

ИННОВАЦИОННЫЕ РАЗРАБОТКИ И ПРОГРЕССИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ЛЕСНОГО КОМПЛЕКСА СТРАНЫ

Материалы Всероссийской научно-практической конференции

Воронеж, 24 сентября 2026 г.



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ВОРОНЕЖСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ЛЕСОТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ Г.Ф. МОРОЗОВА»

ИННОВАЦИОННЫЕ РАЗРАБОТКИ И ПРОГРЕССИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ
ЛЕСНОГО КОМПЛЕКСА СТРАНЫ

Материалы Всероссийской научно-практической конференции

Воронеж, 24 сентября 2026 г.

MINISTRY OF SCIENCE AND HIGHER EDUCATION
OF THE RUSSIAN FEDERATION
FEDERAL STATE BUDGET EDUCATIONAL INSTITUTION
OF HIGHER EDUCATION
«VORONEZH STATE UNIVERSITY OF FORESTRY AND TECHNOLOGIES
NAMED AFTER G.F. MOROZOV»

INNOVATIVE DEVELOPMENTS AND ADVANCED TECHNOLOGIES
OF THE COUNTRY'S FORESTRY COMPLEX

Materials of the All-Russian Scientific and Practical Conference

Voronezh, September 24, 2026

Voronezh 2026

УДК 630*37

И66

И66 Инновационные разработки и прогрессивные технологии лесного комплекса страны : материалы Всероссийской научно-практической конференции, Воронеж, 24 сентября 2026 г. / отв. ред. А. А. Платонов ; М-во науки и высшего образования РФ, ФГБОУ ВО «ВГЛТУ». – Воронеж, 2026. – 260 с. – URL: <https://vgltu.ru/nauka/konferencii/2026/innovacionnye-razrabotki-i-progressivnye-tehnologii-lesnogo-kompleksa-strany-2026/>. – Текст: электронный.

ISBN 978-5-7994-1261-6

В сборник включены материалы Всероссийской научно-практической конференции «Инновационные разработки и прогрессивные технологии лесного комплекса страны», освещающие актуальные вопросы в области прогрессивных технологий, современного оборудования и перспективных видов транспорта в лесном комплексе, а также направлений инновационного развития лесного комплекса на основе ресурсо- и энергосбережения.

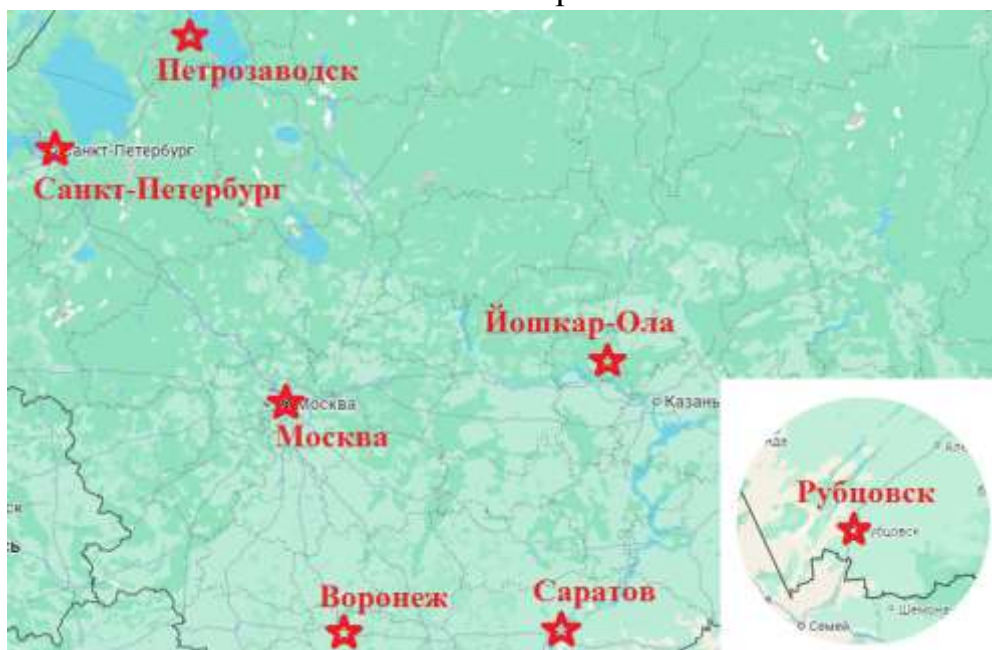
Материалы конференции рассчитаны на специалистов, направление деятельности которых связано с лесным комплексом, а также могут быть использованы преподавателями, аспирантами, магистрантами и студентами при изучении ими различных дисциплин.

УДК 630*37

ISBN 978-5-7994-1261-6

© ФГБОУ ВО «ВГЛТУ», 2026

Города-участники Всероссийской научно-практической конференции
«Инновационные разработки и прогрессивные технологии лесного
комплекса страны»:



Вузы и организации-участники
Всероссийской научно-практической конференции
«Инновационные разработки и прогрессивные технологии лесного
комплекса страны»:

1. Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова
(Рубцовский индустриальный институт, филиал)
2. Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», г. Воронеж
3. Воронежский государственный лесотехнический университет
имени Г.Ф. Морозова
4. Воронежский государственный аграрный университет
имени императора Петра I
5. Мытищинский филиал Московского государственного технического университета имени Н.Э. Баумана (национального исследовательского университета)
6. Петрозаводский государственный университет
7. Поволжский государственный технологический университет, г. Йошкар-Ола
8. Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет
имени С.М. Кирова
9. Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
10. Саратовский государственный технический университет
имени Гагарина Ю.А.

СОДЕРЖАНИЕ

СЕКЦИЯ 1

ПРОГРЕССИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ, СОВРЕМЕННОЕ ОБОРУДОВАНИЕ И ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ВИДЫ ТРАНСПОРТА В ЛЕСНОМ КОМПЛЕКСЕ

<i>Анисимов Н.С.</i> Грунтозацеп современного противобуксовочного устройства для преодоления бездорожья на лесных и полевых дорогах...	7
<i>Белянский Е.А., Малюков С.В., Аксенов А.А.</i> Ротационные рабочие органы в лесном хозяйстве: технологические и конструктивные аспекты...	13
<i>Бухтояров Л.Д., Полетаев Р.Н., Гавадзин М.И.</i> Оценка стабильности качества срезания поросли гибкими рабочими органами роторного кустореза.....	19
<i>Васильев В.В., Афоничев Д.Н.</i> Влияние параметров плоских сплоточных единиц на интервал между ними в малогабаритном плоту.....	23
<i>Гудков В.В., Сокол П.А.</i> Особенности расчета тяговых показателей колесных транспортных средств с гидромеханической трансмиссией.....	30
<i>Дерепаско И.В., Абрамов В.В., Сибиряткин Е.В.</i> Повышение эффективности бесчokerной трелевки древесины с использованием устройства рекуперации энергии.....	36
<i>Добрецов Р.Ю., Носков М.С., Войнаш С.А.</i> Принципы оценки влияния использования модульного гусеничного движителя на энергоэффективность шасси колесного трактора.....	43
<i>Дручинин Д.Ю., Фатхулин В.Р., Бурмистров Р.М.</i> Корреляционный анализ экспериментальных данных процесса работы лесного плуга с дополнительными катками-рыхлителями пластов.....	50
<i>Карпов М.В., Потахин А.Г., Галактионов О.Н.</i> Переработка низкокачественной лиственной древесины в строительные материалы...	57
<i>Круль Т.А., Силецкий В.В.</i> Механизмы влагоразрушения конструкций лесных дорог и перспективы использования модификаторов для ресурсосбережения.....	60
<i>Макаров В.Е.</i> Устройство для создания импульсной закрученной струи жидкости для обеспечения требуемого качества окорки пневого осмола.....	66
<i>Платонов А.А.</i> Моделирование усилий вырывания нежелательной растительности манипулятором лесных машин	70
<i>Поляков В.А., Малюков С.В., Малюкова М.А.</i> Обзор современных конструкций лесопожарных грунтометов.....	78
<i>Саая С.С.Ш.</i> Разработка уточненных норм времени на выполнение технологического процесса щелевого дренирования.....	85

СЕКЦИЯ 2

ИННОВАЦИОННОЕ РАЗВИТИЕ ЛЕСНОГО КОМПЛЕКСА НА ОСНОВЕ РЕСУРСО- И ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ

<i>Галактионов О.Н., Шадрин Р.А., Алешин И.С.</i> Методические основы формирования технологического процесса лесозаготовок с сохранением объектов животного мира и среды их обитания.....	91
<i>Гилязова Т.А.</i> Верификация имитационной модели работы валочно-пакетирующей машины в условиях промышленной лесосеки.....	97
<i>Жайворонок Д.А., Посметьев В.И., Никонов В.О.</i> Оценка опыта использования цифровых аналогов леса отечественными и зарубежными исследователями.....	103
<i>Зленко А.В.</i> Обоснование технологических параметров шнекопитателя лесопожарного грунтомета.....	110
<i>Клубничкин В.Е., Клубничкин Е.Е., Васильев Я.С.</i> Определение технологического оборудования применимого к беспилотным трелевочным машинам.....	117
<i>Коротких В.Н., Платонов А.А.</i> Оценка полноты очистки корчевателем территорий от нежелательной древесно-кустарниковой растительности.....	124
<i>Лукашевич В.М., Киприянов Р.А.</i> Навесное оборудование БПЛА для лесовосстановления сеянцами с закрытой корневой системой.....	130
<i>Макаров В.Е., Овчинников П.В., Смирнов А.В.</i> Устройство для кольцевания деревьев при рубках ухода в молодняках.....	135
<i>Максименков А.И., Абрамов В.В., Акопян Д.Х.</i> Повышение точности распиловки при ленточном лесопилении.....	139
<i>Платонов А.А.</i> Элементы классификационного распределения средств механизации сбора порубочных остатков.....	144
<i>Прокопенко С.В.</i> Моделирование поверхности насыпи щепы при измельчении порубочных остатков.....	151
<i>Пуятин П.А., Попиков П.И., Полумиско А.А., Евсиков И.Д.</i> Влияние компоновки гидроцилиндра на энергосиловые параметры механизма подъема стрелы лесного манипулятора.....	158
<i>Шадрина Е.Л., Богданова Л.Н.</i> Лесная биомасса – как фактор развития возобновляемой энергетики.....	164

СЕКЦИЯ 3

ИССЛЕДОВАНИЕ И МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ, СИСТЕМ И СОСТОЯНИЙ

<i>Анисимов И.С.</i> Сравнительная оценка арборицидов на рубках ухода в молодняках химическим методом.....	171
<i>Белов С.В.</i> Разработка гибридного алгоритма для сегментации и количественной оценки дефектов лесных дорог в условиях ограниченной видимости.....	177

<i>Гнусов М.А., Воскобойник М.Ю.</i> Цифровые методы проектирования высокотехнологичных компонентов с оптимизацией топологии для аддитивного производства.....	182
<i>Дорняк О.Р., Попиков С.К.</i> Результаты экспериментальных исследований динамической нагруженности лесного манипулятора при аварийном сбросе груза.....	189
<i>Клубничкин В.Е., Клубничкин Е.Е., Кузнецов Д.К.</i> Перспективы и особенности применения беспилотных колёсных и гусеничных машин при выполнении лесохозяйственных работ.....	195
<i>Мещеряков А.А., Шевцов А.А., Сердюкова Н.А.</i> Технологические процессы и аппараты получения биодизельного топлива: анализ разработок и прогноз развития.....	201
<i>Неверовский Д.С.</i> Энергопотребление гусеничной машины с резиноармированными гусеницами при развороте на месте.....	209
<i>Полумиско А.А., Путятин П.А., Евсиков И.Д.</i> Разработка конструктивной компоновки магнитного демпфирующего устройства гидропривода лесного манипулятора.....	215
<i>Попов М.А., Дручинин Д.Ю.</i> Статистическая оценка тесноты связи между параметрами лесного плуга и качественными показателями создаваемого им линейного микроповышения.....	221
<i>Прокопенко С.В., Платонов А.А., Попиков В.П.</i> Теоретическое исследование динамики энергосберегающего гидропривода ножевого диска рубильной машины.....	226
<i>Саая С.С.Ш.</i> Результаты оптимизации конструктивных параметров и режимов работы щелерезного цепного рабочего органа.....	236
<i>Суханов Ю.В., Иванов В.А.</i> К вопросу выбора прототипа конструкции беспилотной лесохозяйственной платформы.....	244
<i>Фокин С.В., Шпортко О.Н.</i> Общие положения методики моделирования мобильной рубильной машины.....	250
<i>Худякова Н.И., Зленко А.В., Маликов В.Б.</i> Моделирование рабочего процесса шнекороторного механизма лесопожарной грунтометательной машины в Компас 3D.....	254

СЕКЦИЯ 1
ПРОГРЕССИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ, СОВРЕМЕННОЕ ОБОРУДОВАНИЕ
И ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ВИДЫ ТРАНСПОРТА В ЛЕСНОМ КОМПЛЕКСЕ

DOI: 10.58168/CouForCom2026_7-12

УДК 614.8.067

ГРУНТОЗАЦЕП СОВРЕМЕННОГО ПРОТИВОБУКСОВОЧНОГО
УСТРОЙСТВА ДЛЯ ПРЕОДОЛЕНИЯ БЕЗДОРОЖЬЯ НА ЛЕСНЫХ
И ПОЛЕВЫХ ДОРОГАХ

Анисимов Н.С.

*Поволжский государственный технологический университет,
Йошкар-Ола, Россия*

A MODERN TRACTION CONTROL DEVICE FOR OVERCOMING
OFF-ROAD CONDITIONS ON FOREST AND FIELD ROADS

Anisimov N.S.

*Volga State University of Technology,
Yoshkar-Ola, Russia*

Аннотация. В статье представлена классификация дорог по уровню бездорожья. Особое внимание уделено лесным и полевым дорогам. Представлено конструктивно-техническое решение грунтозацепа противобуксовочного устройства для установки на ведущие колеса для преодоления бездорожья. Проведены его испытания в зимних условиях на полевой дороге.

Abstract. This article presents a classification of roads based on their off-road capabilities, with a particular focus on forest and field roads. A design and engineering solution for a traction control device lug mounted on drive wheels for off-road use is presented. It was tested under winter conditions on a field road.

Ключевые слова: противобуксовочное устройство, бездорожье, лесные дороги, внедорожник, грунтозацеп, уровень бездорожья, полевая дорога.

Keywords: traction control, off-road, forest roads, SUV, lug, off-road level, field road.

Проходимость и, следовательно, мобильность ТС (транспортного средства) определяется набором технических его параметров, а также свойствами и условиями эксплуатируемых и временами года [1, 2]. Классификация дорог с учетом типа, рельефа и сезонности отображена в таблице 1 [3].

Таблица 1 – Классификация дорог с учетом типа и рельефа

Уровень бездорожья	Описание	Характеристики	Требования к автомобилю	Сезонность
Легкое бездорожье	грунтовые и проселочные дороги. Созданы человеком, не имеют твердого покрытия, утрамбованы, подвержены размыванию и колееобразованию.	неровности небольшие ямы и бугры, пыльная летом и скользкая после дождя.	с увеличенным дорожным просветом или полным приводом, требуют противобуксовочные устройства, устанавливаемых только на ведущие колеса	всесезонные
Среднее бездорожье	Лесные и полевые дороги. Эксплуатируются для доступа к местам отдыха, охоты, рыбалки или просто для прогулок по лесу.	Включают в себя значительные препятствия: колеи, глубокие ямы, корни деревьев, небольшие подъемы и спуски	с увеличенным дорожным просветом или полным приводом, требуют противобуксовочные устройства, устанавливаемые только на ведущие колеса	всесезонные
Сложное бездорожье	Бездорожье с выраженными препятствиями, глубокая колея, крутые склоны. Заброшенные дороги, участки, где проходили лесозаготовки, или специально подготовленные трассы для внедорожников	глубокая колея, большие камни, поваленные деревья, крутые и скользкие подъемы/спуски, броды (небольшие водные преграды), участки с глубокой грязью или песком	специализированные внедорожники с высоким дорожным просветом, полным приводом, блокировками дифференциалов, лебедкой, усиленной подвеской. Обязательны внедорожные шины и противобуксовочные устройства	всесезонные
Экстремальное бездорожье	Полное отсутствие дорог, преодоление естественных преград.	Болота, глубокие овраги, скалистые участки, широкие водные преграды	специально подготовленные экспедиционные внедорожники с максимальным набором внедорожного оборудования, включая и противобуксовочные устройства	всесезонные

Целью работы является разработка конструктивного решения грунтозацепа противобуксовочного устройства по преодолению препятствий по бездорожью.

Решение задачи. Рассмотрим на примере лесных дорог, используемых для доступа к местам отдыха, охоты, рыбалки, сбора ягод и грибов или просто для прогулок в течение всего года (всесезонные).

Из приведенной выше классификации все дороги, включая и лесные, требуют установки противобуксовочных устройств [4]. Причем эти устройства устанавливаются только на ведущие колеса.

Причем современные противобуксовочные устройства должны обладать следующими преимуществами [5]:

1. Улучшенными сцепными качествами с опорной поверхностью дороги;
2. Устанавливаться в любой ситуации при остановке автомобиля и на любой дороге;
3. Всесезонность;
4. Универсальность;
5. Незначительным временем и затратами на монтаж/демонтаж;
6. Небольшим весом и габаритами.

Основным и главным преимуществом из всех перечисленных выше является улучшение сцепных качеств. Данное преимущество (параметр противобуксовочного устройства) зависит прежде всего от грунтозацепа.

Грунтозацепы характеризуются прежде всего формой от которой зависит сцепные качества противобуксовочного устройства.

Нами была предложена следующая форма грунтозацепа противобуксовочного устройства. На рис. 1 отображена 3-х мерная конструкция грунтозацепа [6].

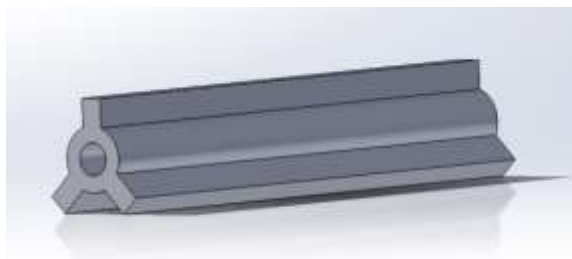


Рисунок 1 – Трехмерная конструкция грунтозацепа

На основе 3-х мерной конструкции были созданы экспериментальные образцы грунтозацепов (рис. 2).



Рисунок 2 – Экспериментальный образец грунтозацепа противобуксовочного устройства

Были проведены предварительно его экспериментальные исследования в зимних условиях на полевой дороге (среднее бездорожье, куда входят и лесные дороги) как наиболее сложные условия в отличие от летних условий (рис. 3, 4).



а – пробуксовка колеса без противобуксовочного устройства,
б – колесо с противобуксовочными устройствами

Рисунок 3 – Экспериментальные исследования противобуксовочного устройства



а – экспериментальная дорога, б – движение автомобиля по зимней полевой дороге с противобуксовочными устройствами

Рисунок 4 – Экспериментальные исследования (движение по зимней полевой дороге с противобуксовочными устройствами)

Выводы. Данная конструкция грунтозацепов показала свою работоспособность. Первоначально испытываемая машина LADA GRANTA ВАЗ-219110 «застряла», ведущие колеса вращались вхолостую на месте без признаков движения транспортного средства вперед. При установке противобуксовочных устройств на ведущие колеса движение транспортного средства продолжилось.

В целом для улучшения сцепных качеств данное противобуксовочное устройство продемонстрировало универсальность, эксперименты проводились

на транспортном средстве с радиусом колеса R14 (также были проведены экспериментальные заезды на транспортном средстве LADA GRANTA ВАЗ-2194 с радиусом ведущего колеса R15), затраты времени на монтаж/демонтаж были незначительны (не более 10 мин, установку осуществляли 2 человека по 3 грунтозацепа на одно ведущее колесо), небольшая масса и габариты (масса 260 грамм, высота 15 мм, ширина 30 мм, длина 190 мм).

В настоящее время идет подготовка проверки работоспособности грунтозацепа противобуксовочного устройства в летних условиях на песчаной лесной дороге.

Работа выполнена в рамках «Фонд содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере» по договору ДОГОВОР (СОГЛАШЕНИЕ) №295ГССС27/109066 на получение поддержки в рамках федерального проекта «Платформа университетского технологического предпринимательства».

Список литературы

1. Федорец М.И. Основные оценочные характеристики движения машин по местности вне дорог / М.И. Федорец, В.К. Зыкова // Математическое моделирование и информационные технологии при исследовании явлений и процессов в различных сферах деятельности. Краснодар. 2021. С. 397-401.
2. Гуськов В.В. Проходимость и тяговые свойства многоцелевых колесных машин при движении по грунтам со слабой несущей способностью / В.В. Гуськов, А.С. Поварехо // Труды НАМИ. 2019. Т. 2. С. 24-31.
3. Анисимов Н.С. Классификация дорог по проходимости легковых автомобилей в условиях бездорожья в контексте лесных дорог с учетом экологических аспектов лесных сообществ / Н.С. Анисимов // в сборнике научных трудов Новые материалы и технологии в машиностроении. Вып. 32. Брянск. БГИТУ. 2026. – С. 80-84.
4. Бруданов А.М. Обзор существующих конструкций для повышения проходимости транспортного средства категории М1 / А.М. Бруданов // Молодой ученый. 2016. Т. 12. С. 216-220.
5. Патент РФ №2848825 Противобуксовочное устройство. Российская Федерация, МПК В60С 27/04, В60С 27/00, заявитель и патентообладатель Поволжский государственный технологический университет, Авторы: Царев Е.М., Рукомойников К.П., Макаров В.Е., Анисимов Н.С., Анисимов И.С., Анисимов С.Е., заявл. 13.05.2025 опубл. 21.10.2025. Бюл. №30.
6. Заявка на изобретение РФ №2026114959. Грунтозацеп противобуксовочного устройства. Авторы: Анисимов Н.С., Анисимов И.С., Царев Е.М., Макаров В.Е. Дата поступления (дата регистрации) 15.05.2026.

References

1. Fedorets M.I. Main evaluation characteristics of vehicle movement on off-road terrain / M.I. Fedorets, V.K. Zykova // Mathematical modeling and information

technologies in the study of phenomena and processes in various fields of activity. Krasnodar. 2021. Pp. 397-401.

2. Guskov V.V. Cross-country ability and traction properties of multi-purpose wheeled vehicles when moving on soils with low bearing capacity / V.V. Guskov, A.S. Povarekho // Proceedings of NAMI. 2019. Vol. 2. pp. 24-31.

3. Anisimov N.S. Classification of roads by the cross-country ability of passenger cars in off-road conditions in the context of forest roads, taking into account the environmental aspects of forest communities / N.S. Anisimov // in the collection of scientific papers New materials and technologies in mechanical engineering. Issue 32. Bryansk. BGITU. 2026. – pp. 80-84.

4. Brudanov A.M. Review of existing designs for improving the cross-country ability of a category M1 vehicle / AM Brudanov // Young scientist. 2016. Vol. 12. pp. 216-220.

5. Russian Federation Patent No. 2848825 Anti-slip device. Russian Federation, IPC B60C 27/04, B60C 27/00, applicant and patent holder Volga Region State Technological University, Authors: Tsarev EM, Rukomoynikov KP, Makarov VE, Anisimov NS, Anisimov IS, Anisimov SE, declared 13.05.2025 published 21.10.2025. Bulletin № 30.

6. Russian Federation Patent Application No. 2026114959. Anti-skid device lug. Authors: N.S. Anisimov, I.S. Anisimov, E.M. Tsarev, V.E. Makarov. Filing date (registration date): May 15, 2026.

**РОТАЦИОННЫЕ РАБОЧИЕ ОРГАНЫ В ЛЕСНОМ ХОЗЯЙСТВЕ:
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ И КОНСТРУКТИВНЫЕ АСПЕКТЫ**

Белянский Е.А., Малюков С.В., Аксенов А.А.

*Воронежский государственный лесотехнический университет
имени Г.Ф. Морозова, Воронеж, Россия*

**ROTATIONAL WORKING AGENTS IN FORESTRY:
TECHNOLOGICAL AND DESIGN ASPECTS**

Belyansky E.A., Malyukov S.V., Aksenov A.A.

*Voronezh State University of Forestry and Technologies
named after G.F. Morozov, Voronezh, Russia*

Аннотация: Статья анализирует специфику использования ротационных рабочих органов в лесном хозяйстве при культивации и уходе за лесными культурами. Показано, что оптимальный подбор параметров ротационных органов помогает увеличить производительность агротехнического ухода и минимизировать трудозатраты операций, производимых вручную.

Abstract: The article analyzes the specifics of using rotary working parts in forestry during the cultivation and maintenance of forest crops. It is shown that the optimal selection of parameters for rotary parts helps to increase the productivity of agrotechnical maintenance and minimize the labor costs of manual operations.

Ключевые слова: ротационные рабочие органы, лесной культиватор, уход за лесными культурами, рыхление почвы, повреждение саженцев.

Keywords: rotary working tools, forest cultivator, maintenance of forest plantations, soil loosening, seedling damage.

Введение

Лесовосстановительные этапы – трудоёмкие процессы, рыхление почвы и уничтожение сорняков в рядах и междурядьях – всё это относится к агротехническому уходу за лесными культурами. От его качества зависят приживаемость, сохранность и скорость роста выращиваемых растений. По данным исследований, на выращивание лесных культур до смыкания крон приходится до 30-50% общих затрат, причём значительная доля – на ручные работы по прополке и рыхлению в защитных зонах рядов [1]. В связи с этим механизированное воздействие с использованием технических орудий сохраняется актуальной целью.

Классические инструменты для обработки рядов и междурядий являются лаповые культиваторы и фрезерные барабаны, они предоставляют хорошее рыхление и подрезание сорной растительности, но несут также весомые ограничения. Лаповые культиваторы требуют значительных защитных зон (до 20-30 см с каждой стороны ряда), что сокращает обрабатываемую площадь и не

решает проблему сорняков в ряду [2], а также наличия предохранительных механизмов. Фрезерные орудия, обладая высокой интенсивностью обработки, могут повреждать корневые системы культур и распылять почву при превышении оптимальной влажности [3]. Стоит отметить, что использование крупных фрез на вырубках с извилистым микрорельефом и, имеющих порубочных остатков, вызывает затруднение в работе.

Игольчатые диски, пальцевые звёздочки, лопастные крыльчатки, являющиеся ротационными рабочими органами – принимают промежуточное положение между пассивными лаповыми и активными фрезерными орудиями.

Цель данной работы – объединить опыт использования ротационных органов в лесном хозяйстве, разобрать их конструктивные и кинематические параметры, устанавливающие качество обработки и безопасность для лесных культур, а также установить путь следующего усовершенствования.

Классификация и назначение ротационных рабочих органов

Используемые в лесном хозяйстве, ротационные рабочие органы, распределяют по следующим признакам: типу рабочего элемента, способу привода, расположению оси вращения и технологическому назначению.

По типу рабочего элемента выделяют:

Игольчатые диски – ступица с периферийными зубьями заострённой формы, устанавливаемая на горизонтальной оси. При качении по поверхности почвы зубья внедряются в верхний слой, разрушают корку и извлекают всходы сорняков с корнями. Основное назначение – обработка почвы в питомниках на ранних стадиях роста сеянцев, а также в рядах лесных культур высотой до 0,7 м на песчаных и супесчаных почвах [4].

Пальцевые звёздочки – рабочий орган в виде корпуса с радиально расположенными пальцами, на которых закреплены рыхлящие элементы (зубья). Устанавливаются на наклонной оси (9-15° к поверхности почвы). Могут иметь как свободное вращение за счёт сцепления с почвой, так и принудительный привод от ВОМ трактора. Применяются для обработки валков в рядах лесных культур, интенсивного рыхления и подрезания сорняков [5].

Каркасно-проволочные рабочие органы – конструкция из проволочного каркаса, вращающаяся на вертикальной оси с наклоном внутрь ряда. Применяются на культиваторе КРЛ-1М для культур высотой 0,1–0,4 м [1, 6].

Многолопастные крыльчатки – 12-лопастные рабочие органы свободного вращения, устанавливаемые на вертикальных осях. Применяются на культиваторе КРЛ-1М для обработки культур высотой 0,4–1,0 м. Уничтожение сорняков осуществляется преимущественно за счёт сдвига почвы к оси ряда с последующей засыпкой растительных остатков [6].

По способу привода ротационные органы распределяются на пассивные (свободное вращение благодаря сопротивлению почвы) и активные (принудительный привод от ВОМ трактора или гидромотора). Конструкция с активными рабочими органами более сложна в техническом плане и имеет повышенные энергозатраты.

Сводная характеристика основных типов ротационных рабочих органов представлена в табл. 1.

Таблица 1 – Характеристика ротационных рабочих органов для лесного хозяйства

Тип рабочего органа	Назначение	Глубина обработки, см	Способ привода	Преимущества
Игольчатые диски	Разрушение корки, борьба с всходами сорняков в питомниках и рядах культур	2–6	Пассивный	Простота конструкции, малое повреждение культур
Пальцевые звёздочки	Рыхление валиков, подрезание сорняков в рядах культур	4–10	Активный / пассивный	Интенсивное рыхление, регулируемость глубины
Каркасно-проволочные	Обработка рядов культур высотой 0,1–0,4 м	3–8	Пассивный	Самоочищение, малый вес
Многолопастные крыльчатки	Обработка рядов культур высотой 0,4–1,0 м	3–8	Пассивный	Универсальность, засыпка сорняков почвой

Технологические операции и место ротационных органов в системе ухода.

Лесные питомники. Игольчатые диски хорошо справляются со своей задачей после дождей, разрушая почвенную корку, уничтожая ранние всходы сорняков. Глубина обработки составляет 1,5–3 см в первый год и 2–3 см во второй год выращивания. Игольчатые диски устанавливаются впереди стрельчатых лап на 0,8–1,0 см выше них для предотвращения выглубления орудия. Эффективность уничтожения однолетних сорняков высотой до 5 см достигает 85–96% [4].

Лесные культуры на вырубках. Обработка междурядий использует культиваторы следующих моделей: КЛБ-1,7, КФЛ-1,4, а также аналогичные орудия. Для того, чтобы ухаживать за почвой используется такой способ как «седлание». Этот способ используется при высоте культур до 0,7–1,0 м [6]. Культиваторы ротационные КРЛ-1М и КРЛ-1Р предоставляют рыхление почвы в ряду на глубину 3–8 см, одновременно уничтожая сорняки, помогая сократить необходимость в прополке защитных зон вручную.

Защитные лесные насаждения. В полезащитных полосах ротационные рабочие органы используются для того, чтобы обеспечить уход за рядами молодых растений.

Конструктивно-кинематические параметры и их влияние на результат обработки.

Производительность работы ротационных рабочих органов устанавливается списком взаимосвязанных параметров: диаметром рабочего органа, глубиной обработки, поступательной скоростью агрегата, угловой скоростью вращения, количеством и геометрией рабочих элементов (зубьев, пальцев, лопастей), и в том числе углом наклона оси вращения.

Глубина обработки. Для игольчатых дисков в питомниках оптимальная глубина составляет 2-3 см, для пальцевых звёздочек при уходе за лесными культурами – 4-7 см. На культиваторе КРЛ-1Р глубина установки рабочих органов устанавливается углом наклона ротора и положением опорных колес. Для обработки низких культур (до 15 см) целесообразно выбирать глубину 4-5 см, для более высоких – 5-7 см.

Скорость движения агрегата. Пальцевые ротационные рабочие органы работают в диапазоне скоростей 3-9 км/ч. Если набрать скорость более чем 9 км/ч, то это приведёт к отрицательному качеству крошения и увеличению отбрасывания почвы. Для культиватора КРЛ-1Р с активным приводом рабочих органов удовлетворительные показатели достигаются при скорости 5-7 км/ч, при этом культиватор практически не повреждает древесные растения [5]. Ротационные органы со свободным вращением на базе КРЛ-1М требуют поступательной скорости не менее 3-4,5 км/ч для обеспечения заглубления [1].

Угол наклона оси вращения. Наклон оси ротационного рабочего органа к поверхности почвы (9-15°) позволяет пальцам орудия внедриться в почву под углом, что положительно влияет на крошение и уменьшает сгуживание почвы. Кроме того, наклонная установка определяет характер перемещения почвы: при вращении почва сдвигается к оси ряда, что приводит к засыпке сорняков, но одновременно может вызывать образование почвенного валика высотой до 9-12 см. Применение рыхлящих элементов (зубьев) на пальцах с двусторонним разводом и тефлоновым покрытием позволяет снизить высоту микроповышений до 2-3 см и исключить налипание почвы.

Снижение повреждаемости лесных культур: инженерные и технологические решения.

Проблематика повреждений лесных культур при механическом уходе является одной из основных при выборе типа рабочих органов и видов их работы. Для культур высотой до 15 см (дуб, сосна первого года посадки) основной тип повреждений – засыпание почвой при образовании валика, а также наклон стволиков вследствие сдвига почвы.

Анализ опыта использования ротационных рабочих органов помогает выделить несколько вариаций снижения повреждений:

1. Кинематические решения. Траектории движения пальцев и зубьев, близкие к циклоидам, уменьшают частоту прямого контакта рабочих элементов со стволиками. Применение активного привода (КРЛ-1Р) обеспечивает стабильную угловую скорость вращения, не зависящую от плотности почвы, что повышает предсказуемость траекторий и снижает риск повреждений [5].

2. Геометрические параметры. Угол наклона оси вращения 9-15° позволяет внедряться пальцам в почву под оптимальным углом и управляет сдвигом почвы в сторону ряда, а не на стволики. Радиальное расположение пальцев с одинаковым шагом исключает усилие воздействия в одной точке. Двусторонний развод зубьев на пальцах способствует равномерному рыхлению без образования валика.

3. Защитные зоны и регулировка положения. Ширина защитной зоны устанавливается в пределах 20-40 см с каждой стороны ряда и регулируется перемещением рабочих органов по раме культиватора [1, 2]. На культиваторе

КРЛ-1М расстояние между лопастями регулируется в пределах 25-70 см, что позволяет адаптировать орудие под разную высоту и ширину рядов [6].

4. Скоростной режим. Работа при скорости 5-7 км/ч позволяет соблюдать оптимальное соотношение качества рыхления и безопасности для насаждений. Превышение скорости приводит к увеличению отбрасывания почвы и росту повреждений, снижение скорости – к ухудшению заглубления и залипанию рабочих органов на тяжёлых почвах [5].

5. Прямолинейность хода и копирование ряда. Точность движения агрегата вдоль оси ряда – критический фактор. Отклонение рабочих органов от оси ряда на 15 см при использовании пальцевых органов с наклонной осью не приводит к увеличению повреждений, однако для многолопастных крыльчаток КРЛ-1М отклонение вызывает резкий рост повреждаемости – до 35%. Это яркий пример преимущества пальцевых конструкций с точки зрения устойчивости к погрешностям вождения.

Перспективы и направления развития.

Следующее усовершенствование ротационных рабочих органов для лесного хозяйства связано с несколькими направлениями.

Адаптивные и сменные рабочие органы. Опыт разработки сменных пальцевых органов к КРЛ-1М [6] и двух модификаций рабочих органов к КРЛ-1Р показывает эффективность модульного подхода. Перспективны конструкции с быстросменными элементами, которые позволяют адаптировать орудие под разные виды почв, высоту культур и степень засорённости.

Интеграция с навигацией и системами автоматического контроля. Применение GPS/ГЛОНАСС-навигации и систем автоматического управления положением рабочих органов относительно ряда культур поможет снизить погрешности вождения и уменьшить защитные зоны, расширив обрабатываемую площадь. Датчики глубины и нагрузки на рабочий орган обеспечат автоматическую корректировку режимов работы в реальном времени.

Лёгкие манёвренные агрегаты и роботизированные платформы. Для обработки труднодоступных участков и культур с малой высотой перспективны малогабаритные агрегаты на базе мотоблоков и мини-тракторов, а также беспилотные платформы с ротационными рабочими органами. Такие машины обеспечивают точечный уход с минимальным уплотнением почвы [4].

Локализация и импортозамещение. Отечественные разработки ротационных культиваторов (КРЛ-1М, КРЛ-1Р и их модификации) доказали работоспособность в различных природно-климатических условиях. Модернизация существующих конструкций с применением современных материалов (тефлоновые покрытия, износостойкие сплавы) и цифровых технологий управления позволит повысить их конкурентоспособность [6].

Заключение

Ротационные рабочие органы представляют собой полезное средство механизации агротехнического ухода за лесными культурами, занимая промежуточное положение между пассивными лаповыми и активными фрезерными орудиями. Анализ применяемых конструкций – от игольчатых дисков для питомников до пальцевых звёздочек с активным приводом для междурядной обработки – по-

казывает, что рациональный подбор кинематических и геометрических параметров позволяет одновременно обеспечить качественное рыхление, уничтожение сорняков и минимизацию повреждений культурных растений.

Ключевыми факторами, определяющими эффективность и безопасность работы ротационных органов, являются: глубина обработки 4-7 см, скорость движения 5-7 км/ч, угол наклона оси 9-15°, наличие рыхлящих элементов на пальцах и защитных зон не менее 20 см. Применение активного привода рабочих органов (КРЛ-1Р) повышает стабильность работы на почвах различной плотности и снижает повреждаемость культур.

Практическая значимость результатов заключается в обосновании параметров для проектирования новых и модернизации существующих ротационных орудий, а также в выборе оптимальных режимов эксплуатации при уходе за лесными культурами различного возраста и породного состава.

Список литературы

1. Винокуров В.Н. Механизация лесного и лесопаркового хозяйства / В.Н. Винокуров, Г.В. Силаев, В.И. Казаков; под ред. В.И. Казакова. – М.: Юрайт, 2026. – 599 с.
2. Лесохозяйственные машины / М.К. Асмоловский, В.П. Мохов, С.Г. Арико, Г.А. Германович. – Минск: БГТУ, 2017. – 92 с.
3. Машины и механизмы в лесном и лесопарковом хозяйстве / А.А. Котов, А.Ф. Алябьев. – М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2021. – 64 с.
4. Казаков В.И. Кинематика и параметры процесса качения ротационных рабочих органов культиватора для питомника / В.И. Казаков, И.В. Казаков // Лесотехнический журнал. – 2016. – Т. 6. – № 3. – С. 156-161.
5. Захаров П.В. Роторный лесной культиватор КРЛ-1Р / П.В. Захаров, И.М. Бартенев, М.Н. Лысыч // Молодой учёный. – 2011. – № 11-1. – С. 43-46.
6. Машины и орудия, применяемые для ухода за культурами // Механизация лесного и лесопаркового хозяйства: учеб. пособие. – URL: studme.org.

References

1. Vinokurov V.N. Mechanization of Forestry and Landscape Forestry / V.N. Vinokurov, G.V. Silaev, V.I. Kazakov; edited by V.I. Kazakov. – Moscow: Yurayt, 2026. – 599 p.
2. Forestry Machines / M.K. Asmolovsky, V.P. Mokhov, S.G. Arico, G.A. Germanovich. – Minsk: BGTU, 2017. – 92 p.
3. Machines and mechanisms in forestry and landscape gardening / A.A. Kotov, A.F. Alyabyev. – Moscow: Bauman Moscow State Technical University, 2021. – 64 p.
4. Kazakov V.I. Kinematics and parameters of the rolling process of rotary working bodies of a cultivator for a nursery / V.I. Kazakov, I.V. Kazakov // Forestry journal. – 2016. – Vol. 6. – No. 3. – pp. 156-161.
5. Zakharov P.V. Rotary forest cultivator KRL 1R / P.V. Zakharov, I.M. Bartenev, M.N. Lysych // Young scientist. – 2011. – № 11-1. – pp. 43-46.
6. Machines and tools used for crop care // Mechanization of forestry and forestry: study stipend. – URL: studme.org.

ОЦЕНКА СТАБИЛЬНОСТИ КАЧЕСТВА СРЕЗАНИЯ ПОРОСЛИ ГИБКИМИ РАБОЧИМИ ОРГАНАМИ РОТОРНОГО КУСТОРЕЗА

Бухтояров Л.Д., Полетаев Р.Н., Гавадзин М.И.

*Воронежский государственный лесотехнический университет
имени Г.Ф. Морозова, Воронеж, Россия*

ASSESSMENT OF THE STABILITY OF BRUSHWOOD CUTTING QUALITY USING FLEXIBLE WORKING ELEMENTS OF A ROTARY BRUSH CUTTER

Bukhtoyarov L.D., Poletaev R.N., Gavadin M.I.

*Voronezh State University of Forestry and Technologies
named after G.F. Morozov, Voronezh, Russia*

Аннотация: Предложена методика оценки устойчивости полноты срезания гибких рабочих органов роторного кустореза. По опубликованным результатам полевых испытаний рассчитаны абсолютное снижение полноты срезания, коэффициент сохранения результата, среднее геометрическое и сценарный индекс.

Abstract: A method is proposed for assessing the stability of cutting completeness provided by flexible tools of a rotary brush cutter. Published field-test data were used to calculate the absolute decrease, retention ratio, geometric mean, and scenario index.

Ключевые слова: роторный кусторез, гибкий рабочий орган, ножевая цепь, полнота срезания, устойчивость

Keywords: rotary brush cutter, flexible cutting tool, knife chain, cutting completeness, stability.

Удаление нежелательной древесно-кустарниковой растительности относится к операциям, результат которых меняется при увеличении диаметра и возраста поросли [2]. Для роторного кустореза с гибкой связью на полноту срезания влияют частота вращения ротора, скорость движения машины, масса и ориентация режущего элемента. После удара элемент отклоняется от рабочего положения, поэтому следующий контакт может произойти режущей кромкой или боковой поверхностью. Это различие отражается одновременно на качестве срезания и затрачиваемой энергии [1, 3-5].

В полевом эксперименте сравнивались цепь с плоскими ножами, цепь со звёздочками и ножевая цепь. При скорости трактора 3,2 км/ч и частоте вращения рабочих органов 20 с^{-1} полнота срезания двухлетней поросли составила соответственно 88,20; 93,59 и 94,61%, а трёхлетней 76,25; 89,25 и 92,50 % [5].

Прямое сравнение показывает преимущество ножевой цепи, но не характеризует устойчивость результата при усложнении условий.

Цель исследования – разработать безразмерные показатели устойчивости полноты срезания и установить, изменяется ли выбор рабочего органа при разных приоритетах оценки. Расчёт основан на повторной обработке опубликованных экспериментальных данных и не предусматривает проведение новых полевых испытаний.

Исходными величинами приняты Q_2 и Q_3 – полнота срезания двухлетней и трёхлетней поросли в процентах. Для каждого рабочего органа определяли абсолютное снижение результата ΔQ , выраженное в процентных пунктах, и коэффициент сохранения результата K_p :

$$\Delta Q = Q_2 - Q_3, \quad (1)$$

$$K_p = \frac{Q_3}{Q_2}, \quad (2)$$

Коэффициент K_p показывает, какая доля исходной полноты срезания сохраняется при переходе к трёхлетней поросли. Значение, близкое к единице, соответствует меньшей чувствительности рабочего органа к усложнению условий. Для совместной оценки двух возрастных групп использовали среднее геометрическое нормированных величин:

$$I_g = \sqrt{q_2 q_3}, \quad (3)$$

где I_g – интегральный показатель.

$$q_i = \frac{Q_i}{100}, \quad (4)$$

где q_i – нормированная полнота срезания для i -й возрастной группы.

Среднее геометрическое снижает итоговую оценку при заметном ухудшении одного из исходных результатов. Для проверки устойчивости ранжирования дополнительно введём сценарный индекс:

$$I_\alpha = \alpha q_3 + (1 - \alpha) K_p, \quad (5)$$

где α – вес полноты срезания трёхлетней поросли.

Рассмотрены значения $\alpha = 0,3$; $0,5$ и $0,7$. При $\alpha = 0,3$ больший вклад в оценку вносит сохранение результата, при $\alpha = 0,5$ оба критерия равнозначны, а при $\alpha = 0,7$ повышается приоритет работы в более сложных условиях.

Рассчитанные показатели сведём в табл. 1.

Таблица 1 – Показатели устойчивости полноты срезания

Рабочий орган	Q_2 , %	Q_3 , %	ΔQ , п.п.	K_p	I_g
Цепь с плоскими ножами	88,20	76,25	11,95	0,8645	0,820
Цепь со звёздочками	93,59	89,25	4,34	0,9536	0,914
Ножевая цепь	94,61	92,50	2,11	0,9777	0,935

Наибольшее снижение полноты срезания выявлено у цепи с плоскими ножами – 11,95 процентного пункта. Для цепи со звёздочками снижение состави-

ло 4,34 процентного пункта. Ножевая цепь потеряла 2,11 процентного пункта и сохранила 97,77 % результата, полученного на двухлетней поросли.

Сценарные значения представлены в табл. 2. Изменение веса α не повлияло на порядок вариантов. Ножевая цепь заняла первое место во всех трёх сценариях. Её преимущество над цепью со звёздочками составило 0,027...0,030, а над цепью с плоскими ножами – 0,128...0,148.

Таблица 2 – Значения сценарного индекса

Рабочий орган	$\alpha = 0,3$	$\alpha = 0,5$	$\alpha = 0,7$	Место
Цепь с плоскими ножами	0,834	0,814	0,793	3
Цепь со звёздочками	0,935	0,923	0,911	2
Ножевая цепь	0,962	0,951	0,941	1

Преимущество ножевой цепи соответствует результатам исходного эксперимента. Этот рабочий орган обеспечивал наибольшую полноту срезания и наименьшее энергопотребление при диаметре поросли от 1 до 2,4 см [5]. Расчёт устойчивости уточняет данный вывод. Высокое значение Q_3 сопровождается минимальным относительным снижением результата, поэтому преимущество не связано только с одним благоприятным режимом.

Выраженное ухудшение результата цепи с плоскими ножами согласуется с особенностями движения гибкого элемента. После контакта с ветвью нож может повернуться и взаимодействовать с последующей ветвью не заточенной стороной. Модели движения звеньев показывают, что амплитуда отклонения и время восстановления рабочего положения влияют на возможность следующего среза [1, 3-5]. При проектировании ротора эти параметры следует рассматривать совместно с длиной связи, массой элемента, частотой вращения и поступательной скоростью машины.

Предложенные показатели применимы для предварительного выбора рабочего органа, когда испытания выполнены минимум для двух уровней сложности. Методика позволяет отличить высокий единичный результат от устойчивого качества, но не учитывает мощность привода, вибрацию, износ и безопасность. Эти характеристики нельзя заменять одним сводным индексом.

Выводы

1. Разработана расчётная методика, включающая абсолютное снижение полноты срезания, коэффициент сохранения результата, среднее геометрическое нормированных показателей и сценарный индекс.

2. Ножевая цепь показала наиболее устойчивый результат. При переходе к трёхлетней поросли полнота срезания снизилась на 2,11 процентного пункта, коэффициент сохранения составил 0,9777, а среднее геометрическое 0,935.

3. Изменение веса конечной полноты срезания от 0,3 до 0,7 не изменило ранжирование, и ножевая цепь сохранила первое место, цепь со звёздочками второе, цепь с плоскими ножами третье.

Список литературы

1. Драпалюк М.В. Связь типа рабочего органа кустореза с возможностью резания древесно-кустарниковой растительности / М.В. Драпалюк, Л.Д. Бухтояров, А.В. Придворова // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. – 2020. – Т. 8, № 2. – С. 12–16. – DOI: 10.34220/2308-8877-2020-8-2-12-16.
2. Платонов А.А. Исследование и систематизация существующих технологических процессов удаления нежелательной растительности / А.А. Платонов // Системы. Методы. Технологии. – 2020. – № 3(47). – С. 63-73. – DOI: 10.18324/2077-5415-2020-3-63-73.
3. Bukhtoyarov L.D. Research units of flexible working body motion, cutting branches / L.D. Bukhtoyarov, A.I. Maksimenkov, V.V. Abramov, M.N. Lysych // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2019. – Vol. 392. – 012073. – DOI: 10.1088/1755-1315/392/1/012073.
4. Bukhtoyarov L.D. Simulation of the movement of hedge cutter links in the Simulink application of the Matlab package / L.D. Bukhtoyarov, M.V. Drapalyuk, A.V. Pridvorova // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2021. – Vol. 875. – 012004. – DOI: 10.1088/1755-1315/875/1/012004.
5. Bukhtoyarov L.D. Substantiating optimum parameters and efficiency of rotary brush cutters / L.D. Bukhtoyarov, O.A. Kunitskaya, A. Urazova [et al.] // Journal of Applied Engineering Science. – 2022. – Vol. 20, № 3. – pp. 788–797. – DOI: 10.5937/jaes0-36513.

References

1. Drapalyuk M.V., Bukhtoyarov L.D., Pridvorova A.V. Relationship between the type of brush cutter working tool and its ability to cut woody and shrub vegetation. Actual Directions of Scientific Research of the XXI Century: Theory and Practice, 2020, Vol. 8, № 2, pp. 12-16. DOI: 10.34220/2308-8877-2020-8-2-12-16. (In Russian).
2. Platonov A.A. Research and systematization of existing technological processes for the removal of unwanted vegetation / A.A. Platonov // Systems. Methods. Technologies. – 2020. – No. 3(47). – P. 63-73. – DOI: 10.18324/2077-5415-2020-3-63-73
3. Bukhtoyarov L.D. Research units of flexible working body motion, cutting branches / L.D. Bukhtoyarov, A.I. Maksimenkov, V.V. Abramov, M.N. Lysych // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2019. – Vol. 392. – 012073. – DOI: 10.1088/1755-1315/392/1/012073.
4. Bukhtoyarov L.D. Simulation of the movement of hedge cutter links in the Simulink application of the Matlab package / L.D. Bukhtoyarov, M.V. Drapalyuk, A.V. Pridvorova // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2021. – Vol. 875. – 012004. – DOI: 10.1088/1755-1315/875/1/012004.
5. Bukhtoyarov L.D. Substantiating optimum parameters and efficiency of rotary brush cutters / L.D. Bukhtoyarov, O.A. Kunitskaya, A. Urazova [et al.] // Journal of Applied Engineering Science. – 2022. – Vol. 20, № 3. – pp. 788–797. – DOI: 10.5937/jaes0-36513.

**ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПЛОСКИХ СПЛОТОЧНЫХ
ЕДИНИЦ НА ИНТЕРВАЛ МЕЖДУ НИМИ В МАЛОГАБАРИТНОМ
ПЛОТУ**

Васильев В.В., Афоничев Д.Н.

*Воронежский государственный аграрный университет
имени императора Петра I, Воронеж, Россия*

**INFLUENCE OF THE PARAMETERS OF FLAT COHESIVE UNITS FOR
THE INTERVAL BETWEEN THEM IN A SMALL-SIZED RAFT**

Vasiliev V.V., Afonichev D.N.

*Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great,
Voronezh, Russia*

Аннотация: Приведены результаты исследования влияния длины и ширины плоских сплочных единиц на интервал между ними в малогабаритном плоту (линейке). Установлено, что интервал между плоскими сплочными единицами, установленными в продольном ряду малогабаритного плота (линейки), зависит от длины и ширины плоских сплочных единиц, где при увеличении длины и ширины плоских сплочных единиц интервал между ними повышается. Причем при увеличении ширины плоских сплочных единиц, а соответственно, и интервала между ними, содержание объема древесины в малогабаритном плоту (линейке) увеличивается. В то же время при увеличении длины плоских сплочных единиц, а соответственно, и интервала между ними, объем древесины в малогабаритном плоту (линейке) не всегда возрастает, что необходимо учитывать при выборе длины заготавливаемых круглых лесоматериалов, предназначенных для сплава в плоских сплочных единицах, для конкретных условий плавания.

Abstract: The results of a study on the influence of the length and width of flat rafting units on the spacing between them in a small raft (ruler) are presented. It has been established that the spacing between flat rafting units installed in a longitudinal row in a small raft (ruler) depends on the length and width of the flat rafting units, with the spacing increasing as the length and width of the flat rafting units increase. Moreover, as the width of the flat rafting units increases, and consequently the spacing between them, the volume of wood in the small raft (ruler) increases. At the same time, as the length of the flat raft units increases, and consequently the interval between them, the volume of wood in a small-sized raft (line) does not always increase, which must be taken into account when selecting the length of harvested round timber intended for rafting in flat raft units under specific navigation conditions.

Ключевые слова: плот, линейка, плоская сплочная единица, круглые лесоматериалы, интервал, длина, ширина, объем.

Keywords: raft, ruler, flat rafting unit, round timber, interval, length, width, volume.

Проведение первоначального сплава лесоматериалов в плоских сплottedных единицах, входящих в состав малогабаритного плота (линейки), требует определения максимально допустимых параметров буксируемого плота, таких как высота, ширина и длина [1-6]. Высота плота зависит от глубины сплавного хода, ширина плота – от ширины сплавного хода, а длина плота – от габаритов плоских сплottedных единиц, интервала между ними и от минимального радиуса закругления сплавного пути. Интервал между плоскими сплottedными единицами определяет гибкость плота, которая обеспечивает безаварийную проводку плота по криволинейному участку сплавного хода. Величина интервала определяется габаритами плоских сплottedных единиц и сплавного пути. Также интервал между плоскими сплottedными единицами оказывает непосредственное влияние на содержание древесины в геометрическом объеме малогабаритного плота (линейки). Следовательно, для высокоэффективного выполнения первоначального сплава древесины в малогабаритных плотах (линейках) требуется изучить характер изменения интервала между сплottedными единицами, установленными в продольном ряду плота, под действием внешних факторов.

Объектом исследования принята конструкция плота, защищенная патентом № 2811178 РФ [7], собираемая из плоских сплottedных единиц, выполненных по патенту № 2777676 РФ [8]. Предметом исследования являются закономерности изменения интервала между плоскими сплottedными единицами, установленными в продольном ряду малогабаритного плота (линейки). Исследование выполнено с помощью специально разработанной программы для ЭВМ [9-11], которая предназначена для планирования сплава древесины в плотах на базе плоских сплottedных единиц. Интерфейс данной программы представлен на рис. 1, а окно ввода данных и вывода результатов расчета изображено на рис. 2.



Рисунок 1 – Интерфейс программы планирования сплава лесоматериалов в плотах на базе усовершенствованных плоских сплottedных единиц

Длина круглых лесоматериалов, м.	6	Предельно допустимое напряжение проволоки при растяжении, Па.	500000000
Ширина лесосплавного хода, м.	17	Плотность материала проволоки, кг/м.куб.	7800
Глубина лесосплавного хода, м.	2,5	Предельно допустимое напряжение гибкой связи при растяжении, Па.	500000000
Донный запас, м.	0,3	Плотность материала гибкой связи, кг/м.куб.	7800
Коэффициент уменьшения диаметра для внутренних поперечных прокладок.	0,85	Установленная ширина плоской сплотовочной единицы, м.	8,5
Коэффициент уменьшения диаметра для наружных поперечных прокладок.	1	Коэффициент учета радиуса поворота сплавного хода.	2
		Минимальный радиус закругления сплавного хода на первоначальном сплаве, м.	100
Плотность древесины повышенной плавучести, кг/м.куб.	750	Минимальный радиус закругления сплавного хода на магистральном сплаве, м.	500
Процентное содержание древесины повышенной плавучести, %.	70	Ширина счала встречного каравана, м.	10
Плотность древесины ограниченной плавучести, кг/м.куб.	850	Расстояние между секциями, м.	2
Процентное содержание древесины ограниченной плавучести, %.	30		
Коэффициент полндревесности плоской сплотовочной единицы.	0,812		
Диаметр круглых лесоматериалов в рядах, см.	20		
Средняя сбеженность круглых лесоматериалов, см на 1 м.	1		
Масса сплотовочного такелажа (скобы), кг.	10		
Число проволоки в гибкой связи, шт.	10		
Ширина сплавного хода на магистральном плотовом сплаве, м.	100		

Показатели	факт, см.	т.к.т, м.	фсВПШ, см	фсНПП, см	ЛВПШ, м.	ЛНПП, м.	ВлПШ, м.	ЛлПШ, м.	ТлПШ, м.	НлПШ
Плот из ПСЕ2	2,2488	99,4821	0,5363	14	93,7719	14	1645,4844	0,7516	34,6154	4

Рисунок 2 – Интерфейс окна «Расчет»

Данная компьютерная программа написана на языке Object Pascal в интегрированной среде программирования Borland Delphi 7, которая работает с операционной системой Windows.

Первоначально были выполнены исследования влияния ширины плоских сплотовочных единиц на интервал между сплотовочными единицами, установленными в продольном ряду малогабаритного плота (линейки). При реализации данных исследований приняты следующие условия: длина круглых лесоматериалов – 6 м; ширина сплавного хода – 17 м; глубина сплавного хода – 2,5 м; донный запас – 0,3 м; диаметр круглых лесоматериалов в рядах – 20 см, коэффициент уменьшения диаметра для внутренних поперечных прокладок – 0,85; коэффициент уменьшения диаметра для наружных поперечных прокладок – 1,0; плотность древесины повышенной плавучести – 750 кг/м³; плотность древесины ограниченной плавучести – 850 кг/м³; содержание древесины повышенной плавучести – 70 %; содержание древесины ограниченной плавучести – 30 %; коэффициент полндревесности плоской сплотовочной единицы – 0,812; средняя сбежистость круглых лесоматериалов – 1,0 см/м; масса сплотовочного такелажа – 10 кг; число проволоки в гибкой связи – 10 шт.; предельно допустимое напряжение проволоки при растяжении – $5 \cdot 10^8$ Па; плотность материала проволоки – 7800 кг/м³; минимальный радиус закругления сплавного хода – 120 м; коэффициент учета радиуса поворота сплавного хода – 2. В данном случае установленная ширина плоских сплотовочных единиц изменялась от 4,0 м до 7,5 м с шагом 0,5 м. Все результаты расчета приведены в табл. 1.

Согласно данным, представленным в таблице 1, установленная ширина каждой плоской сплотовочной единицы меньше расчетной ширины сплотовочной единицы, так как в рядах плоской сплотовочной единицы укладываются круглые лесоматериалы, таким образом, чтобы сумма их средних диаметров не превышала установленной ширины данной сплотовочной единицы, то есть расчет ширины плоской сплотовочной единицы велся из принципа, что в ряды сплотовочной

единицы укладывается целое число круглых лесоматериалов, определяемое как установленная ширина сплотовой единицы, деленная на средний диаметр круглых лесоматериалов, полученное значение округлялось до целого числа в меньшую сторону.

Таблица 1 – Результаты расчета интервала между плоскими сплотовыми единицами в зависимости от их установленной ширины

Установленная ширина плоской сплотовой единицы, м	Расчетная ширина плоской сплотовой единицы, м	Интервал между плоскими сплотовыми единицами, м	Объем древесины в малогабаритном плоту (линейке), м ³
4,0	3,91	0,25	1051,51
4,5	4,37	0,28	1175,22
5,0	4,83	0,31	1298,93
5,5	5,29	0,34	1422,64
6,0	5,98	0,38	1493,33
6,5	6,44	0,41	1608,20
7,0	6,90	0,45	1723,07
7,5	7,36	0,48	1837,94

Данные, приведенные в табл. 1, показывают, что при возрастании установленной ширины плоских сплотовых единиц интервал между ними в малогабаритном плоту (линейке) увеличивается практически линейно. При этом возрастание расчетной ширины плоских сплотовых единиц, а следовательно, и интервала между сплотовыми единицами, обеспечивает повышение содержания древесины в малогабаритном плоту (линейке), о чем свидетельствуют данные, представленные также в табл. 1.

При исследовании влияния длины плоских сплотовых единиц на интервал между сплотовыми единицами, установленными в продольном ряду малогабаритного плота (линейки), приняты следующие условия: ширина плоских сплотовых единиц – 4,0 м, длина круглых лесоматериалов изменяется от 2,0 м до 7,0 м с шагом 0,5 м. Результаты расчета приведены в таблице 2.

Приведенные данные в табл. 2 показывают, что длина плоских сплотовых единиц отличается от длины круглых лесоматериалов на 0,2 м, из-за учета среднего диаметра наружной прокладки сплотовой единицы. При возрастании длины плоских сплотовых единиц интервал между ними в малогабаритном плоту (линейке) увеличивается практически линейно (табл. 2). Увеличение длины плоских сплотовых единиц не всегда способствует увеличению объема древесины в малогабаритном плоту (линейке), например, согласно данным, приведенным в табл. 2, наибольший объем древесины содержится в малогабаритном плоту (линейке) при длине плоских сплотовых единиц 2,0 м, 4,0 м и 7,0 м. При этом наименьший объем древесины содержится в малогабаритном плоту (линейке) при расчетной длине плоских сплотовых единиц 2,5 м и 4,5 м.

Таблица 2 – Результаты расчета интервала между плоскими сплоточными единицами в зависимости от их длины

Длина круглого лесоматериала, м	Длина плоской сплоточной единицы, м	Интервал между плоскими сплоточными единицами, м	Объем древесины в малогабаритном плоту (линейке), м ³
2,0	2,2	0,09	1096,53
2,5	2,7	0,11	1044,55
3,0	3,2	0,13	1069,46
3,5	3,7	0,15	1078,20
4,0	4,2	0,17	1089,45
4,5	4,7	0,18	1008,67
5,0	5,2	0,20	1077,98
5,5	5,7	0,23	1066,10
6,0	6,2	0,25	1051,51
6,5	6,7	0,27	1078,39
7	7,2	0,30	1093,02

На основании полученных результатов можно сделать вывод, что интервал между плоскими сплоточными единицами, установленными в продольном ряду малогабаритного плота (линейки), зависит от длины и ширины плоских сплоточных единиц, где при увеличении длины и ширины плоских сплоточных единиц интервал между ними повышается. Причем при увеличении ширины плоских сплоточных единиц, а соответственно, и интервала между ними, содержание объема древесины в малогабаритном плоту (линейке) увеличивается. В то же время при увеличении длины плоских сплоточных единиц, а соответственно, и интервала между ними, объем древесины в малогабаритном плоту (линейке) не всегда возрастает, что необходимо учитывать при выборе длины заготавливаемых круглых лесоматериалов, предназначенных для сплава в плоских сплоточных единицах, для конкретных условий плавания. Таким образом, для первоначального плотового сплава древесины расчетная ширина плоских сплоточных единиц должна приниматься максимально возможной, а расчетная длина сплоточных единиц устанавливается из условия максимального содержания древесины в геометрическом объеме малогабаритного плота (линейки).

Список литературы

1. Васильев В.В. Усовершенствованные системы плотового сплава лесоматериалов / В.В. Васильев, Д.Н. Афоничев. – Saarbrücken: LAP LAMBERT, 2013. – 278 с. – URL: <https://cloud.mail.ru/stock/27SKokKezws1sEueW1NXBJs6>.
2. Митрофанов А.А. Лесосплав. Новые технологии, научное и техническое обеспечение / А.А. Митрофанов. – Архангельск: Изд-во АГТУ, 2007. – 492 с.
3. Васильев В.В. Модернизированный плот для рек с малыми глубинами / В.В. Васильев // Вестник ПГТУ. Серия: Лес. Экология. Природопользование. – 2015. – № 1. – С. 45–58.

4. Васильев В.В. Обоснование показателя гибкости плота из сплоточных единиц / В.В. Васильев, Д.Н. Афоничев // Известия вузов. Лесной журнал. – 2022. – № 4. – С. 146–155.
5. Васильев В.В. Использование плоских сплоточных единиц на первоначальном сплаве лесоматериалов / В.В. Васильев, Д.Н. Афоничев // Известия вузов. Лесной журнал. – 2022. – № 1. – С. 128–142.
6. Patent № 111152892 A (CN), Int. Cl. B 63 B 35/00, B63H 20/12. Downstream transportation method for wood / S. Zhang, Y. Dai, Z. Gao, C. Fu, G. Ji, X. Li (CN). – Patent holder UNIV LISHUI (CN). – № 202010034087.X; filed: 13.01.2020; date application 15.05.2020. – 11 p.
7. Патент № 2811178 РФ, МПК В 63 В 35/62. Плот / В.В. Васильев, Д.Н. Афоничев, В.А. Морковин, В.В. Абрамов, Е.В. Поздняков; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова». – № 2023121796; заявл. 21.08.2023; опубл. 11.01.2024, бюл. № 2. – 9 с.
8. Патент № 2777676 РФ, МПК В 65 В 35/02. Плоская сплоточная единица / В.В. Васильев, Д.Н. Афоничев, В.А. Морковин, В.В. Абрамов, Е.В. Поздняков; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова». – № 2021140062; заявл. 30.12.2021; опубл. 08.08.2022, бюл. № 22. – 8 с.
9. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022660776 РФ. Программа для планирования сплава древесины в плотях на базе плоских сплоточных единиц / В.В. Васильев, Д.Н. Афоничев, В.А. Морковин, Е.В. Поздняков; заявитель и правообладатель ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова». – Заявл. 08.06.2022, зарегистрировано 08.06.2022, бюл. № 6.
10. Васильев В.В. Автоматизированное планирование сплава древесины в плотях на базе плоских сплоточных единиц / В.В. Васильев // Моделирование информационных систем и технологий: матер. междунар. науч.-практ. конф.; Воронеж, 27 октября 2022 г. – Воронеж: ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», 2022. – С. 354–365. – URL: <https://vgltu.ru/nauka/konferencii/2022/modelirovanie-informacionnyh-sistem-i-tehnologij-2022>.
11. Васильев В.В. Планирование поставки лесоматериалов потребителям по транспортно-технологической схеме плот (линейка) – плот / В.В. Васильев, Д.Н. Афоничев // Resources and Technology. 2024. – № 4, Т. 21. – С. 121–149. – URL: <https://rt.petrsu.ru/journal/article.php?id=8163>.

References

1. Vasiliev V.V. Advanced systems for rafting timber / V.V. Vasilyev, D.N. Afonichev. – Saarbrücken: LAP LAMBERT, 2013. – 278 p. – URL: <https://cloud.mail.ru/stock/27SKokKezws1sEueW1NXBJs6>.
2. Mitrofanov A.A. Lesospravka. New Technologies, Scientific and Technical Support / A.A. Mitrofanov. – Arkhangelsk: AGTU Publishing House, 2007. – 492 p.

3. Vasiliev V.V. Modernized raft for rivers with shallow depths / V.V. Vasilyev // Vestnik PGТУ. Series: Forest. Ecology. Nature Management. – 2015. – № 1. – pp. 45-58.
4. Vasilyev V.V. Substantiation of the Flexibility Index of a Raft Made of Rafting Units / V.V. Vasilyev, D.N. Afonichev // Izvestiya Vuzov. Lesnoy Zhurnal. – 2022. – № 4. – pp. 146-155.
5. Vasilyev V.V. Use of Flat Sploiting Units on the Initial Alloy of Timber / V.V. Vasilyev, D.N. Afonichev // Izvestiya Vuzov. Lesnoy Zhurnal. – 2022. – № 1. – pp. 128-142.
6. Patent № 111152892 A (CN), Int. Cl. B 63 B 35/00, B63H 20/12. Downstream transportation method for wood / S. Zhang, Y. Dai, Z. Gao, C. Fu, G. Ji, X. Li (CN). – Patent holder UNIV LISHUI (CN). – № 202010034087.X; filed: 13.01.2020; date application 15.05.2020. – 11 p.
7. Patent № 2811178 RF, IPC B 63 B 35/62. Plot / V.V. Vasilyev, D.N. Afonichev, V.A. Morkovin, V.V. Abramov, E.V. Pozdnyakov; applicant and patent holder of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Voronezh State Forestry University named after G.F. Morozov». – № 2023121796; filed on 21.08.2023; published on 11.01.2024, bulletin № 2. – 9 p.
8. Patent № 2777676 RF, IPC B 65 B 35/02. Flat consolidation unit / V.V. Vasilyev, D.N. Afonichev, V.A. Morkovin, V.V. Abramov, E.V. Pozdnyakov; applicant and patent holder of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Voronezh State Forestry University named after G.F. Morozov». – № 2021140062; applied on December 30, 2021; published on August 8, 2022, bulletin № 22. – 8 p.
9. Certificate of State Registration of the Computer Program № 2022660776 RF. Program for Planning the Navigation of Timber in Rafts Based on Flat Rafting Units / V.V. Vasilyev, D.N. Afonichev, V.A. Morkovin, E.V. Pozdnyakov; applicant and patent holder of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Voronezh State Forestry University named after G.F. Morozov». – Appl. 08.06.2022, reg. 08.06.2022, bulletin № 6.
10. Vasiliev V.V. Automated planning of timber rafting based on flat rafting units / V.V. Vasilyev // Modeling of information systems and technologies: materials. International Scientific and Practical Conference; Voronezh, October 27, 2022 – Voronezh: Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Voronezh State Forestry University named after G.F. Morozov», 2022. – pp. 354-365. – URL: <https://vgltu.ru/nauka/konferencii/2022/modelirovanie-informacionnyh-sistem-i-tehnologij-2022>.
11. Vasiliev V.V. Planning the Supply of Timber Products to Consumers Using the Transport and Technological Scheme of a Raft (Linear) – Raft / V.V. Vasilyev, D.N. Afonichev // Resources and Technology. 2024. – № 4, Vol. 21. – pp. 121-149. URL: <https://rt.petrsu.ru/journal/article.php?id=8163>.

**ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТА ТЯГОВЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ
КОЛЕСНЫХ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ
С ГИДРОМЕХАНИЧЕСКОЙ ТРАНСМИССИЕЙ**

Гудков В.В., Сокол П.А.

*Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина»,
Воронеж, Россия*

**FEATURES OF CALCULATING TRACTION PERFORMANCE OF
WHEELED VEHICLES WITH HYDROMECHANICAL TRANSMISSION**

Gudkov V.V., Sokol P.A.

*Military Education and Scientific Centre of the Air Force N.E. Zhukovsky
and Y.A Gagarin Air Force Academy, Voronezh, Russia*

Аннотация: Взаимодействие колесного движителя с опорной поверхностью связано с деформацией и взаимным перемещением находящихся в контакте тел, которые обладают многообразием сложных механических свойств. Применение в конструкции машин трансмиссий, способных изменять скорость движения машин без разрыва потока мощности требует разработки специального математического аппарата для решения задачи их совместимости с силовыми двигателями, основанного на математических моделях контактных явлений. Поэтому, разработка математических моделей контактных явлений, способствующих изменению выходных характеристик силовых двигателей, их компьютерная реализация для автоматизированного расчета основных параметров и характеристик колесного движителя является актуальной задачей.

Abstract: The interaction of the wheeled propulsion system with the supporting surface is associated with the deformation and mutual displacement of the bodies in contact, which exhibit a variety of complex mechanical properties. The use of transmissions in machine designs that can change the speed of the machine without interrupting the power flow requires the development of a special mathematical framework to solve the problem of their compatibility with power engines, based on mathematical models of contact phenomena. Therefore, the development of mathematical models of contact phenomena that contribute to changing the output characteristics of power engines, and their computer implementation for the automated calculation of the main parameters and characteristics of the wheeled propulsion system, is an urgent task.

Ключевые слова: тяговые показатели, гидротрансформатор, компоновка, трансмиссия, мощность, потери.

Keywords: traction performance, torque converter, layout, transmission, power, losses.

Сложные и специфичные условия эксплуатации колесных лесотранспортных и землеройно-транспортных машин (ЗТМ) предъявляют специальные требования к схеме и конструкции их трансмиссий. Они должны обеспечить максимальные величины силы тяги в широком диапазоне скоростей движения, быть способными к длительной работе на низших передачах, соответствующих скоростям движения 2,5...3,5 км/ч при выполнении технологических операций [1]. Характерной особенностью таких машин при работе на тяговом режиме является предметное распределение мощности силового двигателя на два потока: к колесному движителю и к механизму отбора мощности для привода рабочих органов. Наиболее распространенные трансмиссии, применяемые в конструкции лесотранспортных и ЗТМ, по характеру преобразования мощностного потока делятся на механические, гидромеханические, гидрообъемные и электрические.

Основным недостатком применяемых механических трансмиссий является ступенчатое изменение скорости движения и разрыв потока мощности в трансмиссии при переключении передач в коробке передач, что сопровождается потерей скорости машины вплоть до ее остановки. Для автомобилей это несущественно, т.к. большой запас кинетической энергии способствует незначительному изменению скорости движения за время переключения передач. При малых скоростях движения и больших по величине внешних сопротивлений разрыв силового потока в механической трансмиссии может вызвать остановку машины.

Для устранения указанных недостатков необходимо конструктивно обеспечить переключение передач под нагрузкой без разрыва силового потока, а в целях максимального использования полной мощности силового двигателя при заданных пределах тягового усилия число ступеней передач должно быть очень большим, т.к. сопротивление движению машины дискретно не изменяется. На практике реализация указанных требований способствует усложнению конструкций коробок передач, увеличению их массогабаритных показателей, а также стоимости.

Частичное устранение недостатков механических трансмиссий достигается установкой на входе коробки передач гидротрансформатора, частота вращения выходного вала которого изменяется обратно пропорционально моменту нагрузки (в пределах отношения 1 : 3). При этом потери энергии в гидротрансформаторе будут зависеть от режима его работы и могут достичь 12...17 %.

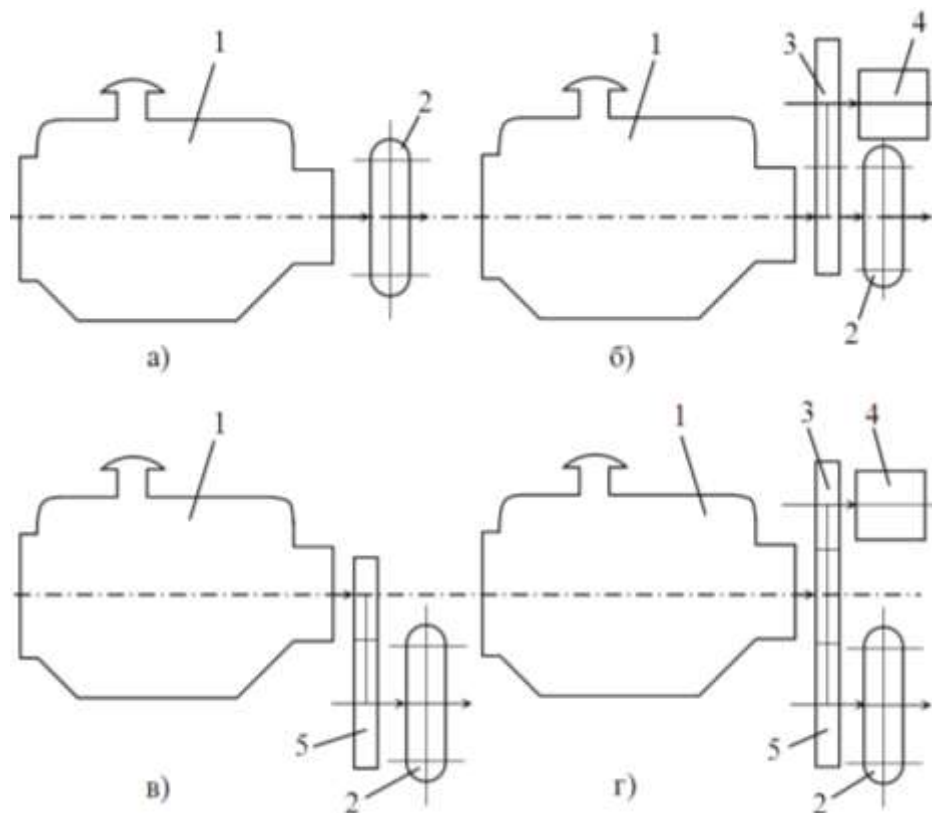
В конструкцию гидромеханических трансмиссий входят ступенчатый редуктор с фрикционным переключением передач и гидродинамический трансформатор, обеспечивающие широкий диапазон бесступенчатого изменения параметров потока мощности в пределах каждой ступени механического редуктора.

Таким образом, широкое применение гидромеханических трансмиссий в конструкции лесотранспортных и ЗТМ обусловлено следующими преимуществами: возможностью изменения силы тяги и скорости движения машины в зависимости от сил сопротивления движению; увеличением коэффициента сцепления пневматических шин колесного движителя с опорной поверхностью; предохранению силового двигателя от перегрузок; снижением динамических

нагрузок и крутильных колебаний в силовой передаче; обеспечением плавного начала движения с места под нагрузкой.

С помощью гидротрансформатора достигается более полное использование мощности силового двигателя при числе ступеней передач, равном и даже несколько меньшем, чем у механической трансмиссии.

Схемы соединения силового двигателя с гидродинамическим трансформатором приведены на рис. 1.



- а) схема непосредственного соединения двигателя с гидротрансформатором;
 - б) непосредственное соединение двигателя с гидродинамическим трансформатором и отбором мощности; в) соединение двигателя с гидродинамическим трансформатором через согласующий редуктор;
 - г) соединение двигателя с гидродинамическим трансформатором через согласующий редуктор с отбором мощности;
- 1 – двигатель; 2 – гидродинамический трансформатор; 3 – редуктор отбора мощности; 4 – вспомогательный механизм; 5 – согласующий редуктор

Рисунок 1 – Схемы соединения силового двигателя с гидродинамическим трансформатором

Однако, наряду с достоинствами, у гидромеханических трансмиссий имеются и недостатки: значительное удорожание трансмиссии, снижение общего КПД передачи, снижение топливной экономичности и динамических показателей машин, они сложнее и тяжелее. Этим обуславливается и пониженные значения величины КПД гидротрансформатора (87...89 %), причем, на смежном

с этой зоной участка КПД снижается, а его работа сопровождается значительным нагревом рабочей жидкости.

Также, при разгоне машины часть энергии затрачивается на увеличение кинетической энергии вращающихся масс двигателя и рабочей жидкости в круге циркуляции гидротрансформатора [2].

Классификацию гидромеханических трансмиссий лесотранспортных и ЗТМ можно провести по следующим признакам:

- по компоновке (раздельно – агрегатные и блочные);
- по типу гидротрансформатора («прозрачный» и «непрозрачный»);
- по способу передачи мощностного потока (однопоточные и двухпоточные);
- по типу коробки передач (вальные и планетарные).

Для расчета тяговых показателей лесотранспортных и ЗТМ с гидромеханической трансмиссией и построения тяговой характеристики необходимы следующие исходные данные:

- регуляторная характеристика силового двигателя;
- внешняя безразмерная характеристика гидромеханической передачи;
- структурная схема соединения двигателя и гидромеханической передачи;
- выходная характеристика системы «силовой двигатель – гидромеханическая передача»;
- общие передаточные числа механической части трансмиссии на рабочих передачах и КПД трансмиссии;
- колесная схема, модель и размерность пневматических шин;
- величины вертикальных реакций опорной поверхности на всех колесах машины;
- вид опорной поверхности, ее состояние и влажность.

Для расчета тяговых показателей лесотранспортных и ЗТМ с гидромеханической трансмиссией с применением персональной электронно-вычислительной машины (ПЭВМ) авторы статьи предлагают использовать усовершенствованную программу, предварительно подготовив следующие исходные данные:

- тип и марка машины;
- модель силового двигателя;
- модель гидротрансформатора;
- величина крутящего момента силового двигателя, затрачиваемая на привод вспомогательных механизмов;
- передаточное число и механический КПД согласующего редуктора;
- коэффициенты, зависящие от конструкции пневматических шин, внутреннего давления воздуха в шинах, вида и состояния опорной поверхности;
- коэффициенты сопротивления качению и сцепления колесного движителя по конкретному типу опорной поверхности;
- внешние факторы и параметры, учитывающие увеличение коэффициента сопротивления качению колесного движителя при работе на ведущем (тяговом) режиме;

- колесная схема машины (количество осей, какие оси ведущие, какие ведомые);
- реакции опорной поверхности на ведущие колеса;
- силовой радиус элементов колесного движителя (ведущих колес);
- количество передач, для которых необходимо выполнить расчеты;
- общее передаточное число и КПД механической части трансмиссии для каждой передачи.

После этого запускается программа на ПЭВМ и производится ввод исходных данных в режиме «запрос программы – ответ пользователя» (рис. 2). Полученные результаты оформляются в виде отчета либо согласно установленных заказчиком требований.

