

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО
ОБРАЗОВАНИЯ
«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ- МСХА ИМЕНИ К. А. ТИМИРЯЗЕВА»

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

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

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

Москва – 2026

Оглавление

Введение.....	4
Глава I. Анализ современного состояния и перспектив развития роботизированных сельскохозяйственных комплексов.	10
1.1. Обзор степени роботизации сельского хозяйства	10
1.2. Проблемы и возможные пути решения трудностей на пути роботизации российского АПК	13
1.3. Анализ существующих беспилотных тракторов	18
1.4. Рассмотрение принципа построения платформ.....	24
1.5. Выводы по главе I	28
Глава II. Теоретические основы проектирования беспилотной малолучной модульной платформы.....	30
2.1. Разработка концептуальной модели беспилотной малолучной модульной платформы.....	30
2.2. Прототипирование модульной платформы	39
2.3. Источники шума в наземных беспилотниках	47
2.4. Анализ акустических процессов.....	52
2.5. Оптимизация конструкции для герметизации кузова беспилотной машины.....	55
2.6. Выводы по главе II	61
Глава III. Практическая реализация и экспериментальное исследование шумоизоляции	64
3.1. Проектирование акустических изделий для беспилотной машины	64
3.2. Методика проведения испытаний	67
3.3. Результаты экспериментальных исследований.....	76
3.4. Оптимизация и доработка акустических изделий	88
3.5. Тепловой расчёт деталей термошумоизоляции для беспилотной сельскохозяйственной машины	98
3.6. Выводы по главе III.....	104
Глава IV. Экономическое обоснование и внедрение результатов исследования.....	107

4.1. Расчёт себестоимости производства беспилотной малозумной модульной платформы.....	107
4.2. Формирование ценовой модели Robot-as-a-Service в сельском хозяйстве	109
4.3. Экологические преимущества	117
4.4. Перспективы внедрения	120
4.5. Выводы по главе IV	123
Заключение	125
Список литературы	127
Приложение 1	140
Приложение 2	149
Приложение 3	152
Приложение 4	153

Введение

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 (СЗР), обеспечивая экономию до 20% объёма расхода химикатов и снижая затраты на технику в 4-5 раз. Самоходная сельскохозяйственная техника, такая как тракторы и комбайны, оснащены 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 малошумная 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 ТС.

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 термшумоизоляции 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: Парлюк Е.П., Дидманидзе О.Н., Евграфов А.В., Гузалов А.С., Митягин Г.Е., Иванов А.Б., Кузнецов А.Н., Разумовский М.А., Наумов А.В., Власов А. И., Гараев А. В., Захарова В. О., Селиванов К. В., Чернышов Д. Д., Лавров А. В., Власов Д. С., Лучников А. И., Горелова Д. А., Киварина М. В., Юрина Н. Н., Плахин А.Е., Огородникова Е.С., Ростовцев К.В. Байрамов Х. А., Анисимова В. Ю., Пивоварова О.В., Орлов С.Л., Хачатрян А.А., Меджидов З. У., Гаджиева А. Г., Баширова А. А, Rossi S., Puglisi A., Benaglia M., Shekh M., Rani S.

Цель исследования – разработка проекта беспилотной малошумной модульной платформы для сельскохозяйственных работ, включающей изделия термшумоизоляции 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 КФХ. 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 ТС. Изучить кузов ТС 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 ПО 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 ТС 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 ТС на производства.

Научную новизну работы составляют:

1. Разработанная концепция проектирования деталей и установок термошумоизоляции (ТШИ) 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 ТШИ и материалов их изготовления. Определены критические значения нагрева и предельно возможные параметры звукопоглощения.

Практическая значимость работы заключается в следующих результатах:

- проведён анализ методов производства деталей и систем беспилотной малошумной модульной платформы. Проведены испытания кузова ТС 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 ВФМ в составе звукоизолирующих деталей превосходит демпфирующий слой из ППУ в среднем на 5 дБ в промежутке от 400 до 3150 Гц. В программном комплексе ANSYS проведён инженерный анализ деталей термошумоизоляции с термозкраном. CAE-анализ показал снижение забарьерной температуры с 90,6 °C до 76,3 °C;

- модель предоставления услуг RaaS продемонстрировала свою целесообразность. При сдаче в аренду беспилотной малошумной модульной платформы по ставке 3 500 руб/ч или 5 600 руб/га обеспечивается стабильная ежемесячная прибыль порядка 314 000 рублей.

- 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 малошумная

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 ТС. 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 термозвукоизоляции на лабораторных установках.

Положения, выносимые на защиту:

1. Проект беспилотной малозвучной модульной платформы и выполненный в масштабе прототип разрабатываемой машины;
2. Результаты, оценка деталей с ярковыраженными акустическими свойствами.
3. Новая методика проектирования систем ТШИ беспилотных ТС.
4. Анализ применимости, реализуемости, экономического обоснования и подтверждение возможности коммерциализации проекта.

Достоверность результатов исследования обеспечивается большим объёмом данных, полученных в результате проведения лабораторных исследований в области акустики. На основе значений, полученных эмпирическим путём, подтверждается математическая сходимость акустических показателей материалов изготовления деталей с ярковыраженными звукоизолирующими и звукопоглощающими свойствами. В результате разработки и реализации прототипа беспилотной малозвучной 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.

Глава I. Анализ современного состояния и перспектив развития роботизированных сельскохозяйственных комплексов.

1.1. Обзор степени роботизации сельского хозяйства

В настоящее время сельское хозяйство находится на этапе внедрения значительных реформ во многие технологические процессы. Под данными изменениями подразумевается масштабная цифровизация и внедрение беспилотных машин в аграрную промышленность. Беспилотные системы позволяют значительно улучшить качество процессов и сократить время работ. Это происходит за счёт более точного земледелия и точного внесения удобрений. Также цифровизация частично решает вопрос отсутствия квалифицированных кадров и рабочей силы в целом.

Правительство поддерживает эту трансформацию и на цифровизацию агропромышленного комплекса и рыбного хозяйства к 2024 году выделено более 3 миллиардов рублей. Однако прогресс идет медленно – только около 2,7% сельскохозяйственных организаций, внедряющих инновации, получают доступ к этим ресурсам. Для того чтобы робототехника получила широкое распространение, необходимо не только довести технологии до требуемого уровня, но и сделать их доступными по цене и обеспечить надежную правовую базу [1]. Фермеры по всему миру активно используют беспилотные тракторы, уборочные роботы, дроны для мониторинга полей, системы точного земледелия и различные датчики. Россия также стремится внедрять подобные технологии, но отстает, и современные решения в основном внедряются крупными агрохолдингами, в то время как мелкие фермерские хозяйства практически не задействованы. Более того, возможность недорого создавать простые беспилотные аппараты не решает проблему в целом.

Уровень внедрения роботизированных систем в российском сельском хозяйстве по-прежнему значительно ниже, чем у мировых

лидеров, что подтверждается статистикой за 2023 год, согласно которой страна находится за пределами топ-20 стран по этому показателю. В ведущих странах на 10 000 работников приходится 162 робота, в то время как в России – менее одного (примерно 0,75) [2].

Однако финансовые прогнозы указывают на быстрое изменение этой тенденции. Ожидается, что сегмент сельскохозяйственной робототехники, который в 2022 году стоил 46,37 миллиона долларов, к 2030 году вырастет до 124,27 миллиона долларов, увеличиваясь на 12,05% в годовом исчислении. Связанная с этим отрасль цифрового растениеводства растет ускоренными темпами: с 810 миллионов долларов в 2023 году она планирует достичь более 2 миллиардов долларов (2 060,6 миллиона долларов) за семь лет, демонстрируя ежегодный рост на 14,3%. Между тем общий вклад российских разработчиков в мировую индустрию точного земледелия ограничен долей в 3,6% (рисунок 1.1).

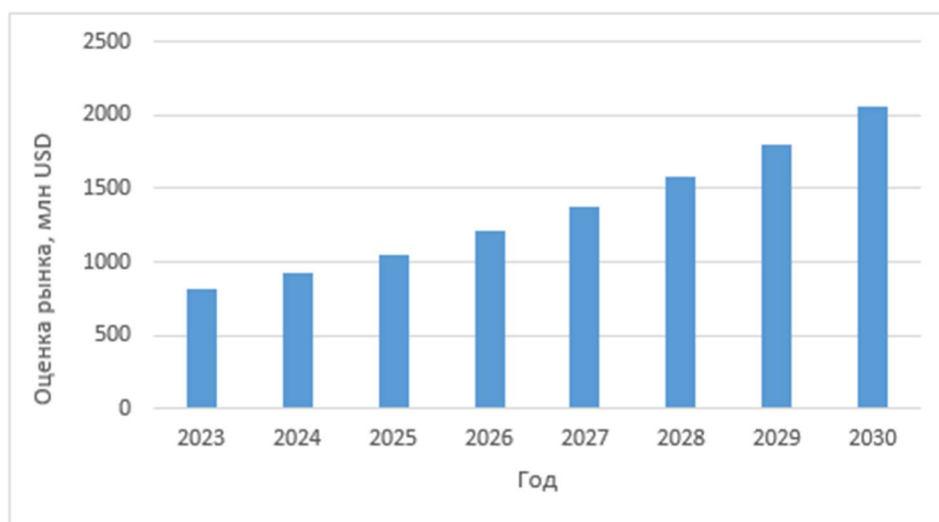


Рисунок 1.1 – Прогнозная динамика рынка умного сельского хозяйства РФ (2023-2030)

Основными препятствиями являются высокая стоимость оборудования, слабая сервисная поддержка, обширность нашей страны и необходимость адаптировать оборудование к различным ландшафтам и

погодным условиям. Тем не менее, по прогнозам специалистов, ситуация может улучшиться в ближайшие 5-7 лет. Важно учитывать не только эффективность роботизированных систем, но и экономическую целесообразность их использования.

В нашей стране уже активно разрабатываются и успешно внедряются различные автономные системы и отдельные её компоненты. Также проходят процессы модернизации сельскохозяйственных машин при помощи внедрения систем помощи механизатору, либо перевода техники в автономный режим работы, без участия человека.

Россия обладает большим запасом плодородных земель и невозделанных территорий. Поэтому даже небольшие улучшения сельскохозяйственных процессов дадут кратные результаты. Ведь на сегодняшний день многие сельскохозяйственные угодья обрабатываются традиционными методами, а также пользуются методами внесения удобрений, посева семян и полива без точного распределения ресурсов [3, 4].

Тем временем аграрная промышленность демонстрирует высокие темпы внедрения точного земледелия и берегающего внесения удобрений, посева семян и использования пестицидов при помощи автономных систем во всём мире. Ожидается, что к 2032 году мировой рынок искусственного интеллекта в сельском хозяйстве превысит 10,2 миллиарда долларов. Россия значительно отстает в этом отношении, поскольку ее инфраструктура передачи данных и единые стандарты все еще находятся в процессе разработки. Например, в 2017 году инвестиции в информационно-коммуникационные технологии в отечественном аграрном секторе составили всего 3,6 млрд рублей, что эквивалентно примерно 0,5% от общего объема капитальных вложений и значительно ниже уровня развитых стран.

Ключевым препятствием остается отсутствие единых стандартов и платформ для обмена данными, что означает, что даже современные

роботизированные системы и системы точного земледелия работают изолированно и не могут полноценно взаимодействовать. Чтобы преодолеть эту проблему, необходимо разработать открытые API, обеспечить совместимость между различными решениями и установить четкие требования к безопасности автономных систем, основанные на международном стандарте ISO 18497-1 [5].

1.2. Проблемы и возможные пути решения трудностей на пути роботизации российского АПК

Внедрение робототехники в отечественный агропромышленный комплекс сталкивается с рядом взаимосвязанных препятствий. В первую очередь, это высокая стоимость специализированной техники: по состоянию на 2024 год автономный трактор стоил 15-25 млн рублей, в то время как платформа для мониторинга полей и сбора данных стоила 5-8 млн рублей [6]. Для значительной части средних и мелких фермерских хозяйств такие капиталовложения являются непомерно высокими без участия государства, лизинговых схем или арендной платы. Кроме того, срок окупаемости может достигать 7-8 лет, особенно при сезонном использовании оборудования, что значительно снижает привлекательность таких проектов для инвесторов.

Существенным препятствием также является низкая адаптируемость зарубежных и даже отечественных разработок к российским реалиям. Суровые климатические условия, значительные колебания температуры, выраженная сезонность и неоднородный почвенный покров требуют применения сложных алгоритмов стабилизации и автономного вождения. Рассредоточенность сельских районов на большие расстояния еще больше усложняет техническое обслуживание машин. По данным TAdviser analytics (2025), климатические и ландшафтные условия являются одними из основных

проблем при внедрении роботизированных систем в сельскохозяйственном секторе [7].

Невозможность в полной мере реализовать потенциал автономной сельскохозяйственной техники во многом обусловлена плохим покрытием сельских районов высокоскоростным Интернетом и сигналами спутникового позиционирования (GPS/ГЛОНАСС). По оценкам Министерства цифрового развития, охватывающим период до 2025 года, стабильная связь доступна только в 62% негородских районах. Это делает невозможным корректное управление датчиками и платформами дистанционного управления, которые имеют решающее значение для точности перемещения роботизированного парка [8].

Дополнительным фактором риска является несовершенство аппаратуры. Машины, которые успешно справляются с задачами на испытательных трассах, регулярно выходят из строя в реальных условиях. Это обусловлено различными факторами, которые включают отсутствие надёжного беспроводного интернет соединения, несовершенство датчиков и лидаров беспилотных систем, а также индивидуальной адаптацией оборудования под различные климатические условия и свойства почвы в России.

На сегодняшний день также отсутствуют стандарты и нормативные документы, определяющих ответственных лиц и регулирующих спорные ситуации. В том числе существуют трудности на малых и средних сельских хозяйствах, которые традиционно испытывают трудности с наймом персонала [9].

И всё же наша сельскохозяйственная промышленность продолжает уверенный рост и на 2019 год в России было задействовано 435 сельскохозяйственных роботов. Таким образом уже 7 лет назад этот показатель составлял примерно 0,75 роботов на 10 000 сотрудников. Малые беспилотные системы часто являются первым выбором, так как они дешевле и обеспечивают более быструю окупаемость инвестиций.

Системы точного земледелия уже работают в 63 регионах, а площадь полей, на которых используются эти технологии, к 2023 году увеличилась на 24%. Благодаря им себестоимость производства зерна снижается на 25-30% (с 6500 руб/т до 5000 руб/т) за счет экономии удобрений, топлива и семян. В дополнение к экономическим выгодам, существуют также экологические преимущества: сокращается использование химических веществ и углеродный след.

Во всем мире рынок сельскохозяйственной робототехники стремительно растет. В 2024 году он оценивался в 14,7 млрд долларов США, ожидается, что к 2030 году он достигнет 48,1 млрд долларов США (среднегодовой прирост составил 23%), а к 2035 году составит примерно 136,8 млрд долларов США. При нынешних темпах роста (примерно 12%) доля России может составить 1,5-2 миллиарда долларов. Если будут приняты системные меры, такие как разработка моделей аренды Robot-as-a-Service (RaaS), стандартизация решений, внедрение льготного кредитования и повышение уровня подготовки персонала, то к 2035 году страна может занять 3-5% мирового рынка [10].

Сегмент сельскохозяйственной робототехники в России приблизился к порогу развития, который эксперты классифицируют как начальную стадию зрелости. Для обеспечения значительного качественного продвижения в вопросе индустриализации процессов массового производства беспилотных систем необходимо на государственном уровне создать благоприятную нормативно-правовую среду и запустить программы подготовки необходимых квалифицированных специалистов. Это потребует совместной работы нескольких государственных ведомств, синергия которых позволит разработать качественные решения в области цифровизации сельского хозяйства и позволит нашей аграрной промышленности занять лидирующие по миру позиции в этом отношении.

Статистика и данные, приведённые выше, сведены в таблицу 1.1.

Таблица 1.1 – Основные финансово-экономические ограничения внедрения беспилотной техники

Проблема	Проявление	Последствие	Возможное решение
Высокая стоимость оборудования	5–25 млн руб. за единицу техники	Долгий срок окупаемости	Лизинг, субсидии, модели RaaS
Низкий коэффициент использования	30–50 % рабочего времени	Недозагрузка машин	Кооперация хозяйств
Дефицит сервисов и запчастей	Отсутствие локальных центров	Рост простоев	Создание региональных сервис-хабов
Недостаток инвестиций в R&D	Ограниченные частные инвестиции	Технологическое отставание	Гранты, венчурные программы

Наиболее перспективной моделью для отечественных условий представляется сервисная модель RaaS, при которой оборудование сдается в аренду, а оплата взимается в зависимости от фактически обработанных гектаров. Такой подход устраняет барьер высоких первоначальных инвестиций и открывает доступ к передовым технологиям даже для небольших фермерских хозяйств [11].

Такая модель обслуживания уже зарекомендовала себя в гражданской авиации, и авиаперевозчики приобретают пакет летных часов у специализированных компаний, а все операции по технической поддержке, такие как плановые проверки, замена расходных материалов, ремонт и модернизация, выполняются сервисной организацией. Аналогичный подход может быть использован и для управления сельскохозяйственными беспилотниками. В этом случае сервисный центр берет на себя не только техническое обслуживание техники, но и само

пилотируемое, освобождая фермеров от этих обязанностей. Прогресс в этой области сдерживается отсутствием соответствующего законодательства. России еще предстоит принять национальный стандарт безопасности для беспилотной сельскохозяйственной техники, в то время как стандарт ISO 18497-1:2024, который определяет требования к проектированию и испытаниям такого оборудования, уже действует на международном уровне. Международный опыт свидетельствует о двойственном влиянии законодательной базы, и в то время как в Соединенных Штатах она стимулирует отрасль, то строгие ограничения на использование беспилотных аппаратов и воздушного пространства в Китае и ряде европейских стран препятствуют инновациям. Поэтому необходима разработка нормативных актов, включающая лицензирование полётов над полями и процедуры контроля за соблюдением требований.

Серьезным препятствием также остается отсутствие официальной регистрации и механизмов подтверждения соответствия автономных систем. Это создает правовую коллизию в отношении распределения ответственности в случае аварии автономного трактора между производителем, удаленным диспетчером или владельцем сельскохозяйственной компании. До тех пор, пока эта неопределенность не будет устранена, ведущие машиностроители будут воздерживаться от массового производства подобных решений. Было бы целесообразно ускорить создание нормативной базы для эксплуатации, тестирования и сертификации сельскохозяйственных роботов, основанной на методах, ранее зарекомендовавших себя в сегменте автономных транспортных средств [12].

Третьим критическим фактором является нехватка квалифицированного персонала. В настоящее время лишь несколько университетов в стране предлагают магистерские программы по цифровому сельскому хозяйству. В большинстве регионов Российской

Федерации отсутствуют учебные заведения для пилотов беспилотных аппаратов, специалистов по спутниковой навигации и аналитике искусственного интеллекта. Это создает дисбаланс, ведь оборудование закуплено, но некому его обслуживать, что приводит к простоям дорогостоящего оборудования. Развитие сети учебных и производственных центров для повышения практических навыков поможет преодолеть этот разрыв. Поддержка как со стороны государства, так и частного сектора заложит основу для развития отрасли. Перечисленные проблемы носят системный характер и сочетают в себе технические недостатки, экономические барьеры, законодательные лазейки и нехватку персонала. Эти элементы тесно взаимосвязаны и даже при наличии инвестиций невозможно гарантировать стабильную работу роботизированных ферм без чётких правил и обученного персонала [13].

1.3. Анализ существующих беспилотных тракторов

Тракторы без водителя – это самоходные сельскохозяйственные машины малой и средней мощности, оснащенные системами машинного зрения и управления, которые позволяют работать без непосредственного присутствия оператора в кабине. Данные типы машин используют различные системы и датчики для автономной работы и выполнения вспашки, посева, внесения удобрений и сбора урожая.

Становление данного сегмента аграрной промышленности стало возможным благодаря комплексному взаимодействию смежных отраслей российской промышленности и позволило качественно решить вопросы автоматизации сельскохозяйственных процессов [14].

Машины комплектуются комплексом сенсоров компьютерного зрения: лидарами для построения трёхмерной карты местности, радарами для обнаружения препятствий в сложных погодных условиях, стереокамерами и гиперспектральными датчиками. Этот набор

оборудования позволяет не только идентифицировать границы поля и препятствия, но и проводить агрономический мониторинг, оценивать состояние почвы и посевов, а также дифференцировать культурные растения от сорняков для точечного внесения средств защиты. В условиях затенения или отсутствия спутникового сигнала непрерывность работы поддерживают инерциальные навигационные системы.

В качестве практического примера отечественной реализации можно привести промышленный прототип полностью автономного роботизированного мини-трактора без кабины, представленный российской компанией Cognitive Pilot. Демонстрация разработки состоялась на выставке «Золотая нива-2024». Оборудование функционирует на базе нейросетевых технологий и предназначено для автоматизации основных сельскохозяйственных операций (рисунок 1.2).



Рисунок 1.2 – Беспилотный мини-трактор «Си-Пи»

Ключевым эксплуатационным преимуществом является система автономного ориентирования. Безопасное передвижение в сложных полевых условиях, при наличии камней, неровностей рельефа или посторонних предметов обеспечивается комплексом сенсоров и алгоритмами искусственного интеллекта, которые отвечают за

распознавание препятствий и их автоматический объезд. В процессе работы аппарат осуществляет сбор агрономических данных о состоянии почвы и посевов. Эти сведения позволяют фермерам оптимизировать технологические карты, повышать урожайность и снижать расход семян, удобрений и ГСМ. Точность позиционирования исполнительных механизмов сопоставима со станками с ЧПУ, что полностью исключает ошибки, связанные с человеческим фактором. Предусмотрено дистанционное сопровождение, при котором оператор контролирует техническое состояние машины и ход выполнения задачи в режиме реального времени [15].

Технические характеристики мини-трактора следующие: мощность – 30 л.с., вес – 970 кг, рабочая скорость – от 5 до 20 км/ч. Конструкция без кабины, без точек поворота, а оптимизированная подвеска и отсутствие коробки передач снижают риск поломок.

Надежность достигается за счет упрощенной кинематической схемы, которая минимизирует количество изнашиваемых узлов и снижает эксплуатационные расходы. Высокая точность операций поддерживается нейросетевыми алгоритмами управления. Автономность позволяет трактору функционировать без участия оператора после постановки глобальной задачи машина самостоятельно выполняет проходы по заданному маршруту. Накопленные массивы полевых данных служат основой для принятия обоснованных управленческих решений, повышающих общую рентабельность хозяйства.

«Си-Пи» полностью спроектирован и изготовлен на опытном производстве Cognitive Pilot в Томске. Стратегия развития компании предусматривает выход на международные рынки, включая страны Латинской Америки, Ближнего Востока, Южной Африки и Китайскую Народную Республику.

Данная разработка позиционируется как инструмент автоматизации рутинных задач для малых и средних фермерских хозяйств,

направленный на снижение себестоимости продукции и повышение эффективности землепользования.

Платформа AgBot 2.055W4 представляет собой гусеничный автономный модуль, разработанный нидерландской компанией AgXeed для выполнения тяжёлых полевых операций в режиме непрерывного цикла. В отличие от классических тракторов, эта машина изначально проектировалась как роботизированная система с упором на энергоэффективность и исключение человеческого фактора из процесса управления. (рисунок 1.3).



Рисунок 1.3 – Беспилотный трактор AgBot 2.055W4 от компании AgXeed

В основе платформы лежит четырехтактный дизельный двигатель Deutz объемом 2.9 литра экологического стандарта Stage 5. Номинальная мощность составляет 75 лошадиных сил при пиковом крутящем моменте до 300 Нм. Ключевая особенность архитектуры заключается в отказе от механической коробки передач в пользу полностью электрической трансмиссии. Дизель-генератор вырабатывает энергию, которая распределяется по электромоторам, приводящим в движение гусеницы. Это обеспечивает бесступенчатое изменение скорости в диапазоне от 0 до 13,5 км/ч без разрыва потока мощности [16].

Для энергоемкого навесного оборудования предусмотрен

опциональный электрический вал отбора мощности. Система способна выдавать до 55 кВт при напряжении 700 вольт, что позволяет агрегатировать машину с современными активными орудиями, требующими высокой стабильной нагрузки. Топливный бак объемом 220 литров поддерживает длительную автономность. Переход на платформу AgBot 2.055W4 исключает затраты на оплату труда механизаторов в ночные смены и снижает риск человеческой ошибки. Электрическая трансмиссия уменьшает износ силовых узлов, а точное дозирование топлива и СЗР сокращает прямые операционные расходы, обеспечивая быструю окупаемость капитальных вложений за счет повышения общей производительности гектара.

Проект Combined Powers представляет собой совместное концептуальное исследование двух немецких машиностроительных гигантов – производителей почвообрабатывающей техники Lemken и кормозаготовительного оборудования Krone. В отличие от классических тракторов, эта разработка позиционируется не как универсальная машина с кабиной, а как беспилотный технологический агрегат, предназначенный для интеграции в полностью автоматизированные рабочие цепочки. (рисунок 1.4).



Рисунок 1.4 – Автономный трактор Lemken Krone Combined Powers

Платформа построена на базе дизель-электрической силовой установки. ДВС приводит в действие генератор, который питает тяговые электромоторы и систему бортового питания. Суммарная мощность агрегата составляет 230 лошадиных сил. Такая конфигурация позволяет передавать крутящий момент на колеса без механических потерь в трансмиссии, обеспечивая мгновенный отклик на изменение нагрузки. Габаритные характеристики автономного модуля составляют 2,7 метра в ширину и 2,6 метра в высоту при массе от 7,5 до 8 тонн. Машина базируется на колесах диаметром 23 дюйма, что обеспечивает оптимальный баланс между проходимостью и давлением на почву. Энергия распределяется электрическим путем как на ходовую часть, так и на вал отбора мощности [17].

Ключевым отличием системы является отказ от традиционного механического управления гидравликой со стороны человека. В этой парадигме управляющие команды генерирует не оператор, а сам рабочий орган через свои датчики и вычислительный модуль. Например, плуг или сеялка могут самостоятельно отдавать трактору приказы об изменении скорости движения, подъеме или опускании рамы, регулировке давления на сошники и включении вала отбора мощности. Это создает замкнутый киберфизический контур, где трактор выступает лишь исполнительным механизмом, адаптирующим свою динамику под текущую плотность почвы или густоту посева.

В описанных выше беспилотных системах отсутствуют детали и установки шумоизоляции как таковые. Данный конструктив негативно сказывается не только на технические характеристики, но и влияет на использование данного рода техники близ ангаров, жилых построек, складов и прочих мест присутствия человека. Поскольку в будущем беспилотные транспортные средства получат значительное распространение и будут всё чаще применяться в логистике, промышленности, сельском хозяйстве и коммунальных службах, вопрос

о внедрении деталей и установок термошумоизоляции становится всё более востребованным. Для более широкого внедрения данных беспилотных систем необходимо учитывать требования большего числа областей применения и производить модификации с учетом потребностей клиентов.

1.4. Рассмотрение принципа построения платформ

В целях ускорения цифровизации сельскохозяйственной отрасли представляется целесообразным внедрение проектного принципа, основанного на единой модульной платформе. В инженерном отношении подобная платформа рассматривается как совокупность унифицированных конструктивных элементов и технических решений, формирующих базу для создания семейства машин различного функционального назначения. Платформа жёстко регламентирует ключевые геометрические параметры, в числе которых колёсная база, колея, компоновка узлов, архитектура несущей рамы и иные базовые характеристики. Применение платформенного подхода создаёт условия для стандартизации производственных цепочек, снижения издержек, сокращения сроков разработки новых моделей и повышения общей эффективности предприятия [18].

Ключевым преимуществом рассматриваемого подхода выступает гибкость архитектуры. Модульная система функционирует как набор взаимозаменяемых компонентов, допускающих различные варианты компоновки. Инженеры получают возможность варьировать колёсную базу, ширину колеи и величину свесов, а также адаптировать конструкцию под установку различных типов кузовов и силовых агрегатов. Интеграция силовых установок закладывается непосредственно на этапе конструирования базы. Формируется единая линейка совместимых двигателей и трансмиссий, при этом модели внутри

одного семейства могут оснащаться как идентичными, так и принципиально разными моторами без изменения несущей структуры.

Ещё одним фундаментальным принципом выступает стандартизация точек крепления. Унификация посадочных мест для ключевых узлов не только упрощает сборочный процесс, но и существенно облегчает последующее техническое обслуживание парка машин (рисунок 1.5).



Рисунок 1.5 – Схема подбора параметров кузова, обеспеченной платформенностью

Современные автомобильные платформы изначально проектируются с расчётом на внедрение перспективных технологий. Подобная архитектура даёт возможность без существенных изменений интегрировать передовые решения, будь то системы автономного вождения или полностью электрические силовые установки.

Не менее значимым фактором выступает и оптимизация производственных процессов. Единая база обеспечивает массовость выпуска, сокращает время на переналадку оборудования, упрощает логистику комплектующих и подготовку персонала. Кроме того, модели

разных классов могут собираться параллельно на одной линии, что заметно повышает общую эффективность производства.

К числу преимуществ платформенного подхода следует отнести, прежде всего, снижение затрат. Несмотря на высокую стоимость первичной разработки самой архитектуры, её масштабирование на несколько моделей уменьшает расходы на НИОКР в среднем на 20–40%. Жизненный цикл создания автомобиля сокращается с традиционных 5–6 лет до 3–4 лет за счёт унификации инженерных решений. Экономия за счёт масштаба также играет свою роль и массовая закупка стандартных компонентов ведёт к значительному снижению их себестоимости. Повышение качества достигается за счёт стандартизации узлов, которая уменьшает вариативность сборочных ошибок и увеличивает общую надёжность продукта.

Вместе с тем переход на единые архитектуры сопряжён со специфическими угрозами. Главная из которых это риск потери индивидуальности бренда. Базовая платформа жёстко регламентирует основные габариты и точки крепления агрегатов, что часто приводит к визуальному сходству автомобилей разных линеек. Ввиду этого, избыточная унификация способна привести к обезличиванию продуктов [19].

Примеры модульных платформ подтверждают эффективность такого подхода. Платформа MQB от Volkswagen позволяет создавать модели различных классов: Polo, Passat и Tiguan. Это автомобили с разными вариантами подвески и трансмиссии. Платформа CMF от Nissan состоит из четырёх независимых модулей, таких как моторный отсек, салон, передняя и задняя части кузова. Она позволяет создавать компактные хэтчбеки, седаны, кроссоверы и тяжёлые внедорожники. Платформа Mercedes-Benz MRA представляет собой модульную заднеприводную архитектуру с несколькими вариантами колёсной базы и ширины колеи, которая может послужить основой для более чем десяти

новых моделей, включая купе, седаны, универсалы и кроссоверы. Aurus – российский бренд автомобилей класса люкс, разработанный ФГУП «НАМИ» в рамках проекта «Кортеж», который в настоящее время переименован в «Единую модульную платформу», или UMP. Семейство включает в себя несколько моделей, построенных на единой модульной платформе (рисунок 1.6).



