

На правах рукописи

СЕРГЕЕВ ДАНИЛ ОЛЕГОВИЧ

**СОЗДАНИЕ БЕСПИЛОТНОЙ МАЛОШУМНОЙ
СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЙ МОДУЛЬНОЙ ПЛАТФОРМЫ
С УЧЁТОМ ВНУТРЕННИХ ТЕПЛООБМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ**

Специальность: 4.3.1. Технологии, машины и оборудование
для агропромышленного комплекса

Автореферат диссертации на соискание ученой
степени кандидата технических наук

Москва – 2026

Работа выполнена на кафедре тракторов и автомобилей Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева».

Научный руководитель:

Парлюк Екатерина Петровна,
д.т.н., профессор, профессор
кафедры тракторов и автомобилей
ФГБОУ ВО РГАУ – МСХА
имени К.А. Тимирязева

Официальные оппоненты:

Труфляк Евгений Владимирович,
д.т.н., профессор, заведующий
кафедрой Процессы и машины в
агробизнесе ФГБОУ ВО «Кубанский
государственный аграрный
университет имени И.Т. Трубилина»

Сафиуллин Руслан Равилович,
к.т.н., доцент кафедры
«Транспортно-технологические
процессы и машины» ФГБОУ ВО
«Санкт-Петербургский горный
университет императрицы
Екатерины II»

Ведущая организация:

ФГБОУ ВО «Башкирский
государственный аграрный
университет»

Защита состоится 10 декабря 2026 года в 15:00 на заседании диссертационного совета 35.2.030.03 на базе ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К. А. Тимирязева», по адресу: 127434, г. Москва, ул. Прянишникова, д. 19, тел: +7 (499) 976-17-14.

Юридический адрес для отправки почтовой корреспонденции (отзывов): 127434, г. Москва, ул. Тимирязевская, д. 49.

С диссертацией можно ознакомиться в Центральной научной библиотеке имени Н.И. Железнова ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К. А. Тимирязева» и на сайте Университета www.timacad.ru.

Автореферат разослан « ____ » _____ 2026 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета 35.2.030.03

Н. Н. Пуляев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Цифровизация техники и процессов в сельском хозяйстве стремительно развивается, особенно в России, и достигла существенного прогресса к октябрю 2025 года. Например, агродроны обрабатывают поля средствами защиты растений, обеспечивая экономию до 20% объёма расхода химикатов и снижая затраты на технику в 4-5 раз. Самоходная сельскохозяйственная техника, такая как тракторы и комбайны, оснащена беспилотными системами управления, что повышает точность процессов и снижает потери урожая на 30%.

В условиях острого дефицита рабочей силы в сельском хозяйстве важно предложить малым и средним фермерским хозяйствам доступное решение для замещения недостающих работников беспилотными системами. Автономные машины не нуждаются в управлении оператора, находящегося в кабине, а один диспетчер может проводить мониторинг работы сразу нескольких единиц беспилотной техники.

Для малых и средних фермерских хозяйств также существенной проблемой является высокая стоимость оборудования. В связи с этим, малые и средние хозяйства не могут освоить беспилотные технологии за счёт их относительно высокой стоимости. В свою очередь, беспилотная малозумная модульная платформа позволит снизить порог начальных капиталовложений в цифровизацию сельскохозяйственных процессов, и за счёт платформенности, в кратчайшие сроки предложить фермерам многофункциональную роботизированную технику для работы в поле.

В настоящий момент Россия отстаёт от мировых темпов роботизации сельского хозяйства, а текущие разработки беспилотных систем, не учитывают ужесточение сертификационных требований, особенно по направлению акустического фона беспилотных транспортных средств. Настоящее исследование направлено на решение вышеописанных проблем в сельском хозяйстве и позволит не только предложить принципиально

новые подходы в области проектирования беспилотных малошумных модульных платформ, но и значительно улучшить внутренние теплообменные процессы и внешний акустический фон уже разработанных роботизированных систем на основе исследуемых методик проектирования деталей термошумоизоляции для беспилотных машин.

Степень разработанности темы исследования. Вопросами цифровизации сельского хозяйства и проектирования систем беспилотной аграрной техники занимаются многие учёные и изобретатели в России и за рубежом: Анисимова В.Ю., Байрамов Х.А., Баширова А.А., Власов А.И., Власов Д.С., Гаджиева А.Г., Гараев А.В., Горелова Д.А., Гузалов А.С., Дидманидзе О.Н., Евграфов А.В., Захарова В.О., Иванов А.Б., Киварина М.В., Кузнецов А.Н., Лавров А.В., Лучников А.И., Меджидов З.У., Митягин Г.Е., Наумов А.В., Огородникова Е.С., Орлов С.Л., Парлюк Е.П., Пивоварова О.В., Плахин А.Е., Разумовский М.А., Ростовцев К.В., Селиванов К.В., Хачатрян А.А., Чернышов Д.Д., Юрина Н.Н., Benaglia M., Puglisi A., Rani S., Rossi S., Shekh M.

Цель исследования – разработка проекта беспилотной малошумной модульной платформы для сельскохозяйственных работ, включающей изделия термошумоизоляции для улучшения акустических и внутренних теплообменных параметров проектируемой беспилотной системы.

Задачи исследования:

1. Изучить рынок сельскохозяйственной техники в области потребностей навесных и прицепных орудий, фермерами малых и средних крестьянских (фермерских) хозяйств. Сделать выводы об оптимальных параметрах и режимах работы проектируемой наземной беспилотной малошумной модульной платформы.

2. Провести анализ методов производства деталей и систем беспилотной малошумной модульной платформы. Выявить основные источники шума в системах транспортных средств. Изучить кузов транспортного средства на предмет потерь воздушных масс, выявить

причины их появления и разработать решение для устранения данного явления.

3. Пропорционально параметрам спроектированного изделия перенести заложенные характеристики в прототип платформы. Написать управляющую программу для прототипа беспилотной малошумной модульной платформы с целью использования программного обеспечения в промышленном изделии.

4. Провести лабораторные исследования разработанных акустических и теплоизоляционных изделий, герметизации кузовных элементов и вывести рекомендации по подбору материалов изготовления шумоизоляционных изделий и методам проектирования беспилотных транспортных средств и акустических систем.