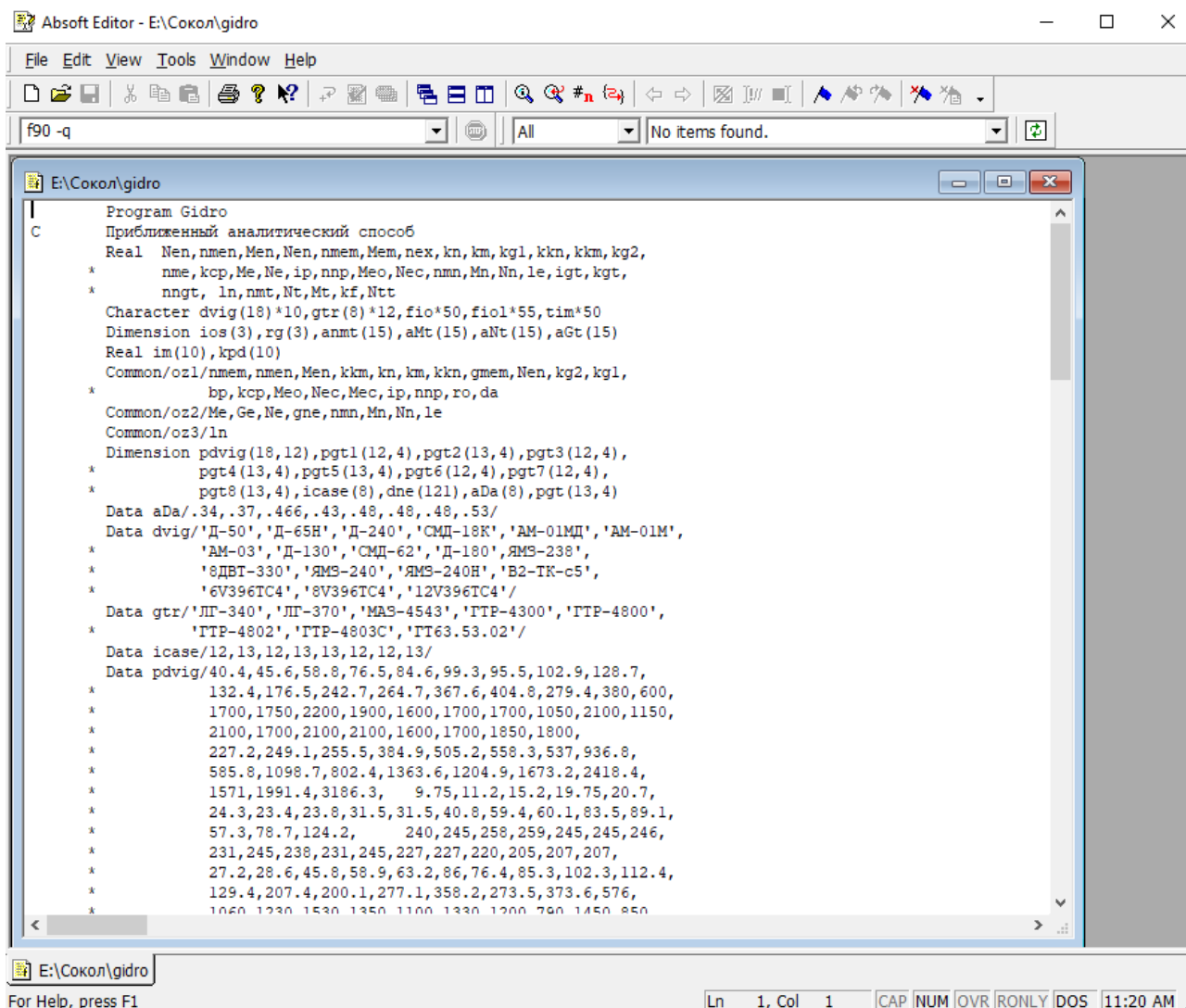


Рисунок 2 – Скриншот окна программы ввода исходных данных

Таким образом, существенные преимущества от применения усовершенствованной программы для расчета тяговых показателей лесотранспортных и ЗТМ с гидромеханической трансмиссией будут способствовать широкому ее использованию, а совершенствование конструкции и характеристик гидромеха-

нических трансмиссий необходимо вести в направлении устранения отмеченных выше недостатков.

Список литературы

1. Добронравов С.С. Строительные машины и оборудование: Справочник / С.С. Добронравов, М.С. Добронравов. – М: Высшая школа. – 2006. – 445 с.
2. Ульянов Н.А. Самоходные колесные землеройно-транспортные машины / Н.А. Ульянов, Э.Г. Ронинсон, В.Г. Соловьев. – М: Машиностроение. – 1976. – 359 с.
3. Гильмутдинов В.И. Математическая модель и методика расчета тяговых качеств колесных движителей землеройно-транспортных машин: дисс. ... канд. техн. наук: 05.05.04 – дорожные и строительные машины / В.И. Гильмутдинов. – Воронеж. – 1988. – 212 с.

References

1. Dobronravov S.S. Construction Machines and Equipment: A Reference Book / S.S. Dobronravov, M.S. Dobronravov. – Moscow: Vysshaya Shkola, 2006. – 445 p.
2. Ulyanov N.A. Self-propelled wheeled earth-moving and transport machines / N.A. Ulyanov, E.G. Roninson, V.G. Solovyov. – Moscow: Mashinostroenie, 1976. – 359 p.
3. Gilmutdinov V.I. Mathematical model and methodology for calculating the traction characteristics of wheeled propulsion systems of earth-moving and transport machines: Diss... Candidate of Technical Sciences: 05.05.04 – Road and Construction Machines / V.I. Gilmutdinov. – Voronezh. – 1988. – 212 p.

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ БЕСЧОКЕРНОЙ ТРЕЛЕВКИ ДРЕВЕСИНЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ УСТРОЙСТВА РЕКУПЕРАЦИИ ЭНЕРГИИ

Дерепаско И.В., Абрамов В.В., Сибиряткин Е.В.

*Воронежский государственный лесотехнический университет
имени Г.Ф. Морозова, Воронеж, Россия*

IMPROVING THE EFFICIENCY OF CHOKERLESS TIMBER SKIDDING USING AN ENERGY RECOVERY DEVICE

Derepasko I.V., Abramov V.V., Sibiryatkin E.V.

*Voronezh State University of Forestry and Technologies
named after G.F. Morozov, Voronezh, Russia*

Аннотация. В работе рассмотрены вопросы динамики гидравлических приводов технологического оборудования лесных машин. В ходе анализа определены подходы к математическому моделированию динамики предложенной конструкции. Установлено, что применение предложенной кинематической и гидравлической схемы позволяет снизить энергозатраты на 10 %. Выполнена экономическая оценка эффективности модернизированного агрегата, показавшая рост производительности на 17 % при снижении количества рейсов.

Abstract. The study addresses the dynamics of hydraulic drives in the technological equipment of forestry machines. During the analysis, approaches to mathematical modeling of the dynamics of the proposed design were identified. It was found that using the proposed kinematic and hydraulic scheme makes it possible to reduce energy consumption by 10 %. An economic assessment of the upgraded unit's efficiency was carried out, showing a 17 % increase in productivity along with a reduction in the number of trips.

Ключевые слова: трелевка сортамента, математическая модель, рекуперация энергии, гидросистема.

Keywords: skidding gripper, sorting, modeling, compliance coefficient, hydraulic recovery cylinder.

В лесозаготовительной отрасли России наблюдается устойчивая тенденция к переходу на механизированные способы ведения работ, что обеспечивает повышение производительности предприятий. В контексте обеспечения экономической рентабельности значительное внимание уделяется снижению энергозатрат на этапе трелевки древесины. Наряду с харвестерами и форвардерами, в отечественной практике широкое распространение получили трелевочные агрегаты, созданные на базе серийных тракторов. Для субъектов малого предпринимательства применение подобной техники является более целесообразным,

так как покупка узкоспециализированных дорогостоящих машин зачастую не имеет экономического обоснования.

Однако общим недостатком подобных конструкций является отсутствие устройств для гашения колебаний, возникающих при движении по неровной поверхности, а также невозможность накапливать энергию этих колебаний с целью использования в гидроприводе. Данное обстоятельство заставляет искать пути повышения энергоэффективности указанных агрегатов. Поскольку гидравлический привод является критически важным компонентом лесозаготовительной техники [1, 5], его модернизация необходима для улучшения общих эксплуатационных характеристик машин.

Целью данной работы является оптимизация конструкции бесчokerного трелевочного агрегата для снижения гидравлических нагрузок и повышения его энергоэффективности, а также обоснование параметров гидропривода с системой рекуперации энергии посредством математического моделирования. и последующая экономическая оценка эффективности предложенных решений по данным натурных испытаний.

Обзор научной литературы, посвященной вопросам повышения энергоэффективности гидроприводов лесотранспортной техники [2-4], продемонстрировал недостаточную изученность методов рекуперации энергии в составе бесчokerных трелевочных агрегатов. На основе этого анализа были выбраны методы математического моделирования и определены пути достижения поставленной цели.

В качестве объекта настоящего исследования выступает бесчokerный трелевочный захват ПТН-0,8, работающий в агрегате с трактором МТЗ-82. Для указанного оборудования построена кинематическая расчетная схема (рис. 1), предназначенная для моделирования и оптимизации рабочих процессов с учетом параметров энергосберегающей гидросистемы. При построении схемы учитывались конструктивные особенности захвата ПТН-0,8, технические характеристики трактора МТЗ-82, а также параметры и принципы функционирования энергосберегающего гидропривода.

Принципиальным конструктивным отличием от существующих аналогов служит наличие дополнительного гидроцилиндра 5, связанного с гидроаккумулятором 1 посредством блока клапанов 2. Рассмотрим физическую сущность работы устройства. В процессе движения агрегата по микронеровностям возникающие вертикальные колебания приводят к смещению поршня со штоком гидроцилиндра рекуперации 5. При этом рабочая жидкость поочередно подается в гидроаккумулятор 1 через напорные обратные клапаны 2, тогда как из гидробака 4 через всасывающие обратные клапаны 3 жидкость поступает в полость цилиндра, где формируется разрежение.

На основе расчетной схемы, представленной на рис. 1, сформирована система дифференциальных уравнений, описывающих рабочий процесс трелевки бесчokerным агрегатом, оснащенным гидроприводом рекуперации энергии:

где: $m_{\text{тр}}$ – масса агрегата, кг;

P_1 и P_2 – реакции на переднем и заднем мостах, Н;

P_z – вертикальная компонента силы тяги, Н;

S – площа поршня гидроцилиндра 5, м^2 ;

p – давление рабочей жидкости в гидроприводе рекуперации, Па;

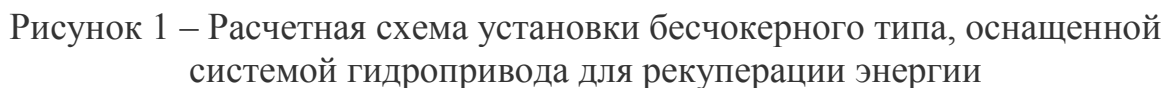
 $J_{\text{тр}_3}$ – момент инерции агрегата относительно его центра масс, $\text{кг} \cdot \text{м}^2$; $R_{\text{агр}}^z$ – вертикальная компонента силы сопротивления перемещению агрегатом

пачки бревен, Н;

k – коэффициент дросселирования рабочей жидкости в гидролинии между гидроцилиндром 5 и гидроаккумулятором 1, $\text{м}^3 \cdot \text{с} \cdot \text{Па}^{-1/2}$;

p_0 – начальное давление в гидроаккумуляторе 1, Па;

k_p – коэффициент податливости гибких элементов гидропривода, определяемый по эмпирической формуле, $\text{м}^5/(\text{Н}\cdot\text{с})$.



Для численного решения системы уравнений (1) применяется метод Эйлера, позволяющий определять значения функций $Z(t)$, $\varphi(t)$ и $p(t)$ в определенные значения времени на заданном интервале. При построении и решении модели не учитывались горизонтальные колебания стрелы и вращение трактора вокруг оси ОХ, неровности рельефа моделировались через мгновенные изменения реакций опор.

Начальные условия имеют вид:

$$Z(0) = Z^0, \quad \frac{dZ}{dt}(0) = Z^1, \quad \varphi(0) = \varphi^0, \quad p(0) = p_0. \quad (2)$$

После подстановки (2) в (1) и выделения главных членов получена система рекуррентных соотношений для расчетного эксперимента:

$$Z_{i+2} = 2Z_{i+1} - Z_i + \sigma_1 h^2 \cdot p_i + \sigma_2 h^2, \quad (3)$$

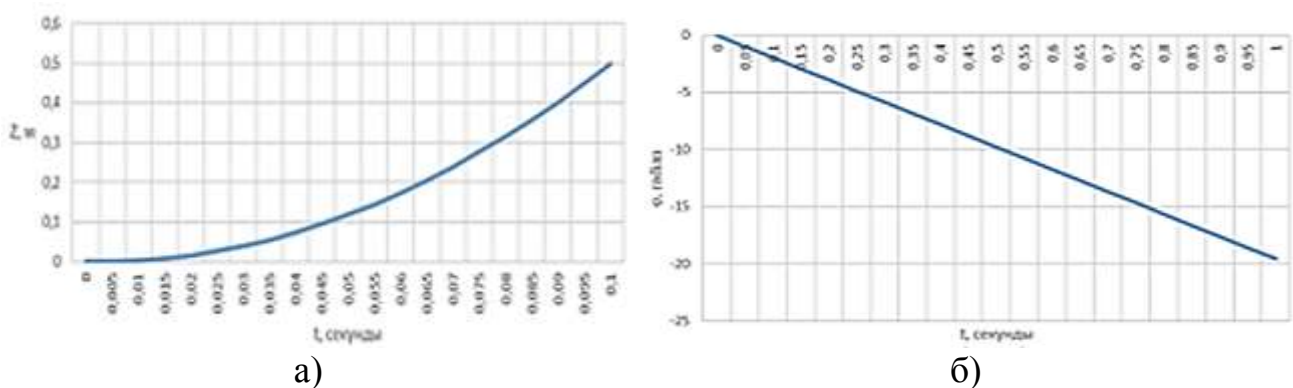
$$\varphi_{i+1} = \varphi_i + \sigma_3 h \cdot p_i + \sigma_4 h, \quad (4)$$

$$p_{i+1} = (1 + \sigma_6 h) \cdot p_i + \sigma_5 h \sqrt{|p_i - p_0|} + \sigma_7 \cdot (Z_{i+1} - Z_i), \quad (5)$$

где $i = 0, 1, 2, \dots$.

Решение системы (3) – (5) реализовано в виде циклического алгоритма в среде Microsoft Excel. Программа позволяет построить графики $Z(t)$, $\varphi(t)$ и $p(t)$. Параметры расчетов: 1) плотность пней на вырубке – 200 шт./км; 2) число столкновений трелюемой пачки сортиментов с пнями – примерно 60 на среднем расстоянии трелевки 300 м; 3) масса трелюемой пачки – 600 кг; 4) амплитуда колебаний агрегата – 20 см. Для повышения точности расчета шаг интегрирования h устремлялся к нулю. Для трактора МТЗ-82 и навесного оборудования ПНТ «Муравей» использовались паспортные размерные и гидродинамические параметры.

На рис. 2, а и 2, б показаны полученные в результате компьютерного моделирования графики зависимостей от времени перемещения $Z(t)$ и угла $\varphi(t)$. Видно, что в момент возникновения колебаний давление в системе больше, чем давление в гидроаккумуляторе, это обеспечивает его зарядку.



а) перемещения $Z(t)$; б) угла $\varphi(t)$
Рисунок 2 – Графики зависимости от времени:

Для обоснования преимущества предлагаемой модернизации проведен сравнительный экономический анализ работы бесчokerного агрегата первоначальной конструкции и после внедрения гидросистемы рекуперации. Себестоимость машино-смены агрегата МТЗ-82+ПНТ-0,8 оценивается по формуле:

$$\begin{aligned}
C_1 &= \frac{C_{msm} M_j k_{uzp} \sum_{i=1}^I t_i}{3600 V_p m \varphi} = \\
&= \frac{C_{msm} k_{uzp} M_j (t_1 + t_2 + t_3 + t_4 + t_5 + t_6 + t_7 + t_8)}{3600 V_p m \varphi} = \\
&= \frac{C_{msm} k_{uzp} M_j \left(\frac{l}{v_1} + t_2 + t_3 + \frac{l}{v_2} + t_5 + t_6 + t_7 + t_8 \right)}{3600 V_p m \varphi},
\end{aligned} \tag{6}$$

где C_{msm} – себестоимость машино-смены агрегата МТЗ-82+ПТН-0,8, руб.;

M_j – объем древесины, вырубаемый в j -й приём на разрабатываемой лесосеке, м³;

k_{uzp} – доля вырубаемого компонента леса;

m – длительность смены, час;

φ – коэффициент эффективности использования времени смены;

V_p – объем трелеваемой пачки сортиментов, м³;

T_i – длительность i -ого периода цикла трелевки, с;

I – число периодов цикла трелевки;

t_1 – время холостого хода трелевочного агрегата с верхнего склада до места захвата сортиментов, с;

t_2 – время на опускание челюстного захвата на пачку сортиментов, с;

t_3 – время, затрачиваемое на захват пачки, с;

t_4 – время перевода трелевочного приспособления с пачкой сортиментов в транспортное положение, с;

t_5 – время маневров трелевочного агрегата по пасеке, с;

t_6 – время перемещения трелевочного агрегата с пасеки на погрузочный пункт, с;

t_7 – время на разгрузку пачки, с;

t_8 – время маневров трелевочного агрегата на верхнем складе, с;

l – среднее расстояние трелевки, м;

v_1 – скорость движения трелевочного агрегата без сортиментов, м/с;

v_2 – скорость движения нагруженного трелевочного агрегата, м/с.

Выражение (6) дает возможность оценить экономическую эффективность применения трелевочного агрегата, учитывая природно-производственные условия конкретной лесосеки.

Натурные испытания проведены в июле 2025 года в Тамбовской области на базе ТОГАУ «Моршанский лесхоз». В ходе мониторинга собирались данные по размерам сортиментов, объёму пачки, доле выпадения сортиментов из захвата и продолжительности элементов рабочего цикла. Из-за выпадения части сортиментов из захвата базовый агрегат МТЗ-82 + ПТН-0,8 за час терял 0,933 м³ древесины. После модернизации (внедрения гидроцилиндра рекуперации и гидроаккумулятора) часовая производительность выросла с 3,47 до 4,2 м³, сменная (при расстоянии трелевки 270 м) – с 22,27 до 26,9 м³. Итоговый прирост производительности составил 17 % (рис. 3)

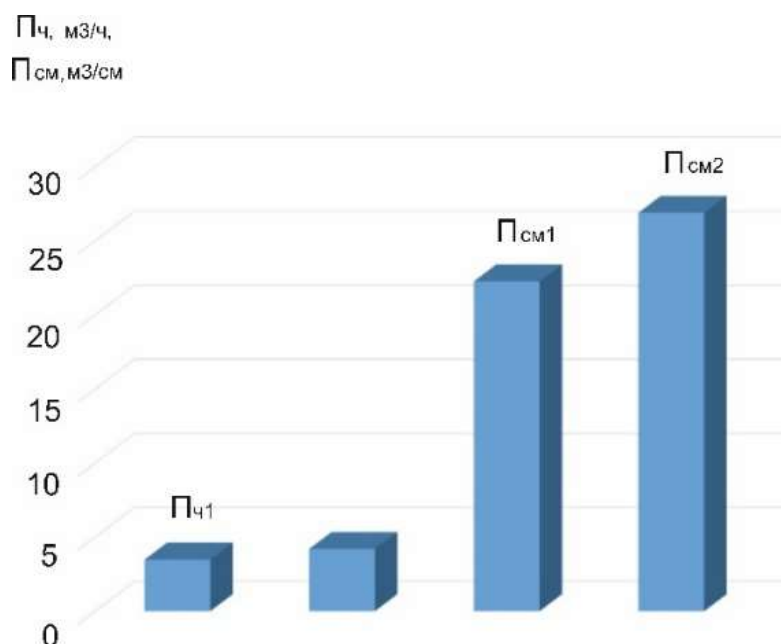


Рисунок 3 – Сравнительный анализ производительности

Снижение потерь древесины из пачки дало возможность уменьшить на 1-2 число рейсов трелевочного агрегата за смену. При этом уменьшается расход топлива и негативное воздействие (повреждение подроста, уплотнение почвы) на лесную экосистему.

Экономия энергии за один цикл достигает 48 кДж при массе пачки 600 кг и амплитуде колебаний 20 см, что соответствует сокращению энергопотребления на 10 %. Данная энергия возвращается в гидросистему, что обеспечивает дополнительное уплотнение сортиментов в захвате, предотвращает их потерю и исключает самопроизвольное опускание навесного оборудования вследствие утечек рабочей жидкости.

Использование гидропривода с системой рекуперации энергии в трелевочном агрегате, таким образом, способствует сокращению энергетических и эксплуатационных расходов, повышению производительности и снижению техногенного воздействия на лесную среду.

Список литературы

1. Драпалюк М.В. Моделирование рабочего процесса гидравлического пульсатора манипулятора лесных машин / М.В. Драпалюк, А.А. Платонов, П.И. Попиков // Лесотехнический журнал. – 2025. – Т. 15, № 2(58). – С. 191-206. – DOI: 10.34220/issn.2222-7962/2025.2/12.
2. Попиков П.И. Математическая модель рабочих процессов бесчokerного трелевочного захвата с энергосберегающим гидроприводом / П.И. Попиков, Р.В. Юдин, В.И. Усков // Resources and Technology. – 2020. – Vol. 17, № 1. – pp. 1-10.
3. Математическая модель рабочих процессов бесчokerного трелевочного захвата с энергосберегающим гидроприводом / Р.В. Юдин, П.И. Попиков, В.И. Усков [и др.] // Resources and Technology. – 2022. – Т. 19, № 1. – С. 72-86. – DOI 10.15393/j2.art.2022.6023.

4. Моделирование работы механизма поворота колонны манипулятора автосортиментовоза с учетом объемной жесткости энергосберегающего гидропривода / А.Т. Рыбак, П.И. Попиков, Д.Ю. Дручинин [и др.] // Лесотехнический журнал. – 2024. – Т. 14, № 2 (54). – С. 280-294. – DOI: 10.34220/issn.2222-7962/2024.2/16.

5. Юдин Р.В. Моделирование процессов в системе гидравлического привода лесозаготовительных машин / Р.В. Юдин, А.И. Максименков, А.А. Аксенов // Современный лесной комплекс страны: проблемы и тренды развития: материалы международной научно-практической конференции, Воронеж, 2022 г. – Воронеж: ВГЛУ, 2022. – С. 81-85. – DOI: 10.58168/MFCCPTD2022_81-85.

References

1. Drapalyuk M.V. Modeling the operating process of a hydraulic pulsator for a forestry machine manipulator / M.V. Drapalyuk, A.A. Platonov, P.I. Popikov // Forestry Engineering Journal. – 2025. – Vol. 15, No. 2(58). – P. 191-206. – DOI: 10.34220/issn.2222-7962/2025.2/12.

2. Popikov P.I. Mathematical model of the operating processes of a chokerless skidder grapple with an energy-saving hydraulic drive / P.I. Popikov, R.V. Yudin, V.I. Uskov // Resources and Technology. – 2020. – Vol. 17, № 1. – pp. 1-10.

3. Mathematical model of the operating processes of a chokerless skidder grapple with an energy-saving hydraulic drive / R.V. Yudin, P.I. Popikov, V.I. Uskov [et al.] // Resources and Technology. – 2022. – Vol. 19, № 1. – pp. 72-86. – DOI 10.15393/j2.art.2022.6023.

4. Modeling the operation of the column rotation mechanism of a timber-hauling truck manipulator, accounting for the volumetric stiffness of the energy-saving hydraulic drive / A.T. Rybak, P.I. Popikov, D.Yu. Druchinin [et al.] // Forestry Engineering Journal. – 2024. – Vol. 14, No. 2 (54). – pp. 280-294. – DOI: 10.34220/issn.2222-7962/2024.2/16.

5. Yudin R.V. Modeling of processes in the hydraulic drive system of logging machines / R.V. Yudin, A.I. Maksimenkov, A.A. Aksenov // The Country's Modern Forestry Complex: Problems and Development Trends: Proceedings of the International Scientific and Practical Conference, Voronezh, 2022. – Voronezh: VGLTU, 2022. – pp. 81-85. – DOI: 10.58168/MFCCPTD2022_81-85.

ПРИНЦИПЫ ОЦЕНКИ ВЛИЯНИЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МОДУЛЬНОГО ГУСЕНИЧНОГО ДВИЖИТЕЛЯ НА ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ ШАССИ КОЛЕСНОГО ТРАКТОРА

¹Добрецов Р.Ю., ¹Носков М.С., ²Войнаш С.А.

¹ *Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, Россия*

² *Рубцовский индустриальный институт (филиал) Алтайский государственный
технический университет им. И.И. Ползунова, Рубцовск, Россия*

ASSESSMENT OF THE IMPACT OF USING A MODULAR CRAWLER ON THE ENERGY EFFICIENCY OF A WHEELED TRACTOR

¹Dobretsov R.Yu., ¹Noskov M.S., ²Voinash S.A.

¹ *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University,
St. Petersburg, Russia*

² *Rubtsovsk Industrial Institute (branch) of Polzunov Altai State Technical University,
Rubtsovsk, Russia*

Аннотация: Рассмотрен подход к расчетной оценке энергоэффективности шарнирно-сочлененного шасси с треугольными гусеничными модулями. Расчеты проведены в сравнении с серийными гусеничными тракторами. Проанализированы особенности конструкции, определяющие преимущества четырехгусеничного шасси.

Abstract: An approach to calculating the energy efficiency of an articulated chassis with triangular track modules is considered. The calculations were carried out in comparison with serial tracked tractors. The design features that determine the advantages of a four-track chassis are analyzed.

Ключевые слова: резиноармированная гусеница, принцип управления поворотом, сопротивление движению, затраты мощности, рекуперация энергии.

Keywords: rubber-reinforced track, steering principle, resistance to movement, power consumption, energy recovery.

Введение

В первом приближении идея создания четырехгусеничной монокорпусной машины представляется перспективной для узкого класса транспортных и тягово-транспортных машин – объектов, обладающих повышенной живучестью или высокой геометрической проходимостью. Пример раннего прототипа танка с четырьмя гусеницами (по две, установленные последовательно, на каждом борту), можно увидеть в книге [1]. Концепция не была доведена до серийного производства (например, четырехгусеничный транспортер-снегоход Э.М. Такера был произведен для антарктической экспедиции в четырех экземплярах, хотя

иногда утверждают, что этот опыт применен в конструкции машин Ратрак), но идея эволюционировала и привела к появлению прототипов двухсекционной сочлененной и монокорпусной чертырехгусеничных машин. Проект монокорпусного чертырехгусеничного транспортера LuWa доведен до стадии макетирования, но информации о результатах работ мало [2].

Чертырехгусеничная машина, выполненная на базе колесного полноприводного трактора оказывает меньшее воздействие на почву и развивает большее тяговое усилие. При оценке допускаемых и желательных давлений на почву можно рекомендовать данные, обобщенные в работе [3].

В статье [4] проанализирован опыт ведущих производителей тракторов в области применения ТГМ. В качестве примера можно привести опыты по использованию ТГМ на машине Петербургского тракторного завода [5].

Область применения ТГМ не ограничивается сельскохозяйственными тракторами высоких тяговых классов. Тракторы с ТГМ позитивно зарекомендовали себя в рисоводческом комплексе, применяются на шасси комбайнов и др. [6]. Современный ТГМ базируется на использовании резиноармированной гусеницы (РАГ).

В основе математического моделирования работы движителя с РАГ лежат классические исследования [7] и др. Специфика работы РАГ рассматривается во многих исследованиях. В качестве характерных примеров можно привести публикации [8,9] и др.

Цель и задачи исследования

Целью работы является обеспечение запуска серийного производства треугольных гусеничных модулей на АО «Петербургский тракторный завод».

Решаемые задачи – выбор системы параметров, позволяющих провести оценку эффективности работы систем шасси трактора с модулями на основе РАГ; выбрать и апробировать математический метод, позволяющий осуществить количественную комплексную оценку энергоэффективности шасси; проанализировать влияние конструктивных решений на итоговые расчетные оценки.

Методы и материалы

Основные положения работы базируются на подходах теории машин и механизмов, теории движения транспортных машин

Результаты теоретических исследований

Выбор режимов движения и объектов сравнения. Скорости движения тракторов в тяговом режиме ограничены особенностями технологических процессов. При полевых работах это компромисс между производительностью и качеством выполнения работ. В транспортном режиме скорость движения ограничивается возможностями системы поддрессоривания и кинематическим диапазоном трансмиссии.

Для транспортной гусеничной характерны большие скорости движения и выполнение поворотов на относительно высоких скоростях. Режимы движения в этом случае определяются собранной в отрасли статистикой.

Режимы движения, выбранные для сравнительной оценки шасси, приведены в табл. 1.

Таблица 1 – Характеристики режимов движения при проведении сравнительной оценки энергоэффективности шасси

Параметр	Режим движения			
	Прямолинейное		Поворот	
	Тяговый	Транспортный	Маневрирование	Транспортный
Коэффициент сопротивления	$\xi = 0,25$	$f = 0,08$	$\mu_{\max} = 0,8$ $f = 0,25$	$\mu_{\max} = 0,7$ $f = 0,10$
Скорость движения, V м/с	1,5	6,5	1,0	7,0
Относительный радиус поворота ρ	∞	∞	0,5	10

Объектами сравнения являются колесный трактор 8 тягового класса (условное обозначение К-8, массой 35000 кг, мощность двигателя 600 л. с., основные размеры шасси приняты по прототипу серийного трактора К-7), модернизированный под использование четырех ТГМ с РАГ; вариант трактора с четырьмя ТГМ с открытым металлическим шарниром (ОМШ) последовательного типа и серийными шасси ТДТ-55 и Беларус-1502.

Выбор частных показателей эффективности работы подсистем шасси транспортно-технологической машины.

Представленная в табл. 2 номенклатура частных показателей эффективности работы гусеничного шасси развивает идеи, предложенные коллективом под руководством А.П. Софийна и А.И. Мазура. Этот вопрос представлен нами, например, в работе [10].

Расчетные зависимости для принятой номенклатуры частных показателей и используемые обозначения приведены в табл. 2.

Таблица 2 – К определению значений частных показателей энергоэффективности шасси

Показатель частный	Расчетная зависимость	Комментарий
<i>Показатели, характеризующие эффективность работы шасси при среднестатистических нагрузках</i>		
1. Показатель потерь мощности в узлах шасси	$\Pi_{\eta} = \frac{\eta_{гр}}{\eta_0}$	$\eta_{гр}, \eta_0$ – КПД шасси при движении на грунте и бетоне
2. Показатель полноты использования мощности	$\Pi_N = \frac{N_{гр}}{N_0}$	$N_{гр}, N_0$ – потребляемая мощность двигателя при движении на грунте и бетоне

3. Показатель уровня сопротивления движению	$\Pi_{\psi} = \frac{1 - \delta}{\psi}$	δ, ψ – коэффициенты буксования сопротивления движению
<i>Показатели, характеризующие эффективность работы шасси при малых силах тяги</i>		
4. Показатель виброактивности гусеницы	$\Pi_{\varphi} = \frac{\max \left\{ \varphi_i(T_{\text{расч}}) \right\}}{\max \left\{ \varphi_i(T = 0) \right\}}$	$\varphi_i(T_{\text{расч}}; 0)$ – значение угла поворота звена за время прохождения опорного катка при действии расчетного и нулевого натяжения в рабочей ветви
5. Показатель относительных потерь мощности в опорной ветви	$\Pi_S = \frac{\Delta N}{N_{fm}}$	ΔN – суммарные потери мощности на опорной поверхности; N_{fm} – мощность для перемещения движителя в режиме идеального качения
6. Показатель относительных потерь натяжения в опорной ветви	$\Pi_T = \frac{\Delta T}{T_p}$	ΔT – суммарные потери натяжения на опорной поверхности; T_p – необходимое по условиям движения натяжение рабочей ветви
<i>Показатели, характеризующие интенсивность воздействия на опорное основание</i>		
7. Показатель интенсивности колееобразования (эффективности использования длины опорной поверхности)	$\Pi_H = \frac{q_{\text{ср}}}{[q]}$	$q_{\text{ср}}$ – среднее давление на грунт под гусеницами, Па; $[q]$ – значение допускаемого давления на грунт Па
8. Показатель интенсивности разрушения грунта, связанного с юзом гусениц	$\Pi_L = \frac{\Delta L}{L_{\text{оп}}}$	ΔL – суммарное положительное смещение на опорной поверхности; $L_{\text{оп}}$ – длина опорной поверхности
9. Показатель оценки ущерба, наносимого твердым грунтам	$\Pi_q = \frac{P_i(\varphi_i^{\text{max}})}{G_T}$	$P_i(\varphi_i^{\text{max}})$ – нормальная сила, действующая на трак при наибольшем угле поворота; G_T – вес машины

<i>Эффективность работы системы подрессоривания</i>		
10. Показатель эффективности работы системы подрессоривания	$P_{\text{эсп}} = \frac{\bar{V}_{\text{местн}}}{V_{\text{ш}}}$	$\bar{V}_{\text{местн}}$ – средняя скорость шасси на местности; $V_{\text{ш}}$ – максимальная скорость на шоссе
<i>Эффективность работы агрегатов трансмиссии при повороте</i>		
11. Относительное увеличение потребной мощности двигателя при повороте	$P_{\mu} = \frac{N_{\text{дв}}}{N_{\text{дв пр}}}$	$N_{\text{дв}}$ – потребная мощность двигателя при повороте; $N_{\text{дв пр}}$ – потребная мощность двигателя при прямолинейном движении с той же скоростью
12. Относительная мощность, рассеиваемая на элементе управления механизма поворота	$P_{\varepsilon} = \frac{N_{\varepsilon}}{N_{\text{дв}}}$	N_{ε} – мощность, рассеиваемая на элементе управления
13. Показатель, учитывающий число фиксированных радиусов поворота	$P_{\rho} = 1 - 1/n_{\rho}$	n_{ρ} – число расчетных радиусов поворота

Выбор математического аппарата построения обобщенного отклика сложной системы. Выстроив систему основных показателей (которая может дополняться), следует перейти к выбору математического метода получения обобщенного отклика сложной системы. Систематический обзор по этому вопросу представлен, например, в источнике [10].

На основе анализа информационных источников для реализации был выбран метод Харрингтона (метод построения обобщенной функции желательности, см., например, публикацию [10]). Предусматривается определения значений частных показателей, их нормировка, построение частных функций желательности. Последний этап – нахождение обобщенного отклика системы. В рамках метода Харрингтона он представляет геометрическое среднее частных функций желательности:

$$D = \sqrt[k]{\prod_{j=1}^k d_j(y_j)}.$$

Полученное значение количественно характеризует эффективность шасси. Основные результаты обобщенной оценки энергоэффективности работы рассмотренных объектов представлены на рис.1.

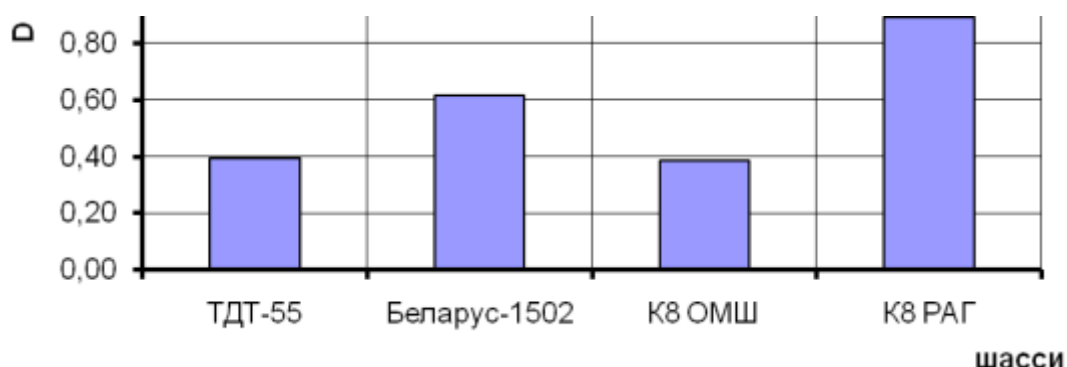


Рисунок 1 – Результаты расчетной оценки энергоэффективности сравниваемых шасси

Заключение

Несмотря на фактическую распространенность в эксплуатации, шасси ТДТ-55 на сегодня следует признать технически устаревшим. Принципы, заложенные в его конструкцию, необходимо развивать и адаптировать под современные требования промышленности. Использование звенчатых гусениц с открытым металлическим шарниром в составе ТГМ для шасси современного энергонасыщенного трактора также ставится под сомнение. Ключевые преимущества концепции перспективного К-8 составляют, в первую очередь, шарнирно-сочлененная рама и ТГМ на основе РАГ. Эти подходы необходимо прорабатывать, подготавливая вопрос постановки шасси на серийное производство.

Список литературы

1. Котович С.В. Двигатели специальных транспортных средств: в 3 ч. Ч. II: учеб. пособие / С.В. Котович. – М.: МАДИ. 2021. – 184 с.
2. Klöckner M. Gesamtsystem demonstrator für einen zukünftigen Luftbeweglichen Waffenträger / Klöckner M., Schael U. – URL: <https://soldat-und-technik.de/2021/08/mobilitaet/28007/gesamt-systemdemonstrator-fuer-einen-zukuenftigen-luftbeweglichen-waffentraeger/> (Дата обращения: 19.06.2026).
3. Куляшов А.П. Экологичность двигателей транспортно-технологических машин / А.П. Куляшов, В.Е. Колотилин. – М.: Машиностроение, 1993. – 288 с.
4. Серов К.Н. Съёмные треугольные гусеничные модули на колесных тракторах: систематический анализ применения / К.Н. Серов // Вестник Вологодского государственного университета. Серия: Технические науки. – 2025. – № 2(28). – С. 72-75.
5. Новинки завода на агросезон 2016-2017 [Электронный ресурс] – 12.10.2016 // Кировец. – URL: https://kirovets-ptz.com/press/news/novinki-zavoda-na-agrosezon-2016-2017/?sphrase_id=741578 (дата обращения: 19.06.2026).
6. Панасюк А.Н. Создание тракторов и комбайнов с резиноармированным гусеничным ходом / А.Н. Панасюк // Техника и оборудование для села. – 2009. – №6. – С. 14-15.
7. Расчет и конструирование гусеничных машин: учебник для вузов, под ред. проф. Н.А. Носова. – Л.: Машиностроение, 1972. – 559 с.

8. Жданович Ч.И. Выбор предварительного натяжения резиноармированной гусеницы сельскохозяйственного трактора с упругой подвеской / Ч.И. Жданович, В.Н. Плищ // Весці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя аграрных навук. – 2022. – Т. 60, № 2. – С. 243-256.

9. Turner R.J. Comparison of two and four track machines to rubber tire tractors in prairie soil conditions / R.J. Turner // Belt and tire traction in agricultural vehicles / Soc. of Automotive Engineers. – Warrendale, 1997. – pp. 31-43.

10. Добрецов Р.Ю. Объективная оценка технических характеристик шасси транспортных гусеничных машин / Р.Ю. Добрецов // Тракторы и сельхозмашины. – 2011. – № 2. – С. 19-23.

References

1. Kotovich S.V. Propulsion Systems for Special-Purpose Vehicles: in 3 parts. Part II: Study Guide / S.V. Kotovich. – Moscow: MADI, 2021. – 184 p.

2. Klöckner M. Gesamtsystem demonstrator für einen zukünftigen Luftbeweglichen Waffenträger / Klöckner M., Schael U. – URL: <https://soldat-und-technik.de/2021/08/mobilitaet/28007/gesamt-systemdemonstrator-fuer-einen-zukuenftigen-luftbeweglichen-waffentraeger/> (Accessed: 19.06.2026).

3. Kulyashov A.P. Environmental Compatibility of Propulsion Systems for Transport and Technological Machines / A.P. Kulyashov, V.E. Kolotilin. – Moscow: Mashinostroenie, 1993. – 288 p.

4. Serov K.N. Detachable triangular track modules on wheeled tractors: a systematic analysis of application / K.N. Serov // Bulletin of Vologda State University. Series: Technical Sciences. – 2025. – No.2(28). – Pp. 72-75.

5. New Products from the Plant for the 2016–2017 Agricultural Season [Electronic Resource] – October 12, 2016 // Kirovets. – URL: https://kirovets-ptz.com/press/news/novinki-zavoda-na-agrosezon-2016-2017/?sphrase_id=741578 (Accessed: 19.06.2026).

6. Panasyuk A.N. Development of tractors and combine harvesters with rubber-reinforced track running gear / A.N. Panasyuk // Machinery and Equipment for Rural Areas. – 2009. – № 6. – pp. 14-15.

7. Design and Calculation of Tracked Vehicles: Textbook for Higher Education Institutions, ed. by Prof. N.A. Nosov. – Leningrad: Mashinostroenie, 1972. – 559 p.

8. Zhdanovich Ch.I. Selecting pre-tensioning of rubber reinforced track on agricultural tractor with cushion suspension / Ch.I. Zhdanovich, V.N. Plishch // Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Agrarian series, 2022, vol. 60, № 2, pp. 243-256.

9. Turner R.J. Comparison of two and four track machines to rubber tire tractors in prairie soil conditions / R. J. Turner // Belt and tire traction in agricultural vehicles / Soc. of Automotive Engineers. – Warrendale, 1997. – pp. 31-43.

10. Dobretsov R.Yu. Objective assessment of the technical characteristics of tracked vehicle chassis / R.Yu. Dobretsov // Tractors and Agricultural Machinery. – 2011. – № 2. – pp. 19-23.

**КОРРЕЛЯЦИОННЫЙ АНАЛИЗ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ
ПРОЦЕССА РАБОТЫ ЛЕСНОГО ПЛУГА С ДОПОЛНИТЕЛЬНЫМИ
КАТКАМИ-РЫХЛИТЕЛЯМИ ПЛАСТОВ**

Дручинин Д.Ю., Фатхулин В.Р., Бурмистров Р.М.

*Воронежский государственный лесотехнический университет
имени Г.Ф. Морозова, Воронеж, Россия*

**CORRELATION ANALYSIS OF EXPERIMENTAL DATA ON THE FOREST
PLOW OPERATION WITH ADDITIONAL ROLLERS-RIPPERS
FOR SEAM**

Druchinin D.Yu., Fatkhulin V.R., Burmistrov R.M.

*Voronezh State University of Forestry and Technologies
named after G.F. Morozov, Voronezh, Russia*

Аннотация: представлены результаты корреляционного анализа данных, полученных в процессе реализации полевых экспериментов по работе лесного плуга с дополнительными катками-рыхлителями отваливаемых почвенных пластов.

Abstract: The results of a correlation analysis of data obtained during field experiments on the operation of a forest plow with additional rollers-rippers for dumping the soil seams are presented.

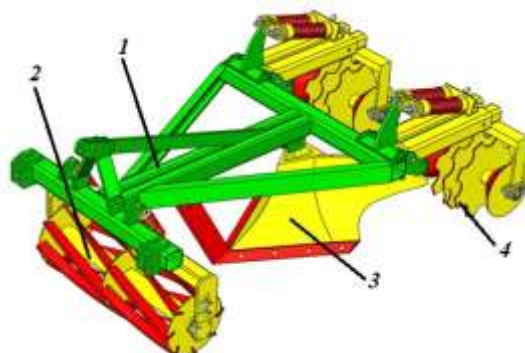
Ключевые слова: лесовосстановление, обработка почвы, лесной плуг, почвенный пласт, каток-рыхлитель, полевые исследования, корреляция данных

Keywords: reforestation, soil cultivation, forest plow, soil seam, roller-ripper, field study, data correlation.

Последовательные технологические операции при проведении лесовосстановительных работ первоначально предусматривают расчистку вырубок от пней, порубочных остатков и других препятствий, которые могут помешать качественной работе лесохозяйственной техники. После предварительной подготовки на восстанавливаемой площади по определенной технологии [3, 5] выполняется обработка лесной почвы специальными машинами или орудиями, принцип реализации которой зависит от природно-производственных условий (лесорастительная зона, тип почвы, количество выпадаемых осадков и т.д.) и объема планируемых работ [4].

Для повышения качества и эффективности процесса подготовки почвы в виде микроповышений – пластов под посадку лесных культур по краям борозды как одного из основных факторов, влияющих на приживаемость и развитие растений, в ВГЛТУ разработана конструкция лесного плуга с дополнительными

катками-рыхлителями пластов, воздействующими на отваленные почвенные массы (рис. 1).



1 – рама; 2 – ножевой барабан; 3 – лемешно-отвальный корпус;
4 – катки-рыхлители

Рисунок 1 – Лесной плуг для подготовки почвы под посадку лесных культур в пласт

С целью экспериментальной оптимизации параметров катков-рыхлителей была составлена программа проведения полевых исследований и изготовлен экспериментальный образец разрабатываемого лесного плуга (рис. 2) [1].



1 – навеска орудия; 2 – тензометрическая навеска; 3 – рама; 4 – опорное колесо;
5 – плужный корпус, 6 – каток-рыхлитель, 7 – предохранительная батарея

Рисунок 2 – Экспериментальный образец лесного плуга для проведения полевых экспериментов

Согласно требованиям к плотности и высоте создаваемых для посадки лесных культур микроповышений с использованием экспериментального оборудования осуществлялся замер:

- тягового сопротивления орудия;
- плотности центральной части отваленного на край борозды пласта после прохода агрегата;
- высоты поперечного профиля отваленного пласта после прохода агрегата.

Конструкция катков-рыхлителей экспериментального образца лесного плуга и агрегируемый трактор предусматривали возможность варьирования следующих входных параметров в процессе экспериментов:

- угол прикатывания конусов катка α_{np} (X_1);
- число вырезов на дисках катка $n_{выр}$ (X_2);
- поступательная скорость агрегата V_{mp} (X_3).

Граничные интервалы и уровни экспериментальных факторов полевого исследования представлены в табл. 1.

Таблица 1 – Граничные условия исследуемых факторов

Фактор	Единица измерения	Уровень варьирования			Интервал варьирования Δi ,
		нижний, $X_i^{(-1)}$	основной, $X_i^{(0)}$	верхний, $X_i^{(+1)}$	
Угол прикатывания конусов катка α_{np}	град.	30	37,5	45	7,5
Число вырезов на дисках катка $n_{выр}$	шт.	8	10	12	2
Поступательная скорость агрегата V_{mp}	м/с	1,11	1,39	1,67	0,28

В итоге, с учетом трех независимых входных факторов, включенных в программу полевых исследований для оценки их влияния на рабочий процесс лесного плуга, кодированная матрица экспериментальной программы из восьми экспериментов имеет следующий вид (табл. 2):

Таблица 2 – Матрица планирования ПФЭ

Номер эксперимента	X_1	X_2	X_3	Y_1 , тяговое сопротивление	Y_2 , плотность пласта	Y_3 , высота пласта
1	-1	-1	+1	$Y_{1\ 1}$	$Y_{2\ 1}$	$Y_{3\ 1}$
2	-1	+1	-1	$Y_{1\ 2}$	$Y_{2\ 2}$	$Y_{3\ 2}$
3	+1	-1	-1	$Y_{1\ 3}$	$Y_{2\ 3}$	$Y_{3\ 3}$
4	+1	+1	+1	$Y_{1\ 4}$	$Y_{2\ 4}$	$Y_{3\ 4}$
5	-1	-1	-1	$Y_{1\ 5}$	$Y_{2\ 5}$	$Y_{3\ 5}$
6	-1	+1	+1	$Y_{1\ 6}$	$Y_{2\ 6}$	$Y_{3\ 6}$
7	+1	-1	+1	$Y_{1\ 7}$	$Y_{2\ 7}$	$Y_{3\ 7}$
8	+1	+1	-1	$Y_{1\ 8}$	$Y_{2\ 8}$	$Y_{3\ 8}$

Полевое исследование рабочего процесса разработанного лесного плуга с дополнительными катками-рыхлителями проводилось на опытном полигоне Учебно-опытного лесхоза ВГЛТУ, и было направлено на определение

наименьшего значения тягового сопротивления при достаточной плотности и высоте отвального почвенного пласта в зависимости от установленных параметров конструкции экспериментального образца (рис. 3).



Рисунок 3 – Результат прохода катка-рыхлителя по отвальному пласту

После реализации запланированной программы исследований для более углубленного изучения перед составлением регрессионных моделей данные полевых экспериментов были подвергнуты корреляционному анализу с целью установления тесноты взаимосвязи между независимыми переменными и выходными оцениваемыми критериями эффективности процесса дополнительного воздействия на почвенный пласт и подтверждения отсутствия мультиколлинеарности между входными факторами [2].

Матрица корреляционного анализа для тягового сопротивления лесного плуга представлена в табл. 3.

Установлено, что среди исследуемых переменных наиболее высокую прямую связь с величиной тягового сопротивления плуга имеет поступательная скорость агрегата (коэффициент корреляции для $X_3 = 0,564$ – заметное значение по шкале Чеддока). Рассчитанный коэффициент детерминации R , равный 0,318, показывает, что изменение Y_1 на 32 % объясняется влиянием именно переменной X_3 . Изменение угла прикатывания конусов катка-рыхлителя α_{np} в умеренной степени влияет на тяговое сопротивление (значение коэффициента корреляции 0,353). Самая незначительная связь наблюдается между числом вырезов на дисковых вырезных ножах и тяговым сопротивлением плуга (коэффициент корреляции – 0,211).

Матрица влияния входных переменных на плотность почвы в отвальном пласте после прохода катка-рыхлителя с коэффициентами корреляции представлена в табл. 4.

Таблица 3 – Матрица коэффициентов корреляционного анализа для тягового сопротивления R_n исследуемой конструкции лесного плуга

	X_1 Угол прикаты- вания конусов α_{np}	X_2 Число вырезов на дисковых ножах $n_{выр}$	X_3 Поступательная скорость агрегата $V_{тр}$	Y_{1cp} Тяговое сопротивле- ние R_n
X_1 Угол прикатыва- ния конусов α_{np}	1			
X_2 Число вырезов на дисковых но- жах $n_{выр}$	0	1		
X_3 Поступательная скорость агрегата $V_{тр}$	0	0	1	
Y_{1cp} Тяговое сопротивление R_n	0,353058	0,21092	0,563935058	1

Таблица 4 – Матрица коэффициентов корреляционного анализа для плотности почвы $\rho_{пл}$ после прохода катка-рыхлителя

	X_1 Угол прикатывания конусов α_{np}	X_2 Число вырезов на дисковых ножах $n_{выр}$	X_3 Поступательная скорость агрегата $V_{тр}$	Y_{2cp} Плотность почвы $\rho_{пл}$
X_1 Угол прикатыва- ния конусов α_{np}	1			
X_2 Число вырезов на дисковых ножах $n_{выр}$	0	1		
X_3 Поступательная скорость агрегата $V_{тр}$	0	0	1	
Y_{2cp} Плотность почвы $\rho_{пл}$	0,051118811	0,79345285	-0,197807573	1

Было установлено, что высокую тесноту связи с плотностью почвы в отвальном пласте имеет число вырезов на дисковых вырезных ножах (значение коэффициента корреляции с прямой связью 0,793), объясняя на 63 % вариабельность Y_2 при изменении X_2 (согласно значению коэффициента детерминации $R = 0,629$). Слабую обратную связь имеет плотность почвы и поступательная скорость агрегата (коэффициент корреляции -0,198). Угол прикатывания конусов практически не влияет на плотность пласта (коэффициент корреляции –

0,051). Это можно объяснить взятием замеров в центральной части отвального пласта, тогда как конусные уплотнители больше воздействуют на края почвенных масс и уплотняя их именно там.

В табл. 5 представлены результаты корреляционного анализа по влиянию входных переменных X на среднюю высоту отвального пласта после прохода катка-рыхлителя. Наибольшее влияние на высоту пласта оказывает поступательная скорость агрегата (значение коэффициента корреляции с прямой связью 0,746 – высокая теснота связи, коэффициент детерминации $R = 0,556$).

Между числом вырезов на дисковых ножах катка-рыхлителя и высотой пласта обратная слабая связь (коэффициент корреляции -0,012), поэтому из дальнейшего регрессионного анализа результатов эксперимента данный фактор X_2 целесообразно исключить. В то же время угол прикатывания конусов α_{np} оказывает умеренное обратное влияние на высоту формируемого пласта как микроповышения (коэффициент корреляции -0,387), т.е. с увеличением угла прикатывания α_{np} средняя высота поперечного профиля пласта уменьшается.

Таблица 5 – Матрица коэффициентов корреляционного анализа для высоты пласта $h_{пл}$ после прохода катка-рыхлителя

	X_1 Угол прикатывания конусов α_{np}	X_2 Число вырезов на дисковых ножах $n_{выр}$	X_3 Поступательная скорость агрегата $V_{тр}$	Y_{3cp} Высота пласта $h_{пл}$
X_1 Угол прикатывания конусов α_{np}	1			
X_2 Число вырезов на дисковых ножах $n_{выр}$	0	1		
X_3 Поступательная скорость агрегата $V_{тр}$	0	0	1	
Y_{3cp} Высота пласта $h_{пл}$	-0,386680025	-0,012483492	0,746389541	1

Сведения о финансировании исследования. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-19-00876, <https://rscf.ru/project/25-19-00876/>.

Список литературы

1. Адлер Ю.П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю.П. Адлер, Е.В. Маркова, Ю.В. Грановский. – 2-е изд., перераб. и доп.. – М: Наука, 1976. – 280 с.
2. Баврина А.П. Современные правила применения корреляционного ана-

лиза / А.П. Баврина, И.Б. Борисов // Медицинский альманах. – 2021. – № 3(68). – С. 70-79.

3. Драпалюк М.В. Структура рабочего времени корчевания нежелательной растительности / М.В. Драпалюк, В.Н. Коротких, А.А. Платонов // Технологии в биоэкономике: инновации и вызовы в XXI веке: Материалы Международного форума, Воронеж, 28-30 мая 2025 года. – Воронеж: Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова, 2025. – С. 69-75. – DOI 10.58168/TBiEc2025_69-75.

4. Дручинин Д.Ю. Особенности работы лесохозяйственной техники на вырубках / Д.Ю. Дручинин, Е.В. Поздняков // Хвойные бореальной зоны. – 2019. – Т. 37, № 6. – С. 448-454.

5. Совершенствование технологий и техники для расчистки площадей от нежелательной древесно-кустарниковой растительности / М.В. Драпалюк, В.Н. Коротких, А.А. Платонов [и др.] // Леса России и хозяйство в них. – 2025. – № 3(94). – С. 136-146. – DOI: 10.51318/FRET.2025.94.3.014.

References

1. Adler Yu.P. Design of Experiments for Finding Optimal Conditions / Yu.P. Adler, E.V. Markova, Yu.V. Granovsky. – 2nd ed., revised and supplemented. – Moscow: Nauka, 1976. – 280 p.

2. Bavrina A.P. Modern Rules for Applying Correlation Analysis / A.P. Bavrina, I.B. Borisov // Medical Almanac. – 2021. – № 3(68). – pp. 70-79.

3. Drapalyuk M.V. Structure of Working Time for Grubbing Unwanted Vegetation / M.V. Drapalyuk, V.N. Korotkikh, A.A. Platonov // Technologies in the Bioeconomy: Innovations and Challenges in the 21st Century: Proceedings of the International Forum, Voronezh, May 28-30, 2025. – Voronezh: G.F. Morozov Voronezh State University of Forestry and Technologies, 2025. – pp. 69-75. – DOI: 10.58168/TBiEc2025_69-75.

4. Druchinin D.Yu. Operational Characteristics of Forestry Machinery on Felling Sites / D.Yu. Druchinin, E.V. Pozdnyakov // Conifers of the Boreal Zone. – 2019. – Vol. 37, № 6. – pp. 448-454.

5. Improvement of Technologies and Machinery for Clearing Areas of Unwanted Tree and Shrub Vegetation / M.V. Drapalyuk, V.N. Korotkikh, A.A. Platonov [et al.] // Forests of Russia and Forestry. – 2025. – № 3(94). – pp. 136-146. – DOI: 10.51318/FRET.2025.94.3.014.

ПЕРЕРАБОТКА НИЗКОКАЧЕСТВЕННОЙ ЛИСТВЕННОЙ ДРЕВЕСИНЫ В СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Карпов М.В., Потахин А.Г., Галактионов О.Н.

Петрозаводский государственный университет, Петрозаводск, Россия

PROCESSING LOW-QUALITY HARDWOOD INTO CONSTRUCTION MATERIALS

Karpov M.V., Potakhin A.G., Galaktionov O.N.

Petrozavodsk State University, Petrozavodsk, Russia

Аннотация: В статье рассмотрены зарубежные исследования строительных материалов на основе низкокачественной лиственной древесины. Выделены основные тенденции переработки лиственной древесины и возможности применения низкокачественного древесного сырья.

Abstract: The paper examines foreign studies of building materials based on low-quality hardwood. The main trends in the processing of hardwood and possibilities for using low-quality wood raw materials are highlighted.

Ключевые слова: лиственная древесины, древесные материалы, низкокачественная древесины, строительные материалы.

Keywords: hardwood, wood materials, low-quality wood, building materials.

Проблема переработки лиственной древесины, в особенности низкокачественной, актуальна как в условиях России, так и за рубежом. Интерес к использованию данного сырья в промышленности возрастает, так как большое количество древесины лиственных пород не находит применения в промышленности, внедрение технологий переработки низкокачественной древесины и разработки новых строительных материалов позволят снизить себестоимость изделий, увеличить интерес лесозаготовителей к проведению рубок ухода и заготовке лиственной древесины, так как решение технологической и производственной задач по изготовлению материалов из низкокачественного древесного сырья увеличит его потребление промышленностью и, как следствие, заготовка лиственной древесины на всех этапах роста лесонасаждений станет экономически выгодной [1].

Ученые из Технического университета Зволена (Словакия) рассматривали прочностные характеристики клееных наборных строительных изделий из 13-ти лиственных пород, анализировали влияния структуры (биологической и физической) на прочность конечного изделия. В ходе исследования было установлено, что прочность клеевого соединения сдвигу (прочность сдвигу при растяжении по стандарту EN 205) составляет 10-18 МПа, существенно снижается во влажном состоянии до 1-3 МПа, при высыхании восстанавливаются до исход-

ных значений [2]. Данный эксперимент показывает, что клееные материалы из лиственной древесины применимы в качестве конструкционных строительных материалов и изделий, однако необходимо ответственно отнестись к вопросам защиты материалов от воздействия влаги (как атмосферной, так и капиллярной).

Американские ученые рассматривали вопросы жизненного цикла клееных изделий из лиственной древесины в восточных штатах США. Оценивались массы выделяемых вредных веществ в атмосферу от процесса заготовки лиственной древесины до процесса утилизации, выработавшего срок службы древесного конструкционного изделия. Это исследование интересно тем, что коррелирует с отечественной практикой. Ученые задались вопросом – можно ли улучшить экологическую ситуацию на Восточном побережье США переходом от хвойных конструкционных изделий к лиственным, так как запасы хвойной древесины снижаются, растут логистические издержки (удаленность хвойных пород от основных логистических путей до переработки и потребителя) и, в следствие всего вышеописанного, растет и стоимость конечного продукта. Исследование показало, что изготовление CLT из лиственной древесины по выделению вредных веществ не отличается от процесса изготовления хвойных CLT [3]. Результат обусловлен логистической доступностью лиственных пород – существенно снижаются издержки на логистику (существенно снижаются транспортные расстояния от лесозаготовки до переработки), из-за чего снижается потребление топлива и выделения вредных веществ, соответственно, однако существенно усложняется переработка древесины из-за анатомических и биологических особенностей лиственных видов. Таким образом, снижение выделения загрязняющих веществ и экономических издержек на этапе логистики перекрываются процессами переработки, распиловки и защиты (биологической, так как лиственные породы менее устойчивы к биологическим поражениям) лиственных древесных материалов.

Подобными вопросами интересуются ученые из северных штатов США. Как отмечают авторы, вопросами переработки низкокачественной лиственной древесины лесозаготовители и деревоперерабатывающие производства заинтересовались после кризиса 2008 года, когда лесная индустрия серьезно пострадала. Вопрос о снижении издержек стал в то время актуальным. На этом фоне использование лиственной древесины позволило сократить расходы как лесозаготовителям, так и деревоперерабатывающим организациям [4]. Экономическое исследование позволило выделить главные факторы конкурентоспособности лиственных изделий перед хвойными: снижение логистических издержек, внедрение «модульных» систем производств (конфигурация элементов внутри изделия под разные задачи), постоянная модернизация и улучшение продукции и ее составляющих (как древесины, так и обрабатывающих материалов, и защитных составов).

Анализируя зарубежный опыт, можно выделить главные тенденции переработки лиственной древесины – снижение логистических и лесозаготовительных издержек, сокращение запаса хвойных пород и снижение стоимости конечного изделия. Актуальная задача по переработке низкокачественной древе-

сины позволит решить ряд проблем лесохозяйственного и экологического характера.

Материалы из лиственных пород могут закрепиться в строительной и мебельной отраслях, так как основное применение лиственной древесины – изготовление клееных материалов. Данные изделия интересуют строительную отрасль в качестве конструкционных и отделочных изделий, а мебельную отрасль – в качестве основных несущих элементов мебели. Таким образом, материалы из низкокачественной лиственной древесины могут найти применение в промышленности.

Список литературы

1. Карпов М.В. Переработка низкокачественной лиственной древесины / М.В. Карпов, О.Н. Галактионов, А.Г. Потахин // Проблемы техносферной и экологической безопасности в промышленности, строительстве и городском хозяйстве: сборник материалов конференции. – Макеевка: ДОННАСА, 2026. – С. 386–389.
2. Iždinský J. Bonding of Selected Hardwoods with PVAc Adhesive / J. Iždinský, L. Reinprecht, J. Sedliačik [et al.] // Applied Sciences. – 2021. – Vol. 11, № 1. – p. 67. – DOI: 10.3390/app11010067.
3. Zhao J. Life cycle assessment of hardwood cross-laminated timber production in the eastern United States / J. Zhao, J. Wang, L. Denes [et al.] // Journal of Cleaner Production. – 2025. – Vol. 527. – p. 146669. – DOI: 10.1016/j.jclepro.2025.146669.
4. Nicholls D.L. Challenges and Opportunities for North American Hardwood Manufacturers to Adopt Customization Strategies in an Era of Increased Competition / D.L. Nicholls, M.S. Bumgardner // Forests. – 2018. – Vol. 9, № 4. – pp. 186–202.

References

1. Karpov M.V. Processing of low-quality hardwood / M.V. Karpov, O.N. Galaktionov, A.G. Potakhin // Problems of technosphere and environmental safety in industry, construction and urban management: collection of conference materials. – Makeevka: DONNASE, 2026. – pp. 386–389.
2. Iždinský J. Bonding of Selected Hardwoods with PVAc Adhesive / J. Iždinský, L. Reinprecht, J. Sedliačik [et al.] // Applied Sciences. – 2021. – Vol. 11, № 1. – p. 67. – DOI: 10.3390/app11010067.
3. Zhao J. Life cycle assessment of hardwood cross-laminated timber production in the eastern United States / J. Zhao, J. Wang, L. Denes [et al.] // Journal of Cleaner Production. – 2025. – Vol. 527. – p. 146669. – DOI: 10.1016/j.jclepro.2025.146669.
4. Nicholls D.L. Challenges and Opportunities for North American Hardwood Manufacturers to Adopt Customization Strategies in an Era of Increased Competition / D.L. Nicholls, M.S. Bumgardner // Forests. – 2018. – Vol. 9, № 4. – pp. 186–202.

**МЕХАНИЗМЫ ВЛАГОРАЗРУШЕНИЯ КОНСТРУКЦИЙ ЛЕСНЫХ
ДОРОГ И ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МОДИФИКАТОРОВ
ДЛЯ РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЯ**

Круль Т.А., Силецкий В.В.

*Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет
им. С.М. Кирова, Санкт-Петербург, Россия*

**MECHANISMS OF MOISTURE-INDUCED DETERIORATION IN FOREST
ROAD STRUCTURES AND PROSPECTS FOR USING MODIFIERS
FOR RESOURCE CONSERVATION**

Krul T.A., Siletsky V.V.

Saint-Petersburg State Forest Technical University, Saint-Petersburg, Russia

Аннотация: В статье рассмотрены основные механизмы влагоразрушения конструкций лесных дорог. Обоснована необходимость повышения водостойкости дорог с целью увеличения их долговечности. Проанализированы перспективы применения модифицированных вяжущих, в частности лигносульфонатов, для стабилизации грунтов и укрепления дорожных конструкций. Показано, что применение лигносульфонатов способствует повышению прочности.

Abstract: The paper examines the main mechanisms of moisture-induced degradation of forest road structures. The necessity of improving road water resistance to increase their durability is substantiated. The prospects of using modified binders, in particular lignosulfonates, for soil stabilization and strengthening of road structures are analyzed. It is shown that the use of lignosulfonates contributes to an increase in strength.

Ключевые слова: лесные дороги, влагоразрушение, водостойкость, модифицированные вяжущие, лигносульфонаты, стабилизация грунтов, долговечность дорожных покрытий.

Ключевые слова: forest roads, moisture degradation, water resistance, modified binders, lignosulfonates, soil stabilization, pavement durability.

Лесные автомобильные дороги являются важным элементом транспортной инфраструктуры лесного комплекса, обеспечивая доступ к участкам лесного фонда, вывоз древесины и эксплуатацию лесных территорий. При этом дорожные конструкции эксплуатируются в условиях повышенной влажности, значительных сезонных перепадов температуры и динамического воздействия тяжёлой лесовозной техники. Совокупность этих факторов способствует снижению прочности и долговечности дорожных покрытий [1].

Одним из наиболее неблагоприятных факторов, влияющих на состояние лесных дорог, является вода [2]. Её проникновение в конструкцию дорожной

одежды происходит через трещины, поры, стыки и неуплотнённые участки покрытия, а также за счёт боковой инфильтрации и капиллярного подъёма из нижних слоёв земляного полотна. В результате вода достигает границы раздела между битумным вяжущим и минеральным заполнителем, изменяя свойства битумной плёнки, снижает сцепление компонентов и способствует развитию процессов водонасыщения и влагоразрушения [3].

Последовательное развитие указанных процессов приводит к образованию микротрещин, колеиности, выбоин, просадок и разрушению отдельных слоёв дорожной одежды. Особенно опасными данные явления становятся для лесных дорог, где недостаточная эффективность водоотвода и сложные грунтово-гидрологические условия могут ускорять потерю несущей способности земляного полотна.

Традиционное повышение долговечности дорожных конструкций за счёт увеличения толщины слоёв или регулярного проведения ремонтных работ требует значительного расхода минеральных материалов, битума, топлива и эксплуатационных ресурсов. Поэтому актуальной задачей является поиск технологических решений, позволяющих одновременно повысить водостойкость и снизить материальные и энергетические затраты на протяжении всего жизненного цикла дороги.

Одним из перспективных направлений решения данной задачи является применение модифицированных вяжущих. Введение в состав полимерных, минеральных или иных функциональных модификаторов позволяет целенаправленно изменять его адгезионные и водостойкие свойства. При правильном подборе модификатора возможно повышение устойчивости вяжущего к воздействию влаги, снижение скорости развития трещин.

Повышение влагостойкости и долговечности дорожного покрытия создаёт предпосылки для ресурсосбережения в лесном комплексе. Более длительный срок службы дороги позволяет сократить количество ремонтных работ.

Целью работы является рассмотрение основных механизмов водоразрушения лесных дорог и обоснование перспектив применения модифицированных вяжущих для повышения водостойкости и долговечности дорожных покрытий, а также снижения расхода материальных и энергетических ресурсов при их устройстве и эксплуатации.

Как показано на рис. 1, вода воздействует на дорожную конструкцию через пять основных механизмов: потерю адгезии, потерю когезии, гидравлическое давление, морозное пучение и гидравлическую эрозию. Ниже поэтапно рассмотрим каждый механизм, причины его возникновения и последствия.

Основные механизмы разрушения. 1. Потеря адгезии. Разрушение связи между битумным вяжущим и поверхностью минерального заполнителя (щебня). Вода проникает на границу раздела «битум-щебень» и вытесняет битум с поверхности камня; 2. Потеря когезии. Размягчение и деградация самого битумного вяжущего внутри асфальтобетона. Вода проникает в битумную плёнку, изменяя её реологические свойства, и битум становится менее вязким и упругим;



Рисунок 1 – Схема основных механизмов воздействия воды на конструктив автомобильной дороги

3. Гидравлическое давление. Избыточное давление воды в порах асфальтобетона под динамической нагрузкой от колёс транспорта. При проходе колеса вода в замкнутых порах сжимается, создавая поровое давление, которое распирает поры изнутри; 4. Морозное пучение. Подъём и деформация земляного полотна при замерзании воды в грунте. Вода в грунте замерзает при отрицательной температуре, образуя ледяные линзы. Лёд увеличивается в объёме примерно на 9 %, что вызывает вспучивание грунта; 5. Гидравлическая эрозия. Вымывание мелких частиц из конструкции дороги потоками воды. Вода, протекающая через трещины, стыки и поры, уносит с собой частицы материала (механическая эрозия); 6. Капиллярный подъём. Вода из грунтового основания перемещается вверх по системе капилляров и мелких пор за счет капиллярных сил.

Основные пути проникновения воды в дорожную конструкцию показаны на рис. 2.

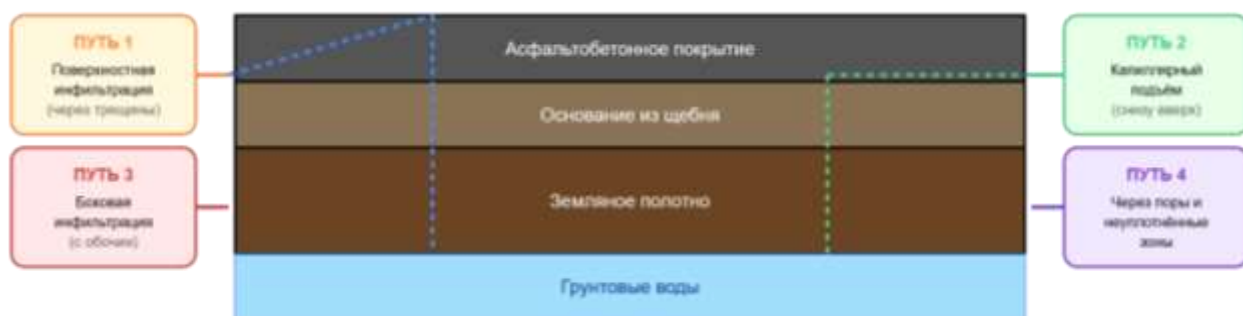


Рисунок 2 – Пути проникновения воды в дорожную конструкцию

Схема основных механизмов воздействия воды иллюстрирует, почему вода – главный враг долговечности дорог. Понимание этих механизмов помогает:

1. Проектировать дороги с учетом водоотвода и дренажа;
2. Выбирать материалы с высокой водостойкостью;
3. Строить с качественным уплотнением и гидроизоляцией;
4. Эксплуатировать со своевременным ремонтом трещин и очисткой водоотвода.

Исследования показывают, что большинство преждевременных разрушений гибких покрытий связаны с попаданием воды в конструкцию дороги, поэтому устройство эффективного водоотвода критически важно для долговечности [4].

Современные модифицированные вяжущие.

Помимо традиционных битумных вяжущих, в дорожном строительстве, в том числе при строительстве лесных дорог, находят применение альтернативные модифицированные вяжущие материалы. К ним относятся полимерные композиции, органоминеральные смеси, геополимеры, а также вяжущие на основе отходов промышленности и природных полимеров.

Одним из перспективных направлений является применение лигносульфонатов - водорастворимых солей лигносульфоновой кислоты, являющихся побочным продуктом промышленности. Лигносульфонаты обладают свойствами поверхностно-активных веществ, пластификаторов и природных связующих, что делает их эффективными для стабилизации грунтов и укрепления дорожных конструкций. Лигносульфонаты используются в качестве добавок для улучшения физико-механических свойств грунтов и несвязных материалов дорожных одежд. При введении в грунт лигносульфонаты взаимодействуют с глинистыми частицами, снижая их гидрофильность и уменьшая оптимальную влажность уплотнения. Это приводит к повышению плотности, прочности и водостойкости грунтовых слоёв.

Зарубежный опыт применения лигносульфонатов.

В Норвегии были проведены полевые исследования по применению лигносульфонатов для укрепления лесных дорог [5]. В рамках проекта были построены опытные участки с добавлением лигносульфоната в несвязные слои дорожной одежды. В течение двух лет наблюдали за изменением жёсткости и деформацией обработанных слоёв. Результаты показали, что лигносульфонат значительно улучшает механические свойства обработанных материалов, повышая их модуль упругости и снижая накопленную остаточную деформацию при циклическом нагружении.

В исследовании [6] оценено экономическое и экологическое влияние применения кальциевого лигносульфоната для стабилизации основания дорожного полотна. Расчёты показали, что использование лигносульфоната кальция позволяет снизить первоначальные затраты на строительство до 25,24 % и уменьшить выбросы CO₂ до 17,88 % за счёт сокращения толщины слоёв и объёмов применяемых материалов.

Заключение.

Вода является основным фактором преждевременного разрушения лесных дорог, воздействуя на дорожную конструкцию через потерю адгезии и когезии, гидравлическое давление, морозное пучение и гидравлическую эрозию. Понимание этих механизмов позволяет целенаправленно выбирать материалы и технологии, повышающие водостойкость и долговечность покрытий.

Применение модифицированных вяжущих, в частности лигносульфонатов, представляет собой эффективное решение для ресурсо- и энергосберегающего устройства лесных дорог. Зарубежный опыт подтверждает, что лигносульфона-

ты повышают прочность грунтов на одноосное сжатие при оптимальных дозировках, повышая модуль упругости.

Использование лигносульфонатов позволяет применять местные грунты вместо привозных материалов, сокращать толщину дорожных слоёв, уменьшать количество ремонтов и снижать затраты на строительство. Дополнительный экологический эффект достигается за счёт утилизации отходов целлюлозно-бумажной промышленности.

Таким образом, переход от традиционных битумных вяжущих к модифицированным составам на основе лигносульфонатов соответствует принципам инновационного развития лесного комплекса на основе ресурсо- и энергосбережения, обеспечивая долговечность лесных дорог при снижении материальных, энергетических и экологических затрат на протяжении жизненного цикла дорожной конструкции.

Список литературы

1. Силецкий В.В. Особенности расчета жестких дорожных одежд на лесной дороге: сравнение методов расчета и рекомендации / В.В. Силецкий, М.Р. Ляфисева // Сборник статей по материалам научно-технической конференции института технологических машин и транспорта леса по итогам научно-исследовательских работ 2022 года, Санкт-Петербург, 06-10 февраля 2023 года. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова, 2023 – С. 56–59.

2. Изменение прочностных свойств лесовозных автомобильных дорог при регулировании водно-теплового режима земляного полотна / Р.С. Сапелкин, Д.Г. Козлов, В.А. Тимофеев [и др.] // Ремонт. Восстановление. Модернизация. – 2023. – № 7. – С. 17-23. – DOI: 10.31044/1684-2561-2023-0-7-17-23.

3. Water Stability of Fibers-Enhanced Asphalt Mixtures under Dynamic Water Pressure Conditions // Materials. – 2024. – Vol. 17, № 6. – Art. 1325.

4. Moisture-Induced Pavement Distress: A Review of Damage Mechanisms, Material Factors, and Climate Impacts // Journal of Traffic and Transportation Engineering. – 2024. – Vol. 11, № 3. – pp. 245–262.

5. Barbieri D.M. Organosilane and Lignosulfonate Stabilization of Roads Unbound: Performance during a Two-Year Time Span / D.M. Barbieri, B. Lou, H. Chen, B. Shu, F. Wang, I. Hoff // Advances in Materials Science and Engineering. – 2021. – Vol. 2021. – Art. 9367501. – DOI: 10.13167/2025.30.9.

6. Sarıcı T. Sustainable Subgrade Stabilization with Calcium Lignosulfonate: A Dual Assessment of Economic Costs and Carbon Footprint in Road Pavements / T. Sarıcı, T. Geçkil, B. Karabaş // Sustainability. – 2026. – Vol. 18, № 13. – Art. 6750. – DOI: 10.3390/su18136750.

References

1. Siletsky V.V. Features of the calculation of rigid road structures on a forest road: comparison of calculation methods and Recommendations / V.V. Siletsky, M.R. Lyafisheva // Collection of articles based on materials of the scientific and technical conference of the Institute of Technological Machines and Forest Transport

on the results of research work in 2022, Saint Petersburg, 06-10 February 2023. – Saint Petersburg: Saint Petersburg State Forest Technical University named after S.M. Kirov, 2023. – pp. 56-59.

2. Changes in the strength properties of logging roads through the regulation of the hydrothermal regime of the roadbed / R.S. Sapelkin, D.G. Kozlov, V.A. Timofeev [et al.] // Repair. Restoration. Modernization. – 2023. – № 7. – pp. 17-23. – DOI: 10.31044/1684-2561-2023-0-7-17-23

3. Water Stability of Fibers-Enhanced Asphalt Mixtures under Dynamic Water Pressure Conditions // Materials. – 2024. – Vol. 17, № 6. – Art. 1325.

4. Moisture-Induced Pavement Distress: A Review of Damage Mechanisms, Material Factors, and Climate Impacts // Journal of Traffic and Transportation Engineering. – 2024. – Vol. 11, № 3. – pp. 245-262.

5. Barbieri D.M. Organosilane and Lignosulfonate Stabilization of Roads Unbound: Performance during a Two-Year Time Span / D.M. Barbieri, B. Lou, H. Chen, B. Shu, F. Wang, I. Hoff // Advances in Materials Science and Engineering. – 2021. – Vol. 2021. – Art. 9367501. – DOI: 10.13167/2025.30.9.

6. Sarıcı T. Sustainable Subgrade Stabilization with Calcium Lignosulfonate: A Dual Assessment of Economic Costs and Carbon Footprint in Road Pavements / T. Sarıcı, T. Geçkil, B. Karabaş // Sustainability. – 2026. – Vol. 18, № 13. – Art. 6750. – DOI: 10.3390/su18136750.

УСТРОЙСТВО ДЛЯ СОЗДАНИЯ ИМПУЛЬСНОЙ ЗАКРУЧЕННОЙ СТРУИ ЖИДКОСТИ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ТРЕБУЕМОГО КАЧЕСТВА ОКОРКИ ПНЕВОГО ОСМОЛА

Макаров В.Е.

*Поволжский государственный технологический университет,
Йошкар-Ола, Россия*

A DEVICE FOR CREATING A PULSE SWIRLING JET OF LIQUID TO ENSURE THE REQUIRED QUALITY OF STUMPS DEBARKING

Makarov V.E.

*Volga State University of Technology,
Yoshkar-Ola, Russia*

Аннотация. В статье рассмотрены вопросы отделения с пневой древесины грунта, коры, гнили и мелкой корневой системы с последующим использованием ее в производстве. Рассмотрены существующие способы очистки древесины. Обоснован выбор очистки пневой древесины импульсными закрученными струями жидкости. Предложена конструкция устройства для создания импульсной закрученной струи жидкости для обеспечения требуемого качества окорки.

Abstract. This article examines the removal of soil, bark, rot, and fine root matter from stumpwood for subsequent use in production. Existing wood cleaning methods are reviewed. The choice of cleaning stumpwood with pulsed swirling liquid jets is substantiated. A device design for creating a pulsed swirling liquid jet to ensure the required debarking quality is proposed.

Ключевые слова: пневой осмол, гидравлическая окорка, импульсная закрученная струя, канифольно-скипидарная продукция, кора, камбиальный слой.

Keywords: pneumoresin, hydraulic debarking, pulsed swirl jet, rosin-turpentine products, bark, cambial layer.

Пневый осмол является ценным источником смолистых веществ, однако его первичная обработка затруднена из-за высокого содержания минеральных загрязнений. Частицы песка и почвы, проникающие в структуру древесины, делают использование стандартных ножевых и фрезерных станков крайне невыгодным. Высокая интенсивность износа режущего инструмента ведет к росту затрат на его обслуживание и замену. Дополнительная проблема заключается в том, что при механической обработке абразивные частицы вдавливаются в сырье, что в дальнейшем негативно сказывается на долговечности оборудования, используемого для измельчения и экстракции [1, 2].

Окорка гидроструями представляет собой комплексное решение задачи подготовки древесины. Помимо удаления коры, водяная струя эффективно

очищает поверхность от минеральных включений, доводя качество сырья до стандартов глубокой химической переработки [3, 4].

Классификация по принципу воздействия:

- струйно-режущая (высоконапорная): использование сфокусированных струй под давлением 100–200 МПа, которые механически прорежают кору, отделяя её от ствола.

- эрозионная (гидродинамическая): разрушение коры и размыв камбиального слоя за счет энергии динамического потока воды.

- комбинированная: интеграция гидравлического метода с механическим (например, предварительное нанесение надрезов фрезами или ножами).

Классификация по типу оборудования:

- камерные: процесс протекает в изолированном пространстве, что снижает уровень шума и предотвращает разбрызгивание.

- открытые (портальные): подача воды осуществляется через подвижные рамы, перемещающиеся вдоль обрабатываемого бревна или штабеля.

- роторные: древесина проходит сквозь вращающийся ротор, на котором закреплены форсунки [3, 4].

Наиболее широкое применение в промышленности нашли камерные установки гидродинамической окорки [5, 6]. Однако их эксплуатация сопряжена с рядом конструктивных сложностей, а непрерывный характер подачи водяной струи на пневый осмол не позволяет достичь необходимого качества очистки сырья.

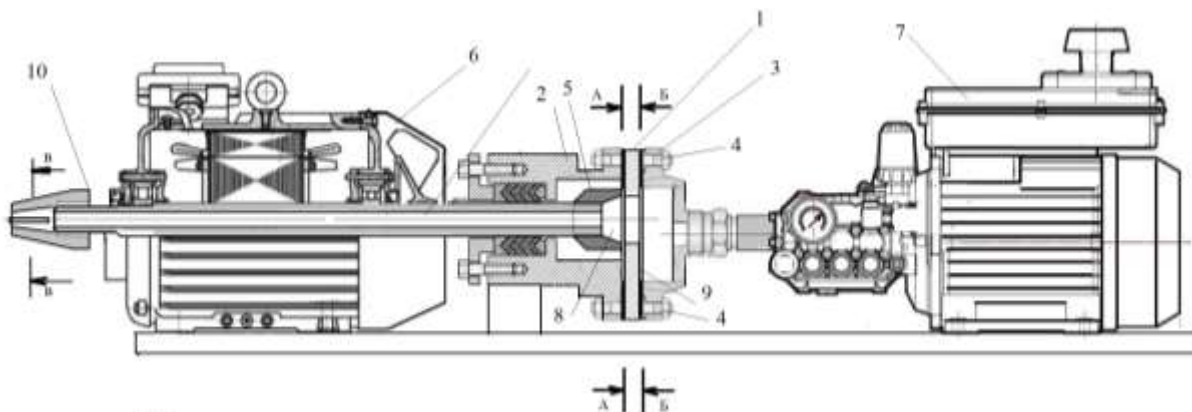
Замена непрерывной струи на импульсную закрученную при окорке осмола позволяет интенсифицировать процесс за счет циклического приложения гидродинамических нагрузок. Тангенциальные силы в сочетании с ударами эффективно разрушают связь "кора-древесина", что снижает удельную энергоемкость операции и предотвращает деструкцию волокон.