Рисунок 1.6 – Пример платформенных автомобилей семейства Aurus

Аналитические агентства сходятся в своих прогнозах относительно устойчивого долгосрочного роста в этом сегменте рынка. Основными факторами остаются демографические факторы, экономическая эффективность за счет снижения зависимости от ручного труда, политика государственной поддержки и требования продовольственной безопасности. При этом также остаётся открытым вопрос внедрения данного решения в том числе и в сельскохозяйственную отрасль. Трудности на пути разработок модульной платформы будут возникать в том числе и с высокими первоначальными вложениями, технологической сложностью проработки модульных систем, консервативностью сельского хозяйства [20].

1.5. Выводы по главе I

Был проведен систематический обзор текущего состояния сельскохозяйственной робототехники, по итогам которого выявлены ключевые технологические, экономические и институциональные барьеры. Также проанализированы существующие отечественные и зарубежные модели беспилотных мини-тракторов. На основе полученных данных сформулированы следующие выводы, определяющие направления дальнейших исследований.

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 рублей 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 районе 80-85 дБА, и без использования звукопоглощающих и звукоизолирующих деталей получение сертификата соответствия нормативным требованиям затруднительно.

Был 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 крестьянско-фермерских хозяйства в доступных беспилотных аграрных машинах.

Глава II. Теоретические основы проектирования беспилотной малошумной модульной платформы.

2.1. Разработка концептуальной модели беспилотной малошумной модульной платформы

Агропромышленный комплекс (АПК) в настоящее время нуждается в автоматизации и цифровизации больше, чем другие отрасли промышленности, из-за нехватки рабочей силы, устаревшего оборудования и медленного внедрения технологий. Хотя сельскохозяйственному сектору России уделяется повышенное внимание и предоставляются субсидии, автоматизация, робототехника и цифровые технологии все еще находятся на ранних стадиях развития.

По данным Росстата, индекс сельскохозяйственного производства в 2024 году составил 96,8%. Это снижение связано с сокращением производства продукции растениеводства, ввиду того что из-за экстремальных погодных условий урожай зерновых оказался более чем на 13% ниже, чем в 2023 году. Производство картофеля также сократилось на 11,9%, при общем урожае 17,83 млн тонн по сравнению с 20,24 млн тонн в 2023 году, зерна на 11,9%, семян подсолнечника на 4,6%, сахарной свеклы на 5,3% и овощей на 1,6%. При этом производство скота и птицы на убой в 2024 году увеличилось на 2,1% почти на 16,9 млн тонн в живом весе, надои молока на 0,8% до 34,1 млн тонн, а производство яиц сократилось на 0,3% до 46,5 млрд яиц [21].

По данным Федеральной налоговой службы, на 1 января 2024 года в России насчитывалось 4 258 149 индивидуальных предпринимателей и крестьянских (фермерских) хозяйств (КФХ). Однако к апрелю 2025 года количество фермерских хозяйств сокращается: в Краснодарском крае на начало марта было на 6,7% меньше голов КРС 7320 против 7850 в 2024 году; в Ростовской области в 2024 году закрылось более 400 ферм; а за последние пять лет более 35 000. Фермеры прекращают свою

деятельность по всей стране. В то же время количество организаций со статусом крестьянско-фермерских хозяйств практически не изменилось 359 по сравнению с 358 годом ранее.

В январе–марте 2025 года продажи российской сельскохозяйственной техники на внутреннем рынке снизились на 32,9% по сравнению с аналогичным периодом 2024 года, составив 38,3 млрд рублей. Основными причинами такого снижения являются высокая стоимость заимствований, низкая рентабельность сельскохозяйственных предприятий, ограниченная государственная поддержка и рост цен как на саму технику, так и на производимую сельскохозяйственную продукцию [22].

Наиболее заметный спад в 2024 году затронул сегмент зерноуборочных комбайнов. Из анализа открытых источников следует что производство сократилось на 58,3%, до 437 единиц. Отрицательная динамика наблюдалась и по другим видам техники. Также это затронуло производство самоходных кормоуборочных комбайнов, которое сократилось на 32,4%, тракторов на 39%, плугов на 13%, культиваторов на 17,4%, борон на 20,3%, сеялок на 4,5%, опрыскивателей на 30%, жаток на 13,2%. И только сборка зерновых уборочных машин увеличилось на 25,3%, в то время как поставки машин для внесения удобрений увеличились в 2,3 раза до 138 единиц, косилок на 28,7% и пресс-подборщиков на 28,3%.

Поддержка малого и среднего сельскохозяйственного бизнеса важна для стимулирования производства продовольствия и повышения доходов сельских жителей. Инновационные технические решения, новые экономические модели и поддержка государства позволят укрепить продовольственную безопасность России [23]. Цифровизация сельского хозяйства позволит повысить эффективность аграрных процессов и сократит финансовую нагрузку на предпринимателей и фермеров. Этот эффект будет достигнут за счёт более взвешенного внесения удобрений,

контроля расхода воды при поливе и точного земледелия. Но данный экономический и практический потенциал может быть реализован только при условии консолидации промышленников, аграриев и предпринимателей смежных областей экономики.

В данном материале под малыми сельскими хозяйствами будут рассмотрены угодья от 0,5 до 10 000 га, на которых занимаются растениеводством или животноводством. Фермерства с большими земельными участками будут приниматься за средние или крупные хозяйства [24].

Основным препятствием на пути к повышению темпа цифровизации выступает высокая стоимость машин и оборудования, неподъёмная для малых и средних хозяйств. Это приводит к фрагментарному внедрению инноваций, в первую очередь крупным капиталом, что препятствует интеграции данных телеметрии в единую систему управления, создавая технологический разрыв с парком автономных устройств. Инициатива направлена на решение трех взаимосвязанных задач. Во-первых, создание доступной многофункциональной машины для растениеводства и уборки урожая; во-вторых, минимизация требований к квалификации персонала для технического обслуживания; и, в-третьих, повышение эффективности использования оборудования для плавной интеграции в цифровую архитектуру российского агропромышленного комплекса.

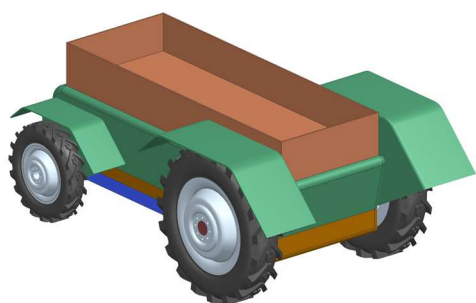
Концепция основана на платформенном принципе – создании унифицированного самоходного колесного шасси. Она предназначена для оснащения широким спектром навесного оборудования, позволяющего пересобирать базовый трактор в другие типы машин. Таких как экскаватор, опрыскиватель, кормоуборочную машину, почвообрабатывающий агрегат, овощеуборочную машину для сбора винограда, молотилку для зерна, вилочный погрузчик, снегоуборочную машину или газонокосилку. При отсутствии модулей платформа служит

в качестве логистической беспилотной машины.

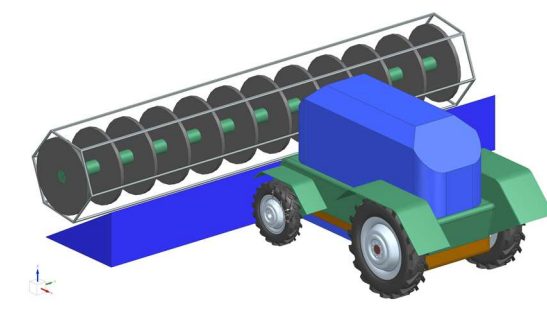
Для обеспечения безопасности в ограниченном радиусе поля, установлена многоуровневая навигационная система. Начальный контур устанавливается с помощью внешнего беспилотника, который считывает пограничные знаки территории. Затем оператор создает карту маршрута, и окончательный контроль расстояния осуществляется автоматически. [25].

Далее на рисунке 2.1 приведён перечень модификаций малотоннажной модульной платформы роботизированных комплексов для сельскохозяйственных работ:

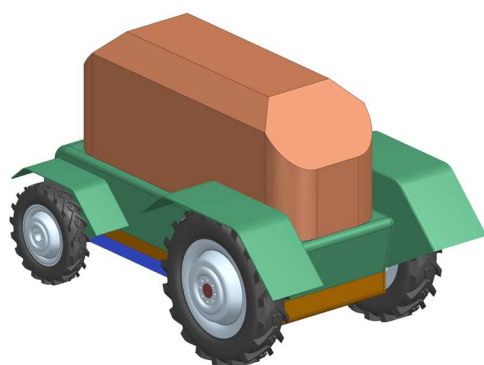
а)



в)



б)



г)

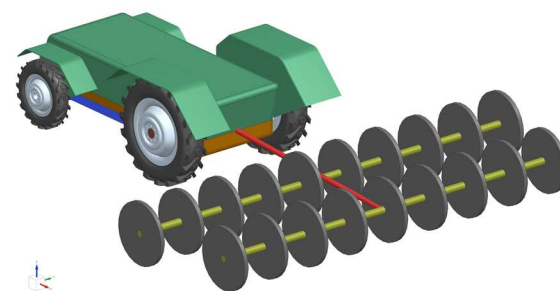


Рисунок 2.1 – Вариативности исполнения модульной платформы: а – платформа с открытым контейнером, б – мобильный комбикормовый завод, в – зерноуборочный комплекс, г – платформа с прицепными почвообрабатывающими модулями, опрыскивателями и тд.

Универсальность платформы позволяет использовать ее не только

как базу для функциональных модулей, но и как автономную логистическую единицу грузоподъемностью до 1500 кг. Функциональность мини-трактора расширяется за счет интеграции различных навесных устройств. В этот перечень устройств входит оборудование для обработки почвы, посева и посадки, внесения удобрений, ухода за растениями и уборки урожая [25].

Для работы беспилотной машины необходимо провести ряд подготовительных операций. Необходимо обозначить маячками края поля и перенести координаты рабочего участка в управляющую программу. Специализированное ПО построит оптимальный маршрут внутри загруженного контура поля в зависимости от типа работ и установленного оборудования и передаст маршрут беспилотной платформе. Далее оператор в режиме реального времени сможет контролировать процесс работы и при необходимости вносить корректировки в маршрут движения беспилотного мини-трактора [26].

На рисунках 2.2 – 2.5 представлены схема работы беспилотной машины и различные виды спроектированного устройства.

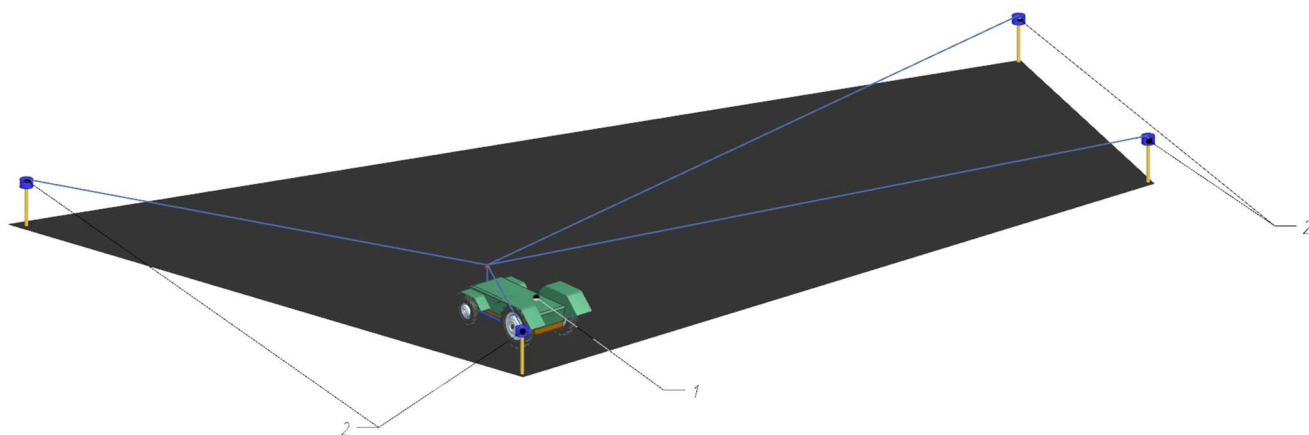


Рисунок 2.2 – Схема работы и определения беспилотного трактора в ограниченном пространстве: 1 – машина с приёмником, 2 – стойки датчиков

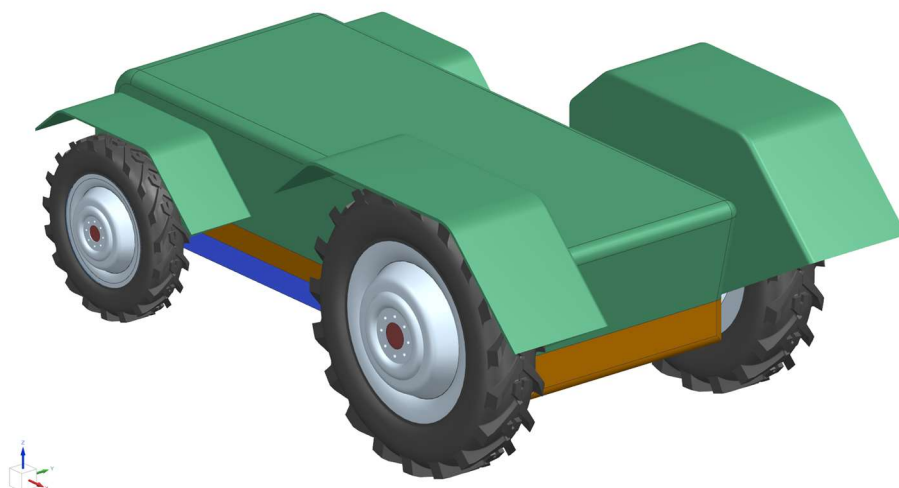


Рисунок 2.3 — Изометрический вид модульной роботизированной платформы

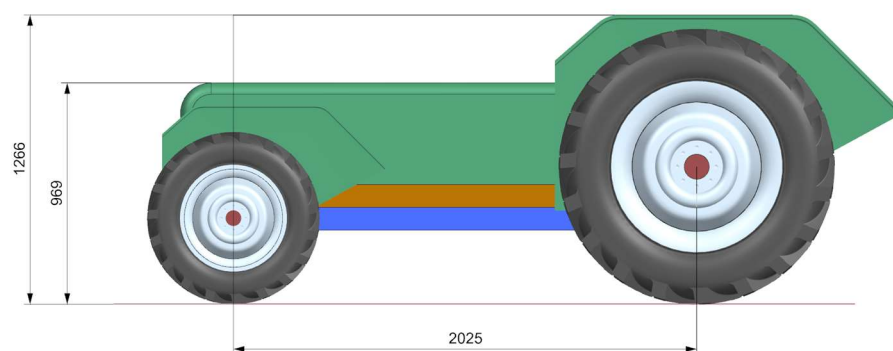


Рисунок 2.4 — Модульная роботизированная платформа, вид сбоку

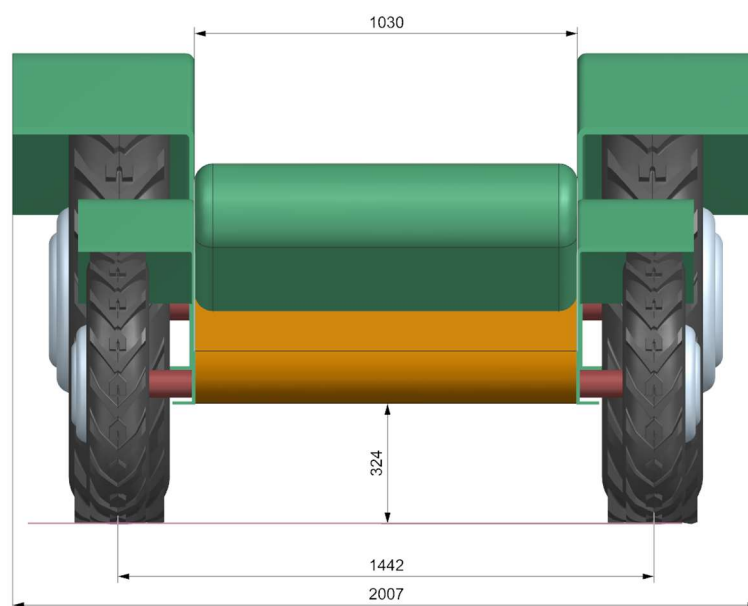


Рисунок 2.5 — Модульная роботизированная платформа, вид спереди

Аппаратная часть платформы включает в себя следующие компоненты: литий-ионную систему накопления энергии мощностью 30 киловатт-часов, систему электропривода конфигурируемую как два двигателя мощностью 6 кВт или один блок мощностью 18 кВт, контроллер на печатной плате и пространственную раму. Чистый вес платформы без модулей ограничен 500 кг, максимальная скорость движения вперёд составляет 30 километров в час, а расчётный срок службы от одного цикла зарядки составляет восемь часов и более.

Дальнейшее уточнение геометрии каркаса будет выполнено с использованием алгоритмов генеративного проектирования, то есть оптимизацией топологии. Преимуществом этого метода является возможность определения точек крепления и плоскостей сопряжения на этапе расчёта. Использование методов компьютерного для моделирования пространственной геометрии позволяет с высокой точностью прогнозировать распределение усилий по всей раме. Такой подход позволяет достичь максимальной энергоэффективности при обеспечении требуемой жесткости конструкции с минимальным расходом материалов. Для этого разрабатывается вычислительная модель. Она должна корректно транслировать внешние воздействия в формат данных для метода конечных элементов. Применение данной модели существенно упрощает процесс проектирования и предваряет полномасштабные испытания прототипа [27].

На начальном этапе критически важно определить доминирующие типы нагрузок. Именно выбор главных векторов давления из всего спектра эксплуатационных условий задает конфигурацию несущего каркаса устройства (рисунок 2.6).

Компоненты беспилотных транспортных средств проектируются с жесткими ограничениями по массе. Снижение снаряженного веса и экономия конструкционных материалов напрямую повышают

эффективность силовой установки. При изготовлении литых деталей подвески предпочтение отдается алюминиевым сплавам. Они обеспечивают оптимальное соотношение лёгкости и прочности, обладают высокой коррозионной стойкостью и сохраняют структурную целостность при экстремально низких температурах. Современные исследования направлены на повышение прочностных характеристик этих материалов. Ожидаемые результаты позволят расширить сферу их применения в машиностроении.

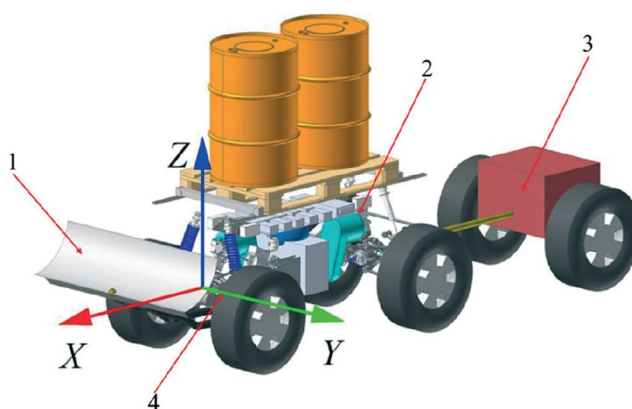


Рисунок 2.6 – Пример проектирования аналогичных беспилотных систем: 1 – отвал, 2 – мотовездеход, 3 – прицеп, 4 – глобальная система координат [28]

Усиливающиеся нормативные требования к технике создают всё новые вызовы для инженеров. Тем не менее данные потребительские запросы и сертификационные критерии являются причиной создания всё более совершенных технологических решений и инновационных внедрений. Это также касается методов оптимизации конструкций, когда проектировщики прибегают к топологической оптимизации, реверс-инжинирингу и создают новые виды сплавов на алюминиевой основе. Подобные разработки позволяют добиваться впечатляющих результатов в области надёжности и функционала деталей и механизмов, при минимальной материалоемкости.

Тем не менее новые решения в области металлических конструкций требуют специальных методов производства, которые включают литьё в напечатанные песчаные формы, выращивание моделей металлом и другие новейшие способы производства (рисунок 2.7). Экструзионная 3D-печать металлом или полимерами является неоптимальным решением из-за низкой прочности конечного продукта и высокой стоимости нитей [29].

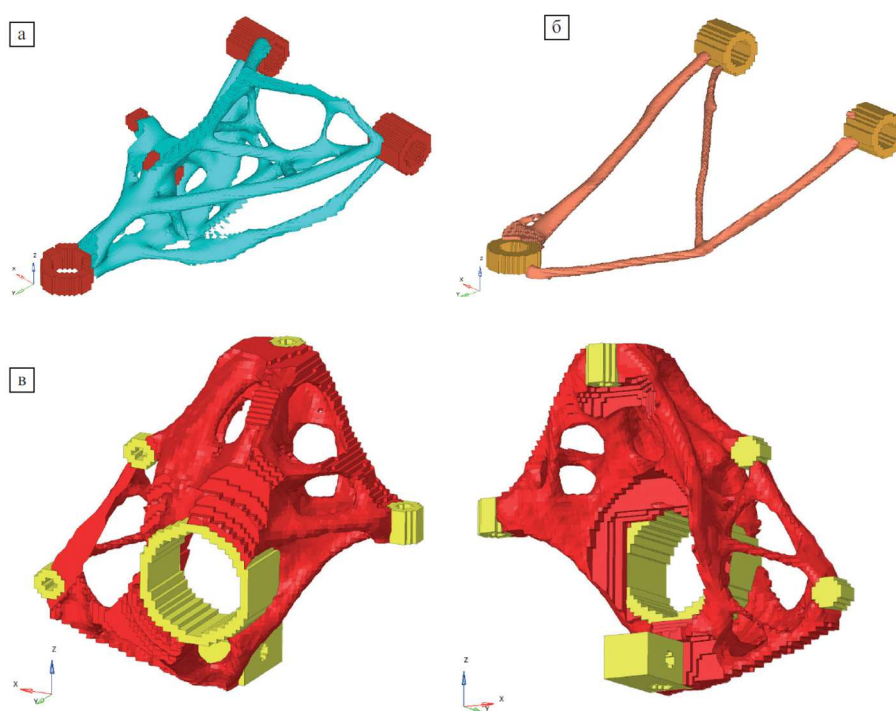


Рисунок 2.7 – Пример применения метода топологической оптимизации при проектировании силовых узлов беспилотных систем: а – силовая схема верхнего рычага, б – силовая схема нижнего рычага, в – силовая схема поворотного кулака [28]

Наиболее эффективным компромиссом признано использование литейных технологий. Предлагается задействовать методику получения облегченных отливок путем естественного залива алюминия в напечатанные на трехмерном принтере песчаные или полимерные формы. Этот гибридный подход даёт возможность серийно производить детали сложной пространственной конфигурации, сохраняя высокие прочностные показатели материала и удерживая себестоимость на

приемлемом уровне (рисунок 2.8) [30, 31].

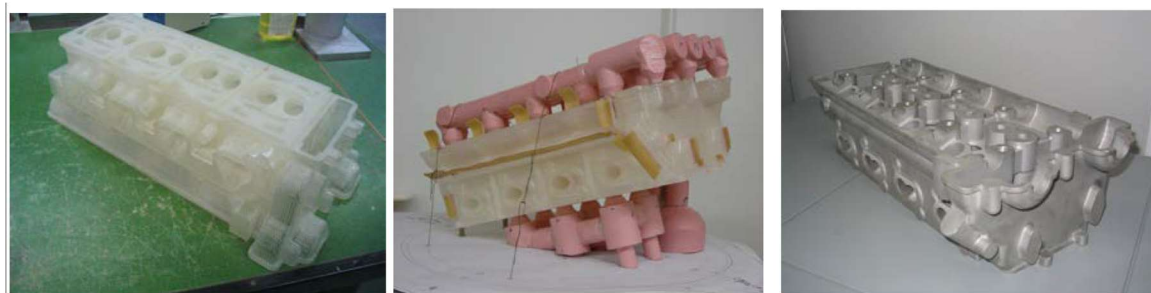


Рисунок 2.8 – Пример применения технологии литья по выплавляемым моделям. На левом фото – выжигаемая стереолитографическая модель, в середине – модель с литниковой системой, справа – отлитый в данной конструкции блок цилиндров

2.2. Прототипирование модульной платформы

Экспериментирование особенно важно в научных исследованиях и разработках, так как оно помогает снизить риски на этапах проектирования промышленных объектов и организовать серийное производство без значительных переработок. В таких ситуациях инженеры и исследователи часто обращаются к превентивным методам проверки своих научных гипотез. В настоящее время существует широкий спектр технологий прототипирования, которые позволяют значительно сократить производственные затраты и сроки изготовления прототипов [32], а также снизить вероятность ошибок проектирования, которые могут негативно сказаться на результатах НИОКР.

Следует понимать, что серийные изделия отличаются от промышленных прототипов не только дизайном, но и решаемыми ими задачами. Серийные изделия выполняют функции, предусмотренные производителем, а потребитель, приобретая такой продукт, использует его функциональность для достижения собственных целей. Промышленные прототипы, концепты и аналогичные образцы реализуют

лишь ограниченный набор функций серийного продукта и в основном используются для отработки дизайнерских решений, проверки простоты сборки и эксплуатации, а также демонстрации продукта потенциальным покупателям или инвесторам. Прототипам часто не хватает глубокой технической проработки, и они в основном являются макетами. Концепт-кары являются прототипами автомобилей будущего и предназначены для демонстрации новых стилей, дизайнов и технологий. Пластиковые формы используются для тестирования технологии формования и выходят из строя менее чем через десять циклов. В то же время, демонстрационные модели роботов и других продуктов являются лишь прототипами. Данные устройства способны выполнять лишь ограниченный функционал, ограниченный от того, каким его закладывали изначально.

В этой главе разобраны существующие способы изготовления компонентов беспилотных аппаратов и подходы, которые на практике наиболее работоспособны при создании промышленных прототипов [33].

Прототип продукта – это концепция, которая берёт на себя часть функций серийного изделия и служит для проверки производственных или проектных решений. В зависимости от целей, поставленных при создании прототипа, выделяют следующие основные группы: функциональные, эстетические и комбинированные. Исходя из ранее приведенных примеров, концепт-кар считается эстетическим прототипом, пластиковые формы – функциональными, а демонстрационные модели роботов – комбинированными.

Для детального анализа проекта используются не только статические 3D-визуализации, но и интерактивные модели, включая кинематические расчёты. Использование такого программного обеспечения продиктовано необходимостью решения прикладных задач, оценки эргономичности процессов сборки и разборки, подтверждения эксплуатационной пригодности изделия и проверки соблюдения протоколов безопасности. Система также позволяет обнаруживать

столкновения и проверять правильность пространственного расположения компонентов. На рисунке 2.9 приведена последовательность действий автоматизированной системы для гидроабразивной резки труб.

Проработка рабочего цикла даёт ответы на конкретные инженерные вопросы. В ходе анализа было установлено следующее.

1. Хватает ли длины токопроводящих кабелей манипулятора, не возникнет ли их чрезмерного растяжения.
2. Исключён ли несанкционированный ввод кабеля в движущиеся части машины и в рабочую зону.
3. Достаточно ли у роботизированной руки осей вращения, чтобы свободно обходить периметр трубы диаметром не менее 240 мм.
4. Под каким углом расположить трубу относительно режущей головки, чтобы разрез шёл непрерывно на все 360 градусов.
5. Какие координаты начала и конца задать в программном обеспечении устройства, чтобы процесс завершился успешно.

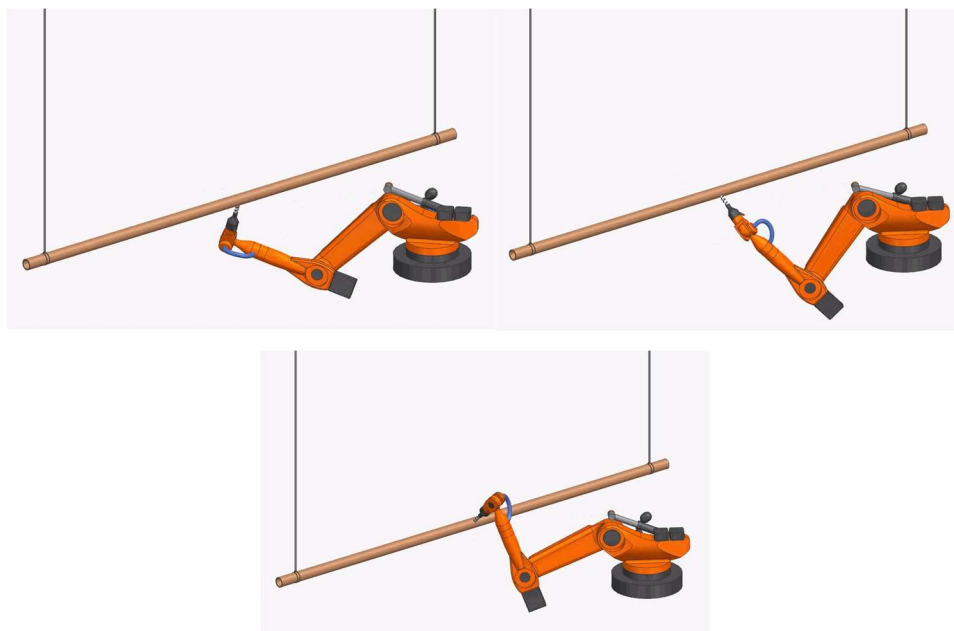


Рисунок 2.9 – Расчёт кинематики робота по резке труб. Движение манипулятора покадрово: 1 кадр - слева сверху, 2 кадр - справа сверху, 3 кадр – снизу

Фундаментальное правило создания прототипов состоит в необходимости достижения функциональной эквивалентности между экспериментальным образцом и конечным продуктом. Несоответствие характеристик на этом уровне неизбежно обнаруживается либо как скрытая уязвимость конструкции, либо как непредвиденное поведение материала [34].

Эффективность прототипирования существенно возрастает при внедрении ряда инженерных подходов. Прежде всего, конструкция должна быть модульной, ориентированной на применение однотипного оборудования и стандартных методов соединения деталей. Далее, сырьё следует выбирать по свойствам, максимально близким к материалам будущего серийного производства. Наконец, конструкция обязана полностью исключать клеевые, сварные и гофрированные соединения, поскольку они затрудняют демонтаж. Также важно, чтобы замена любого компонента производилась без последующей регулировки, а доступ механика ко всем внутренним элементам должен оставаться беспрепятственным. Отдельное требование касается стандартных компонентов: они представляются либо в виде заглушек с малым числом полигонов, либо заимствуются в виде сертифицированных CAD-файлов из библиотек поставщиков [35].

Практическое применение изложенного метода обеспечивает высокую скорость сборки и разборки демонстратора, а также простоту его обслуживания. На рисунке 2.10 приведена иллюстрация данного подхода на примере концепции беспилотного колёсного аппарата, который выступает физическим воплощением прототипа автономной сельскохозяйственной машины.