5. Провести экономический анализ рациональности применения новейших способов проектирования и методов эффективного выхода на рынок. Изучить варианты и выдвинуть предложение о варианте взаимодействия между производителями беспилотной сельскохозяйственной техники и землевладельцами.

6. Внедрить разработанные методики проектирования деталей термошумоизоляции и систем беспилотных транспортных средств на производства.

Научную новизну исследования составляют:

1. Разработанная концепция проектирования деталей и установок термошумоизоляции для беспилотных аграрных машин.

2. Полученная эмпирическим путём, математическая модель зависимости способности к звукоизоляции звукоизолирующих деталей от параметров демпфирующего слоя в их составе.

Теоретическая значимость. Определены значения зависимости характеристик деталей термошумоизоляции и материалов их изготовления. Определены критические значения нагрева и предельно возможные параметры звукопоглощения.

Практическая значимость исследования заключается в следующих результатах:

- проведён анализ методов производства деталей и систем беспилотной малолетной модульной платформы. Проведены испытания кузова транспортного средства на предмет герметизации, на основе которых снижены утечки воздушных масс с 26,77 л/с до 15,33 л/с при вакууме 250 Па;

- произведён прототип модульной платформы, создано программное обеспечение для отслеживания положения беспилотной машины в поле и управления маршрутом её движения;

- установлено, что войлочный фенольный мат в составе звукоизолирующих деталей превосходит демпфирующий слой из пенополиуретана в среднем на 5 дБ в промежутке от 400 до 3150 Гц. В программном комплексе ANSYS проведён инженерный анализ деталей термошумоизоляции с термозраном. CAE-анализ показал снижение забарьерной температуры с 90,6 °С до 76,3 °С;

- на основе диссертационных методик разработаны детали термошумоизоляции и внедрены в проект «Полесад-2.0». Методики проектирования деталей термошумоизоляции для беспилотных тракторов внедрены в учебный процесс кафедры тракторов и автомобилей института механики и энергетики им. В.П. Горячкина.

Объектом исследования выступает сама беспилотная малолетная модульная платформа как сложная техническая система – совокупность конструктивно и функционально взаимосвязанных компонентов, обеспечивающих выполнение агротехнических задач при минимизированном уровне акустического воздействия.

Предметом исследования являются способы контроля уровня запылённости, тепловых и акустических процессов внутри моторного отсека беспилотных транспортных средств. А также сами беспилотные системы, методы их использования в аграрных процессах и методы их

применения в работе в автоматическом режиме.

Методы исследования: математическое моделирование, численные методы, физическое моделирование и виброакустический анализ, испытания деталей и материалов термошумоизоляции на лабораторных установках.

Положения, выносимые на защиту:

1. Концепция проектирования беспилотной малошумной модульной платформы, включающая разработку и реализацию масштабного прототипа исследуемой наземной беспилотной системы для сельскохозяйственных работ.

2. Результаты комплексного анализа и оценки конструктивных элементов, характеризующихся выраженными акустическими свойствами, с целью оптимизации их влияния на общий уровень шума.

3. Методологический подход к проектированию элементов термошумоизоляции для беспилотных транспортных средств для сельского хозяйства, обеспечивающий эффективное снижение акустического воздействия и поддержание оптимального температурного эксплуатационного режима работы.

Достоверность результатов исследования обеспечивается большим объёмом данных, полученных в результате проведения лабораторных исследований в области акустики. В результате разработки и реализации прототипа беспилотной малошумной модульной платформы, были доказаны тезисы о преимуществах платформенного и модульного подходов к проектированию беспилотной сельскохозяйственной техники.

Апробация результатов исследования. Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на международных научно-практических конференциях, таких как V и VI Всероссийский форум «Научно-техническое развитие и задачи глобального лидерства»; а также на ежегодном международном научно-практическом семинаре «Чтения академика В. Н. Болтинского» и на XIX Всероссийской

конференции молодых ученых и специалистов (с международным участием) «Будущее машиностроения России».

Публикации. По теме диссертационной работы опубликовано 8 печатных научных работ, в том числе 4 работы в рецензируемых изданиях из перечня ВАК Российской Федерации.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 4 глав, которые содержат 68 рисунков и 8 таблиц. А также общих выводов, списка использованной литературы из 108 наименований, в том числе 22 на иностранном языке, и 4 приложений. Работа изложена на 153 страницах.

Личный вклад соискателя. Автор принимал непосредственное участие во всех стадиях выполнения диссертационного исследования – от постановки научной задачи до оформления итоговой рукописи. Сформулированы цели и задачи работы, организованы и проведены теоретические и экспериментальные исследования, выполнены сбор и статистическая обработка полученных данных. Разработана математическая модель, предложены практические рекомендации по её внедрению и оценена их применимость. Автор работы подготовил текст данной диссертации, представлял изложенные результаты научных исследований на конференциях.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении содержится общая характеристика диссертационной работы. Приведено обоснование актуальности избранной темы исследования, сформулированы цель и задачи проводимого исследования. Кроме того, в тексте раскрыты научная новизна и практическая значимость работы, а также изложены основные положения диссертации, выносимые на защиту.

Первая глава «Анализ современного состояния и перспектив развития роботизированных сельскохозяйственных комплексов» посвящена

всестороннему обзору текущей ситуации с роботизацией в сельском хозяйстве как в мире, так и в России, а также анализу существующих технических решений и барьеров на пути их внедрения. Проведен систематический обзор текущего состояния сельскохозяйственной робототехники, по итогам которого выявлены ключевые технологические, экономические и институциональные барьеры. Проанализированы существующие отечественные и зарубежные модели беспилотных мини-тракторов.

Мировое сельское хозяйство активно переходит к внедрению автономных систем и на сегодняшний день прогнозируемый объем рынка сельскохозяйственной робототехники достигнет больших объёмов. Высокий потенциал отрасли подтверждается государственной поддержкой и практикой снижения эксплуатационных затрат на 25-30% за счет технологий точного земледелия. Тем не менее массовому распространению препятствует ряд факторов:

1. Высокая стоимость оборудования (от 5 до 25 млн руб. за единицу).
2. Низкий коэффициент использования техники вне сезона (30-50%).
3. Дефицит сервисной инфраструктуры и квалифицированных операторов.
4. Несовершенство нормативно-правовой базы.