Цель работы. В данной работе ставится задача проектирования устройства, формирующего импульсную закрученную струю жидкости, что необходимо для достижения нормативных показателей качества окорки пневого осмола.

Решение задачи. Описание конструкции представлено на рис. 1 [7]

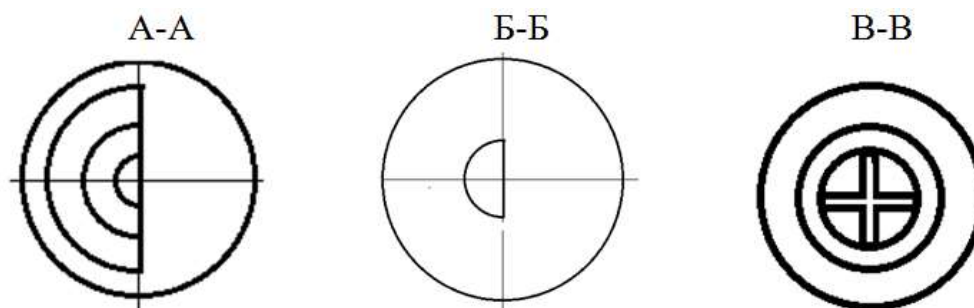
Переходная камера: состоит из двух частей 2 и 3, соединенных шпильками 4. *Узлы сопряжения:* левая часть 2 соединена с полым валом 5 электродвигателя 6; правая часть 3 – с патрубком насоса 7. *Элементы вала (5):* входной насадок 8, контактирующий с планшайбой 9, выходной патрубок с перегородками 10, (рис. 2, в). *Особенности:* планшайба 9 и насадок 8 имеют идентичные вырезы в форме полукруга.

Работа устройства основана на создании прерывистого потока жидкости. Поток воды под давлением от насоса 7 проходит через переходную камеру 1 во входной насадок 8 полого вала 5, после чего направляется к выходному насадку 10. Вращение вала 5 обеспечивается электродвигателем 6, который также приводит в движение выходной насадок 10. В процессе вращения происходит периодическое совмещение вырезов входного насадка 8 и планшайбы 9: при их совпадении жидкость проходит свободно (рис. 2, а), а при перекрытии – поток прерывается, формируя импульс (рис. 2, б).



1 – переходная камера, 2, 3 – левая и правая части переходной камеры,
4 – шпильки, 5 – полый подвижной вал, 6 – электродвигатель, 7 – патрубок
насоса, 8 – входной насадок, планшайба, 10 – перегородки

Рисунок 1 – Устройство для создания импульсной закрученной струи жидкости



а – сечение А-А левой части переходной камеры, б – показано сечение Б-Б пра-
вой части переходной камеры, в - показано сечение В-В выходного насадка

Рисунок 2 – Устройство для создания импульсной закрученной струи жидкости

В результате последовательного чередования этих состояний на выходе устройства образуется импульсная закрученная струя.

Вывод. Разработанная конфигурация устройства для генерации импульсных закрученных струй жидкости обеспечивает:

1. Оптимизацию конструктивного исполнения;
2. Формирование стабильного импульсного закрученного потока;
3. Повышение эффективности процесса окорки древесины путем интенсивного воздействия на адгезионные связи между корой и лубом.

Список литературы

1. Кондратенко С.М. Способ очистки пневой древесины гидроимпульсными струями / С.М. Кондратенко // Научные революции как ключевой фактор развития науки и техники: сборник статей Международной научно-практической конференции, Киров, 27 октября 2020 года. – Уфа: ОМЕГА САЙНС, 2020. – С. 31-33.
2. Никоноров К.Н. Гидравлический способ очистки пневой древесины / К.Н. Никоноров, И.А. Полянин // В сборнике: Научному прогрессу - творчество молодых. Международная молодежная научная конференция по естественно-научным и техническим дисциплинам. ПГТУ. Йошкар-Ола. 2013. С. 39-42.

3. Полянин И.А. Очистка пневого осмола импульсными гидравлическими струями / И.А. Полянин, И.С. Марышев, Е.В. Егошин // Системы. Методы. Технологии. 2012. № 2 (14). С. 74-78.

4. Полянин И.А. Очистка пневого осмола импульсно-закрученными гидравлическими струями / И.А. Полянин, К.Н. Никоноров // Фундаментальные исследования. 2015. № 2-11. С. 2350-2355.

5. Полезная модель №68418 Устройство для создания вращающейся гидравлической струи. Российская Федерация, МПК В27L 1/00 / Е.В. Егошин, И.А. Полянин, заявитель и патентообладатель Марийский государственный технический университет, заявл. 18.12.2006, опубл. 10.05.2008. Бюл. № 1.

6. Полезная модель № 72901 Струеобразующее устройство. Российская Федерация, МПК В27L 1/14 / Е.В. Егошин, Е.М. Царев, заявитель и патентообладатель Марийский государственный технический университет, заявл. 20.07.2007, опубл. 27.11.2007. Бюл. № 33.

7. Заявка на изобретение № 2026122990 Российская Федерация Устройство для создания вращающейся гидравлической струи / Е.М. Царев, В.Е. Макаров, дата поступления (дата регистрации) 23.07.2026 г.

References

1. Kondratenok S.M. Method of cleaning stump wood with hydro-pulse jets / S.M. Kondratenok // Scientific revolutions as a key factor in the development of science and technology: collected articles from the International scientific and practical conference, Kirov, October 27, 2020. - Ufa: OMEGA SCIENCES, 2020. - Pp. 31-33.

2. Nikonorov K.N. Hydraulic method of cleaning stump wood / K.N. Nikonorov, I.A. Polyanin // In the collection: Scientific progress - creativity of the youth. International youth scientific conference on natural sciences and engineering disciplines. PSTU. Yoshkar-Ola. 2013. Pp. 39-42.

3. Polyanin I.A. Cleaning stump resin with pulsed hydraulic jets / I.A. Polyanin, I.S. Maryshev, E.V. Egoshin // Systems. Methods. Technologies. 2012. No. 2 (14). P. 74-78.

4. Polyanin I.A. Cleaning of tree stump resin with pulsed-swirling hydraulic jets / I.A. Polyanin, K.N. Nikonorov // Fundamental research. 2015. No. 2-11. P. 2350-2355.

5. Utility Model No. 68418 Device for creating a rotating hydraulic jet. Russian Federation, IPC B27L 1/00 / E.V. Egoshin, I.A. Polyanin, applicant and patent holder Mari State Technical University, declared. 18.12.2006, published. 10.05.2008. Bulletin No. 1.

6. Utility Model No. 72901 Jet-Forming Device. Russian Federation, IPC B27L 1/14 / E.V. Egoshin, E.M. Tsarev, applicant and patent holder Mari State Technical University, declared 20.07.2007, published 27.11.2007. Bulletin No. 33.

7. Invention Application No. 2026122990 Russian Federation Device for Creating a Rotating Hydraulic Jet / E.M. Tsarev, V.E. Makarov, date of receipt (date of registration) 23.07.2026.

МОДЕЛИРОВАНИЕ УСИЛИЙ ВЫРЫВАНИЯ НЕЖЕЛАТЕЛЬНОЙ РАСТИТЕЛЬНОСТИ МАНИПУЛЯТОРОМ ЛЕСНЫХ МАШИН

Платонов А.А.

*Воронежский государственный лесотехнический университет
имени Г.Ф. Морозова, Воронеж, Россия*

SIMULATION OF UNWANTED VEGETATION REMOVAL EFFORT BY FORESTRY MACHINE MANIPULATORS

Platonov A.A.

*Voronezh State University of Forestry and Technologies
named after G.F. Morozov, Voronezh, Russia*

Аннотация: Удаление нежелательной древесно-кустарниковой растительности нередко осуществляется посредством закрепления рабочего органа на манипуляторе лесных машин. В статье рассматриваются вопросы моделирования усилия вырывания деревьев и кустарников.

Abstract: Removing unwanted trees and shrubs is often accomplished by attaching a working tool to the manipulator of forestry machines. This article discusses modeling the force required to remove trees and shrubs.

Ключевые слова: нежелательная растительность, деревья, кустарники, манипулятор, вырывание, усилие, параметры.

Keywords: unwanted vegetation, trees, bushes, manipulator, uprooting, force, parameters.

Удаление нежелательно произрастающей древесно-кустарниковой растительности нередко осуществляется посредством закрепления рабочего органа (захвата) на манипуляторе лесных машин [2, 5]. Не принимая во внимание такой метод удаления растительности, как её срезание, остановимся на вырывании нежелательной растительности [8, 9].

Такой метод, как вырывание нежелательной древесно-кустарниковой растительности с корневой системой обеспечивает быстрое и качественное удаление деревьев и кустарников с расчищаемой территории [6, 7]. В силу определённого рода объективных причин с корнем удаляются (вырываются) преимущественно молодые деревья и кустарники. При этом в настоящее время чаще всего применяются захватные устройства типа «крокодил», агрегируемые нередко с трактором (Impulse SH 1200, рис. 1, а; нередко проходящие по документации под названием «Корчеватель», как в данном случае), гораздо реже встречаются устройства захватные устройства типа «клещи» (Naarva P05, рис. 1, б).



Рисунок 1 – Устройства для вырывания нежелательных деревьев и кустарников

Большое значение при этом для проектирования деталей и узлов устройств для вырывания нежелательных деревьев и кустарников имеет выявление усилия указанного вырывания. Обзором соответствующих литературных источников нами было установлено, что исследователи уделяют недостаточно внимания данному вопросу.

Основываясь на исследованиях П.М. Мазуркина [3] и В.А. Иванова [1], посвящённых биотехническому моделированию процесса удаления возрастной (20...25 лет и более) древесной растительности, находящейся в воде, можно предложить следующую, модернизированную в рамках диссертационного исследования, формулу определения усилия $F_{вр}$ (Н) вырывания нежелательной древесно-кустарниковой растительности с корневой системой и комом почвенных частиц:

$$F_{вр} = G_{ком} + F_{р\,nc} + F_{pp\,к} + F_{вт\,к} + G_{ндкр} + F_{пов} \quad (1)$$

где $G_{ком}$ – вес кома почвы, Н; $F_{р\,nc}$ – усилие разрушения глубинных почвенных слоёв при формировании кома почвы, Н; $F_{pp\,к}$ – усилие разрыва и излома корней нежелательной древесно-кустарниковой растительности, Н; $F_{вт\,к}$ – усилие вытаскивания неразорвавшихся корней нежелательной растительности, Н; $G_{ндкр} = m_{ндкр} \cdot g$ – вес ствола (стволов) экземпляра нежелательной растительности массой $m_{ндкр}$ (кг) с очищенной от кома почвы корневой системой, Н; $F_{пов}$ – усилие сопротивления поверхности почвенного слоя разрушению, Н.

Вес кома почвы $G_{ком}$ (Н), формирующегося на корнях нежелательной растительности при её вырывании, определяется с учётом площади внутренней поверхности $S_{ям}$ (мм²) и глубины $h_{ям}$ (мм) ямы, образовавшейся после удаления указанной растительности, а также плотности $\rho_{ком}$ (кг/мм³) почвенного слоя:

$$G_{ком} = S_{ям} \cdot h_{ям} \cdot \rho_{ком} \cdot g \quad (2)$$

Сила $F_{p\text{ nc}}$ (Н) разрушения почвенного слоя определяется с учётом физико-механических характеристик почвенной среды, а также случайности образования размеров и формы кома почвы на корнях выдернутой нежелательной растительности. Исходя из этого, величина силы $F_{p\text{ nc}}$ (Н) может быть определена по формуле:

$$F_{p\text{ nc}} = S_{\text{ям}} \cdot \mu_f \cdot \sigma_h \quad (3)$$

где $\mu_f = \operatorname{tg} \varphi$ – коэффициент трения, связанный с углом φ трения почвенных слоёв.

Величина напряжений в нижней части кома почвы σ_h (МПа) может быть определена по формуле [10]:

$$\sigma_h = (1 - \sin \varphi) \cdot \gamma \cdot h_{\text{ям}} \quad (4)$$

где γ – удельный вес почвенных слоёв, Н/мм³.

Величина площади внутренней поверхности $S_{\text{ям}}$ (мм²) ямы, образовавшейся после удаления нежелательной растительности, зависит от формы сформировавшегося кома почвы и в самом общем случае может быть определена по формуле:

$$S_{\text{ям}} = \int_0^{h_{\text{Zsl}}} (f_2(z) - f_1(z)) dz \quad (5)$$

где $f_2(z)$ и $f_1(z)$ – функции, описывающие границы площади поверхности кома почвы с находящейся внутри корневой системой растительности.

Таким образом, суммарно вес кома почвы $G_{\text{ком}}$ и сила $F_{p\text{ nc}}$ (Н) разрушения почвенного слоя для формирования данного кома определяются как:

$$\begin{aligned} G_{\text{ком}} + F_{p\text{ nc}} &= S_{\text{ям}} \cdot h_{\text{ям}} \cdot \rho_{\text{ком}} \cdot g + S_{\text{ям}} \cdot \mu_f \cdot \sigma_h = \\ &= \left(\int_0^{h_{\text{Zsl}}} (f_2(z) - f_1(z)) dz \right) \cdot h_{\text{ям}} \cdot (\rho_{\text{ком}} \cdot g + \mu_f \cdot (1 - \sin \varphi) \cdot \gamma) \end{aligned} \quad (6)$$

Усилие разрыва и излома $F_{pp\text{ к}}$ (Н) корней нежелательной древесно-кустарниковой растительности определяется с учётом физико-механических характеристик корневой системы:

$$F_{pp\kappa} = \sigma_{H\kappa} \cdot \left(\sum_{i=1}^{n_{\kappa cm}^p} S_{\kappa cm}^p + \sum_{j=1}^{n_{\kappa \bar{b}\kappa}^p} S_{\kappa \bar{b}\kappa}^p \right) + \tau_{\kappa} \cdot \left(\sum_{i=1}^{n_{\kappa cm}^c} S_{\kappa cm}^c + \sum_{j=1}^{n_{\kappa \bar{b}\kappa}^c} S_{\kappa \bar{b}\kappa}^c \right) \quad (7)$$

где $\sigma_{H\kappa}$ – предел прочности древесины корневой системы на разрыв, МПа; τ_{κ} – предел прочности древесины корневой системы на срез, МПа; $S_{\kappa cm}^p$ ($S_{\kappa cm}^c$) – площадь (мм²) поперечного сечения соответственно разорвавшегося (сломавшегося) стержневого корня/корней при общем количестве $n_{\kappa cm}^p$ ($n_{\kappa cm}^c$) таких корней; $S_{\kappa \bar{b}\kappa}^p$ ($S_{\kappa \bar{b}\kappa}^c$) – площадь (мм²) поперечного сечения соответственно разорвавшихся (сломавшихся) боковых корней при общем количестве $n_{\kappa \bar{b}\kappa}^p$ ($n_{\kappa \bar{b}\kappa}^c$) таких корней.

Усилие вытаскивания $F_{вт\kappa}$ (Н) неразорвавшихся корней нежелательной растительности из основного (окружающего формирующийся ком почвенных частиц) слоя почвы определяется с учётом усилия обжатия почвенными частицами вытаскиваемых корней:

$$F_{вт\kappa} = \tau_{сц} \cdot \sum S_{нов\kappa} \cdot n_{кобщ} \cdot \mu_{кп} \quad (8)$$

где $\tau_{сц}$ – среднее напряжение в почвенном слое, МПа; $\sum S_{нов\kappa}$ – суммарная площадь поверхности корней, мм²; $n_{кобщ}$ – общее количество существующих у конкретного экземпляра нежелательной растительности корней; $\mu_{кп}$ – коэффициент трения пары «корневая древесина – почва».

Площадь поверхности $S_{нов\kappa}$ одного корня нежелательной древесно-кустарниковой растительности может быть определена с учётом фактической длины корня переменного сечения. Криволинейный характер поведения поверхности корня описывается некоторой функцией $d_{\kappa} = f(l_{\kappa})$, где d_{κ} – переменное значение диаметра корня (мм), а l_{κ} – текущая координата длины корня (мм). При математическом моделировании длины одного корня принимаем, что вышеуказанная функция $d_{\kappa} = f(l_{\kappa})$ является неотрицательной и непрерывной на некотором элементарном отрезке моделируемого корня $[a, b]$, где a соответствует некоторой величине диаметра корня $d_{\kappa i-1}$, параметр b соответствует некоторой величине диаметра корня $d_{\kappa i}$, причём $d_{\kappa i-1} > d_{\kappa i}$, а индекс i соответствует количеству элементарных отрезков. С учётом переменной длины

окружности корня растительности на отрезке корня $[a, b]$, площадь поверхности $S_{нов\ к}$ корня определится как:

$$S_{нов\ к} = \pi \cdot d_{\kappa} \cdot \int_a^b \sqrt{1 + (f'(l_{\kappa}))^2} dx \quad (9)$$

Принимая во внимание то, что длина корня измеряется от его основания, формула определения площади поверхности $S_{нов\ к}$ (мм²) одного корня нежелательной растительности принимает вид:

$$S_{нов\ к} = \pi \cdot d_{\kappa} \cdot \int_0^{l_{\kappa}} \sqrt{1 + (f'(l_{\kappa}))^2} dx \quad (10)$$

С учётом вышеизложенного, суммарная площадь $\sum S_{нов\ к}$ (мм²) поверхности стержневых и боковых корней нежелательной древесно-кустарниковой растительности может быть определена с учётом количества вышеуказанных корней по формуле:

$$\sum S_{нов\ к} = \pi \cdot \left(d_{\kappa cm} \cdot \int_0^{l_{\kappa cm}} \sqrt{1 + (f'(l_{\kappa cm}))^2} dx + d_{\kappa бк} \cdot \int_0^{l_{\kappa бк}} \sqrt{1 + (f'(l_{\kappa бк}))^2} dx \right) \quad (11)$$

где $n_{\kappa cm}$ – количество основных (стержневых) корней длиной $l_{\kappa cm}$ (мм) в корневой системе нежелательной растительности; $n_{\kappa бк}$ – количество боковых корней длиной $l_{\kappa бк}$ (мм) в корневой системе нежелательной растительности.

Принимая во внимание зависимость (11) усилие вытаскивания $F_{вт\ к}$ (Н) неразорвавшихся корней определится как:

$$F_{вт\ к} = \pi \cdot \tau_{сц} \cdot n_{\kappa общ} \cdot \mu_{\kappa n} \times \left(d_{\kappa cm} \cdot \int_0^{l_{\kappa cm}} \sqrt{1 + (f'(l_{\kappa cm}))^2} dx + d_{\kappa бк} \cdot \int_0^{l_{\kappa бк}} \sqrt{1 + (f'(l_{\kappa бк}))^2} dx \right) \quad (12)$$

Усилие $F_{нов}$ (Н) сопротивления поверхности почвенного слоя определяется условиями произрастания удаляемой с поверхности ЛИО нежелательной древесно-кустарниковой растительности. В частности, указанное усилие может формироваться дополнительным сопротивлением вырыванию от корневых систем низкорастущей травянистой растительности (например, в охранной зоне

ЛЭП), от естественно присутствующих конструктивных элементов ЛИО (например, гравия балластной призмы в полосе отвода железных дорог), естественно присутствующих элементов на поверхности и под поверхностью ЛИО. Кроме того, указанное усилие формируется сопротивлением отрыва кома почвенных частиц от основной массы почвенного слоя, что характеризуется его связностью – способностью сопротивляться внешнему воздействию, направленному на разъединение почвенных частиц [4]. Связность почвенных частиц обусловлена действующими силами сцепления между данными частицами и зависит от гранулометрического и минералогического состава почвенного слоя, его структурного состояния и влажности.

Таким образом, усилие $F_{\text{вп}}$ (Н) вырывания нежелательной древесно-кустарниковой растительности с корневой системой и комом почвенных частиц определится по зависимости:

$$\begin{aligned}
 F_{\text{вп}} = & \left(\int_0^{h_{\text{Zsl}}} (f_2(z) - f_1(z)) dz \right) \cdot h_{\text{ям}} \cdot (\rho_{\text{ком}} \cdot g + \mu_f \cdot (1 - \sin \varphi) \cdot \gamma) + \\
 & + \sigma_{\text{Нк}} \cdot \left(\sum_{i=1}^{n_{\text{ксм}}^p} S_{\text{ксм}}^p + \sum_{j=1}^{n_{\text{кбк}}^p} S_{\text{кбк}}^p \right) + \tau_{\text{к}} \cdot \left(\sum_{i=1}^{n_{\text{ксм}}^c} S_{\text{ксм}}^c + \sum_{j=1}^{n_{\text{кбк}}^c} S_{\text{кбк}}^c \right) + \\
 & + m_{\text{ндкр}} \cdot g + \pi \cdot \tau_{\text{сц}} \cdot n_{\text{кобщ}} \cdot \mu_{\text{кп}} \times \\
 & \times \left(d_{\text{ксм}} \cdot \int_0^{l_{\text{ксм}}} \sqrt{1 + (f'(l_{\text{ксм}}))^2} dx + d_{\text{кбк}} \cdot \int_0^{l_{\text{кбк}}} \sqrt{1 + (f'(l_{\text{кбк}}))^2} dx \right) + F_{\text{нов}}
 \end{aligned} \quad (13)$$

Полученное нами выражение усилия вырывания нежелательной древесно-кустарниковой растительности с корневой системой и комом почвенных частиц позволит более эффективно выполнять проектирование деталей и узлов устройств для вырывания нежелательных деревьев и кустарников.

Список литературы

1. Иванов В.А. Моделирование процесса заготовки деревьев, стоящих в воде / В.А. Иванов // Вестник КрасГАУ. – 2007. – № 3. – С. 54-55.
2. Имитационная модель рабочего процесса манипулятора при удалении нежелательной растительности вместе с корневой системой в лесных насаждениях / П.И. Попиков, Л.Д. Бухтояров, А.А. Платонов, Е.Ю. Вакула // Resources and Technology. – 2020. – Т. 17, № 4. – С. 1-14. – DOI: 10.15393/j2.art.2020.5402.
3. Мазуркин П.М. Биотехническое проектирование / П.М. Мазуркин. – Йошкар-Ола: МарПИ, 1994. – 348 с.
4. Обработка почвы: учеб. пособие / Б.И. Тарасенко [и др.]. – Краснодар: КубГАУ, 2015. – 176 с.
5. Патент № 2780834 С1 Российская Федерация, МПК А01G 23/02, В66С 1/68. Манипулятор лесохозяйственной машины: № 2022111654: заявл.

28.04.2022: опубл. 04.10.2022 / А.А. Платонов, М.В. Драпалюк, Р.В. Юдин, С.В. Зимарин; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова».

6. Платонов А.А. Особенности формирования капитальных вложений для создания систем машин удаления нежелательной растительности / А.А. Платонов, О. В. Терновская // Лесотехнический журнал. – 2020. – Т. 10, № 3(39). – С. 164-174. – DOI: 10.34220/issn.2222-7962/2020.3/16.

7. Платонов А.А. Специализированные машины обеспечения работ по удалению растительности на территориях инфраструктурных объектов / А.А. Платонов // Актуальные проблемы современного транспорта. – 2021. – № 2(5). – С. 5-11.

8. Платонова М.А. К исследованию кинематических схем манипуляторов машин для удаления нежелательной растительности / М.А. Платонова, М.В. Драпалюк, А.А. Платонов // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. – 2015. – Т. 3, № 5-2(16-2). – С. 108-112. – DOI 10.12737/15982.

9. Платонова М.А. Кинематические схемы манипуляторов для удаления нежелательной древесно-кустарниковой растительности в плане полосы отвода железных дорог / М.А. Платонова, М.В. Драпалюк, А.А. Платонов // Лесотехнический журнал. – 2015. – Т. 5, № 3(19). – С. 228-234. – DOI: 10.12737/14651.

10. Huang Q. Development of a simplified method for efficient assessment of tree uprooting resistance from large-deformation numerical parametric analyses on root system architecture / Q. Huang, Y. Wang, A.K. Leung [et al] // Plant Soil. – 2025. <https://doi.org/10.1007/s11104-025-07513-4>

References

1. Ivanov V.A. Modeling the Process of Harvesting Trees Standing in Water. V.A. Ivanov, Vestnik KrasSAU, 2007, № 3, pp. 54-55.

2. Simulation Model of the Manipulator's Work Process When Removing Unwanted Vegetation and the Root System in Forest Plantations. P.I. Popikov, L.D. Bukhtoyarov, A.A. Platonov, E.Yu. Vakula Resources and Technology, 2020, № 17, pp. 1-14. DOI: 10.15393/j2.art.2020.5402.

3. Mazurkin, P.M. Biotechnical Design. – Yoshkar-Ola: MarPI, 1994. – 348 p.

4. Soil cultivation: textbook / B.I. Tarasenko [et al.]. – Krasnodar: KubSAU, 2015. – 176 p.

5. Patent № 2780834 C1 Russian Federation, IPC A01G 23/02, B66C 1/68. Forestry machine manipulator: No. 2022111654: declared 28.04.2022: published 04.10.2022 / А.А. Платонов, М.В. Драпалюк, Р.В. Юдин, С.В. Зимарин; applicant Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Voronezh State Forest Engineering University named after G.F. Morozov».

6. Platonov A.A. Features of the formation of capital investments for the creation of systems of machines for removing unwanted vegetation / A.A. Platonov, O.V. Ternovskaya // Forestry journal. - 2020. - Vol. 10, № 3 (39). – pp. 164-174. – DOI: 10.34220/issn.2222-7962/2020.3/16.

7. Platonov A.A. Specialized machines for supporting works on removing vegetation on the territories of infrastructure facilities / A.A. Platonov // Actual problems of modern transport. – 2021. – № 2 (5). – pp. 5-11.

8. Platonova M.A. On the study of kinematic schemes of manipulators of machines for removing unwanted vegetation / M.A. Platonova, M.V. Drapalyuk, A.A. Platonov // Current trends in scientific research in the 21st century: theory and practice. – 2015. – Vol. 3, № 5-2 (16-2). – pp. 108-112. – DOI: 10.12737/15982.

9. Platonova M.A. Kinematic schemes of manipulators for removing unwanted trees and shrubs in the plan of the right-of-way of railways / M.A. Platonova, M.V. Drapalyuk, A.A. Platonov // Forestry journal. – 2015. – Vol. 5, № 3 (19). – pp. 228-234. – DOI: 10.12737/14651.

10. Huang Q. Development of a simplified method for efficient assessment of tree uprooting resistance from large-deformation numerical parametric analyzes on root system architecture / Q. Huang, Y. Wang, A.K. Leung [et al] // Plant Soil. – 2025. <https://doi.org/10.1007/s11104-025-07513-4>

ОБЗОР СОВРЕМЕННЫХ КОНСТРУКЦИЙ ЛЕСОПОЖАРНЫХ ГРУНТОМЕТОВ

Поляков В.А., Малюков С.В., Малюкова М.А.

*Воронежский государственный лесотехнический университет
имени Г.Ф. Морозова, Воронеж, Россия*

REVIEW OF MODERN DESIGNS OF FOREST FIRE-FIGHTING SOIL THROWERS

Polyakov V.A., Malyukov S.V., Malyukova M.A.

*Voronezh State University of Forestry and Technologies
named after G.F. Morozov, Voronezh, Russia*

Аннотация: В данной статье проводится анализ современных конструкций грунтометательных устройств, выявленных в патентных документах. Их ключевой объединяющий признак – наличие активных рабочих органов, задача которых заключается в последовательном выполнении двух операций: рыхлении поверхностного слоя почвы и его метании в зону горения.

Abstract: This article analyzes modern designs of similar devices, as identified in patent documents. Their key unifying feature is the presence of active working elements, whose task is to sequentially perform two operations: loosening the surface soil layer and throwing it into the combustion zone.

Ключевые слова: грунтомет, лесные пожары, конструкция, грунтометательная машина, активный рабочий орган, рыхление почвы.

Keywords: soil thrower, forest fires, design, soil throwing machine, active working element, soil loosening.

Лесные пожары являются одной из наиболее быстрорастущих глобальных угроз. По данным Программы ООН по окружающей среде (UNEP), к 2030 году число экстремальных пожаров возрастёт на 14 %, а к концу столетия – на 50 % [1]. Ежегодно пожары охватывают от 340 до 383 млн. га земной поверхности (данные FAO) [2]. Согласно анализу международной группы учёных, опубликованному в журнале Nature Reviews Earth & Environment, 2025 год стал самым дорогостоящим в истории по страховым убыткам от лесных пожаров: только пожары в Лос-Анджелесе нанесли ущерб в 140 млрд. долл. США [3]. В России ущерб от лесных пожаров также остаётся крайне высоким: по данным МЧС, в 2024 году он составил 16 млрд. руб., а в 2023 году превышал 22 млрд. руб. [4]. При этом наблюдается смещение крупных пожаров в регионы с густыми лесами и населёнными территориями, где традиционные показатели (площадь выжженных земель) перестают отражать реальный уровень опасности [5].

В этих условиях возрастает потребность в эффективных и экономичных средствах тушения. Грунтометательные машины позволяют создавать минерализованные полосы и локализовать кромку пожара без использования воды, что особенно важно в засушливых районах и при ограниченных ресурсах. В данной статье проводится анализ современных конструкций подобных устройств, выявленных в патентных документах.

В настоящее время есть много разных видов тракторных грунтометов [5, 6, 7]. Все они работают по сходному принципу: у них есть вращающиеся детали, которые сначала взрыхляют верхний слой земли, а затем бросают эту землю в огонь.

В патенте [5] описана машина для тушения пожаров, которая засыпает огонь землей. Она собрана из отдельных блоков (модулей), и в ней есть три главные части (рис. 1): отвал – он срезает верхний слой земли; фреза – она измельчает эту землю; центробежный метатель – он с большой силой разбрасывает грунт на огонь. Эти блоки можно ставить на машину все вместе или использовать по одному – как удобнее работать в конкретной ситуации.

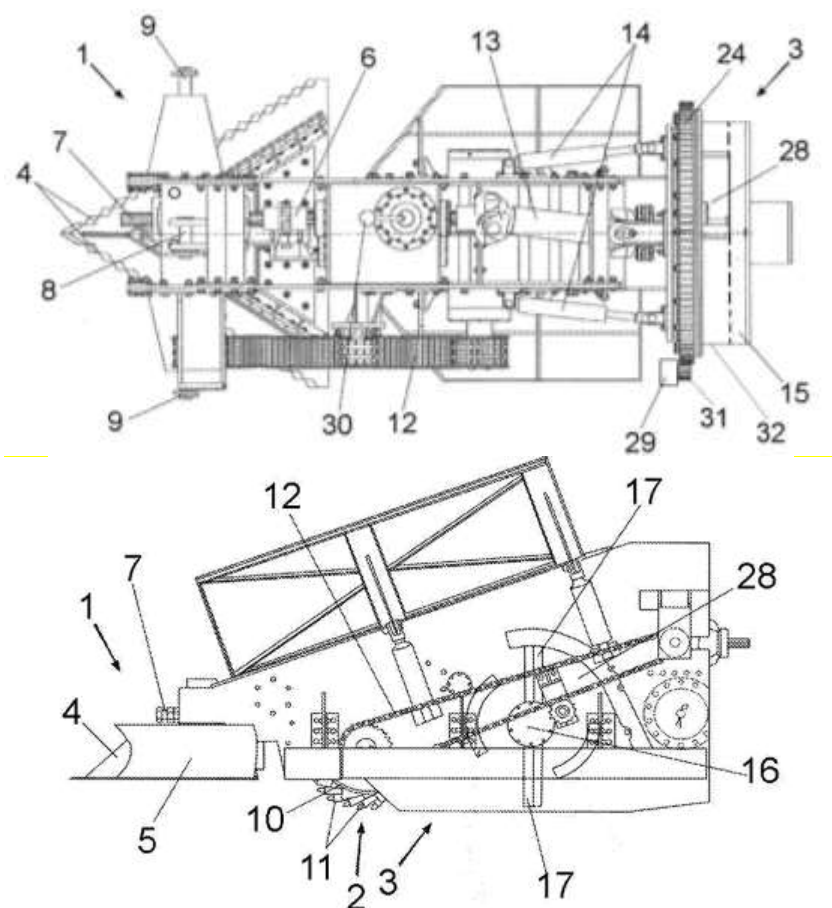


Рисунок 1 – Общий вид машины

Общий вид машины представлен на рисунке 1. Ее рабочие части установлены друг за другом. Спереди находится нож с зубчиками 4 и боковыми отвалами 5 (крыльями). Он срезает кусты, траву и другую растительность. За ним расположена фреза 10 со сменными зубцами 11. Она взрыхляет землю и разбивает её на мелкие куски. Сзади стоит метатель 3. Это тяжелый вращающийся

диск 15 (маховик) с лопатками по краям 17, который спрятан в закрытый корпус. В этом корпусе есть выходное окно 28, размер которого можно менять: оно выбрасывает измельченный грунт наружу.

Машина работает следующим образом: трактор едет вперед, его рабочие органы последовательно подключаются к работе. Сначала нож срезает кусты. Затем фреза опускается в почву, перемалывает её и отправляет на вращающиеся лопатки метателя. Тот под действием быстрого вращения с силой выбрасывает грунт через специальное окно прямо на огонь. Это окно можно поворачивать во все стороны (на 360 градусов) при помощи гидроцилиндров 14, тем самым, менять угол выбрасывания грунта. Благодаря этому поток грунта удастся направить очень точно. Существует также комбинированный вариант устройства: когда на края того самого тяжелого диска (маховика) ставят зубья. В этом случае один блок сразу и выкапывает, и кидает землю.

Плюсы машины: её можно собирать из отдельных блоков и подстраивать под разные тракторы; можно очень точно направлять поток земли: поворачивать его по горизонтали во все стороны и менять наклон вверх-вниз; она работает очень быстро – способна перебрасывать до 500 тонн грунта в час.

Минусы машины: земля летит не слишком далеко, поэтому машину сложно использовать для тушения крон деревьев при больших верховых пожарах; эффективность сильно зависит от того, какая именно земля попалась: твердая глина или мягкий песок; зубья и лопатки быстро ломаются и стираются от трения; вибрация ножа для срезания кустов передается на всю машину; чтобы работали все три части одновременно, нужен очень мощный трактор; сложно настроить работу так, чтобы фреза и метатель крутились слаженно; машина неповоротливая и может перевернуться на склоне холма; перед началом работы нужно вручную убирать крупные деревья.

Лесопожарный грунтомет, представленный на рис. 2 [6] – это оборудование, которое крепится на самоходную платформу с дистанционным управлением и тушит огонь грунтом. По своей конструкции он состоит из трех главных рабочих частей.

Первая часть – это узел для забора почвы. В передней части машины установлен вращающийся барабан 20. На него монтируют рабочие органы 24 под конкретный тип почвы: если земля твердая – крепят мотыжные ножи; если участок зарос травой и дерном – ставят измельчающие ножи; если грунт рыхлый или песчаный – используют ковши. Вращающийся барабан 20 перемалывает почву и подает её дальше в приемную камеру 30. Внутри камеры находится второй главный узел – быстро вращающийся дисковый метатель 40. Он состоит из диска 42, на котором закреплены лопатки 44, расходящиеся от центра лучами. Из-за быстрого вращения возникает центробежная сила. Она с силой разгоняет частицы земли к выходному отверстию, которое расположено сверху камеры. Чтобы грунт не разлетался в разные стороны во время броска, весь этот механизм закрыт направляющим кожухом 36. Затем грунт попадает в третий узел – поворотный желоб 60. Благодаря тому, что он сидит на поворотном хомуте 62, выброс можно направить в любую сторону.

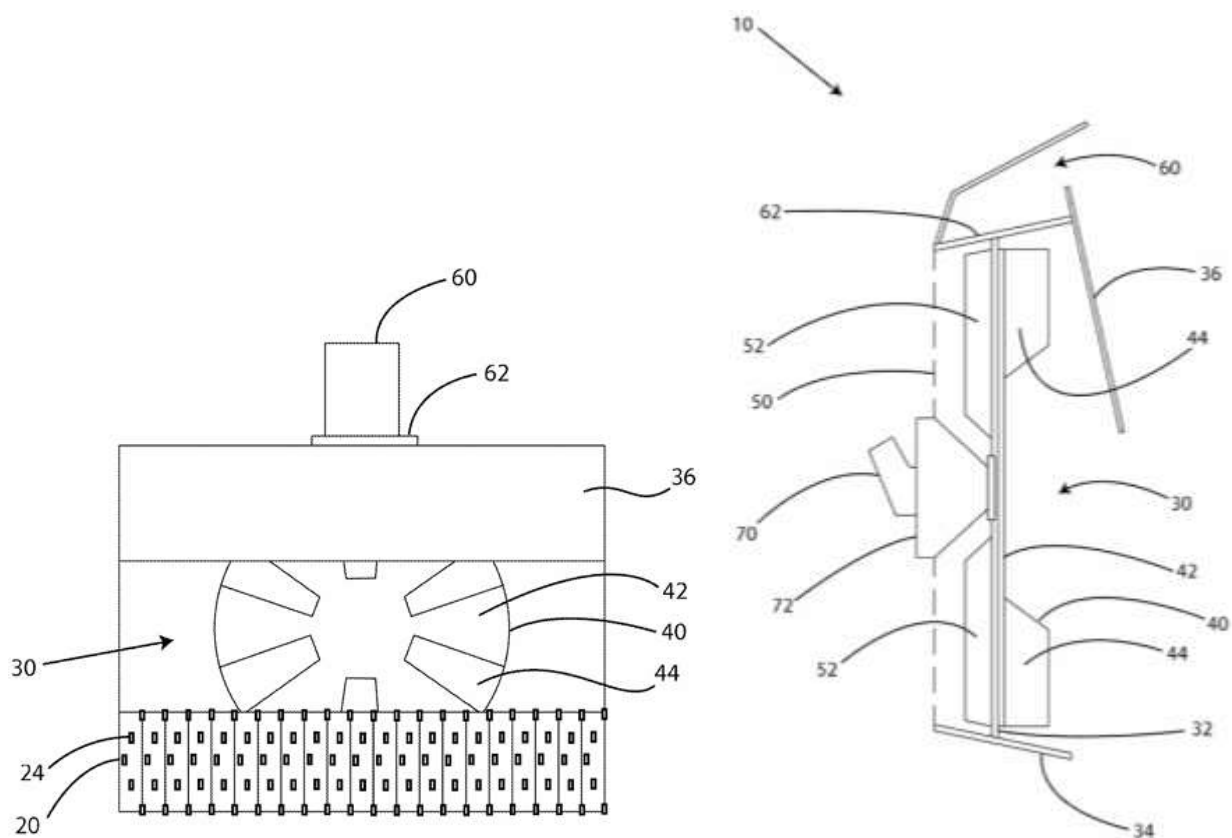


Рисунок 2 – Общий вид машины

Чтобы частицы грунта вылетали из трубы дальше и быстрее, внутри стоит осевой вентилятор 50 с лопастями 52. Он создает сильный поток воздуха, который буквально выдувает грунт из желоба. За движение всего оборудования отвечает двигатель 70 с редуктором 72. Работать эта система может от гидравлики, электричества или от вала отбора мощности (ВОМ) трактора.

У данной машины есть несколько преимуществ:

- безопасность для человека: она работает на дистанционном управлении, поэтому оператору не нужно находиться рядом с огнем и рисковать жизнью;
- многофункциональность: устройство умеет не только тушить уже горящий лес. Им можно создавать минерализованные полосы, предназначенные для ограничения дальнейшего распространения пожара. Также машиной можно обрабатывать выгоревшие места для профилактики;
- экологичность: машина использует обычный грунт, а не химикаты, поэтому она не вредит окружающей среде.

Главные недостатки конструкции: эффективность падает на неподходящей или сырой почве, грунт выбрасывается лишь на малое расстояние, аппарат требует больших затрат мощности, а ножи и лопатки ломаются при ударе о камни или древесные остатки.

Электрическая машина для метания грязи показана на рис. 3 [7]. По форме она напоминает черепаху, её задача – останавливать и тушить пожары в лесах и степях. Машина построена на гусеничном ходу. Внутри её железной рамы 1 находится бак для грязи 4, по форме похожий на черепаху. В этом же баке спрятаны аккумуляторы 8 и кабина водителя 5 с приборами управления.

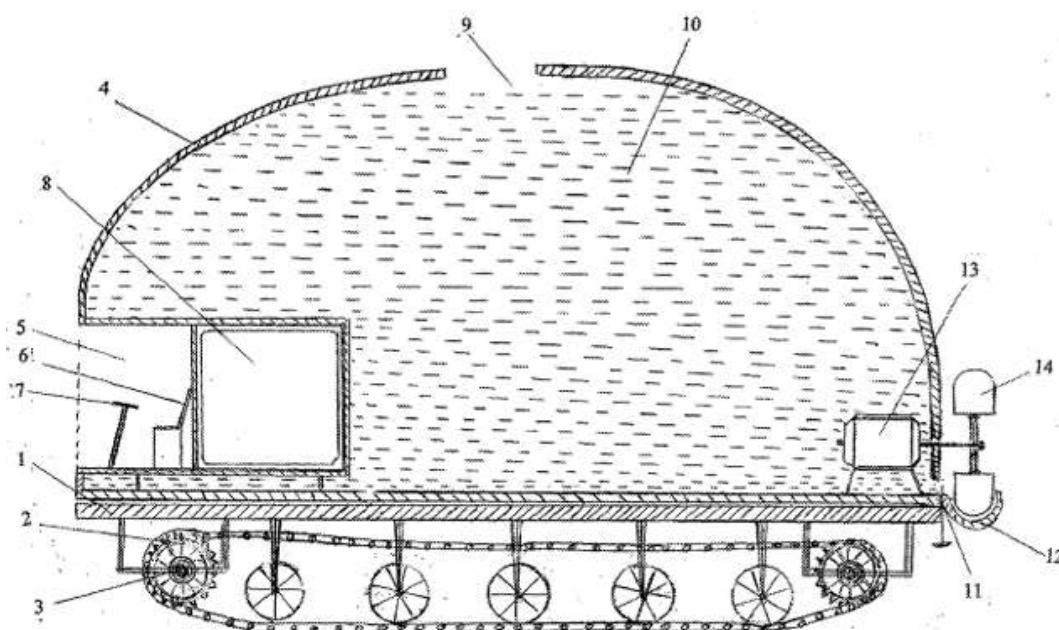


Рисунок 3 – Общий вид черепахообразной машины

Спереди бака симметрично (одинаково слева и справа) стоят два рабочих блока. Каждый из них состоит из: выпускного отверстия с краном 11; ковша, в который собирается грязь 12; электродвигателя средней мощности 13; лопатки-метателя 14. Правый и левый двигатели крутятся навстречу друг другу. Благодаря этому они одновременно выбрасывают потоки грязи в разные стороны – один вправо, другой влево.

Машина работает следующим образом: когда она приезжает на место пожара, водитель открывает краны. Грязь стекает в ковши и подхватывается вращающимися лопатками, которые разбрасывают её вокруг. Сначала грязь летит по краю огня, покрывая деревья, кусты и траву сплошным слоем – получается «грязевая одежда». Затем поток направляют прямо в пламя. Слой грязи перекрывает огню доступ к кислороду и гасит его, а также накрывает горящие материалы, чтобы они не загорелись снова.

Главные преимущества машины:

- надежная защита: кабина, где сидит водитель, и блок с электроникой покрыты слоем грязи. Это надежно защищает и людей, и оборудование от огня;
- безопасность для природы: машина использует только обычный грунт без каких-либо химических добавок, поэтому она не наносит вреда окружающей среде;
- быстрота: устройство может начать работу сразу после прибытия к месту пожара;
- независимость: электрический двигатель работает автономно – машине не нужны внешние источники питания или заправка топливом в процессе тушения.

К слабым сторонам относятся:

- необходимость частой дозаправки из-за небольшого бака;
- падение эффективности в плохую погоду (ветер, ливень, мороз);
- дороговизна и сложность самой конструкции и её обслуживания;

– риск завязнуть на труднопроходимой местности;
– недостаточная дальность выброса для борьбы с огнем в кронах деревьев, а также риск испортить состав грунта при слишком частом использовании аппарата.

Анализ современных патентов на лесопожарные грунтометы показывает: несмотря на то, что эти машины постоянно совершенствуют, одной идеальной модели, которая подходила бы для любых условий, пока не создали. Большинство новых разработок строится по одному принципу из двух шагов. Сначала вращающиеся детали взрывают верхний слой земли, а затем с силой выбрасывают её в огонь – либо за счет быстрого вращения (центробежная сила), либо мощной струей воздуха (пневматика). При этом инженеры стараются сделать технику сборной (модульной), управляемой на расстоянии и работающей от электричества или гидравлики вместо обычного топлива. Основными достоинствами рассмотренных машин являются экологическая безопасность, многофункциональность и гибкость компоновки, однако системными недостатками остаются сильная зависимость от физико-механических свойств и влажности грунта, ограниченная дальность выброса, быстрый износ рабочих органов, высокая энергоёмкость и конструктивная сложность.

Список литературы

1. UNEP & GRID-Arendal. Spreading like Wildfire: The Rising Threat of Extraordinary Landscape Fires. 2022. – URL: <https://www.unep.org/resources/report/spreading-wildfire-rising-threat-extraordinary-landscape-fires>.
2. FAO. The State of the World's Forests 2024 – URL: <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/4f3805ab-dff5-4aef-b34b-251f0e709c98/content/src/html/climate-change-abiotic-biotic.html>.
3. Jones M.W. et al. Climate Chronicles: Wildfire Year in Review 2025. Nature Reviews Earth & Environment, 2026 – URL: <https://www.eurekalert.org/news-releases/1129921>.
4. МЧС России. Данные об ущербе от пожаров за 2023-2024 гг. (цит. по «Коммерсантъ») – URL: <https://www.kommersant.ru/doc/7404113>.
5. Патент на изобретение № WO 2018/029391 A1, Machine for extinguishing fires / Abascal Zuloaga, Jose Manuel.
6. Патент на изобретение № US 2021/0260424 A1, Robotic fire fighter / Joseph Paul Schembri.
7. Патент на изобретение № CN 109331375 A, 泥浆森林草原防火灭火龟形电动电浆车/ 康绍汤.

References

1. UNEP & GRID-Arendal. Spreading like Wildfire: The Rising Threat of Extraordinary Landscape Fires. 2022. – URL: <https://www.unep.org/resources/report/spreading-wildfire-rising-threat-extraordinary-landscape-fires>.

2. FAO. The State of the World's Forests 2024 – URL: <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/4f3805ab-dff5-4aef-b34b-251f0e709c98/content/src/html/climate-change-abiotic-biotic.html>.
3. Jones M.W. et al. Climate Chronicles: Wildfire Year in Review 2025. Nature Reviews Earth & Environment, 2026 – URL: <https://www.eurekalert.org/news-releases/1129921>.
4. EMERCOM of Russia. Data on fire damage for 2023–2024 (cited by «Kommersant»). – URL: <https://www.kommersant.ru/doc/7404113>.
5. Patent for an invention № WO 2018/029391 A1, Machine for extinguishing fires / Abascal Zuloaga, Jose Manuel.
6. Patent for an invention № US 2021/0260424 A1, Robotic fire fighter / Joseph Paul Schembri.
7. Patent for an invention № CN 109331375 A, 泥浆森林草原防火灭火龟形电动甩浆车/ 康绍汤.

РАЗРАБОТКА УТОЧНЕННЫХ НОРМ ВРЕМЕНИ НА ВЫПОЛНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ЩЕЛЕВОГО ДРЕНИРОВАНИЯ

Саая С.С.Ш.

*Воронежский государственный лесотехнический университет
имени Г.Ф. Морозова, Воронеж, Россия*

DEVELOPMENT OF REFINED TIME STANDARDS FOR EXECUTING THE TECHNOLOGICAL PROCESS OF SLOT DRAINAGE

Saaya S.S.Sh.

*Voronezh State University of Forestry and Technologies
named after G.F. Morozov, Voronezh, Russia*

Аннотация: Выполнение работ по лесовосстановлению целесообразно осуществлять с применением новых щеледренажных машин и механизмов. В статье рассматриваются вопросы нормирования времени на выполнение технологического процесса щелевого дренирования для подготовки заболоченных участков под посадку лесных культур.

Abstract: Reforestation work should be carried out using new slit drainage machines and mechanisms. This article examines the time requirements for slit drainage technology to prepare wetlands for planting forest crops.

Ключевые слова: лесовосстановление, заболоченные участки, дренирование, машины, технологический процесс, время, нормирование.

Keywords: reforestation, wetlands, drainage, machines, technological process, time, standardization.

Территория России характеризуется наличием значительных лесных территорий, почвенный покров которых отличается избыточной увлажненностью, а сами территории нередко являются при этом заболоченными. К землям лесного фонда относится 232,1 млн. га, при этом по сведениям [1] болота в лесном фонде России занимают более 12 % территории, по некоторым данным превышают 20 % [2], в лесах заболоченные земли занимают более 220 млн. га, а на болота приходится более 100 млн. га [3], при этом для таежной зоны Западной Сибири 40...50%. Значительная часть, преимущественно олиготрофных болот, вообще безлесна, при этом успешному восстановлению леса мешает только избыток воды.

Одним из наиболее эффективных способов повышения эффективности лесовосстановления [4] на переувлажненных (в том числе – заболоченных) землях лесного фонда является проведение гидротехнической лесомелиорации. В условиях длительного затопления или близкого залегания грунтовых вод формируются неблагоприятные факторы для роста и развития древесно-

кустарниковой растительности: корни молодых саженцев страдают в анаэробных (блокирующих доступ кислорода к корням растений) условиях, что приводит к быстрому загниванию корневой системы. Основные методы осушения заболоченных и избыточно увлажненных земель представлены на рис. 1.

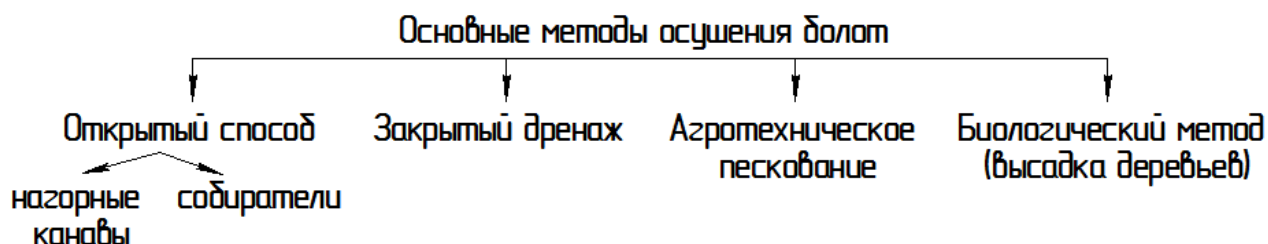


Рисунок 1– Основные методы осушения заболоченных и избыточно увлажненных земель

Анализ исследований в рассматриваемой предметной области выявил, что наиболее экологически безопасным для окружающей среды и экономически целесообразным способом осушения лесных заболоченных и избыточно увлажненных земель с целью дальнейшей посадки лесных культур является щелевой дренаж, представляющий собой вырезанные в почве щели (рис. 2, а). Конструкции щеледренажных машин чрезвычайно разнообразны ввиду большого различия предъявляемых к ним технических требований [5], при этом по типам рабочих органов машины можно классифицировать на несколько групп: цепные, винтовые (шнековые) и дискофрезерные, а также с пассивными рабочими органами [6]. Перспективными представляются щеледренажные машины с цепными рабочими органами [7] (рис. 2, б).



Рисунок 2 – Щеледренажные машины с цепными рабочими органами

В настоящее время существуют различные апробированные технологические схемы нарезания щелевых дрен, при этом в рамках выполнения диссертационного исследования [8] нами была разработана «челночная» схема дренирования, описание которой не входит в цели и задачи данной статьи.

Нормы времени на выполнение технологического процесса [9] щелевого дренирования для подготовки заболоченных участков под посадку лесных культур включают рабочие ходы (нарезание продольных и поперечных дрен) и технологические перерывы (подготовка щеледренажной машины к работе, пе-

реезды, установка нового цепного органа). Разработка указанных норм ведётся с учётом среднего времени на выполнение операций, скорости движения щеледренажной машины, длины дрен и организационных затрат времени. При этом учитываются следующие этапы:

1. «Производительный ход. Нарезание продольных щелевых дрен»;
2. «Производительный ход. Нарезание поперечных щелевых дрен»;
3. «Непроизводительный ход. Установка щеледренажной машины на трассу продольных щелевых дрен»;
4. «Непроизводительный ход. Установка щеледренажной машины на трассу поперечных щелевых дрен».

Нормируемые затраты времени на выполнение каждого этапа определяются следующим образом. Для этапов 1 и 2 учитываются средние скорости $V_{1\text{сред}}$ и $V_{2\text{сред}}$ (м/с) нарезания щеледренажной машиной соответственно продольных и поперечных дрен, при этом принимаются во внимание длины L_1 и L_2 (м) одной продольной и поперечной дрены. Средние величины времени $T_{1\text{сред}}$ и $T_{2\text{сред}}$ (с), затраченные на нарезание соответственно одной продольной и поперечной дрены определяются как:

$$T_{1\text{сред}} = \frac{L_1}{V_{1\text{средн}}}; \quad T_{2\text{сред}} = \frac{L_2}{V_{2\text{средн}}} \quad (1)$$

При необходимости выявления общего времени на все продольные и поперечные дрены учитывается общее количество таких дрен (соответственно, $N_{\text{др}}^{\text{пр}}$ и $N_{\text{др}}^{\text{поп}}$), при этом средние величины времени $T_{1\text{сред}}^{\text{пр}}$ и $T_{2\text{сред}}^{\text{поп}}$ (с), затраченные на нарезание соответственно всех продольных и поперечных дрен определяются как:

$$T_{1\text{сред}}^{\text{пр}} = N_{\text{др}}^{\text{пр}} \cdot \frac{L_1}{V_{1\text{средн}}}; \quad T_{2\text{сред}}^{\text{поп}} = N_{\text{др}}^{\text{поп}} \cdot \frac{L_2}{V_{2\text{средн}}} \quad (2)$$

Для этапов 3 и 4 (их чередование зависит от принятой схемы дренирования) учитываются затраты времени $T_{3\text{сред}}$ и $T_{4\text{сред}}$ (с) на подъём нового цепного рабочего органа в транспортное положение $T_{\text{под РО}}$ (с); переезд щеледренажной машины на новую трассу $T_{\text{пер уцм}}^{\text{пр}} = L_{\text{уцм}}^{\text{пр}}/V_{\text{д}}$ и $T_{\text{пер уцм}}^{\text{поп}} = L_{\text{уцм}}^{\text{поп}}/V_{\text{д}}$ (с; учитываются длины переезда $L_{\text{уцм}}^{\text{пр}}$ и $L_{\text{уцм}}^{\text{поп}}$ до начала новой продольной или поперечной дрены, м, и скорость движения машины, м/с); заглубление $T_{\text{згл РО}}$ (с) нового цепного органа для начала работы по нарезанию дрены [10]:

$$\begin{cases} T_{3\text{сред}} = T_{\text{под РО}} + T_{\text{пер уцм}}^{\text{пр}} + T_{\text{згл РО}} \\ T_{4\text{сред}} = T_{\text{под РО}} + T_{\text{пер уцм}}^{\text{поп}} + T_{\text{згл РО}} \end{cases} \quad (3)$$

При необходимости выявления общего времени на все продольные и поперечные дрены средние величины времени $T_{3\text{сред}}^{np}$ и $T_{4\text{сред}}^{non}$ (с), затраченные на установку щеледренажной машины на трассу продольных (поперечных) щелевых дрен определяются как:

$$\begin{cases} T_{3\text{сред}}^{np} = N_{\partial p}^{np} \cdot (T_{\text{под } PO} + T_{\text{пер } \text{щм}}^{np} + T_{\text{згл } PO}) \\ T_{4\text{сред}}^{non} = N_{\partial p}^{non} \cdot (T_{\text{под } PO} + T_{\text{пер } \text{щм}}^{non} + T_{\text{згл } PO}) \end{cases} \quad (4)$$

Кроме рабочего времени, необходимо учитывать организационные и технологические перерывы в нарезании щелевых дрен $T_{5\text{сред}}$, которые могут включать затраты времени для технического ухода за щеледренажной машиной и новым цепным рабочим органом в начале и в конце смены, а также в течение смены (осмотр, крепление, смазка, запуск до начала работы, очистка); затраты времени на заправку двигателя щеледренажной машины ГСМ и техническими жидкостями; на получение оператором указаний по особенностям выполнения технологического процесса; на переезды щеледренажной машины с участка на участок в течение смены; на отдых и личные надобности оператора время на отдых и личные надобности принимается в размере 10 % от нормируемых затрат, независимо от фактически затраченного времени).

С учетом вышеизложенного, производительность работы щеледренажной машины с цепным рабочим органом $W_{\text{щм}}$ (м/ч) определяется по выражению:

$$W_{\text{щм}} = \frac{3600 \cdot (N_{\partial p}^{np} \cdot L_1 + N_{\partial p}^{non} \cdot L_2)}{T_{1\text{сред}}^{np} + T_{2\text{сред}}^{non} + T_{3\text{сред}}^{np} + T_{4\text{сред}}^{non} + T_{5\text{сред}}} \quad (5)$$

Если учитывается глубина H_b (м) и ширина $B_{\text{дщ}}$ (м) дренажной щели, то производительность работы щеледренажной машины с цепным рабочим органом $W_{\text{щм}}$ (м³/ч) определится как:

$$W_{\text{щм}} = \frac{3600 \cdot (N_{\partial p}^{np} \cdot L_1 + N_{\partial p}^{non} \cdot L_2) \cdot H_b \cdot B_{\text{дщ}}}{T_{1\text{сред}}^{np} + T_{2\text{сред}}^{non} + T_{3\text{сред}}^{np} + T_{4\text{сред}}^{non} + T_{5\text{сред}}} \quad (6)$$

Коэффициент непрерывности технологического процесса нарезания продольных и поперечных щелевых дрен определяется по выражению:

$$K_n = \frac{T_{1\text{сред}}^{np} + T_{2\text{сред}}^{non}}{T_{\text{общ}}} \quad (7)$$

где $T_{\text{общ}} = T_{1\text{сред}}^{np} + T_{2\text{сред}}^{non} + T_{3\text{сред}}^{np} + T_{4\text{сред}}^{non} + T_{5\text{сред}}$ – общее время, затраченное на нарезание всех продольных и поперечных дрен (продолжительность смены), ч;

Коэффициент использования $K_{\text{щм}}^{\text{исп}}$ щеледренажной машины с цепным ра-

бочим органом в течение смены определяется по выражению:

$$K_{\text{цм}}^{\text{исп}} = \frac{T_{1 \text{ сред}}^{\text{нр}} + T_{2 \text{ сред}}^{\text{ноп}} + T_{3 \text{ сред}}^{\text{нр}} + T_{4 \text{ сред}}^{\text{ноп}}}{T_{\text{общ}}} \quad (8)$$

С учетом коэффициента использования $K_{\text{цм}}^{\text{исп}}$ щеледренажной машины с цепным рабочим органом, норма времени (ч) на 100 м нарезания щелевой дрены новым цепным рабочим органом определится следующим образом:

$$H_{\text{РО}} = \frac{1}{W_{\text{цм}} \cdot K_{\text{цм}}^{\text{исп}}} \quad (9)$$

Таким образом, расчет производительности щеледренажной машины с цепным органом в разрезе сезонности (зима/лето) и используемых технологий позволит решить две ключевые задачи: создать регламентированные технологические карты и сформировать объективную систему нормирования труда и оплаты для работ по осушению лесных заболоченных и избыточно увлажненных земель с целью дальнейшей посадки лесных культур.

Список литературы

1. Бабилов Б.В. Формирование и динамика биотопа культур сосны на торфяных почвах после гидромелиорации / Б.В. Бабилов, М.Б. Субота // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. – 2020. – № 4(376). – С. 27-39
2. Лесная энциклопедия: В 2-х т. / под ред. Г.И. Воробьева; Ред. кол.: Анушин Н.А., Атрохин В.Г., Виноградов В.Н. и др. – М: Сов. энциклопедия, 1985-1986. – 1194 с.
3. Брель В.К. Принципы организации и ведения учета мелиорированных земель в современных условиях / В.К. Брель, В.А. Шадских, Л.Г. Романова // Мелиорация и водное хозяйство. – 2013. – № 4. – С. 8-10.
4. Платонов А.А. Комплексное управление лесной растительностью: этапы и перспективы развития / А.А. Платонов // Лесотехнический журнал. – 2023. – Т. 13, № 2(50). – С. 142-157. – DOI 10.34220/issn.2222-7962/2022.3/8.
5. Мажугин Е.И. Мелиоративные машины / Е.И. Мажугин, А.Л. Казаков. – Горки: Изд-во БелГСХА, 2018. – 307 с.
6. Орловский С.Н. Определение энергетических и динамических параметров тракторов, режимов резания активных рабочих органов машин-но-тракторных агрегатов: моногр. / С.Н. Орловский. – Красноярск: Красноярский государственный аграрный университет, 2011. – 375 с.
7. Саая С.С.Ш. Повышение эффективности щелевого дренажа путем обоснования режима работы щеледренажных машин / С.С.Ш. Саая, С.Н. Орловский, С.Н. Долматов // Системы. Методы. Технологии. – 2024. – № 4(64). – С. 105-112. – DOI: 10.18324/2077-5415-2024-4-105-112.
8. Платонов А.А. Формирование водоотводящих дренажных систем: цели, задачи, оборудование / А.А. Платонов, С.С.Ш. Саая // История и перспективы развития транспорта на Севере России. – 2026. – № 1. – С. 117-122.

9. Платонов А.А. Теоретическое обоснование степени распространённости технологического процесса / А.А. Платонов // Актуальные проблемы современного транспорта. – 2020. – № 1. – С. 23-31.

10. Исследование работоспособности щелевого дренажа на осушении торфяников / С.Н. Орловский, С.А. Войнаш, В.А. Соколова [и др.] // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2023. – № 1. – С. 424-428. – DOI: 10.24412/2071-6168-2023-1-424-428.

References

1. Babikov B.V. Formation and dynamics of the biotope of pine crops on peat soils after hydromelioration / B.V. Babikov, M.B. Subota // News of higher educational institutions. Forestry magazine. – 2020. – № 4 (376). – pp. 27-39

2. Forest encyclopedia: In 2 volumes / edited by G.I. Vorobyov; Ed. team: Anuchin N.A., Atrokhin V.G., Vinogradov V.N. et al. – Moscow: Sov. encyclopedia, 1985-1986. – 1194 p.

3. Brel V.K. Principles of organization and accounting of reclaimed lands in modern conditions / V.K. Brel, V.A. Shadskikh, L.G. Romanova // Land Reclamation and Water Management. – 2013. – № 4. – pp. 8-10.

4. Platonov A.A. Integrated Forest Vegetation Management: Stages and Development Prospects / A.A. Platonov // Forest Engineering Journal. – 2023. – Vol. 13, № 2(50). – pp. 142-157. – DOI: 10.34220/issn.2222-7962/2022.3/8.

5. Mazhugin E.I. Land Reclamation Machines / E.I. Mazhugin, A.L. Kazakov. – Gorki: Publishing House of BelGSKhA, 2018. – 307 p.

6. Orlovsky S.N. Definition of energy and dynamic parameters of tractors, cutting modes of active working bodies of machine-tractor units: monograph / S.N. Orlovsky. – Krasnoyarsk: Krasnoyarsk State Agrarian University, 2011. – 375 p.

7. Saaya S.S.Sh. Increasing the efficiency of slit drainage by substantiating the operating mode of slit drainage machines / S.S.Sh. Saaya, S.N. Orlovsky, S.N. Dolmatov // Systems. Methods. Technologies. – 2024. – № 4 (64). – pp. 105-112. – DOI: 10.18324/2077-5415-2024-4-105-112.

8. Platonov A.A. Formation of water-diverting drainage systems: goals, objectives, equipment / A.A. Platonov, S.S.Sh. Saaya // History and prospects for the development of transport in the North of Russia. – 2026. – № 1. – pp. 117-122.

9. Platonov A.A. Theoretical substantiation of the degree of prevalence of the technological process / A.A. Platonov // Actual problems of modern transport. – 2020. – № 1. – pp. 23-31.

10. Study of the performance of slot drainage for draining peatlands / S.N. Orlovsky, S.A. Voynash, V.A. Sokolova [et al.] // Bulletin of Tula State University. Technical sciences. – 2023. – № 1. – pp. 424-428. – DOI 10.24412/2071-6168-2023-1-424-428.

СЕКЦИЯ 2
ИННОВАЦИОННОЕ РАЗВИТИЕ ЛЕСНОГО КОМПЛЕКСА НА ОСНОВЕ
РЕСУРСО- И ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ

DOI: 10.58168/CouForCom2026_91-96

УДК 630.320.06

МЕТОДИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ФОРМИРОВАНИЯ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ЛЕСОЗАГОТОВОК
С СОХРАНЕНИЕМ ОБЪЕКТОВ ЖИВОТНОГО МИРА
И СРЕДЫ ИХ ОБИТАНИЯ

¹Галактионов О.Н., ²Шадрин Р.А., ¹Алешин И.С.

¹*Петрозаводский государственный университет, Петрозаводск, Россия*

²*Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет
им. С.М. Кирова, Санкт-Петербург, Россия*

METHODOLOGICAL FOUNDATIONS OF THE FORMATION OF THE
TECHNOLOGICAL PROCESS OF LOGGING WITH THE SAVING
OF WILDLIFE OBJECTS AND THEIR HABITAT

¹Galaktionov O.N., ²Shadrin R.A., ¹Alyoshin I.S.

¹*Petrozavodsk State University, Petrozavodsk, Russia*

²*St. Petersburg State Forest Technical University, St. Petersburg, Russia*

Аннотация: Рассмотрены нормативные основы необходимости сохранения объектов животного мира и среды их обитания при проведении лесозаготовок, проанализирована практика проектирования и проведения таких мероприятий, сформулированы предложения по формированию технологического процесса лесозаготовок с сохранением объектов животного мира и среды их обитания.

Abstract: The normative bases of the need to save wildlife objects and their habitat during logging are considered, the practice of designing and conducting such events is analyzed, proposals are formulated for the formation of a technological process of logging with the saving of wildlife objects and their habitat.

Ключевые слова: технологический процесс, лесозаготовительное производство, объекты животного мира.

Keywords: technological process, logging industry, wildlife objects.

Сохранение объектов животного мира и среды их обитания при проведении лесозаготовок – это важная и сложная инженерная задача, необходимость решения которой подтверждается требованиями действующего законодательства Российской Федерации. Например, согласно статье 60.12. «Общие положения об охране лесов от загрязнения и иного негативного воздействия» Лесного кодекса Российской Федерации (от 04.12.2006 № 200-ФЗ (ред. от 04.08.2026)):

1. Леса подлежат охране от загрязнения и иного негативного воздействия в соответствии с настоящим Кодексом, Федеральным законом от 10 января 2002 года № 7-ФЗ «Об охране окружающей среды» и другими федеральными законами.

2. При использовании лесов, охране лесов от пожаров, защите, воспроизводстве лесов, в том числе при выполнении **лесосечных работ**, должны соблюдаться установленные законодательством Российской Федерации требования по охране окружающей среды от загрязнения и иного негативного воздействия, выполняться меры по охране лесов от загрязнения (в том числе нефтяного, радиоактивного и другого) и иного негативного воздействия, включая меры по сохранению лесных насаждений, лесных почв, **среды обитания объектов животного мира**, других природных объектов в лесах, а также должна осуществляться, в том числе посредством лесовосстановления и лесоразведения, рекультивация земель, на которых расположены леса и которые подверглись загрязнению и иному негативному воздействию.

3. Охрана лесов от загрязнения и иного негативного воздействия осуществляется физическими и юридическими лицами, органами государственной власти, органами местного самоуправления в пределах их полномочий, определенных в соответствии с настоящим Кодексом и Федеральным законом от 10 января 2002 года № 7-ФЗ «Об охране окружающей среды».

4. Особенности рекультивации земель, указанных в части 2 настоящей статьи, меры по сохранению лесных насаждений, лесных почв, среды обитания объектов животного мира, других природных объектов в лесах утверждаются Правительством Российской Федерации.

5. Невыполнение гражданами, юридическими лицами, осуществляющими использование лесов, лесохозяйственного регламента и проекта освоения лесов в части охраны лесов от загрязнения и иного негативного воздействия является основанием для досрочного расторжения договоров аренды лесных участков, договоров купли-продажи лесных насаждений, а также для принудительного прекращения права постоянного (бессрочного) пользования лесным участком или права безвозмездного пользования лесным участком, прекращения сервитута, публичного сервитута.

В связи с этим, цель настоящего исследования – сформулировать методические основы формирования технологического процесса лесозаготовок с сохранением объектов животного мира и среды их обитания как части разработки прогрессивных технологий лесозаготовительного производства.

Для достижения цели исследования были поставлены и решены следующие задачи:

1. Проанализировать нормативные основы необходимости сохранения объектов животного мира и среды их обитания при проведении лесозаготовок;

2. Проанализировать практику проектирования и проведения мер по сохранению объектов животного мира и среды их обитания при проведении лесозаготовок;

3. Предложить технологические меры для формирования технологического процесса лесозаготовок с сохранением объектов животного мира и среды их обитания.

Для анализа нормативных основ сохранения объектов животного мира и среды их обитания при проведении лесозаготовок авторы обратились к Федеральному закону от 24.04.1995 № 52-ФЗ «О животном мире» (статья 22):

Любая деятельность, влекущая за собой изменение среды обитания объектов животного мира и ухудшение условий их размножения, нагула, отдыха и путей миграции, должна осуществляться с соблюдением требований, обеспечивающих охрану животного мира. Хозяйственная деятельность, связанная с использованием объектов животного мира, должна осуществляться таким образом, чтобы разрешенные к использованию объекты животного мира не ухудшали собственную среду обитания и не причиняли вреда сельскому, водному и лесному хозяйству.

При размещении, проектировании и строительстве населенных пунктов, предприятий, сооружений и других объектов, **совершенствовании существующих и внедрении новых технологических процессов**, введении в хозяйственный оборот целинных земель заболоченных, прибрежных и занятых кустарниками территорий, мелиорации земель, **использовании лесов**, проведении геолого-разведочных работ, добыче полезных ископаемых, определении мест выпаса и прогона сельскохозяйственных животных, разработке туристических маршрутов и организации мест массового отдыха населения и осуществлении других видов хозяйственной деятельности должны предусматриваться и проводиться **мероприятия по сохранению среды обитания объектов животного мира** и условий их размножения, нагула, отдыха и путей миграции, а также по обеспечению неприкосновенности защитных участков территорий и акваторий.

В свою очередь часть шесть статьи 28 Федерального закона от 24.04.1995 № 52-ФЗ «О животном мире» содержит следующее требование:

Требования к предотвращению гибели объектов животного мира при осуществлении производственных процессов, а также при эксплуатации транспортных магистралей, трубопроводов и линий связи и электропередачи разрабатываются специально уполномоченными государственными органами по охране, контролю и регулированию использования объектов животного мира и среды их обитания в соответствии с разграничением полномочий, предусмотренным статьями 5 и 6 настоящего Федерального закона, и утверждаются соответственно Правительством Российской Федерации и высшим исполнительным органом субъекта Российской Федерации. Постановлением Правительства РФ от 31.05.2025 № 813 «Об утверждении требований к предотвращению гибели объектов животного мира при осуществлении производственных процессов, а также при эксплуатации транспортных магистралей, трубопроводов и линий связи и электропередачи» эти требования были утверждены.

В этом документе в процессе анализа авторы обратили особое внимание на разделы III и V: Раздел III содержит Требования при осуществлении лесопромышленных и лесохозяйственных производственных процессов:

12. При **использовании лесов**, планировании и осуществлении мероприятий по их охране, защите и воспроизводству необходимо предусматривать **меры по охране объектов животного мира и среды их обитания**, включая сохранение условий размножения объектов животного мира, нагула, отдыха и путей миграции в соответствии с целевым назначением защитных лесов и правовым режимом особо защитных участков лесов.

Раздел V содержит Требования при эксплуатации транспортных магистралей (что актуально, например, при организации вывозки древесины):

18. При проектировании транспортных магистралей должны разрабатываться и осуществляться мероприятия, обеспечивающие сохранение путей миграции объектов животного мира и мест их постоянной концентрации, в том числе в период размножения и зимовки, в соответствии с частью третьей статьи 22 Федерального закона «О животном мире» (рассматривалась выше).

19. Юридические лица, физические лица, в том числе индивидуальные предприниматели, эксплуатирующие транспортные магистрали, обязаны обеспечивать меры по предотвращению ущерба, наносимого объектам животного мира, путем установки специальных предупредительных знаков и знаков ограничения скорости движения транспорта.

20. При пересечении транспортными магистралями мелких рек и ручьев (водотоков) должна обеспечиваться свободная миграция рыб.

Таким образом, в результате проведенного анализа нормативных документов авторы доказали необходимость проведения мер по сохранению объектов животного мира и среды их обитания при проведении лесозаготовок.

Анализируя практику проектирования и проведения мер по сохранению объектов животного мира и среды их обитания при проведении лесозаготовок, авторы исследования рассмотрели Проект Постановления Правительства Российской Федерации (2018 г.) «Об утверждении мер по сохранению лесных насаждений, лесных почв, среды обитания объектов животного мира, других природных объектов в лесах», разработанный в соответствии с частью 4 статьи 60.12. Лесного кодекса Российской Федерации (рассмотрена выше), который получил отрицательное заключение на стадии оценки регулирующего воздействия (от 11.10.2018 г. № 29471-ВЖ/Д26и). Почему так получилось?

В Заключении об оценке регулирующего воздействия на проект постановления Правительства Российской Федерации «Об утверждении мер по сохранению лесных насаждений, лесных почв, среды обитания объектов животного мира, других природных объектов в лесах» от 11.10.2018 г. № 29471-ВЖ/Д26и, в частности, сказано: «Согласно позиции Министерства природных ресурсов и экологии Калининградской области, принятие проекта акта в представленной редакции нецелесообразно, поскольку проект акта не содержит положений, которые не были бы ранее предусмотрены действующим законодательством Российской Федерации, а представляет собой **компиляцию** норм из различных нормативных правовых актов, регламентирующих как использование лесов, так и использование объектов животного мира и среды их обитания.»

Также в этом документе говорится: «С учетом изложенного на основе проведенной оценки регулирующего воздействия проекта акта Минэкономразвития

России сделан вывод об отсутствии достаточного обоснования решения проблемы предложенным способом регулирования, а также о наличии в проекте акта положений, вводящих избыточные обязанности, запреты и ограничения для физических и юридических лиц в сфере предпринимательской и иной экономической деятельности или способствующих их введению, а также положений, приводящих к возникновению необоснованных расходов физических и юридических лиц в сфере предпринимательской и иной экономической деятельности, а также бюджетов всех уровней бюджетной системы Российской Федерации».

Анализ, как Проекта Постановления, так и Заключения об оценке регулирующего воздействия на проект Постановления, позволил авторам исследования сделать следующие выводы. Во-первых, необходимо самым внимательным образом отнестись к замечаниям, что поможет понять, каких ошибок нужно избежать при разработке технологических мер для формирования технологического процесса лесозаготовок с сохранением объектов животного мира и среды их обитания. Например, это избыточные обязанности, запреты и ограничения, а также необоснованные расходы. Во-вторых, различного рода требования к лесосечным работам рассредоточены по целому ряду нормативно-методических документов, что представляет собой проблему, о которой говорится, например, в исследовании [1]. Поэтому без анализа различных источников на тему лесосечных работ и без обобщения требований в одном исследовании, без всякого сомнения, не обойтись. В-третьих, раз речь идёт об объектах животного мира и среде их обитания, то без знания биологии и экологии лесных зверей и птиц разработать действительно эффективные технологические меры для формирования технологического процесса лесозаготовок с сохранением объектов животного мира и среды их обитания точно не получится [2].

На основании этого авторы формулируют методические основы формирования технологического процесса лесозаготовок с сохранением объектов животного мира и среды их обитания. В качестве одной из технологических мер по формированию технологического процесса лесозаготовок с сохранением местобитаний животного мира авторы предлагают разработку перечня мероприятий по сохранению объектов животного мира и среды их обитания при осуществлении лесопромышленных и лесохозяйственных производственных процессов.

Основной характеристикой таких мероприятий должна быть их интеграция в технологии лесозаготовительного производства. Операторам харвестеров и форвардеров, трактористам, вальщикам леса и другим рабочим, инженерно-техническим специалистам лесозаготовительных предприятий должно быть предельно ясно, что это за мероприятия, зачем они проектируются, какова технология их выполнения, какие машины и механизмы будут применяться, какой эффект эти мероприятия должны принести. Всё это должно быть понятно также представителям различных природоохранных организаций, и особенно тем, которым поручен контроль и надзор за лесозаготовительным производством.

При разработке методических основ формирования технологического процесса лесозаготовок с сохранением объектов животного мира и среды их обитания необходимо помнить, что Российская Федерация – огромная страна с очень разными природно-производственными условиями, что отражено в науч-

ных статьях [3, 4]. Однако направление, в котором должна развиваться инженерная мысль, авторы попытались задать, а именно: всякое мероприятие по сохранению объектов животного мира и среды их обитания должно проектироваться с учётом их биологии и экологии, а также быть интегрировано в технологии лесозаготовительного производства. Тогда эти мероприятия принесут и лесоводственный, и биологический, и экономический эффект.

Список литературы

1. Шадрин Р.А. Лесосечные работы. Нормативно-методические требования: Учебное пособие для студентов направления подготовки 35.03.02 «Технология лесозаготовительных и деревоперерабатывающих производств», профиль «Лесоинженерное дело» / Р.А. Шадрин, А.Р. Бирман, С.А. Угрюмов. – СПб: Медиапир, 2025. – 88 с.
2. Шадрин Р.А. Технологические аспекты мероприятий по сохранению биоразнообразия при проведении лесосечных работ, содержащихся в лесохозяйственных регламентах лесничеств Северо-Запада Российской Федерации / Р.А. Шадрин // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. – 2026. – № 257. – С. 393-412. – DOI: 10.21266/2079-4304.2026.257.393-412.
3. Будник П.В. Типизация лесозэксплуатационных условий центральных лесничеств Республики Карелия, Архангельской и Мурманской областей / П.В. Будник, В.Н. Баклагин, О.Н. Галактионов // Resources and Technology. – 2024. – Т. 21, № 3. – С. 17-38. – DOI: 10.15393/j2.art.2024.7983.
4. Шегельман И.Р. Типизация лесных территорий по природно-производственным условиям на основе кластерного анализа / И.Р. Шегельман, П.В. Будник // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. – 2021. – № 1(379). – С. 120-137. – DOI: 10.37482/0536-1036-2021-1-120-137.

References

1. Shadrin R.A. Logging operations. Normative and methodological requirements / R.A. Shadrin, A.R. Birman, S.A. Ugryumov. – Saint Petersburg: Mediapapir, 2025. – 88 p.
2. Shadrin R.A. Technological aspects of biodiversity conservation measures during logging operations as outlined in the forestry regulations of forestry units in the Northwestern Russian Federation / R.A. Shadrin // Proceedings of the St. Petersburg Forestry Academy. – 2026. – № 257. – pp. 393-412. – DOI: 10.21266/2079-4304.2026.257.393-412.
3. Budnik P.V. Typification of forest exploitation conditions in central forest districts of the Republic of Karelia, Arkhangelsk and Murmansk regions / P.V. Budnik, V.N. Baklagin, O.N. Galaktionov // Resources and Technology. – 2024. – Vol. 21, № 3. – pp. 17-38. – DOI: 10.15393/j2.art.2024.7983.
4. Shegelman I.R., Budnik P.V. Typification of Forest Areas by Natural-Production Conditions Based on Cluster Analysis / I.R. Shegelman, P.V. Budnik // Proceedings of Higher Educational Institutions. Forestry Journal. – 2021. – № 1. – pp. 120-137. – DOI: 10.37482/0536-1036-2021-1-120-137.

**ВЕРИФИКАЦИЯ ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ РАБОТЫ
ВАЛОЧНО-ПАКЕТИРУЮЩЕЙ МАШИНЫ В УСЛОВИЯХ
ПРОМЫШЛЕННОЙ ЛЕСОСЕКИ**

Гилязова Т.А.

*Поволжский государственный технологический университет,
Йошкар-Ола, Россия*

**VERIFICATION OF THE SIMULATION MODEL
OF A FELLER-BUNCHER PERFORMANCE UNDER
INDUSTRIAL CLEARCUT CONDITIONS**

Gilyazova T.A.

*Volga State University of Technology,
Yoshkar-Ola, Russia*

Аннотация: В статье представлены результаты производственной верификации имитационной модели работы валочно-пакетирующей машины (ВПМ) полноповоротного типа, разработанной для обоснования нормативов выработки в различных природно-производственных условиях. Актуальность работы обусловлена необходимостью перехода от устаревших нормативных справочников к научно обоснованному нормированию труда операторов ВПМ, особенно при проведении выборочных и постепенных рубок.

Ключевые слова: валочно-пакетирующая машина (ВПМ), имитационное моделирование, производительность труда, нормирование, производственный эксперимент, верификация модели.

Abstract: The article presents the results of industrial verification of a simulation model of the operation of a full-revolving feller-buncher machine (FBM), developed for substantiating production standards under various natural and production conditions. The relevance of the work is driven by the need to move from outdated regulatory handbooks to scientifically based labor standardization for FBM operators, especially in selective and gradual felling.