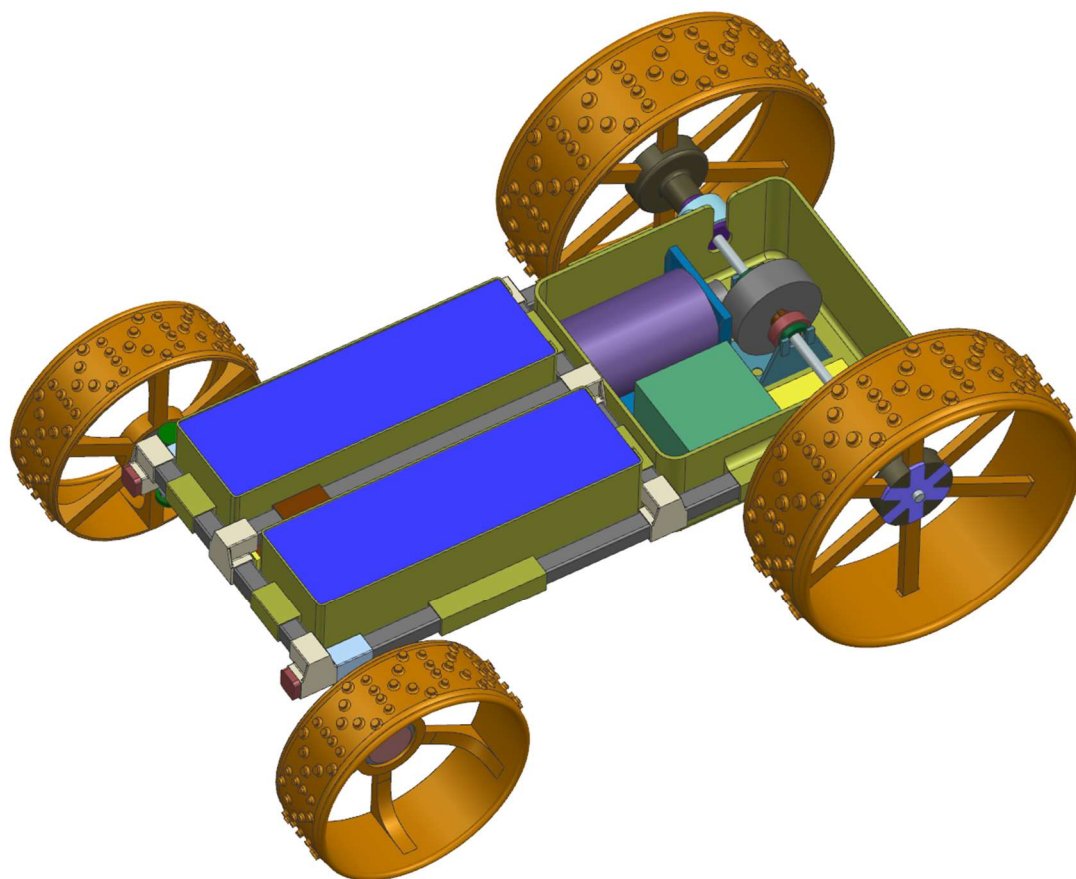


Рисунок 2.10 – Аксонометрический вид прототипа дрона

Целью создания прототипа модульной платформы являлось тестирование ПО для управления наземным беспилотником и отслеживания беспилотной малошумной модульной платформы. Данная программа в дальнейшем будет использована в промышленном образце платформы с учётом изменения компонентов электрики и силовой установки [36].

На рисунке 2.11 приведена схема прототипа платформы с входящими в него компонентами. На контроллер под цифрой 4 приходит сигнал от пульта управления. От платы управления сигнал подаётся на регулятор оборотов 5 от которого на электродвигатель 1 отправляется сигнал. Крутящий момент передаётся на шасси через редуктор в сборе под цифрой 2, который вращает полуоси под цифрой 3 вместе с двигателями малой тяги. Маневрирование обеспечивается приводом

рулевого управления под цифрой 7, который замыкает контур обратной связи с процессором управления под цифрой 4.

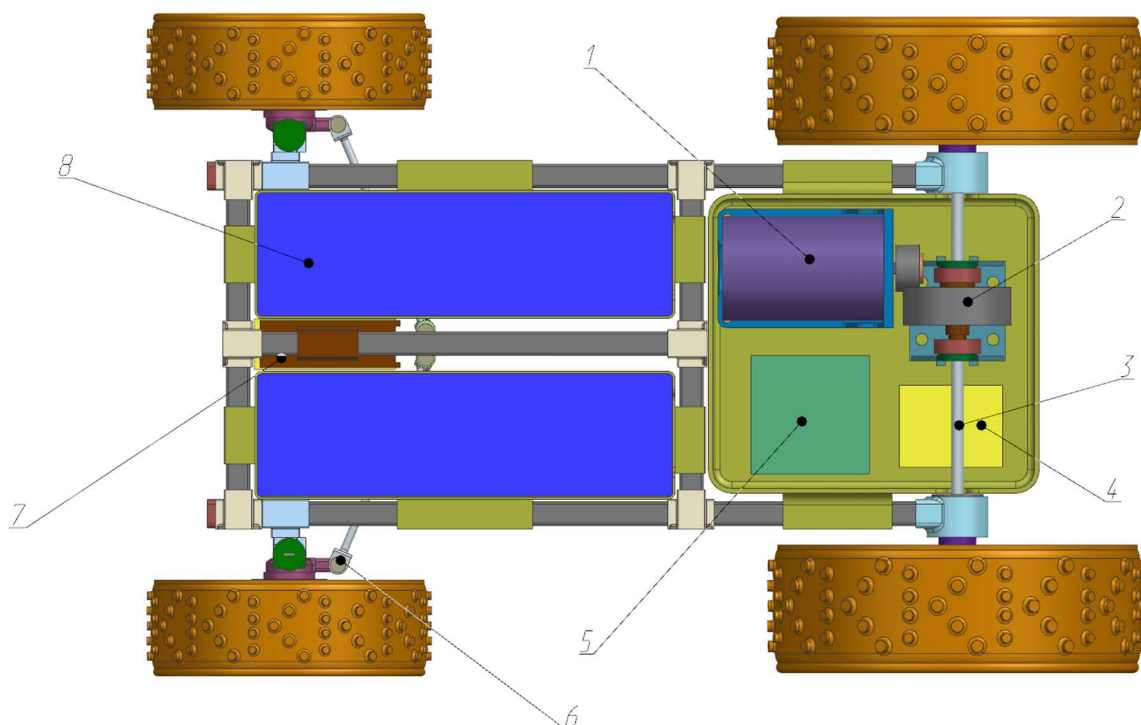


Рисунок 2.11 – Модель прототипа дрона, вид сверху: 1 – электродвигатель, 2 – зубчатая передача, 3 – ось, 4 – контроллер, 5 – регулятор оборотов, 6 – рулевой узел, 7 – сервопривод, 8 - батареи.

Выбору компонентной базы прототипа модульной платформы предшествует расчет электрических нагрузок и баланса мощности всей системы. Мощность силовой установки может быть определена двумя способами. Либо путем прямых расчетов, либо методом сравнительного анализа. Второй подход предполагает изучение параметров двигателей, которые уже зарекомендовали себя в агрегатах, решающих аналогичные инженерные задачи [37].

После утверждения спецификаций всех компонентов и детализации чертежей начинается производственный цикл. Поскольку архитектура беспилотника основана на модульном принципе с общими точками крепления для всех сопрягаемых поверхностей, 3D-печать компонентов

стала возможной с использованием единых пределов точности [38]. Продольные балки, которые составляют основу несущего каркаса беспилотной системы, также выполнены при помощи выращивания. Однако в дальнейшем рекомендуется использовать композитные стержни, например, из углеродного волокна, вместо пластика. Композитные профили более практичны в сборке и прочнее по продольному и поперечному характеру нагрузки. Конечный результат сборки всех систем в готовое устройство показан на рисунке 2.12.

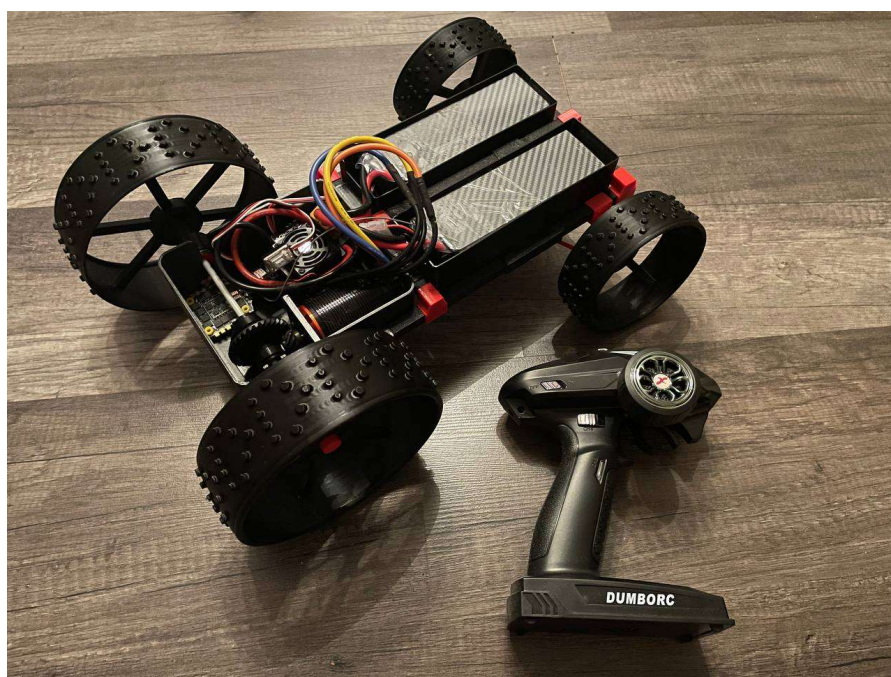


Рисунок 2.12 – Собранный прототип наземного беспилотного мини-трактора

Большая часть деталей беспилотного аппарата изготовлена методом печати на принтере при помощи филамента PETG. Участки конструкции, передающие крутящий момент выполнены из металла. Помимо этого, в подвижных элементах конструкции установлены шариковые подшипники для обеспечения более длительной работы устройства. В прототип также были заложены принципы модульности, выведенные в предыдущей главе. Использование унифицированных деталей и разборных элементов продемонстрировало высокое удобство сборки и

позволило оперативно вносить изменения в конструкцию без глобальных изменений в проект [39].

После изготовления прототипа модульной платформы была создана управляющая программа, предназначенная для отслеживания положения беспилотника и контролем его движения. На рисунке 2.13 показано окно управляющей программы, которое отображает текущее положение транспортного средства относительно загруженной 2D-модели поля, расположение маячков и указанный маршрут в режиме реального времени.

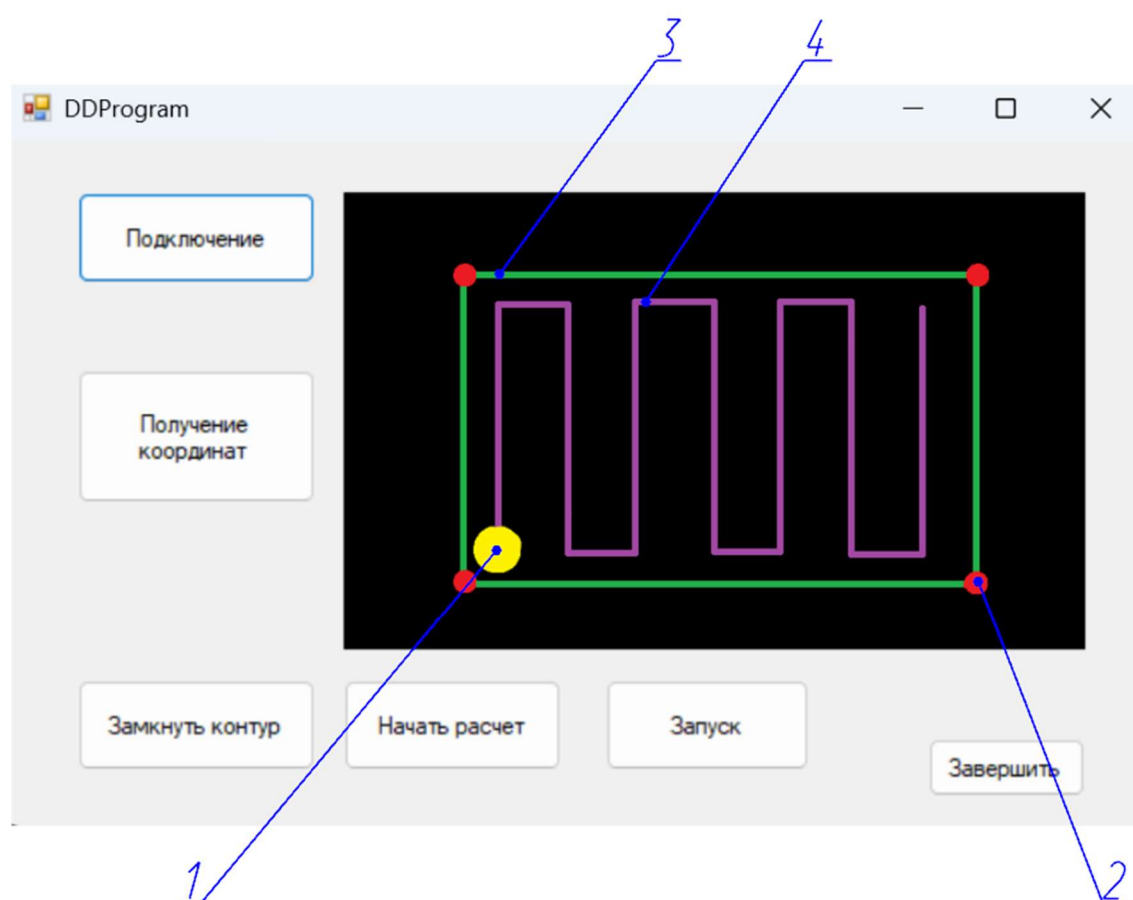


Рисунок 2.13 – Программа автономной работы беспилотной системы: 1 – положение беспилотной машины, 2 – положение маячков, 3 – контур поля, 4 – траектория движения беспилотной машины

Алгоритм работы персонала заключается в соблюдении последовательности выполнения работ в полевых условиях. Для начала

размещаются маяки, оснащенные системой передачи координат в режиме реального времени. При активации команды «Получить координаты» программа запрашивает их местоположение и отображает в графическом окне открытый контур поля, обозначающий маяки. Маяки отмечены красными точками, а визуальные границы поля обозначены зелеными линиями. После формирования открытого контура необходимо соединить первый и последний маяки, используя кнопку «Замкнуть контур» в интерфейсе. Затем, после нажатия кнопки «Начать расчет», система строит оптимальный маршрут, он обозначен фиолетовой линией для беспилотника, отображаемый желтой точкой, и передает его текущее местоположение в графическое окно в режиме реального времени. После построения маршрута необходимо выполнить команду «Старт», чтобы начать движение по нему.

2.3. Источники шума в наземных беспилотниках

Развитие промышленности диктует новые требования к потребительским свойствам товаров, но тяжелая промышленность, включая автомобильное и тракторное производство, не всегда способна адаптироваться к темпам Четвертой промышленной революции. Возникающий диссонанс между рыночным спросом и возможностями конвейерного производства устраняется за счет колоссальных инвестиций в инфраструктуру, переподготовку персонала и реорганизацию управления. По этой причине нехватка специализированных компонентов сдерживается в течение многих лет, ведь запуск новых производственных мощностей является сложной задачей для любой формы собственности [40].

Акустические характеристики наземных транспортных средств основаны, прежде всего, на качестве сборки. Надежные резьбовые и сварные соединения элементов кузова исключают дребезжание, а

вибрации незакрепленных деталей создают широкополосный шум, который не блокируется звукоизоляционными матами.

В то время как шум в первую очередь влияет на комфорт, механические вибрации при достижении критических значений чреваты физическим повреждением компонентов. Однако концепция бесшумного транспорта утопична, так как любое движение создает трение и аэродинамические помехи. Поэтому полностью бесшумными могут быть только стационарные объекты.

Трансформация силовых агрегатов меняет подход к акустике. Внедрение новых типов силовых установок влияет на компоновку моторного отсека ТС. Использование различных типов электромоторов и ДВС влияет не только на расположение компонентов, но и их состав и свойства. С точки зрения проектирования термошумоизоляции применение новых решений означает изменение громкости акустического излучения и отличные от предыдущих поколений ТС частотные спектры. Это обесценивает разработки предыдущих лет в области подавления шумов и требует новых инженерных решений [41]. Увеличение скорости движения машины, приводит к более агрессивному акустическому воздействию на водителя и окружающих [42]. И тем не менее конечное решение о внедрении тех или иных компонентов принимается производителем на основе качественных и ценовых характеристиках нового продукта [43].

Элементы системы газообмена с максимальным уровнем шума представлены на рисунке 2.14 с местами замера:

1. Воздушный фильтр 91 дБА
2. Турбокомпрессор 87 дБА
3. Катализатор 75 дБА
4. Сажевый фильтр 69 дБА
5. Глушитель 65 дБА
6. Датчик расхода воздуха 69 дБА

7. L-зонд 74 дБА

8. Датчик температуры выхлопных газов 75 дБА

9. Охладитель надувочного воздуха 75 дБА

10. Клапан рециркуляции отработавших газов 93 дБА

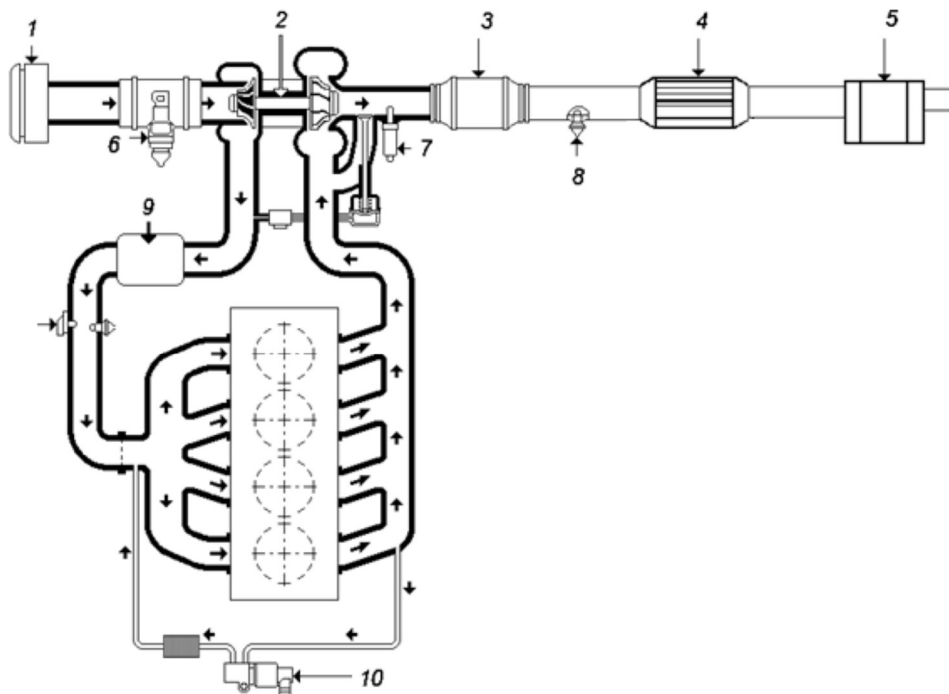


Рисунок 2.14 – Точки замера аэродинамического шума в системе газообмена двигателя

Анализ акустического загрязнения основан на физике распространения звука и характеристиках его спектрального состава во время работы двигателя. Энергия удара от движущихся частей силового агрегата проникает в салон через конструкцию рамы в виде вибрации и излучается во внешнюю среду в виде воздушной волны. Результаты этих исследований позволяют проектировать механизмы таким образом, чтобы акустическое давление от двигателя не создавало помех водителю и негативного влияния на окружающую среду [44, 45].

Несмотря на значительный опыт в производстве беспилотных систем, задача минимизации исходящего шума остается актуальной в соответствии со строгими государственными стандартами. Появление инновационных конфигураций привода требует постоянной адаптации

защитных акустических элементов в моторном отсеке. В Российской Федерации этот вопрос регулируется Техническим регламентом о безопасности колесных транспортных средств, который основан на ряде соответствующих ГОСТов и международных соглашений, устанавливающих верхний предел шума транспортных средств [46].

Демпфирующие и экранирующие элементы широко используются в мировой промышленности. Нынешняя низкая насыщенность рынка робототехники означает, что акустическое загрязнение от автономных транспортных средств на городских улицах и заводских площадях в настоящее время практически незаметно. Но поскольку акустический комфорт должен учитываться в математической модели продукта с самого начала, внедрение методов герметизации и звукоизоляции должно начинаться как можно раньше. Такой подход обеспечивает соблюдение норм по уровню шума при массовом внедрении беспилотных аппаратов на колесах в городских и промышленных условиях.

Выбор технического решения продиктован не только физикой процесса, но и бюджетом проекта. Каждый дополнительный слой шумоизоляции увеличивает конечную стоимость изделия. Это связано с удорожанием сырья, необходимостью приобретения узкоспециализированного формовочного оборудования и возросшей сложностью операций на сборочной линии.

В то время как компоновка пилотируемых транспортных систем с гибридной системой будет довольно схожа с классической схемой устройства автомобиля с ДВС, то для беспилотных систем даже с аналогичным приводом и энергоустановкой компоновка деталей и установок моторного отсека будет значительно отличаться (рисунок 2.15).



Рисунок 2.15 – Варианты расположения электромотора в автомобиле

Если рассматривать транспорт с последовательной гибридной установкой, то используемые в настоящий момент рекомендации по термошумоизоляции потребуют корректировок. Это связано с тем, что электромоторы и двигатели внутреннего сгорания излучают различные по громкости и частотному спектру акустические излучения. Например, ДВС генерирует шум интенсивностью 104-120 дБ в диапазоне 20-8000 Гц, а электродвигатель работает значительно тише и его показания никогда не превышают 74 дБ, но его основной акустический спектр смещён в диапазон 250-10 000 Гц.

Поскольку физика генерации звука в этих двух типах устройств отличается как по амплитудным, так и по частотным характеристикам, конвейерное производство акустических деталей требует адаптации состава и структуры этих изделий. Хотя эта ниша остается предметом научных исследований, рынок ожидает появления узкоспециализированных композитов для электродвигателей в ближайшие годы. В то же время предприятия ищут способы

максимальной стандартизации компонентов для снижения затрат и упрощения логистики. Но всё же физические свойства электроприводов позволяют обеспечить меньший объем изоляции, так как общая площадь и вес звукопоглощающих матов в электромобилях меньше, чем в традиционных транспортных средствах [47].

Типичные варианты реализации таких решений можно увидеть в дизайне защитных экранов в автомобилях Tesla Model S и Nissan Leaf (рисунок 2.16).

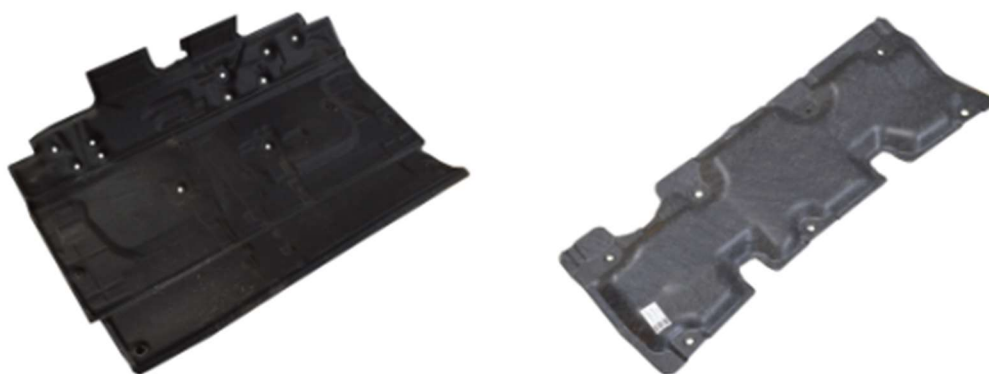


Рисунок 2.16 – Шумоизоляция моторного отсека Tesla Model S (слева), Обивка капота Nissan Leaf

2.4. Анализ акустических процессов

Источники звукового загрязнения обычно делятся на газодинамические и структурные. Первые возникают из-за нестабильных потоков воздуха или выхлопных газов, когда изменения скорости и давления создают акустическое поле. Ярким примером является завихрение воздуха лопастями вентилятора радиатора. Последние конструкционные источники генерируются прямым акустическим излучением от вибрирующих поверхностей блока цилиндров и коробки передач. Причина кроется либо в движении всего агрегата как инерционного тела на подвеске, либо в циркуляции внутренних сдвиговых волн, которые дополняются резонансом вспомогательного

оборудования [48].

Когда внешние усилия от шасси или дороги передаются на элементы конструкции, в металле возникают упругие волны в виде структурной вибрации. Проходя через структурные элементы кузова, эти импульсы заставляют вибрировать панели обшивки, которые, в свою очередь, толкают молекулы воздуха, создавая слышимый звук. Различение терминов вибрации в виде процесса в материале и звука, как процесса в воздухе, принципиально важно для правильного моделирования физики этих явлений.

Для распространения звука необходима упругая среда в любом состоянии. Волна возникает там, где нарушается состояние покоя, будь это внезапный скачок давления или физический контакт. Частицы начинают колебаться, передавая импульс дальше со скоростью звука, которая, по сути, является показателем передачи энергии. Сами частицы не переносятся потоком, так как сместившись, они возвращаются к своим первоначальным координатам после прохождения фазы сжатия или разрежения. Скорость этого процесса определяется жесткостью материала и его массой на единицу объема.

По характеру движения волны делятся на сжимающие, где все движется по одной линии, и сдвигающие, где есть боковое отклонение. Твердые тела передают оба вида волн, в то время как воздух и вода передают только сжимающие. Интересно, что в идеальном твердом теле скорость таких волн не меняется при изменении высоты тона [49]. Основываясь на этой физике, промышленность производит три типа демпферов. Некоторые из них поглощают энергию изнутри, другие отражают ее обратно, и прочие преобразуют механическую энергию в тепловую. Инженеры часто комбинируют эти подходы в многослойных панелях (рисунок 2.17).



Рисунок 2.17 – Шумоизоляция мотора Tesla

Наивысшие показатели акустического комфорта достигаются исключительно за счет комплексного применения барьерных и демпфирующих элементов. Суть метода капсульной защиты заключается в многократном подавлении шума путем блокировки технологических отверстий и вентиляционных каналов, через которые происходит утечка звуковой энергии, наряду с послойным комбинированием деталей с различными физическими свойствами.

До недавнего времени данная концепция оставалась невостребованной в сфере роботизированного транспорта по причине дефицита профильных стандартов и регламентов для автономных систем. Если рассматривать отечественных и зарубежных производителей автомобилей и тракторов, то подобная система не использовалась вследствие жёстких регламентов в области проектирования транспортных средств. Помимо этого, разработанные ранее технические решения и плотная компоновка моторного отсека вынуждают конструкторов искать решения в области термшумоизоляции, позволяющие проходить сертификационные испытания при меньших габаритах акустических деталей (рисунок 2.18).



Рисунок 2.18 – Беспилотный мини-трактор Cognitive Pilot в поле

Принцип капсулирования подразумевает контроль всех воздушных утечек и внедрение уплотнителей и заглушек в места неплотного соединения элементов рамы и кузова ТС. Данное решение позволяет не только предотвратить неконтролируемый выход акустического излучения, но и обеспечить задел в области пыли и влагозащиты, что особенно важно для беспилотных систем, которые наиболее зависимы от штатного функционирования большого количества электрики внутри моторного пространства машины.

2.5. Оптимизация конструкции для герметизации кузова беспилотной машины

Программа испытаний несущей конструкции на герметичность носила комплексный характер. Основной задачей являлось экспериментальное подтверждение эффективности акустических перегородок и расчёт оптимальной схемы их интеграции в силовой каркас. Параллельно проводилась оценка качества изоляционных

компонентов, изготовленных методом напыления пенополиуретана. Для обеспечения воспроизводимости результатов фиксировалась каждая стадия нанесения материала с привязкой к точным пространственным координатам его размещения. В отдельную область исследования было вынесено влияние геометрии сварного шва и химического состава кузовных герметиков на общую плотность сопряжения панелей. Критерием успешного прохождения теста для собранного транспортного средства служила аэродинамическая проницаемость. Нормативное значение не должно превышать 20 л/с при перепаде давления в 250 Па.

Методология исследования была основана на четырехэтапном цикле. Первый этап включал выявление дефектов заводских уплотнений, второй этап подразумевал проверку герметичности после покраски, следующий же лежал в плоскости локального ремонта или модификации, и в конце окончательная перепроверка результатов [50].

Формула расчёта воздушных потерь имеет следующий вид:

$$Q = C_d \cdot A_{\text{отв}} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta p}{\rho}}, \quad (2.1)$$

где: Q – объёмный расход утечки, м³/с; C_d – коэффициент расхода (0,6-0,8); $A_{\text{отв}}$ – площадь пропускного отверстия, м²; Δp – разность давлений на датчиках до и после прохождения воздушного потока через кузов, Па; ρ – плотность воздуха, кг/м³.

Подготовка испытательного стенда для подачи воздуха (рисунок 2.19) проводилась в строгой последовательности с целью полной изоляции внутреннего объема установки.

На начальном этапе были заблокированы оконные проемы и заливная горловина при помощи экранов. Следующим шагом стало устранение крупных технологических отверстий, к которым относятся ниши рулевой колонки, штатные вентиляционные каналы и смотровые прорези в задней части корпуса. Для их герметизации использовалась армированная лента. Затем было произведено перекрытие капиллярных

каналов и дренажных систем. На предпоследней стадии подготовки в дверных проемах смонтированы заглушающие пластины.

Завершающим действием стала коммутация напорной магистрали и тензометрического датчика с измерительным оборудованием. Данная конфигурация позволила инициировать работу вакуумного насоса и приступить к фиксации экспериментальных данных.



Рисунок 2.19 – Установка AirFlow для оценки герметичности ТС

На рисунке 2.20 показаны встроенные внутренние уплотнения в несущие балки рамы. Эти компоненты формуруются непосредственно в полости продольных элементов рамы с использованием двухкомпонентной пены с герметизированными ячейками. Их применение служит созданию барьера для элементов конструкции. Перекрытие технологических швов и дренажных каналов предотвращает проникновение мелкого мусора и жидкостей внутрь модулей кузова и моторного отсека. Одновременно это обеспечивает демпфирование структурных шумов, а отсутствие прямого контакта металлической стены с атмосферой надежно подавляет процессы окисления.



Рисунок 2.20 – Состояние герметизации элементов кузова: левый и правый лонжероны соответственно

Убедившись в правильности расположения барьерных вставок и точности нанесения вспененного материала по технологическим картам, специалисты инициировали контрольную проверку сварных швов кузова. Исходные данные аэродинамического теста, полученные до проведения работ по модернизации, выявили потери давления объемом 26,77 литра в секунду (рисунок 2.21). Данный результат оказался за пределами регламентированных норм эксплуатации. Для приведения параметров в соответствие с требованиями была поставлена задача провести дополнительное усиление конструкции, чтобы снизить коэффициент проницаемости до уровня, не превышающего 20 л/с.