Анализ отечественной и зарубежной беспилотной сельскохозяйственной техники показал отсутствие внимания производителей к вопросам термошумоизоляции. Акустические характеристики учитываются не только при прохождении сертификационных испытаний, но и влияют на состояние окружающих людей и животных. Нормативные документы регламентируют величину акустического фона в диапазоне 80-85 дБА, и без использования звукопоглощающих и звукоизолирующих деталей получение сертификата соответствия нормативным требованиям затруднительно.

В главе проведён анализ принципа построения модульных платформ,

активно используемого в автомобилестроительной индустрии. Такой подход демонстрирует значительное сокращение сроков разработки нескольких моделей автомобилей в серийной линейке. Данный принцип конструирования актуален в том числе и для сельского хозяйства, так как такой подход позволит обеспечить более высокие темпы цифровизации сельского хозяйства. Платформенное основание в малошумной модульной платформе обеспечит агропромышленный комплекс многофункциональной системой, что позволит в кратчайшие сроки закрыть потребность малых и средних крестьянских (фермерских) хозяйств в доступных беспилотных аграрных машинах.

Вторая глава «Теоретические основы проектирования беспилотной малошумной модульной платформы» посвящена переходу от анализа рынка к конкретным инженерным решениям. Описана концепция платформы, исследована природа шума и обоснована необходимость герметизации и термошумоизоляции для беспилотных машин. Предлагается создание модульной платформы – которая подразумевает возможность производства на одной колёсной базе нескольких типов машин, выполняющих различные функции. Техническая задача разработки – создание универсальной платформы (тягача) на котором будет устанавливаться оборудование на предприятии-изготовителе (рисунок 1).

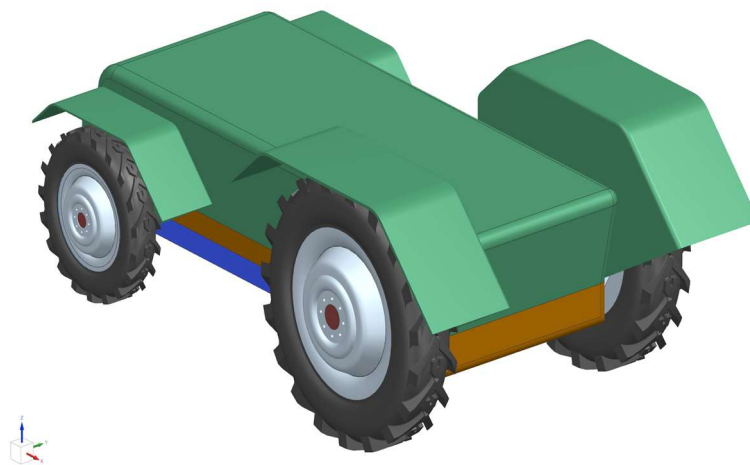


Рисунок 1 – Изометрический вид беспилотной малошумной сельскохозяйственной модульной платформы

Таблица 1 – Технические и экономические характеристики беспилотной модульной платформы

Показатель	Значение
Мощность	30 л.с.
Масса	1200 кг
Тип привода	Последовательный гибрид
Автономность работы	12-20 часов
Класс тяги	0,8
Рабочая скорость	От 5 до 20 км/ч
Габаритные размеры	2300·2000·1300 мм
Стоимость	1 500 000 рублей

В главе рассмотрен процесс прототипирования модульной платформы. Для проведения научных исследований и опытно-конструкторских работ важно проводить эксперименты, которые могли бы минимизировать риски при проектировании промышленных объектов и серийного производства изделий. В качестве примера рассматривается прототип беспилотной модульной платформы для исследования автоматизированной работы в поле по построенному маршруту уборки сельскохозяйственных угодий.

Проработана система автономной работы беспилотника, а именно программы, отражающей в реальном времени положение прототипной платформы относительно загруженной двухмерной модели поля, положения маячков и маршрута движения (рисунок 2).

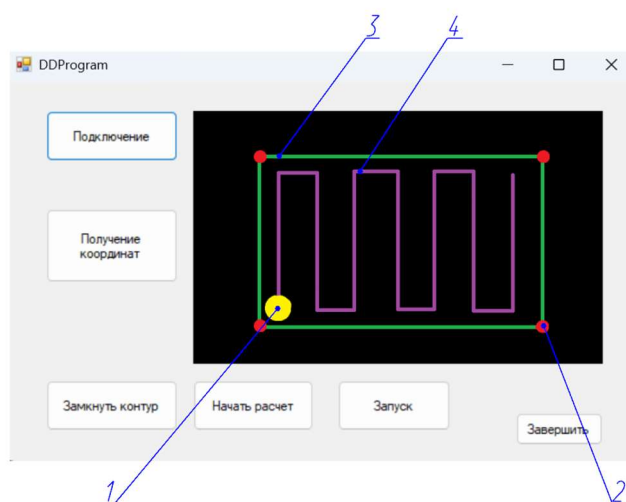


Рисунок 2 – Программа автономной работы беспилотной системы: 1 – положение беспилотной машины, 2 – положение маячков, 3 – контур поля, 4 – траектория движения беспилотной машины

Рассмотрена оптимизация конструкции для герметизации кузова беспилотной машины. Испытания герметичности кузова заключаются в валидации герметизации внутреннего пространства моторного отсека от окружающей среды бафлами с определением соответствующих мест их установки.

Целевое значение для герметичности транспортного средства в сборе составляет 20 л/с при вакууме 250 Па. Испытания выполнялись на установке AirFlow в четыре этапа: осмотр кузова и его герметизации, проверка герметичности после окраски, доработка или ремонт кузова (рисунок 3), повторная проверка после доработок.



Рисунок 3 — Доработка герметизации элементов кузова после проведения замеров

В свою очередь, внутренние бафлы лонжеронов кузова, выполнены из саморасширяющейся закрытоячейистой пены. Они необходимы для герметизации внутреннего пространства элементов машины. Закупоривание щелей и отверстий предотвращает попадание пыли и влаги во внутренние элементы кузова и моторного отсека, препятствует распространению звука и появлению ржавчины.

В результате проведения работ удалось сократить величину воздушных утечек с 26,77 до 15,33 л/с (рисунок 4).