Keywords: feller-buncher, simulation modeling, productivity, labor rating, production experiment, model verification.

Эффективность лесозаготовительного производства напрямую зависит от качества нормативной базы, регламентирующей трудозатраты и выработку техники. Действующие в Российской Федерации «Межотраслевые нормы выработки и времени на лесозаготовительные работы», утвержденные в 1994 году, ориентированы на сплошные рубки и не учитывают современные модели техники, а также особенности проведения выборочных и постепенных рубок, доля которых неуклонно растет [1, 2]. В этих условиях особую актуальность

приобретают методы имитационного моделирования, позволяющие без дорогостоящих полевых экспериментов оценить влияние комплекса природно-производственных факторов на производительность лесосечных машин [3, 4].

Целью данного исследования является верификация имитационной модели работы валочно-пакетирующей машины (ВПМ) полноповоротного типа, разработанной ранее [5]. В отличие от существующих аналогов, модель учитывает пространственную доступность деревьев, наличие неустраняемых препятствий (оставляемых деревьев), а также кинематические ограничения поворота платформы, что критически важно для моделирования несплошных рубок.

Производственный эксперимент проводился на лесосеке № 3 в квартале 101 Сизиманского участкового лесничества Тумнинского лесничества Хабаровского края. Лесосека характеризуется как равнинная, доступная для работы гусеничной техники. Форма рубки — сплошная, вид рубки — рубка спелых и перестойных лесных насаждений (интенсивность 93%). Таксационная характеристика древостоя приведена в табл. 1.

Таблица 1 – Таксационная характеристика лесосеки

Показатель	Значение
Общая площадь, га	40
Эксплуатационная площадь, га	40
Породный состав	4Л4Е2П
Тип леса	ЕБР
Бонитет	4
Полнота	0,6
Сомкнутость крон	малополнотные
Класс возраста	8
Средний запас древесины, м ³ /га	115
Общий объем древесины, м ³	4594

Валка деревьев производилась челночным способом в течение двух недель. Всего на участке было заготовлено 18000 хлыстов, объем деловой древесины составил 3642 м³.

Испытательное оборудование. В качестве объекта наблюдения использовалась валочно-пакетирующая машина САТ 522, оснащенная захватно-срезающим устройством с накопителем (ЗСУ).

Ключевым принципом эксперимента было определение технических параметров работы машины в режиме «эффективного машино-часа», исключая влияние человеческого фактора (усталости или квалификации оператора). Для этого на лесосеке было заложено 8 пробных площадок размером от 0,1 до 0,15 га с прямоугольной формой и расположением волока по центру. Расстояние между площадками исключало их пересечение.

На каждой пробной площадке проводился пересчет деревьев с фиксацией следующих параметров: породный состав; распределение деревьев по диаметру; высота деревьев; количество крупного подлеска (шт./га); доля фаутных и сухостойных деревьев (%).

По результатам первичной обработки данных, площадки были сгруппированы в 4 кластера, характеризующих различные природные условия:

Группа А (эталон): чистый редкий лес (густота до 400 шт./га, подлесок <100 шт./га, фаут <5%).

Группа Б: чистый среднегустой лес (густота 400-600 шт./га).

Группа В: редкий лес с высокой захламленностью крупным подлеском (>200 шт./га).

Группа Г: Участки с повышенной долей фаутных деревьев (>10%).

В ходе хронометража фиксировались следующие технические параметры: скорость движения машины, линейная и угловая скорости манипулятора, производительность пильного механизма, время наведения ЗСУ (с учетом сопутствующих операций), время укладки пачки и количество деревьев в накопителе. На каждой площадке было зафиксировано не менее 30-40 циклов валки для обеспечения статистической достоверности.

Разработанная имитационная модель была запущена в программной среде AnyLogic. В качестве входных параметров использовались данные, идентичные замеренным на пробных площадках (густота, распределение диаметров, количество подлеска, технические характеристики ВПМ САТ 522). Проводилось сравнение выходных параметров модели ($P_{\text{мод}}$) с натурными данными ($P_{\text{факт}}$) для каждой группы условий в отдельности.

Сравнение результатов имитационного моделирования с данными, полученными в ходе производственного эксперимента, показало высокую сходимость.

Относительная погрешность прогнозирования часовой производительности ВПМ составила 7 %. Это значение находится в пределах допустимой погрешности для инженерных расчетов и подтверждает адекватность модели.

Более детальный анализ показал, что расхождение по времени наведения ЗСУ на дерево (с учетом сопутствующих операций) составило 6 %, а по времени укладки спиленных деревьев – 8 %. Эти показатели отклонений свидетельствуют о корректной реализации в модели алгоритмов, учитывающих кинематические ограничения и пространственные препятствия.

Особую ценность представляет сравнение результатов по выделенным кластерам. Модель корректно уловила разницу между эталонными условиями (Группа А) и условиями с высокой захламленностью (Группы В и Г). Например, в условиях Группы В (высокий уровень подлеска) модель показала сниже-

ние производительности, сопоставимое с натурными данными, что подтверждает корректную работу блока учета крупного подлеска. Это доказывает, что модель способна не только давать общую оценку, но и достоверно прогнозировать влияние отдельных негативных факторов, таких как наличие фаутных деревьев и подлеска, которые не учитываются в объеме заготовки, но создают значительные технологические помехи [6]. Согласно исследованию [7], густой подлесок способен снижать производительность валочно-пакетирующей машины примерно на 20 %, что согласуется с результатами, полученными в имитационной модели.

Проведенные производственные испытания и последующая верификация подтвердили адекватность разработанной имитационной модели работы валочно-пакетирующей машины. Погрешность прогнозирования ключевых показателей (производительности, времени наведения и укладки) не превышает 8%, что позволяет рекомендовать модель для практического использования.

Модель является эффективным инструментом для решения следующих задач на лесозаготовительных предприятиях:

1. Нормирование труда: Обоснование норм выработки для операторов ВПМ в условиях отсутствия актуальных отраслевых нормативов, особенно для современных импортных и модернизированных отечественных машин.

2. Оптимизация технологических схем: Выбор рациональных параметров разработки лесосек (ширина пасек, расстояние между рабочими позициями) с целью минимизации трудозатрат.

3. Оценка влияния природных факторов: Количественная оценка влияния неликвидной древесины (фаут, подлесок) и доли вырубаемого древостоя на итоговую производительность, что позволяет более точно планировать себестоимость работ.

Дальнейшее сотрудничество с производственными предприятиями предполагает адаптацию модели под конкретные условия и расширение ее функционала для решения более широкого круга задач лесозаготовительного производства. Перспективным направлением является интеграция модели с системами поддержки принятия решений [8, 10], а также учет кинематических ограничений и недоступности деревьев [9].

Исследование выполнено за счет гранта РНФ № 26-16-00106, <https://rscf.ru/project/26-16-00106/>

Список литературы

1. Межотраслевые нормы выработки и расценки на лесозаготовительные работы: утв. Постановлением Минтруда РФ от 15.03.1994 № 27. М., 1994. 48 с.

2. Тихонов И.И. Выборочные рубки, проблемы и варианты решений / И.И. Тихонов, Т.В. Якушева // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. 2016. № 2 (350). С. 9–18.

3. Имитационное моделирование технологических процессов лесозаготовки / К.П. Рукомойников, Т.В. Сергеева, Т.А. Гилязова [и др.] // Известия выс-

ших учебных заведений. Лесной журнал. – 2025. – № 1(403). – С. 145-163. – DOI: 10.37482/0536-1036-2025-1-145-163.

4. Макаренко А.В. Эффективность применения лесозаготовительных машин с манипулятором на лесосеке / А.В. Макаренко // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. 2023. № 4. С. 120–135.

5. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2026668745. Моделирование работы полноповоротных валочно-пакетирующих машин в различных природно-производственных условиях: заявл. 23.06.2026; опубл. 08.07.2026 / К.П. Рукомойников, Т.А. Гилязова.

6. Анализ технологических параметров валочно-пакетирующей машины при различных природных условиях / В.О. Мамматов, А.П. Мохирев, С.О. Медведев [и др.] // Инженерный вестник Дона. – 2018. – № 2(49). – С. 75.

7. Granskog J.E. Dense undergrowth reduces feller-buncher productivity in shortleaf pine plantations / J.E. Granskog, W.C. Anderson. New Orleans, 1981. 4 p.

8. Соколов А.П. Имитационное моделирование процессов заготовки древесины / А.П. Соколов // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2024. № 246. С. 244–260.

9. Гилязова Т.А. Учет кинематических ограничений и недоступности деревьев в агентной модели валочно-пакетирующей машины для несплошных рубок / Т.А. Гилязова, К.П. Рукомойников // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2026. № 1 (259). С. 276–289.

10. Modeling as a tool for predicting the productive capacity of wood harvesting: approach of Feller-Buncher and Harvester / F.A.C. Ferreira, C.F. Lima, L.J. Minette [et al]. // Revista Árvore. 2025. Vol. 49. DOI: 10.53661/18069088202549263941.

References

1. Inter-industry output standards and rates for logging operations: approved by Resolution of the Ministry of Labor of the Russian Federation № 27 dated March 15, 1994. Moscow, 1994. 48 p.

2. Tikhonov I.I. Selective logging: problems and solution options / I.I. Tikhonov, T.V. Yakusheva // News of Higher Educational Institutions. Forestry Journal. 2016. № 2 (350). P. 9–18.

3. Simulation modeling of logging technological processes / K.P. Rukomoynikov, T.V. Sergeeva, T.A. Gilyazova [et al.] // News of Higher Educational Institutions. Forestry Journal. – 2025. – № 1(403). – pp. 145–163. – DOI: 10.37482/0536-1036-2025-1-145-163.

4. Makarenko A.V. Efficiency of using logging machines with manipulators at the cutting area / A.V. Makarenko // News of Higher Educational Institutions. Forestry Journal. 2023. № 4. pp. 120–135.

5. Certificate of state registration of a computer program No. 2026668745. Modeling the operation of full-swing feller-bunchers under various natural and production conditions: application filed June 23, 2026; published July 8, 2026 / K.P. Rukomoynikov, T.A. Gilyazova.

6. Analysis of technological parameters of a feller-buncher under various natural conditions / V.O. Mammadov, A.P., Mokhirev, S.O., Medvedev, S.O. [et al.] // Engineering Journal of Don. – 2018. – № 2(49). – P. 75.
7. Granskog J.E. Dense undergrowth reduces feller-buncher productivity in shortleaf pine plantations / J.E. Granskog, W.C. Anderson. New Orleans, 1981. 4 p.
8. Sokolov A.P. Simulation modeling of timber harvesting processes / A.P. Sokolov // Bulletin of the Saint Petersburg State Forest Technical Academy. 2024. № 246. P. 244–260.
9. Gilyazova T.A. Accounting for kinematic constraints and tree inaccessibility in an agent-based model of a feller-buncher for partial cutting / T.A. Gilyazova, K.P. Rukomoynikov // Bulletin of the Saint Petersburg State Forest Technical Academy. 2026. № 1 (259). pp. 276–289.
10. Modeling as a tool for predicting the productive capacity of wood harvesting: approach of Feller-Buncher and Harvester / F.A.C. Ferreira, C.F. Lima, L.J. Minette [et al]. // Revista Árvore. 2025. Vol. 49. DOI: 10.53661/18069088202549263941.

ОЦЕНКА ОПЫТА ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЦИФРОВЫХ АНАЛОГОВ ЛЕСА ОТЕЧЕСТВЕННЫМИ И ЗАРУБЕЖНЫМИ ИССЛЕДОВАТЕЛЯМИ

Жайворонок Д.А., Посметьев В.И., Никонов В.О.

*Воронежский государственный лесотехнический университет
имени Г.Ф. Морозова, Воронеж, Россия*

ASSESSMENT OF THE EXPERIENCE OF USING DIGITAL FOREST ANALOGUES BY DOMESTIC AND FOREIGN RESEARCHERS

Zhayvoronok D.A., Posmetyev V.I., Nikonov V.O.

*Voronezh State University of Forestry and Technologies
named after G.F. Morozov, Voronezh, Russia*

Аннотация: Настоящая работа продолжает серию публикаций кафедры, посвящённых ресурсосберегающим технологиям в лесном комплексе. Авторы сознательно отказываются от рассмотрения цифрового аналога леса как универсального инструмента и сосредотачиваются на узком прикладном вопросе: насколько применимы существующие наработки к заготовке хвойной биомассы.

Abstract: This work continues the department's series of publications on resource-saving technologies in the forest sector. The authors deliberately avoid treating the digital forest analogue as a universal tool and focus on a narrow-applied question: to what extent existing developments are applicable to coniferous biomass harvesting.

Ключевые слова: хвоя, цифровой аналог леса, дистанционное зондирование, лес, объект.

Keywords: pine needles, digital twin of the forest, remote sensing, forest, object.

Особенности промышленной заготовки хвои широко освещены как в отечественных, так и зарубежных научных публикациях. Как правило, раскрывать содержание данного процесса начинают с описания актуальности заготовки с точки зрения последующего применения: корма, парфюмерия, топливо и др. Однако, на данный момент существует как минимум две основные проблемы:

– первая заключается в получении высококачественного сырья, предназначенного для безопасного использования в качестве полноценных кормов, а не просто кормовых добавок в животноводстве и звероводстве;

– вторая проблема состоит в том, что лесная таксация считает в первую очередь ствол, в то время как крону оценивают косвенно, по приближенным коэффициентам. Для хвои эти коэффициенты дают недопустимо большую ошибку, что не позволяет планировать промышленную заготовку высококачественного конечного продукта. Сырья много, а посчитать его точно – нечем. Поэтому создание полноценного цифрового аналога леса является актуальной задачей.

Насколько велика ошибка, можно оценить по графику, изображенному на рис. 1.

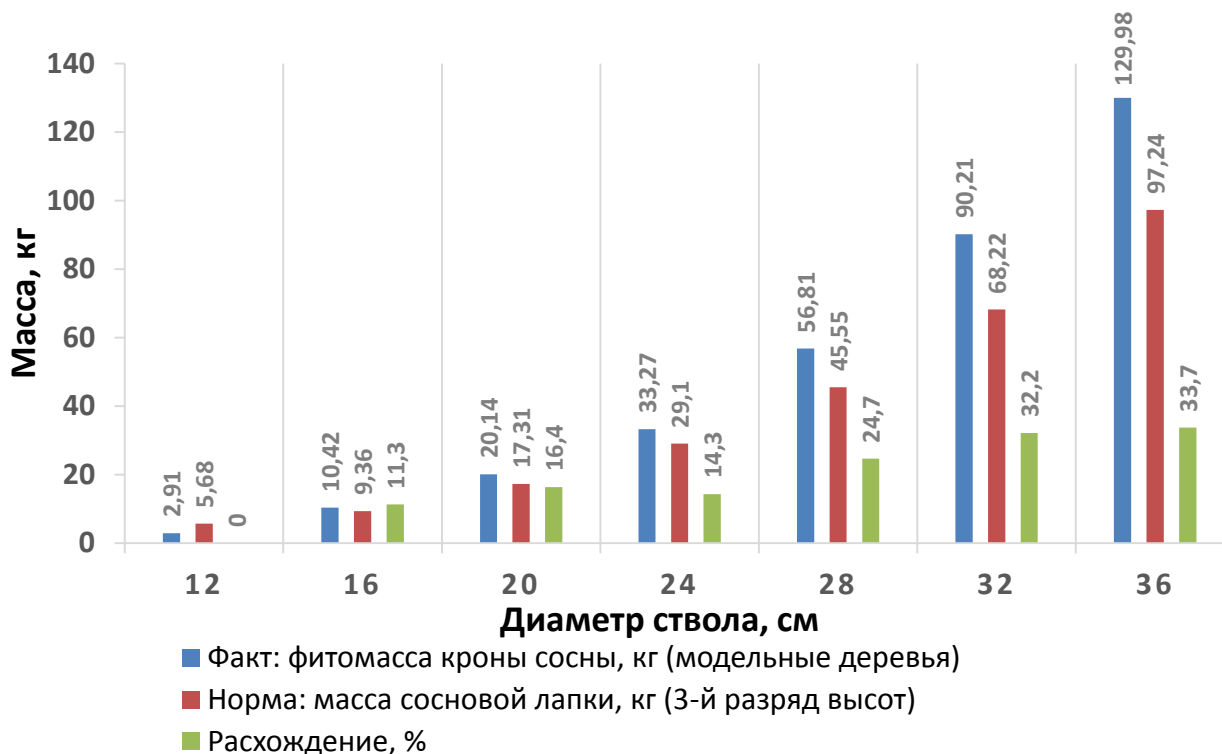


Рисунок 1 – Фактические и нормативные значения фитомассы кроны сосны по ступеням толщины

На графике сопоставлены два ряда данных по сосне. «Факт» – результаты обмеров модельных деревьев: общая фитомасса кроны, приведённая к ступеням толщины 12-36 см. «Норма» – значения из нормативно-справочной таблицы массы сосновой лапки, взятые по 3-му разряду высот. Расхождение рассчитано как отношение разности фактического и нормативного значений к нормативу, в процентах.

При диаметре 12 см фактическая фитомасса ниже нормативной почти вдвое (48,8%). Это объясняется тем, что нормативная таблица ориентирована на деревья с развитой кроной, тогда как в выборку модельных деревьев попали экземпляры с ослабленной кроной. Начиная с диаметра 16 см знак расхождения меняется: факт превышает норму на 11-16% в диапазоне 16-24 см и на 25-34% при 28-36 см. Рост расхождения с увеличением диаметра указывает на то, что нормативные коэффициенты, выведенные для стволовой древесины, систематически занижают фитомассу кроны у крупных деревьев. Именно этот диапазон – 28-36 см представляет интерес для промышленной заготовки хвой, и именно здесь ошибка учёта максимальна.

Цифровой аналог лесного массива строится на двух основных элементах: лазерное сканирование и мультиспектральная съёмка. Вместе они закрывают четыре задачи, которые в обычной таксации либо не решаются, либо решаются частично.

Первая задача – определение породы дерева, причём по каждому дереву порода определяется отдельно. Для хвой это особенно важно, так как для заготовки подходят не все породы подряд. Например, если сосна, ель и пихта подходят, то берёза и осина – нет.

Второе – осуществляется отбор биомассы кроны, а не ствола, как это делается в подавляющем большинстве случаев.

Третье – сроки. Заготовка привязана к сезону, и это надо учитывать заранее.

Четвёртое – экология. Ограничения по работе с лесным массивом проверяются до начала работ, а не после.

Искусственные спутники земли осуществляют вспомогательную функцию. Sentinel-2 и Landsat дают разрешение около 10-30 м на пиксель, что позволяет оконтурить хвойный массив, отметить очаги усыхания и болезни, а также отследить сезонные изменения крон. Однако, посчитать каждое дерево не представляется возможным, так как разрешения 10-30 м на пиксель для этого недостаточно. Это не временная проблема, это предел метода. Поштучный учёт возможен только посредством беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) и лидара (лазерный прибор, который измеряет расстояния до объектов с помощью световых импульсов).

Лазерное сканирование строит облако точек, по которому алгоритмы машинного зрения восстанавливают высоту, диаметр ствола, размер и плотность кроны, координаты дерева. Для заготовки хвой важен именно последний блок параметров: объём, плотность и форма кроны коррелируют с массой хвой, а значит, по лидарным данным можно прогнозировать выход сырья. Насколько это точнее традиционных методов – видно из табл. 1.

Наиболее известная отечественная разработка в этой области – «ПармаСкан». Программа обрабатывает данные лазерного сканирования с помощью ИИ и формирует таксационное описание участка, включая ортофотоплан с разбивкой по породам. Для выделения сосны, ели, пихты и лиственницы данная технология очень хорошо подходит [1, 4].

Лазерное сканирование с последующей обработкой данных активно используют Группа «Илим» и Пермский ЦБК. Последний развернул дистанционный мониторинг на арендованной базе свыше 400 тыс. га [2, 5]. Показателен эпизод с оценкой запасов: спутниковые методы дали по одному из кварталов 28442 м³, лидарная съёмка – 32352 м³. Расхождение почти в 4 тыс. м³ на квартал, и оно не в пользу традиционного метода. По годовой оценке, уточнение составило 25-29 тыс. м³. Для хвойной биомассы эффект должен быть сопоставимым, хотя прямых замеров по кроне в доступных источниках меньше.

Таблица 1 – Сравнение подходов к оценке хвойной биомассы

Показатель	Методы		
	пробные площади	аэрофото-съемка	лидарная модель
Доля охвата	1-5 % площади	вся площадь, визуально	вся площадь, по деревьям
Определение породы	полевое, точное	ограниченное	по форме кроны и спектру, 90-95 %
Биомасса кроны	ручной пересчёт, велика погрешность	не определяется	$\pm 5-10$ % по модели
Трудозатраты	бригада, 2-4 недели	средние	автоматическая обработка
Частота обновления	раз в 5-10 лет	по факту съёмки	постоянно

Различие процесса заготовки хвой от заготовки древесины часто упускают. При заготовке пиломатериалов объект учёта – ствол, и цифровой аналог здесь работает «по инерции»: те же параметры, что и в классической таксации. При заготовке хвой акцент смещается на крону, и требования к модели меняются (табл. 2). Появляются специфические фильтры: нужно отделять хвойные от лиственных, отбраковывать деревья с повреждённой кроной как с механическими повреждениями, так и с кроной, подверженной различными болезнями, а также учитывать сезонный максимум полезных веществ (зима), соблюдать ограничения по объёму снятия кроны – обычно не более 20-30 %.

Таблица 2 – Параметры, критичные для заготовки хвой

Параметр	Параметры		
	как оценивается	нужная точность	достижимая точность (лидар + ИИ)
Порода	форма кроны, спектр	95 %	90-95 %
Объём кроны	3D-модель	± 10 %	$\pm 5-8$ %
Масса хвой	аллометрические уравнения	± 15 %	$\pm 10-15$ %
Состояние дерева	плотность кроны, спектр	отбраковка больных	обеспечивается
Координаты	геопривязка	± 1 м	$\pm 0,1-0,5$ м

Европейский проект SingleTree (14 партнёров из Норвегии, Швеции, Финляндии, Испании, Швейцарии) интересен сменой оптики: вместо управления

лесосекой – управление отдельным деревом. Шведская SCA Skog применяет высокоточное лазерное сканирование для планирования заготовки, а инструмент SCan позволяет выполнять значительную часть планировочной работы удалённо. Для селективной заготовки хвой в труднодоступных массивах это существенно [3, 6].

По оценкам разработчиков «ПармаСкан», затраты на учёт ресурсов и подготовку участков снижаются на 15-30 %. Полевой таксации становится меньше, необходимость в массе пробных площадей для оценки кроны отпадает, перепланирование при смене конъюнктуры выполняется быстрее. Отдельные исследования цепочек поставок лесной биомассы фиксируют рост энергетической эффективности в пиковые периоды до 29 % и до 8 % в среднем за год при снижении логистических затрат до 7 % [2]. Сводные ожидаемые эффекты приведены в табл. 3.

Таблица 3 – Ожидаемые эффекты от внедрения цифрового аналога

Направление	Эффект
Таксация хвойных массивов	снижение затрат на 15-30 %
Оценка биомассы кроны	рост точности на 10-15 %
Логистика	снижение издержек на 5-7 %
Энергоэффективность заготовки	8-29 % в зависимости от сезона
Хранение хвой	сокращение потерь около 5 %

Пермский ЦБК (330 тыс. т картона и бумаги в год) использует парк БПЛА с лидарами: система считает объём древесины, классифицирует деревья по породе, оценивает состояние крон, строит карты рельефа, уклонов и гидрографии [4, 5]. Группа «Илим» первой получила доступ к «ПармаСкан» (регистрация в Роспатенте – март 2025 г.); система объединяет спутниковые данные и съёмку с БПЛА, выдавая ортофотоплан с сегментацией по породам и ведомость поштучного учёта.

Программное обеспечение «ПармаСкан» обладает совместимостью с Федеральной государственной информационной системой лесного комплекса (ФГИС ЛК), при этом процедура выгрузки данных уже отработана [7]. Прикладное значение указанной интеграции состоит в расширении объекта учёта: наряду с древесиной в систему включаются недревесные ресурсы, в частности хвойная биомасса.

Вместе с тем механический перенос указанных решений при решении проблемы заготовки и получении высококачественной хвой недопустим, так как параметры, значимые для кроны и для ствола, совпадают лишь частично, а методика применительно к хвойной биомассе требует отдельной разработки. До завершения этой работы говорить о тиражируемом решении преждевременно.

Список литературы

1. Центр космических технологий и услуг: [сайт]. – Пермь, 2026 – Пермская ИТ-компания создает цифрового аналога леса. – URL: <https://news-perm.ru/society/2026/09/07/40966.html> (дата обращения: 17.09.2026).
2. Laitila J. Cost analysis of transporting forest chips and forest industry by-products with large truck-trailers in Finland / J. Laitila, A. Asikainen, T. Ranta // *Biomass and Bioenergy*. – 2016. – Vol. 90. – pp. 252–261. – DOI: 10.1016/j.biombioe.2016.04.011.
3. Производители машин, оборудования и ИТ-решений для ЛПК: [база данных, каталог] // Ассоциация «ЛЕСТЕХ»: официальный сайт. – URL: alestech.ru (дата обращения: 17.09.2026).
4. Группа «Илим» внедряет отечественное ПО [сайт] // Лесной комплекс. – 2025. – 25 апреля. – URL: <https://forestcomplex.ru/digital-environment/gruppa-eeleem-vnyedrayayet-otyechyestvyennoye-po/> (дата обращения: 17.09.2026).
5. ПЦБК внедрила технологию «цифрового аналога леса»: [сайт] // *Lesprom*. – 2025. – 9 октября. – URL: https://www.lesprom.com/ru/news/ПЦБК_внедрила_технологии_цифрового_двойника_леса_120812/ (дата обращения: 17.09.2026).
6. SingleTree: SCA initiates a new operation on digital forestry: [сайт] // *Wood & Panel Europe*. – 2025. – 16 сентября. – URL: <https://www.woodandpanel.it/woodnews/articolo/singletree-sca-initiates-a-new-operation-on-digital-forestry/> (дата обращения: 17.09.2026).
7. Минсвязи Пермского края сообщило о начале эксплуатации ИИ-системы для инвентаризации лесов: [сайт] // *Digital Russia*. – 2025. – 23 апреля. – URL: <https://d-russia.ru/minsvjazi-permskogo-kraja-soobshhilo-o-nachale-jekspluatatsii-ii-sistemy-dlja-inventarizacii-lesov.html> (дата обращения: 17.09.2026).
8. Hoppen M. Digital technologies for precise carbon balancing in timber procurement / M. Hoppen, S. Baier, L. Schinke [et al.] // *European Journal of Forest Research*. – 2025. – URL: [springer.com](https://www.springer.com) (дата обращения: 17.09.2026). – DOI: 10.1007/s10342-025-01794-1.

References

1. Space Technologies and Services Center: [website]. – Perm, 2026 – A Perm-based IT company is creating a digital analogue of a forest. – URL: <https://news-perm.ru/society/2026/09/07/40966.html> (accessed: 17.09.2026).
2. Laitila J. Cost analysis of transporting forest chips and forest industry by-products with large truck-trailers in Finland / J. Laitila, A. Asikainen, T. Ranta // *Biomass and Bioenergy*. – 2016. – Vol. 90. – pp. 252–261. – DOI: 10.1016/j.biombioe.2016.04.011.
3. Manufacturers of machinery, equipment and IT solutions for agricultural machinery : [database, catalog] // «LESTECH» Association : official website. – URL: alestech.ru (accessed: 17.09.2026).
4. The Ilim Group is implementing domestic software [website] // *Lesnoy Kompleks*. – 2025. – April 25. – URL: <https://forestcomplex.ru/digital-environment/> grup-

pa-eeleem-vnyedryayet-otyechyestvyennoye-po/ (accessed: 17.09.2026). – Text: electronic.

5. The PPCB has implemented the «digital forest analogue» technology: [website] // Lesprom. – 2025. – October 9. – URL: https://www.lesprom.com/ru/news/PPCB_has_implemented_the_technology_of_a_digital_forest_twin_120812/ (accessed: 17.09.2026).

6. SingleTree: SCA initiates a new operation on digital forestry: [website] // Wood & Panel Europe. – 2025. – September 16. – URL: <https://www.woodandpanel.it/woodnews/articolo/singletree-sca-initiates-a-new-operation-on-digital-forestry/> (accessed: 17.09.2026).

7. The Ministry of Communications of the Perm Region announced the start of operation of an AI system for forest inventory: [website] // Digital Russia. – 2025. – April 23. – URL: <https://d-russia.ru/minsvjazi-permskogo-kraja-soobshhilo-onachale-jekspluatacii-ii-sistemy-dlja-inventarizacii-lesov.html> (accessed: 17.09.2026).

8. Hoppen M. Digital technologies for precise carbon balancing in timber procurement / M. Hoppen, S. Baier, L. Schinke [et al.] // European Journal of Forest Research. – 2025. – URL: [springer.com](https://www.springer.com) (accessed: 17.09.2026). – DOI: 10.1007/s10342-025-01794-1.

ОБОСНОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ШНЕКОПИТАТЕЛЯ ЛЕСОПОЖАРНОГО ГРУНТОМЕТА

Зленко А.В.

*Воронежский государственный лесотехнический университет
имени Г.Ф. Морозова, Воронеж, Россия*

JUSTIFICATION OF THE TECHNOLOGICAL PARAMETERS OF THE AUGER FEEDER OF THE FOREST FIRE MORTAR

Zlenko A.V.

*Voronezh State University of Forestry and Technologies
named after G.F. Morozov, Voronezh, Russia*

Аннотация: Исследование шнековых механизмов в машинах для транспортировки материалов выявило недостаток исследований по подаче грунта к роторам-метателям. Целью работы является повышение эффективности лесопожарной грунтометательной машины путем обоснования технологических параметров шнекового питателя.

Abstract: Research on screw mechanisms in material handling machinery has revealed a lack of studies concerning the feeding of soil to throwing rotors. The aim of this work is to improve the efficiency of a forest fire soil-throwing machine by substantiating the technological parameters of the auger feeder.

Ключевые слова: грунтометательная машина, гидропривод, ротор-метатель, лесной пожар, шнековый рабочий орган, грунт, параметры.

Keywords: soil-throwing machine, hydraulic drive, throwing rotor, forest fire, auger working element, soil, parameters.

Введение

Лесные пожары представляют серьезную угрозу для России и других стран. Для борьбы с ними применяются противопожарные полосы и грунтометательные машины, однако последние имеют недостатки в подаче грунта к роторам. Шнековые рабочие механизмы могут стать эффективным решением этой проблемы.

Исследования [1] показали, что наивысшая эффективность шнековых рабочих органов достигается при коэффициенте заполнения $\psi = 2,25$ и шаге $S = 2D$.

В работе [2] авторы исследуют вопрос создания специальных машин для борьбы с лесными низовыми пожарами.

Работа [3] установила, что привод шнека с ребордовым кожухом потребляет на 1,11...1,15 раза больше мощности, чем шнек при любых частотах вращения. В работе [4] изучалось сопряжённое винтовое-пневматическая транс-

портировка измельчённых кукурузных стеблей. Статья [5] посвящена конструкции рабочего органа винтового конвейера с наклонными плоскими лопастями. В работе [6] установлено, что скорость вращения шнека с прямолинейной лопастью должна составлять от 550 до 650 об/мин

Изучение рабочих процессов шнековых механизмов, применяемых в технологических машинах для обработки сыпучих и кусковых материалов, выявило нехватку исследований, посвященных подаче грунта к роторам грунтометательных машин, где используются наклонные шнеки.

В рамках данного исследования ставится цель повысить эффективность работы лесопожарной грунтометательной машины путем определения рациональных технологических параметров шнека-питателя, отвечающего за подачу грунта на ротор-метатель.

В рамках выполнения диссертационного исследования аспирантом Зленко А.В. была разработана конструктивно-технологическая схема представлена инновационная конструктивно-технологическая схема шнекороторной лесопожарной грунтометательной машины (рис. 1). В процессе движения лесопожарного тракторного агрегата лемех 8 с U-образной скобой заглубляется на установленную глубину с помощью опорного колеса 4. Грунт поступает на лоток-подъемник 10 и шнеком-питателем 11 подается к ротору-метателю 5. Кроме того машина включает раму 1, механизм навески 2, кожух-рыхлитель 3, опорные колеса 4, гидромотор ротора 6, подшипниковый узел 7, черенковые ножи 9, гидромотор 12 привода шнека-питателя.

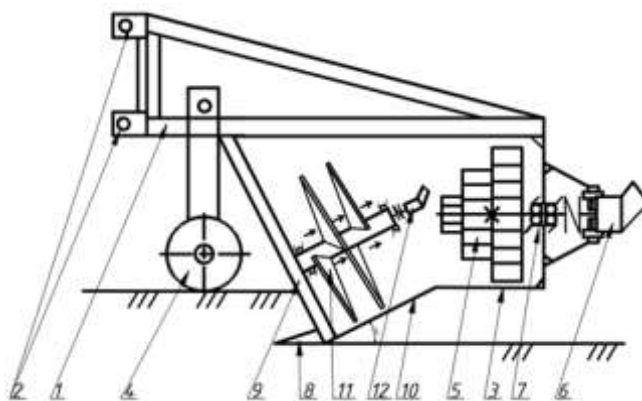


Рисунок 1. – Схема шнекороторной грунтометательной машины

Для достижения поставленной цели использовались методы математического моделирования, а именно: выведена система уравнений, описывающая динамику работы шнекового рабочего органа для подачи грунта к ротору метателю. Система состоит из уравнения вращательного движения шнека, уравнения расходов рабочей жидкости в гидроприводе шнека-питателя, уравнение поступательного движения тракторного агрегата с грунтомётом на задней навеске.

Общая математическая модель рабочего процесса шнекороторного грунтомета будет иметь вид:

$$\begin{cases} J_{\text{пр}} \frac{d^2 \varphi}{dt^2} = \frac{\eta_n q_m p}{2\pi \eta_0} - mg \frac{D}{2} \left(\frac{\cos \alpha}{\sin \varphi_1} + \left(\frac{d\varphi}{dt} \right)^2 \frac{D}{2g} \cdot f_1 \right) \sin(\alpha + \varphi_1), \\ \frac{dp}{dt} = \frac{1}{K_p} \left(q_n n_n - \frac{q_m}{\pi} \frac{d\varphi}{dt} - a_y p \right), \\ \frac{dx}{dt} = \frac{D^2}{4ab_c} \cdot S \cdot \frac{d\varphi}{dt} \rho \cdot k_1 \cdot k_2 \end{cases} \quad (1)$$

где: $J_{\text{пр}}$ – приведенный момент инерции от сил тяжести шнека и силы тяжести грунта, находящегося на шнеке; φ – угол поворота шнека, рад; t – текущее время; η_n – полный КПД гидромотора; q_m – рабочий объем гидромотора, м³/об; p – текущее давление в гидроприводе; η_0 – объемный КПД гидромотора; m – масса шнека, кг; g – сила тяжести, Н; ω – угловая скорость, рад/с; α – угол подъема винтовой линии шнека, рад; φ_1 – угол трения грунта о поверхность витка, рад; D – диаметр шнека, м; f_1 – коэффициент трения частиц грунта друг о друга; n_n – частота вращения гидронасоса; k_1 – коэф., учитывающий степень заполнения шнека; k_2 – коэф. учитывающий наклон шнека; S – шаг шнека, м; D – диаметр шнека, м; q_n – рабочий объем насоса, м³/об; K_p – коэффициент податливости упругих элементов (рукавов высокого давления), м⁵/Н; x – скорость движения трактора, м/с; a – глубина хода подкапывающей скобы, м; b_c – ширина захвата скобы, м; ρ – плотность грунта (супесчаная почва), после взрыхления подкапывающей скобой, кг/м³.

Система дифференциальных уравнений была решена при помощи языка программирования Python модулем `solve_ivp`, с помощью которого определены зависимости от времени угла поворота шнека-питателя, давления рабочей жидкости в гидроприводе шнека, поступательной скорости движения тракторного агрегата с грунтомётом на задней навеске. Проведенные теоретические исследования рабочего процесса новой шнекороторной грунтометательной машины позволяют обосновать рациональные параметры шнекового рабочего органа для подачи полного объема грунта, вырезаемого U-образной скобой, к ротору-метателю и повысить эффективность профилактики и тушения лесных пожаров за счет увеличения объема потока грунта, подаваемого на кромку огня.

Производительность шнека-питателя рассчитывается по формуле:

$$Q = \frac{\pi}{4} \cdot D^2 \cdot S \cdot n \cdot k_2 \quad (2)$$

где: n_m – частота вращения гидромотора привода шнека (200-300 об/мин); k_2 – коэффициент, учитывающий наклон шнека (0,6-0,7); S – шаг шнека, (0,3 м); D – диаметр шнека (0,4 м).

Представленная на рис. 2 зависимость производительности шнека от шага винта описывает прямую линию с шагом от 0,18 до 0,24 м, интервал которого составил 0,02 м. производительность при этом возросла от 0,17 до 0,24 м³/с. Производительность в зависимости от диаметра шнека (рис. 3) показывает, что при диаметрах от 0,3 до 0,4 м производительность возрастает по криволинейной зависимости от 0,17 до 0,26 м³/с с последующим переходом на линейную зависимость при диаметре 0,45 м и производительностью 0,29 м³/с.

Производительность лесопожарного агрегата

$$Q = a \cdot b \cdot v$$

где a – глубина обработки, м; b – ширина обработки, м

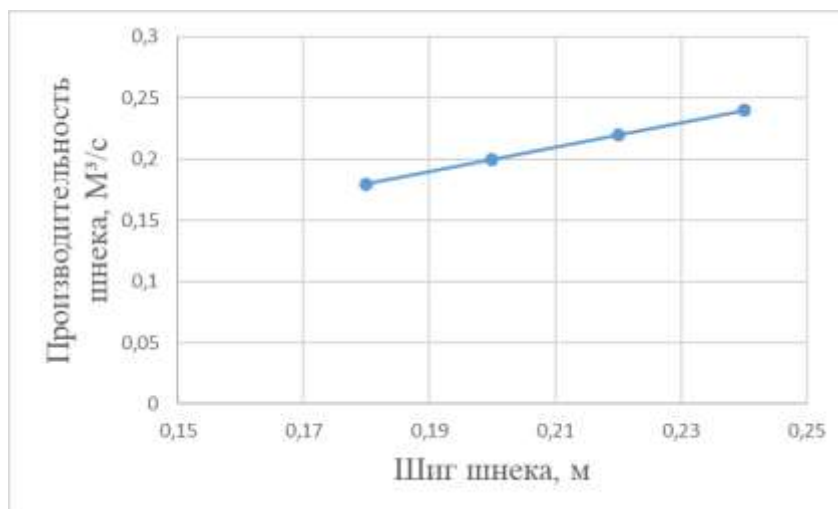


Рисунок 2 – Зависимость производительности шнека от шага винта шнека

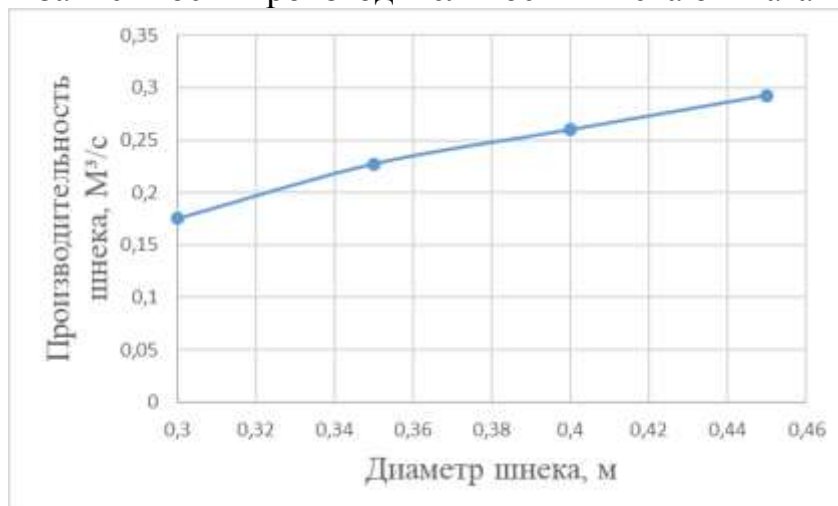


Рисунок 3 – Зависимость производительности шнека от диаметра шнека

Расчет энергоёмкости шнека производился по формуле:

$$E = \frac{N}{Q_{об}} \quad (3)$$

где E – энергоёмкость шнека: это показатель, который отражает количество энергии (в киловатт-часах, кВт·ч), необходимое для перемещения единицы объёма материала (1 м³) с помощью шнека;

N – мощность привода шнека определяется с учетом номинального давления в гидроприводе и крутящему моменту гидромотора привода шнека, кВт:

$$N = M \cdot \omega = M \cdot \frac{2\pi \cdot n}{60} \quad (4)$$

где M – крутящий момент на валу шнека, Н·м; n – частота вращения шнека, об/мин; ω – угловая скорость, рад/с.

Крутящий момент на валу шнека определяется по формуле:

$$M = \frac{\eta_n q_m p}{2\pi\eta_0} \quad (5)$$

где: η_n – полный КПД гидромотора; q_m – рабочий объем гидромотора, м³/об; p – текущее давление в гидроприводе, Па; η_0 – объемный КПД гидромотора.

Влияние шага шнека на энергоемкость (рис. 4) показало динамику снижения энергоемкости при увеличении шага. Таким образом на отрезке от 0,18 до 0,24 м энергоемкость снизилась от 940 до 700 кВт·ч/м³ на промежуточных контрольных измерениях. Это говорит, что при увеличении шага шнека энергоемкость снижается за счет увеличения полезного объема, проходящего через шнек.

Энергоемкость снижается при увеличении диаметра шнека. Это видно на графике (рис. 5). При диаметрах от 0,3 до 0,35 м энергоемкость снижается стремительнее, чем на больших диаметрах и составляет 1250-950 кВт·ч/м³. С повышением диаметра шнека энергоемкость становится более горизонтальной.

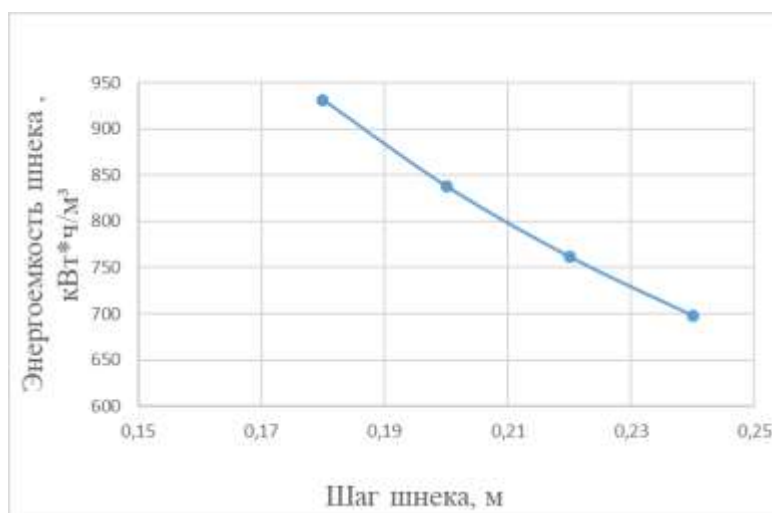


Рисунок 4 – Зависимость энергоемкости шнека от шага шнека

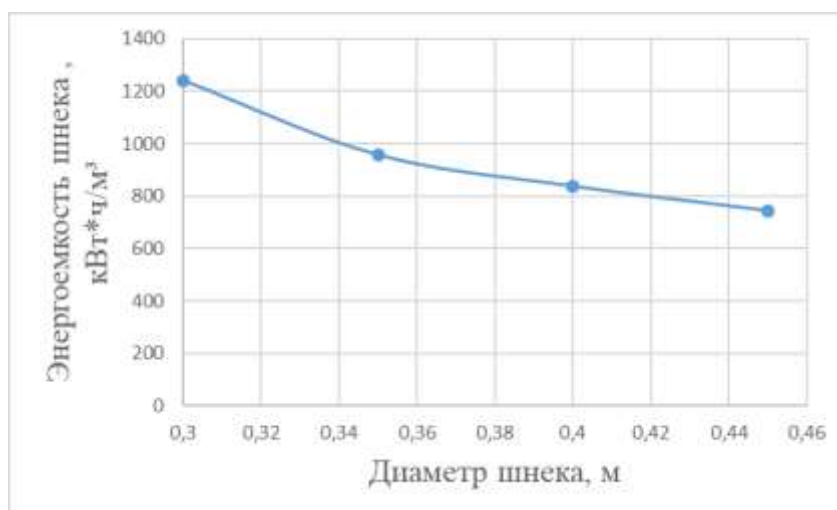


Рисунок 5 – Зависимость энергоемкости шнека от диаметра шнека

Исследования шнекороторной грунтометательной машины показали, что рациональные параметры шнека повысят эффективность тушения лесных пожаров за счет увеличения потока грунта на кромку огня и полной подачи грунта.

Выводы

1. Исследование рабочих процессов шнековых органов в машинах для перемещения материалов показало недостаточное изучение подачи грунта к роторам-метателям. Разработана новая конструктивно-технологическая схема шнекороторной лесопожарной грунтометательной машины с математической моделью рабочего процесса шнекового грунтомета.

2. Модель описывает работу шнека по перемещению почвы, зависимость производительности от шага винта и диаметра шнека. Производительность возрастает с шагом винта от 0,18 до 0,24 м и диаметром шнека от 0,3 до 0,45 м.

3. Энергоемкость снижается при увеличении шага винта и диаметра шнека. При увеличении шага шнека энергоемкость снижается за счет увеличения полезного объема грунта. Зависимость энергоемкости от диаметра шнека более выражена на малых диаметрах, а при больших диаметрах становится более горизонтальной.

Список литературы

1. Kawade N.P. A Review Paper on Screw Conveyor Blade & Bolt of Domestic Cattle Manure Monitor Making Machine / N.P. Kawade, A.B. Tupkar // International Journal of Research Publication and Reviews (IJRPR). – 2024. – Vol. 5, № 2. – pp. 1504-1506.

2. Исследование влияния параметров шнекового барабана лесопожарного грунтомета-полосопрокладывателя на качество очистки потока грунта от напочвенного покрова / П.И. Попиков, А.К. Поздняков, М.А. Гнусов [и др.] // Лесотехнический журнал. – 2022. – Т. 12, № 2(46). – С. 126-134. – DOI 10.34220/issn.2222-7962/2022.2/11.

3. Черкасов Р.И. Энергозатраты при смешивании кормов вертикальным шнеком / Р.И. Черкасов, К.А. Адигамов, С.В. Лемайкина // Технологии пищевой и перерабатывающей промышленности АПК – продукты здорового питания. – 2023. – № 3. – С. 214-218. – DOI: 10.24412/2311-6447-2023-3-214-218.

4. A theoretical analysis and experimental study of a coupled screw-pneumatic conveyor for chopped cornstalks / W. Tuya, N. Li, H. Fan, et al. // Engenharia Agricola. – 2023. – Vol. 43. – DOI: 10.1590/1809-4430-eng.agric.v43n3e20220068/2023.

5. Investigation of the performance of a screw conveyor with a working body, made in the form of a shaft with inclined flat blades / V. Bulgakov, O. Trokhaniak, I. Holovach [et al.] // INMATEH - Agricultural Engineering. – 2022. – pp. 406-411. – DOI: 10.35633/inmateh-67-41.

6. Chongchitpaisan P. A Review on Screw Conveyors for Bulk Materials in Various Applications / P. Chongchitpaisan, S. Sudsawat // Engineering and Technology Horizons. – 2022. – Vol. 39. – pp. 1-12.

References

1. Kawade N.P.A Review Paper on Screw Conveyor Blade & Bolt of Domestic Cattle Manure Monitor Making Machine / N.P. Kawade, A.B. Tupkar // International Journal of Research Publication and Reviews (IJRPR). – 2024. – Vol. 5, № 2. – pp. 1504-1506..
2. Study of the influence of the parameters of the auger drum of a forest fire soil spreader on the quality of cleaning the soil flow from the ground cover / P.I. Popikov, A.K. Pozdnyakov, M.A. Gnusov [et al]// Forest Engineering Journal. – 2022. – Vol. 12, # 2 (46). – pp. 126-134. – DOI 10.34220/issn.2222-7962/2022.2/11.
3. Cherkasov R.I. Energy consumption during feed mixing with a vertical auger / R.I. Cherkasov, K.A. Adigamov, S.V. Lemaikina // Technologies of food and processing industry of the agro-industrial complex – healthy food products. – 2023. – № 3. – pp. 214-218. – DOI 10.24412/2311-6447-2023-3-214-218.
4. A theoretical analysis and experimental study of a coupled screw -pneumatic conveyor for chopped cornstalks / W. Tuya, N. Li, H. Fan [et al] // Engenharia Agricola. – 2023. – Vol. 43. – DOI: 10.1590/1809-4430-eng.agric.v43n3e20220068/2023.
5. Investigation of the performance of a screw conveyor with a working body, made in the form of a shaft with inclined flat blades / V. Bulgakov, O. Trokhaniak, I. Holovach [et al.] // INMATEH - Agri-cultural Engineering. – 2022. – pp. 406-411. – DOI: 10.35633/inmateh-67-41.
6. Chongchitpaisan P.A Review on Screw Conveyors for Bulk Materials in Various Applications / P. Chongchitpaisan, S. Sudsawat // Engineering and Technology Horizons. – 2022. – Vol. 39. – pp. 1-12.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ ПРИМЕНИМОГО К БЕСПИЛОТНЫМ ТРЕЛЕВОЧНЫМ МАШИНАМ

Клубничкин В.Е., Клубничкин Е.Е., Васильев Я.С.

Мытищинский филиал МГТУ им. Н. Э. Баумана, Мытищи, Россия

DETERMINATION OF THE TECHNOLOGICAL EQUIPMENT AP- PLICABLE TO UNMANNED SKIDDER MACHINES

Klubnichkin V.E., Klubnichkin E.E., Vasiliev Y.S.

*Mytishchi Branch of Bauman Moscow State Technical University, Mytishchi,
Russia*

Аннотация: Рассмотрено навесное технологическое оборудование для колёсных и гусеничных трелёвочных машин при хлыстовой заготовке. Приведены параметры и даны особенности чокерного и бесчокерного оборудования. Выполнен сравнительный анализ применимости различных типов оборудования для беспилотных трелёвочных машин (БПТМ).

Abstract: The mounted technological equipment for wheeled and tracked skidders used in stem harvesting has been examined. The parameters and features of hook-based and hook-free equipment are presented. A comparative analysis of the applicability of various types of equipment for unmanned skidders (US) has been carried out.

Ключевые слова: автоматизированное управление, беспилотная трелевочная машина, технологическое оборудование.

Keywords: automated control, unmanned skidding machine, technological equipment.

Тип и конструкция навесного технологического оборудования, монтируемого на колёсные и гусеничные трелёвочные машины, обуславливается его целевым назначением и спецификой выполняемых операций.

Технологическое оборудование, устанавливаемое на колёсные и гусеничные машины, обеспечивает выполнение сбора и трелёвки пачки деревьев (хлыстов), погрузочно-разгрузочных работ с сортиментами и деревьями, обрезки сучьев, раскряжёвки, а также ряда иных лесозаготовительных технологических операций.

В условиях хлыстовой технологии лесозаготовок на трелёвочной машине может применяться пачковый захват, тросочокерное оборудование, а также манипулятор в паре с самозажимным коником.

В работах [1, 2] представлен анализ с особенностями пачковых захватов трелевочных машин. В работах по отдельным элементам технологического

оборудования описываются временные показатели срабатывания, что позволяет облегчить этап проектирования.

Для зарубежных колесных машин в табл. 1 – 3 приведены отдельные характеристики трелевочного оборудования в виде пачковых захватов.

Таблица 1 – Параметры пачковых захватов скиддеров John Deere серии L

Модель	Тип стрелы	Раскрытие захвата (мм)	Площадь захвата (м ²)
640L	Одинарная стрела	3075	1,00
648L	Двойная стрела	3285	1,24
748L		3365	1,48
848L		3780	1,77
948L		3780	2,00

Таблица 2 – Параметры пачковых захватов 4-колесных скиддеров Tigercat

Модель	Тип захвата	Площадь захвата (м ²)	Максимальное раскрытие (мм)	Дополнительные опции (площадь (м ²) / раскрытие (мм))
610E	2-цилиндровые, плоские или коробчатые	1,21	3250	1,39 / 3505
620E		1,39	3505	1,58 / 3630
630E		1,58	3630	1,76 / 3710
632E		1,76	3710	1,95 / 3835; 2,14 / 3861

Как правило технологическое оборудование проектируется или подбирается с учетом особенностей и ключевых параметров базовой машины на котором будет монтироваться.

Таблица 3 – Параметры пачковых захватов 6-колесных скиддеров Tigercat

Модель	Тип захвата	Площадь захвата (м ²)	Максимальное раскрытие (мм)	Дополнительные опции (площадь (м ²) / раскрытие (мм))
615E	2-цилиндровые, плоские или коробчатые	1,58	3630	1,76 / 3710
625E		1,58	3630	1,76 / 3710; 1,95 / 3835
635G		1,95	3810	2,32 / 3835

Эффективная эксплуатация колесных и гусеничных трелевочных машин достигается за счет грамотного подбора характеристик навесного оборудования и его оптимального расположения. Это обеспечивает высокую производительность, удобство в управлении и обслуживании, а также сохраняет маневренность и устойчивость машины. Оборудование может быть как встроенным (ин-

дивидуальным), так и съемным (универсальным), устанавливаемым на время выполнения конкретных операций (задач). Разнообразие условий работы и требований к лесозаготовке обуславливает применение различных видов техники – как колесной, так и гусеничной, – включая гидроманипуляторы.

Место установки гидроманипулятора на базовой машине определяется видом выполняемых работ и особенностями его конструкции. Чаще всего его монтируют в средней части рамы, однако возможны также фронтальный, боковой, задний и надкабинный варианты (в том числе надкапотный – для беспилотных машин) [3, 4]. Гидроманипулятор может быть как неотъемлемым элементом машины, так и съемным оборудованием, устанавливаемым только на время погрузочно-разгрузочных операций. По типу технологического оснащения трелевочные машины делятся на чокерные и бесчокерные. В процессе работы на лесосеке машину разворачивают и позиционируют так, чтобы формирование пачки требовало минимальных затрат времени и труда. Чокерные машины подают задним ходом на 2-4 м от щита до первого дерева или хлыста. При трелевке вершиной вперед продольная ось машины должна совпадать с направлением движения троса лебедки – это упрощает формирование пачки и помогает сохранить подрост [5]. Если же деревья трелюют комлем вперед, машину ставят под углом 50-60° к направлению подтаскивания, чтобы комли не упирались в пни. После установки оператор опускает щит.

На рис. 1 представлены колесные и гусеничные трелевочные машины с тросочокерным оборудованием.



а)



б)



в)



г)

а, в – порожнее состояние; б, г – при трелевке

Рисунок 1 – Колесные и гусеничные машины с тросочокерным оборудованием

Процесс формирования пачки с помощью чокерного оборудования состоит из трех последовательных операций: оттаскивания каната, чокеровки хлыстов или деревьев и их подтягивания лебедкой. Для облегчения оттаскивания каната, его разматывают с барабана путем кратковременного (3 секунды) включения лебедки. При трелевке вершиной вперед чокеры закрепляют на расстоянии 0,7...1,2 м от среза, а при движении комлем вперед – на 0,5...0,7 м от комля. Ввиду низкой производительности и значительных затрат тяжелого ручного труда применение чокерного оборудования на БПТМ признается нецелесообразным.

Бесчокерные машины оснащаются гидроманипуляторами либо пачковыми захватами. В состав их технологического оборудования входят стреловой гидроманипулятор, шарнирный захват, зажимной коник с канатной обвязкой и бульдозерный отвал. Манипулятор обеспечивает поштучный сбор деревьев и формирование пачки в самозажимном конике.

На рис. 2 показаны бесчокерные трелевочные машины на колесном и гусеничном ходу, оборудованные гидроманипулятором и самозажимным коником.

При бесчокерной трелевке машину устанавливают так, чтобы за одну стоянку захватить как можно больше деревьев. При перемещении машины поваленные деревья раздвигают отвалом или манипулятором. После сбора хлыстов или деревьев на первой стоянке коник закрывают, и машина переезжает к следующей стоянке. Сортировку деревьев по породам, размерам и качеству можно выполнять непосредственно в процессе трелевки.



а)



б)



в)



г)

а, в – порожнее состояние; б, г – при трелевке

Рисунок 2 – Колесные и гусеничные машины с бесчокерным оборудованием

Бесчокерное оборудование (гидроманипулятор с захватом и самозажимным коником) применимо на БПТМ, однако дистанционное управление им включает множество операций, что чрезмерно нагружает удаленного оператора и не позволяет ему одновременно работать на нескольких БПТМ.

В качестве альтернативы выступают машины с пачковыми захватами (рис. 3), подхватывающие заранее сформированные пачки деревьев за один прием. Пачка при этом удерживается прямо в захвате, а не в конике. В состав такого оборудования входят стрела с вылетом порядка 1,72 м, пачковый (клещевой) захват грузоподъемностью около 9 т, лебедка и толкатель. Масса гусеничной машины – порядка 15 т, максимальный объем пачки – 10 м³.

Для БПТМ наиболее приемлемо бесчокерное оборудование с пачковым захватом. Дистанционное управление им сводится к минимуму операций: сбор заранее сформированной пачки деревьев выполняется за одну операцию, трелевка идет в автономном режиме, а разгрузка пачки с последующим окучиванием толкателем – также за одну операцию [6, 7].



а)



б)



в)



г)

а, в – порожнее состояние; б, г – при трелевке

Рисунок 3 – Колесные и гусеничные машины с пачковым захватом

Минимальное количество операций дает удаленному оператору возможность параллельно работать на других БПТМ, что повышает производительность труда и сокращает финансовые затраты на дополнительный персонал.

Вывод

Анализ применяемого технологического трелевочного оборудования для хлыстовой заготовки древесины приводит к следующим выводам:

Чокерное оборудование непригодно для БПТМ из-за низкой производительности и тяжелого ручного труда чокеровщиков на делянке.

Бесчokerное оборудование (гидроманипулятор с захватом и самозажимным коником) применимо на БПТМ, но дистанционное управление включает множество операций, что перегружает удаленного оператора и не позволяет ему параллельно работать на другой БПТМ.

Наиболее подходящим для БПТМ является бесчokerное оборудование с пачковым захватом: дистанционное управление сводится к минимуму операций – сбор заранее сформированной пачки деревьев (хлыстов) за одну операцию, трелевка в автономном режиме и разгрузка пачки с окучиванием толкателем также за одну операцию. Минимум операций дает оператору возможность параллельно обслуживать другие машины, что повышает производительность труда и сокращает затраты на дополнительный персонал.

Список литературы

1. Миронов Е.И. Машины и оборудование лесозаготовок. / Е.И. Миронов [и др.]. М.: Лесная промышленность, 1985. 320 с.
2. Котиков В.М. Теория и конструкция машин и оборудования отрасли (колесные и гусеничные машины) / В.М. Котиков. М.: МГУЛ, 2007. 353 с.
3. Клубничкин В.Е. Краткий анализ тенденций развития лесозаготовительных машин / В.Е. Клубничкин, Е.Е. Клубничкин, А.Б. Карташов // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2020. № 3 (130). С. 93-102.
4. Клубничкин В.Е. Автоматизация технологических процессов лесозаготовительной машины / В.Е. Клубничкин, Е.Е. Клубничкин, Д.И. Рогачев // Научно-технический вестник Поволжья. – 2021. – № 12. – С. 114-117.
5. Аблонский Е.И. Трелевочные тракторы / Е.И. Аблонский [и др.]. М: Лесная промышленность, 1972. 224 с.
6. Клубничкин В.Е. Коллаборативная технология трелевки древесины // В сборнике: Современный лесной комплекс страны: проблемы и тренды развития. Материалы Всероссийской научно-практической конференции. Отв. редактор А.А. Платонов. Воронеж, 2022. С. 26-31.
7. Клубничкин В.Е. Формирование облика гусеничных беспилотных трелевочных машин. // Материалы XX Международной научно-технической конференции. «Актуальные проблемы развития лесного комплекса» Вологда: ВГУ, 2022. С. 287-291.

References

1. Mironov E.I. Logging Machinery and Equipment / E.I. Mironov [et al.]. Moscow: Lesnaya Promyshlennost, 1985. 320 p.
2. Kotikov V.M. Theory and Design of Industry Machinery and Equipment (Wheeled and Tracked Vehicles) / V.M. Kotikov. Moscow: MGUL, 2007. 353 p.
3. Klubnichkin V.E. A brief analysis of trends in the development of logging machines / V.E. Klubnichkin, E.E. Klubnichkin, A.B. Kartashov // Proceedings of the R.E. Alekseev NSTU. 2020. № 3 (130). pp. 93-102.
4. Klubnichkin V.E. Automation of technological processes of a logging machine / V.E. Klubnichkin, E.E. Klubnichkin, D.I. Rogachev // Scientific and Technical Bulletin of the Volga region. – 2021. – № 12. – pp. 114-117.

5. Ablonsky E.I. Skidding Tractors / E.I. Ablonsky [et al.]. Moscow: Lesnaya Promyshlennost, 1972. 224 p.

6. Klubnichkin V.E. Collaborative technology of wood skidding // In the collection: The modern forest complex of the country: problems and development trends. Materials of the All-Russian scientific and practical conference. Editor-in-chief A.A. Platonov. Voronezh, 2022. pp. 26-31.

7. Klubnichkin V.E. Formation of the appearance of tracked unmanned skidding machines. // Proceedings of the XX International Scientific and Technical Conference. «Actual problems of the development of the forest complex» Vologda: VSU, 2022. pp. 287-291.

**ОЦЕНКА ПОЛНОТЫ ОЧИСТКИ КОРЧЕВАТЕЛЕМ ТЕРРИТОРИЙ
ОТ НЕЖЕЛАТЕЛЬНОЙ ДРЕВЕСНО-КУСТАРНИКОВОЙ
РАСТИТЕЛЬНОСТИ**

Коротких В.Н., Платонов А.А.

*Воронежский государственный лесотехнический университет
имени Г.Ф. Морозова, Воронеж, Россия*

**ASSESSMENT OF THE COMPLETENESS OF THE UPROOTING
OF TERRITORIES FROM UNWANTED TREE AND SHRUB
VEGETATION**

Korotkikh V.N., Platonov A.A.

*Voronezh State University of Forestry and Technologies
named after G.F. Morozov, Voronezh, Russia*

Аннотация: При расчистке территорий линейной инфраструктуры от нежелательной древесно-кустарниковой растительности одним из вариантов применяемых технологических процессов является использование корчевального оборудования. В работе рассматриваются вопросы оценки качества работ по удалению нежелательной растительности новым корчевальным оборудованием.

Abstract: When clearing unwanted trees and shrubs from linear infrastructure, one of the technological processes used is the use of stump removal equipment. This paper examines the quality of vegetation removal work performed using new stump removal equipment.

Ключевые слова: нежелательная растительность, удаление, выкорчевывание, устройство, качество, площадь.

Keywords: unwanted vegetation, removal, uprooting, device, quality, area.

При расчистке территорий линейной инфраструктуры (полос отвода, защитных зон, полезащитных полос и т.д.) от нежелательной древесно-кустарниковой растительности одним из вариантов применяемых технологических процессов является использование корчевального оборудования [7]. В рамках диссертационного исследования [4] было создано новое корчевальное оборудование (автор – В.Н. Коротких) [2, 9], которое показало свою эффективность в различных условиях эксплуатации. Указанное корчевальное оборудование агрегируется с трактором типа «погрузчик» и обеспечивает сплошное удаление древесно-кустарниковой растительности.

В случае одиночно произрастающей растительности (например, дерево 7...15 м) вопрос полноты очистки корчевальным оборудованием территории от растительности решается фактически визуально по факту удаления такого дерева.



Рисунок 1 – Удаление растительности новым корчевальным оборудованием

Однако, разработанное В.Н. Коротких корчевальное оборудование [2] позволяет удалять одновременно несколько деревьев, и в этом случае вопрос оценки полноты очистки территории требует применения показателей качества и методов математического моделирования [5].

В ходе выполненной экспериментальной очистки участков, расположенных в Таловском (№ 1) и Верхнехавском (№ 2) районах Воронежской области было осуществлено сплошное удаление нежелательной древесно-кустарниковой растительности высотой 4...6 м, по классификации относящейся к кустарникам. Одновременно (за одно воздействие корчевальным оборудованием) удалялось несколько экземпляров растительности [1, 8], при этом ввиду того, что влажность почвы была повышенной (до 23 %), существовала вероятность пропуска отдельных экземпляров растительности.

Для оценки качества работ по удалению нежелательной растительности был принят индекс контроля $I_{уч\ ндкр}^k$ очистки территорий от нежелательной древесно-кустарниковой растительности [3, 6]:

$$I_{уч\ ндкр}^k = \frac{S_{уч\ ндкр}^k}{S_{уч}^k} \cdot 100\% \quad (1)$$

В зависимости (1) $S_{уч\ ндкр}^k$ – площадь элементарных участков с не выкорчёванной нежелательной древесно-кустарниковой растительностью, m^2 ; $S_{уч}^k$ – общая площадь корчевания нежелательной растительности.

При проведении экспериментальных исследований по достижению плановых показателей количества циклов корчевальной работы (для одного опыта – 120 циклов) на участке № 1 (опыт № 1) была выполнена предварительная оценка общей площади $S_{уч}^k$ воздействия корчевального оборудования на территорию произрастания нежелательной растительности, выявлена её предварительная величина $S_{уч}^k = 380\ m^2$.

Путём проведения предварительных статистических исследований полученная величина площади $S_{уч}^K$ воздействия корчевального оборудования для выявления целевой функции «индекс контроля $I_{уч\ ндкр}^K$ очистки территорий от нежелательной древесно-кустарниковой растительности» была признана незначительной.

Ввиду этого, для получения более точных оценок полноты очистки территорий испытуемым корчевальным оборудованием в рамках проведения дополнительных опытов, предусматривающих выполнение корчевания нежелательной растительности для уровней влажности $W_n = 16\%$ и $W_n = 23\%$, дополнительным целевым показателем выполнения корчевальной работы в каждом опыте являлось достижение минимальной общей площади корчевания нежелательной растительности $S_{уч\ min}^K = 1000\text{ м}^2$.

По окончании технологического процесса корчевания нежелательной растительности выполнялась оценка полноты очистки территорий принятых для экспериментального исследования участков №№ 1 и 2 от указанной растительности.

Результаты выявления экспериментальных характеристик элементов выполнения корчевальной работы испытуемым корчевальным оборудованием представлены на рис. 2.

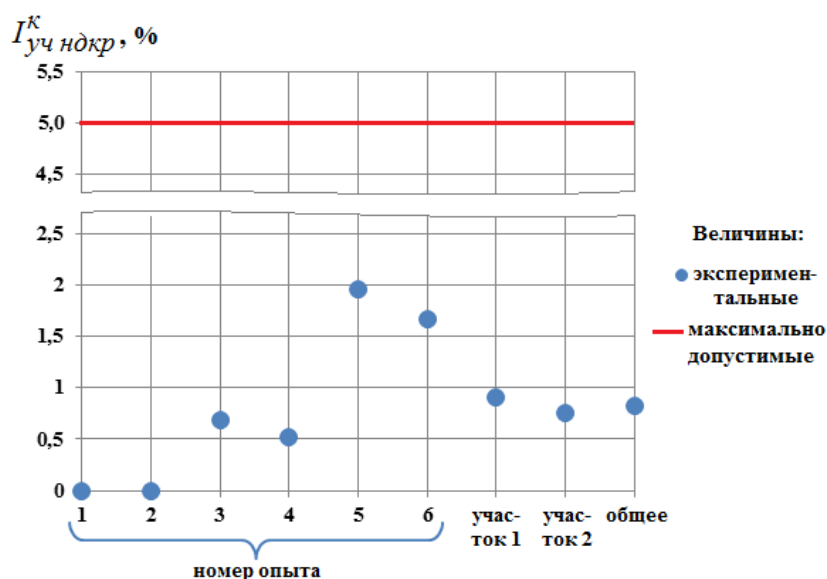


Рисунок 2 – Индекс контроля $I_{уч\ ндкр}^K$ очистки корчевателем территорий от нежелательной древесно-кустарниковой растительности

Результаты анализа полученных величин индекса контроля $I_{уч\ ндкр}^K$ показывают, что во всех случаях (как для опытов по отдельности, так и для участков и в целом для всего экспериментального исследования) корчевальным оборудованием была обеспечена заявленная при его проектировании полнота очистки территорий от нежелательной древесно-кустарниковой растительности.

Наилучшие результаты были получены при влажности почвенного слоя $W_n = 9\%$ (для участков №№1 и 2 величина $I_{уч\ ндкр}^K = 0$: отсутствуют невыкорчёванные экземпляры нежелательной растительности). Наихудшие результаты были получены при влажности почвенного слоя $W_n = 23\%$ (для участков №№ 1 и 2 величины $I_{уч\ ндкр}^K = 1,96$ и $1,67$: в наличии экземпляры нежелательной растительности, распределённые по площади соответственно 23 и 20 м²). Однако и в этом случае экспериментальные величины индекса контроля $I_{уч\ ндкр}^K$ не превысили максимально допустимого значения $[I_{уч\ ндкр}^K] = 5\%$.

В целом анализ полученных экспериментальных величин индекса контроля $I_{уч\ ндкр}^K$ подтвердил способность испытываемого корчевального оборудования обеспечить полную очистку территорий от нежелательной древесно-кустарниковой растительности, в том числе при негативном влиянии увеличения влажности почвенного слоя.

Список литературы

1. Драпалюк М.В. Структура рабочего времени корчевания нежелательной растительности / М.В. Драпалюк, В.Н. Коротких, А.А. Платонов // Технологии в биоэкономике: инновации и вызовы в XXI веке: Материалы Международного форума, Воронеж, 28-30 мая 2025 года. – Воронеж: Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова, 2025. – С. 69-75. – DOI: 10.58168/TBiEc2025_69-75.
2. Патент № 2850883 С1 Российская Федерация, МПК А01G 23/06. Корчеватель: заявл. 05.07.2025: опубл. 17.11.2025 / В.Н. Коротких, М.В. Драпалюк, А.А. Платонов, П.А. Нартов; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова».
3. Платонов А.А. Анализ критериев оценки качества работ по удалению нежелательной поросли / А.А. Платонов // Наука. Техника. Технологии (политехнический вестник). – 2022. – № 1. – С. 177-181.
4. Платонов А.А. Исследование и систематизация существующих технологических процессов удаления нежелательной растительности / А.А. Платонов // Системы. Методы. Технологии. – 2020. – № 3(47). – С. 63-73. – DOI: 10.18324/2077-5415-2020-3-63-73.
5. Платонов А.А. Компоненты математической модели корчевателя нежелательной поросли, произрастающей вдоль линейных лесных объектов / А.А. Платонов, В.Н. Коротких // Транспорт: наука, образование, производство («Транспорт-2026»): Сборник статей Международной научно-практической конференции, Воронеж, 20-21 апреля 2026 года. Секция: «Теоретические и практические вопросы транспорта». – Воронеж: Ростовский государственный университет путей сообщения, 2026. – С. 221-228.

6. Платонов А.А. Математическое моделирование оценки степени покрытия растительностью территорий инфраструктурных объектов / А.А. Платонов, М.А. Платонова // *Resources and Technology*. – 2022. – Т. 19, № 4. – С. 23-41. – DOI: 10.15393/j2.art.2022.6383.

7. Платонов А.А. Особенности формирования капитальных вложений для создания систем машин удаления нежелательной растительности / А.А. Платонов, О.В. Терновская // *Лесотехнический журнал*. – 2020. – Т. 10, № 3(39). – С. 164-174. – DOI: 10.34220/issn.2222-7962/2020.3/16.

8. Платонов А.А. Особенности экспериментальных исследований нового корчевального оборудования / А.А. Платонов // *Транспорт: наука, образование, производство («Транспорт-2025»): Сборник статей Международной научно-практической конференции, Воронеж, 23-25 апреля 2025 года.* – Воронеж: Ростовский государственный университет путей сообщений, 2025. – С. 179-182.

9. Совершенствование технологий и техники для расчистки площадей от нежелательной древесно-кустарниковой растительности / М.В. Драпалюк, В.Н. Коротких, А.А. Платонов [и др.] // *Леса России и хозяйство в них.* – 2025. – № 3(94). – С. 136-146. – DOI: 10.51318/FRET.2025.94.3.014.

References

1. Drapalyuk M.V. Structure of working time for uprooting unwanted vegetation / M.V. Drapalyuk, V.N. Korotkikh, A.A. Platonov // *Technologies in bioeconomy: innovations and challenges in the 21st century: Proceedings of the International Forum, Voronezh, May 28-30, 2025.* – Voronezh: Voronezh State Forest Engineering University named after G.F. Morozov, 2025. – pp. 69-75. – DOI: 10.58168/TBiEc2025_69-75.

2. Patent № 2850883 C1 Russian Federation, IPC A01G 23/06. Uprooter: declared 05.07.2025; published 17.11.2025 / V.N. Korotkikh, M.V. Drapalyuk, A.A. Platonov, P.A. Nartov; applicant: Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Voronezh State Forest Engineering University named after G.F. Morozov».

3. Platonov A.A. Analysis of criteria for assessing the quality of work on removing unwanted growth / A.A. Platonov // *Science. Engineering. Technologies (Polytechnic Bulletin)*. – 2022. – № 1. – pp. 177-181.

4. Platonov A.A. Research and systematization of existing technological processes for removing unwanted vegetation / A.A. Platonov // *Systems. Methods. Technologies*. – 2020. – № 3 (47). – pp. 63-73. – DOI: 10.18324/2077-5415-2020-3-63-73.

5. Platonov A.A. Components of a mathematical model for uprooting unwanted growth along linear forest objects / A.A. Platonov, V.N. Korotkikh // *Transport: science, education, production («Transport-2026»): Collection of articles from the International scientific and practical conference, Voronezh, April 20-21, 2026. Section: «Theoretical and practical issues of transport».* – Voronezh: Rostov State University of Railway Engineering, 2026. – pp. 221-228.

6. Platonov A.A. Mathematical modeling of assessing the degree of vegetation cover of infrastructure facilities / A.A. Platonov, M.A. Platonova // *Resources and*

Technology. – 2022. – Vol. 19, No. 4. – pp. 23-41. – DOI: 10.15393/j2.art.2022.6383.

7. Platonov A.A. Features of the formation of capital investments for the creation of systems of machines for removing unwanted vegetation / A.A. Platonov, O.V. Ternovskaya // Forestry journal. – 2020. – Vol. 10, № 3(39). – pp. 164-174. – DOI: 10.34220/issn.2222-7962/2020.3/16.

8. Platonov A.A. Features of experimental studies of new uprooting equipment / A.A. Platonov // Transport: science, education, production («Transport-2025»): Collection of articles from the International scientific and practical conference, Voronezh, April 23-25, 2025. – Voronezh: Rostov State University of Railway Engineering, 2025. – pp. 179-182.

9. Improving technologies and equipment for clearing areas of unwanted trees and shrubs / M.V. Drapalyuk, V.N. Korotkikh, A.A. Platonov [et al.] // Forests of Russia and their management. – 2025. – № 3 (94). – pp. 136-146. – DOI: 10.51318/FRET.2025.94.3.014.

**НАВЕСНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ БПЛА ДЛЯ
ЛЕСОВОССТАНОВЛЕНИЯ СЕЯНЦАМИ С ЗАКРЫТОЙ
КОРНЕВОЙ СИСТЕМОЙ**

Лукашевич В.М., Киприянов Р.А.

Петрозаводский государственный университет, Петрозаводск, Россия

**MOUNTED EQUIPMENT FOR UAVs FOR REFORESTATION
WITH CONTAINERIZED SEEDLINGS**

Lukashevich V.M., Kipriyanov R.A.

Petrozavodsk State University, Petrozavodsk, Russia

Аннотация: Предложено новое навесное оборудование для дронов, обеспечивающее вкручивание биоразлагаемой посадочной капсулы с сеянцем с закрытой корневой системой (ЗКС) в грунт. Приведены схема оборудования и результаты полевых экспериментов. Сопоставление расчётных и экспериментальных данных показало расхождение в 1 % для подготовленной и 11 % для неподготовленной почвы.

Abstract: A new mounted equipment for drones is proposed, which ensures the screwing of a biodegradable planting capsule with a containerized seedling into the soil. The equipment diagram and the results of field experiments are presented. A comparison of the calculated and experimental data showed a discrepancy of 1% for prepared soil and 11% for unprepared soil.

Ключевые слова: лесовосстановление, БПЛА, сеянцы с закрытой корневой системой, винтовая посадочная капсула, крутящий момент.

Keywords: reforestation, UAV, containerized seedlings, screw planting capsule, torque.

Согласно Правилам лесовосстановления РФ [1], доля саженцев с закрытой корневой системой (ЗКС) при искусственном лесовосстановлении должна составлять не менее 30 %. Посадка вручную под меч Колесова или с помощью посадочной трубы — тяжёлый монотонный сезонный труд, острота которого усиливается дефицитом рабочей силы. Лесопосадочные машины наиболее эффективны на подготовленных площадях (расчищенных, с выровненным рельефом); их работа затруднена на вырубках с пнями, валежником и камнями, а также на переувлажнённых и пересечённых участках. В этих условиях применение БПЛА рассматривается как перспективная альтернатива, позволяющая повысить эффективность искусственного лесовосстановления там, где ручной труд остаётся единственно возможным, а лесопосадочная техника неприменима.

В результате обзора источников и патентного поиска были найдены технические решения по использованию БПЛА для лесовосстановления. Анализ по-

казал, что наиболее известные на сегодня технические решения в области применения БПЛА в лесном хозяйстве ориентированы преимущественно на аэросев семян или гравитационный сброс капсул, что неприменимо для посадочного материала с ЗКС (торфяной ком требует точного заглубления без разрушения его структуры). Это обуславливает необходимость разработки специализированного навесного оборудования БПЛА, обеспечивающего поштучную подачу и безударное внедрение сеянцев с ЗКС в неподготовленный грунт.

При патентном поиске были найдены несколько технических решений для посадки леса с помощью БПЛА.

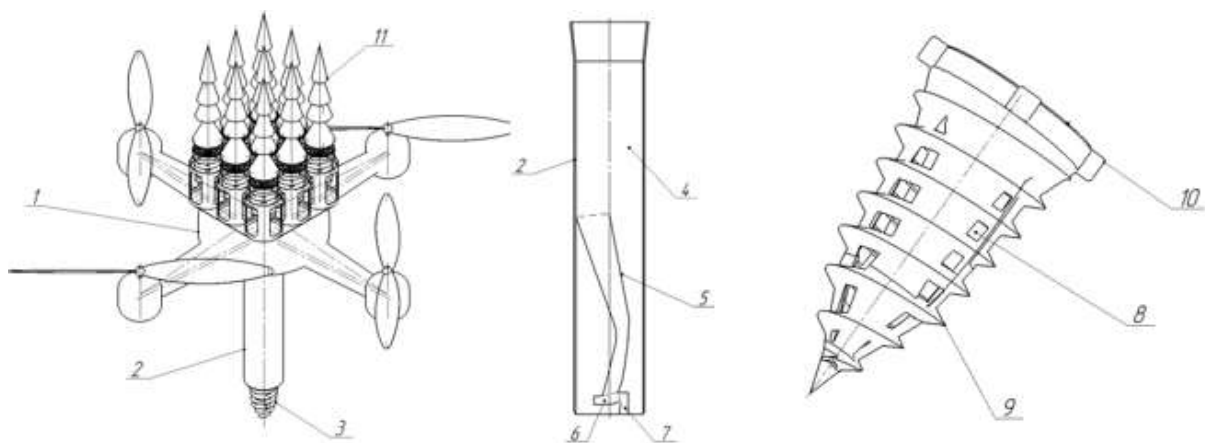
В патенте JP 6768746B2 [2] представлен посадочный модуль, размещенный на БПЛА роторного типа. Он включает в себя ударно-спусковой механизм, который можно использовать как в лесном, так и в сельском хозяйстве. При работе модуля посадочная капсула с семенами подается в камеру, откуда по команде высвобождается и сбрасывается на землю под действием собственного веса, сжатого газа или механической энергии пружины.

Второе техническое решение – патент RU 2847798 C1 [3] на устройство для аэропосадки сеянцев с закрытой корневой системой. Оно представляет собой посадочный конус из биоразлагаемого материала с боковыми отверстиями для выхода корней, внутри которого помещен сеянец с почвенным субстратом. Нижняя часть конуса обработана лаком на водной основе, а на его дне в качестве балласта размещен речной песок. Спуск конуса на землю осуществляется с помощью парашюта.

Техническое решение по патенту CN 113711741 [4] представляет собой посадочный аппарат, требующий зависания БПЛА для выполнения операции. На дроне установлены направляющая труба, подъемная лебедка с тросом, грузограничитель и посадочная капсула. Сама капсула состоит из цилиндрической части для размещения сеянца и конусной нижней части с твердым заостренным наконечником. Наконечник выполнен в виде тяжелого конического цементного блока, ориентированного вершиной вниз. Капсула вбивается в грунт, затем поднимается на лебедке, и операция повторяется.

Среди выявленных технических решений можно выделить общие недостатки, что внедрение посадочной капсулы в почву осуществляется ударным способом. Такая ударная нагрузка ведет к встряхиванию сеянца и его корневой системы вместе с комом земли, что вызывает поломку стволика растения и повреждению корневой системы, находящейся в коме земли в посадочной капсуле. Еще один недостаток заключается в том, что такое устройство производительно на супесчаных (относительно рыхлых) почвах и малопродуктивно на глинистых (твердых) почвах или задерненных почвах, ввиду большой сопротивляемости таких почв внедрению вбиваемого конусного тела.