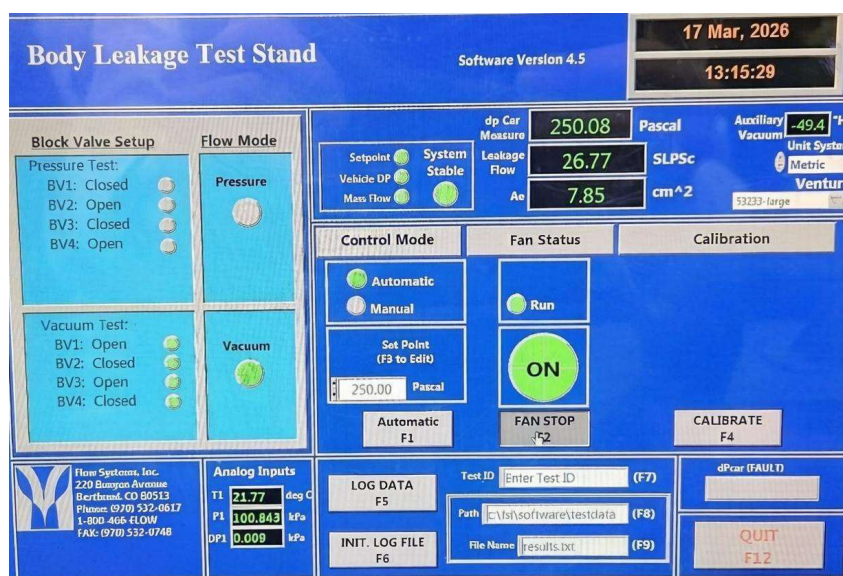


Рисунок 2.21 – Проведение замеров до проведения доработок

Для достижения нормативных показателей непроницаемости кузова была оптимизирована изоляция сегментов, заполненных вспененным составом, и усилены стыки вокруг установленных заглушек на местах вскрытой перфорации. На рисунке 2.22 зафиксирован частный случай усовершенствования конфигурации бафлов внутри силовых балок шасси.



Рисунок 2.22 – Доработка герметизации элементов кузова после проведения замеров

Финальным этапом стала повторная диагностика

неконтролируемого газообмена после внесения всех конструктивных изменений (рисунок 2.23). Оптимизация узлов примыкания обеспечила падение интенсивности утечки воздушного потока на 11 литров в секунду. Достигнутый результат подтвердил соблюдение регламентированных стандартов плотности кузова.

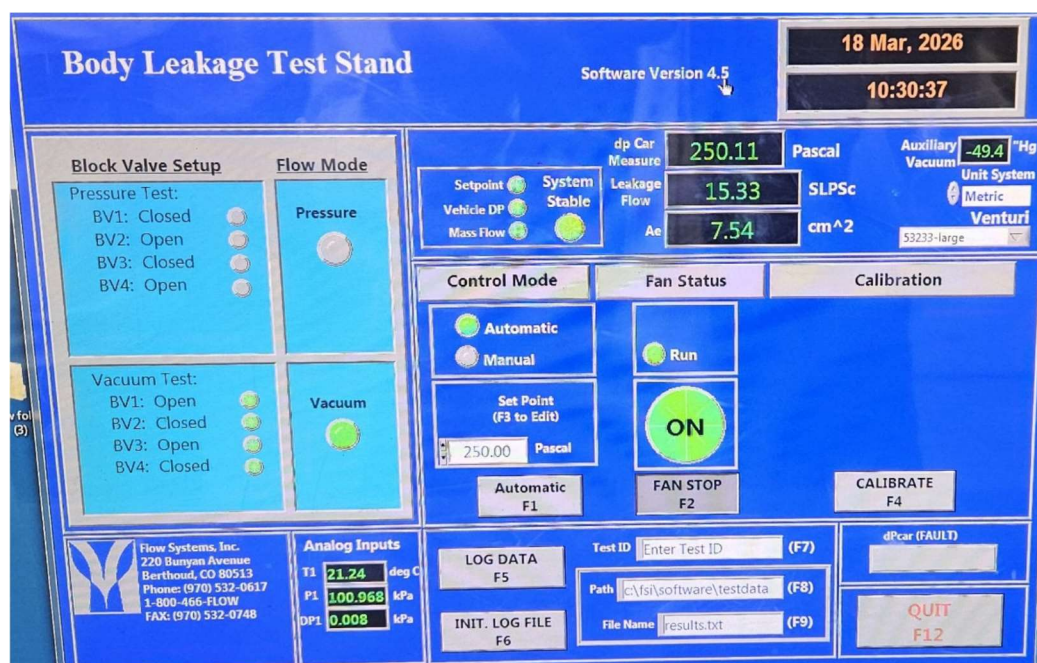


Рисунок 2.23 – Результаты работ по доработке герметизации кузова

Локальные усовершенствования, выполненные непосредственно в процессе сборки, позволят увеличить эксплуатационный ресурс транспортного средства, поскольку предотвращают попадание пыли и влаги в ответственные узлы моторного отсека и их накопление в закрытых, труднодоступных для очистки полостях конструкции. Отдельные аспекты этих требований регламентируются отраслевым стандартом ОСТ 37.001.248-86, устанавливающим методы оценки водопыленепроницаемости кабин и кузовов автотранспортных средств и сельскохозяйственных машин. По результатам проведённых доработок кузов успешно прошёл техническую проверку на соответствие нормативам герметизации.

2.6. Выводы по главе II

Во второй главе были заложены основные теоретические и практические предпосылки для проектирования малозумной модульной платформы роботизированных комплексов. Данный вывод был основан на результатах анализа экономической обстановки в аграрном секторе, а также проведённых испытаний прототипного изделия.

Статистика за 2024-2025 годы указывает на сокращение крестьянско-фермерских хозяйств. Вслед за этим снижаются и продажи сельскохозяйственной техники на 33%, а также тракторов на 39%. Дефицит доступных видов аграрных машин и оборудования сильнее всего ощущается на малых и средних хозяйствах площадью от 0,5 до 10 000 га. Создание беспилотной модульной платформы подразумевает восполнить данную нехватку техники и предложить выгодную аграриям экономическую программу внедрения данных машин в сельскохозяйственные процессы.

Были установлены основные технические параметры беспилотной модульной работы на основе габаритных размеров и спектра закладываемых функций. Среди прочего были установлены характеристики энергоёмкости аккумуляторных батарей в размере 30 кВт·ч, что обеспечивает не менее 8 часов работы без подзарядки. На платформу планируется устанавливать до девяти модулей, за счёт этого беспилотная машина меньше простаивает и выполняет более широкий набор функций.

Разработан прототип модульной платформы для проверки целесообразности применения принципов модульности, а также создана программа управления беспилотной машиной. Прототип был успешно протестирован, подтвердив функциональность системы навигации и управления, что создает основу для последующего масштабирования до полноразмерной платформы.

Был проведен сравнительный анализ акустических характеристик двигателей внутреннего сгорания и электродвигателей. Установлено, что двигатели внутреннего сгорания создают шум в диапазоне 20-8000 Гц с уровнем 104-120 дБ на расстоянии 1 м, в то время как электродвигатели создают шум в диапазоне 250-10000 Гц с уровнем до 74 дБ. Разница не только в объеме, но и в частотном спектре делает неэффективным непосредственный перенос решений по шумоизоляции, разработанных для двигателей внутреннего сгорания, на электромобили.

Были выявлены основные источники аэродинамического шума в системах газообмена, что позволило определить критические зоны для дальнейшей шумоизоляции. Доказано, что для обеспечения низкого акустического фона при эксплуатации беспилотных транспортных средств в городской среде, на промышленных объектах и вблизи жилых массивов необходимо проектировать шумоизоляцию уже на этапе разработки платформы, а не в качестве дополнительной модификации.

Были проведены экспериментальные испытания на герметичность корпуса с использованием установки AirFlow, которые показали, что начальная утечка воздушного потока составила 26,77 л/с, что превышает стандартное значение в 20 л/с при разрежении 250 Па. В ходе модификаций – установки перегородок из саморасширяющегося ППУ, герметизации сварных швов, использования герметика и заглушек для стыков, удалось снизить утечки до 15,33 л/с, то есть на 11 л/с, что гарантирует соблюдение требований по водо- и пылезащитности (ОСТ 37.001.248-86) и в то же время предотвращает распространение звуковых волн через протечки. Было подтверждено, что комплексная герметизация не только увеличивает срок службы машины за счет защиты от пыли и влаги, но и является эффективным средством снижения шума, особенно в высокочастотной области, характерной для электродвигателей.

Впервые для сельскохозяйственных роботизированных платформ был предложен системный подход, сочетающий модульную конструкцию, автономное управление и шумоизоляцию на стадии проектирования.

Глава III. Практическая реализация и экспериментальное исследование шумоизоляции

3.1. Проектирование акустических изделий для беспилотной машины

Классификация материалов для борьбы с нежелательными акустическими и механическими процессами основана на их физической природе. В связи с этим различают три основных типа акустических и вибродемпфирующих изделий. В них входят демпферы, которые преобразуют энергию вибрации в тепло, барьеры, которые отражают звуковые волны обратно к источнику, и пористые матрицы, которые рассеивают звук внутри своей структуры (рисунки 3.1, 3.2). Хотя каждый класс компонентов выполняет узкоспециализированную функцию, современные композитные решения позволяют интегрировать несколько принципов работы в единый продукт [51].



Рисунок 3.1 – Принцип действия звукопоглощающих материалов



Рисунок 3.2 – Принцип действия звукоизолирующих материалов

В общем виде для акустических процессов формула имеет вид:

$$E_0 = E_r + E_a + E_t, \quad (3.1)$$

где E_r – отражённая энергия, Дж; E_a – поглощённая энергия, Дж; E_t – энергия прошедшая сквозь препятствие, Дж.

Если разделить обе части уравнения на общую энергию E_0 , то уравнение будет выглядеть следующим образом:

$$1 = r + \alpha + \tau, \quad (3.2)$$

где r – коэффициент звукоизоляции; α – коэффициент звукопоглощения; τ – коэффициент пропускания. Далее данные акустические явления будут рассмотрены более детально.

Для локализации акустических помех поверх звуконепроницаемого основания установлена изолирующая мембрана, которая не пропускает воздушный поток. Этот промежуточный слой действует как амортизатор и гасит энергию механических колебаний, предотвращая их воздействие на поверхность основного экрана. Наиболее распространенным сырьем для изготовления таких поглотителей является нетканый шерстяной материал и газонаполненный полимер с геометрией открытых ячеек (рисунок 3.3) [52].

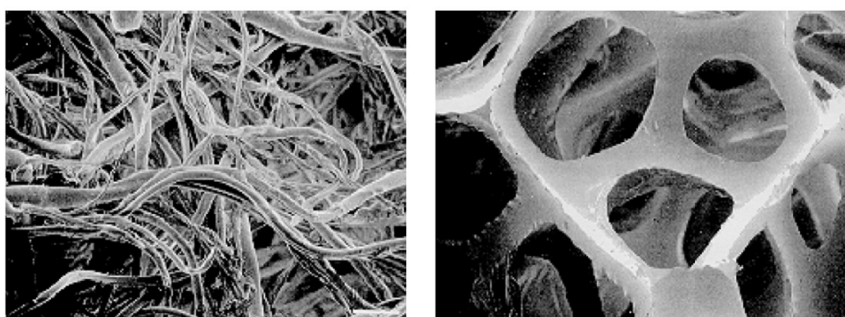


Рисунок 3.3 – Микроструктура войлока (слева) и открытоячеистого ППУ (справа)

Процесс интеграции системы звукоизоляции начинается с подготовки несущего каркаса машины, изготовленного из стали, пластика

или композитных материалов. Сначала на его внутреннюю поверхность укладывается гибридный мат, сочетающий в себе пенополиуретановую структуру и резиновую сердцевину. Этот композит покрыт жесткой оболочкой, изготовленной методом вакуумной термической формовки. Окончательное соединение всех слоев с основой достигается с помощью крепёжных шпилек, установленных контактной сваркой и закрепленных полиамидными гайками (рисунки 3.4, 3.5).

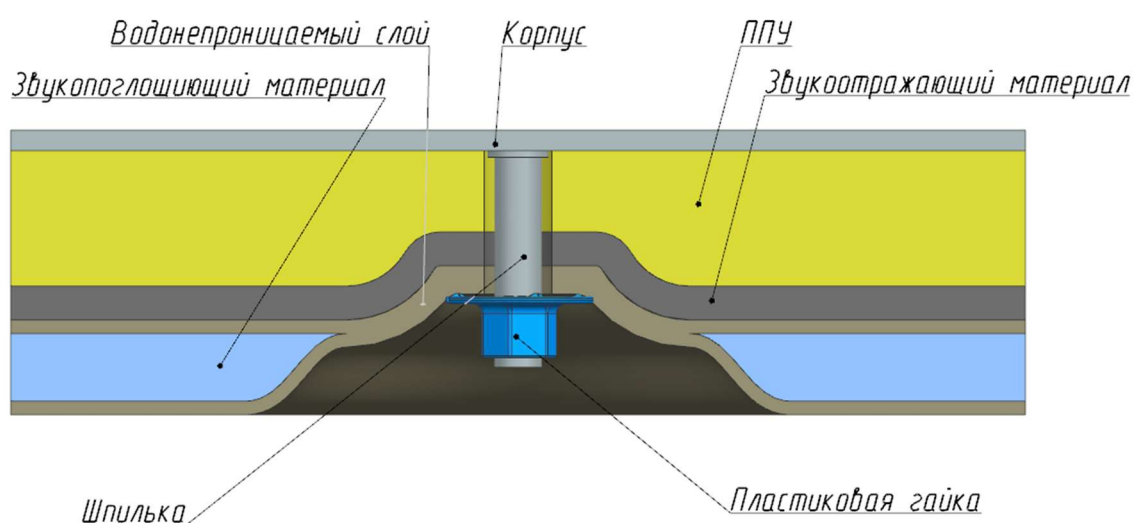


Рисунок 3.4 – Схема установки деталей шумоизоляции



Рисунок 3.5 – Крепёжные элементы системы шумоизоляции

Основной задачей описанной системы является формирование акустически непроницаемой капсулы, удерживающей звуковое давление

и механическую вибрацию в пределах моторного отсека. Помимо этого, защитный экран подавляет аэродинамические шумы силового агрегата, гасит вибрации, передаваемые на элементы шасси, а также служит теплозащитным барьером. Последнее позволяет минимизировать теплопотери и сохранить энергию аккумулятора для быстрого запуска двигателя при отрицательных температурах [53].

Технологический процесс монтажа включает несколько последовательных операций. На начальном этапе металлическое основание зачищается от пыли и обрабатывается обезжиривающим составом. Для устранения структурного резонанса наносится плотный слой битумной мастики, который затем тщательно прикатывается валиком до полного удаления воздушных пузырьков. Далее монтируется пористый звукопоглощающий материал, а сопряжения декоративных панелей обрабатываются фрикционной смазкой.

Сложная топология корпуса и наличие неизбежных заводских вырезов формируют потенциальные зоны образования акустических мостиков. Их герметизация осуществляется с помощью легкоъемных эластичных заглушек. При проектировании архитектуры защиты плотность и геометрия изоляционного слоя должны подбираться с учетом жестких пространственных ограничений [54].

3.2. Методика проведения испытаний

Процедура тестирования шумоизоляции с использованием оборудования Autoneum Alpha Cabin V3.0 регулируется соответствующей нормативной базой, включая международный стандарт ISO 354:2003 и его межгосударственный эквивалент ГОСТ 31704-2011. В этих документах описывается порядок работы в специализированной эхо-камере.

Физический принцип измерения основан на регистрации изменений в послезвуковом периоде. Сначала регистрируется скорость

естественного затухания сигнала в пустом замкнутом пространстве. Затем процедура повторяется с помещенным внутрь образцом. Разница между этими двумя значениями временного затухания звукового поля служит прямым показателем эффективности тестируемого покрытия [55].

Практическое применение метода требует использования стандартной лабораторной системы Autoneum Alpha Cabin V3.0, схема расположения которой показана на рисунке 3.6.

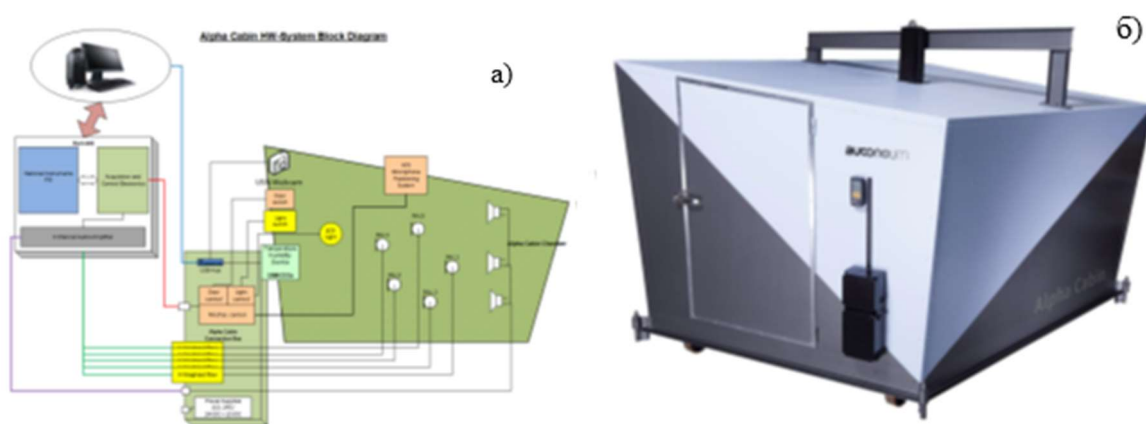


Рисунок 3.6 – Блок-схема (а) и внешний вид (б) экспериментальной установки Autoneum Alpha Cabin V3.0

Аппаратная часть Autoneum Alpha Cabin V3.0 основана на замкнутом объеме, вершины которого заняты тремя генераторами шума широкого спектра действия, массивом из пяти микрофонов с автоматическим координатным управлением и системой климат-контроля. Силуэт установки представляет собой миниатюрную копию в соотношении один к трем безэховой камеры Федерального испытательного центра ЕМРА в Дюбендорфе, Швейцария.

Полезный объем устройства составляет 6,44 кубических метра. Архитектура исключает строго параллельные поверхности между потолками и вертикальными перегородками. Эффект масштабирования приводит к тому, что площадь стандартного салона уменьшается в девять

раз по сравнению с его полноразмерным аналогом и составляет 1,2 квадратных метра, что является оптимальным для имитации шумозащиты моторного отсека и крыши седана D-сегмента [56]. В то время как в эталонном зале ЕМРА в качестве рассеивателей звука использовались изогнутые панели на кабелях, в уменьшенной версии они были заменены сферическими сегментами, встроенными в стены, и потолочной воронкой (рисунок 3.7). Это решение освободило пространство для размещения материалов. Окончательная топология этих элементов была определена в ходе серии полномасштабных экспериментов.

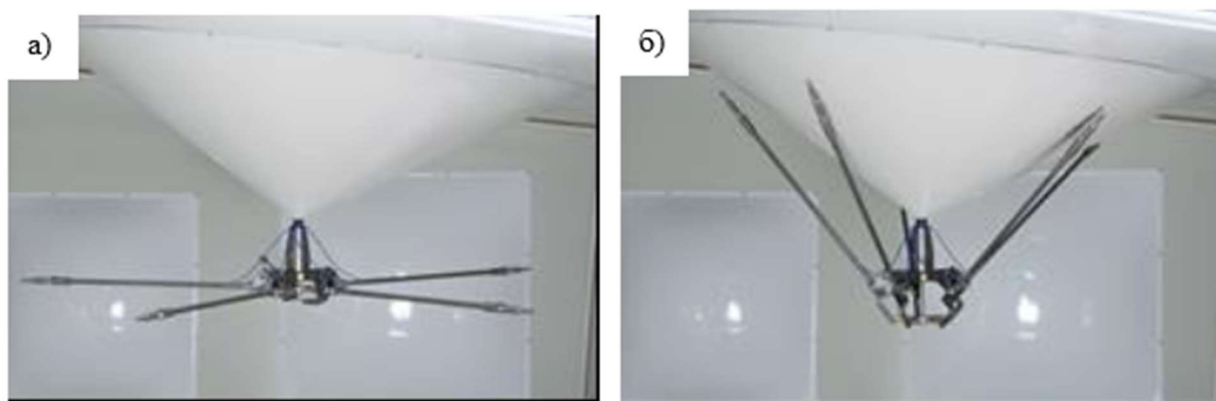


Рисунок 3.7 – Элементы дополнительного рассеивания звукового поля внутри корпуса Autoneum Alpha Cabin. Положение микрофонов: а) в рабочем положении, б) при установке образца

Звуковое давление внутри миниатюрного корпуса имитирует рассеянное поле классической эхо-камеры, но смещено в сторону высокочастотного диапазона. Физические размеры устройства в три раза меньше, что означает, что резонансные частоты в три раза выше. Устройство работает в диапазоне частот 4-10 кГц, что идеально подходит для нужд автомобилестроения и тракторостроительной промышленности. Акустическое возбуждение инициируется генераторами, выдающими дискретные импульсы [57].

Из-за компактных размеров корпуса измерение стандартного

снижения энергопотребления на 60 децибел невозможно без искажений. Технически регистрируется падение на 20 децибел, которое затем экстраполируется в три раза, как это разрешено стандартом ISO 354:2003. Диаграммы затухания во временной области рассчитываются с использованием математической деконволюции импульсной характеристики. Это устраняет необходимость в многократных прогонах с шумовым сигналом, так как достаточно одной записи для каждого микрофона в определенной полосе частот.

Этап расчета выполняется в соответствии с требованиями стандарта ISO 354:2003. Поглощающие свойства материала определяются с использованием формулы Сабина, которая включает периоды после звучания пустой коробки и коробки, содержащей образец [58].

Единственная систематическая ошибка в модели кабины Alpha по сравнению с полномасштабной лабораторией связана с дифракцией по краям объекта. Чтобы предотвратить регистрацию нереалистичных значений эффективности, когда поглощение формально превышает единицу, алгоритм включает поправочный коэффициент. Это значение было получено статистически путем сравнения показаний уменьшенной установки с результатами, полученными в полномасштабной реверберационной камере. Подстановка этого параметра преобразует классическое уравнение следующим образом:

$$\alpha_s = 0,92 \cdot \frac{0,163 \cdot V}{S} \cdot \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_0} \right), \quad (3.3)$$

где α_s – реверберационный коэффициент поглощения; 0,92 – поправочный коэффициент для краевого эффекта; V – объем кабины, м³; S – площадь образца, м²; T_0 – время реверберации в камере без исследуемого образца, с; T_1 – время реверберации в камере с находящимся внутри исследуемым образцом, с.

Индекс S коэффициента звукопоглощения указывает, что это статистический коэффициент звукопоглощения, который следует

отличать от нормального коэффициента звукопоглощения, полученного в импедансной трубе, где угол падения звуковой волны всегда равен 90°.

При введении объема кабины 6,44 м³, формула реверберационного коэффициента звукопоглощения принимает вид:

$$\alpha_S = \frac{0,966}{S} \cdot \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_0} \right). \quad (3.4)$$

При расчете реверберационного коэффициента звукопоглощения также учитывается влажность и температура окружающей среды, и в соответствии с ISO 354:2003 формула становится следующей:

$$\alpha_S = \frac{0,92}{S} \cdot \left[55,3 \cdot V \cdot \left(\frac{1}{c_1 T_1} - \frac{1}{c_0 T_0} \right) - 4 \cdot V \cdot (m_1 - m_0) \right], \quad (3.5)$$

где c_0 и c_1 – скорость звука; m_0 и m_1 – коэффициент мощности затухания см. ISO 354:2003.

В отличие от калибровочных пластин, серийные штампованные или литьевые детали обладают развитым рельефом и сложной трехмерной архитектурой. Это не только выводит их размеры за рамки стандартного шаблона кабины Autoneum Alpha, но и создает проблему точного отображения фактической площади поверхности. Ситуация еще более усложняется, если деталь установлена на стальной опоре, вырезе в корпусе. Это металлическое основание само по себе изменяет акустические характеристики камеры, и вычислить его влияние на общий результат практически невозможно. Из-за этого коэффициент поглощения α_S дает лишь приблизительное, усредненное значение свойств изделий или материалов, не принимая во внимание их фактическую форму [59].

Чтобы обойти методологические ограничения, связанные с привязкой поглощения к кривизне и объему конкретного прототипа, и исключить влияние базовой пластины, для оценки таких компонентов введено понятие эквивалентной площади A поглощения. Этот термин относится к площади идеально мягкой стены, которая гасит звуковую энергию так же эффективно, как и анализируемая конструкция.

Математически эта эквивалентная способность выражается следующей формулой:

$$A = S \cdot \alpha_s. \quad (3.6)$$

В соответствии со стандартом, таким образом, определяется эквивалентная площадь поглощения:

$$A = 0,163 \cdot V \cdot \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_0} \right). \quad (3.7)$$

После введения объема кабины и времени реверберации T_2 и T_3 (соответствующего кабине с частью кузова с формованной деталью и пустой кабине) формула становится такой же, как и в случае с формованной деталью:

$$A = 0,966 \cdot \left(\frac{1}{T_3} - \frac{1}{T_2} \right), \quad (3.8)$$

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.

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

$$A = 0,92 \cdot \left[55,3 \cdot V \cdot \left(\frac{1}{c_3 T_3} - \frac{1}{c_2 T_2} \right) - 4 \cdot V \cdot (m_3 - m_2) \right]. \quad (3.9)$$

С целью минимизации дифракционных искажений на границах материала кромки плоских образцов необходимо перекрыть. Это достигается установкой детали в жесткий каркас-обрамление (рисунок 3.8, а) или механическим запечатыванием краев с помощью липкой ленты (рисунок 3.8, б).

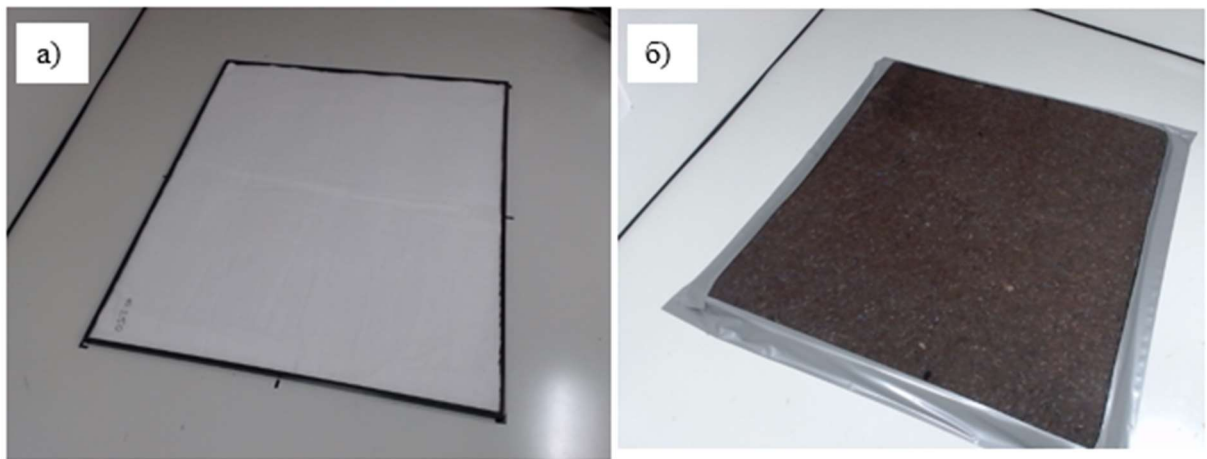


Рисунок 3.8 – Пример установки плоских образцов материалов стандартного размера 1,2*1,0 м: а) с использованием рамки; б) с использованием изоляции клейкой лентой

Штампованные и формованные элементы интерьера, такие как обшивка салона или изоляция днища, проходят испытания, будучи встроенными в металлическую раму. Деталь крепится к стальному основанию точно так же, как это было бы при заводской сборке машины, что обеспечивает соблюдение правильных граничных условий (рисунок 3.9).

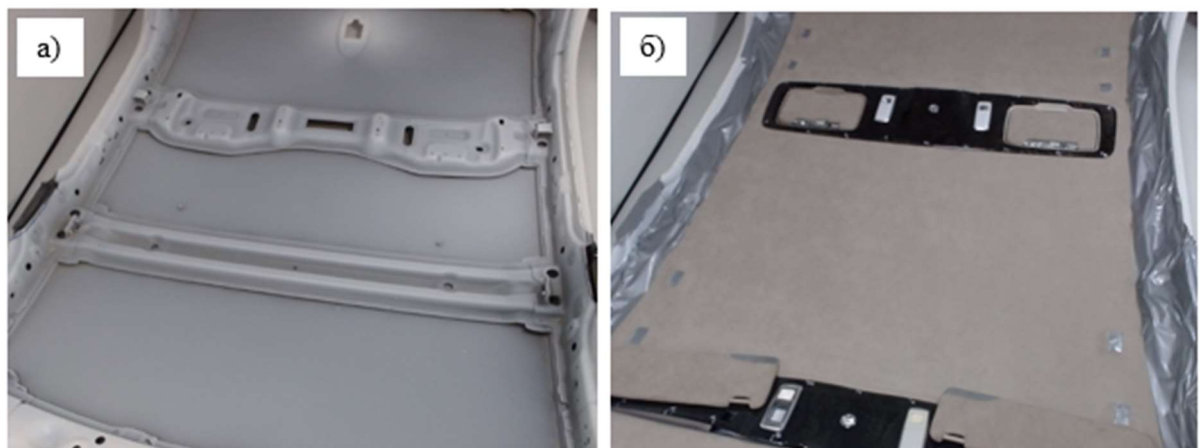


Рисунок 3.9 – Пример установки обивки крыши легкового автомобиля: а) металлическая панель крыши; б) обивка крыши, установленная на металлической панели

Прямое размещение объемного образца на полу кабины с реверберацией приводит к существенной погрешности измерений. Эта аномалия возникает

из-за того, что звуковая волна поглощается задней поверхностью материала, превращая пространство под ней в неконтролируемый воздушный карман, форма которого сильно отличается от реальной конструкции транспортного средства [60].

Учитывая это, для деталей с небольшой кривизной (например, теплозащитных экранов двигателя, коврового покрытия или отделки крышки моторного отсека) допускается приклеивание к основанию салона Autoneum Alpha, если стандартный элемент кузова недоступен для тестирования (рисунок 3.10).