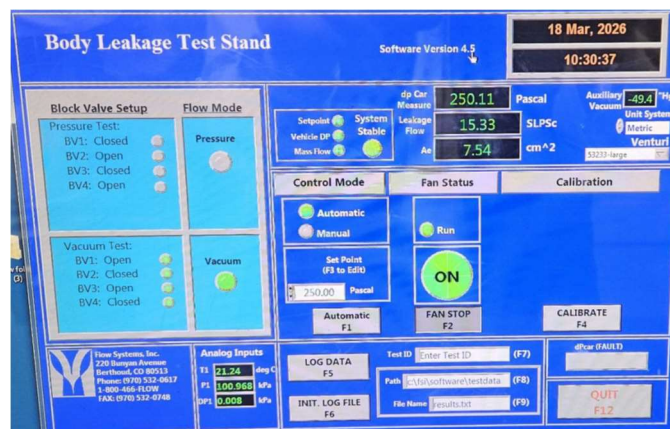


Рисунок 4 – Результаты работ по доработке герметизации кузова

Третья глава «Практическая реализация и экспериментальное исследование шумоизоляции» посвящена переходу от теоретических разработок к конкретным лабораторным испытаниям. Данные испытания включают проектирование акустических деталей для беспилотной машины, проведение измерений звукопоглощения и звукоизоляции, анализ результатов и предложение путей оптимизации, включая инновационное использование легкоплавких материалов.

Чтобы обойти методологические ограничения, связанные с привязкой поглощения к кривизне и объему конкретного прототипа, а также исключить влияние опорной плиты, для оценки таких узлов введено понятие эквивалентной площади поглощения (A).

Под этим термином понимается площадь абсолютно мягкой стены, которая гасит звуковую энергию так же эффективно, как и анализируемая конструкция. Математически данная эквивалентная способность выражается следующей формулой:

$$A = S \cdot \alpha_s. \quad (1)$$

В соответствии со стандартом, эквивалентная площадь поглощения равна:

$$A = 0,163 \cdot V \cdot \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_0} \right). \quad (2)$$

После введения объема кабины и времени реверберации T_2 и T_3 формула становится такой же, как и в случае с формованной деталью:

$$A = 0,966 \cdot \left(\frac{1}{T_3} - \frac{1}{T_2} \right), \quad (3)$$

где A – эквивалентная площадь звукопоглощения, м^2 ; S – площадь образца, м^2 ; α_s – реверберационный коэффициент звукопоглощения; V – объем кабины, м^3 ; T_0 – время реверберации пустой кабины, с; T_1 – время реверберации со стандартным образцом, с; T_2 – время реверберации кабины с одной только частью кузова, с; T_3 – время реверберации кабины с исследуемой формованной деталью, установленной в кузов, с.

При расчете эквивалентной площади звукопоглощения необходимо учитывать влажность и температуру окружающей среды, и в соответствии с ISO 354:2003 формула принимает следующий вид:

$$A = 0,92 \cdot \left[55,3 \cdot V \cdot \left(\frac{1}{c_3 T_3} - \frac{1}{c_2 T_2} \right) - 4 \cdot V \cdot (m_3 - m_2) \right]. \quad (4)$$

В главе описаны результаты испытаний на двух лабораторных установках, а именно Autoneum Isokell и Autoneum Alpha Cabin. Цель испытаний – определение показателей потери передачи шума (TL) и способность к звукоизоляции (IL) образцов звукоизоляционных материалов, а также реверберационного коэффициента (α_s) звукопоглощающих деталей.

На рисунках 5 и 6 приведены результаты исследований комбинирования материалов из пенополиуретана, войлочного фенольного мата и звукоизоляционного полимерного материала разной толщины.

Слои пенополиуретана представлены с отношением материалов изготовления и обозначаются, как пример, PPU15mm_100 46, где значение 15 обозначает толщину мата в 15 мм. Слой войлочного фенольного мата обозначается в графиках как felt20 и имеет постоянную толщину 20 мм. LTS и DSK – звукоизоляционные полимерные слои, отличающиеся по толщине и поверхностной плотности.

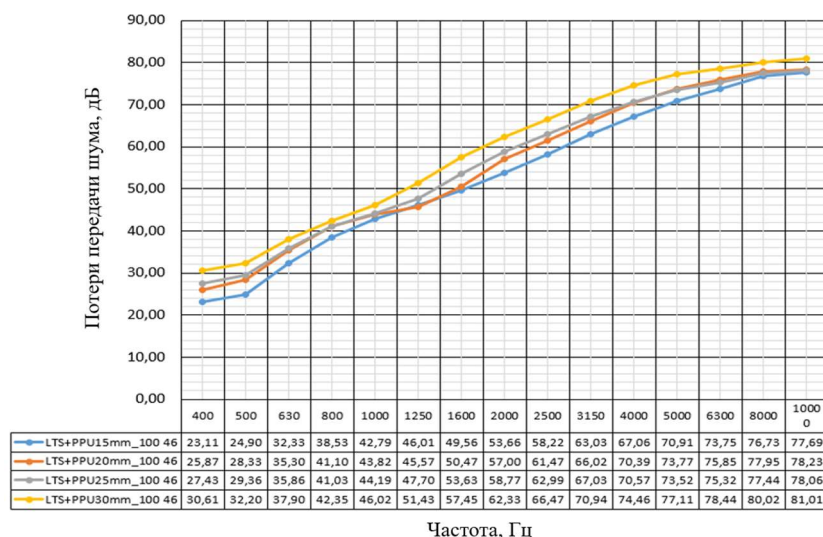


Рисунок 5 – Графики показателя TL пенополиуретана с толщиной 15, 20, 25, 30 мм (соотношение 100/46) с звукоизоляционным слоем