Предлагаемое навесное оборудование (рис. 1) включает направляющую посадочную трубу и биоразлагаемую посадочную капсулу.



1 – БПЛА; 2 – посадочная труба; 3 – посадочная капсула; 4 – поверхность стенки направляющей трубы; 5 – первый паз; 6 – второй паз; 7 – третий паз; 8 – отверстия в капсуле; 9 – винтовая резьба капсулы; 10 – фиксирующий шип; 11 – сеянец с закрытой корневой системой (ЗКС)
Рисунок 1 – Устройство для посадки сеянцев с ЗКС

Капсула выполнена в виде конуса с винтовой линией, образующей коническую резьбу, и снабжена фиксирующими шипами и боковыми отверстиями для выхода корней. На внутренней поверхности трубы выполнена система связанных пазов. Работает устройство следующим образом. Капсула с сеянцем устанавливается в направляющую трубу и под действием силы тяжести скользит вдоль неё; шипы капсулы последовательно проходят первый, второй и третий пазы. При включении вращения БПЛА в режиме «рыскания» шипы прижимаются к глухой части второго пазу, благодаря чему на капсулу передаётся как вращательное движение, так и осевое усилие прижатия к почве. Капсула заглубляется в грунт путём вкручивания. При достижении заданной глубины вращение прекращают и меняют его направление на противоположное; шипы переходят в третий паз, труба поднимается, а капсула остаётся в почве. Затем подаётся следующая капсула, выбирается новая точка посадки, и цикл повторяется.

Моделирование выполнялось в среде «Компас», опытный образец посадочной трубы и капсулы был напечатан на 3D-принтере; для усиления конструкции труба с системой внутренних пазов крепилась к пластиковой трубе. Полевые испытания проводились на территории учебного корпуса на подготовленной и неподготовленной почве. Крутящий момент измерялся электронным динамометрическим ключом (рис. 2).

В ходе полевых испытаний получены средние значения крутящего момента: для подготовленной почвы – 3,51 Н·м, для неподготовленной – 16,27 Н·м. Теоретический расчет крутящего момента выполнен по методике ВНИИСТ для винтовых свай [5]. Расчетный крутящий момент для подготовленной почвы составил 3,48 Н·м, для неподготовленной – 18,1 Н·м.



Рисунок 2 – Эксперимент по вкручиванию капсулы в почву: слева – измерение крутящего момента электронным динамометрическим ключом; капсула, закрученная в неподготовленную (в середине) и подготовленную (справа) почву

Расхождение для подготовленной почвы менее 1 % подтверждает адекватность принятой расчётной модели. Для неподготовленной почвы расхождение 11,3 % объясняется неоднородностью целины (корни, камни, локальные уплотнения) и возможным отличием фактического коэффициента трения от принятого значения 0,62. Указанное расхождение следует учитывать при проектировании: для гарантированного вкручивания в тяжёлые грунты необходим запас крутящего момента не менее 15 %. Полученные результаты подтверждают принципиальную работоспособность предложенной конструкции.

В настоящий момент решаются такие задачи, как расчет и оптимизация геометрии капсулы по критерию минимума крутящего момента; расчёт динамики полёта и стабилизации БПЛА в момент внедрения капсулы с разработкой алгоритма компенсации опрокидывающих сил; прочностной анализ несущей рамы и элементов посадочного модуля; технико-экономическая оценка производительности и себестоимости посадки гектара леса.

Список литературы

1. Правила лесовосстановления, формы, состава, порядка разработки проекта лесовосстановления и внесения в него изменений: Приказ МПРиЭ РФ от 29.12.2021 № 1024 // Официальный интернет-портал правовой информации: [сайт]. – URL: pravo.gov.ru.
2. Planting device: пат. 6768746 B2 JP, Япония: МПК A01C 11/02: № 2017042571: заявл. 07.03.2017: опубл. 14.10.2020 / Masuda K., Suyama T.; заявитель Iseki & Co Ltd. // Google Patents: [сайт]. – URL: <https://patents.google.com/patent/JP6768746B2/en?q=JP+6768746B2> (дата обращения: 25.05.2026)
3. Устройство для аэропосадки семян древесных пород с закрытой корневой системой: пат. 2847798 C1 Рос. Федерация: МПК A01C 7/00: № 2025103522A: заявл. 18.02.2025: опубл. 15.10.2025 / С.В. Кириллов, В.Г.

Краснов, В.Ф. Краснова, И.В. Тымбаршев; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «Поволжский государственный технологический университет» // Google Patents: [сайт]. – URL: <https://patents.google.com/patent/RU2847798C1/en?q=RU+2847798> (дата обращения: 25.05.2026).

4. Automatic planting device of unmanned aerial vehicle and ware of planting seedlings : пат. 113711741 CN, Китай: МПК A01C 11/02: № 202110996843.1: заявл. 27.08.2021: опубл. 30.11.2021 / Tang Y., Zhang S., Wang L.; заявитель South China Agricultural University. // Google Patents: [сайт]. – URL: <https://patents.google.com/patent/CN113711741A/en?q=CN113711741A> (дата обращения: 25.05.2026).

5. Рекомендации по определению крутящего момента и осевого усилия при погружении винтовых свай: утв. Минэнерго СССР. – М: ВНИИСТ, 1983. – 49 с.

References

1. Rules of Reforestation, the Form, Composition and Procedure for Developing a Reforestation Project and Introducing Amendments Thereto: Order of the Ministry of Natural Resources and Environment of the Russian Federation № 1024 dated 29.12.2021. // Official Internet Portal of Legal Information: [website]. – URL: pravo.gov.ru.

2. Planting device: Patent 6768746 B2 JP, Japan: IPC A01C 11/02: Appl. № 2017042571: filed 07.03.2017: published 14.10.2020 / Masuda K., Suyama T.; applicant Iseki & Co Ltd. // Google Patents: [website]. – URL: <https://patents.google.com/patent/JP6768746B2/en?q=JP+6768746B2> (accessed: 25.05.2026).

3. Device for aerial planting of tree seedlings with a closed root system : Patent 2847798 C1 RU, Russian Federation: IPC A01C 7/00: Appl. № 2025103522A: filed 18.02.2025: published 15.10.2025 / S.V. Kirillov, V.G. Krasnov, V.F. Krasnova, I.V. Tymbarshev; applicant and patent holder Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Volga State University of Technology» // Google Patents: [website]. – URL: <https://patents.google.com/patent/RU2847798C1/en?q=RU+2847798> (accessed: 25.05.2026).

4. Automatic planting device of unmanned aerial vehicle and ware of planting seedlings: Patent 113711741 CN, China: IPC A01C 11/02: Appl. № 202110996843.1: filed 27.08.2021: published 30.11.2021 / Tang Y., Zhang S., Wang L.; applicant South China Agricultural University // Google Patents : [website]. – URL: <https://patents.google.com/patent/CN113711741A/en?q=CN113711741A> (accessed: 25.05.2026).

5. Recommendations for Determining the Torque and Axial Force When Driving Screw Piles: approved by the Ministry of Energy of the USSR. – Moscow: VNIIST, 1983. – 49 p.

УСТРОЙСТВО ДЛЯ КОЛЬЦЕВАНИЯ ДЕРЕВЬЕВ ПРИ РУБКАХ УХОДА В МОЛОДНЯКАХ

Макаров В.Е., Овчинников П.В., Смирнов А.В.

*Поволжский государственный технологический университет,
Йошкар-Ола, Россия*

DEVICES FOR GIRDLING TREES DURING TENDING FELLING IN YOUNG STANDS

Makarov V.E., Ovchinnikov P.V., Smirnov A.V.

*Volga State University of Technology,
Yoshkar-Ola, Russia*

Аннотация. В статье рассмотрен вопрос рубок ухода в молодняках кольцеванием в периоды осветления и прочистки. Статья направлена на совершенствование и модернизацию кольцевателей деревьев, путем упрощения конструкции и повышения производительности работ.

Abstract. The article examines the use of girdling for tending young forest stands during the cleaning and thinning stages. It aims to improve and modernize tree-girdling tools by simplifying their design and increasing operational productivity.

Ключевые слова: рубки ухода в молодняках, нежелательные древесные породы, простота конструкции, усыхание, кольцевание.

Keywords: tending cuts in young stands, undesirable tree species, simplicity of design, drying out, girdling.

Своевременное проведение рубок ухода в молодняках, возникших после пожаров или сплошных рубок, является определяющим фактором для создания продуктивных и устойчивых лесных насаждений [1].

Специалисты в области лесного хозяйства и научное сообщество уделяют особое внимание вопросам осветления на гарях, где эффективность традиционных методов снижается из-за активного вегетативного возобновления лиственных пород, подавляющих рост ценных хвойных культур [2-4].

В этом контексте перспективным решением становится химическое кольцевание – метод, заключающийся в нанесении надрезов на камбий нежелательных деревьев для их последующего усыхания. Ключевым преимуществом данной технологии является возможность её применения вне зависимости от сезона [5].

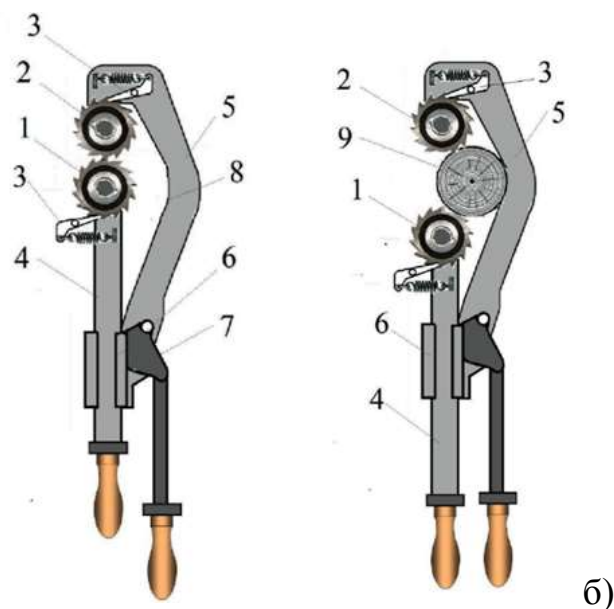
На сегодняшний день арсенал инструментов для кольцевания деревьев варьируется от ручных приспособлений (модели БТИ-1Б, БТИ-2) до механизированных комплексов на базе бензопил [6-8]. Однако существующие решения об-

ладают рядом критических недостатков: значительными габаритами и низкой производительностью, обусловленной необходимостью постоянной настройки ограничителей глубины пропила под конкретную породу древесины. Ограниченное внедрение метода предварительной подсушки деревьев перед рубкой связано именно с высокой трудоемкостью процесса.

В связи с этим разработка более простых, высокопроизводительных и универсальных устройств, способных работать с широким диапазоном диаметров стволов, является крайне *актуальной задачей*.

Целью работы разработка технических решений для устройств, осуществляющих кольцевание деревьев-конкурентов.

Решение задачи. Общая кинематическая схема устройства представлена (на рис. 1) [9]. Устройство представляет собой систему с двумя рычагами, один из которых неподвижен 4, а другой подвижен 5 и имеет возможность продольного перемещения и фиксации.



а) – исходное положение, б) – рабочее положение

1, 2 – дисковые фрезы, 3 – защелки, 4 – неподвижный рычаг, 5 – подвижный рычаг, 6 – ползун, 7 – эксцентриковый зажим, 8 – подвижный рычаг V-образной формы, 9 – дерево

Рисунок 1 – Кольцеватель для рубок ухода

На концах этих рычагов расположены дисковые фрезы 1 и 2 с храповыми механизмами 3. Форма (V-образная) подвижного рычага 8 в рабочей зоне указывает на специфическую функцию, связанную с обработкой материала, где синхронизированное движение фрез и рычага обеспечивает выполнение режущей операции.

Храповые механизмы, образованные защелками 3 на дисковых фрезах 1 и 2 и соответствующими элементами на рычагах 4 и 5, обеспечивают однонаправленное вращение фрез 1 и 2. При движении подвижного рычага 5 (или неподвижного рычага 4, в зависимости от конкретной реализации), защелки 3 взаимодействуют с зубчатыми элементами храповика, вызывая вращение фрезы

только в одном направлении. Обратное движение блокируется, что позволяет осуществлять точное дозирование режущего воздействия

Эксцентриковый зажим 7, расположенный на ползуне 6, служит для надежной фиксации подвижного рычага 5 в выбранном положении на неподвижном рычаге 4. Поворот эксцентрика создает давление, которое прижимает ползун к направляющей неподвижного рычага, предотвращая нежелательное смещение подвижного рычага во время работы устройства. Это обеспечивает стабильность и точность выполнения операции

Для работы устройства необходимо выполнить следующие шаги:

1. Поднести режущий орган к дереву 9;
2. Отодвинуть подвижный рычаг 5 от неподвижного 4, чтобы создать пространство для дерева 9;
3. Охватить дерево рычагами 4 и 5, сдвинуть их и зафиксировать зажимом 7.
4. Повернуть устройство. Срезание коры осуществляется при повороте на 180 градусов по часовой стрелке.

В случае неполного срезания, вернуть устройство в исходное положение, повторно сдвинуть и зафиксировать рычаги, а затем снова выполнить срез. Таким образом, производят полное кольцевание деревьев для подсушки их на корню.

Вывод. Применение данного механизма с упрощенной конструкцией позволит эффективно удалять нежелательную растительность методом усыхания на корню, тем самым высвобождая ресурсы для роста хозяйственно значимых лесных культур.

Список литературы

1. Сакса Т. Уход за молодняками. Цели, технологии и затраты / Т. Сакса, Я. Мийна, К. Утила // Метсаякустаннус, Институт природных ресурсов Финляндии (Luke), 2020. – 130 с.
2. Дебков Н.М. Нужны ли рубки ухода в сосновых молодняках в типичных для них условиях местопроизрастания? / Н.М. Дебков // Сибирский лесной журнал. 2020. № 1. С. 28-37.
3. Проблемы воспроизводства сосновых лесов Среднего Поволжья / С.А. Денисов, К.К. Калинин, В.П. Бессчетнов [и др.] // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Лес. Экология. Природопользование. – 2012. – № 1(14). – С. 12-23.
4. Коротков В. Концепция восстановления разновозрастных полидоминантных хвойно-широколиственных лесов Восточной Европы / В. Коротков // Устойчивое лесопользование. – 2016. – № 3(47). – С. 2-7.
5. Совершенствование химического метода подсушки нежелательных деревьев при уходе за лесом / Б.Е. Чижев, В.А. Штоль, М.В. Герасимова [и др.] // Лесохозяйственная информация. – 2015. – № 1. – С. 42-49.
6. Авторское свидетельство №419202 СССР, МПК А01G 7/06. Приспособление для кольцевания деревьев / Марченко И.С., заявитель и патентообладатель Брянский технологический институт, заявл. 16.12.1971, опубл. 15.03.1974. Бюл. №10.

7. Авторское свидетельство №159349 СССР, МПК A01G, B27B. Механическая пила для кольцевания древесины / Сарайкин Ю.Д., заявитель и патентообладатель Вснипилесдрев, заявл. 14.03.1963, опубл. 07.12.1963. Бюл. №24.

8. Авторское свидетельство №545303 СССР, МПК A01G 23/12, B27B 17/00. Устройство для кольцевания древесины / Шахов Е.Н., Амурцев А.Ф., заявитель и патентообладатель Всесоюзный научно-исследовательский институт лесоводства и механизации лесного хозяйства, заявл. 14.10.1975, опубл. 05.02.1977. Бюл. №5.

9. Патент № 2862683 Российская Федерация, A01G 23/12, Устройство для кольцевания деревьев / Царев Е.М., Макаров В.Е., Торопов А.В. заявитель и патентообладатель Поволжский государственный технологический университет, заявл. 17.11.2025, 26.05.2026. Бюл. № 15.

References

1. Saksa T. Tending of young stands: objectives, technologies, and costs / T. Saksa, J. Miina, K. Uotila // Metsäkustannus, Natural Resources Institute Finland (Luke), 2020. – 130 p.

2. Debkov N.M. Are tending cuts needed in young pine stands on typical sites? / N.M. Debkov // Siberian Journal of Forest Science. 2020. № 1. pp. 28-37.

3. Issues regarding the regeneration of pine forests in the Middle Volga region / S.A. Denisov, K.K. Kalinin, V.P. Besschetnov [et al.] // Bulletin of the Volga State University of Technology. Series: Forest. Ecology. Nature Management. – 2012. – № 1(14). – pp. 12-23.

4. Korotkov V. Concept for the restoration of uneven-aged, polydominant coniferous-broadleaved forests in Eastern Europe / V. Korotkov // Sustainable Forest Management. – 2016. – № 3(47). – pp. 2-7.

5. Improving the chemical method for desiccating unwanted trees during forest tending / B.E. Chizhov, V.A. Shtol, M.V. Gerasimova [et al.] // Forestry Information. – 2015. – № 1. – pp. 42-49.

6. Copyright certificate № 419202 Union of Soviet Socialist Republics, IPC A01G 7/06. Device for ringing trees / Marchenko I.S., applicant and patent holder Bryansk Technological Institute, appl. 12.16.1971, publ. 03.15.1974. Bull. № 10.

7. Copyright certificate № 159349 Union of Soviet Socialist Republics, IPC A01g, B27b. Mechanical saw for banding wood / Saraikin Yu.D., applicant and patent holder Vsnipilesdrev, appl. 03.14.1963, publ. 12.07.1963. Bull. № 24.

8. Copyright certificate № 545303 Union of Soviet Socialist Republics, IPC A01G 23/12, B27B 17/00. Device for banding wood / Shakhov E.N., Amurtsev A.F., applicant and patent holder All-Union Scientific Research Institute of Forestry and Forestry Mechanization, appl. 10.14.1975, publ. 02.05.1977. Bull. № 5.

9. Patent № 2862683 Russian Federation, A01G 23/12, Device for tree girdling / Tsarev E.M., Makarov V.E., Toropov A.V.; applicant and patent holder: Volga State University of Technology; appl. 11.17. 2025, publ. 05.26.2026. Bull. № 15.

ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ РАСПИЛОВКИ ПРИ ЛЕНТОЧНОМ ЛЕСОПИЛЕНИИ

Максименков А.И., Абрамов В.В., Акопян Д.Х.

*Воронежский государственный лесотехнический университет
имени Г.Ф. Морозова, Воронеж, Россия*

IMPROVING THE ACCURACY OF SAWING IN STRIP-LUMBERING

Makimenkov A.I., Abramov V.V., Akopyan D.H.

*Voronezh State University of Forestry and Technologies
named after G.F. Morozov, Voronezh, Russia*

Аннотация: Определены параметры определяющие точность распиловки древесины при ленточном лесопилении исходя из условия обеспечения требуемой величины шероховатости получаемой пилопродукции. Получены аналитические выражения для определения скорости подачи при различной ширине пропила.

Abstract: The parameters determining the accuracy of wood sawing in band sawing have been determined based on the condition of ensuring the required level of roughness of the resulting sawn timber. Analytical expressions have been obtained to determine the feed rate at different cut widths.

Ключевые слова: точность распиловки, ленточное лесопиление, качество, шероховатость.

Keywords: sawing accuracy, band sawing, quality, roughness.

Одной из энергоемких и наиболее важных технологических операций при переработке древесины является ее распиловка на пиломатериалы. При существующей технологии переработки и применяемом оборудовании (лесопильные рамы и круглопильные станки), деловой выход древесины с учетом пороков, очень низок и не превышает 50 – 60%, что обусловлено рядом причин: большие потери в опилки 18 – 20%; не оптимальная схема раскроя пиловочного сырья; низкое качество получаемых пиломатериалов. Это приводит к нерациональному использованию ресурсно-сырьевой базы.

На современном этапе развития деревообрабатывающего производства большинство малых предприятий России используют для распиловки бревен на доски горизонтальные ленточнопильные станки, заменяющие вертикальные лесопильные рамы. Эти станки, несмотря на сравнительно невысокую производительность, положительно зарекомендовали себя благодаря следующим преимуществам:

- простота конструкции;

- мобильность;
- индивидуальный раскрой;
- минимальная ширина пропила.

Одним из основных показателей оценки эффективной работы ленточной пилы горизонтального ленточнопильного станка является качество изготовленных досок. Согласно действующим стандартам доски разделяются по качеству древесины на пять сортов – отборочный, I, II, III, IV. Качество изготовления досок характеризуется такими показателями, как шероховатость обработанной поверхности, непараллельность пластей, волнистость, вырывы, риски. Величины показателей качества обработки допускаются в пределах погрешностей номинальных размеров пиломатериалов, то есть в пределах разнотолщинности досок. Так, для толщин досок 40...100 мм допустимая погрешность сортов высшего качества (отборочного, I и II) находится в пределах ± 2 мм. Следует также учитывать, что эти погрешности установлены для сухих пиломатериалов (когда влажность не превышает 22 %), а когда доски обладают большей влажностью (что характерно для условий пиления древесины в виде бревен), то допустимы значения погрешностей согласно данным[1] уменьшены вдвое. То есть отклонения толщины, упомянутых выше номинальных размеров досок, не должны превышать ± 1 мм. Именно такая точность, относительно разнотолщинности досок, должна обеспечиваться при распиловке бревен на горизонтальных ленточнопильных станках ленточными пилами.

Распиловка бревен на доски является начальной операцией технологического процесса механической обработки древесины, поэтому точность толщины досок определяет процент полезного выхода древесины вследствие величины припусков на последующих операциях механической обработки заготовок. Поэтому достижение высокой точности изготовления досок в современных условиях является важной задачей для производителей с точки зрения экономики сырья и энергоресурсов.

Следует отметить, что на сегодняшний день отсутствуют данные результатов теоретических и экспериментальных исследований точности распиловки бревен ленточной пилой с определенными геометрическими параметрами на горизонтальных ленточнопильных станках, которые позволили бы обосновать нормативные значения показателей технологической и геометрической точности станков отечественных производителей.

На основе вышеприведенного, считаем актуальным и необходимым проведение исследований точности распиловки бревен на горизонтальных ленточнопильных станках, с целью определения их фактического уровня точности, основных факторов влияния на точность обработки и разработки способов ее повышения.

Методика замеров разнотолщинности изготовленных досок разрабатывалась на основе требований госстандарта, устанавливающий методы контроля качества досок. Замеры выполнялись на пяти досках одинаковой номинальной толщины 40 мм в 20 точках, расположенных с двух сторон равномерно по длине каждой доски через 400 мм. Измерения толщин досок производились с

помощью штангенциркуля с точностью до 0,05 мм. Объем выборки данных замеров $N=100$.

Статистическая обработка результатов измерения выполнялась с помощью специально разработанной программы на ЭВМ, обеспечивающей определение статистических показателей, класса точности станка, качества точности обработанного размера (толщины досок) и установления закона распределения погрешности размера.

Результаты статистической обработки экспериментальных данных на ЭВМ представлен на рис. 1.

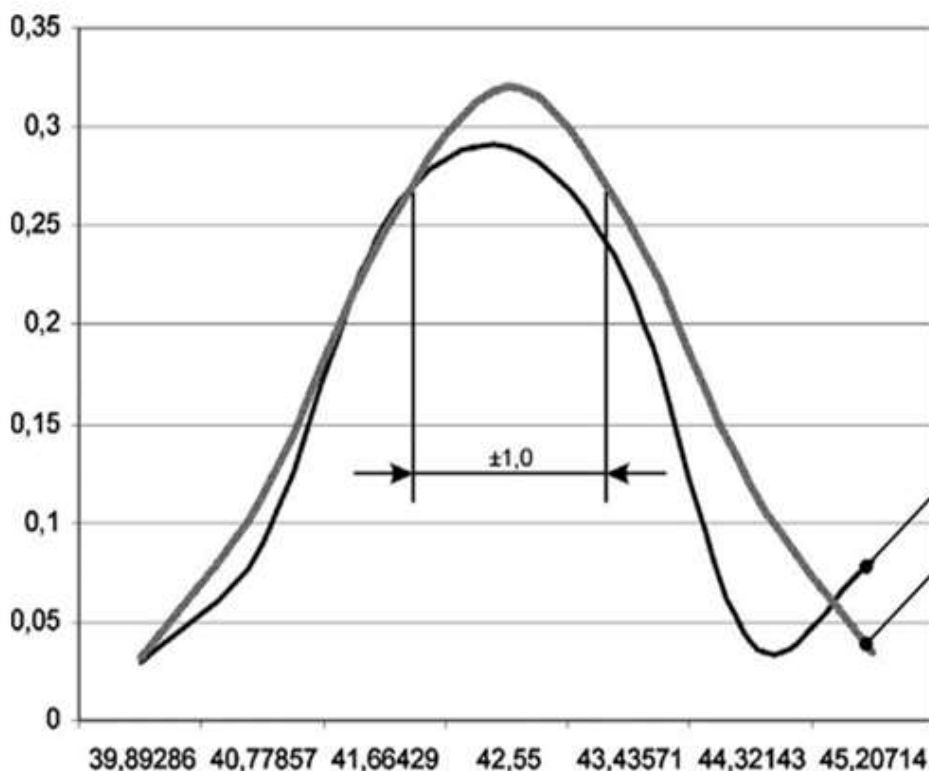


Рисунок 1 – Результаты статистической обработки данных разнотолщинности досок

На основе статистической обработки выборки данных разнотолщинности досок установлено:

- средний размер толщины 42,60 мм;
- качество обработки размера – 18;
- класс точности станка – 4 (низкий);
- закон распределения погрешностей – нормальный;
- поле рассеяния размера – $\pm 3,74$ мм.

Закономерность нормального распределения погрешностей толщин досок позволяет утверждать, что количество изготовленных досок на станке в пределах допуска $\pm 1,0$ мм составляет 25 % от общего объема производства.

На основе анализа характера изменения разнотолщинности по длине доски установлено, что основным фактором влияния на периодичность его изменения является неоднородность структуры древесины в плоскости резки. К названной

неоднородности можно отнести наличие сучков, увеличение твердости древесины от кроны до корневой части бревна, а также взаиморасположение годовых колец в плоскости резки.

Результаты измерений максимальной шероховатости при пилении бревен дуба с использованием малогабаритного ленточнопильного станка можно описать зависимостью от трех переменных – скорости подачи U , ширины пропила B , и температуры t :

$$R_{\max}(U, B, t) = 67.23 - 0.1004 B + 0.0001313 B^2 - 0.10288 - 0.0008895 B t + 0.01474 t^2 + 177.0 U + 0.01746 B U + 0.03495 t U - 16.93 U^2. \quad (1)$$

Выражение (1), аппроксимирует опытные данные с относительной погрешностью $< 10\%$. Сумма квадратов отклонений для $R_{\max}/R_{\text{хар}}$, ($R_{\text{хар}}=100$ мкм) меньше 1. Зависимость $R_{\max}$ от температуры незначительна, поэтому для расчетов максимальной шероховатости пиломатериалов из древесины дуба можно использовать функцию двух переменных вида:

$$R_{\max}(U, B) = 45.62 - 0.02246 B + 0.00004827 B^2 + 180.9 U + 0.006853 B U - 16.83 U^2 \quad (2)$$

Относительная погрешность (2) также меньше 10%, сумма квадратов отклонений для $R_{\max}/R_{\text{хар}}$, ($R_{\text{хар}}=400$ мкм) меньше 1.

На основании результатов замеров толщины досок и шероховатости поверхности, полученных при различных скоростях подачи и ширине пропила, построены графики, иллюстрирующие качественные показатели процесса пиления. На рис. 2 и 3 показано изменение шероховатости пиломатериалов в зависимости от ширины пропила и скорости подачи.

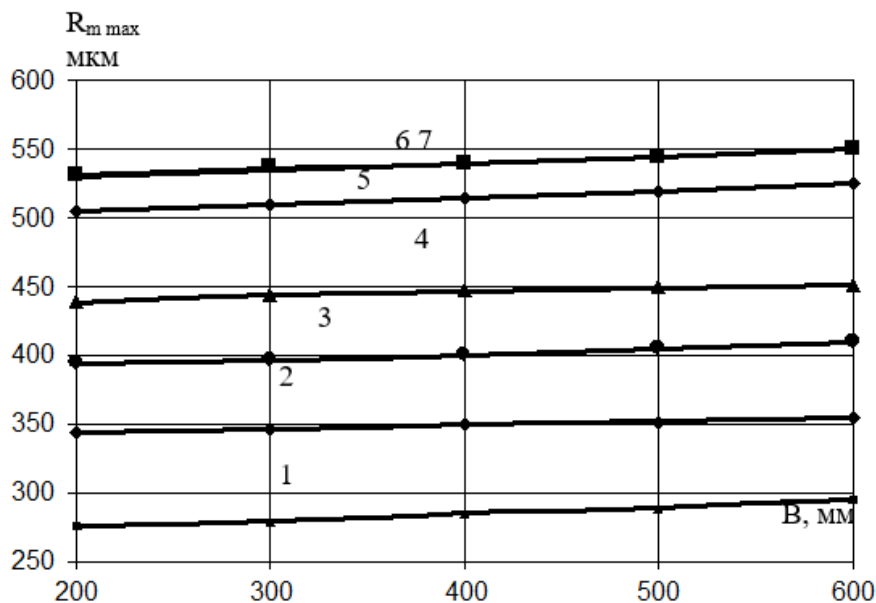


Рисунок 2 – Зависимость шероховатости от ширины пропила бревен дуба при значениях скорости подачи $U=1,5$ м/мин – 1; 2 – 2; 2,5 – 3; 4 – 4; 5 – 5; 6 – 6; 7 – 7

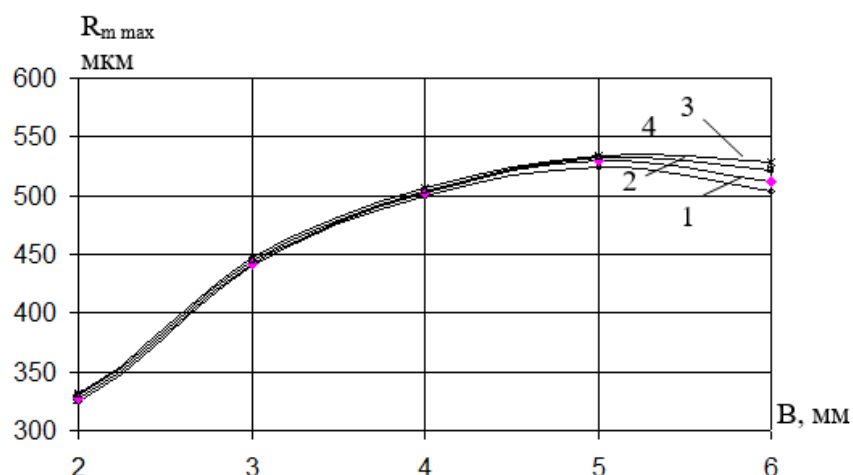


Рисунок 3 – Зависимость шероховатости от скорости подачи при различной ширине пропила бревен дуба В=200 мм – 1, 300 – 2, 400 – 3, 500 – 4

Анализ приведенных графических зависимостей показывает, что с увеличением ширины пропила и скорости подачи происходит возрастание шероховатости пиломатериалов, причем интенсивность этого возрастания практически одинакова как для данной ширины пропила при различных подачах, так и для выбранной скорости подачи при различных значениях ширины пропила (кривые на рис. 1 - 2 почти совпадают при параллельном переносе).

Из (2) можно получить выражение ограничения на скорость подачи по шероховатости при различной ширине пропила бревен дуба, которое имеет аналитическую форму:

$$U_{\text{ш}} = 2.976 \cdot 10^{-9} [1.81 \cdot 10^9 + 68500.0 B - 573819.0 (1.088 \cdot 10^7 + 293.9 B + B^2 - 20408.89 R_{\text{gost}})^{0.5}] \quad (3)$$

где R_{gost} – требуемое значение максимальной шероховатости пиломатериалов дуба.

Используя выражения (3) можно получить численные значения скорости подачи для различной ширины пропила.

Вывод: В результате анализа разнотолщинности досок по их длине установлено, что наибольшее влияние на величину волнистости пропила оказывает неоднородность структуры древесины мягких пород дерева в плоскости резки, отмечаемой соответствующим изменением твердости древесины.

Список литературы

1. Справочник по лесопилению: Справочник [Текст] / Под ред. С.М. Хасдана. – М: Лесн. пром-сть, 1980. – 415с.

References

1. Sawmilling Handbook: Handbook [Text] / Ed. by S.M. Khasdan. – Moscow: Lesnaya Promyshlennost, 1980. – 415 p.

ЭЛЕМЕНТЫ КЛАССИФИКАЦИОННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ СРЕДСТВ МЕХАНИЗАЦИИ СБОРА ПОРУБОЧНЫХ ОСТАТКОВ

Платонов А.А.

*Воронежский государственный лесотехнический университет
имени Г.Ф. Морозова, Воронеж, Россия*

ELEMENTS OF CLASSIFICATION DISTRIBUTION MEANS OF MECHANIZATION OF COLLECTION OF INCOMING RESIDUES

Platonov A.A.

*Voronezh State University of Forestry and Technologies
named after G.F. Morozov, Voronezh, Russia*

Аннотация: В процессе надлежащего содержания объектов транспортной инфраструктуры нередко предусмотрена технологическая операция удаления нежелательной растительности. В работе рассматриваются вопросы классификации существующих моделей технических средств сбора и сгребания порубочных остатков.

Abstract: In the process of proper maintenance of transport infrastructure facilities, a technological operation of removing unwanted vegetation is often provided. The paper deals with the classification of existing models of technical means for collecting and raking felling residues.

Ключевые слова: нежелательная растительность, удаление, технические средства, классификация, критерии.

Keywords: unwanted vegetation, removal, technical means, classification, criteria.

При выполнении работ по надлежащему содержанию ряда инфраструктурных объектов (в соответствии с [6, 7] организуемом через процедуру конкурсных заявок, размещаемых на специализированном сайте) в соответствующем технологическом процессе [3] нередко предусмотрена технологическая операция по удалению порубочных остатков с очищаемой территории путём их сбора и/или сгребания с последующей утилизацией любым законным способом [5]. При этом указанная технологическая операция может выполняться при помощи специализированных технических средств [1, 2], агрегируемых с целым рядом базовых транспортных средств (тракторами, многофункциональными машинами, в том числе, мини-погрузчиками, а также специализированными шасси; рис. 1).



- а) грабли Erskine Industrial Grapple Rake + многофункциональная машина Cat
 б) грабли Clearing Rake Woodcracker G1250 + многофункциональная машина JCB 140XLC

Рисунок 1 – Технологическая операция сбора и сгребания порубочных остатков

В [4, 8] нами был рассмотрен вопрос классификации данных специализированных технических средств (называемых «Лесные грабли»), однако за рамками отмеченной работы остался вопрос классификационного распределения существующих отечественных и зарубежных моделей лесных граблей по ряду предложенных нами критериев.

Целью работы является представление классификационного распределения существующих моделей технических средств сбора и сгребания порубочных остатков.

Для реализации цели исследования рассмотрим компонент классификации указанных средств механизации удаления нежелательной растительности (рис. 2):



Рисунок 2 – Компонент классификации лесных граблей

В соответствии с разработанной нами классификацией одними из классификационных признаков лесных граблей являются «конструктивные» признаки «По ширине захвата» и «По густоте», формирующие соответствующие класси-

фикационные ряды. Следует отметить, что указанные признаки, связанные с такими основными конструктивными параметрами, как количество зубьев Z и ширина одного зуба B_Z , подвержены субъективному влиянию, для исключения которого нами были предложены критерии густоты распределения зубьев (учитывающий соотношение интервала между двумя соседними зубьями B_{pr} и ширины B_R лесных граблей: $D_{RZ} = B_{pr} / B_R$; рис. 3) и удельной ширины граблей (*specific width rake* – англ.) $SW_R = f(B_R; B_Z)$, определяемый как функция соотношения ширины захвата граблей и ширины одного зуба (табл. 1).

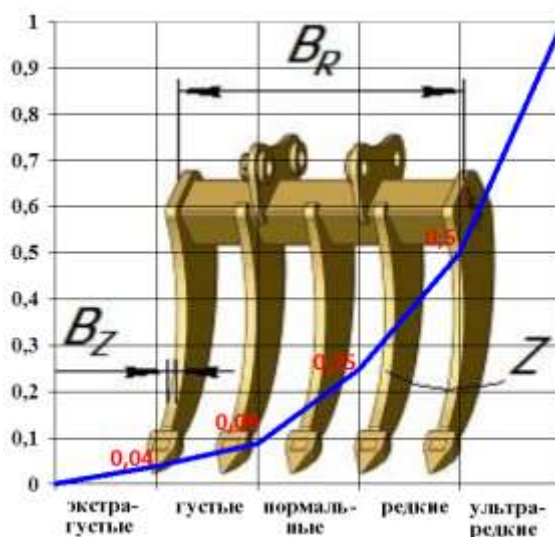


Рисунок 3 – Диаграмма критерия D_{RZ} густоты зубьев лесных граблей

На рис. 4 представлено распределение принятых нами в анализ моделей лесных граблей отечественного и зарубежного производства по критерию D_{RZ} густоты распределения зубьев лесных граблей. Следует отметить, что в соответствии с предложенной нами классификацией наибольшее распространение (около 54%) имеют лесные грабли нормальной густоты с шириной захвата по исследуемой выборке $B_R = 750...4110$ мм и количеством зубьев $Z = 5...11$ (при этом около 90% лесных граблей обладают параметром $Z = 5...9$; рис. 5, а). Установлено, что распределение лесных граблей на густые и редкие является практически одинаковым (около 18% от общего количества), при этом для густых рассматриваемых технических средств (с шириной захвата $B_R = 500...3440$ мм) выявлена значительная их доля ($N_{ЛГ} \approx 40\%$) с количеством зубьев $Z = 11$ (с предельными значениями $Z = 9...16$; рис. 5, б). Для редких по густоте лесных граблей (с шириной захвата $B_R = 915...1800$ мм) отмечено преимущественное количество зубьев $Z = 3$ или $Z = 4$ (с долей около 64% для технических средств с параметром $Z = 4$).

Таблица 1 – Граничные значения критерия удельной ширины SW_R лесных граблей

		Ширина зубьев B_Z								
		15	20	25	30	35	40	45	50	55
Граница зон	IV-V	4244,8 92	4244,8 92	4244,8 92	4244,8 92	4244,8 92	4244,8 92	4244,8 92	4244,8 92	4244,8 92
	I-IV	1626,5 69	2159,5 04	2631,3 39	3042,0 74	3391,7 09	3680,2 44	3907,6 79	4074,0 14	4179,2 49
	I-II	562,62 2	908,93 7	1221,5 52	1500,4 67	1745,6 82	1957,1 97	2135,0 12	2279,1 27	2389,5 42
	II-III	453,45 35	561,67 6	665,11 35	763,76 6	857,63 35	946,71 6	1031,0 14	1110,5 26	1185,2 54
	III-VI	356,96	386,62	415,72	444,26	472,24	499,66	526,52	552,82	578,56
	VI-	45	60	75	90	105	120	135	150	165
		Ширина зубьев B_Z								
		60	65	70	75	80	85	90	95	100
Граница зон	IV-V	4244,8 92	4244,8 92	4244,8 92	4244,8 92	4244,8 92	4244,8 92	4244,8 92	4244,8 92	4244,8 92
	I-IV	4223,3 84	4206,4 19	4128,3 54	3989,1 89	3788,9 24	3581,5 74	3642,2 24	3693,8 64	3736,4 94
	I-II	2466,2 57	2509,2 72	2542,0 36	2629,7 16	2708,3 86	2778,0 46	2838,6 96	2890,3 36	2932,9 66
	II-III	1255,1 96	1320,3 54	1380,7 26	1436,3 14	1487,1 16	1533,1 34	1574,3 66	1610,8 14	1642,4 76
	III-VI	603,74	628,36	652,42	675,92	698,86	721,24	743,06	764,32	785,02
	VI-	180	195	210	225	240	255	270	285	300

Примечание:

Зона V – экстра-широкие лесные грабли; Зона IV – широкие лесные грабли; Зона I – средне-широкие лесные грабли; Зона II – нормальные лесные грабли; Зона III – узкие лесные грабли; Зона VI – экстра-узкие лесные грабли.

Отдельно отметим, что к экстра-густым лесным граблям (с предельными значениями количества зубьев по исследуемой выборке $Z = 18...41$ и параметром $B_R \geq 1200$ мм) относятся несколько моделей технических средств для сгребания нежелательной растительности с повышенной шириной захвата (более 4000 мм), что объясняется на наш взгляд как большим количеством зубьев указанных моделей ($Z = 28...40$), так и значительной ($B_Z = 40...57$ мм) шириной каждого зуба.



Рисунок 4 – Классификационное распределение моделей лесных граблей по критерию густоты зубьев D_{Rz}



Рисунок 5 – Распределения количества зубьев лесных граблей

На рис. 6 представлено распределение принятых нами в анализ моделей лесных граблей отечественного и зарубежного производства по критерию удельной ширины SW_R . Следует отметить, что в соответствии с предложенной нами классификацией наибольшее распространение (около 43%) имеют лесные грабли нормальной ширины, при этом нами было выявлено сопоставимое с ними суммарное количество средне-широких (около 37%) и широких (около 5%) лесных граблей.

Малораспространёнными (как уже отмечалось выше) являются экстра-широкие грабли с шириной захвата более 4200 мм (около 1,5%) и фактически отсутствующими – экстра-узкие лесные грабли, которые были включены нами в вышерассмотренную классификацию лишь с учётом небольшой доли вероятности появления на рынке лесных граблей технических средств с соответствующими экстра-узким граблям конструктивными параметрами.

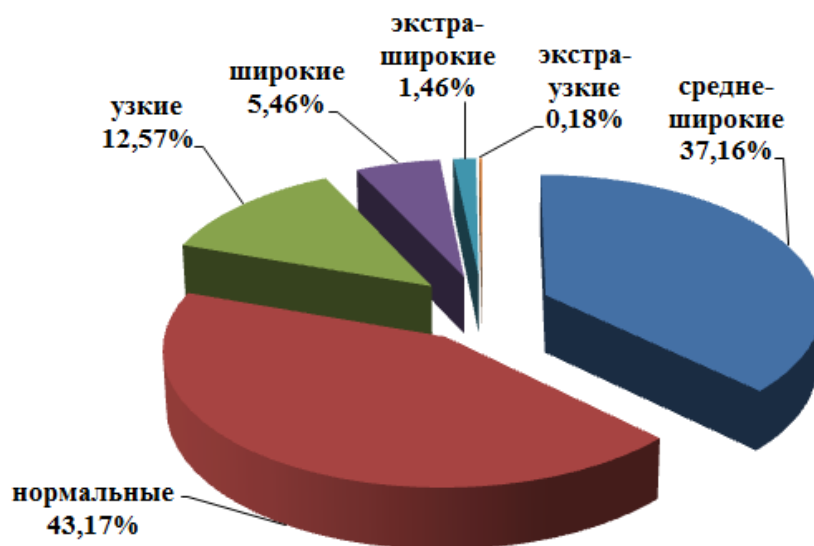


Рисунок 6 – Распределение моделей лесных граблей по критерию удельной ширины SW_R

С учётом вышеизложенного можно сделать следующий вывод.

Для рассмотренного компонента классификации лесных граблей, описывающего такие конструктивные классификационные признаки, как «Ширина захвата» и «Густота», выявлено распределение отечественных и зарубежных моделей лесных граблей по данным признакам. Показано наибольшее распространение (около 54%) лесных граблей нормальной густоты с шириной захвата 750...4110 мм и количеством зубьев $Z = 5...11$. Выявлено наибольшее распространение (около 43%) лесных граблей нормальной ширины при малой распространённости (около 1,5%) экстра-широких граблей с шириной захвата более 4200 мм.

Список литературы

1. Застенский Л.С. Машины и механизмы лесного хозяйства и их эксплуатация / Л.С. Застенский, Н.Н. Неволин. – Вологда: Издательство КРТ, 2000. – 395 с.
2. Мохирев А.П. Современные технологии заготовки и переработки древесной биомассы на стадии лесозаготовительного производства: учеб. пособие / А.П. Мохирев, М.А. Зырянов, Ю.А. Безруких. – Красноярск: СибГТУ, 2015. – 73 с.
3. Платонов А.А. Структура формирования технологических процессов удаления нежелательной растительности с эксплуатационных объектов инфраструктуры / А.А. Платонов // Ползуновский альманах. 2020. № 1. С. 65-68.
4. Платонов А.А. Грабли лесные: назначение, область применения, классификация / А.А. Платонов // Лесной вестник. Forestry Bulletin. – 2023. – Т. 27, № 6. – DOI: 10.18698/2542-1468-2023-6-139-150.
5. Энергетическое использование древесной биомассы: заготовка, транспортировка, переработка и сжигание: учеб. пособие / авт.-сост. В.С. Сютёв и др. – Петрозаводск: Издательство ПетрГУ, 2014. – 123 с.

6. Ersson B.T. Analysis of the information content of tenders for the removal of unwanted vegetation / B.T. Ersson, A. Platonov, S.V. Zimarin // В сборнике: IOP Conference Series: Earth and Environmental Science . International Forestry Forum «Forest ecosystems as global resource of the biosphere: calls, threats, solutions». 2020. С. 012022.

7. Platonov A. Methodology for assessing the quality of work on removing trees and shrubs / A. Platonov, M. Platonova // BIO Web of Conferences. – 2024. – Vol. 145. – P. 06001. – DOI: 10.1051/bioconf/202414506001.

8. Platonov A. Structure of the formation of a classification description of forest rakes / A. Platonov // BIO Web of Conferences. – 2024. – Vol. 145. – P. 03008. – DOI: 10.1051/bioconf/202414503008.

References

1. Zastensky L.S. Forestry Machines and Mechanisms and Their Operation / L.S. Zastensky, N.N. Nevolin. – Vologda: KRT Publishing House, 2000. – 395 p.

2. Mokhirev A.P. Modern Technologies for Harvesting and Processing Wood Biomass at the Stage of Logging Production: Textbook. Manual / A.P. Mokhirev, M.A. Zyryanov, Yu.A. Bezrukikh. – Krasnoyarsk: SibSTU, 2015. – 73 p.

3. Platonov A.A. Structure of the Formation of Technological Processes for Removing Unwanted Vegetation from Operational Infrastructure Facilities / A.A. Platonov // Polzunovsky Almanac. 2020. № 1. pp. 65-68.

4. Platonov A.A. Forest rakes: purpose, scope, classification / A.A. Platonov // Forestry Bulletin. – 2023. – Vol. 27, No. 6. – DOI: 10.18698/2542-1468-2023-6-139-150.

5. Energy use of wood biomass: harvesting, transportation, processing and combustion: textbook / compiled by V.S. Sunev et al. – Petrozavodsk: Publishing House of PetrSU, 2014. – 123 p.

6. Ersson B.T. Analysis of the information content of tenders for the removal of unwanted vegetation / B.T. Ersson, A. Platonov, S.V. Zimarin // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science . International Forestry Forum «Forest ecosystems as global resource of the biosphere: calls, threats, solutions». 2020. P. 012022.

7. Platonov A. Methodology for assessing the quality of work on removing trees and shrubs / A. Platonov, M. Platonova // BIO Web of Conferences. – 2024. – Vol. 145. – P. 06001. – DOI: 10.1051/bioconf/202414506001.

8. Platonov A. Structure of the formation of a classification description of forest rakes / A. Platonov // BIO Web of Conferences. – 2024. – Vol. 145. – P. 03008. – DOI: 10.1051/bioconf/202414503008.

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТИ НАСЫПИ ЩЕПЫ
ПРИ ИЗМЕЛЬЧЕНИИ ПОРУБОЧНЫХ ОСТАТКОВ**

Прокопенко С.В.

*Воронежский государственный лесотехнический университет
имени Г.Ф. Морозова, Воронеж, Россия*

**MODELING THE SURFACE OF A RUBBLE FILL IN THE PROCESS
OF CRUSHING FELLING RESIDUES**

Prokopenko S.V.

*Voronezh State University of Forestry and Technologies
named after G.F. Morozov, Voronezh, Russia*

Аннотация: Измельчение порубочных остатков является нередкой технологической операцией воздействия на удаляемую нежелательную растительность. В работе исследуются геометрические характеристики насыпи щепы, формирующейся при измельчении порубочных остатков.

Abstract: Chipping logging residues is a common technological operation for removing unwanted vegetation. This paper examines the geometric characteristics of the chip pile formed during chipping.

Ключевые слова: нежелательная растительность, удаление, измельчение, контейнер, кузов, щепа, насыпь, характеристики.

Keywords: unwanted vegetation, removal, crushing, container, body, chips, embankment, characteristics.

При удалении нежелательной растительности, произрастающей на территориях земель лесного фонда или линейной инфраструктуры [3], в состав применяемых технологических процессов [5] нередко входят технологические операции воздействия на формирующиеся порубочные остатки. В соответствии с исследованиями д.т.н. А.А. Платонова [2] указанные порубочные остатки могут быть сформированы посредством ручного (кусторезами, бензопилами, топорами) удаления растительности с последующим ручным сбором порубочных остатков, их погрузкой и вывозкой (рис. 1, а); ручным или механизированным срезанием (вырубанием) растительности с последующим ручным сбором порубочных остатков и их сжиганием (рис. 1, б). Указанные технологические схемы весьма распространены [7] в лесохозяйственном производстве [4], однако их недостатком является необходимость перемещения в пространстве больших объемов удаленной растительности (по рис. 1, а; что требует привлечения большого количества техники и, как следствие, больших затрат).

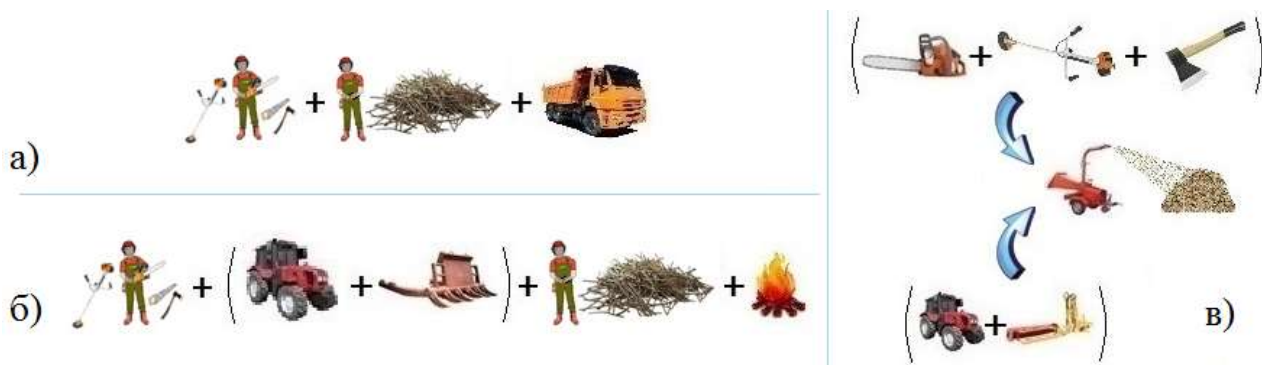


Рисунок 1 – Элементы воздействия на нежелательную растительность и порубочные остатки

Утилизация порубочных остатков (веток, коры и сучьев) [9] путем сжигания (рис. 1, б) сопровождается выбросом целого комплекса вредных веществ. В процессе горения в воздух попадает углекислый газ, усиливающий парниковый эффект, и высокотоксичный угарный газ, возникающий из-за неполного сгорания древесины [1]. Кроме того, образуются метан и продукты пиролиза – например, сажа и мелкие твердые частицы, которые в сочетании с газами формируют плотную дымовую завесу. Всё вышеизложенное обуславливает целесообразность развития ручного или (желательно!) механизированного удаления нежелательно произрастающих деревьев и кустарников с их последующим измельчением (рис. 1, в) [6].

Измельчение порубочных остатков [8] сопровождается непременно их удалением из измельчающей машины или в кузов транспортного средства (рис. 2, а; как вариант – в приёмный контейнер для сухопутного или водного перемещения порубочных остатков в пространстве) или на поверхность очищаемого участка (рис. 2, б). Не рассматривая вариант рассыпания щепы относительно ровным слоем по поверхности участка, практически во всех остальных случаях формируется насыпь щепы, величина которой непосредственным образом отражается на общем объеме измельченных порубочных остатков, транспортируемом в кузове транспортного средства или приемном контейнере.



Рисунок 2 – Сформированная щепа из порубочных остатков

Выполним исследование геометрических характеристик насыпи щепы. Указанная насыпь, ограниченная с четырёх сторон стенками приёмного контейнера (кузовом транспортного средства), формируется потоком щепы, отдельные частицы которой в большей своей части падают по центру данного контейнера (соответствует принятому допущению при математическом моделировании).

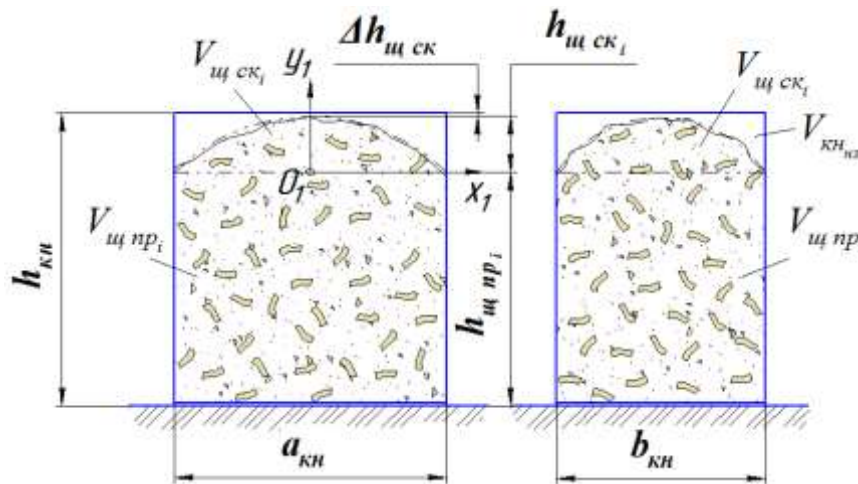


Рисунок 3 – Характеристики насыпи щепы и приемной тары

Объём щепы $V_{щ_i}$ (м^3) от измельчаемых порубочных остатков, наполняющий собой приемную тару (под которой подразумевается контейнер или кузов транспортного средства), в каждый i -й момент времени определится как:

$$V_{щ_i} = V_{щ пр_i} + V_{щ ск_i} \quad (1)$$

где $V_{щ пр_i}$ – часть объема, относящаяся к призматической части насыпанной щепы; $V_{щ ск_i}$ – секторальная часть объема насыпанной щепы.

Принимая во внимание переменную высоту $h_{щ пр_i}$ призматической части объема щепы, получим $V_{щ пр_i} = a_{кн} \cdot b_{кн} \cdot h_{щ пр_i}$ при $a_{кн}$ и $b_{кн}$ – соответственно внутренних длине и ширине используемой приемной тары, мм.

Принимая во внимание переменную высоту $h_{щ ск_i}$ секторальной части объема щепы, отметим, что расстояние от верхней кромки приемной тары до верхней точки насыпи в ходе работ по измельчению щепы и ее погрузке в приемную тару стремится к минимуму ($\Delta h_{щ ск} \rightarrow 0$). Достижение верхним уровнем щепы верхней кромки приемной тары ($\Delta h_{щ ск} = 0$) является свидетельством об окончании набора щепы, хотя верхний уровень щепы может быть и выше уровня тары (указанный случай в данном исследовании не рассматрива-

ется). Окончательная высота сформировавшейся насыпи щепы определится как $h_{щск} = h_{кн} - h_{щпр}$.

В целях моделирования примем допущение о том, что поверхность насыпи щепы в приемной таре рассматривается в продольном и поперечном направлениях указанной тары и аппроксимируется полиномиальными уравнениями второго порядка.

В общем виде формирующаяся поверхность рассматриваемой насыпи может быть описана функциональными выражениями типа $y = a \cdot x^2 + b \cdot x + c$, где $y = N_{щ}$ – ордината крайней частицы щепы, принадлежащей насыпи, м; x – абсцисса частицы щепы, находящейся в приёмном контейнере, м. Коэффициенты a , b и c в указанных зависимостях определяются по следующим зависимостям:

$$a = \frac{\left(y_2 - \frac{(x_2 - x_0) \cdot (y_1 - y_0)}{x_1 - x_0} - y_0 \right)}{x_2^2 - x_1 \cdot x_2 + x_1 \cdot x_0 - x_0 \cdot x_2}, \quad b = \frac{y_1 - a \cdot (x_1^2 - x_0^2) - y_0}{x_1 - x_0} \quad (2)$$

$$c = y_0 - a \cdot x_0^2 - b \cdot x_0$$

Для моделирования поверхности насыпи щепы введём систему координат $x_1 O_1 y_1$, ось ординат которой совпадает с осью симметрии приёмного контейнера, а ось абсцисс находится в основании моделируемой насыпи.

На рис. 4 выполнено моделирование общего вида поверхности насыпи щепы для модели приёмной тары из рис. 3.

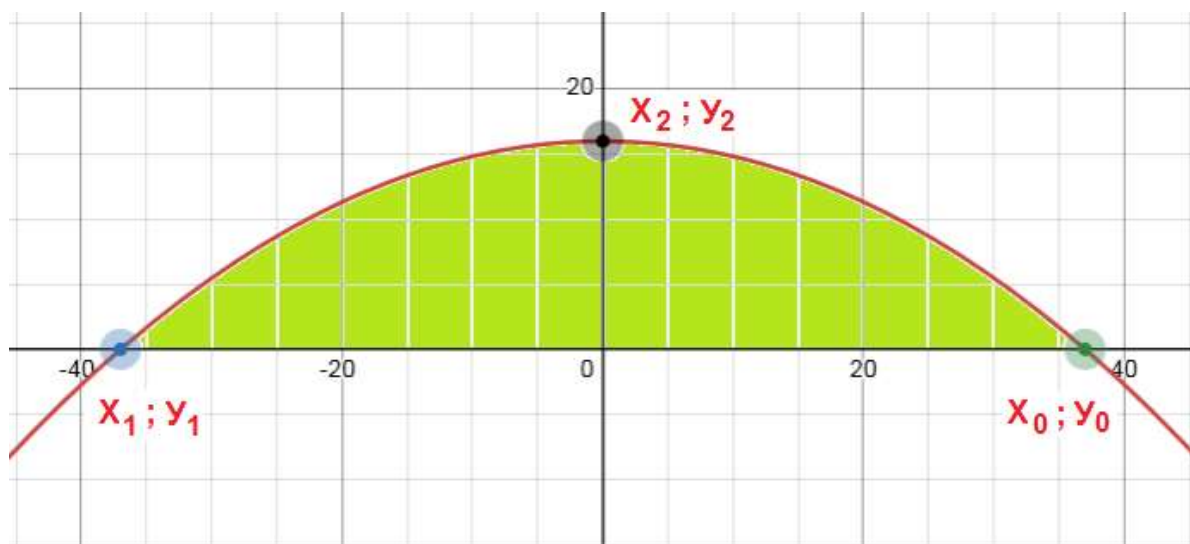


Рисунок 4 – Моделирование общего вида поверхности насыпи щепы в приемную тару

Применительно к принятым обозначениям размеров приемной тары, а также переменных высот $h_{щпр}$ и $h_{щск}$ призматической и секторальной частей насыпающейся в тару щепы (рис. 4), зависимости для вышеуказанных коэффициентов a , b и c приводятся к следующему виду:

$$\begin{aligned} a &= \frac{\left(h_{щск} - \frac{(0 - a_{кн} / 2) \cdot (0 - 0)}{-a_{кн} / 2 - a_{кн} / 2} - 0 \right)}{0 - (-a_{кн} / 2) \cdot 0 + (-a_{кн} / 2) \cdot a_{кн} / 2 - a_{кн} / 2 \cdot 0} = -\frac{4 \cdot h_{щск}}{a_{кн}^2}, \\ b &= \frac{0 - a \cdot ((-a_{кн} / 2)^2 - (a_{кн} / 2)^2) - 0}{-a_{кн} / 2 - a_{кн} / 2} = 0 \\ c &= 0 - a \cdot (a_{кн} / 2)^2 - 0 \cdot (a_{кн} / 2) = \frac{4 \cdot h_{щск}}{a_{кн}^2} \cdot \frac{a_{кн}^2}{4} = h_{щск} \end{aligned} \quad (3)$$

С учётом этого, формирующаяся поверхность насыпи щепы в приемную тару в направлениях длины и ширины указанной тары могут быть описаны следующими параболическими выражениями:

$$\begin{cases} N_{щпр} = h_{щск} - \frac{4 \cdot h_{щск}}{a_{кн}^2} \cdot x^2 \\ N_{щпн} = h_{щск} - \frac{4 \cdot h_{щск}}{b_{кн}^2} \cdot x^2 \end{cases} \quad (4)$$

Полученные выражения будут необходимы при моделировании общего объема щепы, формирующейся при измельчении порубочных остатков и помещаемой в кузов транспортного средства или приемный контейнер.

Список литературы

1. Макаров В.Е. Совершенствование технологии разделения по степени смолистости технологической щепы, полученной из пневой и некондиционной древесины: монография / В.Е. Макаров. – Вологда, Москва: Инфра-Инженерия, 2026. – 96 с.
2. Платонов А.А. Исследование и систематизация существующих технологических процессов удаления нежелательной растительности / А.А. Платонов // Системы. Методы. Технологии. – 2020. – № 3(47). – С. 63-73. – DOI: 10.18324/2077-5415-2020-3-63-73.
3. Платонов А.А. Линейный инфраструктурный объект: определение, классификация / А.А. Платонов // Актуальные проблемы и перспективы развития транспорта, промышленности и экономики России (Транспромэк 2025): Труды научно-практической конференции, Воронеж, 19 ноября 2025 года. – Воронеж: Ростовский государственный университет путей сообщения, 2025. – С. 208-212.

4. Платонов А.А. Особенности формирования капитальных вложений для создания систем машин удаления нежелательной растительности / А.А. Платонов, О. В. Терновская // Лесотехнический журнал. – 2020. – Т. 10, № 3(39). – С. 164-174. – DOI: 10.34220/issn.2222-7962/2020.3/16.
5. Платонов А.А. Современные технологии и технические средства сгребания и сбора порубочных остатков при восстановлении полегающих лесополос / А.А. Платонов, М.А. Гнусов // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. – 2026. – Т. 19, № 1(88). – С. 124-133. – DOI: 10.53914/issn2071-2243_2026_1_124.
6. Платонов А.А. Структура формирования технологических процессов удаления нежелательной растительности с эксплуатационных объектов инфраструктуры / А.А. Платонов // Ползуновский альманах. – 2020. – № 1. – С. 65-68.
7. Платонов А.А. Теоретическое обоснование степени распространённости технологического процесса / А.А. Платонов // Актуальные проблемы современного транспорта. – 2020. – № 1. – С. 23-31.
8. Прокопенко С.В. Анализ способов повышения эффективности рабочих процессов рубительных машин / С.В. Прокопенко, А.А. Платонов // Современный лесной комплекс страны: инновационные разработки и прогрессивные технологии: материалы Всероссийской научно-практической конференции, Воронеж, 25 сентября 2025 года. – Воронеж: Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова, 2025. – С. 201-205. – DOI 10.58168/MFCC2025_201-205.
9. Фомина О.А. Совершенствование конструкции технических средств для производства топливной щепы из отходов лесозаготовок / О.А. Фомина, С.В. Фокин. – Тюмень: Государственный аграрный университет Северного Зауралья, 2023. – 119 с.

References

1. Makarov V.E. Improving the technology for separating process chips obtained from stump and substandard wood by the degree of resin content: monograph / V.E. Makarov. - Vologda, Moscow: Infra-Engineering, 2026. - 96 p.
2. Platonov A.A. Research and systematization of existing technological processes for removing unwanted vegetation / A.A. Platonov // Systems. Methods. Technologies. - 2020. - No. 3 (47). - P. 63-73. - DOI: 10.18324/2077-5415-2020-3-63-73.
3. Platonov A.A. Linear infrastructure object: definition, classification / A.A. Platonov // Actual Problems and Prospects for the Development of Transport, Industry and Economy of Russia (Transpromex 2025): Proceedings of the Scientific and Practical Conference, Voronezh, November 19, 2025. – Voronezh: Rostov State University of Transport, 2025. – Pp. 208-212.
4. Platonov A.A. Features of the Formation of Capital Investments for the Creation of Systems of Machines for Removing Unwanted Vegetation / A.A. Platonov, O.V. Ternovskaya // Forest Engineering Journal. – 2020. – Vol. 10, No. 3(39). – Pp. 164-174. – DOI: 10.34220/issn.2222-7962/2020.3/16.

5. Platonov A.A. Modern Technologies and Technical Means of Raking and Collecting Logging Residues During the Restoration of Shelterbelts / A.A. Platonov, M.A. Gnusov // Bulletin of the Voronezh State Agrarian University. - 2026. - Vol. 19, No. 1 (88). - Pp. 124-133. - DOI: 10.53914/issn2071-2243_2026_1_124.
6. Platonov A.A. Structure of the formation of technological processes for removing unwanted vegetation from operational infrastructure facilities / A.A. Platonov // Polzunovsky Almanac. - 2020. - No. 1. - Pp. 65-68.
7. Platonov A.A. Theoretical justification for the degree of prevalence of the technological process / A.A. Platonov // Actual problems of modern transport. - 2020. - No. 1. - Pp. 23-31.
8. Prokopenko S.V. Analysis of methods for increasing the efficiency of work processes of chipping machines / S.V. Prokopenko, A.A. Platonov // The modern forest complex of the country: innovative developments and progressive technologies: materials of the All-Russian scientific and practical conference, Voronezh, September 25, 2025. - Voronezh: Voronezh State Forest Engineering University named after G.F. Morozov, 2025. - Pp. 201-205. - DOI 10.58168/MFCC2025_201-205.
9. Fomina O.A. Improving the design of technical means for the production of fuel chips from logging waste / O.A. Fomina, S.V. Fokin. - Tyumen: State Agrarian University of the Northern Trans-Urals, 2023. - 119 p.

**ВЛИЯНИЕ КОМПОНОВКИ ГИДРОЦИЛИНДРА НА
ЭНЕРГОСИЛОВЫЕ ПАРАМЕТРЫ МЕХАНИЗМА ПОДЪЕМА
СТРЕЛЫ ЛЕСНОГО МАНИПУЛЯТОРА**

Путятин П.А., Попиков П.И., Полумиско А.А., Евсиков И.Д.
*Воронежский государственный лесотехнический университет
имени Г.Ф. Морозова, Воронеж, Россия*

**INFLUENCE OF HYDRAULIC CYLINDER LAYOUT ON THE POWER
AND FORCE PARAMETERS OF THE BOOM LIFTING MECHANISM OF A
FORESTRY MANIPULATOR**

Putyatin P.A., Popikov P.I., Polumisko A.A., Evsikov I.D.
*Voronezh State University of Forestry and Technologies
named after G.F. Morozov, Voronezh, Russia*

Аннотация: Рассмотрено влияние компоновки гидроцилиндра на давление и расход в энергосберегающем гидроприводе лесного манипулятора. Получены зависимости основных параметров от положения точки крепления гидроцилиндра. Показана возможность снижения пикового давления за счет рационального выбора компоновки.

Ключевые слова: лесной манипулятор, гидропривод, гидроцилиндр, гидроаккумулятор, компоновка, давление, расход.

Abstract: The influence of hydraulic cylinder layout on pressure and flow rate in an energy-saving hydraulic drive of a forestry manipulator is considered. Relationships between the main parameters and the cylinder mounting position are obtained. The possibility of reducing peak pressure by rational layout selection is shown.

Keywords: forestry manipulator, hydraulic drive, hydraulic cylinder, hydraulic accumulator, layout, pressure, flow rate.

Введение

Энергоэффективность механизма подъема стрелы лесного манипулятора определяется не только параметрами насосной установки и гидроаккумулятора, но и геометрией установки исполнительного гидроцилиндра. При изменении положения стрелы изменяется плечо действия его усилия, вследствие чего изменяются необходимое давление и расход рабочей жидкости. Вопросы компоновки и моделирования манипуляторных механизмов рассмотрены в работах [1–4], а применение рекуперативных и энергосберегающих гидроприводов – в [5–7].

В ранее разработанной модели энергосберегающего гидропривода исследовались изменение угла подъема стрелы, давления в напорной линии и давления в гидроаккумуляторе. При этом коэффициент преобразования давления во

вращающий момент изменяется вместе с положением стрелы, поскольку меняется геометрическое плечо силы гидроцилиндра. Поэтому целью настоящей работы является определение влияния положения точки крепления гидроцилиндра на давление, расход рабочей жидкости и требуемый ход гидроцилиндра.

Для расчёта используется геометрическая схема механизма подъема стрелы, приведенная на рис. 1.

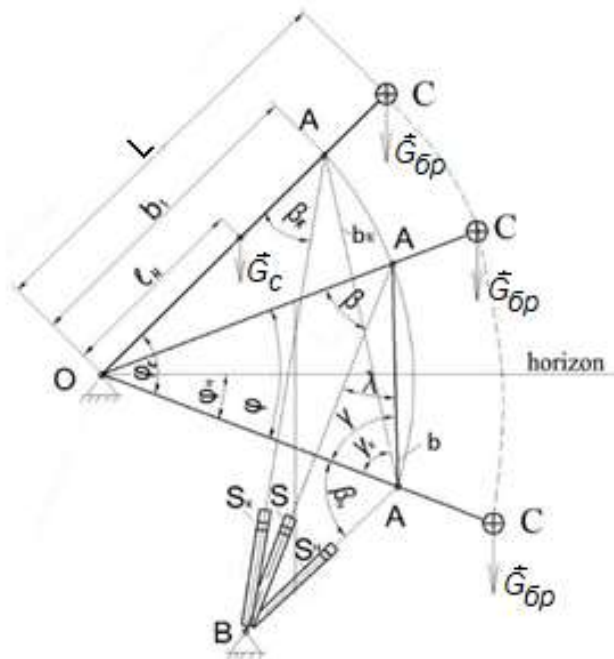


Рисунок 1 – Геометрическая схема механизма подъема стрелы лесного манипулятора

Текущая длина гидроцилиндра определяется из геометрии треугольника OAB:

$$S = \sqrt{a^2 + b_1^2 - 2ab_1 \cos(\gamma + \varphi)} \quad (1)$$

где S – текущая длина гидроцилиндра, м; a – расстояние от оси поворота стрелы O до неподвижного шарнира крепления гидроцилиндра B , м; b_1 – расстояние от оси O до точки крепления гидроцилиндра A на стреле, м; γ – постоянный угол, определяющий положение неподвижного шарнира B , рад; φ – текущий угол подъема стрелы, рад.

Угол β , определяющий направление действия усилия гидроцилиндра, рассчитывается по зависимости

$$\sin \beta = \frac{b_1 \sin(\gamma + \varphi)}{\sqrt{a^2 + b_1^2 - 2ab_1 \cos(\gamma + \varphi)}} \quad (2)$$

Здесь β – угол между линией, соединяющей ось поворота стрелы с неподвижным шарниром гидроцилиндра, и продольной осью гидроцилиндра, рад. Такая зависимость использовалась и в предыдущей математической модели.

Эффективное плечо действия усилия гидроцилиндра относительно оси поворота стрелы определяется выражением

$$h = a \sin \beta \quad (3)$$

где h – перпендикулярное расстояние от оси O до линии действия усилия гидроцилиндра, м.

Площадь поршня гидроцилиндра равна

$$A_{\text{ц}} = \frac{\pi d_{\text{ц}}^2}{4} \quad (4)$$

где $A_{\text{ц}}$ – площадь рабочей поверхности поршня, м^2 ; $d_{\text{ц}}$ – внутренний диаметр гидроцилиндра, м.

Момент, создаваемый гидроцилиндром относительно оси поворота стрелы,

$$M_{\text{ц}} = p A_{\text{ц}} h \quad (5)$$

где $M_{\text{ц}}$ – вращающий момент гидроцилиндра, $\text{Н} \cdot \text{м}$; p – давление рабочей жидкости в поршневой полости гидроцилиндра, Па.

Для сравнительного анализа вариантов компоновки рассматривается квазистатический режим. Момент внешней нагрузки принимается в виде

$$M_g = (G_{\text{бр}} L + G_c l_c) \cos(\varphi - \alpha) \quad (6)$$

где M_g – суммарный момент сил тяжести, $\text{Н} \cdot \text{м}$; $G_{\text{бр}}$ – сила тяжести пачки древесины, Н; G_c – сила тяжести стреловой группы, Н; L – вылет манипулятора, м; l_c – расстояние от оси O до центра масс стреловой группы, м; α – угол наклона опорной площадки, рад.

Требуемое давление определяется из условия равновесия моментов:

$$p_{\text{тр}} = \frac{M_g}{A_{\text{ц}} h} = \frac{M_{\text{п}}}{A_{\text{ц}} a \sin \beta} \quad (7)$$

где $p_{\text{тр}}$ – давление, необходимое для преодоления внешнего нагрузочного момента, Па.

Из формулы (7) следует, что изменение положения точки крепления гидроцилиндра влияет на давление через изменение угла β . Поэтому увеличение b_1 не эквивалентно простому пропорциональному увеличению силового плеча.

Скорость изменения длины гидроцилиндра определяется как

$$v_{\text{ц}} = \frac{ds}{dt} = a \sin \beta \omega \quad (8)$$

где $v_{\text{ц}}$ – скорость перемещения поршня гидроцилиндра, м/с; $\omega = d_{\varphi}/d_t$ – угловая скорость стрелы, рад/с.

Необходимый расход рабочей жидкости составляет

$$Q_{\text{ц}} = A_{\text{ц}} v_{\text{ц}} = A_{\text{ц}} a \sin \beta \omega \quad (9)$$

где $Q_{\text{ц}}$ – расход рабочей жидкости, поступающей в гидроцилиндр, $\text{м}^3/\text{с}$.

Таким образом, одна и та же геометрическая величина $a \sin \beta$ одновременно определяет силовую и расходную характеристики гидропривода. Увеличение эффективного плеча приводит к снижению требуемого давления, но при заданной угловой скорости увеличивает необходимый расход.

Для базового варианта приняты: $b_1=1,0\text{м}$; $S_{\text{н}}=1,4\text{м}$; $S_{\text{к}}=2,2\text{м}$; $\varphi_{\text{н}}=-0,26\text{рад}$; $\varphi_{\text{к}}=1,40\text{рад}$; $d_{\text{ц}}=0,1\text{м}$; $G_{\text{бр}}=8840\text{Н}$; $G_c=4330\text{Н}$; $L=6,15\text{м}$; $l_c=3,34\text{м}$; продолжительность подъема $t=7\text{с}$. Номинальная подача насоса составляет $Q_{\text{н}}=0,00133\text{м}^3/\text{с}$, или 79,8 л/мин. Эти параметры соответствуют исходной расчетной модели.

Для геометрии, соответствующей рис. 1, из условий $S(\varphi_{\text{н}})=1,4\text{м}$ и $S(\varphi_{\text{к}})=2,2\text{м}$ получены

$$a = 1,204 \text{ м} \quad \gamma = 1,626 \text{ рад}$$

Средняя угловая скорость стрелы составляет

$$\omega = \frac{\varphi_k - \varphi_n}{t} = 0,237 \text{ рад/с} \quad (10)$$

Для оценки влияния компоновки значение b_1 изменялось от 0,8 до 1,2 м при неизменном положении неподвижного шарнира В.

Таблица 1 – Влияние положения точки крепления гидроцилиндра на расчетные параметры

b_1 , м	Рабочий ход ΔS , м	p_{max} , МПа	Q_{max} , л/мин
0,8	0,697	26,91	80,9
0,9	0,752	25,12	87,9
1,0	0,800	23,68	94,1
1,1	0,843	22,50	99,5
1,2	0,882	21,52	104,2

Результаты показывают, что увеличение b_1 с 0,8 до 1,2 м уменьшает максимальное требуемое давление с 26,91 до 21,52 МПа, то есть примерно на 20%. Одновременно максимальный расход возрастает с 80,9 до 104,2 л/мин, или на 28,8%, а требуемый ход гидроцилиндра увеличивается с 0,697 до 0,882 м.

Для базовой компоновки $b_1=1,0$ м расчетный максимальный расход составляет 94,1 л/мин, что на 17,9% превышает номинальную подачу насоса 79,8 л/мин. При уменьшении b_1 до 0,8 м превышение составляет только около 1,3%, однако максимальное давление возрастает до 26,91 МПа.

Таким образом, изменение компоновки приводит к противоположному изменению давления и расхода: увеличение расстояния b_1 снижает давление, но повышает расход и необходимый ход гидроцилиндра. При сохранении гидроцилиндра с рабочим ходом 0,8 м варианты $b_1 > 1,0$ м требуют увеличения его хода и поэтому не могут быть реализованы без изменения исполнительного элемента.

В предыдущем исследовании было показано, что гидроаккумулятор участвует в перераспределении расхода и сглаживании колебаний давления. Полученные в настоящей работе зависимости дополняют эту модель и позволяют учитывать влияние геометрической компоновки при выборе параметров энергосберегающего гидропривода.

По результатам исследования установлено, что положение точки крепления гидроцилиндра оказывает существенное влияние на давление, расход и необходимый рабочий ход. Увеличение b_1 с 0,8 до 1,2 м снижает максимальное расчетное давление на 20%, однако увеличивает максимальный расход на 28,8% и требуемый ход гидроцилиндра на 26,5%. Для базовой конструкции $b_1=1,0$ м рабочий ход составляет 0,8 м, поэтому дальнейшее увеличение данного параметра требует изменения гидроцилиндра. Полученные

зависимости могут использоваться при совместном выборе компоновки исполнительного механизма, производительности насоса и параметров гидроаккумулятора.

Список литературы

1. Исследование и обоснование компоновки и параметров гидропривода механизма подъема лесного манипулятора / П.И. Попиков, И.В. Четверикова, И.Д. Евсиков [и др.] // *Resources and Technology*. – 2023. – Т. 20, № 3. – С. 76–93. – DOI: 10.15393/j2.art.2023.7063.
2. Создание трехмерной кинематической модели манипулятора Delta при помощи системы автоматизированного проектирования в NX / А.А. Волошкин, Л.А. Рыбак, В.М. Скитова [и др.] // *Робототехника и техническая кибернетика*. – 2023. – Т. 11, № 1. – С. 20–29. – DOI: 10.31776/RTCJ.11103.
3. Моделирование движений харвестера при выборочных рубках леса / Т.В. Сергеева, К.П. Рукомойников, Е.М. Царев [и др.] // *Аграрный научный журнал*. – 2024. – № 6. – С. 134–142. – DOI: 10.28983/asj.y2024i6pp134-142.
4. Chernik D.V. Mathematical model of a combined manipulator of a forest machine / D.V. Chernik, K. N. Chernik // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – 2020. – Vol. 919. – Article 052037. – DOI: 10.1088/1757-899X/919/5/052037.
5. Платонова М.А. Кинематические схемы манипуляторов для удаления нежелательной древесно-кустарниковой растительности в плане полосы отвода железных дорог / М.А. Платонова, М.В. Драпалюк, А.А. Платонов // *Лесотехнический журнал*. – 2015. – Т. 5, № 3(19). – С. 228–234. – DOI: 10.12737/14651.
6. Платонова М.А. К исследованию кинематических схем манипуляторов машин для удаления нежелательной растительности / М.А. Платонова, М.В. Драпалюк, А.А. Платонов // *Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика*. – 2015. – Т. 3, № 5-2(16-2). – С. 108–112. – DOI: 10.12737/15982.
7. Ворожцов О.В. Гидропривод рекуперации энергии транспортного средства / О.В. Ворожцов // *Математическое моделирование систем и процессов: материалы Международной научно-практической конференции*. – Псков: Псковский государственный университет, 2022. – С. 57–62. – DOI: 10.37490/978-5-00200-102-6-57-62.
8. Стенд для испытаний грузоподъемных механизмов лесных манипуляторов с рекуперацией энергии / П.И. Попиков, А.В. Конюхов, С.К. Попиков [и др.] // *Энергоэффективность и энергосбережение в современном производстве и обществе: материалы Международной научно-практической конференции*. – Воронеж, 2022. – Ч. II. – С. 105–110.
9. Jensen K.J. Novel Concept for Electro-Hydrostatic Actuators for Motion Control of Hydraulic Manipulators / K.J. Jensen, M.K. Ebbesen, M.R. Hanse // *Energies*. – 2021. – Vol. 14, № 20. – Article 6566. – DOI: 10.3390/en14206566.
10. Путятин П.А. Математическая модель энергосберегающего гидропривода механизма подъема стрелы лесного манипулятора / П.А. Путятин, П.И.

Попиков, А.А. Полумиско // 2026. – С. 247–255. – DOI: 10.58168/PBHT2026_247-255.