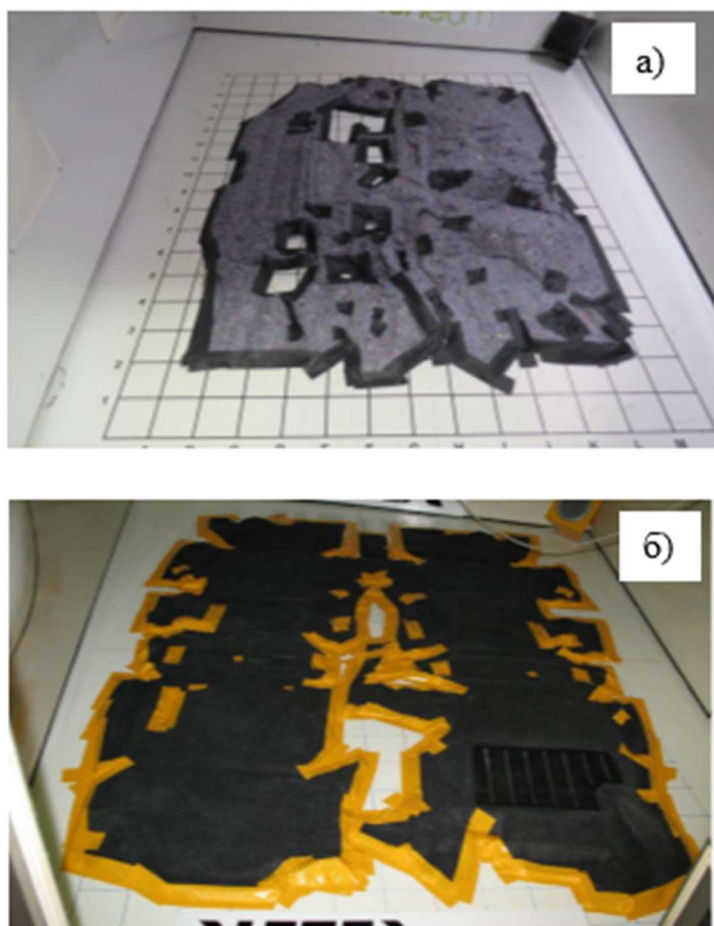


Рисунок 3.10 – Примеры установки формованных деталей шумоизоляции легкового автомобиля, приклеенных к полу кабины: а) обивка щитка передка, б) ковер пола

Наилучшая воспроизводимость условий достигается за счет использования оригинальных крепежных узлов. Только таким образом мы

можем гарантировать идентичную геометрию и поддерживать откалиброванную толщину буферного воздушного слоя, что повышает надежность результатов.

Также необходимо убедиться, что все посторонние отверстия в измеряемом объеме заблокированы. Неиспользуемые отверстия следует заделать мембранным изолятором или клейкой лентой, чтобы предотвратить утечку звуковой энергии из-за граничных эффектов на их краях [61].

Объемные компоненты с выраженным потенциалом рассеивания, такие как шумозащитные накладки на крылья и элементы каркаса сидений, требуют многоцелевого подхода к тестированию. Образец последовательно помещается в камеру под несколькими различными углами относительно источников звука, после чего на основе всех измерений рассчитывается среднее значение. Иллюстрация процесса интеграции этих компонентов шасси и интерьера в лабораторный комплекс показана на рисунке 3.11.

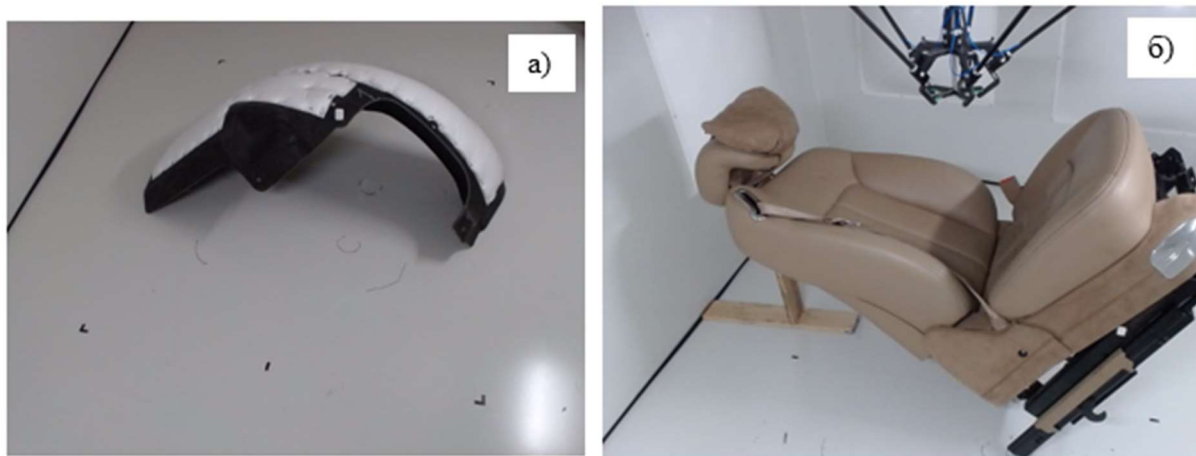


Рисунок 3.11 – Пример установки шумоизоляционных подкрылков (а) и сидений (б)

Определение индекса диффузного затухания α_s и суммарной диссипативной способности A делегируется вычислительному алгоритму профильного ПО. На выходе программная среда формирует функциональные графики, визуализирующие частотную динамику данных параметров.

Рисунок 3.12 визуализирует матрицу ранжирования звукопоглощающих материалов по их акустическим свойствам. На координатной плоскости

нанесены граничные контуры, которые сегментируют поле значений на четыре категории качества: зону Э для сверхэффективных поглотителей, зону 1 повышенная эффективность, зону 2 умеренная эффективность и зону 3 низкий уровень поглощения.

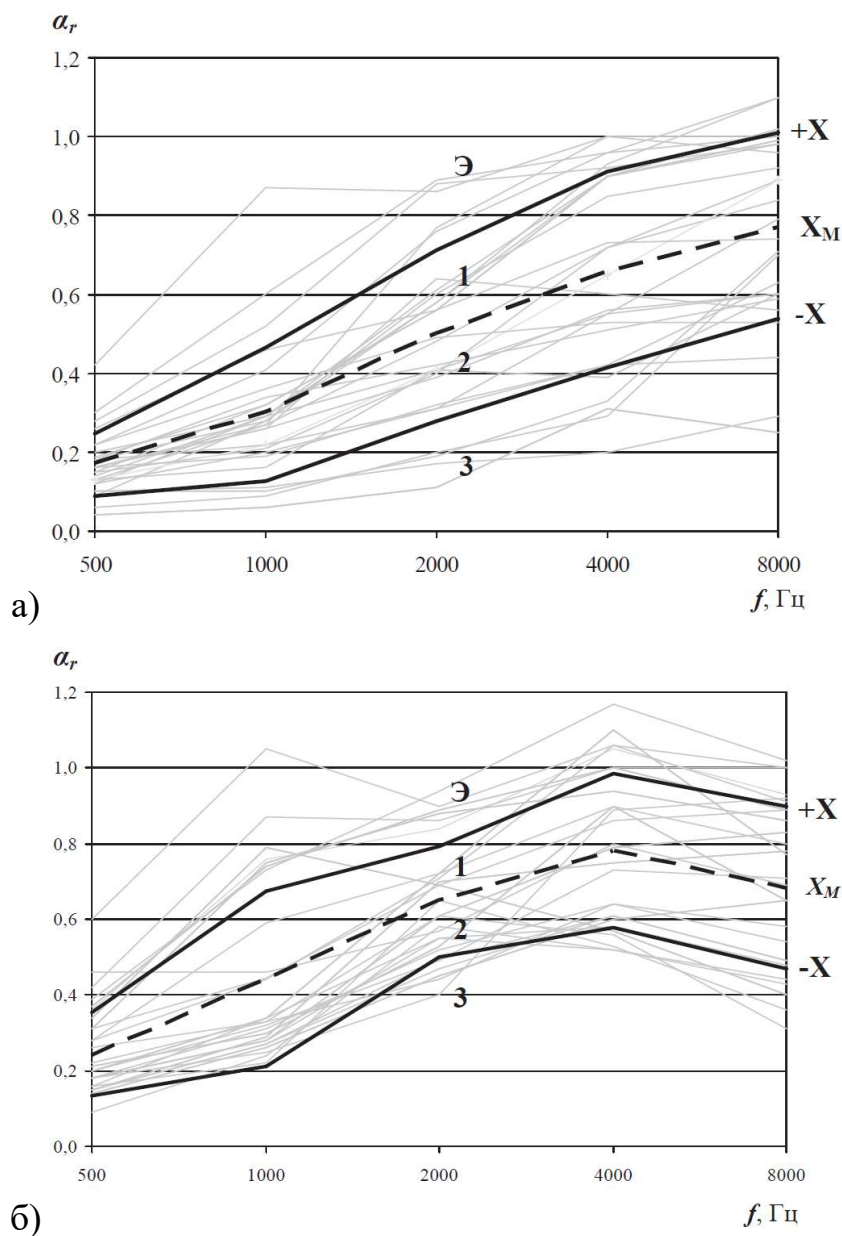


Рисунок 3.12 – Реверберационный коэффициент звукопоглощения материалов: а) не содержащих облицовочного слоя, б) содержащих облицовочный слой

3.3. Результаты экспериментальных исследований

Определение способности материала противостоять прохождению воздушного шума выполняется с использованием установки Autoneum Isokell V3.0. Методика испытаний опирается на стандарты ISO 140/III и SAE J1400, описывающие протокол оценки индекс изоляции для автопромных материалов и узлов [62].

Физический смысл измерения состоит в сопоставлении децибел, зафиксированных по обе стороны преграды. Образец монтируется в разъем между излучающей эхокамерой и камерой-приемником, после чего вычисляется разность их шумовых потенциалов. Для этих целей применяется типовой комплекс Autoneum Isokell V3.0, архитектура и фотография которого приведены на рисунке 3.13.

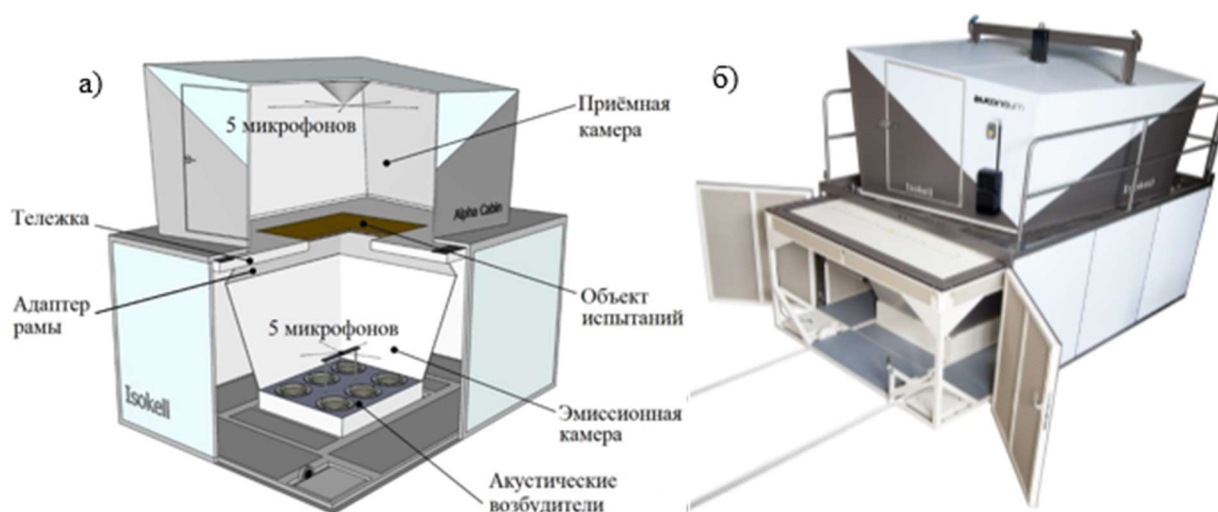


Рисунок 3.13 – Схема (а) и внешний вид (б) экспериментальной установки Autoneum Isokell V3.0

Архитектура системы Autoneum Isokell V3.0 представляет собой модульную сборку, состоящую из четырех функциональных блоков. Первый представляет собой мобильный сегмент, состоящий из двухкубовой эхо-камеры со встроенной панелью мощных динамиков и сеткой звукоснимателей. Второй элемент служит соединительным звеном, который соединяет генератор шума с порталной рамой, на которой горизонтально устанавливается образец, размеры которого не ограничены благодаря сменной

раме размеры тестируемого объекта. Третьим блоком является зона обнаружения, которая осуществляется с помощью кабины Autoneum Alpha, жестко прикрепленной к полу лаборатории и также содержащей микрофонную решетку. Четвертым компонентом являются пневматические цилиндры, которые обеспечивают избыточное давление, создавая идеально плотный и воздухонепроницаемый контакт между источником и приемником [63].

Сеанс измерения начинается с настройки чувствительности микрофона. Затем система усредняет значения звукового давления в переднем и заднем пространствах. Кроме того, в приёмном отделении измеряется время затухания звука для расчета общей поглощающей способности материала.

Метод позволяет тестировать как листовые амортизаторы, так и готовые трехмерные элементы интерьера, такие как теплозащитные экраны передней переборки (рисунок 3.14), которые устанавливаются в проеме с использованием имитационных стандартных панелей кузова [64].



Рисунок 3.14 – Обивка щитка передка LADA Granta с войлоком (слева) и Kia Optima с ППУ (звукоизолирующие детали)

Способ крепления образцов зависит от их геометрии. В свою очередь плоские образцы устанавливаются на плоскую металлическую пластину и края детали закрывают клейкой лентой. Объёмные детали помещаются в установку в составе ответной металлической детали кузовного элемента. При этом необходимо перекрыть отверстия, через которые проходят смежные

компоненты. Данные мероприятия проводятся с целью минимизации нецелевых звуковых потерь и позволяют наиболее объективно оценить показатели звукоизоляции материалов и формованных деталей.

Далее описано лабораторное исследование на предмет способности звукоизоляции некоторых материалов и деталей термошумоизоляции на лабораторной установке Aitoneum Isokell. Одной из задач являлось определение двух ключевых параметров, а именно потерь при передаче шума TL (Transmission Loss) и способности к звукоизоляции IL (Insertion Loss). Ключевое методологическое различие заключается в учёте опорной плиты, так как при определении TL она считается неотъемлемой частью испытательного узла, в то время как при расчете IL её показатель TL вычитается, что позволяет оценить чистый потенциал звукоизолирующего материала [65].

Потери передачи шума рассчитываются в соответствии с формулой:

$$TL = SPL_1 - SPL_2 + 10 \log \left(\frac{S}{A} \right) + \int td \text{ wave corr}, \quad (3.10)$$

где SPL_1 – средний уровень звукового давления в излучающей камере, дБ; SPL_2 – средний уровень звукового давления в приемной камере, дБ; S – поверхность образца, m^2 ; A – эквивалентная площадь поглощения приемной камеры, m^2 ; $\int td \text{ wave corr}$ – коррекция стоячей волны.

Система номенклатурирования образцов построена по иерархическому принципу:

1. Пенополиуретановые прослойки. Индекс содержит сведения о высоте слоя и массовой доле реагентов. В коде PPU15mm_100 46 первые две цифры указывают на высоту материала в 15 мм, а последующие значения описывают пропорцию смешивания сырья.

2. Фенольный войлок. Классифицируется под единым артикулом felt20, где заложена его неизменная толщина в 20 миллиметров.

3. Изоляционные пленки LTS/DSK. Серия LTS представляет собой стандартизированный лист. Семейство DSK является многозначным, поэтому числовое значение 3,5; 5 или 6 выносится непосредственно в маркировку.

В таблице 3.1 представлен список образцов, используемых при испытаниях.

Таблица 3.1 – Образцы компонентов испытаний

Наименование	Количество
ППУ толщиной 15 мм Соотношение 100/44	1
ППУ толщиной 15 мм Соотношение 100/46	1
ППУ толщиной 15 мм Соотношение 100/48	1
ППУ толщиной 20 мм Соотношение 100/44	1
ППУ толщиной 20 мм Соотношение 100/46	1
ППУ толщиной 20 мм Соотношение 100/48	1
ППУ толщиной 25 мм Соотношение 100/44	1
ППУ толщиной 25 мм Соотношение 100/46	1
ППУ толщиной 25 мм Соотношение 100/48	1
ППУ толщиной 30 мм Соотношение 100/44	1
ППУ толщиной 30 мм Соотношение 100/46	1
ППУ толщиной 30 мм Соотношение 100/47	1
Заготовка LTS – 1000·1200·3 мм (5 кг·м ²)	1
Войлочный фенольный мат 20 мм (ВФМ)	1
Звукоизоляционный полимерный слой 2 мм (3,5 кг·м ²)	1
Звукоизоляционный полимерный слой 3 мм (5 кг·м ²)	1
Звукоизоляционный полимерный слой 3.3 мм (6 кг·м ²)	1

Графические данные, представленные на рисунках 3.15-3.20, отражают результаты тестирования многослойных структур, включающих вспененный полиуретан, иглопробивной мат с внедрением фенолформальдегидной смолы и вязкоупругие полимерные мембраны разной плотности.

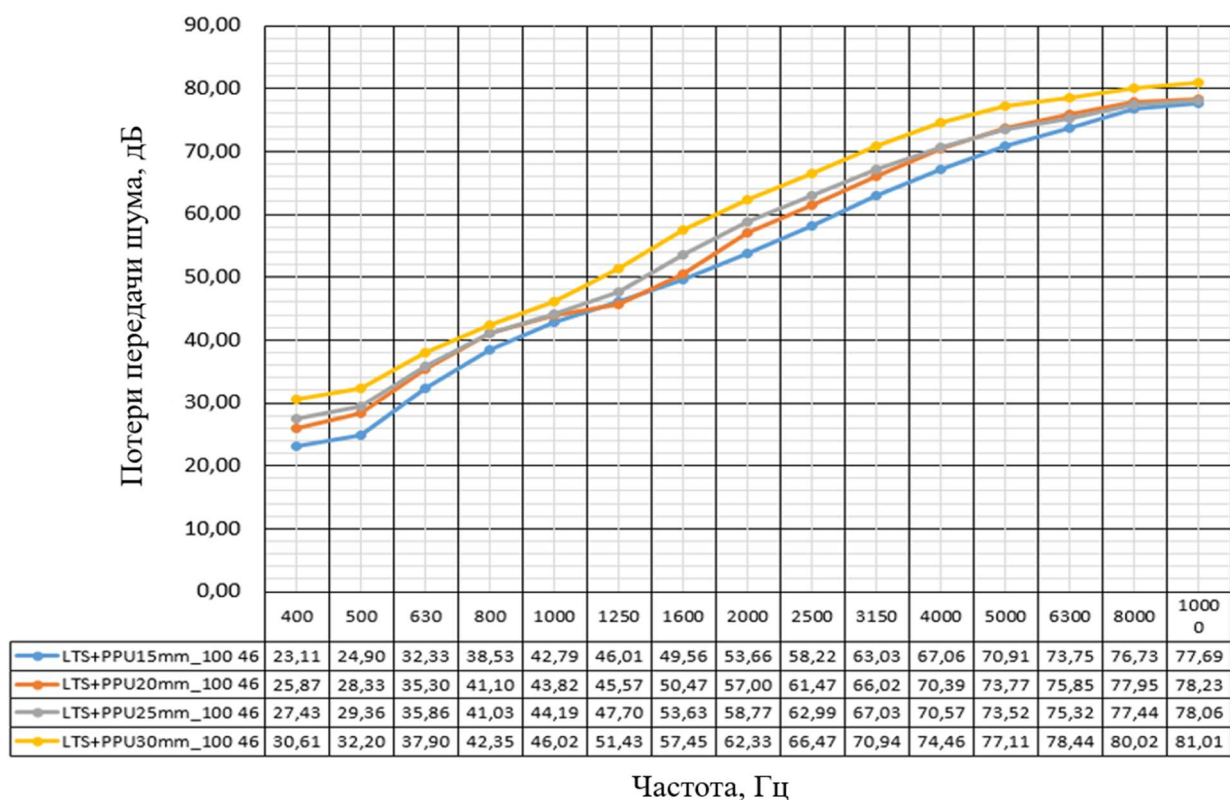


Рисунок 3.15 – Графики показателя TL ППУ с толщиной 15, 20, 25, 30 мм (соотношение 100/46) с звукоизоляционным слоем

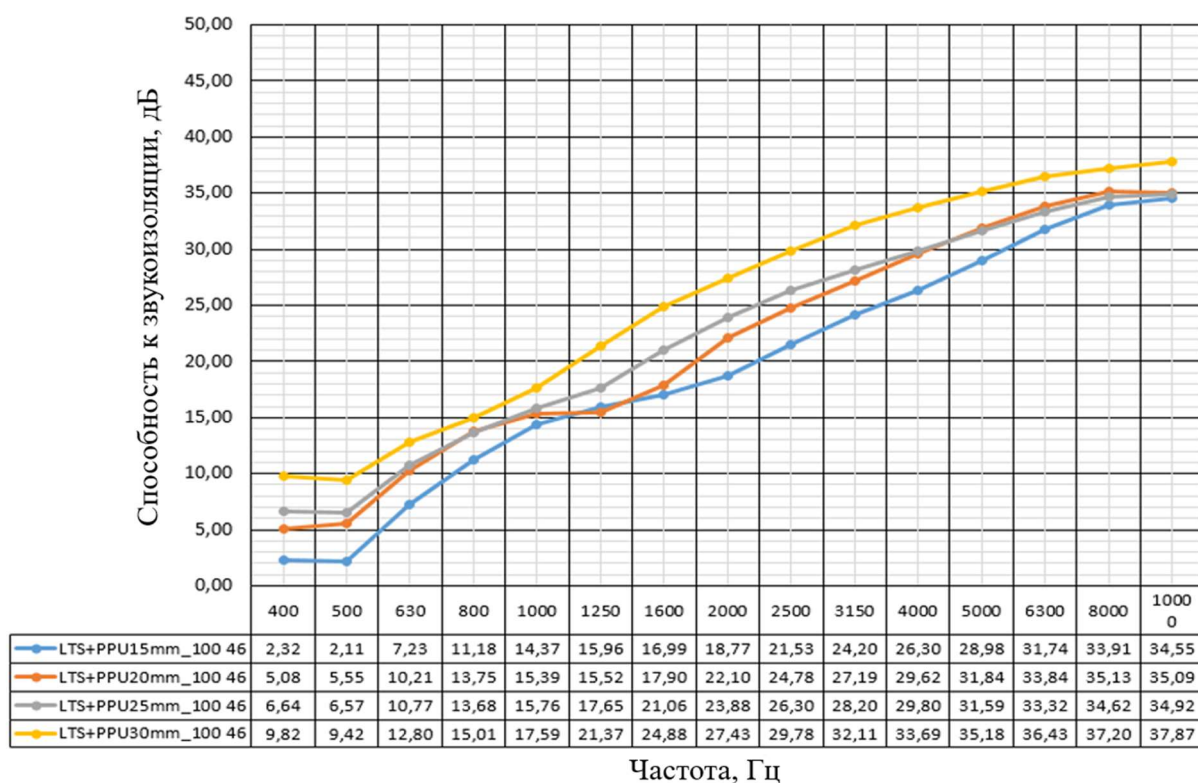


Рисунок 3.16 – Графики показателя IL ППУ с толщиной 15, 20, 25, 30 мм (соотношение 100/46) с звукоизоляционным слоем

Сравнительный анализ данных стендовых испытаний показывает решающую роль толщины звукоизоляционного слоя полиуретана в обеспечении защиты от воздушного шума. Анализируя кривые для листов толщиной 15 мм синяя полоса и 30 мм жёлтая полоса, становится очевидным линейное повышение эффективности. Удвоение высоты заслонки приводит к скачку показателя IL при частоте 400 Гц и значение увеличивается с 2,3 дБ до 9,82 дБ, демонстрируя четырехкратное увеличение изоляционных свойств.

Тем не менее, общая картина показывает, что максимальная разница в значениях IL между всеми тестируемыми версиями остаётся в пределах 10 дБ. Это свидетельствует о линейной зависимости между звукоизоляционными свойствами и объёмом используемого демпфирующего мата.

Рисунки 3.17 и 3.18 аккумулируют данные по оценке эффективности вязкоупругих полимерных экранов разного состава и сечения, смонтированных поверх полиуретанового мата толщиной 15 мм. Визуализация спектров демонстрирует сглаженность различий между кривыми, из чего следует закономерность, при которой варьирование толщины и компонентного состава изолирующей подложки практически не сказывается на финальных метриках IL и TL .

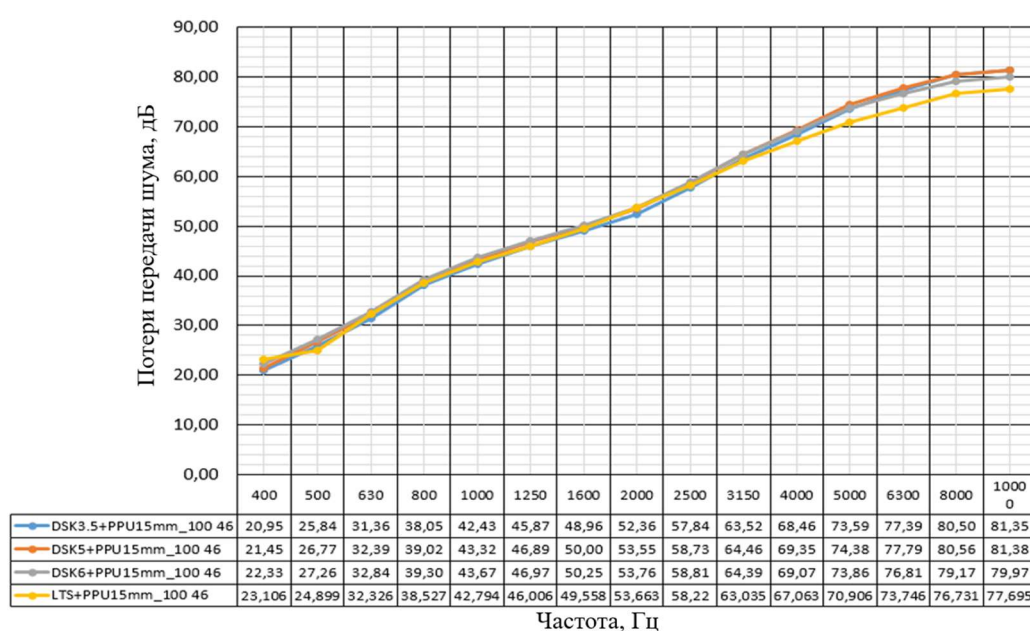


Рисунок 3.17 – Графики показателя TL ППУ толщиной 15 мм (соотношение 100/46) с разным звукоизоляционным слоем

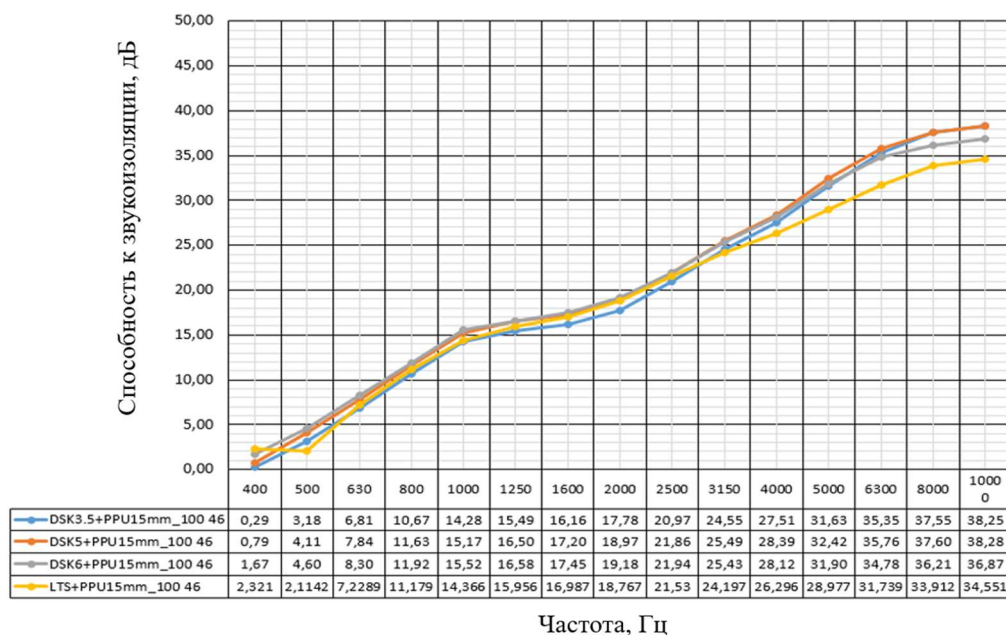


Рисунок 3.18 – Графики показателя Π ППУ толщиной 15 мм (соотношение 100/46) с разным звукоизоляционным слоем

На рисунках 3.19 и 3.20 показаны акустические характеристики многослойного мата на основе войлока и изолирующей пленки. Полученные профили демонстрируют низкую чувствительность параметров TL и Π к изменениям толщины верхнего полимерного слоя.

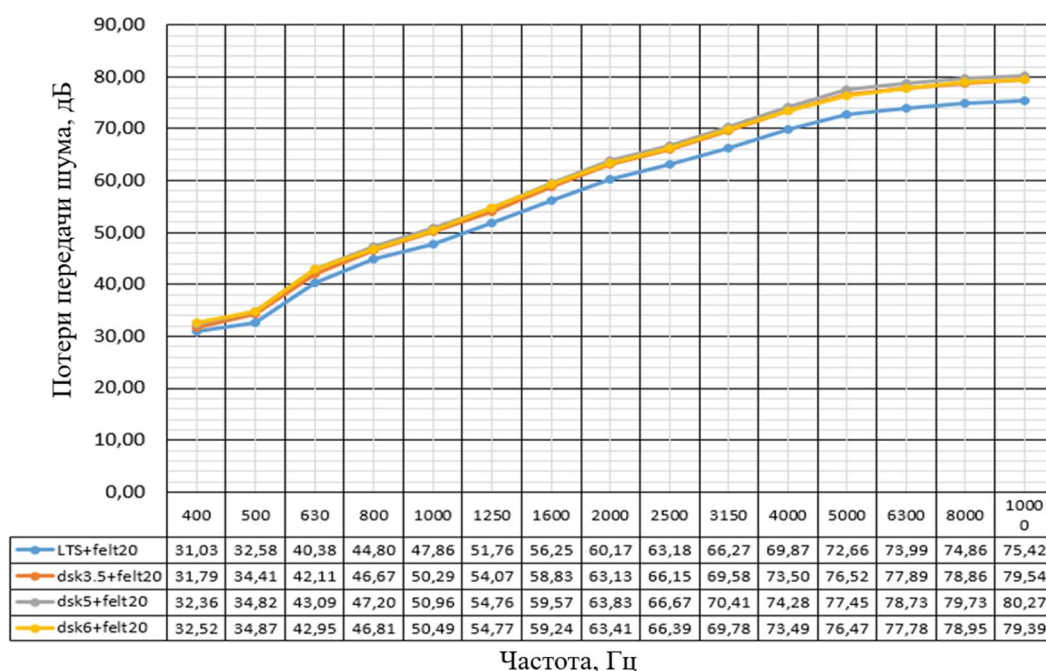


Рисунок 3.19 – Графики показателя TL ВФМ с разным звукоизоляционным слоем

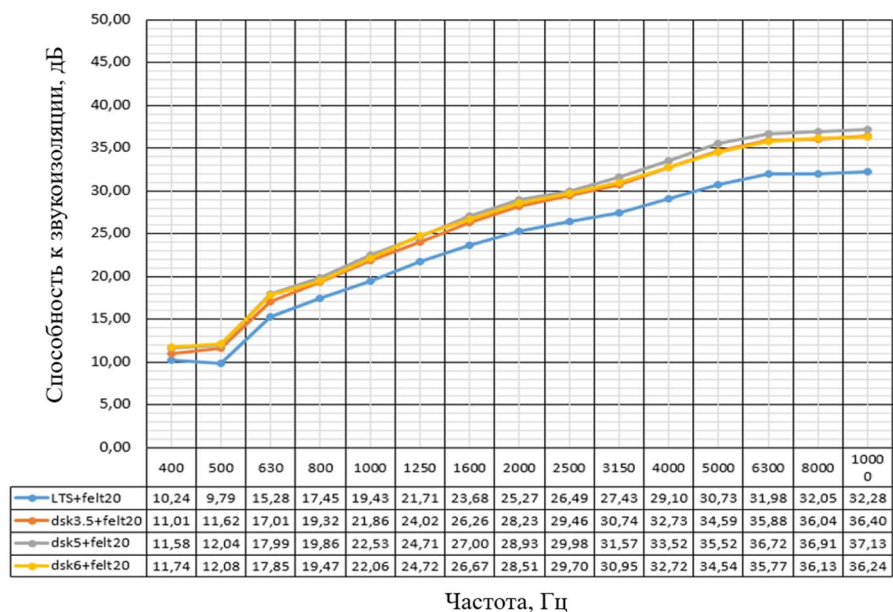


Рисунок 3.20 – Графики показателя IL ВФМ с толщиной 20 мм с разным звукоизоляционным слоем

При наложении результаты показывают лучшие результаты звукоизоляции войлочной основы над полиуретановой. Сравнение графиков на рисунках 3.16 (оранжевого) и 3.20 (синего) показывает схожие характеристики лицевой панели LTS с различным демпфирующим слоем в виде пенополиуретана толщиной 20 мм и войлока толщиной 20 мм. Эксперимент демонстрирует превосходство натуральных волокон в диапазоне средних частот 400-3150 Гц с точки зрения барьерных свойств (рисунок 3.21).