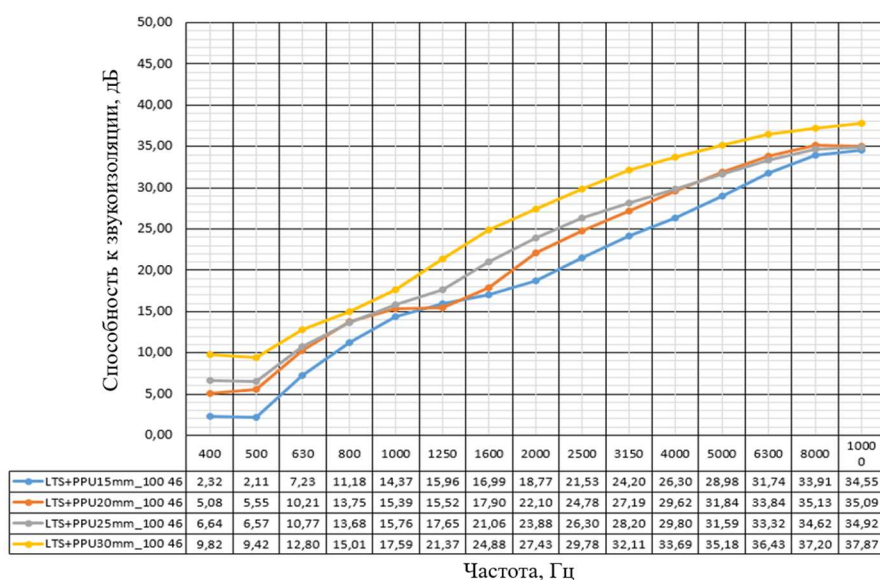


Рисунок 6 – Графики показателя IL пенополиуретана с толщиной 15, 20, 25, 30 мм (соотношение 100/46) с звукоизоляционным слоем

Анализируя результаты лабораторных исследований комбинаций различной толщины пенополиуретана и звукоизоляционного слоя, сделан вывод о разнице в показателе IL в зависимости от толщины демпфирующего материала. Если обратить внимание на отличие значений графиков на рисунке 6 для пенополиуретана толщиной 15 мм (синий цвет графика) и толщиной 30 мм (жёлтый цвет графика), то получится что при увеличении слоя пенополиуретана в 2 раза, значение IL при 400 Гц отличается более чем в 4 раза: 2,3 дБ и 9,82 дБ соответственно. Однако, при дальнейшем исследовании показателей видно, что

показатели Π отличаются не более чем на 10 дБ, что является прямой зависимостью от увеличения толщины слоя пенополиуретана.

На рисунках 7 и 8 изображены графики показателей TL и Π для композитных матов различных комбинаций плотности и толщины пенополиуретана и постоянной толщины и плотности полимерного звукоизолирующего слоя DSK.

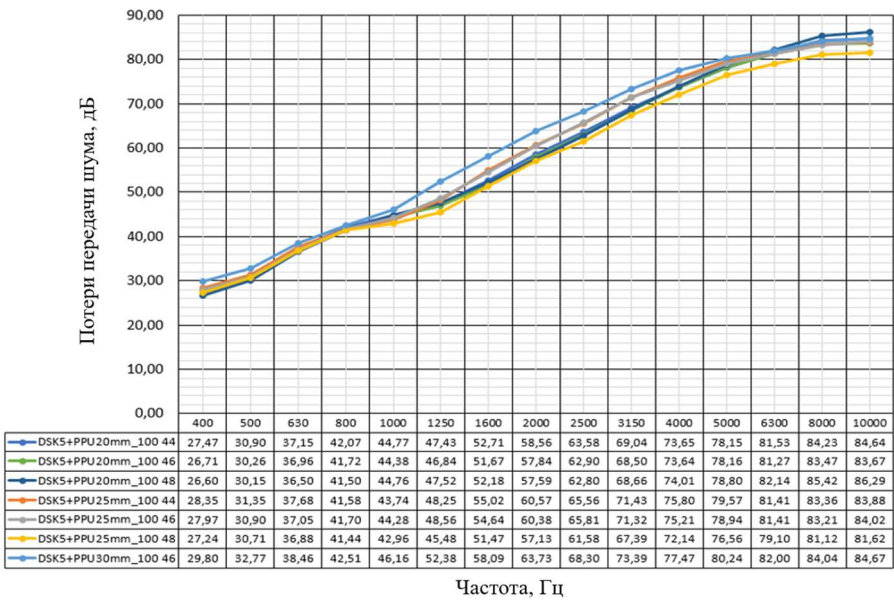


Рисунок 7 – Графики показателя TL пенополиуретана разной плотности с толщиной 20, 25, 30 мм с разным звукоизоляционным слоем (DSK)

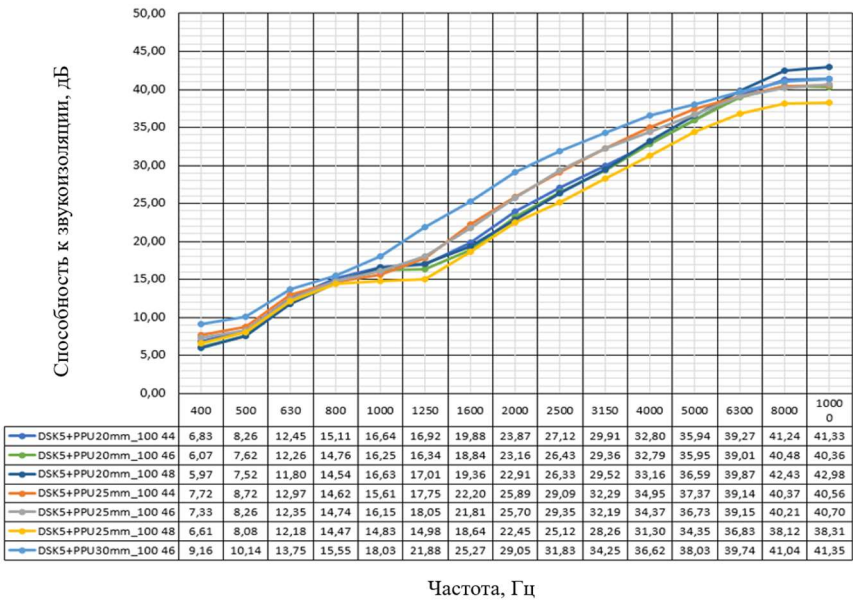


Рисунок 8 – Графики показателя Π пенополиуретана разной плотности с толщиной 20, 25, 30 мм с разным звукоизоляционным слоем (DSK)

Результаты испытаний демонстрируют прямую зависимость способности к звукоизоляции от толщин композитного мата. В то же время различный состав изготовления слоя пенополиуретана не демонстрирует значительных отличий акустических характеристик всего мата. Из рисунков можно выделить значительное преимущество показателей мата в составе которого присутствует пенополиуретан толщиной 30 мм. Также отдельно выделяются несколько комбинаций образцов, обозначенных на графике оранжевым и серым цветом: данные материалы идентичны по толщине, но отличаются по пропорции компонентов, используемых при изготовлении слоя пенополиуретана. Данные результаты подтверждают незначительное влияние изменения пропорций смешивания двух компонентов при производстве пенополиуретана на способность к звукоизоляции всего акустического изделия.