References

1. Research and justification of the layout and parameters of the hydraulic drive for the lifting mechanism of a forestry manipulator / P.I. Popikov, I.V. Chetverikova, I.D. Evsikov [et al.] // *Resources and Technology*. – 2023. – Vol. 20, № 3. – pp. 76-93. – DOI: 10.15393/j2.art.2023.7063.
2. Creation of a 3D kinematic model of a Delta manipulator using the NX CAD system / A.A. Voloshkin, L.A. Rybak, V.M. Skitova [et al.] // *Robotics and Technical Cybernetics*. – 2023. – Vol. 11, № 1. – pp. 20-29. – DOI: 10.31776/RTCJ.11103.
3. Modeling the movements of a harvester during selective logging / T.V. Sergeeva, K.P. Rukomoynikov, E.M. Tsarev [et al.] // *Agrarian Scientific Journal*. – 2024. – № 6. – pp. 134-142. – DOI: 10.28983/asj.y2024i6pp134-142.
4. Chernik D.V. Mathematical model of a combined manipulator of a forest machine / D.V. Chernik, K. N. Chernik // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – 2020. – Vol. 919. – Article 052037. – DOI: 10.1088/1757-899X/919/5/052037.
5. Platonova M.A. Kinematic schemes of manipulators for removing unwanted woody and shrubby vegetation within railway right-of-way zones / M.A. Platonova, M.V. Drapalyuk, A.A. Platonov // *Forestry Engineering Journal*. – 2015. – Vol. 5, № 3(19). – pp. 228-234. – DOI: 10.12737/14651.
6. Platonova M.A. On the study of kinematic schemes of manipulators for machines removing unwanted vegetation / M.A. Platonova, M.V. Drapalyuk, A.A. Platonov // *Current Trends in Scientific Research of the 21st Century: Theory and Practice*. – 2015. – Vol. 3, № 5-2(16-2). – pp. 108-112. – DOI: 10.12737/15982.
7. Vorozhtsov O.V. Hydraulic drive for energy recovery of a vehicle / O.V. Vorozhtsov // *Mathematical Modeling of Systems and Processes: Proceedings of the International Scientific and Practical Conference*. – Pskov: Pskov State University, 2022. – pp. 57-62. – DOI: 10.37490/-978-5-00200-102-6-57-62.
8. Test Rig for Forestry Manipulator Lifting Mechanisms with Energy Recovery / P.I. Popikov, A.V. Konyukhov, S.K. Popikov [et al.] // *Energy Efficiency and Energy Conservation in Modern Production and Society: Proceedings of the International Scientific and Practical Conference*. – Voronezh, 2022. – Part II. – pp. 105–110.
9. Jensen K.J. Novel Concept for Electro-Hydrostatic Actuators for Motion Control of Hydraulic Manipulators / K.J. Jensen, M.K. Ebbesen, M.R. Hanse // *Energies*. – 2021. – Vol. 14, № 20. – Article 6566. – DOI: 10.3390/en14206566.
10. Putyatin P.A. Mathematical model of an energy-saving hydraulic drive for the boom lifting mechanism of a forestry manipulator / P.A. Putyatin, P.I. Popikov, A.A. Polumisko // 2026. – P. 247–255. – DOI: 10.58168/PBHT2026_247-255.

**ЛЕСНАЯ БИОМАССА – КАК ФАКТОР РАЗВИТИЯ
ВОЗОБНОВЛЯЕМОЙ ЭНЕРГЕТИКИ**

Шадрина Е.Л., Богданова Л.Н.

*Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина»,
Воронеж, Россия*

**FOREST BIOMASS AS A FACTOR IN RENEWABLE
ENERGY DEVELOPMENT**

Shadrina E.L., Bogdanova L.N.

*Military Education and Scientific Centre of the Air Force N.E. Zhukovsky
and Y.A Gagarin Air Force Academy, Voronezh, Russia*

Аннотация: Оценка доступности и качества биомассы является важным подходом к пониманию ее потенциала использования в различных секторах отечественной промышленности. В статье рассматриваются вопросы расширения потенциала биомассы для её устойчивого использования в интересах общества.

Abstract: Assessing the availability and quality of biomass is a key approach to understanding its potential for use across various sectors of the domestic industry. The article examines ways to expand biomass potential for sustainable use in the public interest.

Ключевые слова: биомасса, порубочные остатки, переработка, возобновляемое биотопливо.

Keywords: biomass, logging residues, processing, renewable biofuel.

Использование биомассы в России значительно возросло за последние несколько десятилетий. Хотя основными категориями биомассы являются лесные ресурсы и сельскохозяйственные культуры, небольшой процент, включая остатки лесозаготовок и энергетические культуры, используется для производства энергии.

Значительная часть территории нашей страны покрыта лесами, что делает лесную биомассу вероятным источником существенного увеличения использования возобновляемой энергии и устойчивого производства биогаза.

Оценка доступности и качества биомассы является важным подходом к пониманию ее потенциала использования в различных секторах отечественной промышленности. В существующих публикациях [1, 9] прогнозируется развитие потенциала биомассы в отношении биоэнергетики.

Российский лесной сектор продолжает стремиться к росту в мировой биоэкономике посредством исследований и разработок. На основе инициативных

программ исследований в области лесного хозяйства намечены приоритеты лесного сектора, которые включают в себя:

- поддержание конкурентоспособности существующих производственных мощностей для сохранения прибыльности, а также для финансирования разработки новых биопродуктов и процессов;
- увеличение доступности лесного сырья при сохранении устойчивого лесопользования [3];
- разработка новых продуктов на биологической основе для замены современных материалов и изделий, изготовленных из ископаемого топлива;
- стимулирование увеличения объемов промышленного строительства из древесины для достижения большей экологичности зданий.

Классификация биомассы имеет важное значение для понимания различных типов биомассы и ситуаций. В целом, биомассу можно классифицировать на основе ее происхождения, характеристик, состава и методов утилизации.

Растительная биомасса может быть подразделена на природную, остаточную и энергетическую биомассу. Природная и энергетическая биомасса представляют собой первичные культуры, в то время как остаточная биомасса далее подразделяется на лесную, сельскохозяйственную, промышленную и бытовую биомассу.

Доступность лесной биомассы зависит от адекватных экономических и экологических условий [6]. В зависимости от климата и графика сбора урожая могут существовать сезонные ограничения доступности биомассы и значительная ежегодная изменчивость урожайности ресурсов на местном уровне. Неблагоприятные условия окружающей среды могут оказывать значительное негативное или позитивное влияние на ежегодную доступность ресурсов.

Для оценки доступности лесной биомассы [4] используются различные процессы. Некоторые оценки определяют потенциал биомассы для устойчивого использования, а также социальные, экологические и экономические последствия, связанные с производством и использованием ресурсов. Другие оценки анализируют потенциал биомассы с использованием подробной базы данных лесной инвентаризации, учитывая ограничения, которые снижают доступность биомассы для различных сценариев ее получения.

Лес не только обеспечивает пиломатериалы и балансовую древесину, но и предоставляет отходы лесопромысла, остатки лесозаготовок и подлесок, используемые в секторе биоэнергетики. Эти ресурсы могут иметь некоторую сезонную изменчивость, но, как правило, остаются на постоянном уровне в большинстве районов. Они также, как правило, пространственно сконцентрированы [7]. Сектор биоэнергетики также использует всевозможные отходы и побочные продукты лесопереработки и балансовой древесины. Эти остатки используются для производства биотоплива для выработки тепла и электроэнергии, а также для производства пеллет для отопления и жидкого биотоплива для транспорта.

К лесной биомассе, которая может быть преобразована в энергопроизводящие ресурсы, относятся, помимо прочего, следующие виды работ [2, 5, 10]:

- обрезки деревьев;
- лесозаготовка;

- прореживание леса;
- остатки лесоперерабатывающих предприятий, такие как опилки, кора и древесная щепа;
- другие органические вещества.

Замена традиционных видов топлива на возобновляемые биотоплива, производимые из древесины, также может помочь снизить риск лесных пожаров, поскольку это приведет к удалению легковоспламеняющихся материалов, таких как кустарник, деревья малого диаметра и поврежденные деревья, которые в противном случае могли бы подпитывать и усиливать лесные пожары.

Благодаря освоению этих новых рынков биотоплива, частные лесовладельцы получают дополнительную возможность для дальнейшего повышения рентабельности своих лесных угодий устойчивым образом.

Перспективным представляется производство древесных гранул – это вид биотоплива, изготавливаемый из спрессованных опилок, древесной стружки и других отходов. Древесные гранулы обладают высокой плотностью энергии, что делает их эффективными для выработки тепла и электроэнергии. Их однородный состав, низкое содержание влаги и высокая теплотворная способность обеспечивают оптимальное сгорание.

Отдельно отметим синтез-газ, который можно использовать в газовых турбинах, двигателях внутреннего сгорания или котлах для выработки электроэнергии или тепла, обеспечивая более чистое сгорание топлива с меньшими выбросами, чем традиционные ископаемые виды топлива. Перед использованием синтез-газ обычно проходит процессы удаления примесей, твердых частиц и соединений серы для обеспечения оптимальной производительности и снижения потенциального воздействия на окружающую среду. Затем его можно использовать непосредственно для сжигания или дополнительно перерабатывать в жидкое топливо для использования в транспорте.

Еще один способ получения биотоплива из лесной биомассы – анаэробный процесс. При этом методе бактерии разлагают органические вещества в отсутствие кислорода, производя возобновляемый биогаз. Затем этот биогаз может пройти дополнительные процессы очистки для получения биометана, который может быть закачан в газораспределительную сеть или использован в качестве транспортного топлива.

Помимо производства топлива, растет интерес к развитию других биоперерабатывающих предприятий для разработки экономически жизнеспособных продуктов и химикатов в качестве заменителей тех, которые производятся на традиционных нефтеперерабатывающих заводах. Побочные продукты целлюлозно-бумажной промышленности используются на этих биоперерабатывающих предприятиях для производства химикатов с добавленной стоимостью и потребительских товаров.

Энергетические культуры представляют собой важную биомассу, выращиваемую специально для производства биоэнергии, и в основном культивируются на переходных пастбищах. К энергетическим культурам относятся, как правило, быстрорастущие древесные виды, такие как *ива* и *тополь*, с периодом се-

вооборота 5...10 лет. После выращивания вся биомасса используется для производства энергии.

Как уже отмечалось выше, лесная биомасса имеет широкий спектр применения, включая традиционное промышленное использование для производства пиломатериалов и целлюлозно-бумажной продукции, а также в энергетическом секторе для комбинированного производства тепла и электроэнергии. Кроме того, она представляет значительный интерес для развития непрерывного крупномасштабного производства современных жидких и газообразных биотоплив [8, 11]. Таким образом, лесная биомасса представляет собой важную составляющую в рамках доступных местных, национальных и региональных поставок возобновляемого сырья.

Использование биомассы в качестве сырья для биохимического производства обусловлено стремлением сократить выбросы ископаемого углекислого газа, обеспечить безопасность энергоснабжения и желанием оживить сельские районы.

Лесные отходы также являются важными источниками сырья для биохимической промышленности. Остатки лесных насаждений состоят не только из целлюлозы и гемицеллюлозы, которые могут быть ферментированы до полезных молекул, но и из лигнина. Поэтому одной из задач является поиск способов использования не только целлюлозы и гемицеллюлозы, но и лигнина для получения ценных соединений в процессе биопереработки. В России существует потенциал для значительного увеличения использования остатков лесных насаждений по сравнению с нынешним уровнем. Однако определенная часть должна быть возвращена в лес, чтобы избежать деградации органического углерода и питательных веществ почвы. Кора ствола и листва являются основными носителями микроэлементов, а листва – основными носителями макроэлементов. Это жизненно важные остатки экосистемы, и они должны соответствовать определенным экологическим ограничениям для достижения устойчивого производства и использования биомассы в качестве возобновляемого материала. Экологический баланс и продуктивность экосистемы зависят от состава и количества извлеченной биомассы. Поэтому вопрос экологической устойчивости использования остатков лесных насаждений в качестве сырья на биопереработке все еще находится на перспективном рассмотрении.

В связи с существующим мнением о том, что использование древесины в качестве сырья не приводит к высоким выбросам парниковых газов, древесина и древесные продукты обычно считаются углеродно-нейтральными. Как правило, углекислый газ, выделяющийся при вырубке деревьев, поглощается окружающими лесами, что делает древесный материал климатически нейтральным. Это мнение подтверждается тем, что вся удаленная биомасса из лесов, управляемых на принципах устойчивого развития, будет снова поглощена в будущем. Аналогично, увеличение биомассы деревьев означает увеличение поглощения углерода. Благодаря поглощению углекислого газа леса обычно рассматриваются как поглотители углекислого газа. Их также можно считать углеродно-нейтральными, поскольку углекислый газ, поглощенный с начала их жизненного цикла, высвобождается при вырубке лесов. Древесные продукты из лесной

биомассы будут продолжать действовать как значительные поглотители углерода, и это может продолжаться до тех пор, пока древесина не разложится или не сгорит.

Таким образом очевидно, что имеющаяся в России биомасса может быть использована для обеспечения устойчивого снабжения материалами (например, древесиной, целлюлозой, бумагой и бумажной продукцией, химикатами, биокомпозитами и другими строительными материалами) для текущих и будущих потребностей. Устойчивое управление лесной биомассой будет и впредь предоставлять возможности для экономического роста и повышения производительности, а также способствовать созданию углеродно-нейтральной биоэкономики.

Список литературы

1. Беляев С.В. О роли биомассы в повышении топливно-энергетического потенциала регионов / С. В. Беляев, М. Левина // *Resources and Technology*. – 2019. – Т. 16, № 4. – С. 25-36. – DOI 10.15393/j2.art.2019.4882.
2. Совершенствование технологий и техники для расчистки площадей от нежелательной древесно-кустарниковой растительности / М.В. Драпалюк, В.Н. Коротких, А.А. Платонов [и др.] // *Леса России и хозяйство в них*. – 2025. – № 3(94). – С. 136-146. – DOI: 10.51318/FRET.2025.94.3.014.
3. Платонов А.А. Анализ критериев оценки качества работ по удалению нежелательной поросли / А.А. Платонов // *Наука. Техника. Технологии (политехнический вестник)*. – 2022. – № 1. – С. 177-181.
4. Платонов А.А. Вопросы утилизации нежелательной растительности при содержании охранных зон трасс ВЛ / А.А. Платонов // *Воронежский научно-технический Вестник*. – 2020. – Т. 1, № 1(31). – С. 95-102.
5. Платонов А.А. Исследование и систематизация существующих технологических процессов удаления нежелательной растительности / А.А. Платонов // *Системы. Методы. Технологии*. – 2020. – № 3(47). – С. 63-73. – DOI: 10.18324/2077-5415-2020-3-63-73.
6. Платонов А.А. Комплексное управление лесной растительностью: этапы и перспективы развития / А.А. Платонов // *Лесотехнический журнал*. – 2023. – Т. 13, № 2(50). – С. 142-157. – DOI: 10.34220/issn.2222-7962/2022.3/8.
7. Платонов А.А. О местах воздействия на нежелательную растительность при её удалении с территорий транспортных инфраструктур / А.А. Платонов // *Актуальные проблемы развития лесного комплекса: Материалы XVII Международной научно-технической конференции, Вологда, 03 декабря 2019 года / Ответственный редактор Ю.М. Авдеев*. – Вологда: Вологодский государственный университет, 2019. – С. 216-218.
8. Татаренко И.Р. Исследование влияния условий хранения биодизельного топлива на его свойства / И.Р. Татаренко, Н.А. Сердюкова, А.А. Шевцов // *Современный лесной комплекс страны: инновационные разработки и исследования: Материалы Всероссийской научно-практической конференции, Воронеж, 03 октября 2024 года*. – Воронеж: Воронежский государственный лесотехниче-

ский университет им. Г.Ф. Морозова, 2024. – С. 105-110. – DOI: 10.58168/MFCC2024_105-110.

9. Технологические аспекты повышения эффективности использования энергетического потенциала биомасс России / Е.В. Арбузова, С.Е. Щеклеин, А.А. Холмаков [и др.] // Международный научный журнал Альтернативная энергетика и экология. – 2012. – № 3(107). – С. 82-88.

10. Platonov A.A. Modern state of technical means to remove uncontrolled vegetation / A.A. Platonov // Lesnoy Vestnik. Forestry Bulletin. – 2021. – Vol. 25, № 1. – pp. 115-122. – DOI: 10.18698/2542-1468-2021-1-115-122.

11. Serdyukova N. Biodiesel production technology using low-potential energy / N. Serdyukova, A. Shevtsov // BIO Web of Conferences. – 2024. – Vol. 145. – P. 04011. – DOI: 10.1051/bioconf/202414504011.

References

1. Belyaev S.V. On the role of biomass in enhancing the fuel and energy potential of regions / S.V. Belyaev, M. Levina // Resources and Technology. – 2019. – Vol. 16, № 4. – pp. 25-36. – DOI: 10.15393/j2.art.2019.4882.

2. Improvement of technologies and machinery for clearing areas of unwanted woody and shrubby vegetation / M.V. Drapalyuk, V.N. Korotkikh, A.A. Platonov [et al.] // Forests of Russia and Forestry. – 2025. – № 3(94). – pp. 136-146. – DOI: 10.51318/FRET.2025.94.3.014.

3. Platonov A.A. Analysis of quality assessment criteria for unwanted regrowth removal operations / A.A. Platonov // Science. Engineering. Technologies (Polytechnic Bulletin). – 2022. – № 1. – pp. 177-181.

4. Platonov A.A. Issues regarding the disposal of unwanted vegetation during the maintenance of overhead power line protection zones / A.A. Platonov // Voronezh Scientific and Technical Bulletin. – 2020. – Vol. 1, № 1(31). – pp. 95-102.

5. Platonov A.A. Research and systematization of existing technological processes for unwanted vegetation removal / A.A. Platonov // Systems. Methods. Technologies. – 2020. – № 3(47). – pp. 63-73. – DOI: 10.18324/2077-5415-2020-3-63-73.

6. Platonov A.A. Integrated forest vegetation management: stages and development prospects / A.A. Platonov // Forestry Engineering Journal. – 2023. – Vol. 13, № 2(50). – pp. 142-157. – DOI: 10.34220/issn.2222-7962/2022.3/8.

7. Platonov A.A. On target areas for treating unwanted vegetation during its removal from transport infrastructure sites / A.A. Platonov // Current Issues in Forest Sector Development: Proceedings of the XVII International Scientific and Technical Conference, Vologda, December 3, 2019 / Executive Editor Yu.M. Avdeev. – Vologda: Vologda State University, 2019. – pp. 216-218.

8. Tatarenko I.R. Study of the effect of storage conditions on biodiesel fuel properties / I.R. Tatarenko, N.A. Serdyukova, A.A. Shevtsov // The Country's Modern Forest Sector: Innovative Developments and Research: Proceedings of the All-Russian Scientific and Practical Conference, Voronezh, October 3, 2024. – Voronezh: Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, 2024. – pp. 105-110. – DOI: 10.58168/MFCC2024_105-110.

9. Technological aspects of improving the efficiency of utilizing Russia's biomass energy potential / E.V. Arbuzova, S.E. Shcheklein, A.A. Kholmakov [et al.] // International Scientific Journal «Alternative Energy and Ecology». – 2012. – № 3(107). – pp. 82–88.
10. Platonov A.A. Modern state of technical means to remove uncontrolled vegetation / A.A. Platonov // Lesnoy Vestnik. Forestry Bulletin. – 2021. – Vol. 25, № 1. – pp. 115-122. – DOI: 10.18698/2542-1468-2021-1-115-122.
11. Serdyukova N. Biodiesel production technology using low-potential energy / N. Serdyukova, A. Shevtsov // BIO Web of Conferences. – 2024. – Vol. 145. – P. 04011. – DOI: 10.1051/bioconf/202414504011.

СЕКЦИЯ 3
ИССЛЕДОВАНИЕ И МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ, СИСТЕМ
И СОСТОЯНИЙ

DOI: 10.58168/CouForCom2026_171-176

УДК 630*24

СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА АРБОРИЦИДОВ НА РУБКАХ УХОДА
В МОЛОДНЯКАХ ХИМИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

Анисимов И.С.

*Поволжский государственный технологический университет,
Йошкар-Ола, Россия*

COMPARATIVE EVALUATION OF ARBORICIDES IN YOUNG STONE
THREAT CLEANING BY THE CHEMICAL METHOD

Anisimov I.S.

*Volga State University of Technology,
Yoshkar-Ola, Russia*

Аннотация. В статье рассмотрены вопросы апробации и сравнительной оценки арборицидов на рубках ухода в молодняках химическим методом с использованием усовершенствованного экспериментального устройства путем впрыска арборицида в стволы деревьев нежелательных пород, преимущественно лиственных. Приведены результаты экспериментальных исследований.

Abstract. This article examines the testing and comparative evaluation of arboricides in thinning operations in young stands using a chemical method, using an improved experimental device, by injecting the arboricide into the trunks of undesirable tree species, primarily deciduous trees. The results of the experimental studies are presented.

Ключевые слова: пробные площадки, нежелательные породы, арборициды (химические растворы), древостой, породный состав, рубки осветления.

Keywords: test plots, unwanted species, arboricides (chemical solutions), forest stand, species composition, clearing felling.

Осветление – первоначальный и основополагающий этап формирования состава пород древостоя [1, 2].

Химический метод – это один из малозатратных методов при рубках ухода в молодняках (на осветлении), поскольку древесина удаляемых деревьев не является хозяйственно ценной (не используется в народном хозяйстве). Один из возможных путей ее использования - это использование в качестве удобрения при ее разложении на органические вещества при их отмирании [3-5]. Причем быстрому разложению стволов деревьев способствуют и арборициды, впрыскиваемые в их стволы при удалении [6, 7].

В статье рассматривается вопрос сравнительной оценки продуктивности арборицидов на рубках осветления.

Целью работы сравнительная оценка продуктивности арборицидов на рубках осветления.

Решение задачи.

Для эффективного удаления древесной и кустарниковой растительности использовались специализированные арборициды высокой концентрации. Применение данных препаратов требует неукоснительного соблюдения рекомендованных дозировок и мер предосторожности (табл. 1).

Таблица 1 – Арборициды для уничтожения древесно-кустарниковой растительности

№	Название	Назначение
1	Раундап	Это широко известное средство эффективно подавляет рост древесно-кустарниковых пород, демонстрируя высокую результативность как на хвойных, так и на лиственных деревьях
2	Торнадо	Химический препарат демонстрирует высокую эффективность в борьбе с древовидными сорняками. Важно отметить, что благодаря отсутствию почвенной активности, препарат оказывает избирательное действие, воздействуя исключительно на целевые растения. Это гарантирует отсутствие негативного влияния на почву и соседние культурные растения в зоне обработки. Полное уничтожение крупных сорных растений достигается в течение 8 месяцев.
3	Грейдер	Гербицид системного действия, то есть это препарат, который уничтожает все сорняки без разбору. Им можно уничтожить как однодольные, так и двудольные растения, однолетние и многолетние. Более того, он поможет избавиться даже от деревьев, например, осин, берез, ольхи, ив, сосен и елей.
4	Ураган	Системный гербицид сплошного действия, он проникает внутрь растения и убивает его изнутри, не оставляя ни малейшего шанса на повторное отрастание. Кроме того, с помощью этого гербицида можно уничтожить кустарники и даже молодые деревья.

Примечание: Эти арборициды характеризуются по ВОЗ как препараты III класса опасности, малотоксичные. Имеются в свободной продаже.

Для проведения экспериментальных исследований на рубках ухода осветлении были выделены пробные участки (площадки) на арендной лесной площади ООО «Оршанский лес». Эксперимент проходил в несколько этапов.

Этап 1 (22.05.2026 г.). Закладывалось четыре пробные площадки (участок 1, 2 и 3-1, 3-2). Выбирались деревья породы береза. Деревья маркировались: крепились бирки с данными о породе, диаметре, месте нанесения арборицида над уровнем земли, концентрации арборицида, вид арборицида. Использовались химические растворы: Торнадо ВК (Т), Ураган (У), Раундап (Р), Грейдер (Г).

На примере рассмотрим участок 1 (рис. 1).

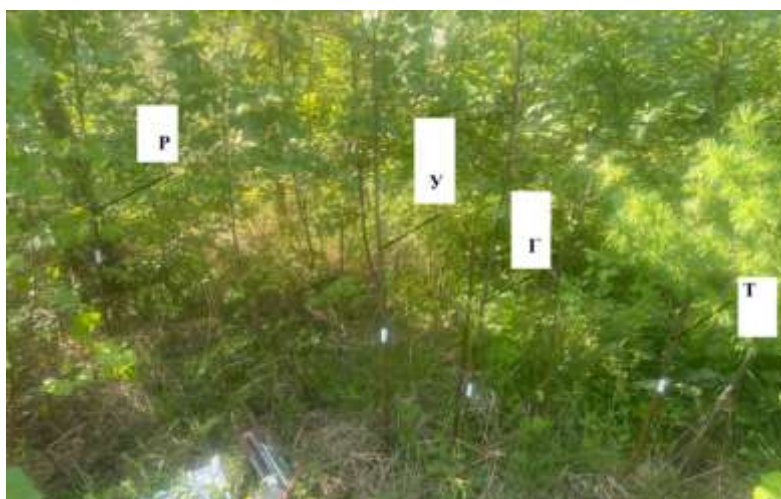


Рисунок 1 – Участок 1

Характеристика заложенных пробных площадок представлена в табл. 2

Таблица 2 – Характеристики заложенных пробных площадок

Участок 1 Вид рубок: осветление Порода: береза Место впрыск: на высоте 40 см от уровня земли Концентрация раствора: концентрат (сам раствор)			Участок 2 Вид рубок: осветление Порода: береза Место впрыск: на уровне земли Концентрация раствора: концентрат (сам раствор)		
Хим. раствор	Диаметр дерева, мм	Объем хим. раствора, мл.	Хим. раствор	Диаметр дерева, мм	Объем хим. раствора, мл.
Торнадо	17	2	Торнадо	25	2
Грейдер	13	2	Грейдер	16	2
Раундап	15	2	Раундап	19	2
Ураган	15	2	Ураган	21	2
Участок 3-1 Вид рубок: осветление Порода: береза Место впрыск: на высоте 40 см от уровня земли Концентрация раствора: 1 к 2			Участок 3-2 Вид рубок: осветление Порода: береза Место впрыск: на высоте 40 см от уровня земли Концентрация раствора: 1 к 3		
Хим. раствор	Диаметр дерева, мм	Объем хим. раствора, мл.	Хим. раствор	Диаметр дерева, мм	Объем хим. раствора, мл.
Торнадо	17	2	Торнадо	16	2
Грейдер	13	2	Грейдер	20	2
Раундап	15	2	Раундап	24	2
Ураган	15	2	Ураган	13,5	2

Примечание. На других пробных площадках ввод арборицида осуществлялся с разной концентрацией и на разных высотах.

Промежуточный этап (дата проведения и наблюдения 05.06.2026; рис. 2).



Рисунок 2 – Участок 1

Идет постепенное усыхание крон некоторых деревьев, а именно под воздействием арборицидов Торнадо ВК и Ураган. Под воздействием других арборицидов заметно *лишь незначительное* увядание кроны.

Заключительный этап (дата проведения и наблюдения 13.06.2026; рис. 3).



Рисунок 3 – Участок 1

Кроны некоторых деревьев полностью усохли при воздействии арборицидов Торнадо ВК и Ураган. Под воздействием других арборицидов увядание кроны не существенно.

Выводы. Проведя экспериментальные исследования на осветлении можно заключить:

1. Самым эффективным оказался химический раствор (арборицид) Торнадо ВК, затем по эффективности следует Ураган. Химические растворы Раундап и Грейдер оказались малоэффективны, практически не оказали ни-

какого действия, т.е. они не пригодны для удаления древесной растительности.

2. Впрыск арборицида на разных уровнях не влияет на процесс усыхания деревьев, подлежащих удалению.

3. Наиболее эффективным оказался концентрация смеси арборицида 1 к 0, т.е. впрыскивался сам арборицид (срок усыхания быстрее). При концентрации 1 к 2 отмирание удаляемых деревьев существенно снизилось. А при концентрации 1 к 3 существенного влияния арборицидная смесь не оказывает. Таким образом, регулируя концентрацию арборицида, мы можем регулировать и срок усыхания (отмирания) удаляемых деревьев.

4. Кронам деревьев подверженных воздействию арборицида Торнадо ВК после промежуточного этапа уже не оказывают никакого влияния на условия для роста остающихся деревьев после обработки лесных участков. Это подтверждает заключительный этап.

5. Наблюдения продолжаются.

Работа выполнена в рамках «Фонд содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере» по договору ДОГОВОР (СОГЛАШЕНИЕ) №228ГССС27/109084 на получение поддержки в рамках федерального проекта «Платформа университетского технологического предпринимательства».

Список литературы

1. Сакса Т. Уход за молодняками. Цели, технологии и затраты / Т. Сакса, Я. Мийна, К. Утила. – Метсакустаннус, Институт природных ресурсов Финляндии (Luke), 2020. – 130 с.

2. Цыпилев С.В. Апробация различных способов рубок ухода в молодняках / С.В. Цыпилев, Ф.Н. Дружинин // В сборнике: Актуальные проблемы развития лесного комплекса. Материалы XVIII Международной научно-технической конференции. Вологда, 2020. С. 109-111.

3. Регулирование состава насаждений способом инъекции гербицидов в стволы деревьев нежелательных древесных пород: история и перспективы / А.А. Бубнов, А.М. Постников, А.Б. Егоров и др. // Труды Санкт-Петербургского научно-исследовательского института лесного хозяйства. – 2023. – № 2. – С. 4-17. – DOI: 10.21178/2079-6080.2023.2.4.

4. Григорьева О.И. Безопасное использование пестицидов в лесном хозяйстве / О.И. Григорьева, О.И. Гринько, И.В. Григорьев // Безопасность и охрана труда в лесозаготовительном и деревообрабатывающем производствах, 2023. – № 3. – С. 48-68.

5. Бакина Ю.В. Химическая обработка леса / Ю.В. Бакина // Современные вопросы естествознания и экономики: Сборник трудов IV Международной научно-практической конференции, Прокопьевск, 17 марта 2022 года. – Прокопьевск: Филиал Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Кузбасский государ-

ственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева» в г. Прокопьевске, 2022. – С. 276-278.

6. Патент №2800996 Российская федерация, МПК А01G 23/00, А01М 21/00. Устройство для химического ухода за лесом / Царев Е.М., Анисимов С.Е. Рукомойников К.П., Анисимов Н.С., Анисимов И.С., Гилязова Т.А., Макаров В.Е., заявитель и патентообладатель ПГТУ, заявл. 19.04.2023, опубл. 01.08.2023. Бюл. №22.

7. Патент № 2690471 Российская Федерация, МПК А01G23/00. Устройство для химического ухода за лесом / Царев Е.М., Анисимов С.Е., Заболотский В.М., Конюхова Т.А., Кренев А.В., Коновалова Ю.А., Анисимов Н.С., Анисимов И.С., заявитель и патентообладатель ПГТУ, заявл. 22.05.2018, опублик. 03.06.2019. Бюл. № 16.

References

1. Saxa T. Young Forest Care. Objectives, Technologies, and Costs / T. Saxa, J. Miina, K. Uotila. – Metsäkustannus, Natural Resources Institute Finland (Luke), 2020. – 130 p.

2. Tsypilev S.V. Testing Various Thinning Methods in Young Forests / S.V. Tsypilev, F.N. Druzhinin // In the collection: Actual Problems of Forest Complex Development. Proceedings of the XVIII International Scientific and Technical Conference. Vologda, 2020. – pp. 109-111.

3. Regulating Stand Composition by Injecting Herbicides into the Trunks of Undesirable Tree Species: History and Prospects / A.A. Bubnov, A.M. Postnikov, A.B. Egorov, et al. // Transactions of the St. Petersburg Forestry Research Institute. – 2023. – № 2. – pp. 4-17. – DOI: 10.21178/2079-6080.2023.2.4.

4. Grigorieva O.I. Safe use of pesticides in forestry / O.I. Grigorieva, O.I. Grinko, I.V. Grigoriev // Occupational safety and health in logging and woodworking industries, 2023. – № 3. – pp. 48-68.

5. Bakina Yu.V. Chemical treatment of forests / Yu.V. Bakina // Modern issues of natural science and economics: Collection of works of the IV International scientific and practical conference, Prokopyevsk, March 17, 2022. – Prokopyevsk: Branch of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Professional Education «Kuzbass State Technical University named after T. F. Gorbachev» in Prokopyevsk, 2022. – pp. 276-278.

6. Patent № 2800996 Russian Federation, IPC A01G 23/00, A01M 21/00. Device for chemical forest care / Tsarev E. M., Anisimov S. E., Rukomoynikov K. P., Anisimov N. S., Anisimov I. S., Gilyazova T. A., Makarov V. E., applicant and patent holder Perm State Technical University, declared 19.04.2023, published 01.08.2023. Bulletin № 22.

7. Patent № 2690471 Russian Federation, IPC A01G23/00. Device for chemical forest care / Tsarev E.M., Anisimov S.E., Zabolotsky V.M., Konyukhova T.A., Krenov A.V., Konovalova Yu.A., Anisimov N.S., Anisimov I.S., applicant and patent holder Perm State Technical University, declared 22.05.2018, published 03.06.2019. Bulletin № 16.

**РАЗРАБОТКА ГИБРИДНОГО АЛГОРИТМА ДЛЯ СЕГМЕНТАЦИИ
И КОЛИЧЕСТВЕННОЙ ОЦЕНКИ ДЕФЕКТОВ ЛЕСНЫХ ДОРОГ
В УСЛОВИЯХ ОГРАНИЧЕННОЙ ВИДИМОСТИ**

Белов С.В.

*Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет
им. С.М. Кирова, Санкт-Петербург, Россия*

**DEVELOPMENT OF A HYBRID ALGORITHM FOR SEGMENTA-
TION AND QUANTITATIVE ASSESSMENT OF FOREST ROAD DE-
FECTS UNDER LIMITED VISIBILITY CONDITIONS**

Belov S.V.

Saint-Petersburg State Forest Technical University, Saint-Petersburg, Russia

Аннотация: Представлен гибридный алгоритм обнаружения и количественной оценки дефектов покрытия лесовозных дорог, основанный на слиянии данных RGB-камеры и лидара. Разработан конвейер обработки, включающий калибровку сенсоров, семантическую сегментацию изображений, фильтрацию и кластеризацию облаков точек, а также проекционное слияние разнородных данных.

Abstract: A hybrid algorithm for detection and quantitative assessment of forest road surface defects based on the fusion of RGB camera and LiDAR data is presented. A processing pipeline comprising sensor calibration, semantic image segmentation, point cloud filtering and clustering, as well as projective fusion of heterogeneous data has been developed.

Ключевые слова: лесные дороги, дефекты покрытия, компьютерное зрение, лидар, слияние сенсорных данных, семантическая сегментация.

Keywords: forest roads, pavement defects, computer vision, LiDAR, sensor fusion, semantic segmentation.

Лесовозные дороги составляют основу транспортной инфраструктуры лесного комплекса, обеспечивая вывозку древесины и логистику лесопромышленных предприятий. Согласно данным отраслевой статистики, протяженность лесовозных дорог в Российской Федерации превышает 500 тыс. км, значительная часть которых эксплуатируется в условиях сезонного переувлажнения, перепадов температур и ограниченного финансирования планово-предупредительных ремонтов. Дефекты дорожного покрытия – выбоины, колея глубиной более 5 см, размывы обочин – не только снижают скорость и безопасность движения лесовозного транспорта, но и приводят к повышенному износу ходовой части и шин, что увеличивает эксплуатационные затраты на 15–20 %.

Традиционные методы диагностики состояния лесных дорог [2] основываются на визуальном осмотре с привлечением квалифицированных специалистов либо на применении мономодальных систем: видеокамер или лазерных сканеров. Каждый из этих подходов имеет системные ограничения. Оптические системы чувствительны к внешней освещённости, теням от крон деревьев и атмосферным явлениям – туману, снегопаду, дождю. Лидарные системы, напротив, инвариантны к освещению, но порождают разреженные облака точек, недостаточные для достоверной идентификации дефектов малых размеров и текстурированных поверхностей.

Цель работы – разработка и экспериментальная проверка гибридного алгоритма сегментации и количественной оценки дефектов лесовозных дорог, устойчивого к условиям ограниченной видимости, на основе слияния данных RGB-камеры и лидара.

Обнаружение дефектов дорожного покрытия методами компьютерного зрения прошло путь от классических детекторов границ (Canny, Sobel) до сверточных нейронных сетей. Архитектура DeepLab с использованием атласной свертки и пространственного пирамидального пулинга (ASPP) продемонстрировала высокую эффективность в задачах семантической сегментации дорожных сцен [5]. Семейство детекторов YOLO, включая YOLOv8 и YOLOv11, обеспечивает компромисс между точностью и скоростью, что актуально для бортовых систем реального времени. В работе [1] показано, что улучшенная модель YOLOv11 достигает $mAP_{0.5} = 0,483$ при сегментации трещин асфальта, однако эксперименты проводились на городских дорогах с четкими контурами дефектов.

Проблематика мультисенсорного слияния для обнаружения дефектов освещена в работах [3-5]. В [6] предложена оптимизация размещения камеры и лидара на бортовой платформе, обеспечивающая максимизацию перекрытия зон обзора; экспериментальные погрешности оценки числа точек дефекта составили 6,8–6,9 %. В [1] представлена IoT-платформа для инспекции дорог, где слияние изображений и облаков точек выполняется на основе улучшенной модели YOLOv11. Недостатком указанных подходов является их ориентированность на структурированные дорожные сцены с высоким контрастом дефектов на фоне покрытия. В лесных условиях фон неоднороден, границы дефектов размыты, а облака точек содержат значительное количество шумовых выбросов от растительности.

Таким образом, существующие методы не обеспечивают необходимой точности сегментации и количественной оценки дефектов лесовозных дорог в условиях ограниченной видимости. Настоящая работа восполняет этот пробел путем разработки гибридного конвейера, интегрирующего семантическую сегментацию RGB-изображений, фильтрацию и кластеризацию лидарных данных и проекционное слияние с вычислением геометрических параметров дефектов.

Экспериментальный стенд включал стереокамеру Intel RealSense D455 (разрешение 1920×1080 пикселей, частота 30 кадров/с) и лидар Velodyne VLP-16 (16 лучей, дальность до 100 м, частота вращения 10 Гц, точность ±3 см). Сенсоры жёстко закреплены на общей платформе с известным базовым расстоянием (15 см). Сбор данных выполнялся при движении платформы со скоро-

стью 5 км/ч по участкам лесовозных дорог общей протяженностью 2,3 км в условиях естественного освещения, тумана (видимость 50–100 м) и снегопада.

Каждый кадр RGB-изображения подаётся на вход модели семантической сегментации на основе архитектуры DeepLabV3+ с бэкбоном ResNet-50, предварительно обученной на наборе данных Cityscapes и дообученной на размеченной выборке лесных дорог (1200 изображений с пиксельными масками дефектов). Сеть выдаёт карту сегментации с классами: «фон», «дорога», «выбоина», «колея», «размыв». Для повышения устойчивости к условиям ограниченной видимости применяется предобработка: адаптивная эквализация гистограммы (CLAHE) и фильтрация с сохранением границ (билатеральный фильтр). Выходом модуля является бинарная маска, где единица соответствует пикселям, отнесенным к дефекту.

Облако точек, полученное от лидара, подвергается последовательной обработке:

1. Фильтрация дальности – удаление точек с расстоянием более 30 м и менее 1 м.;
2. Статистическая фильтрация выбросов – для каждой точки вычисляется среднее расстояние до заданного числа ближайших соседей; точки, у которых это расстояние превышает пороговое значение (определяемое как среднее плюс удвоенное стандартное отклонение), удаляются.
3. Выделение дорожной поверхности – применение алгоритма RANSAC для поиска плоскости, аппроксимирующей точки дороги. Порог расстояния до плоскости – 0,05 м, максимальное число итераций – 1000. Точки, лежащие ниже плоскости более чем на 0,03 м, классифицируются как кандидаты в дефекты.
4. Кластеризация – алгоритм DBSCAN с параметрами радиуса окрестности 0,15 м и минимальным числом точек в кластере, равным 10, для группировки точек дефектов в отдельные объекты.

Выходом модуля является набор кластеров, каждый из которых представляет собой множество трёхмерных точек, соответствующих одному дефекту. Слияние данных выполняется на уровне объектов (поздняя интеграция) по следующей схеме:

1. Каждый кластер лидарных точек проецируется на плоскость изображения с использованием результатов калибровки. Полученное множество проекций ограничивает прямоугольную область на изображении.

2. Для каждой области вычисляется коэффициент перекрытия (IoU) с маской сегментации — отношение площади пересечения к площади объединения проекции и маски.

3. Кластер считается подтвержденным дефектом, если IoU превышает 0,3. Для подтвержденных кластеров выполняется уточнение границ: границы дефекта определяются как пересечение контура проекции кластера и границ сегментированной маски.

4. Для кластеров с IoU не более 0,3 выполняется повторная сегментация изображения в области проекции с использованием адаптивного порогового метода OTSU, что позволяет обнаружить дефекты, пропущенные нейросетью.

Для каждого подтвержденного дефекта вычисляются геометрические параметры. Поверхность дороги аппроксимируется плоскостью, полученной на этапе RANSAC [4]. Объем дефекта вычисляется путем вокселизации простран-

ства между плоскостью дороги и поверхностью, заданной облаком точек дефекта. Для каждого вокселя фиксированного размера определяется, находится ли его центр ниже плоскости дороги. Объем рассчитывается как произведение объема одного вокселя на число вокселей, центры которых лежат ниже плоскости. Глубина дефекта определяется как максимальное отклонение точек облака от плоскости дороги.

Для обучения и тестирования сформирован набор данных, включающий 1200 синхронизированных пар «изображение + облако точек», полученных в трёх сценариях: ясная погода, туман, снегопад. Разметка выполнена вручную с привлечением трёх экспертов; для каждого дефекта указаны маска на изображении и трехмерные координаты границ.

Оценка качества сегментации проводилась по метрикам IoU, Precision и Recall. Оценка точности количественных параметров – по средней абсолютной ошибке и среднеквадратичной ошибке относительно эталонных значений, полученных лазерным сканированием с высокой плотностью (FARO Focus S70).

Для предложенного гибридного алгоритма [1] средняя абсолютная ошибка оценки объёма составила $7,2 \text{ см}^3$, среднеквадратичная ошибка (RMSE) – $12,5 \text{ см}^3$. Для сравнения: CV-модуль в тех же условиях дал $\text{MAE} = 18,6 \text{ см}^3$, LiDAR-модуль – $\text{MAE} = 14,8 \text{ см}^3$. Основной вклад в ошибку гибридного метода вносит погрешность проецирования лидарных точек на изображение (до 0,65 пикселя), что при масштабе сцены соответствует смещению около 2 см на местности.

Оценка глубины дефектов показала, что предложенный метод определяет максимальную глубину с ошибкой не более 1,8 см для дефектов глубиной до 15 см. Это позволяет классифицировать дефекты по категориям опасности согласно отраслевым нормативам.

В работе [1] представлен гибридный алгоритм сегментации и количественной оценки дефектов лесовозных дорог, основанный на слиянии данных RGB-камеры и лидара. Разработан конвейер обработки, включающий калибровку сенсоров, семантическую сегментацию изображений на основе DeepLabV3+, фильтрацию и кластеризацию облаков точек, а также проекционное слияние с вычислением IoU. Экспериментальная верификация в условиях тумана и снегопада показала, что предложенный подход обеспечивает $\text{IoU} = 0,71$ и $0,68$ соответственно, что на 30–33 % выше, чем у мономодального CV-подхода. Средняя абсолютная ошибка оценки объёма дефектов составила $7,2 \text{ см}^3$.

Список литературы

1. Белов С.В. Применение методов машинного обучения и компьютерного зрения для автоматизации обнаружения дорожных дефектов / С.В. Белов, В.В. Силецкий // Современные технологии лесопромышленного комплекса : Материалы международной молодежной научно-практической конференции, Санкт-Петербург, 22-23 апреля 2026 года. – СПб: Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет им. С.М. Кирова, 2026. – С. 267-272.
2. Белов С.В. Теоретические основы системы ИИ-управления БПЛА для высокоточной топографической съемки автомобильных дорог / С.В. Белов, В.В. Силецкий // Сборник статей по материалам научно-технической конференции

Института технологических машин и транспорта леса по итогам научно-исследовательских работ 2025 года: Материалы докладов научно-технической конференции, Санкт-Петербург, 09-20 февраля 2026 года. – СПб: Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет им. С.М. Кирова, 2026. – С. 57-62.

3. Qi C.R. PointNet: Deep Learning on Point Sets for 3D Classification and Segmentation / C.R. Qi, H. Su, K. Mo // Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). – 2017. – P. 652–660.

4. Besl P.J. A Method for Registration of 3-D Shapes / P.J. Besl, N.D. McKay // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. – 1992. – Vol. 14, № 2. – pp. 239–256.

5. DeepLab: Semantic Image Segmentation with Deep Convolutional Nets, Atrous Convolution, and Fully Connected CRFs / L.-C. Chen, G. Papandreou, I. Kokkinos [et al] // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. – 2018. – Vol. 40, № 4. – pp. 834–848.

6. Adaptive Calibration of LiDAR and Camera Sensors for Multi-Sensor Fusion // Proceedings of the International Conference on Intelligent Robotics and Automation. – 2025. – pp. 1–6.

References

1. Belov S.V. Application of machine learning and computer vision methods for the automated detection of road defects / S.V. Belov, V.V. Siletskiy // Modern Technologies in the Timber Industry Complex: Proceedings of the International Youth Scientific and Practical Conference, St. Petersburg, April 22-23, 2026. – St. Petersburg: Saint Petersburg State Forest Technical University named after S.M. Kirov, 2026. – pp. 267–272.

2. Belov S.V. Theoretical foundations of an AI-based UAV control system for high-precision topographic surveying of roads / S.V. Belov, V.V. Siletskiy // Collection of papers based on the 2025 research findings of the Institute of Technological Machinery and Forest Transport: Proceedings of the Scientific and Technical Conference, St. Petersburg, February 9-20, 2026. – St. Petersburg: Saint Petersburg State Forest Technical University named after S.M. Kirov, 2026. – pp. 57–62.

3. Qi C.R. PointNet: Deep Learning on Point Sets for 3D Classification and Segmentation / C.R. Qi, H. Su, K. Mo // Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). – 2017. – P. 652–660.

4. Besl P.J. A Method for Registration of 3-D Shapes / P.J. Besl, N.D. McKay // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. – 1992. – Vol. 14, № 2. – pp. 239–256.

5. DeepLab: Semantic Image Segmentation with Deep Convolutional Nets, Atrous Convolution, and Fully Connected CRFs / L.-C. Chen, G. Papandreou, I. Kokkinos [et al] // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. – 2018. – Vol. 40, № 4. – pp. 834–848.

6. Adaptive Calibration of LiDAR and Camera Sensors for Multi-Sensor Fusion // Proceedings of the International Conference on Intelligent Robotics and Automation. – 2025. – pp. 1–6.

**ЦИФРОВЫЕ МЕТОДЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ
ВЫСОКОТЕХНОЛОГИЧНЫХ КОМПОНЕНТОВ С ОПТИМИЗАЦИЕЙ
ТОПОЛОГИИ ДЛЯ АДДИТИВНОГО ПРОИЗВОДСТВА**

Гнусов М.А., Воскобойник М.Ю.

*Воронежский государственный лесотехнический университет
имени Г.Ф. Морозова, Воронеж, Россия*

**DIGITAL DESIGN METHODS FOR HIGH-TECH COMPONENTS VIA TO-
POLOGY OPTIMIZATION FOR ADDITIVE MANUFACTURING**

Gnusov M.A., Voskoboynik M.Yu.³⁰

*Voronezh State University of Forestry and Technologies
named after G.F. Morozov, Voronezh, Russia*

Аннотация: В данной статье проводится комплексный обзор современных подходов к интеграции методов топологической оптимизации (ТО) и технологий аддитивного производства (АП). Рассматривается синергия между способностью ТО создавать сложные геометрические конфигурации и возможностями АП по их реализации. Особое внимание уделяется решению проблем технологичности, таким как минимизация вспомогательных поддержек, учет анизотропии материалов, многомасштабное проектирование решетчатых структур и оптимизация ориентации детали. В практической части работы описан процесс подготовки цифровых моделей (slicing), сравнительный анализ методов АП (FDM, SLA, SLS и др.) и экспериментальная реализация прототипов деталей лесохозяйственной грунтометательной машины методом FDM на принтере Picaso с использованием пластика ABS+.

Abstract: This paper provides a comprehensive review of modern approaches to integrating topology optimization (TO) methods with additive manufacturing (AM) technologies. It examines the synergy between the ability of TO to generate complex geometric configurations and the capacity of AM to realize them. Particular attention is paid to addressing manufacturability challenges, such as the minimization of support structures, accounting for material anisotropy, multiscale design of lattice structures, and part orientation optimization. The practical part of the work describes the digital model preparation process (slicing), a comparative analysis of AM methods (FDM, SLA, SLS, etc.), and the experimental implementation of prototype components for a forestry soil-spraying machine using FDM technology on a Picaso printer with ABS+ plastic.

Ключевые слова: топологическая оптимизация, 3D-печать, FDM, самонесущие конструкции, многомасштабное проектирование, решетчатые структуры, анизотропия, подготовка модели.

Keywords: topology optimization, additive manufacturing, FDM, self-supporting structures, multiscale design, lattice structures, anisotropy, model preparation.

В данной статье представлены результаты анализа научных исследований в области 3D-печати, а также результаты собственных изысканий авторов, включающие создание модели, построение топологии и печать деталей. На основании анализа данных выделены основные проблемные области в аддитивном производстве, например: проблемы дальнейшей эксплуатации, влияние масштаба модели (детали), такие характеристики, как «анизотропия» и «прочность материалов», и т. д. Разработка и совершенствование методов проектирования изделий различной формы для применения в разных конструкциях позволяют получать инновационные, облегченные, сложнореализованные детали и конструкции [1]. Технология 3D-печати является инновационным методом послойного выращивания деталей и воспроизведения сложных форм. Объединение топологической оптимизации и 3D-печати предоставляет возможность повышать эксплуатационные характеристики при снижении себестоимости производства. В материале [1] авторами отмечена важность оптимизации топологии как ключевого фактора воспроизведения деталей в процессе аддитивного производства.

Топологическая оптимизация с учетом индивидуальных характеристик производства активно исследовалась и развивалась в течение последних десятилетий. Это позволило также достичь прогресса как инженерам-конструкторам и технологам в практических вопросах, так и научному сектору. В работе [2] авторы отмечают, что возможности 3D-печати способны обеспечить эволюцию форм с учетом топологических особенностей деталей.

Топологическая оптимизация активно используется для нахождения оптимального распределения материала по заготовке. Именно это позволяет воспроизводить сложные изделия, которые обычными методами получить невозможно, но позволяет изготавливать детали без создания технологической оснастки. Основным преимуществом следует выделить также творческую гибкость, которая требуется как дизайнерам, так и инженерам. В работе [3] авторы обобщили и выделили основные аспекты научных исследований, которые характерны для объединения топологической оптимизации и производства, применяющего технологию 3D-печати.

Следует отметить, что инженеры сталкиваются с рядом сложностей при применении технологии, например: проблема «критического угла» выступа, нарушение геометрии, перерасход материала, создание дополнительных поддержек, вынужденная постобработка, а также весьма ограниченные характеристики деталей, сниженные показатели долговечности, сложности в распределении материала и др.

Технологии постоянно совершенствуются, и указанные проблемы решаются как учеными, так и представителями производственного сектора. Это достигается путем совмещения поиска оптимальных вариантов, которые учитывают макроструктуру с учетом параметров микроструктуры (решеток). Применение

теории гомогенизации дает возможность сохранить структуру на микро- и макроуровнях [4]. В работе [5] авторы представили взаимосвязь «материал–структура–производительность». В частности, они получили зависимость характеристик лазерного спекания от траектории осаждения, что напрямую влияет на топологию изделия. Для разработки и производства самонесущих конструкций применяются методы функций уровня (Level-set), послойная фильтрация, оптимизация параметров сборки [6] и планирование траектории осаждения (deposition path planning) [7]. На основании анализа научных данных можно отметить, что использование комбинированного подхода (топологии и 3D-печати) показывает высокие результаты. Например, в экспериментальных исследованиях было достигнуто снижение массы деталей на 43–77% при сохранении требуемой несущей способности [8]. В аэрокосмической отрасли использование оптимизированных компонентов позволяет добиться снижения веса летательных аппаратов. В автомобилестроении была проведена оптимизация корпуса рулевой колонки гоночного автомобиля с использованием систем Siemens NX и последующей проверкой методом DMLS [9]. Для достижения высокой производительности, многофункциональности и легкости изделий необходимо рассматривать оптимизацию как комплексный процесс, объединяющий материал, структуру, технологический процесс и эксплуатационные характеристики [10].

Каждый из методов 3D-печати обладает обязательным этапом в технологическом процессе - обработка и подготовка 3D-модели для печати. Эта подготовка именуется термином «slicing», в ходе чего создается адаптивный для принтера G-код. Это целый комплекс обязательных мероприятий, необходимых, чтобы получить изделие от 3D-печати. Основные этапы зафиксированы в [11] и обозначены как: подготовка CAD-модели - разделение модели на слои - 3D-печать - финишная обработка.

Необходимо проверить геометрию на наличие дефектов, способных вызвать сбой печати. Чаще всего такие зоны отмечены серым цветом в модели или пропусками, но возможны и иные дефекты. Выполняя проверку, стоит обращать внимание на незамкнутые контуры, пересечения или перевернутые векторы в модели, наличие лишних граней. В специализированных программах, например, Cura, PrusaSlicer и др., встроены специализированные инструменты для автоматического исправления модели, но возможна и ручная доработка в иных программных продуктах, например, в Blender, Maya или SolidWorks.

Модель в формате STL разделяют на слои и располагают на виртуальном печатном столе оптимальным образом. Далее определяют наиболее подходящий масштаб модели и проверяют в программе для печати единицы измерения.

Печать выполнена на 3D-принтере Picaso. Принтер обладает подогреваемой камерой, которая позволяет печатать с учетом различных характеристик пластика и минимизировать усадку и искривление геометрии детали в ходе печати, что в дальнейшем может повлиять на кинематику. В процессе подготовки модели к 3D-печати выполнены настройки, в частности оптимизирована геометрия (рис. 1, а).



а) б)
Рисунок 1 – а) Техническое задание и б) рабочая область с размещенной деталью и информацией о печати

В ходе всего процесса изготовления проводился постоянный мониторинг печати (рис. 2).

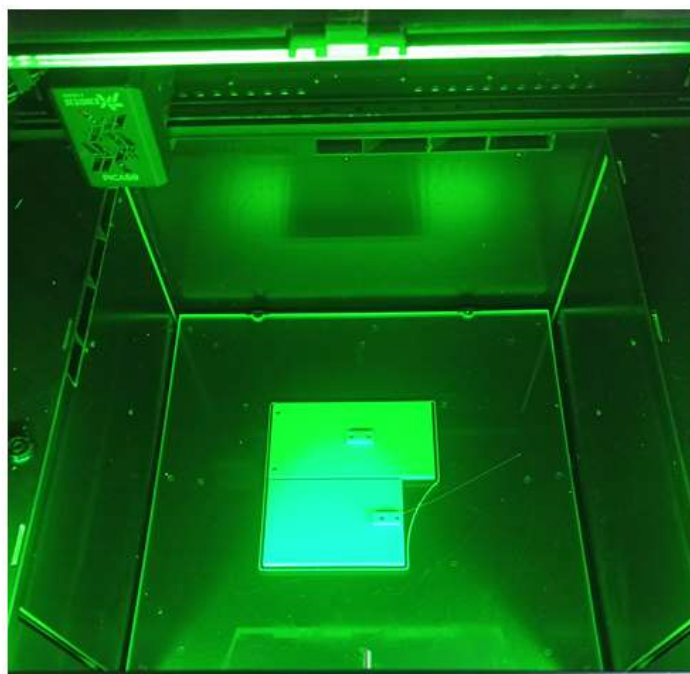


Рисунок 2 – Процесс печати

Это важно, так как любая неточность или сбой могли привести к потере материала и времени печати. Рабочая область с размещенной деталью и информацией о печати представлена на рис. 1, б.

Изделия из пластика обладают отличительной особенностью по сравнению с литьем – фактором шероховатой верхней поверхности.

В ходе рабочего процесса нить пластика направляется в разогретый экструдер 3D-принтера, при помощи моторов продавливается и уже через сопло выходит в виде расплавленного пластика, который слоями наносится на основание рабочей области печати и мгновенно застывает. Таким образом, мы получаем модель изделия [12]. Этот метод широко распространен из-за своей гибкости и адаптивности, но обладает и рядом недостатков. В части самой печати технология ограничена по «нависающим» элементам: если угол отклонения модели от стола достаточно велик, геометрия модели сильно изменяется, что

критично в инженерной печати. Также невозможно печатать в удалении от стола, что потребует «поддержек» – искусственных конструкций или тех же дополнительных отпечатков – увеличивающих время и расход материала. Ряд пластиков требователен к параметрам печати, к параметрам окружающей среды и к качеству самого печатного материала, что зачастую вызывает сбои в печати, тем самым увеличивая время печати, снижая качество изделий и вызывая иные проблемы, которые зачастую проявляются на начальных этапах, тем самым значительно повышая значимость ошибки технологии.

В рамках проекта исследование рабочих процессов, который наиболее близок к инженерным задачам, выбор был сделан на технологию FDM, с помощью которой созданы рабочие детали лесохозяйственной грунтометальной машины в масштабе для проведения экспериментов.

Лабораторное оборудование для выполнения испытаний создано согласно ГОСТ 11262-2017 «Пластмассы. Метод испытания на растяжение» [10, 13], на принтере Picaso по технологии FDM из пластика ABS+ с дополнительной обработкой (для создания коэффициента трения грунта о металл).

Проведенный анализ позволяет сделать вывод, что синергетический подход, объединяющий топологическую оптимизацию и аддитивные технологии, является высокоэффективным. С учетом развития технологий переход от традиционного проектирования к многомасштабному становится необходимым условием повышения функциональности и надежности изделий. Выполненные исследования показывают, что применение технологии FDM-печати материалом ABS+ в сочетании с цифровой подготовкой модели (slicing) позволяет обеспечивать требуемую геометрическую точность и контролировать топологические особенности, такие как критические углы нависания. Таким образом, топологическая оптимизация является ключевым этапом в цикле создания высокотехнологичных деталей методом 3D-печати.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда №25-19-00876, <https://rscf.ru/project/25-19-00876/>.

Список литературы

1. Zhu J. et al. A review of topology optimization for additive manufacturing: Status and challenges // Chinese Journal of Aeronautics, 2021, vol. 34, no. 1, pp. 91–110.
2. Liu J., Gaynor A.T., Chen S., Kang Z., Suresh K., To A.C. et al. Current and future trends in topology optimization for additive manufacturing // Structural and Multidisciplinary Optimization, 2018, vol. 57, no. 6, pp. 2457–2483.
3. Langelaar M. Topology optimization of 3D self-supporting structures for additive manufacturing // Additive Manufacturing, 2016, vol. 12, pp. 60–70.
4. Wang C., Zhu J., Zhang W., Li S., Kong J. Concurrent topology optimization design of structures and non-uniform parameterized lattice microstructures // Structural and Multidisciplinary Optimization, 2018, vol. 58, no. 1, pp. 35–50.

5. Gu D., Shi X., Poprawe R., Bourell D.L., Setchi R., Zhu J. Material-structure-performance integrated laser-metal additive manufacturing // *Science*, 2021, vol. 372, no. 6545.
6. Sedláček F., Kalina T., Štěpánek M. Optimization of Components with Topology Optimization for Direct Additive Manufacturing by DMLS // *Materials*. - 2023. - Vol. 16, No. 15. - Article 5422. - DOI: 10.3390/ma16155422.
7. Liu J., To A.C. Deposition path planning-integrated structural topology optimization for 3D additive manufacturing subject to self-support constraint // *Computer-Aided Design*. – 2017. – Vol. 91. – pp. 27-45.
8. Anh N. T., Quynh N. X., Tung T. T. Study on topology optimization design for additive manufacturing // *Engineering, Technology & Applied Science Research*. – 2024. – Vol. 14. – No. 3. – pp. 14437-14441.
9. Sedlacek F., Kalina T., Stepanek M. Optimization of components with topology optimization for direct additive manufacturing by DLMS // *Materials*. – 2023. – Vol. 16. – No. 15. – pp. 5422.
10. Турченко М. В., Гончарова Ю. А., Касимов Р. М. Исследование прочности 3D-печатных изделий при варьировании технологических параметров в процессе печати // *Агроинженерия*. – 2023. – Т. 25. – №. 2. – С. 46-51.
11. Применение математического моделирования в аддитивных технологиях для топологической оптимизации // *Научноёмкие технологии в машиностроении*, 2025, № 4.
12. Слюсар В.И. Фаббер-технологии: сам себе конструктор и фабрикант. Конструктор. - 2002. / *Электроника: наука, технология, бизнес*. - 2003. / *Вокруг света*. - № 1 (2008).
13. Ермакова В.А. и др. Исследование прочностных характеристик изделий, полученных методом 3D-печати из PLA // *Наука и техника*. – 2022. – Т. 21. – №. 2. – С. 107-113.

References

1. Zhu J. et al. A review of topology optimization for additive manufacturing: Status and challenges // *Chinese Journal of Aeronautics*, 2021, vol. 34, № 1, pp. 91–110.
2. Liu J., Gaynor A.T., Chen S., Kang Z., Suresh K., To A.C. et al. Current and future trends in topology optimization for additive manufacturing // *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 2018, vol. 57, № 6, pp. 2457–2483.
3. Langelaar M. Topology optimization of 3D self-supporting structures for additive manufacturing // *Additive Manufacturing*, 2016, vol. 12, pp. 60–70.
4. Wang C., Zhu J., Zhang W., Li S., Kong J. Concurrent topology optimization design of structures and non-uniform parameterized lattice microstructures // *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 2018, vol. 58, № 1, pp. 35–50.
5. Gu D., Shi X., Poprawe R., Bourell D.L., Setchi R., Zhu J. Material-structure-performance integrated laser-metal additive manufacturing // *Science*, 2021, vol. 372, № 6545,

6. Sedláček F., Kalina T., Štěpánek M. Optimization of Components with Topology Optimization for Direct Additive Manufacturing by DMLS // *Materials*. – 2023. – Vol. 16, № 15. – Article 5422. – DOI: 10.3390/ma16155422.
7. Liu J., To A.C. Deposition path planning-integrated structural topology optimization for 3D additive manufacturing subject to self-support constraint // *Computer-Aided Design*. – 2017. – Vol. 91. – pp. 27-45.
8. Anh N.T., Quynh N.X., Tung T.T. Study on topology optimization design for additive manufacturing // *Engineering, Technology & Applied Science Research*. – 2024. – Vol. 14. – № 3. – pp. 14437-14441.
9. Sedlacek F., Kalina T., Stepanek M. Optimization of components with topology optimization for direct additive manufacturing by DLMS // *Materials*. – 2023. – Vol. 16. – № 15. – pp. 5422.
10. Turchenko M.V., Goncharova Yu.A., Kasimov R.M. Investigation of the strength of 3D-printed products under varying technological parameters during the printing process // *Agroengineering*, 2023, vol. 25, № 2, pp. 46–51.
11. Application of mathematical modeling in additive technologies for topology optimization // *High-Tech Technologies in Mechanical Engineering*, 2025, № 4.
12. Slyusar V.I. Fabber-technologies: Being your own designer and manufacturer // *Konstruktor*, 2002 / *Electronics: Science, Technology, Business*, 2003 / *Vokrug Sveta [Around the World]*, № 1 (2008).
13. Ermakova V.A. et al. Investigation of the strength characteristics of products obtained by 3D printing from PLA // *Science and Technology*, 2022, vol. 21, № 2, pp. 107–113.

**РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ
ДИНАМИЧЕСКОЙ НАГРУЖЕННОСТИ ЛЕСНОГО МАНИПУЛЯТОРА
ПРИ АВАРИЙНОМ СБРОСЕ ГРУЗА**

Дорняк О.Р., Попиков С.К.

*Воронежский государственный лесотехнический университет
имени Г.Ф. Морозова, Воронеж, Россия*

**RESULTS OF EXPERIMENTAL STUDIES OF THE DYNAMIC LOADING
OF A FORESTRY MANIPULATOR DURING EMERGENCY LOAD
RELEASE**

Dornyak O.R., Popikov S.K.

*Voronezh State University of Forestry and Technologies
named after G.F. Morozov, Voronezh, Russia*

Аннотация: В работе дан анализ результатов экспериментальных исследований динамики гидропривода лабораторного стенда с гидроманипулятором ЛВ-210-01 с новым демпфирующим устройством при аварийном сбросе груза для предотвращения опрокидывания сортиментовоза в поперечной плоскости при погрузке сортиментов. Установлено, что среднестатистическое значение коэффициента динамичности снижается примерно на 11-12%.

Abstract: The paper analyzes the results of experimental studies of the dynamics of the hydraulic drive of a laboratory test bench with a hydraulic manipulator LV-210-01 with a new damping device during emergency load release to prevent lateral tipping of a log truck when loading logs. It was established that the statistical average value of the dynamic factor decreases by approximately 11–12%.

Ключевые слова: лесотранспортная машина, гидроманипулятор, механизм подъема стрелы, демпфирующее устройство.

Keywords: timber transport machine, hydraulic manipulator, boom lifting mechanism, damping device.

Использование лесозаготовительной техники на склонах повышает риски аварийных ситуаций, а также может приводить к ухудшению технического состояния лесных машин и повышенному износу гидравлического оборудования [1]. Известно, что сброс сортимента, позволяющий сохранить устойчивость машины, может приводить к существенным перегрузкам гидропривода исполнительного механизма как при механическом, так и при автоматическом управлении. Теоретическому исследованию динамических процессов в гидроприводах лесных машин посвящены работы [2-5].

В патенте [6] предложено демпфирующее устройство, которое решает задачу снижения динамической нагруженности гидропривода грузоподъемного механизма при различных положениях стрелы.

В данной работе представлены результаты экспериментального исследования динамической нагруженности гидропривода стрелы лесного манипулятора при осуществлении сброса сортимента. Рассмотрены различные варианты подключения демпфирующего устройства.

Для оценки динамической нагруженности лесного манипулятора и проверки влияния параметров демпфирующего устройства на снижение динамической нагруженности грузоподъемного механизма при аварийном сбросе сортимента на базе серийного гидроманипулятора ЛВ-210-01 изготовлена лабораторная установка (рис. 1). В гидросистему включено демпфирующее устройство, а также контрольно-измерительные приборы, в числе которых устройство для измерения угла подъема стрелы, датчики давления ZET 315 (BC 315), манометры. Сигнал от датчиков давления регистрируется и обрабатывается тензометрической системой ZET 058 с шагом по времени 0,1 с.



Рисунок 1 – Лабораторная установка на базе серийного гидроманипулятора ЛВ-210-01.

Гидравлические характеристики привода при различных регулировочных положениях дросселей демпфирующего устройства исследованы для следующих режимов: подъем стрелы с грузом, остановка стрелы с грузом, сброс груза, опускание стрелы без груза. Для каждого регулировочного положения дросселей эксперимент проводился с тремя повторениями.

Для всех режимов зафиксированы высокочастотные колебания давления рабочей жидкости в гидроцилиндре стрелы. Характерный график изменения давления в гидроцилиндре стрелы при сбросе сортимента представлен на

рис. 2. График демонстрирует недостаточную точность измерения пиков давления, что подтвердилось при статической обработке данных полученных в результате опытов. Поэтому статистическая обработка опытов проведена для огибающих колебаний давления (верхней и нижней).

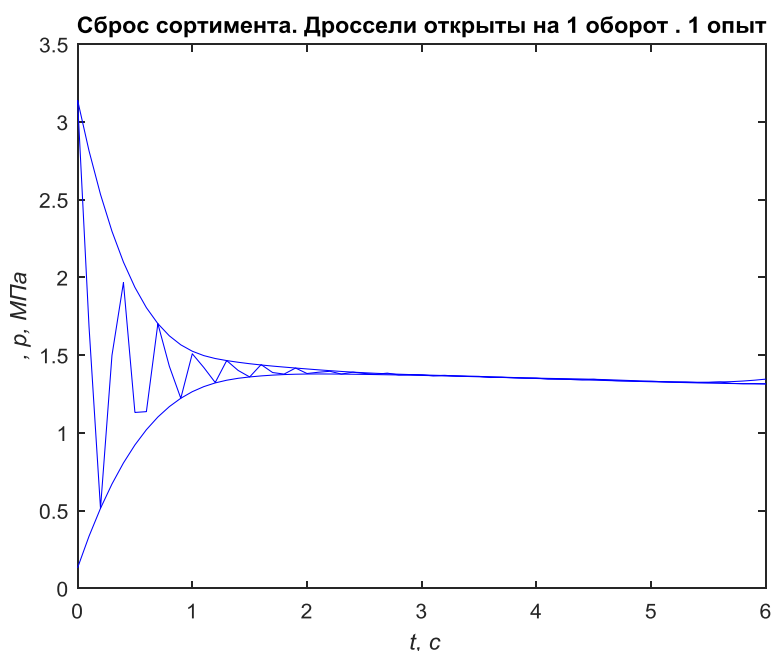


Рисунок 2 – График изменения давления в гидроцилиндре стрелы с огибающими при сбросе сортифта в опыте с дросселями, открытыми на 1 оборот.

Установлено, что число воспроизводимых дисперсий для верхней огибающей пиков давления максимально в четырех сериях из пяти. Для нижней огибающей пиков давления, в целом не влияющих на работоспособность гидропривода, воспроизводимость опытов обоснована, начиная с момента времени $t < 1$ с. Экспериментальные результаты воспроизводимы с вероятностью $p = 95\%$. Относительная случайная квадратичная погрешность в опытах для максимальных пиков давления не превышает 12,1%, а для минимальных пиков – 19%.

В качестве характеристики динамической нагруженности гидросистемы манипулятора используется коэффициент динамичности. Величина коэффициента динамичности равна отношению максимального пика давления в гидроцилиндре стрелы при мгновенной разгрузке к установившемуся давлению при данном режиме.

Расчет коэффициента динамичности в режиме мгновенной разгрузки манипулятора при сбросе сортифта показал, что применение дросселей для регулирования пульсаций давления рабочей жидкости в гидроцилиндре стрелы, позволяет снизить его значение примерно на 11-12% (рис. 3).

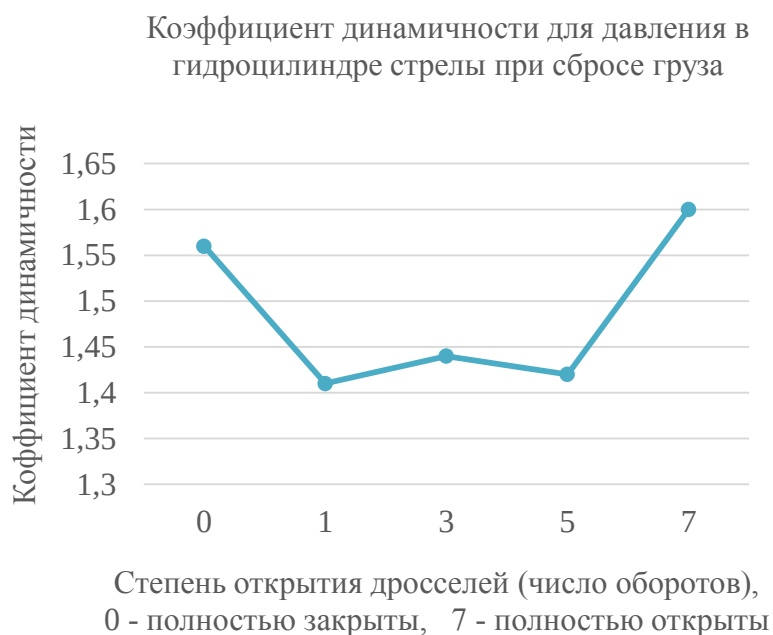


Рисунок 3 – Влияние степени открытия дросселей на коэффициент динамичности для давления в гидроцилиндре стрелы при сбросе груза

Выводы:

1. Спроектирован и создан лабораторный стенд для исследования динамической нагруженности гидропривода стрелы лесного манипулятора.
2. Проведены эксперименты по измерению зависимостей давления рабочей жидкости в поршневой и штоковой полостях гидроцилиндра при различных регулировочных положениях дросселей демпфирующего устройства в режимах подъема стрелы с грузом, остановки стрелы с грузом, сброса груза, опускания стрелы без груза.
3. Эксперименты подтвердили, что подключение разработанного демпфирующего устройства понижает величину максимальных пиков давления рабочей жидкости в гидроцилиндре стрелы. При этом значение коэффициента динамичности снижается на 11-12%.
4. Применение предложенной модифицированной системы гидропривода повышает эффективность погрузочно-разгрузочных работ в лесном комплексе за счет возможности реализации аварийного сброса сортифта при значениях пикового давления рабочей жидкости в пределах допустимого.

Список литературы

1. Современные системы машин и технологии заготовки древесины и лесовосстановления в условиях горных лесосек / В.А. Каляшов, А.До Туан, Е.Г. Хитров [и др.] // Resources and Technology. – 2022. – Т. 19, № 2. – С. 1-47. – DOI: 10.15393/j2.art.2022.6163.
2. Анализ работы гидравлического манипулятора лесной машины с цикловой системой управления / Е.Н. Власов, А.В. Сергеевичев, Ю.А. Добрынин [и

др.]// Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. – 2022. – № 238. – С. 99-112. – DOI: 10.21266/2079-4304.2022.238.99-112.

3. Патент № 2780834 С1 Российская Федерация, МПК А01G 23/02, В66С 1/68. Манипулятор лесохозяйственной машины: № 2022111654: заявл. 28.04.2022: опубл. 04.10.2022 / А.А. Платонов, М.В. Драпалюк, Р.В. Юдин, С.В. Зимарин; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова».

4. Моделирование работы механизма поворота колонны манипулятора автосортиментовоза с учетом объемной жесткости энергосберегающего гидропривода / А.Т. Рыбак, П.И. Попиков, Д.Ю. Дручинин [и др.] // Лесотехнический журнал. – 2024. – Т. 14, № 2(54). – С. 280-294. – DOI: 10.34220/issn.2222-7962/2024.2/16.

5. Динамическое нагружение элементов гидравлической системы манипулятора лесотранспортной машины при выравнивании рамы опорно-поворотного устройства / О.Р. Дорняк, Л.В. Маркова, П.В. Танчук [и др.] // Лесотехнический журнал. – 2024. – Т. 14, № 2(54). – С. 168-187. – DOI: 10.34220/issn.2222-7962/2024.2/10.

6. Патент № 2789167 С1 Российская Федерация, МПК В66С 13/42. Гидропривод грузоподъемного механизма лесного манипулятора : № 2022119768 : заявл. 19.07.2022 : опубл. 30.01.2023 / П.И. Попиков, А.С. Черных, Д.С. Богданов [и др.]; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова».

References

1. Modern systems of machines and technologies for timber harvesting and reforestation in mountain cutting areas / V.A. Kalyashov, A.Do Tuan, E.G. Xitrov [et al.] // Resources and Technology. – 2022. – Vol. 19, № 2. – pp. 1-47. – DOI: 10.15393/j2.art.2022.6163.

2. Analysis of the operation of a hydraulic manipulator of a forest machine with a cyclic control system / E.N. Vlasov, A.V. Sergeevichev, Yu.A. Dobry'nin [et al.] // Proceedings of the Saint Petersburg Forestry Academy. – 2022. – № 238. – pp. 99–112. – DOI: 10.21266/2079-4304.2022.238.99-112.

3. Patent № 2780834 C1 Russian Federation, IPC A01G 23/02, B66C 1/68. Forestry machine manipulator: № 2022111654 : filed 28.04.2022 : published 04.10.2022 / A.A. Platonov, M.V. Drapalyuk, R.V. Yudin, S.V. Zimarin ; applicant Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov».

4. Modeling of the operation of the slewing mechanism of the manipulator column of a log truck taking into account the volumetric stiffness of an energy-saving hydraulic drive / A.T. Ry'bak, P.I. Popikov, D.Yu. Druchinin [et al.] // Forestry Engineering Journal. – 2024. – Vol. 14, № 2(54). – pp. 280-294. – DOI: 10.34220/issn.2222-7962/2024.2/16.

5. Dynamic loading of elements of the hydraulic system of a manipulator of a forest transport machine during leveling of the frame of the slewing ring device / O.R. Dornyak, L.V. Markova, P.V. Tanchuk [et al.]// Forestry Engineering Journal. – 2024. – Vol. 14, № 2(54). – pp. 168-187. – DOI 10.34220/issn.2222-7962/2024.2/10.

6. Patent № 2789167 C1 Russian Federation, Int. Cl. B66C 13/42. Hydraulic drive of the load-lifting mechanism of a forest manipulator : № 2022119768 : filed 19.07.2022 : published 30.01.2023 / P.I. Popikov, A.S. Cherny'x, D.S. Bogdanov [et al.]; applicant Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Voronezh State Forestry University named after G.F. Morozov».

ПЕРСПЕКТИВЫ И ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ БЕСПИЛОТНЫХ КОЛЁСНЫХ И ГУСЕНИЧНЫХ МАШИН ПРИ ВЫПОЛНЕНИИ ЛЕСОХОЗЯЙСТВЕННЫХ РАБОТ

Клубничкин В.Е., Клубничкин Е.Е., Кузнецов Д.К.

Мытищинский филиал МГТУ им. Н. Э. Баумана, Мытищи, Россия

PROSPECTS AND FEATURES OF THE USE OF UNMANNED WHEELED AND TRACKED VEHICLES IN FORESTRY OPERATIONS

Klubnichkin V.E., Klubnichkin E.E., Kuznetsov D.K.

Mytishchi Branch of Bauman Moscow State Technical University, Mytishchi, Russia

Аннотация: Рассмотрены лесохозяйственные мероприятия и техника для лесовосстановления, ухода за лесами и защиты от пожаров. Показаны перспективы перехода лесного комплекса к беспилотным колёсным и гусеничным машинам. Определены их преимущества: исключение оператора из опасных зон, круглосуточная работа и снижение затрат. Выявлены вызовы: высокая стоимость, зависимость от связи и навигации, потребность в инфраструктуре и кадрах.

Abstract: Reviewed forestry measures and machinery for reforestation, forest maintenance, and fire protection. The prospects for the transition of the forestry sector to unmanned wheeled and tracked vehicles are shown. Their advantages are identified: removing the operator from hazardous zones, round-the-clock operation, and reduced costs. The challenges are identified: high cost, dependence on communications and navigation, and the need for infrastructure and personnel.

Ключевые слова: лесовосстановление, уход за лесами, защита от пожаров, беспилотные машины, лесной комплекс

Keywords: reforestation, forest maintenance, fire protection, unmanned vehicles, forestry sector.

Лесохозяйственные мероприятия представляют собой комплекс организационно-технических работ, направленных на повышение продуктивности и устойчивости лесов, выполнение ими экологических функций, а также на рациональное использование лесных ресурсов. В состав этих мероприятий входят лесовосстановление, уход за лесами, охрана от пожаров, вредителей и болезней, а также лесоустройство. Техническая реализация большинства из них базируется на использовании тракторов различного тягового класса и специализированного навесного оборудования, выбор которых определяется типом работ, почвенно-климатическими условиями и особенностями участка [1, 2, 3].

На этапе подготовительных работ и обработки почвы основными задачами являются создание борозд, рыхление, удаление дернового покрова и подготовка

посадочных мест. Для этого применяются тракторы тяговых классов 1,4 и 3. Колесные модели, такие как МТЗ-80, МТЗ-82 и ЛТЗ-60А, экономичны и маневренны, однако эффективны лишь на лёгких почвах и участках без пней. Гусеничные тракторы (ТДТ-55, ЛХТ-100) незаменимы на переувлажнённых и захламлённых вырубках благодаря высокой проходимости и лучшему сцеплению с грунтом. Среди навесных орудий ключевое место занимают лесные плуги, в первую очередь ПКЛ-70, который формирует борозду шириной 70 см и минерализованную полосу 1,4 м, а также ПЛ-1 для дренированных почв (рис. 1а). Для первичной обработки применяются дисковые бороны (БДН-3.0, БДТ-3.0), покровосдиратели (ПЛ-1.2, ПДН-1) используются на горячих и свежих вырубках, шнековые фрезы (ФЛШ-1.2) создают микроповышения на переувлажнённых участках, а культиваторы (КЛБ-1.7) служат для доработки борозд и рыхления дна.

Для механизированной посадки лесных культур в качестве тяговой базы выступают как колесные (МТЗ-80/82, ДТ-75, Т-150), так и гусеничные тракторы (ТДТ-55, ЛХТ-100, «Онежец»). Непосредственно высадка сеянцев выполняется с помощью универсальных лесопосадочных машин (рис. 1б), например МЛУ-1 и МЛУ-1А, а в питомниках для посева сыпучих семян используются сеялки типа СЛП-5.

Уход за лесными культурами включает рыхление почвы, уничтожение сорняков, внесение удобрений и осветление посадок. Для этих работ применяются те же тракторные базы, а основным оборудованием выступают культиваторы различных типов. Культиватор КЛБ-1,7 предназначен для обработки дна плужных борозд на глубину 5–15 см, ротационный КРЛ-1М эффективен в рядах культур высотой до 1 м с глубиной обработки 3–8 см, а боковой КБЛ-1А используется для полезащитных насаждений с глубиной рыхления 8–10 см. Для осветления и удаления нежелательной древесно-кустарниковой растительности применяются дисковые кусторезы (КРТ-1Б) и катки-осветлители (КОК-2, КОЛК-2). Химическая обработка гербицидами и внесение жидких удобрений осуществляются навесными штанговыми опрыскивателями (ОНШ-600), также используются разбрасыватели минеральных удобрений. Вспомогательные агрегаты, такие как мульчирователи (МСБ-02), бороны и катки, применяются для предпосевной подготовки и покрытия посевов в питомниках (рис. 1в).