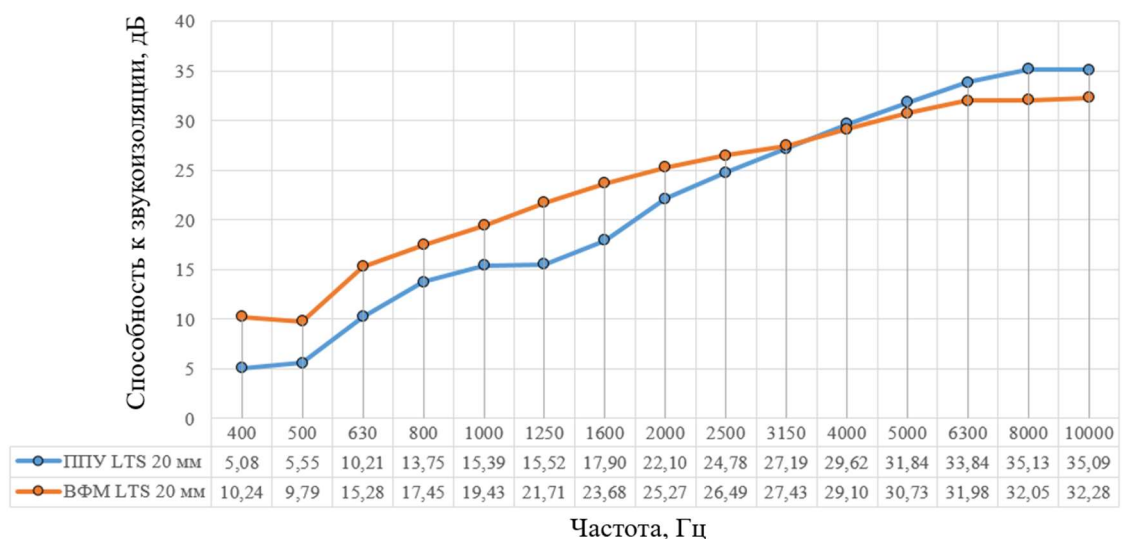


Рисунок 3.21 – Сравнение материалов изготовления деталей звукоизоляции: пенополиуретан и войлочный фенольный мат

Из данных, полученных эмпирическим путём были получены следующие математические модели. Для ППУ:

$$IL = -0,0356 \cdot \nu^2 + 2,8952 \cdot \nu + 1,3177, \quad (3.11)$$

где ν – частота звуковой волны, Гц. Для ВФМ:

$$IL = -0,0878 \cdot \nu^2 + 3,0746 \cdot \nu + 6,1853. \quad (3.12)$$

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

Принцип действия поглотителей основан на необратимой потере энергии акустической волной. Из-за открытой микропористости или волокнистости волна проникает внутрь мата. Там звук ослабевает из-за сопротивления и межфазного трения между частицами воздуха, преобразуя его в тепло. Эта способность измеряется коэффициентом α от 0 до 1, где крайние точки указывают на абсолютное отражение или полное растворение звука.

Целью следующего этапа исследования была проверка характеристик звукопоглощения отделки капота и акустических деталей двигателя, изготовленных с использованием термовакуумного формования (рисунки 3.22, 3.23).



Рисунок 3.22 – Обивки звукопоглощающие моторного отсека в испытательной установке

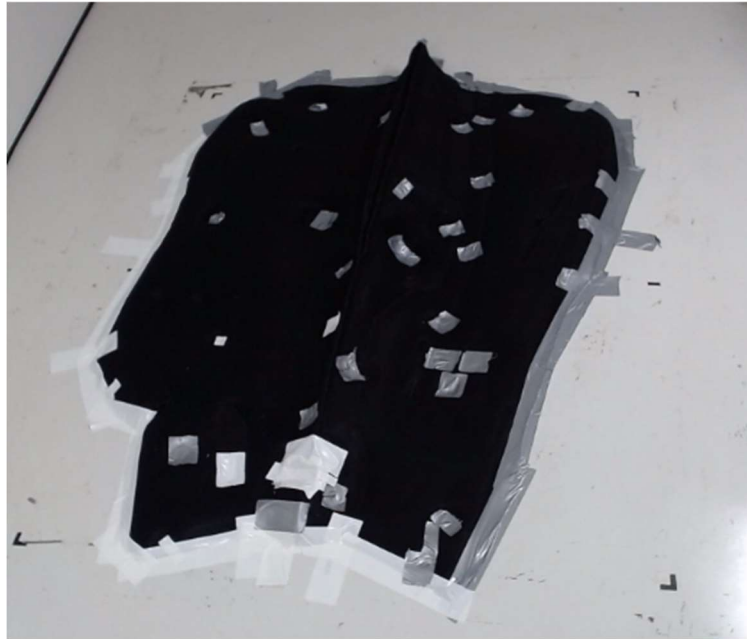


Рисунок 3.23 – Обивка звукопоглощающие тоннеля пола в испытательной установке

В качестве лабораторной базы для фиксации акустических параметров и их последующей алгоритмической обработки применялся стенд Autoneum Alpha Cabin V3.0, функционирующий в составе системы Isokell. Геометрический метраж протестированных деталей равен $1,14 \text{ м}^2$, что практически соответствует габаритам детали шумоизоляции тоннеля пола $1,2 \text{ м}^2$.

Графическое отображение итогов замера диффузного поглощения звука фронтальной стороной материалов приведено на рисунках 3.23 и 3.24. Для формирования опорных контрольных точек на частотах 500, 630, 800, 1250, 1600, 2000, 3150, 4000, 6300 и 8000 Гц использовался алгоритм линейно-кусочной аппроксимации данных в третьоктавном масштабе.

Анализ графической зависимости (рисунок 3.24) показывает, что акустические экраны для моторного отсека успешно проходят проверку на способность к звукопоглощению. Данные, полученные эмпирическим путём, соответствуют целевым значениям практически во всём целевом спектре 400-10 000 Гц, за исключением зоны 5000 и 10 000 герц. Данный провал характеристик может быть обусловлен негерметичностью стыков между

обивками или неплотным контактом изоляции с фальшполом лабораторного стенда. Принимая во внимание эти единичные несоответствия целевым значениям, итоги испытаний признаются удовлетворительными.

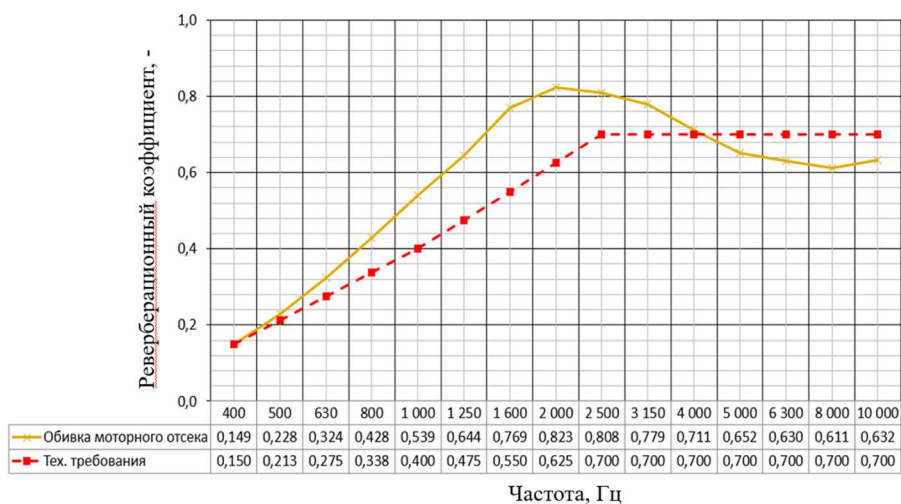


Рисунок 3.24 – График реверберационного коэффициента звукопоглощения обивок моторного отсека

Анализ графической зависимости, зафиксированной на рисунке 3.25, подтверждает эффективность звукопоглощения обивки арки тоннеля. Показатели поглощения звука в диффузном слое не опускаются ниже нормативных границ ни в одном из третьоктавных интервалов внутри спектра 400-10 000 Гц.

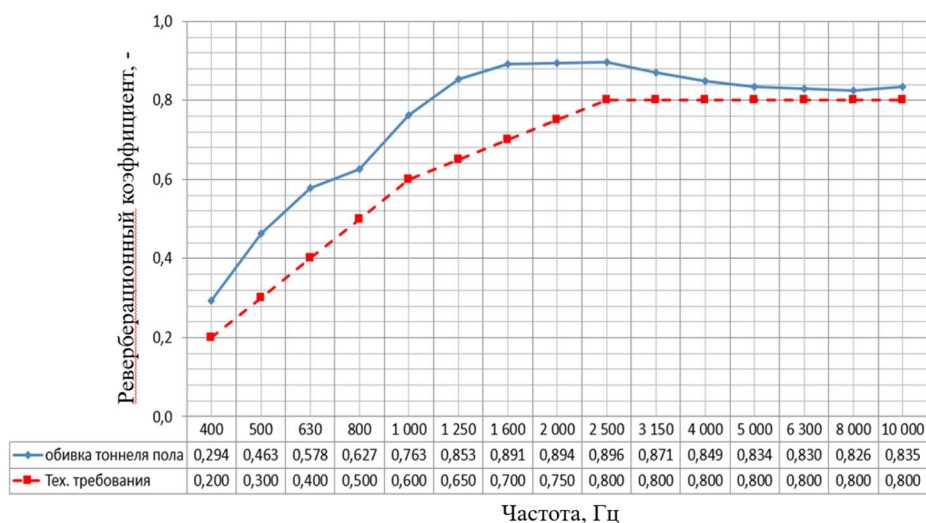


Рисунок 3.25 – График реверберационного коэффициента звукопоглощения обивки тоннеля пола

3.4. Оптимизация и доработка акустических изделий

Сочетание различных материалов – один из важнейших этапов в разработке звукоизоляционных компонентов. Правильное сочетание слоев, позволяющее использовать их преимущества, позволяет решать задачи, возникающие при проектировании акустических панелей для транспортных средств. В этом разделе обсуждается использование легкоплавких материалов в звукоизоляционных конструкциях транспортных средств, в частности в теплошумоизоляции капота [66].

Акустическая эмиссия машин возникает из-за нескольких источников, которые включают работу силового агрегата, систем впуска и выпуска двигателя, вибрации компонентов кузова, контакта колес с дорожным покрытием и другие. Разработка звукоизоляционных изделий и их последующее лабораторное тестирование направлены на соответствие нормативным требованиям, предъявляемым к транспортным средствам [67].

Каждое новое поколение наземного транспорта создается с учетом все более жестких технических требований. Ужесточение акустических стандартов требует внесения изменений в компоновку и состав шумоглушающих компонентов, включая моторный отсек. В Российской Федерации Технический регламент о безопасности колесных транспортных средств основан на ряде международных и национальных стандартов, ограничивающих уровень шума, создаваемого транспортом.

Лабораторные акустические исследования дают ответы на некоторые вопросы, возникающие при проектировании транспортных средств.

В настоящее время энергетическая отрасль стремительно развивается, и исследования сосредоточены, в частности, на синтезе материалов, способных служить источниками энергии [68]. Например, благодаря развитию нанотехнологий были созданы и усовершенствованы различные

материалы для накопления тепловой энергии, обладающие высокими свойствами теплопередачи и использующие фазовые переходы.

Ниже описано исследование, проведенное с целью оценки эффективности использования легкоплавкого материала в звукопоглощающей облицовке капота для обеспечения дополнительного сохранения тепла. В качестве этого материала рассматривается очищенный парафин П-2 с температурой плавления 55°C . Чем выше температура плавления, тем скорее смесь начнёт передавать накопленное тепло источнику тепла при остывании. Например, когда парафин П-2 охлаждается с 90°C до 55°C при температуре окружающей среды около 20°C , ему требуется около 60 минут для затвердевания и выделения тепла. Снижение температуры плавления задерживает выделение тепла. Температуру плавления парафина можно снизить, добавив вазелиновое масло в определенной пропорции. Этот приём актуален для использования в условиях Крайнего Севера.

Далее приведён пример использования этой технологии на обивке капота легкового автомобиля. Этот звукопоглощающий элемент крепится к внутренней стороне капота с помощью специальных крепежных элементов. Она изготовлена из пенополиуретана с открытыми порами и обшита нетканым материалом. Основная функция обивки – поглощать звуковые волны, излучаемые работающим двигателем внутреннего сгорания. Деталь изготавливается путем формования заготовки в пресс-форме (рисунок 3.26) [69].



Рисунок 3.26 – Внешний вид обивки капота

Метод измерения основан на сравнении среднего времени реверберации, то есть времени затухания звукового давления, в реверберационной камере без тестируемого образца и с образцом, помещенным в неё. Измерения проводятся с использованием стандартной установки Autoneum Alpha Cabin V3.0 [70, 71].

Для оценки реверберационного коэффициента звукопоглощения исследуемой детали использовалась измерительная камера Autoneum Alpha Cabin V3.0. Определение звукопоглощающих свойств выполнялось в соответствии с нормативными документами ISO 354:2003 «Акустика. Измерение звукопоглощения в реверберационной комнате» и ГОСТ 31704-2011 (EN ISO 354:2003) «Материалы звукопоглощающие. Метод измерения звукопоглощения в реверберационной камере» (рисунок 3.27) [72].

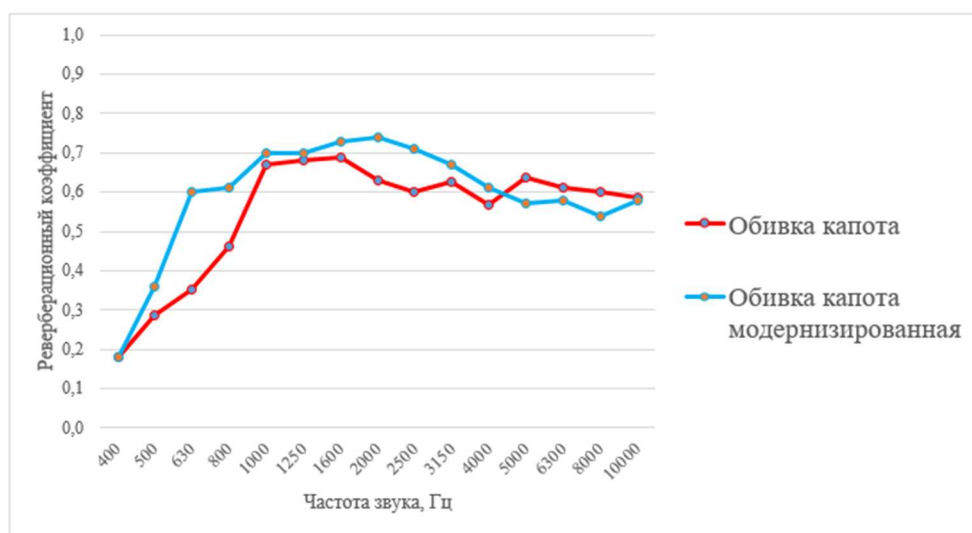


Рисунок 3.27 – Результаты акустических испытаний обшивки капота

На графике наглядно показано, что модернизированная обшивка капота значительно превосходит стандартную по своим звукопоглощающим свойствам. Использование обшивки капота в моторном отсеке является эффективным способом снижения шума двигателя, и такие решения широко используются при проектировании транспортных средств. Увеличение объема звукопоглощающего материала также улучшает акустические характеристики. Однако это также уменьшает свободное пространство в моторном отсеке, что затрудняет циркуляцию воздуха и в целом снижает тепловую инерцию воздушного объема. Для улучшения термостатирования воздуха в моторном отсеке требуются материалы, которые не только поглощают звук и обеспечивают теплоизоляцию, но и, наоборот, обеспечивают отвод тепла от нагретых поверхностей работающих компонентов [73].

Суть предлагаемого технического решения для комбинированной облицовки капота показана на рисунке 3.28. Парафиновые блоки 2 укладываются на нетканый водонепроницаемый материал 1, покрываются сверху таким же материалом, а затем соединяются с нижним слоем с помощью ультразвуковой сварки, образуя герметичные ячейки. Полученный ячеистый слой встраивается в формованный пенополиуретан 3 и размещается на стороне

капота, обращенной к двигателю. Слой алюминиевой фольги 4 размещается на обратной стороне обшивки, прилегающей к панели капота. Собранный упаковку в виде мата помещают в форму и формуют.

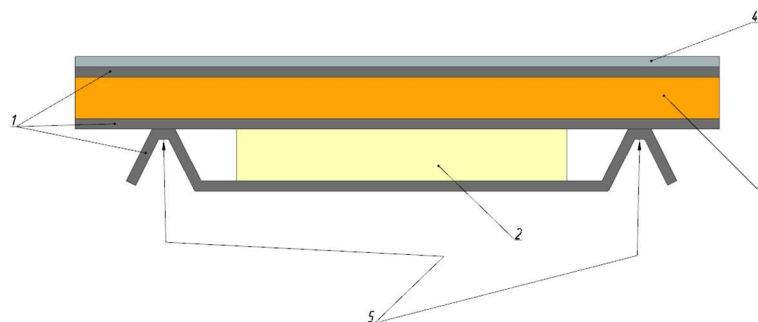


Рисунок 3.28 – Схема структуры мата: 1 – водонепроницаемый нетканый материал, 2 – парафин, 3 – ППУ, 4 – фольга, 5 – место спайки

С учётом габаритов обшивки капота и её удалённости от источника тепла, для эксперимента целесообразно использовать парафиновые бруски размером 210*12*5 мм. Для их размещения на тыльной стороне обшивки выполняются прорезы длиной 200-220 мм и глубиной 10-15 мм, расположенные на расстоянии не более 130 мм друг от друга. В эти прорезы помещаются парафиновые бруски. Чтобы сопоставить температурные показатели поверхности с парафиновым слоем и без него, прорезы выполняются только на половине площади обшивки капота (рисунок 3.29).

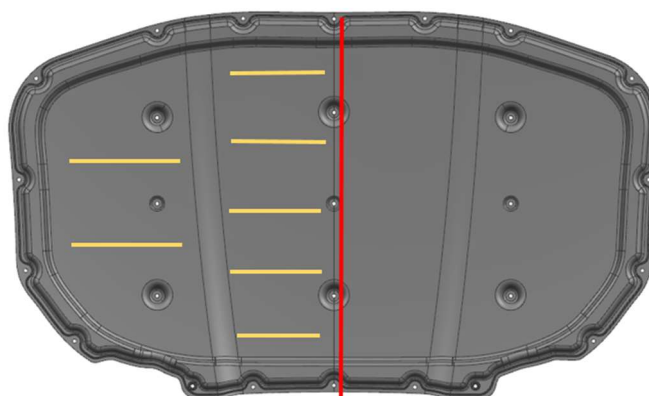


Рисунок 3.29 – Схема расположения парафина в обшивке капота: жёлтым цветом обозначено положение брусьев парафина в разрезах обшивки, красным обозначена граница между участками с парафином и без него

В дальнейшем будут проведены натурные исследования для более точного определения положительных свойств внедрения теплового аккумулятора в виде парафина. Один из ключевых экспериментов будет заключаться в создании специального контейнера, содержащего ёмкость моторного масла. Эта конструкция имитирует стенки моторного отсека с установленным силовым агрегатом, при этом на внутренних стенках короба будут установлены модернизированные обивки. Эта экспериментальная установка позволит изучить поведение нового материала в составе звукопоглощающих изделий в условиях, максимально приближенных к реальным условиям эксплуатации. В ходе эксперимента температура масла и внутренних стенок контейнера будет регистрироваться на различных стадиях нагрева и охлаждения, что позволит оценить эффективность парафина при колебаниях температуры [74].

На основании результатов исследований планируется получить исчерпывающую информацию о тепловых характеристиках модернизированного компонента и его способности улучшать характеристики запуска двигателя при минусовых температурах окружающей среды. Ожидается, что использование такого материала значительно сократит время прогрева двигателя, снизит нагрузку на стартер и аккумулятор, а также повысит общую надежность транспортного средства в холодном климате.

Это исследование могло бы послужить основой для разработки новых решений в области тепло- и звукоизоляции, которые могли бы повысить комфорт и безопасность эксплуатации транспортных средств в различных климатических условиях [75].

Предварительно можно оценить теоретическую эффективность использования легкоплавких веществ в рассматриваемых компонентах. Материал изначально твердый и разжижается за счет поглощаемого тепла. Следовательно, при последующем затвердевании будет выделяться тепло в соответствии с графиком плавления и отверждения твердых кристаллов

(рисунок 3.30). Поскольку температура плавления парафиновых брусков составляет 55°C , тепла, выделяемого двигателем внутреннего сгорания, достаточно для их расплавления.

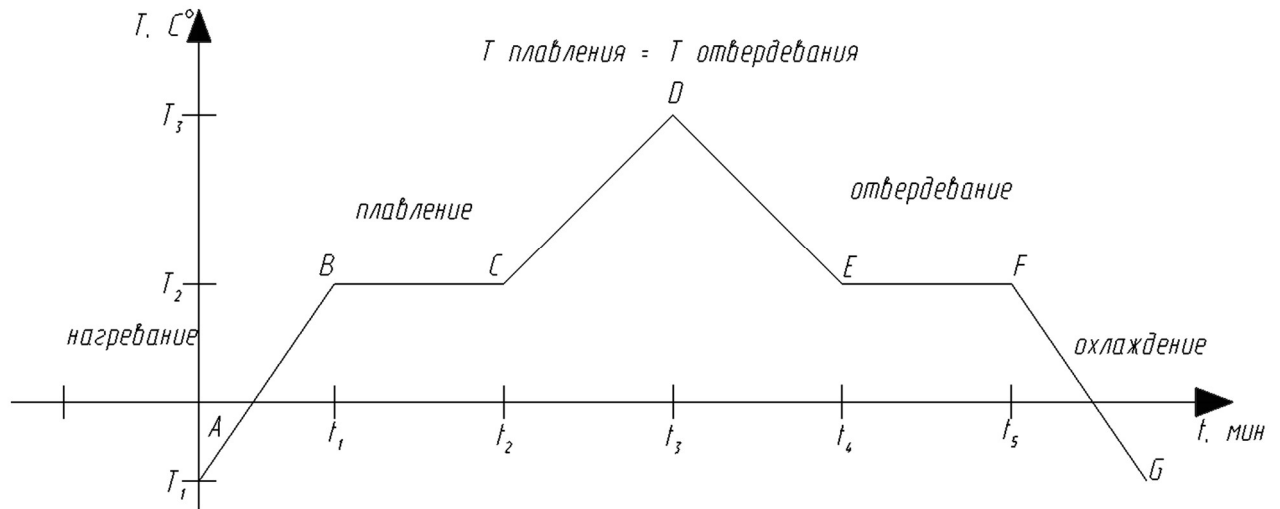


Рисунок 3.30 – График плавления и отвердевания кристаллических тел

Рассчитаем объём парафина: при среднем размере бруска его длина составит 0,21 м, ширина 0,12 м, высота 0,005 м:

$$V = a \cdot b \cdot c = 0,21 \text{ м} \cdot 0,12 \text{ м} \cdot 0,005 \text{ м} = 0,000126 \text{ м}^3.$$

Масса бруска при плотности парафина $\rho = 900 \text{ кг/м}^3$ будет равна:

$$m = V \cdot \rho = 0,000126 \text{ м}^3 \cdot 900 \text{ кг/м}^3 = 0,1134 \text{ кг}.$$

Общая масса зависит от расположения брусков в обивке. Рассмотрим массу 14 брусков, она составит:

$$m = 14 \text{ шт.} \cdot 0,1134 \text{ кг} = 1,6 \text{ кг}.$$

Первый этап теплоотдачи парафина происходит во время его остывания до момента начала затвердевания. В данном случае рассмотрим сколько тепла выделит весь парафин при охлаждении с 90°C до 55°C . При расчёте

используем значение удельной теплоёмкости парафина в расплавленном состоянии, равное 3000 Дж/кг·°C:

$$Q_1 = Cm(t_{\text{нач}} - t_{\text{кон}}) = 3000 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}} \cdot 1,6 \text{ кг} \cdot (90 - 55)^\circ\text{C} = 168 \text{ кДж}.$$

Далее необходимо обозначить сколько тепла выделится при затвердевании парафина. Для этого используем значение удельной теплоты плавления, равное 150 кДж/кг:

$$Q_2 = lm = 150 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}} \cdot 1,6 \text{ кг} = 240 \text{ кДж}.$$

Снижение температуры будет происходить до тех пор, пока температура парафина не станет равной температуре окружающей среды. Примем значение 20 °C как температуру окружения. Зная значение удельной теплоёмкости парафина в твёрдом агрегатном состоянии 2900 Дж/кг·°C:

$$Q_3 = Cm(t_{\text{нач}} - t_{\text{кон}}) = 2900 \text{ Дж} \cdot 1,6 \text{ кг} \cdot (55 - 20)^\circ\text{C} = 162 \text{ кДж}.$$

Суммируем полученные значения:

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 = 168 \text{ кДж} + 240 \text{ кДж} + 162 \text{ кДж} = 570 \text{ кДж}.$$

Расчёт показал, что 1,6 кг парафина разогретые до 90 °C и охлаждённые до 20 °C выделяют 570 кДж энергии.

Из-за ограниченного объёма подкапотного пространства беспилотного транспортного средства звукоизоляционные элементы необходимо адаптировать к новым компоновочным условиям. Предлагаемая модернизация предполагает уменьшение толщины слоёв, а также использование новых компонентов и технологических приёмов производства [76].

Для звукоизоляционных деталей модернизация предполагает в качестве отражающего слоя применение стеклоткани или углеволоконную ткань толщиной 1 мм (рисунок 3.31). На формообразующей матрице этот тканевый слой формируется с учётом

особенностей внутренней компоновки моторного отсека. С наружной стороны отформованной поверхности предусматривается жертвенный слой, улучшающий сцепление с демпфирующим звукопоглощающим слоем. В качестве матрицы предлагается использовать эпоксидную смолу с добавлением оксида алюминия. Данный состав при контакте с открытым пламенем выделяет водяной пар, гася горящий участок. После пропитки, необходимо извлечь изделие и установить со стороны жертвенного слоя войлочный фенольный мат или использовать литьевую форму для ППУ.

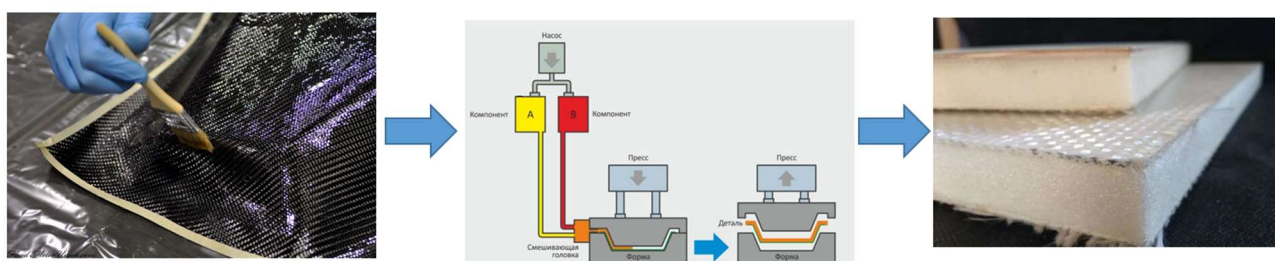


Рисунок 3.31 – Схема изготовления экспериментальных деталей звукоизоляции

Данные материалы, используемые в качестве демпфирующего слоя, прошли сертификационные испытания в области пожароопасности. В ходе проведения исследований была установлена температура воспламенения войлочный фенольного мата при значении 222 °С, литьевой ППУ показал значения воспламеняемости при температуре 110-120 °С. При этом оба материала имеют свойство самозатухания и не распространяют открытое пламя, что в комбинации с звукоотражающим слоем с применением оксида алюминия, демонстрирует безопасность применения данных деталей в моторном отсеке.

В качестве экспериментального способа производства возможно изготовить звукопоглощающие детали методом, изображённом на рисунке 3.32. На полуформу оснастки устанавливается перфорированный алюминиевый экран толщиной не более 1 мм. Методом прикатки валиком

необходимо придать термоэкрану геометрию матрицы, на которую он установлен. Далее на матрицу устанавливается пуансон и в закрытую форму с термоэкраном заливается двухкомпонентный полиуретан.

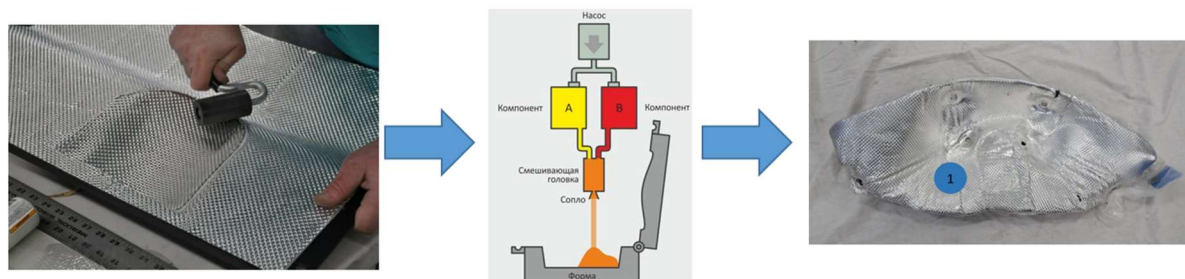


Рисунок 3.32 – Схема изготовления деталей звукопоглощения с термоэкраном экспериментальным способом

После извлечения данный тип деталей может быть установлен в моторный отсек беспилотной малолетной модульной платформы. Таким образом, детали, выполненные таким способом производства, сочетают в себе высокие показатели термоизоляции, а также звукопоглощающие свойства.