На рисунках 9 и 10 показаны акустические характеристики многослойного мата на основе войлока и полимерного звукоизоляционного слоя. Полученные профили демонстрируют низкую чувствительность параметров TL и PL к изменениям толщины верхнего полимерного слоя.

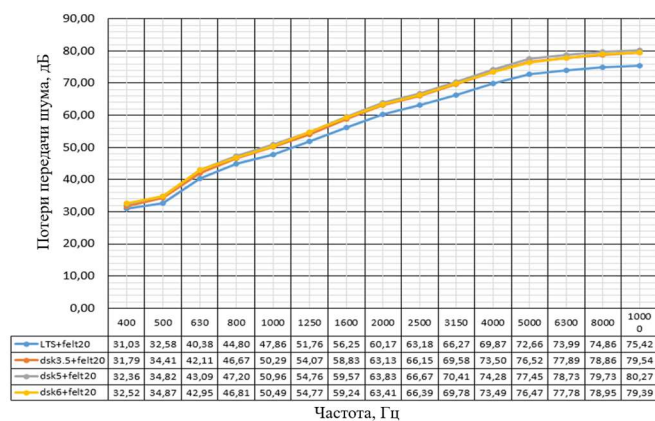


Рисунок 9 – Графики показателя TL войлочного фенольного мата с разным звукоизоляционным слоем

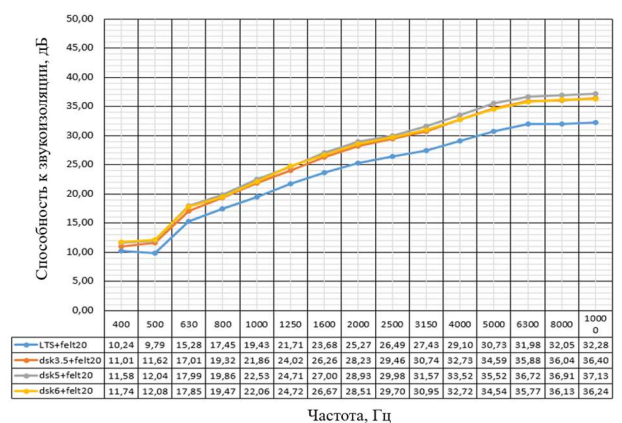


Рисунок 10 – Графики показателя PL войлочного фенольного мата с толщиной 20 мм с разным звукоизоляционным слоем

Эксперимент показал лучшие показатели способности к звукоизоляции на частотах от 400 до 3150 Гц у композитного мата в составе которого

использовался войлочный фенольный мат по сравнению с матом аналогичной толщины из пенополиуретана (рисунок 11).

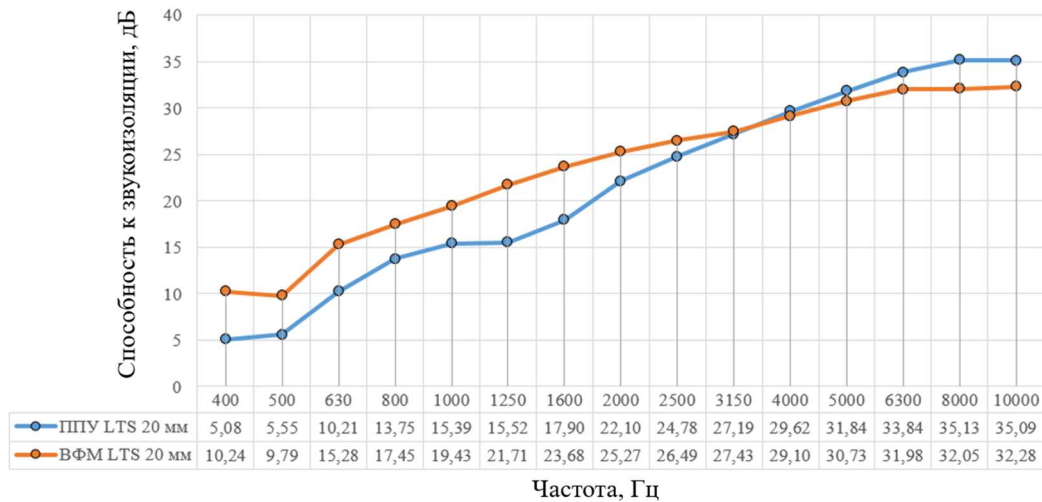


Рисунок 11 – Сравнение материалов изготовления деталей звукоизоляции: пенополиуретан и войлочный фенольный мат

Из данных, полученных эмпирическим путём получены следующие математические модели:

Для пенополиуретана:

$$IL = 10,10 \cdot \ln(\nu) - 55,21, \quad (5)$$

где ν – частота звуковой волны, Гц.

Для войлочного фенольного мата:

$$IL = 7,26 \cdot \ln(\nu) - 31,61, \quad (6)$$

Полученные модели отражают зависимость между частотой звуковой волны и влиянием демпфирующего материала на способность к звукоизоляции акустических деталей.

В рамках проведения исследования выполнена проверка соответствия требованиям реверберационного коэффициента звукопоглощения для термоформованных деталей моторного отсека (рисунки 12а, 12б, 13а, 13б).

Для акустических измерений и обработки результатов использовалась испытательная установка Autoneum Alpha Cabin V 3.0.