Лесозащитные и противопожарные мероприятия требуют специализированной техники, разделяемой на средства создания заградительных преград и средства активного тушения. Для нарезки минерализованных полос и противопожарных разрывов используются лесные плуги (ПКЛ-70А, ПЛК-2А, ПЛ-1), фрезерные полосопрокладыватели с шириной захвата до 8–10 м, грунтометы (ГТ-3), создающие полосу до 25 м и одновременно тушащие кромку пожара (рис. 1г), а также канавокопатели (ПКЛН-500А, ЛКН-600) и бульдозерные отвалы с мульчерами для расчистки просек. Для тушения пожаров применяются тяжёлые лесопожарные агрегаты на гусеничном ходу (ЛПА-521, ЛПМ-2, МТ-ЛБу-ГПМ-10) с ёмкостями для воды до 5 тонн, насосным оборудованием и средствами связи, а также лёгкие агрегаты (АЛП-0,2, АЛК-25) на базе тракторов, оснащённые воздуходувками, пеногенераторами и аппаратами для пуска встречного огня.



а)



б)



в)



г)

а) Плуг ПКЛ-70; б) Лесопосадочная машина МЛУ-1;

в) Мульчирователь МСБ-02; г) Грунтомет ГТ-3

Рисунок 1 – Машины агрегируемые

Таким образом, эффективность лесохозяйственных мероприятий достигается за счёт дифференцированного подхода к выбору тяговой техники и навесного оборудования на каждом технологическом этапе. Правильное агрегирование тракторов различных классов со специализированными орудиями позволяет адаптировать технологические процессы к конкретным лесорастительным условиям, обеспечивая как продуктивность работ, так и сохранность лесных экосистем.

На сегодняшний день все отчетливее наблюдается устойчивая тенденция перехода агропромышленного комплекса к специализированным роботизированным платформам (рис. 2 а, б). В карьерной и строительной отраслях вектор развития смещен в сторону тяжелых беспилотных самосвалов, как шарнирно-сочлененных, так и специализированных компактных моделей (рис. 2 д, е). Лесной комплекс не остается в стороне и направление, связанное с применением беспилотных машин, становится более перспективным (рис. 2 в, г) [4]. Ключевым здесь выступает необходимость повышения безопасности труда за счет исключения человека из опасных зон и стремление к круглосуточной эксплуатации техники для максимизации производительности.



а)



б)



в)



г)



д)



е)

а, б – сельское хозяйство; в, г – лесной комплекс; д, е – карьерная техника
Рисунок 2 – Применение беспилотных машин в отраслях народного хозяйства:

Объединяющей технической чертой всех представленных решений является отказ от классических кабин в пользу дистанционного управления или полной автономии на базе сенсорных систем [5]. Наблюдается повсеместный переход к электрическим или гибридным силовым установкам, что снижает эксплуатационные затраты и воздействие на окружающую среду.

К ключевым преимуществам беспилотной техники относится исключение оператора из зон с повышенным риском, что напрямую снижает травматизм. Кроме того, обеспечивается возможность круглосуточной работы без потери производительности, а повышенная точность позиционирования и выполнения операций минимизирует ошибки и долгосрочно снижает затраты на топливо и расходные материалы. Основные вызовы связаны с высокой первоначальной стоимостью сенсорного комплекса и самой машины, критической зависимостью от качества связи и навигации (включая устойчивость к глушению и рельефу), а также необходимостью создания новой инфраструктуры и подготовки квалифицированных кадров для обслуживания роботизированных комплексов. Отдельно стоит вопрос кибербезопасности и безопасного доступа к системам управления.

Для автономной навигации применяется мультисенсорная fusion-система, включающая лидары, радары, камеры и GNSS-приемники [6]. Ключевыми техническими параметрами таких систем являются: дальность действия, точность определения координат (сантиметровая при RTK-режиме), угол обзора, частота сканирования и разрешение камер [7]. Эти параметры определяют способность машины распознавать статические и динамические препятствия, строить карту местности и прокладывать маршрут в реальном времени.

Эффективная беспилотная работа требует создания наземной инфраструктуры. В первую очередь это базовая станция для усиления сигналов высокоточного позиционирования (RTK/PPP) и связи. Для обеспечения устойчивого канала управления в сложных условиях (лес, пересеченная местность) используются мобильные базовые станции на БПЛА или развертывание локальных сетей 5G/Private LTE. Рабочее место оператора может быть реализовано в трех

вариантах: мобильное (размещение в транспортном средстве сопровождения), стационарное (бытовка или пункт управления на краю участка) или полностью удаленное (офис в ближайшем населенном пункте) с выводом телеметрии и видеопотока.

Именно такая гибкость в организации рабочего места позволяет решить одну из наиболее острых проблем современной промышленности – нехватку молодых кадров для тяжелых и монотонных работ. Традиционно лесозаготовки, лесное и сельское хозяйство, а также карьерная добыча ассоциировались у молодых специалистов с физическим трудом, длительным нахождением в удалении от городов и низким уровнем комфорта, что приводило к оттоку молодежи из отрасли. Перевод оператора из кабины в офис или мобильный пункт управления кардинально меняет характер труда: вместо многочасового вождения техники или управления манипулятором в лесу специалист занимается мониторингом телеметрии, анализом данных и принятием решений в цифровой среде. Это смещает требования к кандидату с физической выносливости на навыки работы с программным обеспечением, сенсорными системами и алгоритмами – компетенции, которые близки и понятны молодому поколению. Возможность работать из офиса в ближайшем населенном пункте или даже удаленно из крупного города, сохраняя при этом высокую производительность участка, делает профессию оператора беспилотной техники привлекательной для молодежи и способствует закреплению кадров в отрасли. Таким образом, инфраструктурные решения по организации рабочего места выступают не только техническим, но и социальным инструментом кадрового обновления промышленности.

Вывод

Таким образом, применение беспилотных колесных и гусеничных машин в лесном хозяйстве является перспективным направлением. Оно позволяет решить проблему безопасности и нехватки кадров для тяжелых и монотонных работ.

Внедрение требует комплексного подхода: адаптации существующих технологий, разработки специализированного оборудования и создания соответствующей инфраструктуры связи и управления.

Дальнейшие исследования должны быть направлены на оптимизацию технологических схем и экономическое обоснование таких решений.

Список литературы

1. Бартенев И.М. Система машин в лесном хозяйстве: учебное пособие / И. М. Бартенев, Р.В. Юдин; М-во образования и науки РФ, ФГБОУ ВО «ВГЛТУ». – Воронеж, 2018. – 213 с.
2. Технологии применения машин и оборудования в лесном комплексе: учебник / И. М. Бартенев; М-во науки и высшего образования РФ, ФГБОУ ВО «ВГЛТУ». – Воронеж, 2021. – 219 с.
3. Гончаров П.Э. Машины и механизмы лесного и лесопаркового хозяйства: учебное пособие / П.Э. Гончаров, И.М. Бартенев, М.В. Драпалюк; М-во образования и науки РФ, ФГБОУ ВО «ВГЛТУ». – Воронеж, 2016 – 196 с.

4. Рогачев Д.И. Развитие Отечественной робототехники в лесной отрасли / Д.И. Рогачев, И.В. Козлов // Студенческий вестник. – 2020. – № 1-6(99). – С. 22-23.

5. Клубничкин В.Е. Автоматизация технологических процессов лесозаготовительной машины / В.Е. Клубничкин, Е.Е. Клубничкин, Д.И. Рогачев // Научно-технический вестник Поволжья. - 2021. - № 12. - С. 114-117.

6. Клубничкин В.Е. Коллаборативная технология трелевки древесины / В.Е. Клубничкин // В сборнике: Современный лесной комплекс страны: проблемы и тренды развития. Материалы Всероссийской научно-практической конференции. Отв. редактор А.А. Платонов. Воронеж, 2022. С. 26-31.

7. Клубничкин В.Е. Формирование облика гусеничных беспилотных трелевочных машин / В.Е. Клубничкин // Материалы XX Международной научно-технической конференции. «Актуальные проблемы развития лесного комплекса» Вологда: ВГУ, 2022. С. 287-291.

References

1. Bartenev I.M. The system of machines in forestry: a textbook / I.M. Bartenev, R.V. Yudin; Ministry of Education and Science of the Russian Federation, VSUFT. – Voronezh, 2018. – 213 p.

2. Technologies for the use of machines and equipment in the forestry complex: a textbook / I.M. Bartenev; Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, VSUFT. – Voronezh, 2021. – 219 p.

3. Goncharov P.E. Machines and mechanisms of forestry and forest park management: a textbook / P.E. Goncharov, I.M. Bartenev, M.V. Drapalyuk; Ministry of Education and Science of the Russian Federation, VSUFT. – Voronezh, 2016 – 196 p.

4. Rogachev D.I. Development of domestic robotics in the forest industry / D.I. Rogachev, I.V. Kozlov // Studencheskiy vestnik. – 2020. – № 1-6(99). – pp. 22-23.

5. Klubnichkin V.E. Automation of technological processes of a logging machine / V.E. Klubnichkin, E.E. Klubnichkin, D.I. Rogachev // Scientific and Technical Bulletin of the Volga region. - 2021. - № 12. - pp. 114-117.

6. Klubnichkin V.E. Collaborative technology of wood skidding / V.E. Klubnichkin // In the collection: The modern forest complex of the country: problems and development trends. Materials of the All-Russian scientific and practical conference. Editor-in-chief A.A. Platonov. Voronezh, 2022. pp. 26-31.

7. Klubnichkin V.E. Formation of the appearance of tracked unmanned skidding machines / V.E. Klubnichkin // Proceedings of the XX International Scientific and Technical Conference. «Actual problems of the development of the forest complex» Vologda: VSU, 2022. pp. 287-291.

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И АППАРАТЫ ПОЛУЧЕНИЯ БИОДИЗЕЛЬНОГО ТОПЛИВА: АНАЛИЗ РАЗРАБОТОК И ПРОГНОЗ РАЗВИТИЯ

Мещеряков А.А., Шевцов А.А., Сердюкова Н.А.

*Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина»,
Воронеж, Россия*

TECHNOLOGICAL PROCESSES AND EQUIPMENT FOR BIODIESEL PRODUCTION: DEVELOPMENT ANALYSIS AND OUTLOOK

Meshcheryakov A.A., Shevtsov A.A., Serdyukova N.A.

*Military Education and Scientific Centre of the Air Force N.E. Zhukovsky
and Y.A Gagarin Air Force Academy, Voronezh, Russia*

Аннотация. Рассмотрены основные технологические стадии получения биодизельного топлива из масел и жиров: подготовка сырья, дозирование реагентов, проведение трансэстерификации, разделение фаз, удаление спирта, очистка и осушка продукта. Проанализированы функции ключевых аппаратов и факторы, определяющие устойчивость технологического процесса. Особое внимание уделено разработкам технологических линий и способов получения биодизеля в сверхкритических условиях. Представлено качественное сопоставление технологических маршрутов и сформулирован сценарный прогноз развития аппаратного оформления.

Abstract. The main technological stages of obtaining biodiesel fuel from oils and fats are considered: preparation of raw materials, dosing of reagents, transesterification, phase separation, alcohol removal, purification and drying of the product. The functions of key devices and factors determining the stability of the technological process were analyzed. Particular attention is paid to the development of production lines and methods for producing biodiesel under supercritical conditions. A qualitative comparison of technological routes is presented and a scenario forecast for the development of hardware design is formulated.

Ключевые слова: биодизельное топливо, трансэстерификация, сверхкритический процесс, реактор, разделение фаз, технологическая линия

Keywords: biodiesel, transesterification, supercritical process, reactor, phase separation, process line.

Биодизельное топливо относится к альтернативным жидким топливам, получаемым из возобновляемого органического сырья [7, 8], в частности, в лесном хозяйстве (рис. 1). Однако, в качестве исходных компонентов могут использоваться также растительные масла, животные жиры и некоторые виды отработанных

ного жирового сырья. Интерес к развитию данной технологии обусловлен необходимостью расширения сырьевой базы моторных топлив, повышения эффективности использования биомассы и разработки технологических решений, позволяющих получать топливные продукты с заданными эксплуатационными характеристиками. Вместе с тем получение биодизеля представляет собой многостадийный физико-химический процесс, эффективность которого определяется не только свойствами исходного сырья, но и способом организации химической реакции, условиями тепло- и массообмена, качеством разделения реакционной смеси и полнотой очистки готового продукта.



Рисунок 1 – Схема получения биотоплива из древесного сырья

В отличие от простого использования растительных масел в качестве топлива, производство биодизеля предполагает целенаправленное изменение химического состава исходного сырья. Основным промышленно применяемым способом является переэтерификация триглицеридов спиртом с образованием сложных эфиров жирных кислот и глицерина. В качестве спирта преимущественно используется метанол, а для ускорения реакции могут применяться щелочные, кислотные или гетерогенные катализаторы. Выбор конкретного способа зависит от состава сырья, содержания свободных жирных кислот и воды, требований к качеству продукта и особенностей аппаратного оформления процесса [1, 2].

Технологическая схема производства биодизельного топлива включает (рис. 2) несколько взаимосвязанных стадий. На первом этапе осуществляется подготовка сырья, предусматривающая удаление механических примесей, снижение содержания влаги и, при необходимости, предварительную обработку для уменьшения кислотного числа. Далее выполняются дозирование спирта и катализатора, смешение реагентов и проведение реакции переэтерификации. Полученная реакционная смесь направляется на разделение, в ходе которого выделяется глицериновая фаза. После этого из эфирной фазы удаляются остаточный спирт, катализатор, мыла и другие примеси.



Рисунок 2 – Обобщённая технологическая цепочка получения биодизельного топлива

Завершающими операциями являются очистка и осушка биодизельного топлива, а также контроль его физико-химических показателей.

Технологическая последовательность показывает, что качество конечного продукта определяется совокупностью операций, а не только степенью превращения триглицеридов в реакторе. Недостаточная подготовка сырья может приводить к осложнению реакции и образованию устойчивых эмульсий. Нарушение режима дозирования реагентов способно вызвать неполное превращение исходных компонентов. Недостаточная эффективность разделения фаз увеличивает содержание глицерина и других примесей в эфирном продукте, а неполное удаление спирта и воды может ухудшать его эксплуатационные характеристики. Поэтому совершенствование производства биодизеля должно осуществляться как на уровне отдельных аппаратов, так и на уровне всей технологической линии.

Наиболее распространённая технология основана на щелочной переэтерификации растительного масла метанолом. Её применение связано с относительно умеренными температурой и давлением процесса, а также с возможностью использования традиционного химико-технологического оборудования. Реакция проводится при интенсивном перемешивании, необходимом для увеличения площади контакта между масляной и спиртовой фазами. Катализатор обеспечивает ускорение химического превращения, однако чувствительность процесса к содержанию воды и свободных жирных кислот предъявляет повышенные требования к подготовке сырья.

С точки зрения аппаратного оформления основным элементом такой технологии является реактор, обеспечивающий дозирование компонентов, смешение реагентов, поддержание заданной температуры и необходимое время пребывания реакционной смеси. В зависимости от производительности и организации процесса могут применяться аппараты периодического или непрерывного действия. В реакторах периодического действия технологические операции выполняются последовательно в одном аппарате, что упрощает изменение режима обработки, но требует организации циклов загрузки, реакции, выгрузки и подготовки оборудования. Непрерывные реакторные схемы позволяют организовать устойчивое движение потоков сырья и продуктов, однако предъявляют более высокие требования к равномерности подачи компонентов, стабильности режимов и согласованию производительности последующих стадий.

Особое значение имеет организация перемешивания. Поскольку исходное масло и спирт обладают ограниченной взаимной растворимостью, скорость химического превращения в начальный период процесса во многом определяется условиями межфазного массопереноса. Недостаточная интенсивность перемешивания может приводить к возникновению локальных зон с различным составом реакционной смеси. Чрезмерное увеличение интенсивности механического воздействия, в свою очередь, не должно рассматриваться как универсальный способ повышения эффективности: оно может сопровождаться ростом энергопотребления, образованием мелкодисперсных эмульсий и усложнением последующего разделения фаз. Следовательно, при проектировании реактора необходимо учитывать взаимосвязь геометрических характеристик аппарата, режима перемешивания, температуры и времени реакции.

После завершения переэтерификации реакционная смесь содержит эфиры жирных кислот, глицерин, остаточный спирт, катализатор и возможные побочные продукты. Для получения биодизельного топлива требуемого качества необходимо обеспечить разделение компонентов. На этой стадии применяются отстойные аппараты, сепараторы и другие устройства, в которых используются различия плотности и физико-химических свойств жидких фаз. Продолжительность разделения зависит от состава смеси, температуры, интенсивности предшествующего перемешивания и наличия поверхностно-активных примесей. Образование устойчивых эмульсий может снижать эффективность разделения и приводить к потерям целевого продукта.

Дальнейшая обработка эфирной фазы предусматривает удаление остаточного метанола, катализатора, мыл и воды. Для удаления летучих компонентов могут использоваться испарительные и вакуумные аппараты, а для очистки жидкой фазы – промывка, сорбционные методы или другие технологические решения. При выборе схемы очистки необходимо учитывать не только требуемую степень удаления примесей, но и возможность потерь эфиров, образования сточных вод и дополнительного расхода тепловой энергии. Поэтому перспективным направлением является разработка таких аппаратурных решений, которые обеспечивают необходимое качество продукта при сокращении числа последовательных операций и повышении согласованности режимов.

Важным направлением развития технологии является получение биодизеля в сверхкритических условиях. Данный подход предполагает проведение реакции при температуре и давлении, соответствующих сверхкритическому состоянию используемого спирта. Изменение физико-химических свойств реакционной среды может способствовать улучшению смешения реагентов и интенсификации химического превращения. При этом сверхкритическая технология предъявляет повышенные требования к конструкции оборудования, поскольку реактор и вспомогательные элементы должны обеспечивать работу при высоких температурах и давлениях.

В отличие от традиционной щелочной переэтерификации, сверхкритический процесс ориентирован на изменение условий взаимодействия сырья и реагента за счёт формирования особого состояния реакционной среды. Возможность сокращения отдельных операций, связанных с использованием катализатора, представ-

ляет технологический интерес, однако не означает автоматического устранения всех проблем очистки и разделения продуктов. Реальные преимущества такого процесса должны оцениваться с учётом характеристик исходного сырья, параметров реактора, времени пребывания, требований к материалам оборудования и особенностей последующей обработки полученной смеси [2, 3].

Сравнение традиционного и сверхкритического способов показывает, что они отличаются прежде всего требованиями к аппаратному оформлению и организации технологического режима. Щелочная технология использует сравнительно привычные реакторные системы и требует тщательного контроля качества сырья, дозирования катализатора и последующего разделения фаз. Сверхкритическая технология предполагает применение оборудования, рассчитанного на повышенные температуру и давление, и требует более сложного контроля параметров процесса. Поэтому выбор способа получения биодизеля должен основываться на комплексном анализе свойств сырья, технологических ограничений, качества целевого продукта и возможностей обеспечения безопасной эксплуатации оборудования.

Особый интерес в контексте совершенствования технологических линий и аппаратурных решений для производства биодизельного топлива представляют патентные решения, относящиеся к организации технологической линии, способу получения биодизеля и установке для его осуществления, а также к получению биодизельного топлива из растительного масла в сверхкритических условиях [4–6]. Эти разработки отражают переход от рассмотрения отдельных химических операций к проектированию взаимосвязанных технологических систем, в которых конструкция аппаратов должна обеспечивать согласованное выполнение последовательных стадий процесса.

Существенное значение при проектировании установки имеет согласование производительности отдельных аппаратов. Если реактор обеспечивает подачу продукта быстрее, чем система разделения способна обработать реакционную смесь, возникает накопление промежуточного продукта и нарушается непрерывность процесса. Аналогично недостаточная производительность узла удаления спирта или очистки может ограничивать работу всей линии. Следовательно, технологическая система должна рассматриваться как единый комплекс, включающий подготовку сырья, реакторный блок, систему разделения, узлы регенерации и очистки, а также средства контроля и управления.

Перспективным направлением совершенствования аппаратурного оформления является повышение интенсивности тепло- и массообмена при сохранении устойчивости последующих стадий разделения. Для этого могут исследоваться различные конструкции смесительных устройств, способы организации движения потоков, а также варианты тепловой интеграции между отдельными аппаратами. При этом конструктивные изменения должны оцениваться не изолированно, а с учётом влияния на весь технологический процесс. Например, повышение дисперсности реакционной смеси может улучшать контакт реагентов, но одновременно осложнять разделение фаз. Поэтому выбор параметров оборудования требует поиска согласованного технологического режима.

Дополнительные возможности связаны с автоматизацией контроля основных параметров процесса. Измерение температуры, давления, расхода сырья и реагентов, а также контроль характеристик промежуточных и конечных продуктов позволяют своевременно выявлять отклонения технологического режима. В перспективе такие системы могут дополняться алгоритмами прогнозирования, использующими данные о свойствах исходного сырья и текущем состоянии оборудования. Однако внедрение интеллектуальных средств управления должно опираться на достоверные экспериментальные зависимости и проверенные модели процесса, поскольку ошибки в оценке состава сырья или параметров реакции могут приводить к нарушению качества продукта.

На основе рассмотренных подходов можно сформулировать прогноз развития технологии получения биодизельного топлива (рис. 3). В ближайшей перспективе основное внимание, вероятно, будет уделяться совершенствованию традиционных технологических линий: повышению стабильности дозирования, оптимизации перемешивания, улучшению разделения фаз и снижению потерь целевого продукта при очистке. Данные направления не требуют обязательного перехода к принципиально новым химическим методам и могут рассматриваться как этап модернизации существующего аппаратного оформления.



Рисунок 3 – Сценарный прогноз развития аппаратного оформления производства биодизеля

В среднесрочной перспективе возможно расширение исследований интегрированных технологических схем, в которых отдельные стадии будут проектироваться с учётом взаимного влияния. Это предполагает согласование режимов реактора, разделительных аппаратов и систем удаления остаточного спирта, а также применение средств автоматизированного контроля. Развитие такого подхода может способствовать повышению устойчивости процесса и снижению зависимости качества конечного продукта от колебаний характеристик исходного сырья. При этом конкретные показатели эффективности должны подтверждаться экспериментально для каждой технологической схемы.

В более отдалённой перспективе представляется целесообразным исследование интенсифицированных процессов, включая сверхкритические методы, а также развитие цифровых моделей технологических аппаратов. Использование компьютерного моделирования может позволить предварительно оценивать

распределение температуры, движение потоков и влияние конструктивных параметров на работу оборудования. На этой основе возможно формирование виртуальных моделей отдельных аппаратов и технологических линий, предназначенных для сравнения инженерных решений до проведения полномасштабных испытаний. Вместе с тем расчётные результаты должны проходить проверку на экспериментальных данных и не могут рассматриваться как самостоятельное подтверждение промышленной готовности технологии.

Таким образом, совершенствование производства биодизельного топлива связано с комплексным развитием химико-технологических процессов, аппаратного оформления и систем управления. Традиционная переглицерификация сохраняет значение благодаря возможности организации процесса на основе распространённых типов оборудования, тогда как сверхкритические методы представляют направление дальнейших исследований, требующее специального аппаратного обеспечения. Разработки, связанные с технологическими линиями и установками получения биодизельного топлива, могут служить основой для дальнейшего анализа конструктивных решений и формирования требований к экспериментальной проверке. Перспективы развития отрасли определяются возможностью согласованного совершенствования всех стадий процесса – от подготовки сырья до получения очищенного топлива, а также внедрением методов моделирования и автоматизированного контроля.

Список литературы

1. Кучкина А.Ю. Источники сырья, методы и перспективы получения биодизельного топлива / А.Ю. Кучкина, Н.Н. Сущик // Журнал СФУ. Биология. 2014. № 1. С. 14–42.
2. Ткач В.В., Шевцов С.А. Линия производства биодизельного топлива: пат. 2646755 Рос. Федерация. № 2017112845; заявл. 13.04.2017; опубл. 03.07.2018, Бюл. № 7.
3. Тертычная Т.Н., Шевцов С.А., Ткач В.В., Сердюкова Н.А. Способ получения биодизельного топлива и установка для его осуществления: пат. 2714306 Рос. Федерация. № 2019114066; заявл. 06.05.2019; опубл. 14.02.2020, Бюл. № 5.
4. Шевцов А.А., Сердюкова Н.А., Орешин К.В. и др. Способ получения биодизельного топлива из растительного масла в сверхкритических условиях и установка для его осуществления : пат. 2772417 Рос. Федерация. № 2020139844; заявл. 02.12.2020; опубл. 19.05.2022, Бюл. № 14.
5. Insight into the Recent Advances in Sustainable Biodiesel Production by Catalytic Conversion of Vegetable Oils: Current Trends, Challenges, and Prospects // Energy & Fuels. 2023. Vol. 37, № 4. pp. 2631–2647. DOI: 10.1021/acs.energyfuels.2c03887.
6. Kim K. Recent advances in photobioreactor systems for sustainable and enhanced microalgal biofuel production / K. Kim, J. Yoo, W.G. Lee // Sustainable Energy & Fuels. 2022. Vol. 6. P. 5459–5473. DOI: 10.1039/D2SE01345B.
7. Платонов А.А. Вопросы утилизации нежелательной растительности при содержании охранных зон трасс ВЛ / А.А. Платонов // Воронежский научно-технический Вестник. – 2020. – Т. 1, № 1(31). – С. 95-102.

8. Совершенствование технологий и техники для расчистки площадей от нежелательной древесно-кустарниковой растительности / М.В. Драпалюк, В.Н. Коротких, А.А. Платонов [и др.] // Леса России и хозяйство в них. – 2025. – № 3(94). – С. 136-146. – DOI 10.51318/FRET.2025.94.3.014.

References

1. Kuchkina A.Yu. Sources of raw materials, methods and prospects for obtaining biodiesel fuel / A.Yu. Kuchkina, N.N. Sushchik // SFU Journal. Biology. 2014. № 1. pp. 14-42.
2. Tkach V.V., Shevtsov S.A. Biodiesel production line: Fri. 2646755 Ros. Federation. № 2017112845; declared. 13.04.2017 ; publ. 03.07.2018, Bul. № 7.
3. Tertychnaya T.N., Shevtsov S.A., Tkach V.V., Serdyukova N.A. Method of producing biodiesel fuel and installation for its implementation: Pat. 2714306 Reg. Federation. № 2019114066; declared. 06.05.2019; publ. 14.02.2020, Bul. № 5.
4. Shevtsov A.A., Serdyukova N.A., Oreshin K.V. and others. The method of producing biodiesel fuel from vegetable oil under supercritical conditions and apparatus for realising said method are as follows: 2772417 Ros. Federation. № 2020139844; declared. 02.12.2020 ; publ. 19.05.2022, Bul. № 14.
5. Insight into the Recent Advances in Sustainable Biodiesel Production by Catalytic Conversion of Vegetable Oils: Current Trends, Challenges, and Prospects // Energy & Fuels. 2023. Vol. 37, № 4. pp. 2631-2647. DOI: 10.1021/acs.energyfuels.2c03887.
6. Kim K. Recent advances in photobioreactor systems for sustainable and enhanced microalgal biofuel production / K. Kim, J. Yoo, W.G. Lee // Sustainable Energy & Fuels. 2022. Vol. 6. pp. 5459-5473. DOI: 10.1039/D2SE01345B.
7. Platonov A.A. Issues regarding the disposal of unwanted vegetation during the maintenance of overhead power line protection zones / A.A. Platonov // Voronezh Scientific and Technical Bulletin. – 2020. – Vol. 1, № 1(31). – pp. 95-102.
8. Improvement of technologies and machinery for clearing areas of unwanted woody and shrubby vegetation / M.V. Drapalyuk, V.N. Korotkikh, A.A. Platonov [et al.] // Forests of Russia and Their Management. – 2025. – № 3(94). – pp. 136-146. – DOI 10.51318/FRET.2025.94.3.014.

**ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЕ ГУСЕНИЧНОЙ МАШИНЫ
С РЕЗИНОАРМИРОВАННЫМИ ГУСЕНИЦАМИ ПРИ РАЗВОРОТЕ
НА МЕСТЕ**

Неверовский Д.С.

*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, Россия*

**POWER CONSUMPTION OF A CATERPILLAR MACHINE
WITH RUBBER-ARMORED TRACKS DURING PIVOT TURNING**

Neverovsky D.S.

*Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University,
Saint Petersburg, Russia*

Аннотация: Представлены результаты экспериментальной оценки энергопотребления гусеничной машины при развороте на месте и прямолинейном движении на асфальте, грунтовой дороге и песке. По измеренным значениям энергопотребления оценены потребные мощности приводных электродвигателей. Установлено, что энергозатраты при развороте на месте превышают энергозатраты на прямолинейное движения в 3,8–5,5 раз.

Abstract: The results of an experimental assessment of the energy consumption of a tracked vehicle during turning in place and straight-line movement on asphalt, a dirt road, and sand are presented. Based on the measured energy consumption values, the required power of the drive electric motors was estimated. It was found that the energy consumption during turning in place exceeds the energy consumption during straight-line movement by 3,8–5,5 times.

Ключевые слова: гусеничная машина, резиноармированные гусеницы, разворот с нулевым радиусом, энергозатраты, электропривод.

Keywords: tracked vehicle, rubber-reinforced tracks, zero-radius turn, energy consumption, electric drive.

Гусеничные машины применяются во всех сферах народного хозяйства, в том числе на покрытиях со слабой несущей способностью. Значительная часть рабочего цикла таких машин приходится на маневрирование, способ выполнения манёвра влияет не только на проходимость, но и на энергопотребление и продолжительность автономной работы машины. Влияние конструкции трансмиссии на энергозатраты при повороте гусеничных трелевочных тракторов исследовано в [1]. Однако для малогабаритных гусеничных машин с отдельным электроприводом бортов и эластичными

гусеницами наблюдается недостаток опубликованных экспериментальных данных о фактическом энергопотреблении.

Разворот на месте или разворот с нулевым радиусом выполняется при движении гусениц в противоположных друг другу направлениях с равными по модулю скоростями. Такой разворот обеспечивает минимально возможный радиус маневра. Особенности взаимодействия гусениц с опорной поверхностью, а также работы трансмиссии в этом режиме рассмотрены В.В. Павловым [2]. В отличие от движения по дуге, при таком маневре центр тяжести машины почти не перемещается, а значительная часть подводимой энергии расходуется на поперечное скольжение, сдвиг поверхностного слоя основания и внутренние потери в двигателе [3, 4]. Для эластичных гусениц дополнительно оказывают влияние деформация резины, трение в направляющем аппарате и предварительное натяжение [5].

Цель работы – экспериментальная оценка энергопотребления гусеничной машины с электроприводом и эластичными гусеницами при развороте на месте с последующим сопоставлением полученных результатов с энергопотреблением при прямолинейном движении в аналогичных условиях.

Исследование было проведено на основе гусеничной платформы «ЖУК» с независимым электроприводом приводом каждого борта и эластичными гусеницами. Такая компоновка позволила обеспечить непосредственную регистрацию электрических параметров каждого тягового двигателя без необходимости разделения общего потока мощности механической трансмиссии. Общий вид платформы представлен на рис. 1, основные технические характеристики гусеничной платформы представлены в табл. 1.



Рисунок 1 – Экспериментальная гусеничная платформа «ЖУК»

Исследования проведены на ровных однородных участках таких покрытий как асфальт, грунтовая дорога, песок. Для каждого покрытия в ходе исследований измерялись показатели при прямолинейном движении платформы и развороте на месте. Каждый опыт был повторен не менее четырех для того, чтобы исключить влияние случайных событий.

С целью обеспечения корректности оценки энергопотребления во всех опытах машине была задана постоянная скорость гусениц – 1 м/с, данное задание избавило от необходимости оценки удельной энергии маневра, позволив проводить оценку по средней потребляемой мощности.

Таблица 1 – Технические характеристики гусеничной платформы «ЖУК»

Параметр	Величина	Параметр		Величина
Снаряженная масса, кг	100	СИЛОВАЯ УСТАНОВКА	Тип электродвигателя	BLDC
Допустимая полная масса, кг	300		Номинальная мощность, кВт	0,75 (1,5 суммарно)
Длина, мм	1230		Передаточное отношение редуктора	10,4
Ширина, мм	1100		Количество, шт.	2
Высота, мм	540	ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ	Тип аккумуляторных батарей	Li-ion
Ширина колеи (расстояние между серединами гусеничных лент), мм	945		Напряжение сети, В	72
Длина опорной поверхности, мм	750		Количество, шт.	1
Ширина гусеницы, мм	100		Общая емкость батарей, А·ч	от 90 до 250

Во время проведения опытов системой регистрации и записи параметров движения регистрировались фактические данные о энергопотреблении такие как напряжение, сила тока в цепи и число оборотов тяговых электродвигателей. Состав и принцип действия системы описаны в [6].

Электрическая мощность на входе каждого регулятора определялась как произведение напряжения и силы тока в цепи. Для приведения результатов к механической мощности на валах тяговых электродвигателей учитывалось потребление регулятора оборотов и КПД электродвигателя:

$$P_{m,i} = U_i I_i \eta_p \eta_d ,$$

где $P_{m,i}$ – механическая мощность i -го двигателя, Вт; U_i и I_i – измеренные напряжение (В) и сила тока (А); $\eta_p = 0,96$ – КПД регулятора оборотов, учитывающее потребляемую им долю мощности; $\eta_d = 0,95$ – принятый КПД тягового электродвигателя.

Суммарная механическая мощность двух бортовых приводов определялась по выражению

$$P_{\Sigma} = P_{m,1} + P_{m,2} .$$

В качестве относительного показателя энергозатрат использовано отношение суммарной механической мощности при развороте на месте $P_{\Sigma,0}$ к мощности при прямолинейном движении $P_{\Sigma,\infty}$ на том же типе покрытия:

$$K_n = \frac{P_{\Sigma,0}}{P_{\Sigma,\infty}} ,$$

В табл. 2 представлены обработанные результаты проведенного исследования для всех трёх типов покрытий.

Таблица 2 – Результаты экспериментального исследования

–	Прямолинейное движение		Разворот на месте		–
Покрытие	$P_{м,1} / P_{м,2}$, Вт	$P_{Σ,∞}$, Вт	$P_{м,1} / P_{м,2}$, Вт	$P_{Σ,0}$, Вт	K_H
Асфальт	70,1 / 70,1	140,2	386,8 / 390,1	776,9	5,5
Грунтовая дорога	98,1 / 98,9	197,0	373,3 / 371,8	745,1	3,8
Песок	90,5 / 91,0	181,5	358,4 / 350,2	708,6	3,9

На асфальте суммарная механическая мощность при развороте составила 776,9 Вт, тогда как при прямолинейном движении – 140,2 Вт. Таким образом, для разворота с нулевым радиусом получено увеличение мощности в 5,5 раз. На грунтовой дороге опыт показал увеличение потребляемой мощности в 3,8 раз, на песке в 3,9 раза. Отношение K_H однозначно показывает повышенную нагрузку, возникающую при развороте на месте.

На рис. 2 представлено графическое сопоставление результатов исследования.

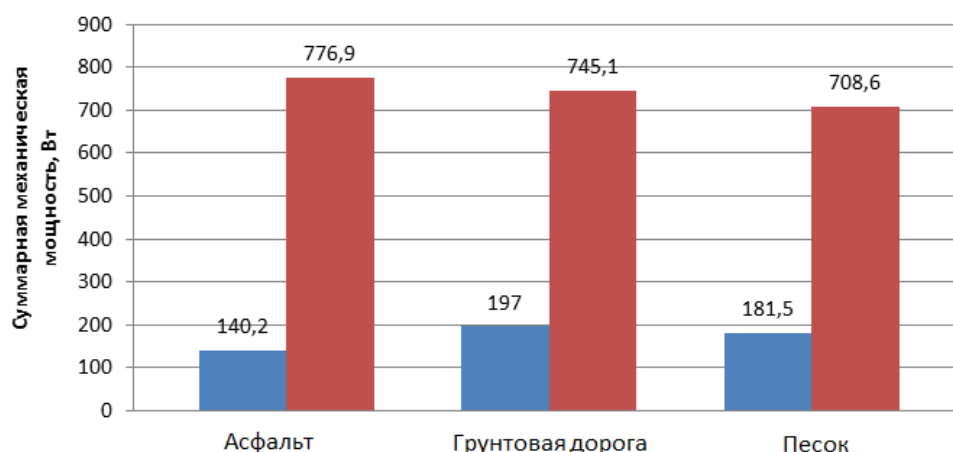


Рисунок 2 – Сопоставление суммарной механической мощности при прямолинейном движении и развороте на месте

Полученные результаты не позволяют выявить однозначную зависимость между мощностью разворота на месте и мощностью прямолинейного движения по исследованным покрытиям. На асфальте, где мощность прямолинейного движения была минимальной среди исследованных покрытий, зафиксирована наибольшая мощность разворота, тогда как на песке эффект обратный. Причиной является иной характер взаимодействия гусеницы с опорной поверхностью. Совершая поперечное перемещение по опорной поверхности, гусеницы деформируются в плане, а в направляющем аппарате возрастает трение катков о реборды траков. На деформируемом основании часть относительного перемещения реализуется за счет сдвига поверхностного слоя, что изменяет общее сопротивление повороту.

Мощности левого и правого приводов в ходе экспериментов практически не различались относительно их среднего значения, на асфальте и грунтовой дороге максимальная разница мощностей составила – 0,4 %, на песке – 1,15%. Данный показатель свидетельствует о достаточно симметричном нагружении бортов в данных условиях. Некоторая разница в потребляемых мощностях может быть вызвана неоднородностью поверхности движения и различием условий взаимодействия гусениц с основанием различием фактического буксования гусениц. Поэтому сопоставление мощностей бортовых приводов может использоваться не только для ограничения нагрузки, но и как косвенный признак несимметричного взаимодействия гусениц с поверхностью.

Для гусеничных машин с отдельным электроприводом бортов мощность разворота с нулевым радиусом необходимо учитывать при выборе тяговых электродвигателей и параметров системы электропитания. Если технологическая операция допускает маневр конечного радиуса или как можно большее количество прямолинейного движения, замена части разворотов на месте плавными поворотами может существенно снизить энергозатраты в целом. Общие принципы повышения энергоэффективности механизмов поворота [7] позволяют рассматривать увеличение радиуса манёвра как возможное направление снижения энергозатрат, требующее отдельной экспериментальной проверки.

Выводы

Экспериментально установлено, что разворот на месте характеризуется повышенными энергозатратами по сравнению с прямолинейным движением исследованной электрической гусеничной платформы. При одинаковой линейной скорости гусениц суммарная механическая мощность при развороте на месте относительно прямолинейного движения на асфальте, грунтовой дороге и песке в соответствующих условиях увеличилась в 5,5; 3,8 и 3,9 раза, соответственно.

Установленный рост потребной мощности подтверждает необходимость учета разворота на месте при выборе компонентов электропривода и оценке энергетического баланса гусеничного шасси. Для снижения эксплуатационных энергозатрат целесообразно ограничивать продолжительность и скорость таких разворотов, а при наличии свободного пространства использовать повороты конечного радиуса.

Список литературы

1. Скобцов И.Г. Влияние типа трансмиссии на энергоёмкость процесса поворота гусеничного трелевочного трактора: дис. ... канд. техн. наук: 05.21.01 / И.Г. Скобцов. – Петрозаводск, 2004. – 173 с.
2. Павлов В.В. Вопросы поворота гусеничной машины на месте / В.В. Павлов // Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ). – 2011. – № 2(25). – С. 14-17.
3. Падалкин Б.В. Теоретическое исследование потерь в движителе при повороте гусеничной машины / Б.В. Падалкин. // Транспортные системы. – 2021. – № 1 (19). – С. 11-15.

4. Morales J. Power Consumption Modeling of Skid-Steer Tracked Mobile Robots on Rigid Terrain / J. Morales, J. L. Martinez, A. Mandow [et al.] // IEEE Transactions on Robotics. – 2009. – Vol. 25, № 5. – pp. 1098–1108.
5. Меденцев А.Ю. Обзор конструкции и технологии изготовления резиноармированной гусеницы / А.Ю. Меденцев, И.С. Кузнецов. // Агротехника и энергообеспечение. – 2020. – № 4 (29). – С. 49–55.
6. Система регистрации и записи параметров движения гусеничной машины / Д.С. Неверовский, В.Д. Гайдук, С.В. Пичахчи [и др.]// Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2026. – № 2. – С. 106–114.
7. Добрецов Р.Ю. К определению параметров энергоэффективности механизма поворота шасси транспортных и технологических гусеничных машин / Р.Ю. Добрецов, Г.П. Поршневу. // Вестник ПНИПУ. Охрана окружающей среды, транспорт, безопасность жизнедеятельности. – 2015. – № 1. – С. 42–55.

References

1. Skobtsov I.G. The influence of the transmission type on the energy consumption of the turning process of a tracked skidder caterpillar: dis. ... cand. tech. sci.: 05.21.01 / I.G. Skobtsov. – Petrozavodsk, 2004. – 173 p.
2. Pavlov V.V. Issues of turning a tracked vehicle in place / V.V. Pavlov // Bulletin of the Moscow Automobile and Road State Technical University (MADI). – 2011. – № 2(25). – pp. 14–17.
3. Padalkin B.V. Theoretical study of losses in the drive mechanism when turning a tracked vehicle / B.V. Padalkin. // Transport Systems. – 2021. – № 1 (19). – pp. 11–15.
4. Power Consumption Modeling of Skid-Steer Tracked Mobile Robots on Rigid Terrain / J. Morales, J. L. Martinez, A. Mandow [et al.] // IEEE Transactions on Robotics. – 2009. – Vol. 25, no. 5. – P. 1098–1108.
5. Medentsev A.Yu. Overview of the design and manufacturing technology of a rubber-reinforced track / A.Yu. Medentsev, I.S. Kuznetsov. // Agrotechnology and Energy Supply. – 2020. – № 4 (29). – pp. 49–55.
6. System for Recording and Logging the Movement Parameters of a Tracked Vehicle / D.S. Neverovsky, V.D. Gaiduk, S.V. Pichakchi [et al.] // Proceedings of the Tula State University. Technical Sciences. – 2026. – № 2. – pp. 106–114.
7. Dobretsov R.Yu. On Determining the Energy Efficiency Parameters of the Turning Mechanism of the Chassis of Transport and Technological Tracked Vehicles / R.Yu. Dobretsov, G.P. Porshnev. // Bulletin of PNIPU. Environmental Protection, Transport, Life Safety. – 2015. – № 1. – pp. 42–55.

РАЗРАБОТКА КОНСТРУКТИВНОЙ КОМПОНОВКИ МАГНИТНОГО ДЕМПФИРУЮЩЕГО УСТРОЙСТВА ГИДРОПРИВОДА ЛЕСНОГО МАНИПУЛЯТОРА

Полумиско А.А., Путятин П.А., Евсиков И.Д.

*Воронежский государственный лесотехнический университет
имени Г.Ф. Морозова, Воронеж, Россия*

DEVELOPMENT OF THE DESIGN LAYOUT OF A MAGNETIC DAMPING DEVICE FOR A FORESTRY MANIPULATOR HYDRAULIC DRIVE

Polumisko A.A., Putyatin P.A., Evsikov I.D.

*Voronezh State University of Forestry and Technologies
named after G.F. Morozov, Voronezh, Russia*

Аннотация: Представлена конструктивная проработка магнитного демпфирующего устройства гидропривода лесного манипулятора. По рабочим чертежам уточнены габариты корпусных деталей, соединительные резьбы и крепёжные отверстия. Принята разъёмная компоновка из двух гильз и крышек. Конструкция предназначена для изготовления опытного образца и последующей проверки расчётной модели.

Abstract: The design of a magnetic damping device for a forestry manipulator hydraulic drive is presented. Working drawings were used to specify the housing dimensions, connection threads, and fastening holes. A detachable layout with two sleeves and covers was adopted. The design is intended for prototype manufacture and subsequent verification of the calculation model.

Ключевые слова: лесной манипулятор, гидропривод, магнитное демпфирование, конструктивная компоновка, магнитный поршень, экспериментальный образец.

Keywords: forestry manipulator, hydraulic drive, magnetic damping, design layout, magnetic piston, prototype.

Введение

Гидропривод механизма подъёма стрелы лесного манипулятора работает в повторно-кратковременном режиме. Разгон и торможение стреловой системы, изменение вылета и массы перемещаемого груза вызывают переходные процессы, при которых давление и скорость движения звеньев кратковременно отклоняются от установившихся значений. Для снижения динамической нагруженности требуется согласованный выбор параметров привода и демпфирующих элементов [1, 3].

В патентной схеме магнитное демпфирующее устройство 24 подключено между гидролиниями 6 и 7 гидроцилиндра подъёма стрелы через регулируемые

дрессели 22 и 23 (рис. 1). Устройство включает корпус с крышками 25 и 26, два подвижных магнитных поршня 27 и 28 и неподвижную магнитную перегородку 29 с дроссельным отверстием 30. При всплеске давления рабочая жидкость поступает в соответствующую полость устройства и перемещает один из поршней в направлении перегородки. Сближение одноимённых магнитных полюсов вызывает увеличение силы отталкивания, противодействующей перемещению поршня, а перетекание рабочей жидкости через дроссельное отверстие создаёт дополнительное гидравлическое сопротивление. Совместное действие магнитной силы и дросселирования обеспечивает снижение интенсивности колебаний давления [2].

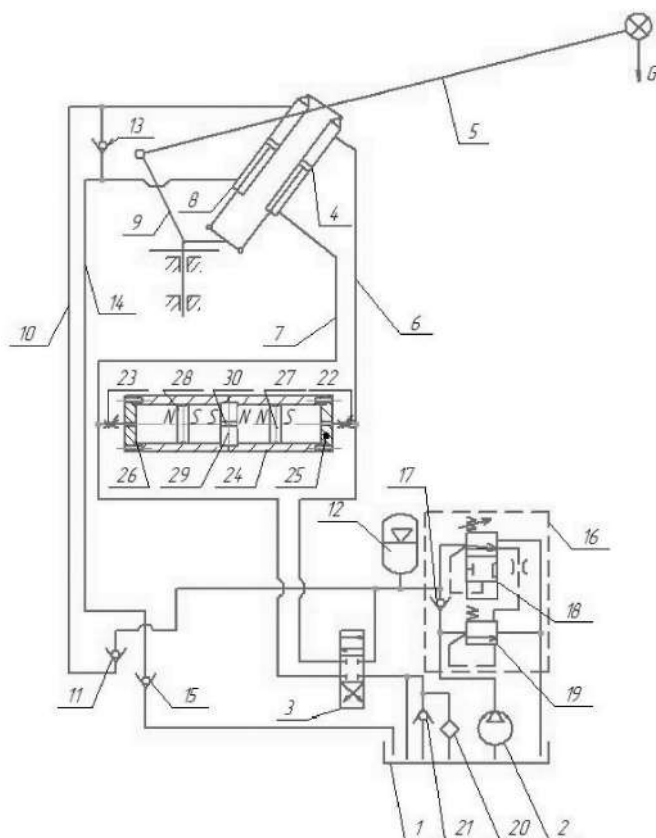


Рисунок 1 – Схема гидропривода механизма подъёма стрелы лесного манипулятора с магнитным демпфирующим устройством [2]

Ранее выполненный авторами численный эксперимент показал, что подключение такого устройства может снизить максимальные динамические значения давления примерно в 1,4...1,5 раза: после переходной стадии давление стабилизировалось около 25 МПа, тогда как в расчётном режиме без демпфирования сохранялись колебания в диапазоне 31...39 МПа [1]. Для перехода от расчётной схемы к стендовому исследованию потребовалось уточнить геометрию корпуса, способ соединения его частей и параметры деталей, доступных для изготовления.

Цель работы заключается в разработке конструктивной компоновки магнитного демпфирующего устройства гидропривода лесного манипулятора и определении основных геометрических параметров его корпусных деталей для последующего изготовления экспериментального образца.

Материалы и методы

При конструкторской проработке использованы результаты расчётной модели: диаметр магнитного поршня в модели принимался равным 50 мм, конструктивно допустимая координата поршня составляла 60 мм, а его фактическое перемещение в рассмотренном переходном процессе – около 5 мм [1]. Эти значения характеризуют расчётную схему и не заменяют размеры посадочных поверхностей опытного образца. Размеры на рабочих чертежах интерпретированы по правилам ЕСКД и системе допусков и посадок [4, 5].

Трёхмерные модели и рабочие чертежи выполнялись средствами автоматизированного проектирования. Последовательность включала построение общей цилиндрической компоновки, разбиение корпуса на технологически самостоятельные детали, назначение резьбовых и крепёжных элементов, после чего проверялись соосность рабочих поверхностей и сборочные габариты.

Корпус принят разъёмным и образован двумя гильзами с торцевыми крышками. Такое решение обеспечивает доступ к внутренним элементам магнитной системы и позволяет изменять их положение при стендовой отработке. Рабочие чертежи относятся к корпусным деталям; окончательная конструкция магнитных поршней, неподвижной перегородки, уплотнений и присоединительных штуцеров должна быть оформлена отдельными чертежами перед изготовлением опытного образца. Разработанное конструктивное соединение двух гильз показано на рис. 2.

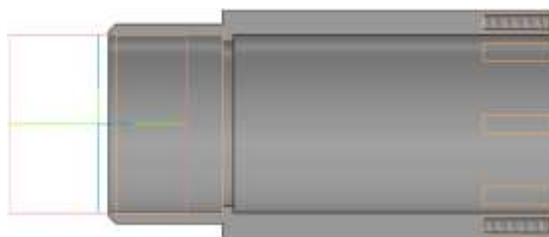


Рисунок 2 – Продольный вид соединения корпусных деталей магнитного демпфирующего устройства

Результаты и обсуждение

Размерная цепь сборки включает осевое перекрытие гильз и посадку крышек. Каждая гильза имеет длину 125 мм; длина сопрягаемого участка гильз равна 32 мм. Крышка имеет осевую толщину 15 мм, при этом её ступенчатый участок входит в гильзу на 5 мм, поэтому наружу выступает 10 мм. Полная длина устройства составляет $125 + 125 - 32 + 2 \times (15 - 5) = 238$ мм, что соответствует сборочному чертежу. Наружный диаметр корпуса равен 64 мм. Соединение гильз выполнено резьбой М56×2. В основной цилиндрической зоне расчётная толщина стенки для диаметра 64 мм и отверстия 50 мм составляет 7 мм; для гильзы 2 при отверстии Ø50+0,16 минимальное значение составляет 6,92 мм.

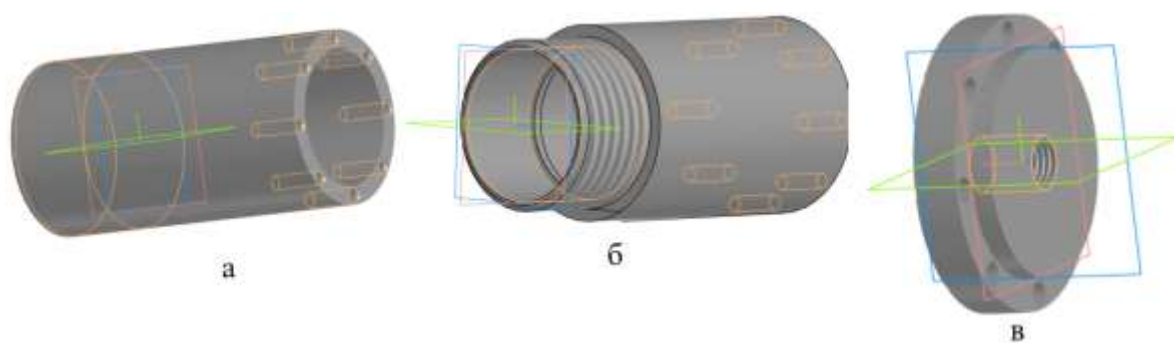
В обеих гильзах предусмотрены восемь резьбовых отверстий М5: глубина резьбы 17 мм, глубина сверления 20 мм, фаска 1×45°; отверстия расположены на диаметре 57 мм с угловым шагом 45°. Крышка имеет наружный диаметр 64 мм и толщину 15 мм. В ней выполнены восемь проходных отверстий Ø5,5 мм

на диаметре 50 мм с шагом 45° и центральное резьбовое отверстие М12. Следовательно, отверстия Ø5,5 мм следует рассматривать как крепёжные проходные отверстия крышки, а М5 – как резьбовые отверстия в гильзах.

Таблица 1 – Основные параметры разработанной компоновки

Параметр	Значение по чертежам
Длина устройства в сборе	238 мм
Наружный диаметр корпуса	Ø64 мм
Длина гильзы 1 / гильзы 2	125 / 125 мм
Внутреннее отверстие гильзы 1	Ø50 мм
Внутреннее отверстие гильзы 2	Ø50+0,16 мм
Соединение гильз	резьба М56×2
Крышка	Ø64×15 мм; центральная резьба М12
Отверстия в крышке	8×Ø5,5 мм на Ø50; шаг 45°
Отверстия в гильзах	8×М5, глубина резьбы 17 мм; на Ø57; шаг 45°
Размерная цепь длины сборки	$125 + 125 - 32 + 2 \times (15 - 5) = 238$ мм

Конструктивное исполнение гильз и торцевой крышки представлено на рис. 3. Гильза 1 имеет внутреннюю цилиндрическую поверхность Ø50; на чертеже гильзы 2 указан размер Ø50+0,16. Эти размеры относятся к корпусным отверстиям. Крышка выполнена толщиной 15 мм с посадочным ступенчатым участком 5 мм. Указанные размеры не подтверждают фактический диаметр подвижного магнитного поршня, который должен быть назначен с учётом выбранного зазора, направляющих и уплотнений.



а – гильза 1; б – гильза 2; в – крышка

Рисунок 3 – Основные корпусные детали

Принятая компоновка согласуется с расчётной схемой устройства, однако рабочий чертёж экспериментального образца требует дальнейшей детализации. До изготовления необходимо назначить фактический диаметр подвижного узла, радиальный зазор, материал корпуса, шероховатость направляющих поверхностей, тип уплотнения и прочностные параметры резьбового и болтовых соеди-

нений. Такое разделение расчётных и конструкторских параметров исключает отождествление диаметра поршня модели с диаметром отверстия корпуса.

Практическая ценность разработанной конструктивной компоновки состоит в возможности изготовить модульный корпус и использовать его как основу испытательного устройства. Разъёмная схема позволяет последовательно менять магнитные элементы, их начальный зазор, массу подвижного узла и параметры дросселирования, сохраняя одинаковые внешние габариты. При таком подходе сравнение режимов будет отражать влияние исследуемого параметра, а не изменение всей конструкции.

На следующем этапе требуется выполнить прочностной расчёт корпуса и крепёжных элементов для максимального давления, проверить герметичность соединений, изготовить детали и определить реальные потери на трение. После сборки экспериментальный образец может быть установлен в гидравлический стенд для регистрации давления, перемещения и скорости магнитного поршня. Сопоставление измеренных переходных процессов с расчётными зависимостями позволит уточнить коэффициенты модели и определить рациональный диапазон конструктивных параметров.

Выводы

1. На основе расчётной схемы магнитного демпфирующего устройства разработана разъёмная конструкция корпуса, включающая две гильзы и торцевые крышки.

2. По рабочим чертежам уточнена размерная цепь сборки: две гильзы длиной по 125 мм соединяются с осевым перекрытием 32 мм, а крышки толщиной 15 мм имеют посадочный участок 5 мм. Это обеспечивает общую длину устройства 238 мм при наружном диаметре 64 мм.

3. Установлено различие между крепёжными элементами: крышка имеет восемь проходных отверстий Ø5,5 мм, а в гильзах выполнены восемь резьбовых отверстий М5; это обеспечивает корректное назначение болтового соединения.

4. До изготовления образца необходимо назначить рабочие зазоры и уплотнения, выбрать материал, выполнить расчёт прочности и сформировать программу стендовых испытаний.

Список литературы

1. Исследование динамики гидропривода механизма подъема стрелы лесного манипулятора с магнитным демпфирующим устройством / А.А. Полумиско, П.И. Попиков, Н.С. Камалова [и др.] // Лесотехнический журнал. – 2026. – Т. 16, № 1(61). – С. 174-190. – DOI: 10.34220/issn.2222-7962/2026.1/12.

2. Патент на полезную модель № 230802 U1 Российская Федерация, МПК В66С 13/42. Гидропривод механизма подъема стрелы лесного манипулятора с магнитным демпфирующим устройством: № 2024127518: заявл. 18.09.2024 : опубл. 19.12.2024 / А.А. Сидоров, П.И. Попиков, Е.В. Поздняков [и др.] ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова».

3. Кинематические и динамические характеристики механизма подъема манипулятора сортиментовоза с гидромеханическим демпфером / Д.С. Богданов, И.Д. Евсиков, А.В. Попикова [и др.] // Физические основы наукоемких технологий: Материалы Всероссийской научно-методической конференции, Воронеж, 17 апреля 2024 года. – Воронеж: Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова, 2024. – С. 109-113. – DOI 10.58168/PBST_109-113.

4. ГОСТ 2.307–2011. Единая система конструкторской документации. Нанесение размеров и предельных отклонений. – Введ. 2012–09–01. – М: Стандартиформ, 2012. – 23 с.

5. ГОСТ 25346–2013 (ISO 286-1:2010). Основные нормы взаимозаменяемости. Единая система допусков и посадок. Общие допуски, поля допусков и предельные отклонения. – Введ. 2015–01–01. – М: Стандартиформ, 2014. – 36 с.

References

1. Investigation of the dynamics of the hydraulic drive for the boom lifting mechanism of a forestry manipulator equipped with a magnetic damping device / A.A. Polumisko, P.I. Popikov, N.S. Kamalova [et al.] // Forestry Engineering Journal. – 2026. – Vol. 16, № 1(61). – P. 174-190. – DOI: 10.34220/issn.2222-7962/2026.1/12.

2. Utility Model Patent № 230802 U1 (Russian Federation), IPC B66C 13/42. Hydraulic drive for the boom lifting mechanism of a forestry manipulator with a magnetic damping device: № 2024127518: filed 18.09.2024 : published 19.12.2024 / A.A. Sidorov, P.I. Popikov, E.V. Pozdnyakov [et al.]; applicant: Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov».

3. Kinematic and dynamic characteristics of the log-hauler manipulator lifting mechanism with a hydromechanical damper / D.S. Bogdanov, I.D. Evsikov, A.V. Popikova [et al.] // Physical Foundations of Knowledge-Intensive Technologies: Proceedings of the All-Russian Scientific and Methodological Conference, Voronezh, April 17, 2024. – Voronezh: G.F. Morozov Voronezh State University of Forestry and Technologies, 2024. – pp. 109–113. – DOI: 10.58168/PBST_109-113.

4. GOST 2.307–2011. Unified System for Design Documentation. Dimensioning and Tolerancing. – Introduced 2012–09–01. – Moscow: Standartinform, 2012. – 23 p.

5. GOST 25346–2013 (ISO 286-1:2010). Basic norms of interchangeability. Unified system of tolerances and fits. General tolerances, tolerance zones, and limit deviations. – Introduced 2015–01–01. – Moscow: Standartinform, 2014. – 36 p.

**СТАТИСТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ТЕСНОТЫ СВЯЗИ МЕЖДУ
ПАРАМЕТРАМИ ЛЕСНОГО ПЛУГА И КАЧЕСТВЕННЫМИ
ПОКАЗАТЕЛЯМИ СОЗДАВАЕМОГО ИМ ЛИНЕЙНОГО
МИКРОПОВЫШЕНИЯ**

Попов М.А., Дручинин Д.Ю.

*Воронежский государственный лесотехнический университет
имени Г.Ф. Морозова, Воронеж, Россия*

**STATISTICAL ASSESSMENT OF THE CLOSENESS
OF THE RELATIONSHIP BETWEEN THE PARAMETERS
OF A FOREST PLOW AND THE QUALITY INDICATORS
OF THE LINEAR MICROELEVATION CREATED BY IT**

Popov M.A., Druchinin D.Yu.

*Voronezh State University of Forestry and Technologies
named after G.F. Morozov, Voronezh, Russia*

Аннотация: представлены результаты корреляционного анализа данных экспериментальных исследований по оценке совместного влияния скорости агрегата и угла атаки диска макетного образца лесного плуга на процесс создания им линейных микроповышений поверхности. Качественными показателями образованного гребня являлись дальность перемещения почвенных масс и высота микроповышения.

Abstract: The results of a correlation analysis of experimental study data are presented to assess the combined influence of the unit speed and the angle of attack of the disk of a prototype model of a forest plow on the process of creating linear microelevations on the surface. The quality indicators of the formed ridge were the distance of movement of soil masses and the height of the microelevation.

Ключевые слова: почва, лесной плуг, микроповышение, корреляционный анализ, параметры, теснота связи.

Keywords: soil, forest plow, microelevation, correlation analysis, parameters, closeness of relationship.

При создании технических средств основным критерием оценки их работоспособности являются качественные показатели конечного результата рабочего процесса, которые рассматриваются в прямой взаимосвязи с параметрами орудия или машины. Эти критерии также неотделимы от технологии работы и условий эксплуатации техники. Для реализации поставленных задач в инженерных проектах необходимым этапом разработки эффективных образцов орудий является проведение экспериментов. Особенно это актуально для техники, работающей в тяжелых условиях, к которым в лесном хозяйстве относятся временно переувлаж-

ненные почвы [0]. К лесным плугам для их обработки предъявляются высокие требования по соблюдению технологии рабочего процесса, к которым относятся параметры создаваемого микроповышения. Для качественного лесовосстановления в условиях переувлажненных почв требуется высокопродуктивная техника. В настоящее время подобных машин недостаточно, а имеющиеся образцы устарели и малоэффективны. Для этой цели была разработана конструкция лесного плуга для создания линейных микроповышений, состоящего из лемешных корпусов, доотваливающих почвенные массы сферических дисков и уплотняющего катка трапецеидальной формы [2].

На базе лаборатории кафедры механизации лесного хозяйства и проектирования машин ВГЛТУ для проведения экспериментальных исследований при помощи сварных и механосборочных работ был создан маркерный образец рабочего секции плуга, состоящий из рамы 1, лемешного корпуса 2 и сферического диска 3 (рис. 1).



Рисунок 1 – Макетный образец лесного плуга

На базе испытательного полигона Инжинирингового центра ВГЛТУ (рис. 2) была проведена серия экспериментов [3]. Почвенные условия на опытном участке – чернозем с высокой степенью задернения, влажность которого в момент проведения испытаний в среднем находилась в пределах 30%.



Рисунок 2 – Опытный участок для проведения экспериментов

Целью исследования являлось нахождение зависимостей между технологическими параметрами агрегата и высотой микроповышения, а также величиной поперечного перемещения почвенных масс, сходящих с рабочих органов плуга, отсчитываемой от сферического диска. В качестве технологических параметров были выбраны угол атаки сферического диска и скорость движения агрегата. Для перемещения макетного образца как тяговое средство использовался трактор «УРАЛЕЦ 254».

После реализации составленной серии экспериментов полученные данные были усреднены и подвергнуты корреляционному анализу [4]. В табл. 1 совместно представлены матрица эксперимента и полученные результаты. При анализе выходные параметры исследовались отдельно.

Таблица 1 – Исходные данные эксперимента

№ опыта	X_1 Угол атаки α , (град.)	X_2 Скорость движения агрегата V , (км/ч)	Y_1 Высота микроповышения H , м	Y_2 Расстояние перемещения почвы L , м
1	-1 (45)	-1 (2,8)	0,057	0,42
2	1 (55)	-1 (2,8)	0,066	0,61
3	-1 (45)	1 (5,9)	0,051	0,68
4	1 (55)	1 (5,9)	0,057	0,69

Корреляционный анализ высоты микроповышения (Y_1) (табл. 2) показал, что присутствует прямая зависимость с углом атаки α сферического диска. Значение коэффициента корреляции для $X_1 = 0,67$, что является заметным значением по шкале Чеддока. Также наблюдается высокая обратная зависимость между скоростью движения агрегата V и высотой H , где коэффициент составляет для $X_2 = -0,72$. Рассчитанный для фактора X_2 коэффициент детерминации R , равный 0,518, показывает, что изменение Y_1 на 52 % объясняется влиянием именно скорости движения агрегата.

Таблица 2 – Матрица результатов корреляционного анализа поперечного перемещения почвы L

	X_1 Угол атаки α	X_2 Скорость движения агрегата V	Y_1 Расстояние перемещения почвы L
X_1 Угол атаки α	1		
X_2 Скорость движения агрегата V	0	1	
Y_1 Расстояние перемещения почвы L	0,67	-0,72	1

Корреляционный анализ величины поперечного перемещения почвы (Y_2) (табл. 3) показал прямую зависимость как с углом атаки доотваливающего диска α , так и со скоростью движения V . Коэффициенты корреляции составляют для $X_1 - 0,48$ и $X_2 - 0,78$. При этом коэффициент корреляции для X_2 больше, чем для X_1 , что говорит о повышенном влиянии именно скорости движения агрегата на поперечное перемещение почвы, укладываемой в микроповышение. Изменение высоты микроповышения H , согласно значению коэффициента детерминации $R = 0,608$, на 61 % объясняется влиянием фактора X_2 .

Таблица 3 – Матрица результатов корреляционного анализа высоты микроповышения H

	X_1 Угол атаки α	X_2 Скорость движения агрегата V	Y_2 Высота микроповышения H
X_1 Угол атаки α	1		
X_2 Скорость движения агрегата V	0	1	
Y_2 Высота микроповышения H	0,48	0,78	1

В результате корреляционного анализа данных, полученных при реализации экспериментов с лесным плугом на опытном участке, можно сделать следующие выводы:

- наблюдается умеренное влияние угла атаки α на высоту микроповышения H , где с увеличением угла увеличивается и высота. Скорость агрегата V , в свою очередь, высоко влияет на высоту H , но имеет обратную направленность, где с увеличением скорости высота H уменьшается из-за большего разброса почвенных масс, формирующих гребень.

- с увеличением скорости V растет длина поперечного перемещения почвенных объемов L . Это согласуется с первым выводом и говорит о увеличении площади распределения почвы и, как следствие, уменьшении высоты микроповышения H . Увеличение угла атаки α доотваливающего диска также приводит к увеличению поперечного перемещения L из-за общего расположения конструктивных элементов: при этом коэффициент корреляции для первого фактора X_1 меньше, чем значение для X_2 и отличается на 48%, а разница между величиной X_1 для первого и второго выходных критериев Y составляет примерно 33%. Установленные закономерности соотносятся с результатами Нартова П.С. [5], где угол атаки α диска имеет большее прямое влияние на поперечное перемещение почвы.

Согласно полученным данным и итогов ранее проведенных исследований можно предположить высокое совместное оказываемое влияние на высоту микроповышения и поперечное перемещение почвы со стороны угла атаки α

дисковых элементов конструкции лесного плуга и скорости движения агрегата V. Поэтому для подтверждения полученных результатов в дальнейшем необходимо провести регрессионный анализ полученных экспериментальных данных.

Сведения о финансировании исследования. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-19-00876, <https://rscf.ru/project/25-19-00876/>.

Список литературы

1. Дручинин Д.Ю. К вопросу создания микроповышений при проведении лесовосстановления в условиях временно переувлажняемых почв / Д.Ю. Дручинин, М.А. Попов. // Актуальные проблемы развития лесного комплекса: Материалы XIX Международной научно-технической конференции, Вологда, 07 декабря 2021 года. – Вологда: Вологодский государственный университет, 2021. – С. 48-53.
2. Патент № 2789357 С1 РФ, МПК А01В 13/02, А01В 49/02, А01G 23/00. Лесной плуг для образования микроповышений: № 2022119496: заявл. 16.07.2022; опубл. 02.02.2023 / Д.Ю. Дручинин, М.А. Попов; заявитель ФГБОУ ВО «ВГЛТУ имени Г.Ф. Морозова».
3. Адлер Ю.П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю.П. Адлер, Е.В. Маркова, Ю.В. Грановский. – М.: Наука, 1976. – 280 с.
4. Баврина А.П. Современные правила применения корреляционного анализа / А.П. Баврина, И.Б. Борисов // Медицинский альманах. – 2021. – № 3(68). – С. 70-79.
5. Нартов П.С. Дисковые почвообрабатывающие орудия / П.С. Нартов. – Воронеж: Изд-во ВГУ, 1972. – 181 с.

References

1. Druchinin D.Yu. On the issue of creating microelevations during reforestation under conditions of temporarily waterlogged soils / D.Yu. Druchinin, M.A. Popov // Current Problems of Forest Complex Development: Proceedings of the XIX International Scientific and Technical Conference, Vologda, December 07, 2021. – Vologda: Vologda State University, 2021. – pp. 48-53.
2. RF Patent No. 2789357 C1, IPC A01B 13/02, A01B 49/02, A01G 23/00. Forest plow for forming microelevations: No. 2022119496: filed 16.07.2022; published 02.02.2023 / D. Yu. Druchinin, M. A. Popov; applicant: Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G. F. Morozov».
3. Adler Yu.P. Design of Experiments in the Search for Optimal Conditions / Yu.P. Adler, E.V. Markova, Yu.V. Granovsky. – Moscow: Nauka, 1976. – 280 p.
4. Bavrina A.P. Modern rules for the use of correlation analysis / A.P. Bavrina, I.B. Borisov // Medical Almanac. – 2021. – № 3(68). – pp. 70-79.
5. Nartov P.S. Disk Soil-Cultivating Implements/ P.S. Nartov. – Voronezh: Publishing House of Voronezh State University, 1972. – 181 p.

**ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ
ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩЕГО ГИДРОПРИВОДА НОЖЕВОГО
ДИСКА РУБИЛЬНОЙ МАШИНЫ**

Прокопенко С.В., Платонов А.А., Попиков В.П.

*Воронежский государственный лесотехнический университет
имени Г.Ф. Морозова, Воронеж, Россия*

**THEORETICAL STUDY OF THE DYNAMICS OF AN ENERGY
SAVING HYDRAULIC DRIVE FOR A CUTTING MACHINE'S BLADES**

Prokopenko S.V., Platonov A.A., Popikov V.P.

*Voronezh State University of Forestry and Technologies
named after G.F. Morozov, Voronezh, Russia*

Аннотация: При производстве топливной щепы, наиболее универсальной является дисковая рубильная машина, обладающая рядом преимуществ, т.к. имеет возможность работать как непосредственно на лесосеке, так и на лесном складе. В рамках настоящего исследования акцент сделан на дисковых рубильных машинах с верхним выбросом щепы, и связан с разработкой энергосберегающего гидропривода ножевого диска для снижения энергозатрат путем аккумуляирования энергии торможения диска и возвращения ее в момент его разгона, а также демпфирования динамических нагрузок в момент пуска и снижение вибраций в рабочем режиме.

Abstract: In the production of fuel chips, the most versatile machine is the disc shredder, which has a number of advantages, as it can operate both directly at the logging site and at the forest warehouse. The focus of this study is on disc shredders with top-discharge of chips and is related to the development of an energy-saving hydraulic drive for the cutting disc to reduce energy consumption by accumulating the braking energy of the disc and returning it when the disc accelerates, as well as damping dynamic loads at startup and reducing vibrations in operation.

Ключевые слова: топливная щепа, рубильная машина, демпфирование, энергосберегающий гидропривод.

Keywords: fuel wood chips, chipper, damping, energy-saving hydraulic drive.

На сегодняшний день рубильная машина, служащая для получения экологически чистого и возобновляемого вида топлива, является актуальной. Из перечня технических средств, используемых в цепочке производства топливной щепы, рубильная машина является наиболее энергоемкой, сложной и дорогостоящей. Существует большое разнообразие конструктивных схем рубильных машин. Наиболее универсальной (имеет возможность работать как непосред-

ственно на лесосеке, так и на лесном складе) является дисковая рубильная машина, обладающая рядом преимуществ.

Исследования Германовича А.О. направлены на изучение процесса измельчения древесного сырья в топливную щепу с применением мобильной рубильной машины с автономным приводом, который сопровождается вибрацией ее агрегатов и модулей, учет которой необходим при проектировании данной техники [1].

Лой В.Н указал в своей работе на то, что мобильная рубильная машина представляет сложную конструкцию взаимосвязанных между собой узлов и механизмов. Все они, как правило, приводятся в действие от автономного двигателя через механические (ножевой барабан, вентилятор, винтовой конвейер) и гидравлические (механизм подачи (подающий транспортер, вальцы) передачи [2].

Голякевичем С.А. [3]. приводятся итоги исследований эффективности эксплуатации рубильной машины на операции измельчения древесины. Описаны потенциальные условия эксплуатации машин на нижних складах, лесосеках и при изменяющихся условиях. В своих исследованиях он определил, что в последнее время помимо высокой мощности и производительности, переработчики хотят получить и высокую степень мобильности со снижением затрат на перегоны. Если предполагается работа в условиях рассредоточенной сырьевой базы (в нескольких областях, снабжая щепой несколько энергообъектов либо работа на услугах) и пробегах в месяц более 1000...1500 км – выбирают рубильную машину на базе шасси грузовых автомобилей

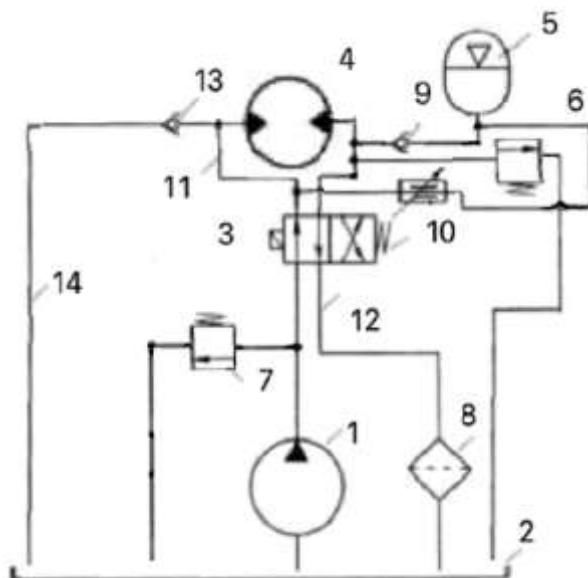
Процесс работы мобильной дисковой рубильной машины состоит из повторяющегося цикла, который включает два наиболее энергозатратных всплеска давления в гидросистеме. Первая составляющая представляет собой непосредственно сам процесс пуска привода рубильной машины, когда происходит резкий скачок давления в гидросистеме. Второй составляющей является процесс измельчения древесного сырья в щепу [4].

На основании проведенных исследований научных трудов, посвященных изучению рабочего процесса привода рубильных машин [9, 10] можно сделать вывод о том, что до сих пор недостаточно внимания уделялось рассмотрению вопросов, связанных с разработкой энергосберегающего гидропривода ножевого диска для снижения энергозатрат путем аккумулирования энергии торможения ножевого диска момент остановки рубильной машины при окончании рабочего цикла или стопорении рабочего органа при забивании, в этот момент возникает гидравлический удар при этом резкий скачок давления может повредить элементы гидросистемы.

Нами разработана гидравлическая схема рубильной машины с ножевым диском с приводом от гидромотора, подключенного к гидросистеме трактора МТЗ-82 (рисунок 1). В рабочем режиме насос 1 приводится в действие от двигателя трактора и подает рабочую жидкость по магистрали 2 из бака через распределитель 3 в гидромотор 4, который вращает режущий диск рубильной машины и измельчает древесину в щепу для биотоплива. В момент выключения распределителя 3, при остановке рубильной машины, гидропневмоаккумулятор

5 выполняет роль тормоза, поглощая энергию торможения. В этом случае режущий диск продолжает вращаться по инерции, а гидромотор 4 работает в режиме насоса и нагнетает жидкость, а гидропневмоаккумулятор 5 до полной его зарядки, а затем срабатывает предохранительный клапан 6 и сбрасывает излишек рабочей жидкости в бак 2. В моменты разгона и торможения диска гидропневмоаккумулятор 5 также работает в качестве демпфера и гасит всплески давления. При повторном пуске рубильной машины, рабочая жидкость насосом 1 подается через распределитель в гидромотор 3 и одновременно через регулируемый дроссель 6 рабочая жидкость подается из полностью заряженного гидропневмоаккумулятора 5 в гидромотор 3 и снижает энергозатраты на разгон режущего диска. Насос 1 защищен от перегрузок предохранительным клапаном 7. Фильтр 8 установлен на сливной гидролинии в гидробаке.

Ниже представлена математическая модель разгона режущего диска рубильной машины с приводом от гидромотора, подключенного к гидросистеме трактора МТЗ-82, в которой гидроаккумулятор выполняет роль демпфера, сглаживая всплески давления в гидросистеме привода в момент пуска.



(1 – гидронасос; 2, 11, 12, 14 – магистраль гидролинии; 3 – распределитель; 4 – гидромотор; 5 – гидропневмоаккумулятор; 6, 7 – предохранительный клапан; 8 – фильтр; 9, 13 – обратный клапан; 10 – дроссель).

Рисунок 1 – Гидравлическая схема рубильной машины с ножевым диском с приводом от гидромотора, подключенного к гидросистеме трактора МТЗ-82

Уравнение вращательного движения режущего диска:

$$J \frac{d\omega}{dt} = M_{\text{гидр}}(t) - M_{\text{тр}}(\omega) - M_{\text{рез}}(\omega) \quad (1)$$

где J – момент инерции режущего диска, $\text{кг} \cdot \text{м}^2$ (оценка для диска $\varnothing 600$ мм); ω – угловая скорость вращения гидромотора, с^{-1} ; $M_{\text{гидр}}$ – движущий момент гидромотора, Нм; $M_{\text{тр}}$ – момент трения, Нм; $M_{\text{рез}}$ – момент резания, Нм.

Момент инерции режущего диска определяется по формуле:

$$J = \frac{1}{2} m_{disk} R^2 \quad (2)$$

Принимаем: $m_{disk} \approx 120$ кг .

$$J = 0,5 \cdot 120 \cdot 0,3^2 = 5,4 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$$

Движущий момент гидромотора:

$$M_{гидр}(t) = \frac{V_m}{2\pi} \cdot \eta_m \cdot (p_{нас}(t) - p_{др}) \quad (3)$$

где V_m – рабочий объем гидромотора, м³/об; $p_{нас}$ – давление на выходе насоса с учетом демпфирования, Па; η_m – механический КПД гидромотора (в двигательном режиме, обычно 0.9–0.95); $p_{др}$ – давление в дренажной линии (обычно ≈ 0).

Давление в гидропневмоаккумуляторе при расширении газа (политропный процесс) [5]:

$$p_{ак}(t) = p_{ак}^{max} \left(\frac{V_{газ}^{min}}{V_{газ}^{min} + V_{масла}^{отд}(t)} \right)^n \quad (4)$$

где $p_{ак}$ – давление в гидропневмоаккумуляторе, Па; $V_{газ}$ – объем газа в гидропневмоаккумуляторе, м³; $V_{масла}$ – объем масла в гидропневмоаккумуляторе, м³.

Расход рабочей жидкости из гидропневмоаккумулятора равен расходу гидромотора:

$$\frac{dV_{масла}}{dt} = -\eta_{об} \frac{V_m(t)}{2\pi} \omega(t) \quad (5)$$

где $\eta_{об}$ – объемный КПД гидромашины (в двигательном режиме, обычно 0,9...0,95); V_m – рабочий объем гидромотора, м³/об; ω – угловая скорость вращения гидромотора, с⁻¹.

Отрицательный знак означает то, что убывает из аккумулятора.

Уравнение расходов рабочей жидкости в гидроприводе рубильной машины в рабочем режиме [5]:

В момент пуска рубильной машины гидропневмоаккумулятор забирает часть расхода, сглаживая пик давления:

$$Q_{нас} = Q_{мотор}(t) + Q_{ак}(t) \quad (6)$$

где $Q_{мотор}$ – расход жидкости гидромотора м³/с; $Q_{ак}$ – расход жидкости гидропневмоаккумулятора м³/с.

Тогда расход в аккумуляторе можно рассчитать:

$$Q_{ак}(t) = \frac{V_0}{n p_0^{1/n}} \cdot \frac{d}{dt} (p_{ак}^{1/n}) \quad (7)$$

где V_0 – начальный объем газа; n – показатель политропы (для быстрых процессов $\approx 1,3...1,4$); $p_{ак}$ – давление в гидропневмоаккумуляторе, Па; или в дифференциальной форме:

$$\frac{dp_{ак}}{dt} = \frac{n \cdot p_{ак}^{1-1/n} \cdot Q_{ак}(t)}{V_0 / p_0^{1/n}} \quad (8)$$

Давление в системе (с учетом дросселя между насосом и аккумулятором):

$$p_{\text{сист}}(t) = p_{\text{ак}}(t) + k_{\text{др}} \cdot Q_{\text{ак}}(t)^2 \quad (9)$$

где $k_{\text{др}}$ – гидравлическое сопротивление дросселя (настраиваемый параметр).

Модель гидропневмоаккумулятора-демпфера, может быть представлена следующим образом [5].

При пуске гидропневмоаккумулятор работает в режиме демпфирования пульсаций:

$$p_{\text{ак}} \cdot V_{\text{газа}}^n = \text{const} \quad (10)$$

$$V_{\text{газа}}(t) = V_0 - \int_0^t Q_{\text{ак}}(\tau) d\tau \quad (11)$$

где V_0 – начальный объем газа при p_0 , м³; n – показатель политропы (для быстрых процессов $\approx 1,3 \dots 1,4$); $Q_{\text{ак}}(t)$ – расход жидкости через гидромотор, м³/с.

Предварительное давление заряда (рекомендуется 0,9 от минимального рабочего давления):

$$p_0^{\text{зар}} = 0,9 \cdot p_{\text{мин}}^{\text{раб}} \quad (12)$$

Для расчетов принимаем следующие характеристики: $p_{\text{мин}}^{\text{раб}} = 8$ МПа; $p_0^{\text{зар}} = 7,2$ МПа; $V_0 = 1$ л (малый гидропневмоаккумулятор для демпфирования).