Также возможна доработки текущих способов производства звукопоглощающих деталей. Для этого необходимо внедрить в композитный мат, который проходит этап термического формования при температуре 80 °С под прессом, внедрить перфорированную алюминиевую фольгу (рисунок 3.33). Данный элемент значительно улучшает теплоизоляционные характеристики деталей звукопоглощения. Освоение технологии внедрения в состав войлочного фенольного мата элемента термоэкранирования, позволит использовать текущую серийную оснастку для изготовления данных типов деталей.



Рисунок 3.33 — Звукопоглощающая деталь моторного отсека с использованием термоэкрана

В заключительной части исследования были проанализированы методы модернизации акустических компонентов для их интеграции в моторный отсек беспилотной малошумной модульной платформы.

Ввиду жёстких пространственных ограничений подкапотной компоновки, основное внимание было уделено поиску оптимальных сочетаний материалов с различной толщиной. Целью являлось достижение максимального индекса изоляции воздушного шума при минимизации габаритных размеров деталей [77].

3.5. Тепловой расчёт деталей термошумоизоляции для беспилотной сельскохозяйственной машины

Топология силового отсека беспилотных платформ принципиально отличается от компоновки пилотируемых транспортных средств, что формирует специфический профиль тепловых нагрузок. Высокочувствительная бортовая автоматика подвергается интенсивному воздействию теплового излучения от двигателя внутреннего сгорания и вспомогательных агрегатов. Прогнозирование зон риска и путей конвекции горячего газа осуществляется с использованием методов CAE моделей. Численные эксперименты позволяют выявить горячие точки, в

которых обнаруживаются пиковые нагрузки на электрические блоки управления и топливопроводы, а также математически обосновать зависимость качества охлаждения от геометрии компонентов.

Формула для расчёта теплопередачи в движущемся воздухе имеет вид:

$$\frac{\partial T}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \cdot T = \alpha \nabla^2 T + \frac{q}{\rho C_p}, \quad (3.13)$$

где T – температура воздуха в исследуемой точке, К; t – время, с; $\mathbf{u}$ – вектор скорости движения воздуха, м/с; α – коэффициент температуропроводности воздуха, м²/с (принимается за $2,2 \cdot 10^{-5}$ м²/с); q – объёмная мощность источников тепла, Вт/м³; ρ – плотность воздуха, кг/м³ ($1,2$ кг/м³); C_p – удельная теплоёмкость воздуха, Дж/(кг·К) (1005 Дж/(кг·К)); ∇ – пространственный оператор дифференцирования.

При раскрытии формулы по координатам X , Y , Z , уравнение принимает следующий вид:

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u_x \frac{\partial T}{\partial x} + u_y \frac{\partial T}{\partial y} + u_z \frac{\partial T}{\partial z} = \alpha \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \frac{q}{\rho C_p}, \quad (3.14)$$

где в левой части уравнения учитывается локальное изменение и показано, насколько быстро меняется температура конкретно в той точке, где проводится измерение, с течением времени, а также описывается перенос тепла ветром. В правой части уравнения описана молекулярная теплопроводность, которая учитывает передачу тепла на микроуровне, когда быстрые горячие молекулы воздуха сталкиваются с медленными холодными и передают им энергию и внутренний нагрев, то есть чистый приток энергии от внешних источников [78].

Целью данного исследования являлся анализ термических процессов и воздушных потоков моторного отсека самоходного беспилотного роботизированного транспортно-технологического энергосредства мощностью до 130 л.с. проекта «Полесад-2.0». Кинематика воздушных потоков и механизмы теплопередачи моделировались в специализированной среде инженерного анализа

(рисунок 3.34).

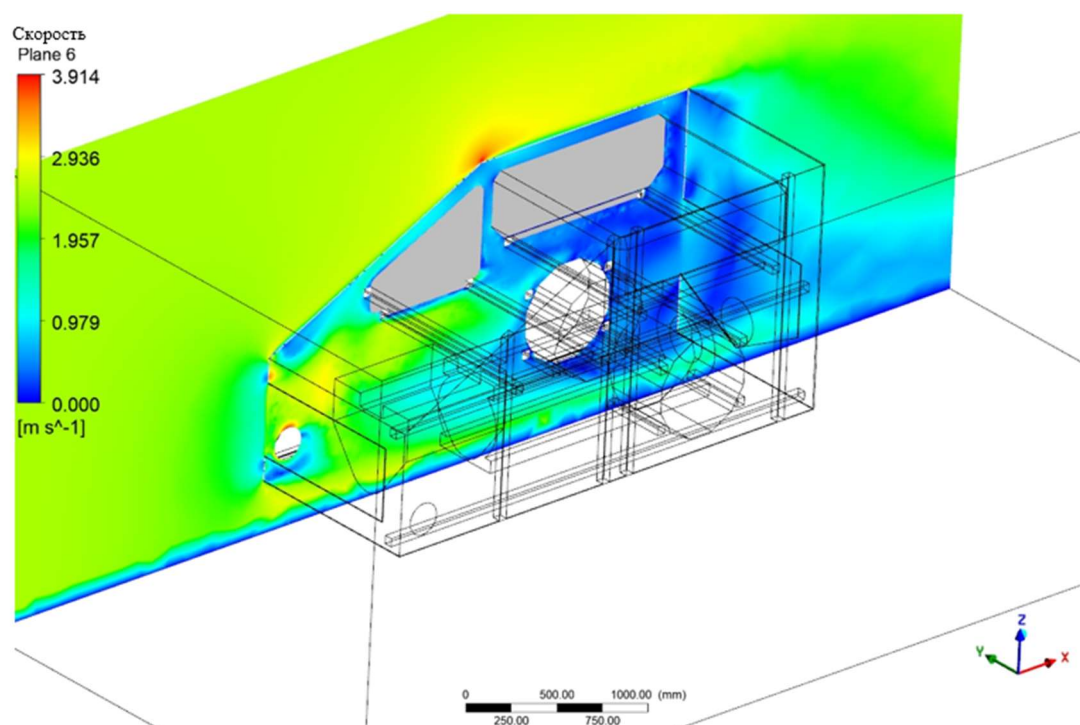


Рисунок 3.34 – Расчёт характера воздушного потока внутри разработанной упрощённой модели моторного отсека беспилотной аграрной машины

Применение цифрового двойника моторного отсека позволило визуализировать изотермические поля, отследить траектории движения нагретых масс воздуха и с высокой точностью локализовать зоны критического теплового воздействия. На основе полученных данных была выполнена корректировка архитектуры отсека и разработана комбинированная система изоляции. Виртуальная модель определила оптимальные координаты для монтажа термошумоизоляции.

Такой подход исключает риск термического повреждения электропроводки. Кроме того, симуляция выявила аэродинамические мостики шума, такие как конструктивные каналы, которые одновременно дестабилизируют акустический фон и нарушают расчетные режимы теплопереноса (рисунок 3.35).

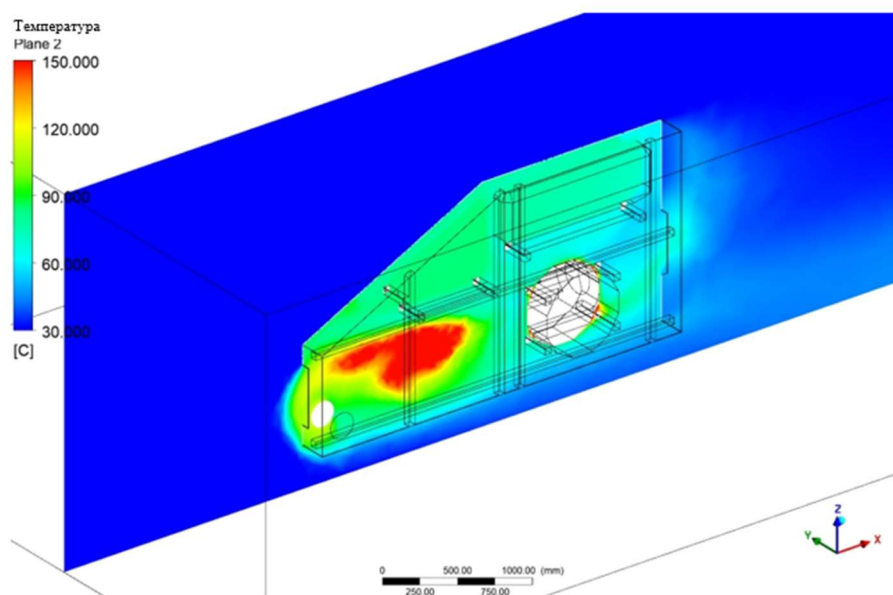


Рисунок 3.35 – Карта температур в разработанной упрощённой модели моторного отсека беспилотной аграрной машины

Применение прогнозного анализа уже на ранних стадиях НИОКР позволяет избежать затратной модернизации оборудования: инженеры получают возможность моделировать характеристики различных конфигураций шумо- и теплоизоляции ещё до изготовления прототипа производственной линии.

Особую важность представляет охлаждение бортовых электрокомпонентов автоматизации беспилотных наземных средств и топливной системы (рисунок 3.36). Это обусловлено кумулятивным тепловыделением поршневых групп, выхлопных систем и тяговых гидротрансформаторов. В таких условиях ключевая функция теплозащитных элементов состоит в снижении тепловой нагрузки на высоковольтную электронику, поддержании заданных эксплуатационных режимов и увеличении ресурса деталей. Современные материалы, как правило, обладают комплексными композитными свойствами: они не только препятствуют проникновению гигроскопичной пыли и масла в корпус, но и ослабляют структурный шум [79].

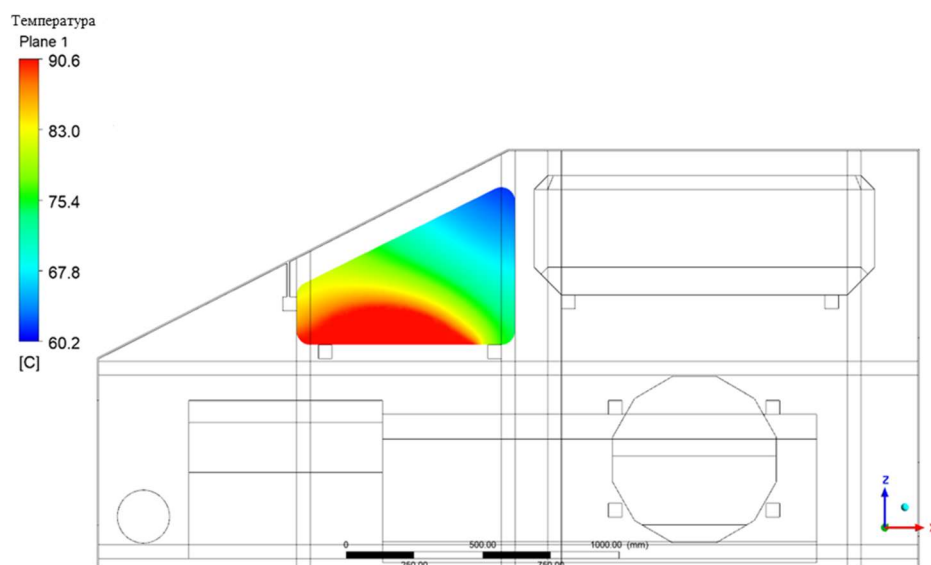


Рисунок 3.36 – Карта температур в разработанной упрощённой модели моторного отсека беспилотной аграрной машины

Защита компонентов машинного отделения может включать обмотку жгутов проводов клейкими термоусадочными трубками, рассчитанными на температуру до 150 °С. Наряду с этим широко применяются теплоизоляционные прокладки повышенной плотности, металлизированные отражатели и композитные панели, а также многослойные конструкции из разнородных материалов. Однако максимальная эффективность достигается лишь при системном подходе к проектированию. Он предполагает продуманное размещение дефлекторов и перегородок, организацию путей отвода горячего воздуха за пределы полости и активное воздушное охлаждение зон с наибольшей плотностью теплового потока. Дополнительно микроклимат контролируется в режиме онлайн с помощью телеметрии и сетей термопар, что обеспечивает точное управление температурой [80].

Алгоритм проектирования защиты начинается с компьютерного аудита рисков в среде CAE. На основании карты температурных показаний выбираются материалы, параметры которых отвечают требованиям по влагопоглощению и вибропоглощению. Не менее важна эргономика сборки: корпус не должен затруднять плановое техническое

обслуживание или провоцировать коррозию крепёжных элементов. Затем проводятся полевые испытания, которые либо подтверждают расчётные и теоретические значения, либо служат основанием для их корректировки по практическим результатам. В итоге формируется комплексная методология, встраивающая теплоизоляцию в общую систему надёжности транспортного средства, а не рассматривающая её как разрозненный набор локальных доработок (рисунок 3.37).

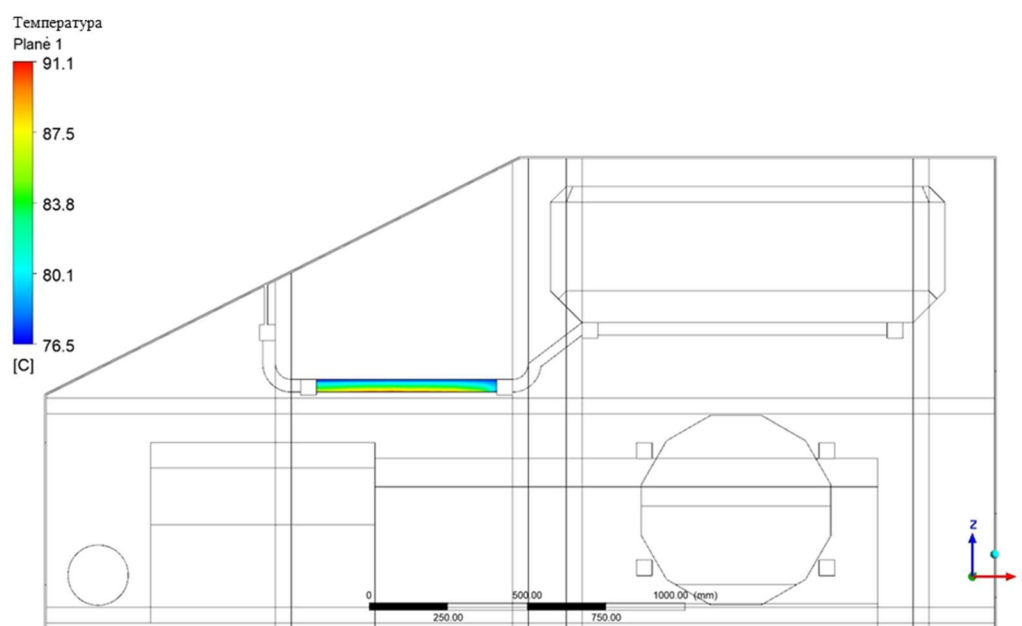


Рисунок 3.37 – Нагрев элементов ТШИ

Внедрение деталей термшумоизоляции по предложенным ранее экспериментальным способам производства, позволило снизить тепловую нагрузку не только на топливную систему беспилотного трактора «Полесад-2.0», но и на компоненты электрики (рисунок 3.38).

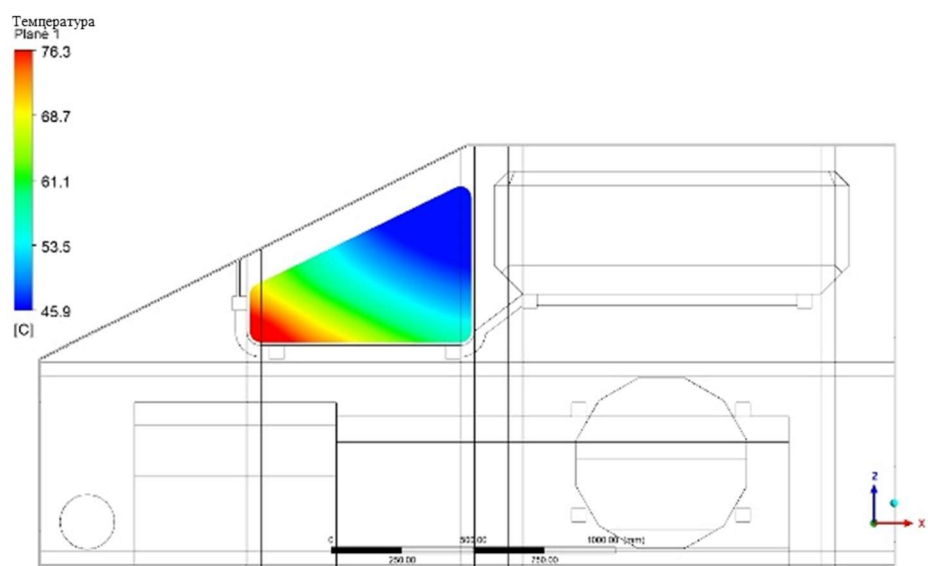


Рисунок 3.38 –Карта нагрева топливной системы «Полесад-2.0» после внедрения деталей термошумоизоляции

В программном комплексе ANSYS проведён инженерный анализ деталей термошумоизоляции с термозэкраном. CAE-анализ показал снижение забарьерной температуры с 90,6 °C до 76,3 °C. Также из положительного влияния внедрения данного типа деталей стало перераспределение воздушных потоков в моторном отсеке машины. В совокупности с контролем воздушных потерь на лабораторной установке «AirFlow», разработанные методики позволяют точно контролировать распределение тепловой энергии, передаваемой по воздуху и выводить избыточное тепло за пределы моторного отсека.

3.6. Выводы по главе III

Была разработана и протестирована методика измерений с использованием системы Autoneum Alpha Cabin V3.0, которая соответствует стандартам ISO 354:2003 и ГОСТ 31704-2011. Были получены расчетные частотные зависимости коэффициента поглощения звука при реверберации α_s и эквивалентной площади поглощения A . Подтверждено, что для формованных деталей сложной геометрии эквивалентная площадь

поглощения является более точным показателем, поскольку не зависит от неточностей при определении фактической площади поверхности образца. Для учета краевых эффектов был введен поправочный коэффициент 0,92, позволяющий сравнивать результаты измерений в небольших камерах с полномасштабными измерениями реверберации.

Испытания проводились на композитах на основе пенополиуретана различной толщины и войлочного фенольного мата с полимерными звукоизоляционными слоями LTS, DSK. Было установлено, что:

1. Увеличение толщины пенополиуретана с 15 до 30 мм приводит к увеличению значения изоляции воздушного шума IL на частоте 400 Гц с 2,3 до 9,82 дБ, подтверждая прямую пропорциональность IL толщине демпфирующего слоя.

2. Варьирование толщины и состава полимерного звукоизолирующего слоя не обеспечивает существенного увеличения TL и IL . Поэтому при проектировании звукоизолирующих компонентов приоритетным параметром является толщина демпфирующей подложки, а не толщина наружного покрытия.

3. Замена пенополиуретана войлоком такой же толщины 20 мм в звукоизолирующем композите с общим слоем LTS обеспечивает более высокие значения TL и IL в диапазоне частот 400-3150 Гц, что указывает на большую эффективность войлока в качестве демпфирующего материала в средних частотах. Были протестированы стандартные и модернизированные облицовки моторного отсека и туннеля. Было установлено, что большинство образцов соответствуют нормативным требованиям по коэффициенту поглощения звука при реверберации во всем диапазоне частот 400-10 000 Гц. Отклонения, зафиксированные в отделке моторного отсека на частотах 5000 и 10 000 Гц, были вызваны зазорами и плохим контактом между компонентами и поверхностью камеры, что требовало тщательной герметизации и точного позиционирования при монтаже.

Было предложено новое решение, касающееся обивки капота, содержащей герметичные ячейки, заполненные парафином. Расчеты показали, что 1,6 кг парафина, нагретого до 90°C и охлажденного до 20°C, выделяют в общей сложности 570 кДж тепла, включая тепло охлаждения в жидкой фазе, тепло кристаллизации и тепло охлаждения в твердой фазе.

Разработанные методы и экспериментальные данные служат основой для проектирования элементов акустической и теплоизоляционной установок для беспилотных модульных сельскохозяйственных платформ. Предложенные конструктивные решения могут быть непосредственно использованы в опытно-конструкторских работах. Было установлено, что не все отечественные производители обладают подобным экспериментальным оборудованием, что подчеркивает необходимость создания отраслевых лабораторий и стандартизации методов оценки акустических свойств материалов специально для беспилотных транспортных средств.

Была разработана упрощенная модель моторного отсека самоходного беспилотного роботизированного транспортно-технологического энергосредства мощностью до 130 л.с. проекта «Полесад-2.0» для проведения инженерных расчётов в программном комплексе ANSYS. На основе разработанной модели проведён анализ воздушных потоков на предмет обнаружения мест скопления пыли и попадания влаги на компоненты электрики. На основе данного расчёта далее были получены результаты нагрева внутренних компонентов беспилотной машины. Исходя из двух моделей, описывающих движение воздушных масс и тепла в моторном отсеке, был выявлен перегрев компонентов электрики и топливной системы. На основе полученных лабораторных исследований материалов ТШИ и описанных методов проектирования деталей термошумоизоляции, была создана и внедрена в конструкцию беспилотной машины «Полесад-2.0». В итоге CAE-анализ показал снижение температуры нагрева топливной системы с 90,6 °C до 76,3 °C.

Глава IV. Экономическое обоснование и внедрение результатов исследования

4.1. Расчёт себестоимости производства беспилотной малошумной модульной платформы

Определение себестоимости изготовления беспилотного мини-трактора начинается с анализа прямых материальных затрат, то есть расходов на комплектующие, которые сведены в таблицу 4.1.

Таблица 4.1 – Расчёт стоимости компонентов беспилотного мини-трактора

Компонент	Примерная цена за ед. (руб.)
Шасси (металлическая рама)	150 000
Электродвигатель	100 000
Дизельный двигатель	100 000
Трансмиссия и привод	50 000
Аккумуляторная батарея (Li-Ion)	100 000
Система управления (контроллер, ПО)	300 000
Корпус (композитные материалы)	70 000
Датчики (GPS, камеры, лидары)	80 000
Электроника (микроконтроллеры, модули связи)	60 000
Ходовая часть (колёса, подвеска)	40 000
Прочие комплектующие (кабели, крепёж)	40 000
Итого материальные затраты	1 050 000

Далее оцениваются трудозатраты по основным производственным

этапам. Сборка и монтаж выполняются тремя сборщиками в течение 100 часов при ставке 500 руб./ч, что в сумме 150 000 руб. Программирование и настройка программного обеспечения занимают у одного программиста 200 часов с оплатой 1 000 руб./ч, итого 200 000 руб. Тестирование и отладка проводятся двумя специалистами за 50 часов по ставке 700 руб./ч, что составляет 70 000 руб. Контроль качества осуществляет один контролёр в течение 30 часов с оплатой 400 руб./ч, что даёт 12 000 руб. Суммарные трудовые затраты равны:

$$150\,000 \text{ руб.} + 200\,000 \text{ руб.} + 70\,000 \text{ руб.} + 12\,000 \text{ руб.} = \\ = 432\,000 \text{ руб.}$$

Производственные накладные расходы включают амортизацию оборудования, затраты на электроэнергию, воду, газ, аренду производственного помещения и обслуживание инструментов. В данном расчёте они приняты в размере 35 % от суммы материальных и трудовых затрат:

$$(1\,050\,000 \text{ руб.} + 432\,000 \text{ руб.}) \cdot 0,35 = 518\,700 \text{ руб.}$$

Прочие расходы состоят из затрат на исследования и разработки 200 000 руб., сертификацию и тестирование 150 000 руб., логистику 50 000 руб., а также непредвиденных расходов, которые принимаются равными 10% от суммы материальных, трудовых и накладных затрат:

$$(1\,050\,000 \text{ руб.} + 432\,000 \text{ руб.} + 518\,700 \text{ руб.}) \cdot 0,1 = 200\,070 \text{ руб.}$$

Таким образом, общая сумма прочих расходов составляет:
 $200\,000 \text{ руб.} + 150\,000 \text{ руб.} + 50\,000 \text{ руб.} + 200\,070 \text{ руб.} = 600\,070 \text{ руб.}$

Итоговая себестоимость изготовления одного экземпляра определяется как сумма всех статей:

$$1\,050\,000 \text{ руб.} + 432\,000 \text{ руб.} + 518\,700 \text{ руб.} + 600\,070 \text{ руб.} = \\ = 2\,600\,770 \text{ руб.,}$$

что приблизительно равно 2,6 млн руб.

На конечную стоимость влияют следующие факторы: объём производства, так как массовое производство снижает закупочные цены

на компоненты, трудоемкость и долю накладных расходов, использование местных поставщиков, что снижает транспортные и закупочные расходы, степень автоматизации производства, ввиду внедрения роботизированных производственных линий, что сокращает долгосрочные затраты. А также выбор технологических решений, таких как замена дорогостоящих датчиков более доступными альтернативами.

При мелкосерийном производстве объемом 100 единиц прогнозируемое снижение себестоимости на единицу продукции составляет 20-30%. Данный показатель достигается за счёт эффекта масштаба при закупке материалов, оптимизации технологических операций сборки и сокращения накладных расходов. В этом случае ориентировочная стоимость изделия составит от 2,0 до 2,4 млн рублей.

Следует учитывать, что приведенные расчеты носят предварительный характер. Для формирования точной финансовой модели необходим детальный аудит рынка поставщиков, оценка реальных технологических возможностей производственной линии и окончательный выбор бизнес-модели реализации проекта.

4.2. Формирование ценовой модели Robot-as-a-Service в сельском хозяйстве

Концепция предоставления роботизированных систем по модели RaaS реализуется через различные финансовые инструменты, включая периодическую подписку, прямую аренду машинного времени и операционный лизинг без перехода права собственности. В рамках данной главы акцент сделан на варианте повременной оплаты за обработку полей. Выбор обусловлен тем, что именно для этой схемы будут рассчитаны оптимальные тарифные ставки и продемонстрирован алгоритм оценки затрат, базирующийся на эксплуатационных характеристиках оборудования.

Актуальность рассматриваемой парадигмы для отечественного агропромышленного комплекса продиктована структурным дефицитом квалифицированных кадров, прогрессирующим износом парка тракторной техники и общим снижением рентабельности производства. Переход от крупных капитальных вложений к оплате фактически оказанных услуг является закономерной рыночной реакцией [81].

По сравнению с традиционным финансовым лизингом модель RaaS обладает рядом существенных преимуществ. Заказчику не требуется расширять штат сотрудников для управления парком роботов, так как эти функции берет на себя поставщик сервиса. Ответственность за регламентное техническое обслуживание, ремонт и поддержание работоспособности аппаратной части полностью ложится на провайдера. Как будет показано в последующих расчётах, данный подход обеспечивает высокую экономическую эффективность и способствует росту рентабельности растениеводческих хозяйств.

Согласно рыночным отчётам, объём мирового рынка сельскохозяйственных беспилотных систем в 2024 году оценивается в 18,2 млрд долларов. При этом смежный сектор RaaS демонстрирует опережающую динамику, достигнув показателя в 28,5 млрд долларов. Прогнозы аналитиков указывают на то, что к 2025 году затраты отрасли на аппаратные решения могут составить 23,5 млрд долларов, тогда как расходы на сервисные контракты достигнут 33,6 млрд долларов [82].

В долгосрочной перспективе тренд на аутсорсинг автоматизации сохранится. Многие аналитические агентства, а также общее направление развития рынка предоставления услуг в сельском хозяйстве, подтверждает это. Согласно экстраполяции текущих темпов роста, ёмкость сегмента RaaS должна выйти на уровень 76,5 млрд долларов к концу текущего десятилетия. Статистические данные по географии внедрения и типам механизации полевых работ за период 2023–2025 годов сведены в справочную таблицу 4.2.

Таблица 4.2 – Распределение долей рынка роботизированной сельхозтехники, %

Регион	2023 год	2024 год	2025 год
Северная Америка	35	32	38
Европа	28	28	29
Азия	25	25	26
Южная Америка	6	10	5
В других регионах	6	5	2

Региональное распределение доходов от реализации сельскохозяйственной роботизированной техники характеризуется выраженной неравномерностью.

Североамериканский агропромышленный комплекс подтверждает своё технологическое лидерство. За два года его рыночная доля увеличилась с 35% до 38%, что укрепляет статус региона как основного драйвера отрасли [83].

Европейский союз удерживает вторую позицию, консолидируя около трети мирового рынка или 28-29%. Для этого региона характерен умеренный рост без резких конъюнктурных колебаний. В то же время показатели Азиатского региона продемонстрировали коррекцию на один процентный пункт. Данную динамику следует рассматривать не как локальный спад, а как следствие более агрессивной экспансии североамериканских корпораций.

Наиболее существенное падение зафиксировано в Южной Америке, где доля сократилась вдвое с 10% до 5%. Такая корректировка может сигнализировать о дефиците инвестиционного финансирования или замедлении темпов цифровизации местного сельского хозяйства. На прочие географические зоны приходится минимальная совокупная масса в 5-6% [84].

Приведенная статистика позволяет сделать вывод об олигополизации глобального рынка тремя ключевыми центрами силы: Северной Америкой, Европой и странами Азии.

Таблица 4.3 – Удельный вес автоматизированного оборудования
в сфере сельского хозяйства, %

Категория	Годы		
	2023	2024	2025
Оборудование для сборки урожая	20	19	15
Автопилотные тракторы	25	28	35
Дроны	34	32	30
Оборудование для прополки и посева	15	14	12
Доильное оборудование	6	7	8

Мировой парк сельскохозяйственной робототехники претерпевает фазовый сдвиг. Если в 2023 году на рынке доминировали бортовые системы в 34% отрасли, то к 2025 году их доля сократится до 30%, уступив место более тяжелому наземному оборудованию. Рынок беспилотных аппаратов, вероятно, приближается к своему пику, и акцент смещается в сторону фундаментальной обработки почвы [85].

Сегмент тракторов становится новым ядром отрасли: доля самоуправляемых машин за тот же период увеличилась с четверти до трети от общего объема рынка с 25% до 35%. Это свидетельствует о быстром переходе от управляемых машин к полностью автономным решениям. Напротив, уборочные системы теряют позиции с 20% до 15%, сталкиваясь с чрезмерной сложностью алгоритмов и высокими затратами на внедрение. Роботы для защиты растений и посева демонстрируют здоровый консерватизм, сохраняя стабильную долю в 14-15% без каких-либо существенных колебаний. Автоматизация доения остается высокоспециализированной 6-8%, хотя наблюдается медленная тенденция к росту благодаря внедрению элементов точного молочного животноводства.