Рисунок 12а – Обивки

звукопоглощающие моторного отсека
в испытательной установке

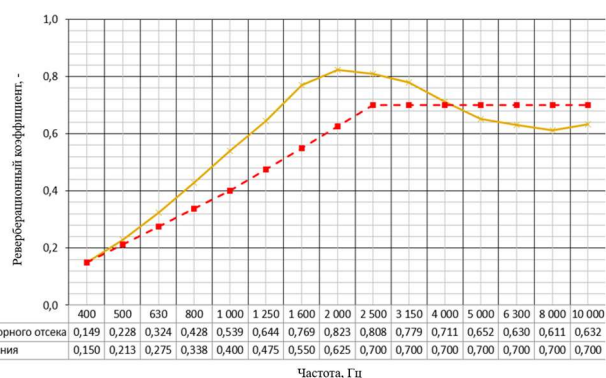


Рисунок 12б – Результаты их испытаний

Представленные звукопоглощающие обивки моторного отсека соответствуют техническим требованиям к реверберационному коэффициенту звукопоглощения во всех 1/3-октавных полосах частот, в диапазоне от 400 Гц до 10000 Гц, кроме 5000 Гц и 10000 Гц. Данное отклонение может быть обусловлено наличием зазоров между деталями и неплотным прилеганием обивок к полу лабораторной установки.

Несмотря на отклонения от технических требований в некоторых диапазонах частот, результат можно считать положительным.



Рисунок 13а – Обивка тоннеля
пола в испытательной установке

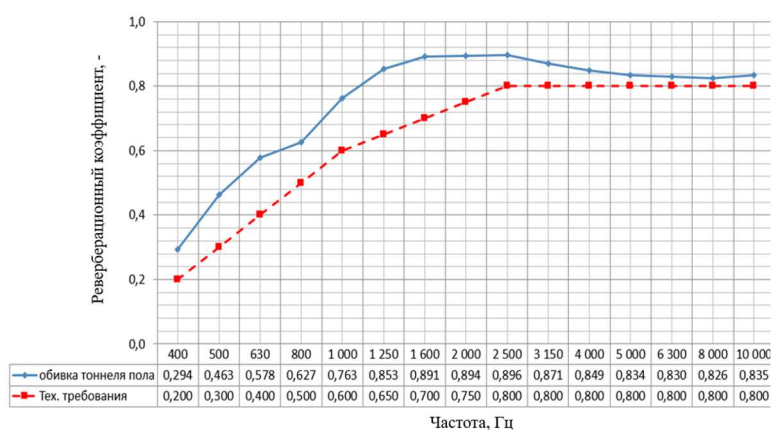


Рисунок 13б – Результаты испытаний детали

Значения технических требований для частот: 500 Гц, 630 Гц, 800 Гц, 1250 Гц, 1600 Гц, 2000 Гц, 3150 Гц, 4000 Гц, 6300 Гц, 8000 Гц получены в результате кусочно-линейной интерполяции (в 1/3-октавной шкале).

В рамках исследования создана упрощённая модель моторного отсека беспилотного трактора «Полесад-2.0», позволяющая построить изотермы, отследить маршруты миграции горячего воздуха и диагностировать области потенциального запыления и перегрева компонентов бортовых систем беспилотного трактора.

На основе разработанной упрощённой модели беспилотного трактора «Полесад-2.0», составлена карта температур внутри моторного отсека до внедрения деталей термошумоизоляции для выявления потенциальных мест перегрева бортовых систем машины (рисунок 14).

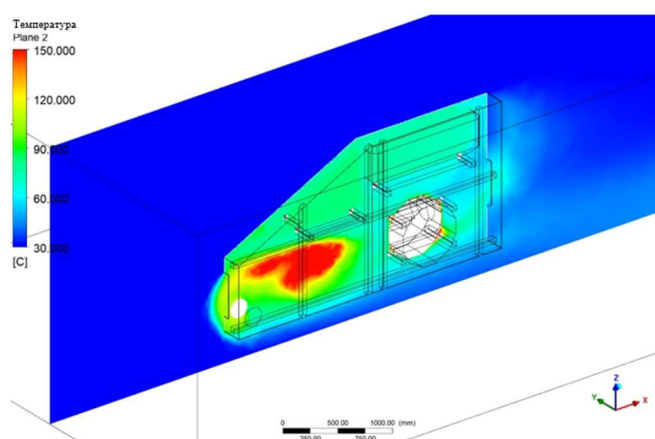


Рисунок 14 – Карта температур моторного отсека беспилотной аграрной машины

На основе проведённого анализа спроектированы детали термошумоизоляции, внедрены в конструкцию беспилотного трактора «Полесад-2.0». На основе полученной геометрии проведён расчёт нагрева спроектированных деталей при максимальной тепловой нагрузке. Полученные данные заложены в основу установки деталей термошумоизоляции и создания комбинированной изоляции. Модель указывает локацию для монтажа деталей с использованием термоэкранов во избежание оплавления проводки и перегрева компонентов электрики и топливной системы.

В программном комплексе ANSYS проведён инженерный анализ деталей термошумоизоляции с термозэкраном. CAE-анализ показал снижение забарьерной температуры с 90,6 °С до 76,3 °С (рисунок 15).

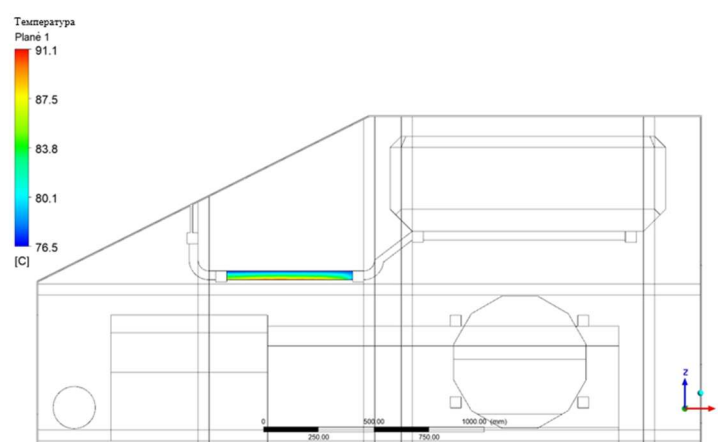


Рисунок 15 – Карта нагрева детали термошумоизоляции с термозэкраном

Четвёртая глава «Экономическое обоснование и внедрение результатов исследования» посвящена экономической оценке проекта, расчёту себестоимости производства, анализу рентабельности модели Robot-as-a-Service, экологическим преимуществам и перспективам коммерциализации. Проведен расчёт себестоимости производства платформы на основе сметы основных компонентов. Рассмотренная экономическая модель Robot-as-a-Service может быть реализована несколькими способами: оплата по подписке за определённые услуги, оплата за часы работы техники, аренда без необходимости покупки либо лизинг. Экономическая сводка по Robot-as-a-Service представлена в таблице 2.