Динамика давления при пуске может быть представлена следующим образом:

Классическая модель демпфирования пуска:

$$P_{\text{нас}}(t) = p_{\text{уст}} \cdot (1 - e^{-t/\tau_{\text{демп}}}) \quad (13)$$

где $\tau_{\text{демп}}$ – постоянная времени демпфера; $p_{\text{уст}}$ – давление установленное в гидропневмоаккумуляторе, Па.

$$\tau_{\text{демп}} = \frac{V_0}{n \cdot p_0^{1/n}} \cdot \frac{1}{K_{\text{дрос}}} \quad (14)$$

Без демпфера ($\tau_{\text{демп}} \rightarrow 0$) возникает ударный пик давления:

$$p_{\text{пик}} \approx p_{\text{уст}} + \frac{\rho \cdot \zeta \cdot \Delta Q}{A_{\text{тр}}} \quad (15)$$

где $p_{\text{пик}}$ – пиковое давление, Па; $p_{\text{уст}}$ – установившееся (рабочее) давление, Па; ρ – плотность рабочей жидкости (гидравлического масла). кг/м³; ζ – скорость распространения ударной волны (или приведенная скорость звука) в гидравлической системе, м/с; ΔQ – изменение (приращение) расхода рабочей жидкости, м³/с; $A_{\text{тр}}$ – площадь поперечного сечения трубопровода (или проходного сечения), м².

С демпфером пик «срезается» до безопасного уровня.

Давление в гидропневмоаккумуляторе [6] при расширении газа (политропный процесс):

$$p_{\text{ак}}(t) = p_{\text{ак}}^{\text{max}} \left(\frac{V_{\text{газ}}^{\text{min}}}{V_{\text{газ}}^{\text{min}} + V_{\text{масла}}^{\text{отд}}(t)} \right)^n \quad (16)$$

Объем газа в аккумуляторе:

$$V_{\text{газ}}(t) = V_{\text{газ}}^{\text{min}} + V_{\text{масла}}^{\text{отд}}(t) \quad (17)$$

где $V_{\text{газ}}(\mathbf{0}) = V_{\text{газ}}^{\min} \approx 1,9$ л (сжатый газ); $V_{\text{масла}}(\mathbf{0}) = V_{\text{масла}}^{\max} \approx 2,1$ л (масло в аккумуляторе).

Представим систему дифференциальных уравнений для моделирования разгона режущего диска рубильной машины в гидросистеме привода будет выглядеть:

$$\left\{ \begin{array}{l} J \frac{d\omega}{dt} = \frac{V_m}{2\pi} \cdot \eta_m \cdot p_{\text{нас}}(t) - k_{\text{тр}} \cdot \omega - M_{\text{сх}} \\ \frac{dp_{\text{ак}}}{dt} = \frac{n \cdot p_{\text{ак}}^{1-1/n}}{V_0/p_0^{1/n}} \cdot Q_{\text{ак}}(t) \\ Q_{\text{ак}}(t) = Q_{\text{нас}} - \frac{V_m}{2\pi} \eta_v \omega(t) \\ p_{\text{сист}}(t) = p_{\text{ак}}(t) + k_{\text{др}} \cdot Q_{\text{ак}}(t)^2 \end{array} \right. \quad (18)$$

Начальные условия (после торможения) где $\omega(\mathbf{0}) = 0$ – ротор неподвижен; $p_{\text{ак}}(\mathbf{0}) = p_{\text{ак}}^{\max} \approx 28,5$ МПа (конечное давление после торможения).

Таблица 1 – Параметры дисковой рубильной машины (для диска Ø600 мм)

Параметр	Значение	Обозначение
Момент инерции	5,4 кг·м ²	J
Рабочий объем гидромотора	56 см ³ /об	V_m
Механический КПД	0,92	η_m
Объемный КПД	0,95	$\eta_{\text{об}}$
Номинальный расход насоса	80 л/мин	$Q_{\text{нас}}$
Объем аккумулятора	1,0 л	V_0
Предварительное давление	7,2 МПа	$p_0^{\text{зар}}$
Показатель политропы	1,4	n
Коэффициент трения	0,8 Н·м·с/рад	$k_{\text{тр}}$
Момент страгивания	20 Н·м	$M_{\text{сх}}$
Коэффициент сопротивление дросселя	0,05 МПа·с ² /л ²	$k_{\text{др}}$

Используя программное моделирование на базе Python, а так же программный модуль динамического расчета гидропривода ротора измельчителя древесины [7], введем данные для моделирования разгона режущего диска рубильной машины от ротора гидропневмоаккумулятора.

Результаты полученного моделирования разгона режущего диска рубильной машины от ротора гидропневмоаккумулятора представлены ниже и позволяют построить графики разгона ротора и давления в гидропневмоаккумуляторе (рис. 2, 3).

Таблица 2 – Результаты моделирования разгона режущего диска

Параметр	Значение
Время разгона до 1000 об/мин	3.2 с
Максимальная частота вращения	1000 об/мин
Начальное давление в ГА	8 МПа
Конечное давление в ГА	12.3 МПа
Расход рабочей жидкости	2.05 л (из 2.1 л)
Энергия, отданная ГА	89.7 кДж
Кинетическая энергия ротора	72.4 кДж
Эффективность разгона	80.7%

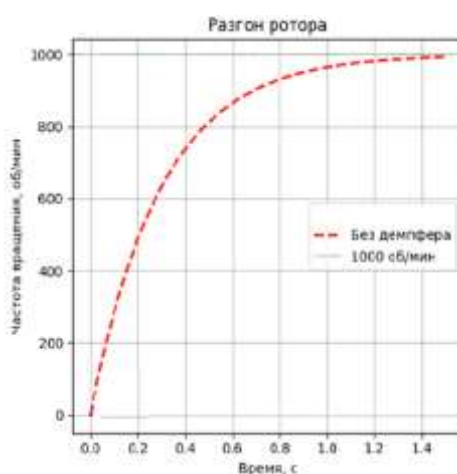


Рисунок 2 – Зависимость частоты вращения режущего диска рубительной машины при разгоне от времени

- красная пунктирная (без гидропневмоаккумулятора): разгон 0,95 с., но необходимо перерегулирование.

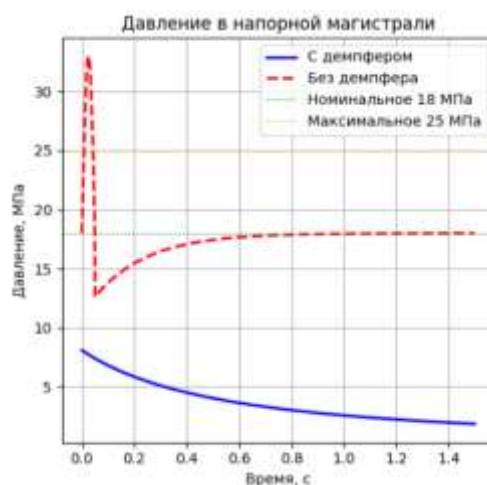


Рисунок 3 – Зависимость давления в гидроприводе от времени

- без гидропневмоаккумулятора: острый пик до 32,8 МПа (гидроудар) (превышение $p_{ак}^{max}$ на 30%);

- с гидропневмоаккумулятором: плавный подъем до 19,2 МПа, затем стабилизация на 18 МПа
- экспоненциальное снижение с 28.5 до 12.3 МПа;
- наиболее интенсивное падение в первые 2 секунды.

По результатам моделирования сравним момент разгона режущего диска рубильной машины от гидропневмоаккумулятора и без него (табл. 3).

Таблица 3 – Результаты моделирования разгона режущего диска рубильной машины (для диска Ø600 мм)

Параметр	Без гидропневмоаккумулятора	С гидропневмоаккумулятором	Улучшение
Время разгона до 1000 об/мин	0,95 с	1,18 с	+24% (плавнее)
Пиковое давление	28,5 МПа	19,2 МПа	-33%

Из таблицы 3 следует, что при подключенном гидропневмоаккумуляторе 5, в момент пуска часть рабочей жидкости поступает через регулируемый дроссель 10 в гидропневмоаккумулятор и пиковое давление снижается на 33%, а время разгона диска увеличивается на 24 %, т.е. происходит более плавный разгон.

Выводы

1. Разработана принципиальная схема энергосберегающего гидропривода мобильной рубильной машины, подключенного к гидросистеме трактора МТЗ-82, в которой гидропневмоаккумулятор запасает энергию торможения диска и отдает ее при его разгоне, а также выполняет роль демпфера, сглаживая всплески давления в гидросистеме привода в момент пуска и в рабочем режиме.

2. Разработана математическая модель рабочего процесса режущего диска рубильной машины с приводом от гидромотора. Выведена система уравнений, описывающая динамику работы в момент разгона режущего диска рубильной машины от гидроаккумулятора ротора. Система состоит из уравнения вращательного движения режущего диска, уравнение расхода жидкости с гидроаккумулятором.

3. При подключенном гидропневмоаккумуляторе в момент пуска часть рабочей жидкости поступает через регулируемый дроссель в гидропневмоаккумулятор и пиковое давление снижается на 33%, а время разгона диска увеличивается на 24 %, т.е. происходит более плавный разгон.

Список литературы

1. Германович А.О. Технологические процессы заготовки топливной щепы мобильными рубильными машинами / А.О. Германович // Междунар. науч. онлайн-конф.: Современные технологии деревообрабатывающей промышленности. Минск: Белорусский государственный технологический университет, 2018. С. 209–214.

2. Лой В.Н. Компоновочные схемы самоходных рубильных машин / В.Н. Лой, А.О. Германович, В.В. Чернявский // Мат-лы 85-й науч.-технич. конф. с междунар. участием: Лесная инженерия, материаловедение и дизайн. Минск, 2021. С. 40–41.
3. Голякевич С.А. Анализ и перспективы использования лесозаготовительной техники в природно-производственных условиях Республики Беларусь / С.А. Голякевич // Труды БГТУ. Серия 1: Лесное хозяйство, природопользование и переработка возобновляемых ресурсов. 2021. № 2 (246). С. 188-195.
4. Шейнман Л.Е. Гидравлические и пневматические приводы: курс лекций / Л.Е. Шейнман. – Ижевск: Изд-во ИжГТУ, 2006. – 82 с.
5. Гидравлика, гидромашины и гидроприводы: учебник для машиностроительных вузов / Т.М. Башта, С.С. Руднев, Б.Б. Некрасов [и др.]. – М.: Альянс, 2022. – С. 34-68.
6. Сагдатуллин А.М. Разработка математической модели автоматизированного электромеханического комплекса насосной станции / А.М. Сагдатуллин // Математическое моделирование. – 2015. – Т. 27, № 4. – С. 3-15.
7. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025669616 Российская Федерация. Программный модуль динамического расчета гидропривода ротора измельчителя древесины: заявл. 02.07.2025 : опубл. 29.07.2025 / С.В. Прокопенко, А.А. Платонов.
8. Прокопенко С.В. Повышение эффективности рубильных машин при переработке древесины / С.В. Прокопенко, П.И. Попиков, А.А. Платонов // Технологии в биоэкономике: инновации и вызовы в XXI веке: Материалы Международного форума, Воронеж, 28-30 мая 2025 года. – Воронеж: Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова, 2025. – С. 291-297. – DOI: 10.58168/TViEc2025_291-297.
9. Патент на полезную модель № 234571 U1 Российская Федерация, МПК B27L 11/00. Устройство для измельчения порубочных остатков: заявл. 15.02.2025: опубл. 02.06.2025 / М.В. Драпалюк, А.А. Платонов, П.И. Попиков; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова».
10. Платонов А.А. Исследование и систематизация существующих технологических процессов удаления нежелательной растительности / А.А. Платонов // Системы. Методы. Технологии. – 2020. – № 3(47). – С. 63-73. – DOI: 10.18324/2077-5415-2020-3-63-73.

References

1. Germanovich A.O. Technological processes of harvesting fuel chips by mobile chopping machines / A.O. Germanovich // International Scientific Journal. online conference: Modern technologies of the woodworking industry. Minsk: Belarusian State Technological University, 2018. pp. 209-214.
2. Loy V.N. Layout schemes of self-propelled chopping machines / V.N. Loy, A.O. Germanovich, V.V. Chernyavsky // Proceedings of the 85th Scientific and

Technical Conference with International Participation: Forest Engineering, Materials Science, and Design. Minsk, 2021. pp. 40-41.

3. Golyakevich S.A. Analysis and Prospects of Using Logging Equipment in the Natural and Industrial Conditions of the Republic of Belarus / S.A. Golyakevich // Proceedings of BSTU. Series 1: Forestry, Environmental Management, and Processing of Renewable Resources. 2021. № 2 (246). – pp. 188–195.

4. Sheinman L.E. Hydraulic and pneumatic drives: a course of lectures / L.E. Sheinman. – Izhevsk: IzhSTU Publishing House, 2006. – 82 p.

5. Hydraulics, Hydraulic Machines and Hydraulic Drives: Textbook for Engineering Universities / T.M. Bashta, S.S. Rudnev, B.B. Nekrasov [et al]. – Moscow: Alliance, 2022. pp. 34-68.

6. Sagdatullin A.M. Development of a mathematical model for the automated electromechanical system of a pumping station / A.M. Sagdatullin // Mathematical Modeling. – 2015. – Vol. 27, № 4. – pp. 3-15.

7. Certificate of State Registration of a Computer Program No. 2025669616, Russian Federation. Software module for dynamic calculation of the hydraulic drive of the wood shredder rotor : applied for 02.07.2025: published on 29.07.2025 / S.V. Prokopenko, A.A. Platonov.

8. Prokopenko, S.V. Improving the Efficiency of Chopping Machines in Wood Processing / S.V. Prokopenko, P.I. Popikov, A.A. Platonov // Technologies in Bioeconomy: Innovations and Challenges in the 21st Century: Proceedings of the International Forum, Voronezh, May 28-30, 2025. – Voronezh: Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, 2025. – pp. 291-297. – DOI6 10.58168/TBiEc2025_291-297.

9. Utility Model Patent № 234571 U1 (Russian Federation), IPC B27L 11/00. Device for comminuting logging residues: application filed 15.02.2025; published 02.06.2025 / M.V. Drapalyuk, A.A. Platonov, P.I. Popikov; applicant: Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov».

10. Platonov A.A. Research and systematization of existing technological processes for the removal of unwanted vegetation / A.A. Platonov // Systems. Methods. Technologies. – 2020. – No. 3(47). – P. 63–73. – DOI: 10.18324/2077-5415-2020-3-63-73.

**РЕЗУЛЬТАТЫ ОПТИМИЗАЦИИ КОНСТРУКТИВНЫХ
ПАРАМЕТРОВ И РЕЖИМОВ РАБОТЫ ЩЕЛЕРЕЗНОГО ЦЕПНОГО
РАБОЧЕГО ОРГАНА**

Саая С.С.Ш.

*Воронежский государственный лесотехнический университет
имени Г.Ф. Морозова, Воронеж, Россия*

**RESULTS OF OPTIMIZATION OF DESIGN PARAMETERS AND OPERAT-
ING MODES OF A CHAIN-CUTTING DEVICE**

Saaya S.S.Sh.

*Voronezh State University of Forestry and Technologies
named after G.F. Morozov, Voronezh, Russia*

Аннотация: Выполнение работ по лесовосстановлению целесообразно осуществлять с применением новых щеледренажных машин и механизмов. В статье рассматриваются вопросы оптимизации конструктивных и технологических параметров нового цепного рабочего органа.

Abstract: Reforestation work should be carried out using new slit-drainage machines and mechanisms. This article examines the optimization of the design and technological parameters of the new chain-operated working tool.

Ключевые слова: лесовосстановление, заболоченные участки, дренирование, рабочий орган, параметры, оптимизация.

Keywords: reforestation, wetlands, drainage, working element, parameters, optimization.

В современной России лесное хозяйство уделяет недостаточно внимания вопросам гидролесомелиорации [1], несмотря на богатый опыт, накопленный в советский период и наглядно демонстрирующий эффективность подхода: на подготовленных и осушенных лесных землях сформировались продуктивные древостои, успешно эксплуатируемые в настоящее время [2-4]. Осушение заболоченных и избыточно увлажненных лесных участков является обязательным условием для создания стабильных и продуктивных лесных насаждений. Без проведения осушения лесовосстановление на заболоченных и избыточно увлажненных участках становится экономически нецелесообразным и экологически неоправданным [5], так как молодые саженцы лесных культур не получают необходимых условий для роста.

Экономическая эффективность осушительных мероприятий проявляется в долгосрочной перспективе: увеличение приживаемости саженцев лесных культур с 30...40 % (на заболоченных участках) до 80...90 % (после осушения)

обеспечивает повышение продуктивности лесных насаждений, сокращает сроки возобновления древостоев [6, 7].

При выполнении работ по осушению избыточно увлажненных и заболоченных лесных территорий для последующего лесовосстановления на участках лесных зон применяются различные машины и механизмы, а также технологические схемы дренирования [8, 9]. Перспективными представляются щеледренажные машины с цепными рабочими органами (рис. 1).



Рисунок 1 – Щеледренажные машины с цепными рабочими органами

В рамках выполнения диссертационного исследования была разработана новая конструкция цепного рабочего органа [10], отличительной особенностью которого являлось наличие изогнутых резцов (рис. 2).

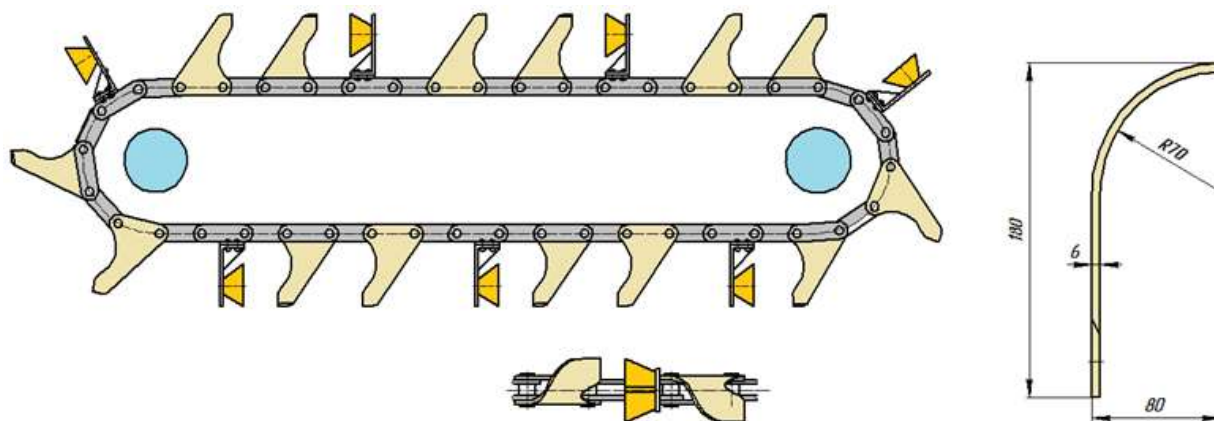


Рисунок 2 – Схема геометрии режущей цепи с резцами в сборе

Имитационное исследование возможных радиусов скругления изогнутых резцов позволило выявить область допустимых соотношений (рис. 3) ширины режущей цепи, указанных радиусов, а также ширины формирующейся дренажной щели, при которых будет обеспечена эффективная работа нового цепного рабочего органа щеледренажной машины.

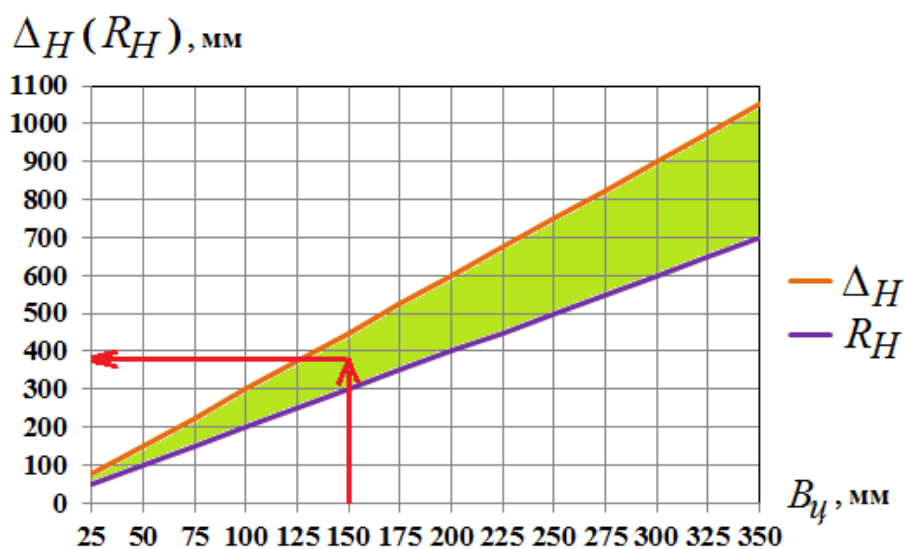


Рисунок 3 – Допустимые соотношения радиуса R_H скругления изогнутых резцов, ширины $B_{ц}$ режущей цепи и ширины Δ_H дренажной щели

Указанная область, ограниченная прямыми $R_H = f(B_{ц})$ и $\Delta_H = f(B_{ц})$ и выделенная на рис. 3 зелёным цветом, позволяет определить допустимые величины радиуса R_H скругления изогнутых резцов нового цепного рабочего органа.

При исследовании зависимости толщины $\delta_{ср} = f(n_{бз}, f_{nn})$ срезаемой стружки торфяно-болотной почвы от частоты вращения ведущей звездочки $n_{бз}$ и поступательной подачи f_{nn} выявлено (рис. 4) следующее.

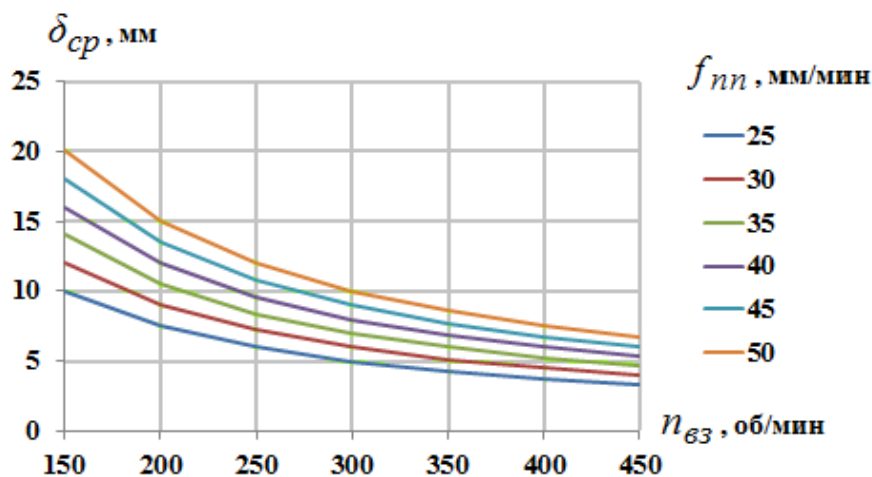


Рисунок 4 – Зависимость толщины срезаемой стружки торфяно-болотной почвы $\delta_{ср}$ от частоты вращения ведущей звездочки $n_{бз}$ и поступательной подачи f_{nn} .

В пределах неизменной частоты вращения ($n_{бз} = const$) увеличение поступательной подачи f_{nn} приводит к возрастанию толщины $\delta_{ср}$ срезаемой изогнутыми резцами стружки на 96...100 %, при этом по абсолютным величинам более

быстрые темпы такого увеличения характерны для меньших величин $n_{\text{вз}}$. Возрастание частот вращения $n_{\text{вз}}$ в 3 раза (со 150 об/мин до 450 об/мин) влечет за собой уменьшение толщины $\delta_{\text{ср}}$ срезаемой изогнутыми резцами стружки на 190...210 %.

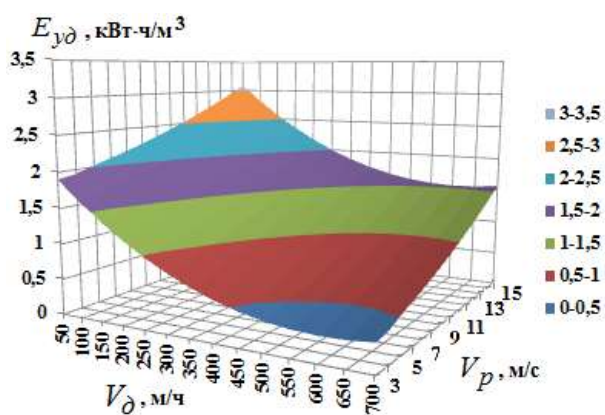
Исследование зависимостей энергоёмкости E_{yd} (кВт·ч/м³) прорезания дренажной щели новым цепным рабочим органом в мерзлой и талой почве, в том числе с древесными включениями, от скорости резания цепи V_p (м/с), скорости движения щеледренажной машины V_d (м/ч) и поступательной подачи f_{nn} (мм/мин) осуществлялось посредством применения программных продуктов, на которые были получены свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ [11].

Результаты выявления показателей формирования осушительных дрен для подготовки заболоченных участков под посадку лесных культур новым цепным рабочим органом щеледренажной машины, а также его характеристик, представлены на рис. 5, а-в.

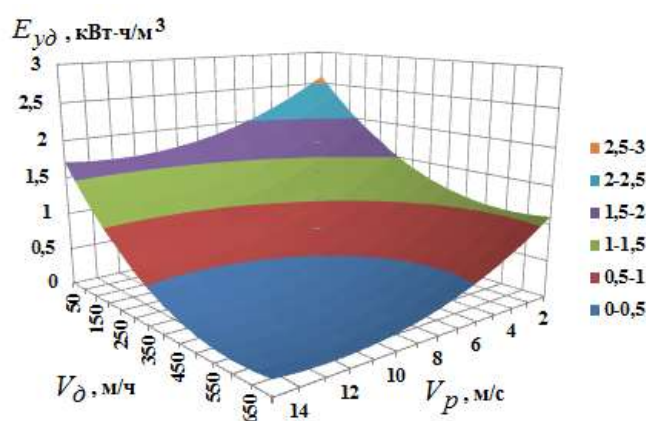
Анализ зависимости $E_{\text{yd}} = f(V_p, V_d)$ энергоёмкости E_{yd} прорезания дренажной щели в мерзлой торфяно-болотной лесной почве (рис. 5, а) позволил выявить, что при постоянной скорости резания ($V_p = \text{const}$) увеличение рабочей скорости агрегата с цепным рабочим органом на каждые 50 м/ч обуславливает снижение энергоёмкости на 2,2...19,7 %, при этом увеличение скорости движения щеледренажной машины с 50 м/ч до 600 м/ч обеспечит теоретическое снижение энергоёмкости E_{yd} на 410,5 %. Однако при дальнейшем увеличении скорости движения V_d машины наблюдается тенденция к резкому возрастанию энергоёмкости E_{yd} прорезания дренажной щели.

Наименьшие величины энергоёмкости (при стабильной величине $V_p = \text{const}$) наблюдаются при скорости движения машины $V_d = 550...650$ м/ч (аналогично – для талой почвы; рис. 5, б). При неизменной величине скорости движения ($V_d = \text{const}$) возрастание скорости резания цепью V_p мерзлой почвы на каждый 1 м/с обуславливает увеличение энергоёмкости на 2,1...4,1 %, при этом изменение величины V_p с 2 м/с до 15 м/с приводит к увеличению энергоёмкости прорезания дренажной щели на 62,2...84,9 %.

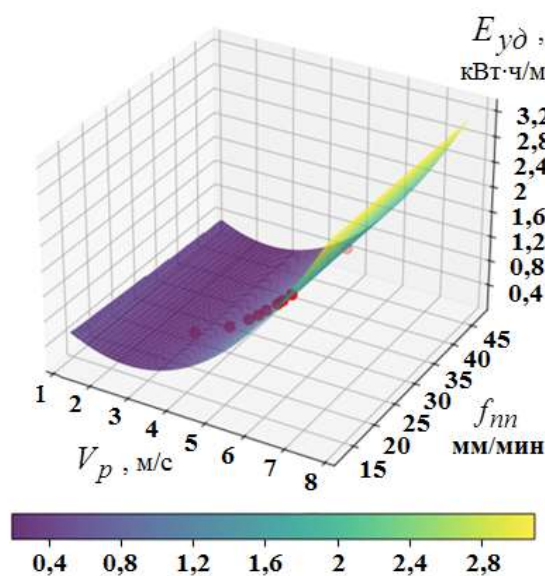
Аналогично, анализ зависимости $E_{\text{yd}} = f(V_p, V_d)$ энергоёмкости E_{yd} формирования дрены в талой торфяно-болотной лесной почве (рис. 5, б) позволил выявить, что при постоянной скорости резания ($V_p = \text{const}$) увеличение рабочей скорости агрегата с цепным рабочим органом на каждые 50 м/ч обуславливает снижение энергоёмкости на 1,8...13,4 %, при этом увеличение скорости движения щеледренажной машины с 50 м/ч до 600 м/ч обеспечит теоретическое снижение энергоёмкости E_{yd} на 175,8 %.



а)



б)



в)

а – в мерзлой почве; б – в талой почве;

в – в талой почве с древесными включениями

Рисунок 5 – Зависимость энергоёмкости $E_{y\partial}$ прорезания дренажной щели от скорости резания цепи V_p , скорости движения щеледренажной машины V_{∂} и поступательной подачи f_{nn} .

При неизменной величине скорости движения ($V_{\partial} = \text{const}$) возрастание скорости резания цепью V_p талой почвы на каждый 1 м/с обуславливает уменьшение энергоёмкости на 2,6...10,8 %, при этом изменение величины V_p с 2 м/с до 12 м/с приводит к снижению энергоёмкости прорезания дренажной щели на 56,1...80,5 %. Наименьшие величины энергоёмкости (при стабильной величине $V_{\partial} = \text{const}$) наблюдаются при скорости резания цепи $V_p = 11...14$ м/с.

Анализ зависимости $E_{y\partial} = f(V_p, f_{nn})$ энергоёмкости $E_{y\partial}$ прорезания дренажной щели в талой торфяно-болотной лесной почве с древесными включениями (рис. 5, в) позволил выявить, что при постоянной поступательной подаче рабочего органа ($f_{nn} = \text{const}$) наименьшие величины энергоёмкости до-

стигаются при скоростях резания $V_p = 2,5 \dots 3,5$ м/с, при этом увеличение скоростей резания сверх указанного диапазона обуславливает резкое увеличение энергоёмкости на 350...420 %. При постоянной скорости резания ($V_p = \text{const}$) увеличение поступательной подачи рабочего органа обуславливает снижение затрат энергии на резание талой почвы на 123...175 %.

Таким образом, исследование зависимостей $E_{y\partial} = f(V_p, V_{\partial})$ энергоёмкости $E_{y\partial}$ прорезания дренажной щели в мерзлой и талой (в том числе, с древесными включениями) торфяно-болотной лесной почве выявило, что по критерию $E_{y\partial} \rightarrow \min$ для мерзлой почвы целесообразно назначение скоростей резания цепью $V_p = 2 \dots 5$ м/с, для талой почвы – $V_p = 11 \dots 14$ м/с, для почвы с древесными включениями – $V_p = 2,5 \dots 3,5$ м/с. Во всех случаях целесообразно стремиться к увеличению скоростей движения щеледренажной машины до оптимальных значений $V_{\partial} = 550 \dots 650$ м/ч.

Список литературы

1. Залесов С.В. Гидролесомелиорация избыточно увлажненных земель. Термины, понятия и определения / С.В. Залесов, А.В. Тукачева. – Екатеринбург: Изд-во УГЛТУ, 2018. – 67 с.
2. Ещё раз к вопросу о гидролесомелиорации торфяных болот / В.Ф. Корольчук, В.К. Константинов, А.В. Кудряшев [и др.] // Труды Санкт-Петербургского научно-исследовательского института лесного хозяйства. – СПб: Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт лесного хозяйства, 2011. – С. 295-309.
3. Platonov A.A. Modern state of technical means to remove uncontrolled vegetation / A.A. Platonov // Lesnoy Vestnik. Forestry Bulletin. – 2021. – Vol. 25, № 1. – pp. 115-122. – DOI: 10.18698/2542-1468-2021-1-115-122.
4. Совершенствование технологий и техники для расчистки площадей от нежелательной древесно-кустарниковой растительности / М.В. Драпалюк, В.Н. Коротких, А.А. Платонов [и др.] // Леса России и хозяйство в них. – 2025. – № 3(94). – С. 136-146. – DOI: 10.51318/FRET.2025.94.3.014.
5. О лесоводственной эффективности осушения и лесокультурного освоения болот и их окраек / В.К. Константинов, С.А. Выродова, Ю.А. Фролов [и др.] // Лесное хозяйство и комплексное природопользование: Труды Санкт-Петербургского научно-исследовательского института лесного хозяйства. Выпуск 2(22). – СПб: Изд-во СПбНИИЛХ, 2010. – С. 133-138
6. Болат-Оол Ч.К. Оценка искусственного лесовосстановления в Кызылском лесничестве Республики Тыва / Ч.К. Болат-Оол, Ш.А. Седембиль // Научный аспект. – 2023. – Т. 29, № 12. – С. 356-362.
7. Естественное возобновление хвойных пород на площадях лесных культур / В.З. Нгуен, А.В. Грязькин, Н.В. Беляева [и др.] // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. – 2018. – № 223. – С. 6-15. – DOI: 10.21266/2079-4304.2018.223.6-15.

8. Саая С.С.Ш. Совершенствование рабочих органов щеледренажных мелиоративных машин путём обоснования кинематических соотношений работы цепи с чашеобразными резцами / С.С.Ш. Саая, С.Н. Долматов, С.Н. Орловский // Системы. Методы. Технологии. – 2026. – № 1(69). – С. 16-22. – DOI: 10.18324/2077-5415-2026-1-16-22.

9. Саая С.С.Ш. Технологии осушения болот щелевым дренажом / С.С.Ш. Саая, С.Н. Орловский // Мелиорация и водное хозяйство – основа продовольственной и экологической безопасности: материалы Юбилейной международной научно-практической конференции. – М: ФГБНУ «ФНЦ ВНИИГиМ им. А.Н. Костякова», 2024. – С. 398-407.

10. Патент на полезную модель № 234610 U1 Российская Федерация, МПК E02F 9/22, E02B 11/02, E02F 5/06. Режущий аппарат для формирования дренажных щелей / С.С.Ш. Саая, С.Н. Далматов; заявитель «Тувинский государственный университет»; № 2025100426; заявл. 14.01.2025; опубл. 03.06.2025.

11. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025619050 РФ. Программа для расчета энергоёмкости прорезания щели в торфе от скоростей резания и движения / С.С.Ш. Саая, С.Н. Долматов; заявитель «Тувинский государственный университет»; № 2025617848; заявл. 07.04.2025; опубл. 14.04.2025.

References

1. Zalesov S.V. Hydroforestry reclamation of excessively wetlands. Terms, concepts, and definitions / S.V. Zalesov, A.V. Tukacheva. – Ekaterinburg: USLTU Publishing House, 2018. – 67 p.

2. Once again on the issue of hydroforestry reclamation of peat bogs / V.F. Korolchuk, V.K. Konstantinov, A.V. Kudryashev [et al.] // Proceedings of the St. Petersburg Forestry Research Institute. - SPb: St. Petersburg Forestry Research Institute, 2011. - Pp. Modern state of technical means to remove uncontrolled vegetation / A.A. Platonov // Lesnoy Vestnik. Forestry Bulletin. – 2021. – Vol. 25, № 1. – pp. 115-122. – DOI: 10.18698/2542-1468-2021-1-115-122.

4. Improving technologies and equipment for clearing areas of unwanted trees and shrubs / M.V. Drapalyuk, V.N. Korotkikh, A.A. Platonov [et al.] // Forests of Russia and their management. – 2025. – № 3(94). – pp. 136-146. – DOI: 10.51318/FRET.2025.94.3.014.

5. On the silvicultural efficiency of drainage and silvicultural development of swamps and their edges / V.K. Konstantinov, S.A. Vyrodova, Yu.A. Frolov [et al.] // Forestry and Integrated Nature Management: Transactions of the St. Petersburg Forestry Research Institute. Vol. 2(22). – SPb: Publishing House of SPbNIILH, 2010. – Pp. 133-138

6. Bolat-Ool Ch.K. Assessment of artificial reforestation in the Kyzyl forestry of the Republic of Tyva / Ch.K. Bolat-Ool, Sh.A. Sedembil // Scientific aspect. – 2023. – Vol. 29, № 12. – pp. 356-362.

7. Natural regeneration of coniferous species in areas of forest plantations / V.Z. Nguyen, A.V. Gryazkin, N.V. Belyaeva [et al.] // Bulletin of the St. Petersburg Forest

Engineering Academy. – 2018. – № 223. – pp. 6-15. – DOI: 10.21266/2079-4304.2018.223.6-15.

8. Saaya S.S.Sh. Improvement of working bodies of slit drainage melioration machines by substantiating the kinematic relationships of the operation of a chain with cup-shaped cutters / S.S.Sh. Saaya, S.N. Dolmatov, S.N. Orlovsky // Systems. Methods. Technologies. – 2026. – № 1(69). – pp. 16-22. – DOI: 10.18324/2077-5415-2026-1-16-22.

9. Saaya S.S.Sh. Technologies for draining swamps with slit drainage / S.S.Sh. Saaya, S.N. Orlovsky // Land Reclamation and Water Management – the Basis of Food and Environmental Security: Proceedings of the Anniversary International Scientific and Practical Conference. – Moscow: Federal Scientific Center of Hydrometeorology and Metrology named after A.N. Kostyakov, 2024. – pp. 398-407.

10. Patent for Utility Model № 234610 U1 Russian Federation, IPC E02F 9/22, E02B 11/02, E02F 5/06. Cutting Apparatus for Forming Drainage Slits / S.S.Sh. Saaya, S.N. Dolmatov; applicant «Tuva State University»; № 2025100426; declared 14.01.2025; published 03.06.2025.

11. Certificate of state registration of computer program № 2025619050 of the Russian Federation. Program for calculating the energy intensity of cutting a gap in peat from cutting and movement speeds / S.S.Sh. Saaya, S.N. Dolmatov; applicant «Tuva State University»; № 2025617848; declared 07.04.2025; published 14.04.2025.

К ВОПРОСУ ВЫБОРА ПРОТОТИПА КОНСТРУКЦИИ БЕСПИЛОТНОЙ ЛЕСОХОЗЯЙСТВЕННОЙ ПЛАТФОРМЫ

Суханов Ю.В., Иванов В.А.

Петрозаводский государственный университет, Петрозаводск, Россия

ON THE SELECTION OF A DESIGN PROTOTYPE FOR AN UNMANNED FORESTRY PLATFORM

Sukhanov Yu.V., Ivanov V.A.

Petrozavodsk State University, Petrozavodsk, Russia

Аннотация: Рассмотрены перспективы и сложности применения наземных беспилотных решений в лесном хозяйстве. Показан подход к выбору существующих машин, конструкция которых может быть использована в качестве прототипа для создания отечественной беспилотной платформы.

Abstract: The article examines the prospects and challenges of using ground-based unmanned solutions in forestry. It considers approaches to selecting machines whose design can be used as a prototype for creating a domestic unmanned platform.

Ключевые слова: механизация лесохозяйственных работ, беспилотная платформа, прототип, конструктивные требования.

Keywords: mechanization of forestry, unmanned platform, prototype, design requirements.

В отличие от лесозаготовительных процессов, процессы лесовосстановления и ухода за лесом механизированы в недостаточной степени, причём это касается не только Российской Федерации, но и тех стран мира, где традиционно лесная отрасль считается самой передовой и где производят современные лесохозяйственные машины. Например, сегодня в Финляндии механизированная посадка леса составляет только 4%, хотя по прогнозам финских учёных десятилетней давности доля механизированной посадки леса должна была вырасти с 5% до 35% [1]. В соседней Швеции доля механизированной посадки около 1%, хотя в конце XX века она достигала 12%, в основном за счёт машин Silva Nova [2]. Аналогичная ситуация с механизацией посадки складывается и в других странах, включая Канаду, Германию, Бразилию. Доля механизированного ухода в странах Скандинавии также остаётся низкой и составляет всего несколько процентов, а в Канаде и Бразилии по статистике доля механизированного ухода выше, но только за счёт машин, которые вносят удобрения [3]. Такая ситуация объясняется в основном высокой стоимостью машин и их эксплуатации при недостаточном повышении производительности труда, а иногда и при снижении качества работ, что не позволяет им конкурировать с технологиями работ, где используются ручные или бензиномоторные инструменты.

Сегодня в разных отраслях народного хозяйства начинают использовать беспилотные решения, что связано с развитием компьютерных технологий и алгоритмов, а также с доступностью датчиков, сенсоров и технологий связи. Например, сегодня известны беспилотные и роботизированные наземные машины для сельского хозяйства и горнодобывающей отрасли, появляются экспериментальные разработки и в лесной отрасли.

Относительно традиционных лесных машин, когда оператор находится в кабине трактора, внедрение беспилотных решений потенциально в будущем позволяет получить следующие преимущества:

- снижение общей массы МТА (машинно-тракторного агрегата), за счёт отсутствия, как самого оператора, так и кабины с органами управления, причём, чем более лёгкая машина, тем более существенный будет выигрыш, что позволит беспилотной машине перевозить больший груз или передвигаться на большее расстояние, относительно традиционного решения той же массы;

- отсутствие оператора и кабины позволяет упростить компоновку МТА и даёт возможность более рационально разместить рабочие органы или груз, так как не требуется продумывать расположение кабины и удобство попадания в нее человека, заботиться об обзорности из кабины при проведении работ и т.д.;

- беспилотные решения позволяют отдалить оператора от места проведения опасных работ, а значит, и от опасных и вредных факторов, что позволит не заботиться о снижении уровня шума и вибраций или об эргономике в кабине, а также об уровне безопасности кабины (ROPS/FOPS);

- в отличие от человека с ручным или бензиномоторным инструментом, беспилотные машины в лесу могут работать и в тёмное время суток;

- если человеку ранее приходилось контролировать каждое движение беспилотной машины и ее рабочих органов, то, в будущем с развитием автоматизации, один оператор сможет управлять не одной, а сразу несколькими машинами, превращаясь из оператора в диспетчера, когда вмешиваться в работу автоматики придётся только в нештатных или сложных ситуациях, что позволит повысить производительность труда исходя из расчёта на одного работника;

- с развитием технологий связи оператор сможет больше находиться в населённом пункте, что позволит решить проблемы доставки работников в лес и создания комфортных условий для проживания в лесу во время вахты.

Технологическое отставание лесной отрасли от других отраслей экономики по направлению развития наземных беспилотных решений обусловлено рядом причин:

- постоянно изменяющиеся природно-производственные условия, характеризующиеся сложным рельефом, часто с резким перепадом высот, наличие труднопроходимых топких участков, препятствий в виде валунов, пней, упавших стволов деревьев и т. д.;

- возможность появления посторонних объектов или внезапных изменений: выход людей (туристов, охотников, грибников) или диких животных, падение деревьев, что делает лесную среду менее предсказуемой, чем карьер или сельскохозяйственные угодья;

– наличие высокой травы и густой листвы (проблема отличия деформируемых и недеформируемых препятствий), а также стволов оставшихся деревьев значительно ограничивает возможности автономной навигации с использованием камер и лидаров на лесной беспилотной машине;

– лесная инфраструктура расположена на обширных территориях и менее развита, чем у других отраслей народного хозяйства, что осложняет организацию работы, связи и транспортировки машин, людей и материалов;

– наземным беспилотным решениям для лесных задач требуется большая автономность, что делает использование ДВС (двигателя внутреннего сгорания) предпочтительным, в лесу машины сложнее обслуживать и ремонтировать;

– недостаток финансирования разработок лесохозяйственных машин.

Несмотря на множество проблем, активизация научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ по созданию отечественных беспилотных и автономных решений для лесного хозяйства, особенно с учётом появления в стране большого количества специалистов по беспилотной технике и наличия множество организаций и компаний с компетенциями в разработке беспилотных решений, может рассматриваться как возможное решение застарелых проблем лесного хозяйства, связанных с недостатком кадров и низкой производительностью тяжелого ручного труда.

При этом за счёт преимуществ беспилотных решений, компоновка и массогабаритные характеристики беспилотных лесных машин могут заметно отличаться от современных лесных машин. Так на компоновку беспилотной платформы будут влиять и ограничения существующих технологий, пока недостаточные для полноценной автоматизированной работы манипулятора лесной машины [4]. Например, применяемыми сегодня посадочными машинами для семян с закрытой корневой системой являются машины типа Braske P11.a, M-Planter или Risutec PM, агрегатируемые на стрелу среднего экскаватора или тяжёлого харвестера. Применение подобного решения в беспилотном варианте не позволит решить главные проблемы таких машин – высокую стоимость рабочей и базовой машины, а также маломобильность решения при относительно низкой производительности. Использование для посадки беспилотных решений по типу Moritz Fr70/75 Planter позволяет заметно уменьшить массогабаритные характеристики машины, но вынуждает отказаться от стрелы и использовать активную фрезу для подготовки посадочного места, что приведёт к снижению производительности. Другим решением может быть разделение функций между двумя машинами – одна готовит посадочные места, а другая производит посадку по типу машины RoboFoR. С одной стороны, это позволит снять с машины, производящей посадку семян, энергоёмкие функции подготовки посадочных мест, но, с другой стороны, потребует разработать способы нахождения борозды или дискретных посадочных мест на территории участка лесовосстановления. Аналогично беспилотный лёгкий харвестер для рубок ухода возможно будет трансформироваться в компактную беспилотную машину для работы под пологом леса без манипулятора с большим вылетом, напоминающим по компоновке Lokomo Makeri или гусеничный Bell Super T.

При классификации машин и механизмов по виду выполняемых операций следует обращать внимание [5], что выполнение той или иной операции ограничено конструкцией технологического оборудования, а состав технологического оборудования определяется параметрами базовой машины, которые не должны выходить за рамки лесоводственных требований к технологическому процессу и обеспечивать высокую рентабельность проведения работ.

Для выбора прототипа конструкции беспилотной лесохозяйственной платформы необходимо не только проанализировать востребованные лесохозяйственные работы, но и оценить существующие технические и технологические ограничения, негативно влияющие на возможность автоматизации некоторых работ. Ранее в СССР были разработаны системы машин, которые содержали технические средства, выпускаемые промышленностью [6], где все лесохозяйственные работы делились по видам работ и лесорастительным зонам, что позволяло систематизировать и классифицировать существующие в то время машины и помогало решать, в том числе, задачи координации научно-исследовательских работ при модернизации существующих и создании новых лесохозяйственных машин. Сегодня эта классификация несколько устарела, в том числе потому, что не включает некоторые типы машин, но ее можно использовать как основу для классификации работ по энергоёмкости. Так к работам лёгкого класса можно отнести: посев семян, химическую защиту леса; средний класс: внесение удобрений, обработка почв культиватором/бороной/катком/рыхлителем, сбор семян, трелевка древесины на рубках ухода; к тяжелым работам: посадка сеянцев, фрезеровка почвы, удаление гумусового слоя почвы; к сверхтяжелым: корчевка пней, расчистка от нежелательной ДКР, гидролесомелиорация. Такая классификация позволяет сделать вывод, что за исключением операций, связанных с обработкой почвы, работы по лесовосстановлению и агротехническому уходу не требуют тяжелых машин и механизмов, а это позволяет предположить, что в качестве прототипа беспилотной платформы могут рассматриваться и средства малой механизации [7].

При формулировании требований к конструкции прототипа лесохозяйственной беспилотной платформы были проанализированы объёмы лесохозяйственных работ двух лесозаготовительных компаний Республики Карелия. В результате анализа были выделены лесохозяйственные работы, выполняемые арендаторами и их подрядчиками в наибольших объёмах: посадка и посев культур, дополнение, уход, подготовка почвы и прочистка минерализованных полос. Анализ конструкций с учётом типа движителя, типа двигателя и его мощности, конструкции рамы и трансмиссии, и имеющихся у прототипа рабочих органов позволил подобрать в качестве прототипа мини-трелёвщик IN2090 PW Flex [8]. Технические характеристики прототипа могут быть использованы для описания требований к технической части беспилотной лесохозяйственной платформы.

С учётом ограничений существующих технологий для реализации автономного движения в лесу [9], использование беспилотных решений может привести к изменению подхода к планированию и проведению работ. Например, может потребоваться предварительная оценка с БПЛА территории работы

наземных беспилотных машин для выявления участков, исключаемых из работы (каменистые, топкие, ветровальные участки) и предварительное планирование миссий беспилотных машин. А для решения проблем с поиском сеянцев при уходе за ними можно использовать предварительно собранные данные в ходе посадки сеянцев на предыдущем подходе, включая координаты каждого сеянца, полученные с использованием технологий глобального позиционирования с RTK-поправками или UWB-технологий, и сохранённые при создании цифрового двойника территории [10].

Таким образом, в настоящее время в России есть производства способные наладить у себя выпуск подобных беспилотных платформ, способных уменьшить объёмы тяжёлого ручного труда и повысить производительность лесохозяйственных работ, что должно снизить кадровый голод в отрасли.

Список литературы

1. Evaluation of the productivity and costs of excavator-based mechanized tree planting in Finland based on automated data collection / K. Kemppainen, K. Kärhä, Ju. Laitila [et al.] // *Silva Fennica*. – 2025. – Vol. 59, № 1. – DOI: 10.14214/sf.25004.
2. Mechanized tree planting in Sweden and Finland: Current state and key factors for future growth / B.T. Ersson, T. Laine, T. Saksa // *Forests*. – 2018. – Vol. 9(7). – p. 370. – DOI: 10.3390/f9070370
3. Ramantswana M. Advances in the Mechanization of Regenerating Plantation Forests: a Review / M. Ramantswana, S.Ph.S. Guerra, B.T. Ersson // *Current Forestry Reports*. – 2020. – Vol. 6, № 2. – pp. 143-158. – DOI: 10.1007/s40725-020-00114-7.
4. Reinforcement Learning Control of a Forestry Crane Manipulator / J. Andersson, K. Bodin, D. Lindmark [et al.] // 2021 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). – 2021. – pp. 2121-2126. – DOI: 10.1109/IROS51168.2021.9636219
5. Полукаров М.В. Классификация лесосечных машин и механизмов по виду выполняемых операций / М.В. Полукаров, Ф.Г. Беляйков, А.В. Мехренцев // *Лесной вестник*. – 2007. – № 8. – С. 133-136.
6. Машков С.В. История развития отечественной системы сельскохозяйственных машин и анализ технической обеспеченности предприятий в настоящее время / С.В. Машков, В.А. Прокопенко // *Никоновские чтения*. – 2018. – № 23. – С. 346-349.
7. Даимова Ф.Д. Беспилотные платформы как современный аналог мобильных средств малой механизации / Ф.Д. Даимова, В.А. Иванов, Ю.В. Суханов // *Научное сопровождение в АПК, лесном хозяйстве и сфере гостеприимства: современные проблемы и тенденции развития*, Рязань, 28 февраля 2025 года. – Рязань: Рязанский государственный агротехнологический университет им. П.А. Костычева, 2025. – С. 40-44.
8. The IronHorse. Classic & Flex. Lennartsfors AB. 2018-01-01. 16 p. URL: <http://media.lennartsfors.com/2018/03/Product-information-The-IH-Classic-and-Flex-2018-ENG2.pdf>

9. Ben Abdallah F. Autonomous Navigation of a Forestry Robot Equipped with a Scanning Laser / F. Ben Abdallah, A. Bouali, P.J. Meausoone // *AgriEngineering*. – 2023. – Vol. 5, № 1. – pp. 1-11. – DOI: 10.3390/agriengineering5010001.

10. Sukhanov Yu. Data collection method for creating digital twin of planted forests / Yu. Sukhanov, A. Vasilev // *Гласник Српског географског друштва*. – 2025. – Vol. 105, № 1. – pp. 127-138. – DOI: 10.2298/gsgd2501127s.

References

1. Evaluation of the productivity and costs of excavator-based mechanized tree planting in Finland based on automated data collection / K. Kemppainen, K. Kärhä, Ju. Laitila [et al.] // *Silva Fennica*. – 2025. – Vol. 59, № 1. – DOI: 10.14214/sf.25004.

2. Mechanized tree planting in Sweden and Finland: Current state and key factors for future growth / B.T. Ersson, T. Laine, T. Saksa // *Forests*. – 2018. – Vol. 9(7). – p. 370. – DOI: 10.3390/f9070370

3. Ramantswana M. Advances in the Mechanization of Regenerating Plantation Forests: a Review / M. Ramantswana, S.Ph.S. Guerra, B.T. Ersson // *Current Forestry Reports*. – 2020. – Vol. 6, № 2. – pp. 143-158. – DOI: 10.1007/s40725-020-00114-7.

4. Reinforcement Learning Control of a Forestry Crane Manipulator / J. Andersson, K. Bodin, D. Lindmark [et al.] // 2021 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). – 2021. – pp. 2121-2126. – DOI: 10.1109/IROS51168.2021.9636219

5. Polukarov M.V. Classification of logging machines and mechanisms by the type of operations performed / M.V. Polukarov, F.G. Belyaykov, A.V. Mekhrentsev // *Lesnoy Vestnik*. – 2007. – № 8. – pp. 133-136.

6. Mashkov S.V. The history of the development of the domestic system of agricultural machinery and analysis of the technical support of enterprises at the present time / S.V. Mashkov, V.A. Prokopenko // *Nikonov Readings*. – 2018. – № 23. – Pp. 346–349.

7. Daimova F.D. Unmanned platforms as a modern analogue of mobile small-scale mechanization tools / F.D. Daimova, V.A. Ivanov, Yu.V. Sukhanov // *Scientific support in the agro-industrial complex, forestry and the hospitality sector: modern problems and development trends*, Ryazan, February 28, 2025. – Ryazan: P.A. Kostychev Ryazan State Agrotechnological University, 2025. – pp. 40–44.

8. The IronHorse. Classic & Flex. Lennartsfors AB. 2018-01-01. 16 p. URL: <http://media.lennartsfors.com/2018/03/Product-information-The-IH-Classic-and-Flex-2018-ENG2.pdf>

9. Ben Abdallah F. Autonomous Navigation of a Forestry Robot Equipped with a Scanning Laser / F. Ben Abdallah, A. Bouali, P.J. Meausoone // *AgriEngineering*. – 2023. – Vol. 5, № 1. – pp. 1-11. – DOI: 10.3390/agriengineering5010001.

10. Sukhanov Yu. Data collection method for creating digital twin of planted forests / Yu. Sukhanov, A. Vasilev // *Гласник Српског географског друштва*. – 2025. – Vol. 105, № 1. – pp. 127-138. – DOI: 10.2298/gsgd2501127s.

ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ МЕТОДИКИ МОДЕЛИРОВАНИЯ МОБИЛЬНОЙ РУБИЛЬНОЙ МАШИНЫ

Фокин С.В., Шпортько О.Н.

*Саратовский государственный технический университет
имени Гагарина Ю.А., Саратов, Россия*

GENERAL PROVISIONS OF THE METHODOLOGY FOR MODELING A MOBILE CHIPPING MACHINE

Fokin S.V., Shportyko O.N.

*Saratov State Technical University named after Gagarin Y.A.
Saratov, Russia*

Аннотация: Статья посвящена разработке математического аппарата для прогнозирования эффективности рубильной установки, предназначенной для переработки порубочных остатков, оценки её производительности и определения оптимальных параметров конструкции и эксплуатации. Основой моделирования служит аппарат классической механики. Модель учитывает физико-механические характеристики и геометрию порубочных остатков (интерпретируемых как совокупность отдельных ветвей со случайной пространственной ориентацией и индивидуальными параметрами – длиной и диаметром), а также детально воспроизводит ключевые узлы установки (рубильный диск, валы, подающий вал, загрузочный конус, щепопровод) с имитацией их вращательного движения.

Abstract: The article is devoted to the development of a mathematical framework for predicting the efficiency of a chipping unit designed to process logging residues, assessing its productivity, and determining the optimal design and operational parameters. The modeling is based on the principles of classical mechanics. The model takes into account the physical and mechanical characteristics and geometry of the logging residues (interpreted as a set of individual branches with random spatial orientation and individual parameters – length and diameter), and also provides a detailed representation of the unit's key components (chipping disk, rollers, feed shaft, loading cone, chip chute), simulating their rotational motion.

Ключевые слова: рубильная машина, порубочные остатки, измельчение порубочных остатков.

Keywords: chipper, logging residues, chipping of logging residues.

В ходе исследования была построена и детально изучена математическая модель установки для переработки порубочных остатков. Её применение позволило провести предварительную проверку функциональности агрегата, проанализировать ожидаемую производительность и выявить наиболее рациональ-

ные параметры конструкции и эксплуатации [1,2]. Базой для моделирования процесса дробления древесных отходов выступает аппарат классической механики [3, 4].

В структуре модели важно адекватно отразить как сами отходы лесозаготовок (их геометрию, физико-механические характеристики и склонность к разрушению на фрагменты), так и ключевые узлы установки: элементы загрузочного устройства и канала транспортировки щепы, измельчитель и подающие вальцы [5].

Измельчение порубочных остатков представляет собой определяющий технологический этап, от эффективности которого зависит общая производительность установки. В связи с этим математическая модель обязана адекватно воспроизводить физические особенности материала: его подвижность в рабочем пространстве, способность к деформации и фрагментации.

При построении модели отходы лесозаготовки рассматриваются как дискретная система, состоящая из отдельных элементов – ветвей. Геометрические параметры каждого элемента (длина и диаметр) задаются индивидуально, что позволяет точнее описать поведение древесной массы в процессе переработки, а их начальное пространственное расположение формируется случайным образом [6].

В разрабатываемой модели требуется точное геометрическое воспроизведение ключевых узлов машины – рубильного диска, вальцов, подающего вала, а также загрузочного конуса и щепопровода, включая имитацию их вращательного движения. При реализации конечно-элементного подхода возникает необходимость аппроксимации поверхностей со сложной конфигурацией. Стандартная практика в таких случаях заключается в дискретизации криволинейных поверхностей с помощью большого числа простых геометрических фигур [7, 8].

Наиболее распространённым решением выступает использование треугольных элементов: благодаря универсальности стыковки и высокой адаптивности они позволяют с приемлемой точностью моделировать поверхности произвольной формы. В связи с этим в рамках создаваемой расчётной модели геометрия оборудования формируется путём сборки из значительного количества элементарных треугольников – такая триангуляционная схема обеспечивает баланс между детализацией формы и вычислительной эффективностью.

В ходе функционирования машины элементы ветви вступают во взаимодействие с различными поверхностями оборудования. Такое соприкосновение порождает две группы сил. Первая группа воздействует на поверхности машины и обуславливает возникновение сопротивления, препятствующего движению её рабочих компонентов – в частности, измельчителя и подающих вальцов. На фрагменты ветви действуют силы второй группы – именно они инициируют пространственное перемещение элемента и реализуют его дальнейшее дробление до требуемой фракции [9].

Количественное определение указанных сил осуществляется с использованием модели вязко-упругого взаимодействия, которая формализует характер контакта между рабочей поверхностью и отдельными элементами ветви. Ключевой трудностью при проведении расчётов является необходимость определить факт контакта конкретного элемента ветви с треугольным сегментом по-

верхности. В случае подтверждения контакта требуется дополнительно вычислить глубину внедрения элемента в плоскость указанного треугольника, а также установить вектор направления силового взаимодействия.

Процесс измельчения моделируется посредством формирования комплексной системы уравнений – она включает как дифференциальные, так и алгебраические соотношения, агрегированные из отдельных выражений, характеризующих поведение каждого элемента. Структура этой системы напрямую определяется топологией модели: поскольку любая ветвь представляет собой совокупность элементарных компонентов, каждый из которых описывается собственным уравнением, общее число уравнений пропорционально количеству ветвей.

Для решения дифференциальных уравнений применяется численный подход – в частности, модифицированный метод Эйлера-Коши. Его отличительная особенность заключается в разной степени точности для различных переменных: по координате достигается второй порядок точности, тогда как по скорости – лишь первый [10].

Список литературы

1. Цыплаков В.В. О применении устройства для измельчения порубочных остатков при реконструкции защитных лесонасаждений / В.В. Цыплаков, С.В. Фокин // Научное обозрение. – 2011. – № 5. – С. 253-257.
2. Фокин С.В. Об использовании математических методов моделирования рубительных машин / С.В. Фокин, О.А. Фомина // Фундаментальные исследования, методы и алгоритмы прикладной математики в технике, медицине и экономике: Материалы 17-ой Международной молодежной научно-практической конференции, Новочеркасск, 06-07 сентября 2018 года. – Новочеркасск: Лик, 2018. – С. 158-159.
3. Фокин С.В. Моделирование машины для измельчения порубочных остатков / С.В. Фокин // Научное обозрение. – 2011. – № 5. – С. 258-265.
4. Фокин С.В. К обоснованию конструктивно-технологических параметров механизма выброса щепы из дисковой рубительной машины / С.В. Фокин, О.А. Фомина // Лесной вестник. Forestry Bulletin. – 2021. – Т. 25, № 2. – С. 99-107.
5. Фокин С.В. Описание конструкции и работы опытного образца рубительной машины для измельчения порубочных остатков / С.В. Фокин // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. – 2015. – Т. 3, № 2-1(13-1). – С. 146-149.
6. Фокин С.В. Моделирование машины для измельчения порубочных остатков/Фокин С.В.// Научное обозрение. 2011. № 5. -С. 258-265.
7. Фокин С.В. О проблемах измельчения порубочных остатков на лесосеке / С.В. Фокин, Е.В. Саввин // Лесотехнический журнал. 2011. № 2 (2). – С. 30-31.
8. Цыплаков В.В. О применении устройства для измельчения порубочных остатков при реконструкции защитных лесонасаждений / В.В. Цыплаков, С.В. Фокин // Научное обозрение. – 2011. – № 5. – С. 253-257.
9. Фокин С.В. О применении метода конечных элементов при проектировании рабочих элементов рубительных машин / С.В. Фокин, О.А. Фомина // Научная жизнь. – 2017. – № 12. – С. 65-75.

10. Фокин С.В. О конструктивных особенностях дисковой рубительной машины для измельчения порубочных остатков / С.В. Фокин, О.А. Фомина // Инновации в природообустройстве и защите в чрезвычайных ситуациях: Материалы VII Международной научно-практической конференции, Саратов, 17-19 марта 2020 года. – Саратов: Амирит, 2020. – С. 390-393.

References

1. Tsyplakov V.V. On the Application of a Device for Chipping Logging Residues during the Reconstruction of Protective Forest Plantations / V.V. Tsyplakov, S.V. Fokin // Scientific Review. – 2011. – № 5. – pp. 253–257.

2. Fokin S.V. On the Use of Mathematical Modeling Methods for Chipper Machines / S.V. Fokin, O.A. Fomina // Fundamental Research, Methods and Algorithms of Applied Mathematics in Engineering, Medicine and Economics: Proceedings of the 17th International Youth Scientific and Practical Conference, Novocherkassk, September 6-7, 2018. – Novocherkassk: Lik, 2018. – pp. 158–159.

3. Fokin S.V. Modeling of a Machine for Chipping Logging Residues / S.V. Fokin // Scientific Review. – 2011. – № 5. – pp. 258–265.

4. Fokin S.V. Justification of the Design and Technological Parameters of the Chip Ejection Mechanism in a Disc Chipper / S.V. Fokin, O.A. Fomina // Forestry Bulletin. – 2021. – Vol. 25, № 2. – pp. 99–107.

5. Fokin S.V. Description of the Design and Operation of a Prototype Chipper for Chipping Logging Residues / S.V. Fokin // Current Directions of Scientific Research in the 21st Century: Theory and Practice. – 2015. – Vol. 3, № 2-1(13-1). – pp. 146–149.

6. Fokin S.V. Modeling of a Machine for Chipping Logging Residues / S. V. Fokin // Scientific Review. – 2011. – № 5. – pp. 258–265.

7. Fokin S.V. On the Problems of Chipping Logging Residues at the Cutting Area / S.V. Fokin, E.V. Savvin // Forestry Journal. – 2011. – № 2(2). – pp. 30–31.

8. Tsyplakov V.V. On the Application of a Device for Chipping Logging Residues during the Reconstruction of Protective Forest Plantations / V.V. Tsyplakov, S.V. Fokin // Scientific Review. – 2011. – № 5. – pp. 253–257.

9. Fokin S.V. On the Application of the Finite Element Method in the Design of Working Elements of Chipper Machines / S.V. Fokin, O.A. Fomina // Scientific Life. – 2017. – № 12. – pp. 65–75.

10. Fokin S.V. On the Design Features of a Disc Chipper for Chipping Logging Residues / S.V. Fokin, O.A. Fomina // Innovations in Environmental Management and Protection in Emergency Situations: Proceedings of the VII International Scientific and Practical Conference, Saratov, March 17-19, 2020. – Saratov: Amirit, 2020. – pp. 390–393.

**МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА ШНЕКОРОТОРНОГО
МЕХАНИЗМА ЛЕСОПОЖАРНОЙ ГРУНТОМЕТАТЕЛЬНОЙ МАШИНЫ
В КОМПАС 3D**

Худякова Н.И., Зленко А.В., Маликов В.Б.

*Воронежский государственный лесотехнический университет
имени Г.Ф. Морозова, Воронеж, Россия*

**MODELING THE OPERATING PROCESS OF THE SCREW-ROTOR
MECHANISM OF A FOREST FIRE EXCAVATION MACHINE
IN KOMPAS-3D**

Khudyakova N.I., Zlenko A.V., Malikov V.B.

*Voronezh State University of Forestry and Technologies
named after G.F. Morozov, Voronezh, Russia*

Аннотация: В работе рассматривается компьютерное моделирование динамики взаимодействия элементов шнекороторного рабочего органа (шнек и ротор-метатель) с почвогрунтом при прокладке противопожарных полос и тушении низовых лесных пожаров. Разработанная в КОМПАС-3D трёхмерная модель позволяет визуализировать процесс подачи грунта, оценить траектории движения частиц. Полученные результаты служат основой для обоснования рациональных конструктивных параметров (угол резания, радиус ступеней ротора, скорость вращения) и технологических режимов работы машины, что в итоге направлено на повышение эффективности тушения пожаров и прокладки полос.

Abstract: The paper examines computer modeling of the dynamics of interaction between the elements of a screw-rotor working unit (screw and rotor-thrower) and the soil during the creation of firebreak strips and the suppression of ground-level forest fires. The three-dimensional model developed in KOMPAS-3D makes it possible to visualize the soil feeding process and assess the trajectories of particle movement. The obtained results serve as the basis for substantiating rational design parameters (cutting angle, rotor step radius, rotation speed) and technological modes of the machine's operation, which ultimately aims to improve the efficiency of fire suppression and strip creation.

Ключевые слова: моделирование, Компас 3D, шнек, ротор, детали, сборка

Keywords: modeling, Compass 3D, auger, rotor, parts, assembly

Введение

Проблема профилактики и ликвидации лесных пожаров остаётся значимой для лесного хозяйства как Российской Федерации, так и зарубежных стран. В числе наиболее результативных мероприятий по предупреждению и тушению

возгораний выделяют формирование противопожарных полос, а также локализацию огня посредством подачи грунта на кромку пламени с использованием грунтометательных машин. Вместе с тем в конструктивном исполнении данных машин сохраняется нерешённой задача эффективной подачи грунта к роторам-метателям. В технологических решениях для транспортировки сыпучих и кусковых материалов наибольшее распространение получили рабочие органы шнекового типа.

В работе Д.Ю. Глазкова и др. [1] доказано, что увеличение коэффициента заполнения кожуха не пропорционально росту производительности. Неравномерность показателей производительности обусловлена формированием в поперечном сечении шнека двух слоёв материала, характеризующихся различной скоростью перемещения.

В статье [2] представлены результаты теоретического анализа энергозатрат при эксплуатации модернизированного шнекового рабочего органа агрегата, разработанного с целью повышения эффективности очистителя от мелких примесей, который широко используется в технологическом процессе первичной обработки хлопка.

В работе [3] изучен процесс смешивания сыпучих материалов, который применяют во многих отраслях. В комбикормовой отрасли этот процесс осложняется большим разнообразием размеров частиц. Это приводит к сегрегации, т.е. разделению частиц на фракции при одновременном смешивании.

В статьях [4-5] рассмотрена проблема создания грунтометательных машин для предупреждения и тушения лесного низового пожара. Цель исследования повышение эффективности удаления растительного напочвенного покрова из потока грунта при предупреждении и тушении возгораний за счет оптимизации параметров шнекового рабочего органа грунтометательной машины. Предложена новая конструктивно-технологическая схема устройства, а также выведены теоретические зависимости, описывающие его рабочие процессы.

Анализ литературных источников показал, что актуальными вопросами при создании новых лесопожарных машин являются методы автоматического проектирования.

Переход от плоских чертежей к объемным цифровым двойникам кардинально изменил подходы к проектированию, производство 3D-моделей несет в себе исчерпывающую информацию о геометрии, массе, объеме и физических свойствах объекта.

3D-моделирование стало ключевым инструментом в проектировании и эксплуатации лесопожарной техники: оно позволяет не просто визуализировать машину, а полноценно тестировать её ещё до появления физического прототипа.

Таким образом, 3D моделирование техники – это полноценный инструмент, который повышает надёжность, снижает издержки и делает технику удобнее и безопаснее как для разработчиков, так и для конечных пользователей.

Кроме того, на базе 3D-библиотек типовых узлов (рамы, кронштейны, гидроцилиндры) можно менять навесное оборудование, сохраняя базовую кон-

струкцию. Это ускоряет разработку новых модификаций и удешевляет производство.

На этапе проектирования цифровой модели навесного оборудования сразу проверяется, насколько узлы совместимы друг с другом. Это помогает выявить коллизии (например, когда деталь мешает движению) в САД системе, а не на сборке в цехе.

Трёхмерное моделирование позволяет на раннем этапе проектирования проверить собираемость конструкции, выявить пересечения деталей, подготовить наглядные демонстрационные материалы.

Целью статьи является демонстрация принципа работы шнекороторного механизма. Анимация и 3D-модель — лучший способ наглядно предоставить информацию, как именно работает шнекороторный метатель. Часто это эффективнее, чем чертежи и формулы.

Материалы и методы

Шнекороторные механизмы находят применение в питателях сыпучих материалов и других машинах. Их рабочий процесс основан на взаимодействии двух функциональных узлов: шнекового питателя, который подаёт материал к центру, и ротора-метателя, который выбрасывает его в сторону.

Для моделирования данного процесса использовался КОМПАС-3D это комплексное программное обеспечение для решения широкого круга задач в области трёхмерного проектирования, которое состоит из нескольких тесно интегрированных компонентов:

- Система трёхмерного моделирования;
- Чертежно-графический редактор «КОМПАС-График»;
- Модуль проектирования спецификаций;
- Текстовый редактор.

С помощью прикладных библиотек КОМПАС проектировались валы и подшипники (рис. 1):

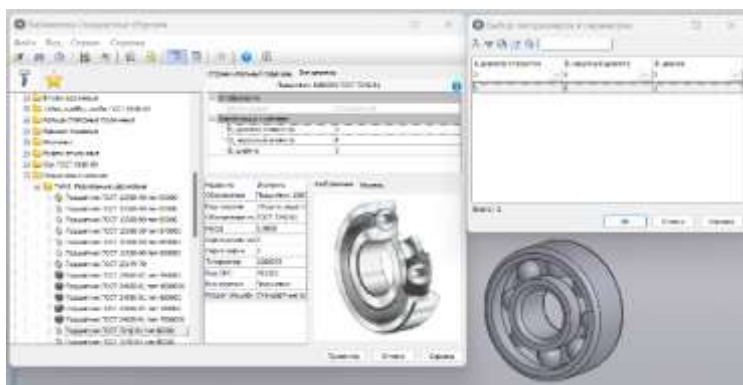


Рисунок 1 – Проектирование стандартных изделий

Моделирование рабочего процесса шнекороторного механизма в КОМПАС-3D строилось на нескольких ключевых принципах это:

- Эскизирование;
- Операции формообразования;
- Работа в Дереве построения;

- Визуализация и оформление;
- Анимация сборки.

Задача моделирования показать расположение и работу всех элементов в сборке и проверить пересечение компонентов. Важно выявить, не накладываются ли физические объёмы деталей друг на друга в сборке. Если такое наложение есть, при реальной сборке детали просто не встанут на свои места, что приведёт к сбою, а иногда и к поломке. Для этого выполнялась проверка коллизий.

На некоторые компоненты накладывалась прозрачность для видимости внутреннего устройства узлов сборки (рис. 2):

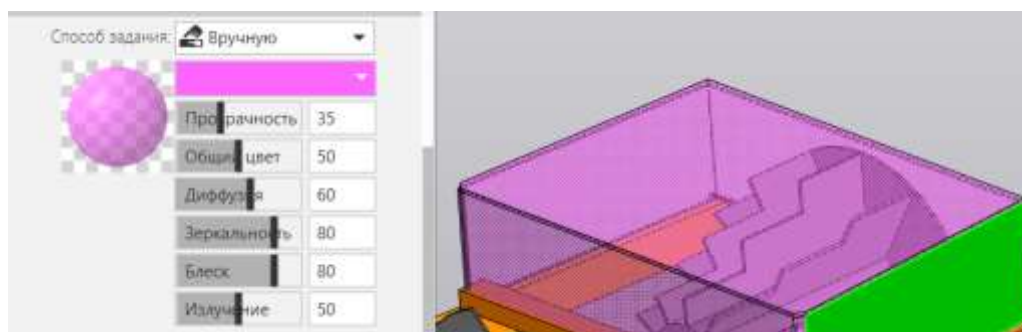


Рисунок 2 – Свойства компонента

При моделировании деталей входящих в сборку необходимо производить разнесение компонентов. Разнесение компонентов в сборке КОМПАС-3D нужно в первую очередь для наглядности – чтобы показать конструкцию в «разобранном» виде, чётко выделив каждую деталь (рис. 3):

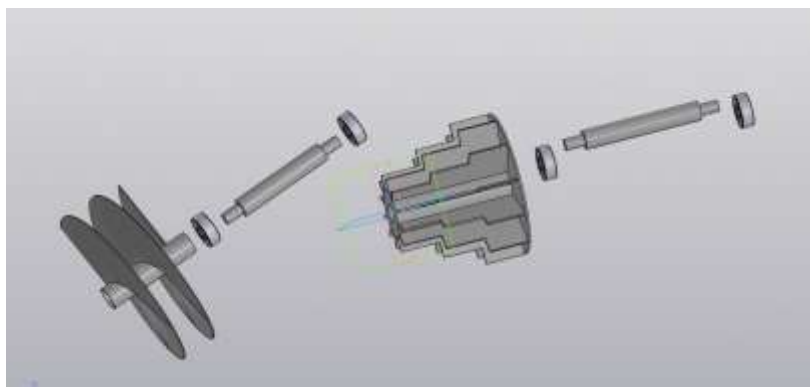


Рисунок 3 – Компоненты в разборке

Работу шнекороторного механизма можно видеть на (рис. 4) где шнек подает песок к ротору → ротор с лопатками захватывает песок и выбрасывает через направляющее отверстие. Шнек в такой схеме работает как вспомогательный «транспортёр»: он расположен под наклоном относительно ротора и активно подгребает грунт прямо к зоне захвата. Дальше ротор подхватывает массу и выводит её наружу (рис. 4):

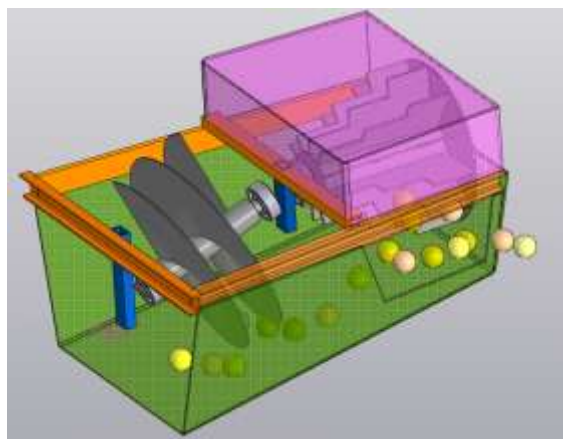


Рисунок 4 – Визуализация сборки шнекороторного механизма

При моделировании любого оборудования в КОМПАС-3D можно увидеть, как рабочие органы взаимодействуют между собой, достаточно повернуть 3D-вид. В результате количество доработок сокращается и сроки вывода модели уменьшаются (рис. 5):

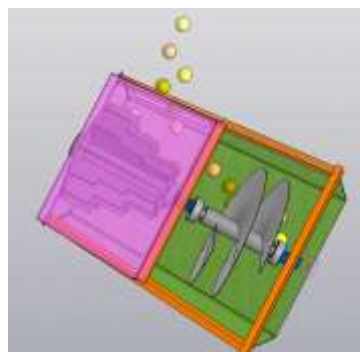
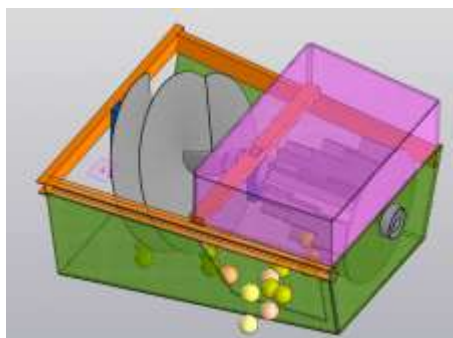


Рисунок 5 – Визуализация сборки по разным направлениям

Анимация в КОМПАС-3D позволяет имитировать движение механизмов, проверять коллизии (соударения деталей), создавать видеоролики. При создании анимации шнекороторного механизма использовалась стандартная библиотека «Механика: Анимация».

С помощью библиотеки создана анимация, имитирующая движение компонентов сборки – как поступательное перемещение по заданной траектории частиц песка, так и вращение вокруг оси шнека и ротора.

Заключение

В ходе работы было показано, что применение КОМПАС-3D для моделирования рабочего процесса шнекороторного механизма позволяет комплексно решать задачи проектирования и наглядной демонстрации работы устройства. Моделирование в КОМПАС-3D повышает обоснованность проектных решений и сокращает количество доработок на стадии изготовления опытного образца.

Список литературы

1. Основные параметры горизонтального шнека с U-образным кожухом / Д.Ю. Глазков, А.Н. Глобин, И.Н. Краснов [и др.] // Вестник аграрной науки До-

на. – 2024. – Т. 17, № 1(65). – С. 48-55. – DOI: 10.55618/20756704_2024_17_1_48-55

2. Ражабов И.Я. Теоретический анализ определения потребляемой мощности в шнековой части очистителя / И.Я. Ражабов, М.М. Агзамов, М.М.К. Каримова // *Endless Light in Science*. – 2023. – № 2-2. – С. 251-260.

3. Садов В.В. Интенсификация процесса смешивания комбикормов в вертикальном шнековом смесителе / В.В. Садов, С.А. Сорокин // *Вестник Алтайского государственного аграрного университета*. – 2023. – № 4(222). – С. 86-92. – DOI: 10.53083/1996-4277-2023-222-4-86-92.

4. Поздняков А.К. Обзор кинематических и динамических характеристик шнекового рабочего органа грунтомета-полосопрокладывателя на виртуальном стенде в лесных условиях. *Механика и машиностроение. Наука и практика. Материалы международной научно-практической конференции*. - СПб: Индивидуальный предприниматель Жукова Елена Валерьевна, 2022. – с. 111-112.

5. Оптимизация параметров шнековых рабочих органов лесопожарной грунтометательной машины / П.И. Попиков, А.К. Поздняков, В.П. Попиков [и др.] // *Повышение эффективности лесного комплекса: Материалы Восьмой Всероссийской национальной научно-практической конференции с международным участием*, Петрозаводск, 24 мая 2022 года. – Петрозаводск: Петрозаводский государственный университет, 2022. – С. 161-162.

References

1. Key parameters of a horizontal screw conveyor with a U-shaped casing / D.Yu. Glazkov, A.N. Globin, I.N. Krasnov [et al.] // *Bulletin of Agrarian Science of the Don*. – 2024. – Vol. 17, № 1(65). – pp. 48-55. – DOI: 10.55618/20756704_2024_17_1_48-55

2. Razhabov I.Ya. Theoretical analysis of power consumption in the screw section of a cleaner / I.Ya. Razhabov, M.M. Agzamov, M.M.K. Karimova // *Endless Light in Science*. – 2023. – № 2-2. – pp. 251-260.

3. Sadov V.V. Intensification of the compound feed mixing process in a vertical screw mixer / V.V. Sadov, S.A. Sorokin // *Bulletin of Altai State Agricultural University*. – 2023. – No. 4(222). – pp. 86-92. – DOI: 10.53083/1996-4277-2023-222-4-86-92.

4. Pozdnyakov A.K. Review of kinematic and dynamic characteristics of the screw working element of a soil-throwing strip-layer on a virtual test bench in forest conditions. *Mechanics and Mechanical Engineering: Science and Practice. Proceedings of the International Scientific and Practical Conference*. - St. Petersburg: Individual Entrepreneur Elena Valeryevna Zhukova, 2022. – pp. 111–112.

5. Optimization of the parameters of the auger working elements of a forest-fire soil-throwing machine / P.I. Popikov, A.K. Pozdnyakov, V.P. Popikov [et al.] // *Improving the Efficiency of the Forestry Complex: Proceedings of the Eighth All-Russian National Scientific and Practical Conference with International Participation*, Petrozavodsk, May 24, 2022. – Petrozavodsk: Petrozavodsk State University, 2022. – pp. 161–162.

Научное издание

ИННОВАЦИОННЫЕ РАЗРАБОТКИ И ПРОГРЕССИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ
ЛЕСНОГО КОМПЛЕКСА СТРАНЫ

Материалы Всероссийской научно-практической конференции

Воронеж, 24 сентября 2026 г.

Ответственный редактор А.А. Платонов

Материалы издаются в авторской редакции

Подписано к изданию 02.10.2026. Объем данных 34,2 Мб
ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет
имени Г.Ф. Морозова»
ФГБОУ ВО «ВГЛТУ». 394087, г. Воронеж, ул. Тимирязева, 8