Таблица 2 – Экономическая сводка итоговых значений расходов и прибыли

Показатель ежемесячный	Значение
Стоимость техники, млн. руб.	1,5
Ежемесячная амортизация, руб.	12 500
Обслуживание и ремонт, руб.	8 500
Топливо и материалы, руб.	5 000
Зарплаты, руб.	210 000
Логистические расходы, руб.	10 000
Общие ежемесячные расходы, руб.	246 000
Арендная ставка, руб./час	3 500
Загруженность, час/месяц	160
Ежемесячный доход, руб.	560 000
Прибыль, руб.	314 000

В четвёртой главе рассмотрены нормативные аспекты влияния акустического излучения на человека. Указаны основные сертификационные документы, по которым устанавливается предельное значение шумового фона, производимого сельскохозяйственной техникой. Установлено, что на текущий момент нормативными документами не закреплены различные допустимые значения шума для беспилотных машин и техники, управляемой водителем.

В связи с этим, наличие деталей термошумоизоляции в составе беспилотных аграрных машин, позволяет не только регулировать тепловые и воздушные потоки, что положительно влияет на условия работы бортовых систем, но и позволяет гарантировать прохождение сертификационных испытаний в области шума.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе проведения исследования было предложено решение актуальной проблемы цифровизации сельского хозяйства путём создания беспилотной малозумной модульной платформы. Методы проектирования и лабораторные исследования, полученные при выполнении поставленных задач, были реализованы в виде математических моделей, конструкторской документации и методических материалов.

По итогу проведённого исследования были получены следующие результаты:

1. Исследование соответствует актуальным тенденциям цифровизации российского агропромышленного комплекса. Применение беспилотных технологий демонстрирует высокую экономическую эффективность: экономия средств защиты растений достигает 20%, затраты на технику снижаются в 4–5 раз, а потери урожая уменьшаются на 30%.

2. Проведён анализ методов производства деталей и систем беспилотной малозумной модульной платформы. Выявлены основные источники шума в системах транспортных средств в пределах 65-93 дБА. Проведены испытания кузова транспортного средства на предмет герметизации: снижены утечки воздушных масс с 26,77 л/с до 15,33 л/с при вакууме 250 Па.

3. Произведён прототип модульной платформы, создано программное обеспечение для отслеживания положения беспилотной машины в поле и управления маршрутом её движения. Результаты работы представлены на «Национальной научно-технической конференции» и получили высокие оценки экспертов.

4. Установлено, что войлочный фенольный мат в составе звукоизолирующих деталей превосходит демпфирующий слой из пенополиуретана в среднем на 5 дБ в промежутке от 400 до 3150 Гц. В программном комплексе ANSYS проведён инженерный анализ деталей термошумоизоляции с термоэкраном. CAE-анализ показал снижение забарьерной температуры с 90,6 °С до 76,3 °С.

5. Модель предоставления услуг Robot-as-a-Service продемонстрировала свою целесообразность. При сдаче в аренду беспилотной маломощной модульной платформы по ставке 3 500 руб./ч обеспечивается стабильная ежемесячная прибыль порядка 314 000 рублей.

6. На основе диссертационных методик разработаны детали термошумоизоляции и внедрены в проект «Полесад-2.0». Методики проектирования деталей термошумоизоляции для беспилотных тракторов внедрены в учебный процесс кафедры «Тракторы и автомобили» института механики и энергетики им. В.П. Горячкина.

В дальнейших научных исследованиях планируется продолжить изучение виброакустических и теплообменных процессов, происходящих в моторном отсеке беспилотных наземных машин. Данное направление позволит улучшить надёжность техники и продлить срок службы беспилотных наземных систем.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:

Статьи в изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

1. Сергеев Д.О., Использование прогрессивных методов проектирования наземных дронов для сельскохозяйственных работ / Д.О. Сергеев, О.Н. Дидманидзе, О.В. Закарчевский // Техника и оборудование для села. – 2026. – № 5(347). – С. 28-31.
2. Сергеев Д.О., Методики проектирования и технологии прототипирования беспилотных систем / Д.О. Сергеев, О.Н. Дидманидзе, Д.М. Дудин // Техника и оборудование для села. – 2026. – № 6(348). – С. 12-15.
3. Сергеев Д.О., Формирование ценовой модели Robot-as-a-service для сельского хозяйства / Д.О. Сергеев, О.В. Закарчевский, С.Б. Карякин // Инновации в АПК: проблемы и перспективы. – 2026. – № 2(50). – С. 93-97.
4. Сергеев Д.О., Шумоизоляция и герметизация беспилотных мини-тракторов / Д.О. Сергеев, Е.П. Парлюк // Инновации и продовольственная безопасность. – 2026. – № 3(Т14) – С. 91-102.

Прочие издания:

1. Сергеев Д.О., Применение легкоплавких материалов в акустических и теплоизоляционных обивках транспортных средств / Д.О. Сергеев, Р.В. Хидиров, А.Б. Малышев [и др.] // Сборник научных трудов XIV Национальной научно-технической конференции: Сборник материалов конференции, Москва, 01 – 08 марта 2024 года. Выпуск 6. – Москва: ООО Издательский дом «Камертон», Союз машиностроителей России, 2025. – С. 16-22.
2. Сергеев Д.О., Модульная платформа роботизированных манипуляторов для сельскохозяйственных работ // Сборник научных трудов XV Национальной научно-технической конференции – 2026. – С. 71 – 74.
3. Сергеев Д.О., Методы исследования акустических материалов и деталей с выраженными акустическими свойствами / И.В. Малкин, Д.О. Сергеев, Д. Е. Мещеряков // Труды НАМИ. – 2025. – № 3(302). – С. 137-150.
4. Сергеев Д.О., Перспективы использования роботизированной сельскохозяйственной техники / О.В. Закарчевский, Д.О. Сергеев // АПК: экономика, управление. – 2026. – № 3. – С. 12-19.