Российский сектор беспилотных аппаратов для сельского хозяйства также претерпевает изменения, так как в 2024 году в нем было представлено

33 игрока. В 2025 году геополитические факторы привели к уходу западных концернов, но образовавшуюся нишу заполняют местные разработчики, поддерживаемые грантами российского правительства. Аналитики оценивают ожидаемую капитализацию внутреннего рынка к концу десятилетия в 1,1-1,5 трлн рублей чистой выручки [86].

Экономическая целесообразность модели RaaS предполагает синергию. Бизнес должен приносить прибыль как интегратору, так и фермеру. Для поставщика расчет основан на износе оборудования, затратах на ремонт, ценах на компоненты, топливе, заработной плате полевой бригады и доставке оборудования. Сельскохозяйственное предприятие, с другой стороны, оценивает конечную чистую прибыль с гектара, сравнивая получение контракта на обслуживание с гипотетическими затратами на приобретение, обслуживание и модернизацию собственного парка техники [87].

Для проведения экономического моделирования установим временные рамки выполнения типичных операций на площади 10 гектаров для рассматриваемого беспилотного агрегата. В этом случае цикл обработки почвы занимает 12-20 часов, посев семян 5-8 часов, а сбор сена в тюки 3-5 часов.

В дополнение к прямым эксплуатационным расходам, при оценке владения оборудованием необходимо учитывать стоимость планового технического обслуживания. Это включает в себя циклическую замену технических жидкостей, обновление колёсной базы, пополнение запасов топлива и комплексное тестирование электронных компонентов. Отдельные статьи бюджета включают расходы на поддержание жизненного цикла литий-ионных аккумуляторов, адаптацию рабочей оснастки к сезонным потребностям и низкие транспортные расходы при перемещении станка [88].

Беспилотный мини-трактор может выполнять различные функции в зависимости от сезона и условий эксплуатации. Зимой его можно

использовать для уборки снега в городских условиях, а в теплую погоду для сельскохозяйственных работ на полях. Кроме того, оборудование может быть использовано в логистике для перевозки грузов. Такая универсальность помогает избежать простоев оборудования, значительно повышая его экономическую эффективность [89]. Характеристики беспилотной наземной системы указаны в таблице 4.4.

Таблица 4.4 – Характеристики проектируемой машины и её стоимость.

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
Стоимость	1 500 000 рублей

Стоит также обозначить менее очевидные отрицательные стороны как приобретения техники в собственность, так и её аренды. Если машина покупается для постоянного использования, необходимо принимать во внимание коэффициент использования по времени, значение которого не должно опускаться ниже 0,8 [90].

На сегодняшний день стоимость ежемесячного обслуживания гибридного привода в российских условиях оценивается примерно в 8500 рублей. Финансовый план владельца автономной платформы должен дополнительно включать компенсацию амортизации актива, таким образом при десятилетнем горизонте планирования и известной цене покупки конкретные затраты на амортизацию составляют 12 500 рублей в месяц.

Существенное влияние оказывает и человеческий фактор, а именно затраты на персонал. Требуются специалисты для технического обслуживания, организации выездов на места и логистики. При стандартном графике работы 5/2 зарплата каждого сотрудника составляет 70 000 рублей в месяц, а для обеспечения бесперебойной работы требуются три человека.

На сегодняшний день стоимость ежемесячного обслуживания гибридного привода в российских условиях оценивается примерно в 8500 рублей. Финансовый план владельца автономной платформы должен дополнительно включать компенсацию амортизации актива, таким образом при десятилетнем горизонте планирования и известной цене покупки конкретные затраты на амортизацию составляют 12 500 рублей в месяц.

Существенное влияние оказывает и человеческий фактор, а именно затраты на персонал. Требуются специалисты для технического обслуживания, организации выездов на места и логистики. При стандартном графике работы 5/2 зарплата каждого сотрудника составляет 70 000 рублей в месяц, а для обеспечения бесперебойной работы требуются три человека.

Масштабированию бизнес-модели RaaS в России препятствует ряд критических факторов. Сложность конструкции современных сельскохозяйственных роботов и алгоритмическая сложность их автопилотов требуют постоянной доработки программного обеспечения и строгого соблюдения планового технического обслуживания. Эти задачи требуют доступа к квалифицированному персоналу и специализированному оборудованию, включая инструменты для разборки трансмиссии, интерфейсы для загрузки обновленного кода и системы выравнивания датчиков компьютерного зрения [91].

Выбор между покупкой и арендой техники не столь однозначен, как может показаться на первый взгляд, и требует более глубокого

экономического анализа с учётом конкретных условий эксплуатации, приведённого в таблице 4.5.

Таблица 4.5 – Экономическая сводка итоговых значений расходов и прибыли

Показатель ежемесячный	Значение
Стоимость техники	1.5 млн рублей
Ежемесячная амортизация	12 500 рублей
Обслуживание и ремонт	8 500 рублей
Топливо и материалы	5 000 рублей
Зарплаты	210 000 рублей
Логистические расходы	10 000 рублей
Общие ежемесячные расходы	246 000 рублей
Арендная ставка	3 500 рублей в час
Загруженность	160 часов в месяц
Ежемесячный доход	560 000 рублей
Чистая прибыль	314 000 рублей

Согласно таблице, при ставке 3500 рублей в час итоговая прибыль достигает 314 000 рублей.

Несмотря на то, что программы государственной поддержки способствуют внедрению цифровых инструментов, фактический уровень роботизации на российских полях по-прежнему значительно ниже, чем в ведущих сельскохозяйственных странах. Ключевым препятствием является

отсутствие стандартизированных протоколов ввода в эксплуатацию беспилотных аппаратов. Именно эта неопределенность в регулировании препятствует развитию полноценного рынка аутсорсинга полевых работ. Особую проблему представляет ограниченный доступ к высокоскоростному интернету и спутниковой навигации в отдаленных сельских районах. Нестабильное подключение напрямую влияет на точность автономного оборудования и возможность использования современных датчиков и облачных платформ управления.

Существующая нормативная база также требует существенного пересмотра, ввиду отсутствия чётких правил эксплуатации автономных систем, механизмов страхования и сертификации роботизированных систем в сельскохозяйственном секторе. Ответственность за действия автономных машин во время сбоев или аварий не определена [92].

Сельскохозяйственным предприятиям, планирующим внедрение RaaS, рекомендуется провести аудит внутренних процессов и определить операции, наиболее подходящие для автоматизации, при выборе поставщика тщательно изучить условия соглашения об уровне обслуживания, указав параметры безотказной работы, время реагирования на инциденты, процедуры обновления и прозрачность ценообразования и начать с пилотных проектов в ограниченные области или отдельные технологические операции для оценки экономической эффективности и отработки взаимодействия с поставщиком услуг, что позволит свести к минимуму риски до полномасштабного внедрения.

4.3. Экологические преимущества

Шумовое загрязнение – это превышение естественного фонового уровня шума или аномальное изменение его характеристик, а именно интенсивности и частотного спектра. В транспортных средствах шум создаётся множеством источников и распространяется по воздуху и через

конструктивные элементы. Основными источниками являются силовой агрегат и трансмиссия, взаимодействие шин с дорожным покрытием, аэродинамические потоки вокруг кузова транспортного средства, вибрации конструктивных элементов и работа вспомогательных систем, таких как вентиляция и кондиционирование воздуха [93].

Воздействие шума на человека хорошо изучено. Длительное воздействие повышенного фонового шума вызывает повышенную утомляемость и нарушение концентрации внимания, что увеличивает вероятность развитию расстройств нервной системы, сердечно-сосудистых заболеваний, а при уровне шума выше 85 дБ – потере слуха.

Также существенны эксплуатационные преимущества высококачественной звукоизоляции. Снижение вибрационных и акустических нагрузок на кузов платформы повышает долговечность конструктивных элементов и уменьшает износ уплотнений, крепежных элементов и других деталей, подверженных вибрации. Помимо этого, улучшается управляемость благодаря более информативной обратной связи с дорогой, повышается общая надежность машины и снижаются затраты на техническое обслуживание [94].

Экономическая целесообразность использования шумоизоляции определяется несколькими факторами. Во-первых, транспортные средства с улучшенными акустическими характеристиками имеют более высокую рыночную стоимость и привлекательны для покупателей. Во-вторых, снижение уровня шума позволяет производителям соблюдать всё более строгие требования к охране окружающей среды и технике безопасности, что особенно важно при выходе на зарубежные рынки. В-третьих, использование современных звукоизоляционных материалов снижает стоимость модификаций транспортных средств на более поздних стадиях производства [95, 96].

Для транспортных средств установлен норматив по допустимой величине внешнего шумового фона. Для ТС данный показатель

регламентируется ГОСТ Р 52231-2004 (легковые, грузовые машины и автобусы) и ГОСТ 33678-2015 (тракторы).

Для беспилотных систем на сегодняшний день отсутствуют специальные документы, регламентирующие величину акустического излучения беспилотных наземных машин. Это означает, что испытания по шумам могут проводиться по ГОСТ, для аналогичного класса техники, управляемых водителем.

Уровень шума безопасного для работника регламентируется СанПиН 1.2.3685-21. Для использования беспилотных машин близ жилых построек, складов, производств, уровень шума в том числе будет регулироваться и этими документами. ТС без изделий шумоизоляции могут не пройти установленные нормы по всем вышеупомянутым документам.

Проектирование систем шумоизоляции требует комплексного подхода и включает в себя несколько ключевых этапов. Данные этапы подразумевают определение источников шума и путей его распространения в конкретном транспортном средстве, выбор оптимальных материалов и их комбинаций для различных областей кузова, определение необходимого количества материала на основе целевых показателей шума, компьютерное моделирование акустических процессов для оптимизации конструкции, проведение полномасштабных испытаний и корректировка конструкции на основе их результатов.

Математическое моделирование приобретает всё большее значение при разработке шумоизоляции. Численные методы позволяют прогнозировать эффективность различных материалов перед производством, оптимизировать размещение и толщину изоляционных слоёв, сократить объем дорогостоящих физических испытаний, а также ускорить процесс проектирования и снизить связанные с этим затраты [97].

Перспективными направлениями развития шумоизоляции является внедрение умных материалов с адаптивными свойствами, способных изменять жесткость и демпфирующие характеристики в зависимости от

условий, использование систем активного шумоподавления, основанных на интерференции звуковых волн, интеграция решений по шумоизоляции на ранних стадиях проектирования с использованием BIM-технологий, создание экологически чистых, биоразлагаемых материалов, а также оптимизация конструкций кузова с учетом акустики, например, за счёт аэродинамических форм и уменьшения количества стыков и швов [98, 99].

4.4. Перспективы внедрения

Поскольку Россия придерживается стратегических приоритетов развития своего агропромышленного комплекса и добивается технологической независимости, внедрение беспилотных наземных платформ в сельскохозяйственное производство приобретает особое значение. Системный анализ институциональной среды и отраслевых тенденций выявляет несколько перспективных областей применения таких технических решений, различающихся по своему функциональному назначению, уровню технологической готовности и характеру междисциплинарного сотрудничества [100, 101]. На рисунке 4.1 изображены графики распределения роботизированных систем в мире.

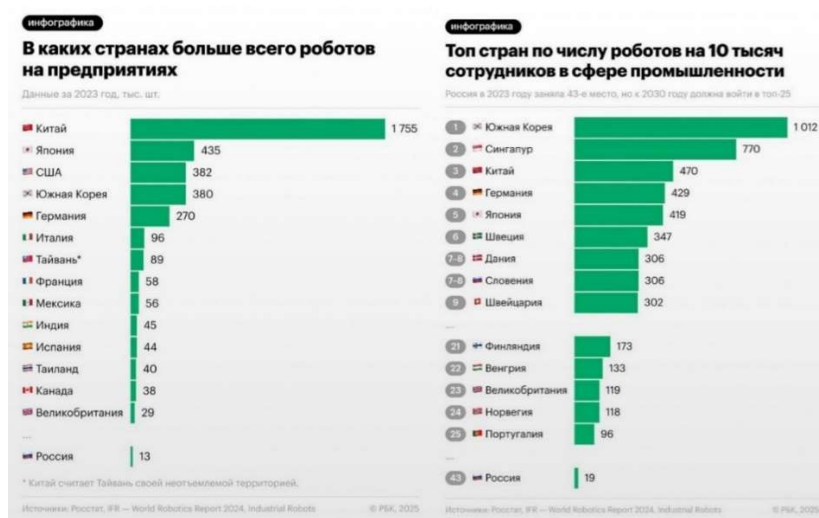


Рисунок 4.1 – Инфографики роботизации по миру

Представленные графики показывают, что Россия находится на ранних стадиях внедрения робототехники в производственные процессы, и ожидается быстрый рост. К дополнительным факторам, ускоряющим этот процесс, относятся демографическая ситуация и растущий дефицит рабочей силы в различных отраслях [102, 103].

Изучение современного научно-технологического ландшафта показывает, что несколько ключевых институциональных образований – Федеральное государственное бюджетное учреждение «НАМИ», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Российский государственный аграрный университет – Московская сельскохозяйственная академия имени К.А. Тимирязева» и ООО «Когнитивный пилот» – обладают дифференцированными компетенциями. Это требует рассмотрения возможностей применения соответствующих методов проектирования с учетом функциональной специфики этих организаций и их потенциала для синергетического взаимодействия [104]. В рамках диссертационного исследования целесообразно рассматривать ФГУП «НАМИ» как системообразующий элемент инженерной, технической и испытательной инфраструктуры. Эмпирическое подтверждение гипотез, включая моделирование сложных эксплуатационных сценариев, в частности, передвижение по местности с нелинейными характеристиками, динамическое взаимодействие с навесным оборудованием, обеспечивает переход от концептуальных разработок к практико-ориентированным решениям. Перспективными направлениями деятельности ФГУП «НАМИ» в этой предметной области являются: разработка унифицированных платформ, изначально созданных с учетом требований к интеграции автономных систем управления, формирование стандартизированных методов тестирования высокоавтоматизированных машинно-тракторных агрегатов, внедрение мультисенсорных систем,

включая компьютерное зрение и местные навигационные технологии, способные функционировать при ограниченной доступности спутниковых сигналов. Реализация совместных проектов с производителями сельскохозяйственной техники, направленных на адаптацию производственных моделей к автономной работе [105, 106].

Российский государственный аграрный университет имени К. А. Тимирязева – Московская сельскохозяйственная академия, миссия которой в первую очередь связана с кадровым обеспечением и агрономическими знаниями, может внести значительный вклад в развитие этого направления. Перспективные направления, представляющие интерес для диссертации, включают разработку образовательных программ, сочетающих инженерные, технические и агробиологические дисциплины, которые позволят выпускникам проектировать оборудование с учетом агрономических ограничений и требований сохранения плодородия почв, реализацию совместных проектов с промышленными партнерами, включая создание цифровых двойников агроландшафтов для прогнозного моделирования беспилотных систем, а также фундаментальные и прикладные исследования в области точного земледелия, включающие сочетание наземной робототехники и беспилотных аппаратов для мультиспектрального мониторинга сельскохозяйственных культур. Разработка гибридных технических решений с оптимизацией силовых установок и систем передачи для упрощения последующей автоматизации [107, 108].

По итогу проведенного анализа, были заложены основные этапы внедрения разработок данной работы в производства, ВУЗы, лаборатории и исследовательские центры. Результаты были сформулированы, и сведены для формулирования этапов внедрения на обозначенные предприятия в соответствии с таблицей 4.6.

Таблица 4.6 – Этапы внедрения разработок на производства

Этап	Длительность	Содержание
1. Аудиторный анализ	2-3 недели	Замеры шума на действующих образцах, выявление критических узлов
2. Проектирование шумоизоляции	1-2 месяца	Разработка 3-D моделей с учётом новых материалов, определение акустических характеристик деталей
3. Изготовление прототипов	1 месяц	Производство опытных образцов с выбранными материалами и геометрическими параметрами
4. Лабораторные испытания	2-3 недели	Сравнение уровней шума до и после, измерение внутренних значений температур
5. Полевые испытания	1 месяц	Эксплуатация в реальных сценариях (поле, улица, производство), сбор отзывов пользователей
6. Доработка и стандартизация	1-2 месяца	Оптимизация технологии, утверждение конструкторской документации, подготовка рекомендаций для серийного производства
7. Внедрение в серию	Постоянно	Интеграция в сборочные линии, контроль уровня шума и значений температур

4.5. Выводы по главе IV

В четвёртой главе диссертационной работы был проведён экономический анализ и определены перспективы внедрения проекта малошумной модульной беспилотной платформы для сельскохозяйственных работ. На основе данного анализа сформулированы следующие выводы.

Стоимость производства беспилотного трактора составит около 2,6 миллиона рублей. Однако, с учётом модульности и платформенности

конструкции, итоговое значение стоимости единицы такого типа машины может быть снижена на 20-30 %, что составляет 2,0-2,4 миллиона рублей.

Анализ коммерциализации показал, что для малых и средних крестьянско-фермерских хозяйств, модель RaaS является наиболее оправданной с экономической точки зрения, а также имеет ряд преимуществ по сравнению с приобретением сельскохозяйственного оборудования и техники. Модель RaaS позволяет перейти от капиталоемких инвестиций к операционным расходам, снижает уровень необходимых вложений для приобретения необходимых в сельскохозяйственных работах тракторов, навесных и прицепных орудий.

Расчёт ставки работы роботизированного комплекса в поле показал значение в 3500 руб./ч при месячной загрузке в 160 часов и прибыли в размере 314000 рублей на единицу. Это подтверждает экономическую целесообразность применения данной модели.

Также обосновано применение акустических материалов и изделий в составе конструкции беспилотной модульной платформы. Согласно действующим нормативам, а именно ГОСТ 33678-2015 (тракторы) и СанПиН 1.2.3685-21, установлены нормы шума не более 85 дБА. Из анализа акустического фона, создаваемого двигателями и их вторичными системами, было установлено, что без использования деталей термошумоизоляции данные системы не проходят сертификационных испытаний. В связи с этим, разработан план внедрения деталей ТШИ на действующие серийные производства, а также проведены работы по разработкам акустических изделий для сельскохозяйственного беспилотного трактора «Полесад-2.0».

Был проведён анализ перспективных организаций, в которые могут быть внедрены методики проектирования деталей термошумоизоляции для беспилотных систем, описанные в данной работе. В этот перечень входит: ФГУП «НАМИ», Московская сельскохозяйственная академия имени К.А. Тимирязева и ООО «Когнитивный пилот».

Результаты анализа, проведённого в четвёртой главе подтверждают технологическую, экономическую и нормативную целесообразность применения разработанных в ходе проведения исследования методик проектирования деталей термошумоизоляции, рациональных предложений по вопросам методов взаимодействия между фермерами и производителями беспилотных модульных платформ для сельскохозяйственных работ.

Заключение

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 малощумной модульной платформы. Выявлены основные источники шума в системах ТС в пределах 65-93 дБА. Проведены испытания кузова ТС 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 ВФМ в составе звукоизолирующих деталей превосходит демпфирующий слой из ППУ 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 °C до 76,3 °C.

5. Модель предоставления услуг RaaS продемонстрировала свою целесообразность. При сдаче в аренду беспилотного трактора по ставке 3 500 руб/ч или 5 600 руб/га 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.

Список литературы

1. Федеральная служба государственной статистики (Росстат). Социально-экономическое положение России, январь–октябрь 2024 года. – М., 2024. – № 10 (67). – 98 с.
2. Малое и среднее предпринимательство в России. 2024 : статистический сборник. – М. : Росстат, 2024. – 97 с.
3. Меджидов З.У. Методологические основы цифровизации агропромышленного комплекса с использованием механизма государственно-частного партнерства / З.У. Меджидов, А.Г. Гаджиева, А.А. Баширова // АПК: Экономика, управление. – 2024. – № 9. – С. 47–55.
4. Пивоварова О.В. Цифровая экосистема агропромышленного комплекса Российской Федерации: возможности и ограничения имплементации / О.В. Пивоварова, С.Л. Орлов, А.А. Хачатрян // Аграрная наука. – 2025. – Т. 1, № 1. – С. 140–153.
5. Анисимова В.Ю. Влияние цифровизации на трансформацию цепочек добавленной стоимости в агропромышленном комплексе регионов // АПК: Экономика, управление. – 2025. – № 4. – С. 3–9.
6. Байрамов Х.А. Цифровизация сельского хозяйства в России: перспективы и проблемы // Современные проблемы управления в условиях цифровизации : материалы VII Международной научно-практической конференции (Саратов, 21 ноября 2020 г.). – Саратов : Саратовский социально-экономический институт (филиал) РЭУ им. Г.В. Плеханова, 2020. – С. 5–9.
7. Труба А.С. Научно-технический прогресс и его влияние на формирование трудовых ресурсов сельского хозяйства / А.С. Труба, Е.Г. Скворцова // Экономика сельского хозяйства России. – 2020. – № 2. – С. 42–48.
8. Плахин А.Е. Проблемы становления цифровой модели в сельском хозяйстве / А.Е. Плахин, Е.С. Огородникова, К.В. Ростовцев //

Аграрная наука. – 2024. – Т. 1, № 8. – С. 188–193.

9. Киварина М.В. Цифровые решения в АПК: новые возможности регионов / М.В. Киварина, Н.Н. Юрина // АПК: Экономика, управление. – 2024. – № 8. – С. 34–42.

10. Горелова Д.А. Анализ проблемы применения роботов в сельскохозяйственном производстве // Молодежь в науке: Новые аргументы : сборник научных работ V Международной молодежной конференции. – Липецк, 2020. – С. 12–14.

11. Головина С.Г. Продовольственная безопасность: угрозы, вызовы, возможности / С.Г. Головина, А.Р. Кузнецова, М.Ф. Хайруллин // Аграрная наука. – 2024. – № 12. – С. 173–181.

12. Продажи сельскохозяйственной техники в России сократились на 21% [Электронный ресурс] // Ведомости. – 2026. – 28 января. – URL: <https://www.vedomosti.ru/business/articles/2026/01/28/1172202-prodazhi-selskohozyaistvennoi-tehniki-sokratilis> (дата обращения: 27.03.2026).

13. На прямую поддержку роботизации в АПК РФ в 2026 году выделяют 34,4 млрд руб. [Электронный ресурс] // ФГБУ «Центр Агроаналитики». – 2026. – 4 февраля. – URL: <https://specagro.ru/news/202602/na-pryamuyu-podderzhku-robotizacii-v-apk-rf-v-2026-godu-vydelyat-344-mlrd-rub> (дата обращения: 14.04.2026).

14. AgriEcomission. Точное земледелие: состояние и перспективы [Электронный ресурс]. – URL: <https://agriecomission.com/base/tochnoe-zemledelie-sostoyanie-i-perspektivy> (дата обращения: 08.11.2025).

15. Корпорация Роботов. Применение роботов в сельском хозяйстве [Электронный ресурс]. – URL: <https://корпорацияроботов.рф/primenenie-robotov-v-selskom-hozyaystve> (дата обращения: 10.11.2025).

16. Naukaru. Современные тенденции внедрения технологий точного земледелия в России [Электронный ресурс]. –

URL: <https://naukaru.ru/ru/nauka/article/84567/view> (дата обращения: 09.11.2025).

17. FoodSmi. Точное земледелие в АПК: растёт потребность в новых профессиях [Электронный ресурс]. – URL: <https://foodsmi.com/statistika-i-issledovaniya-tochnoe-zemledelie-v-apk-rastet-potrebnost-v-novykh-professiyakh/> (дата обращения: 09.11.2025).

18. Российские обзоры и статистика цифровизации АПК. Отчёт портала Naukaru по внедрению технологий точного земледелия, 2024 [Электронный ресурс]. – URL: <https://naukaru.ru> (дата обращения: 09.11.2025).

19. World Bank. Digital Agriculture in Russia: Opportunities and Challenges [Электронный ресурс]. – Washington, D.C. : World Bank Group, 2018. – 58 р. – URL: <https://documents.worldbank.org/curated/en/174171539109767548/pdf/126745-P164457-RussiaDigitalAgreport.pdf> (дата обращения: 09.11.2025).

20. Grand View Research. Smart Agriculture Market Size, Share & Trends Analysis Report, 2024–2030 [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.grandviewresearch.com/horizon/outlook/smart-agriculture-market/russia> (дата обращения: 10.11.2025).

21. Next Move Strategy Consulting. Agricultural Robots Market Report, 2024–2030 [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.nextmsc.com/report/agricultural-robots-market> (дата обращения: 10.11.2025).

22. Минцифры России. Развитие цифровых технологий в агропромышленном комплексе РФ [Электронный ресурс]. – URL: <https://digital.gov.ru> (дата обращения: 10.11.2025).

23. Лопота А.В. О вхождении Российской Федерации к 2030 году в число 25 ведущих стран мира по показателю плотности роботизации / А.В. Лопота [и др.] // Робототехника и техническая кибернетика. – Т. 13. – № 3. – Санкт-Петербург : ЦНИИ РТК. – 2025. – С. 165-173. – EDN:

HGOOUF.

24. Nazarov D. Drones in agriculture: analysis of different countries / D. Nazarov, A. Nazarov, E. Kulikova // BIO Web of Conferences. – 2023. – Vol. 67. – Art. 02029.

25. ГОСТ Р 7.0.100-2018. Библиографическая запись. Библиографическое описание. Общие требования и правила составления. – Введ. 2019-07-01. – М. : Стандартинформ, 2018. – 94 с.

26. Поддубко С.Н. Опыт создания робототехнического комплекса на базе мини-трактора «Беларус 132Н» / С.Н. Поддубко, А.В. Белевич, В.И. Луцкий // Искусственный интеллект. Интеллектуальные транспортные системы : материалы Международной научно-технической конференции (Брест, 25–28 мая 2016 г.). – Брест : БрГТУ, 2016. – С. 69–73.

27. Старостин И.А. Оценка производительности беспилотных машинно-тракторных агрегатов / И.А. Старостин, С.А. Давыдова, А.В. Ещин, Т.З. Годжаев // Аграрная наука Евро-Северо-Востока. – 2024. – Т. 25, № 3. – С. 483–494. – DOI: 10.30766/2072-9081.2024.25.3.483-494.

28. Левенков Я.Ю., Чичекин И.В., Вдовин Д.С., Нырков Ф.А., Душкин М.А., Попова К.В. Проектирование направляющего аппарата подвески из алюминиевых сплавов для многоцелевого беспилотного транспортно-технологического средства с использованием метода топологической оптимизации // Труды НАМИ. – 2023. – № 2 (293). – С. 42–59. DOI: 10.51187/0135-3152-2023-2-42-59.

29. Ахметова, С.Т. Предпосылки создания виртуальной 3D-модели беспилотного универсального пропашного трактора / С.Т. Ахметова [и др.] // Academic Scientific Journal of Computer Science. – 2025. – № 2. – С. 33–49.

30. Галиуллин И.Г. Моделирование и полунатурные испытания системы беспилотного трактора тяжёлого класса / И.Г. Галиуллин, Д.Е. Чикрин, Д.М. Пашин, А.Ф. Фахрутдинов // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. – 2024. – № 5. – С. 34–42.

31. Иванов А.С. Состояние и перспективы беспилотных сельскохозяйственных тракторов, работающих на возобновляемых источниках энергии // Энергообеспечение и энергосбережение в сельском хозяйстве. – 2023. – № 3. – С. 89–96.
32. Теринов, Н.Н. Технологические схемы использования мини-тракторов на рубках ухода за лесом / Н.Н. Теринов, Э.Ф. Герц, А.В. Мехренцев, С.В. Залесов, Г.Г. Терехов, О.В. Толкач // Resources and Technology. – 2023. – № 4. – DOI: 10.15393/j2.art.2023.7263.
33. Плахов С.А. Моделирование параметров силового агрегата электрического мини-трактора / С.А. Плахов, В.А. Козлов // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2025. – Вып. 5. – С. 319–320.
34. Серебренников А.В. Выбор оптимальной конструкции малогабаритного лесохозяйственного трактора // Механизация и электрификация лесного хозяйства. – 2022. – № 4 (4). – С. 29–33.
35. Беспилотный трактор для сельского хозяйства : отчет о НИР (заключительный) / СПбПУ ; руководитель А.В. Чемоданов. – СПб., 2024. – 78 с.
36. Беспилотная универсальная сельскохозяйственная платформа : патент 2828891 Рос. Федерация. – № 2024105678 ; заявл. 04.03.2024 ; опубл. 23.10.2024, Бюл. № 30. – 14 с.
37. Беспилотный трактор «Беларус» : отчет о НИР (заключительный) / БНТУ ; руководитель В.Н. Дашков. – Минск, 2024. – 62 с.
38. New Holland T4 Electric Power: Autonomous Electric Tractor Prototype [Электронный ресурс] // CNH Industrial Press Release. – 2022. – 19 Dec. – URL: <https://www.cnhindustrial.com> (дата обращения: 17.06.2026).
39. Monarch Electric Autonomous Tractor: Technical Specifications // Agrability Technology Review. – 2026. – 24 Feb. – 6 p.
40. Autonomous Electric Tractor : патент US20240217597A1 США. – заявл. 05.01.2022 ; опубл. 04.07.2024. – 35 с.

41. CNH Industrial's Autonomous Tractor Patents & Innovation [Электронный ресурс] // Insights GreyB. – 2024. – 14 June. – URL: <https://insights.greyb.com> (дата обращения: 17.06.2026).
42. Rossi S. Additive manufacturing technologies: 3D printing in organic synthesis / S. Rossi, A. Puglisi, M. Benaglia // ChemCatChem. – 2018. – Vol. 10. – P. 1512–1525.
43. Мигущенко Р.П. Перспективность FDM технологий в 3D печати // Вестник Национального технического университета «ХПИ». – 2016. – № 18 (1190). – С. 148–152.
44. Sleptsov V.V. Electrosark dispersion in nanopowder production for additive technologies / V.V. Sleptsov, A.V. Savkin, E.A. Trunova [et al.] // Russian Engineering Research. – 2019. – Vol. 39. – P. 133–136.
45. Лучников А.И. Современные тенденции применения БПЛА в исследовании природных сред. Анализ зарубежных публикаций // Гидрометеорология и экология. – 2025. – № 80. – С. 530–546.
46. Федосеева Н.А. Перспективные области применения беспилотных летательных аппаратов / Н.А. Федосеева, М.В. Загвоздкин // Научный журнал. – 2017. – № 9. – С. 26–29.
47. Лавров А.В. Методы и средства мониторинга характеристик БПЛА в реальном времени / А.В. Лавров, Д.С. Власов // Технологии инженерных и информационных систем. – 2019. – № 4. – С. 57–66.
48. Маркелов В.В. Системный анализ процесса управления качеством изделий электронной техники / В.В. Маркелов, А.И. Власов, Э.Н. Камышная // Надежность и качество сложных систем. – 2014. – № 1. – С. 35–42.
49. Власов А.И. Методика профилизации беспилотных летательных аппаратов на основе аддитивных технологий / А.И. Власов, А.В. Гараев, В.О. Захарова, К.В. Селиванов, Д.Д. Чернышов // Надежность и качество сложных систем. – 2023. – № 4. – С. 95–110.
50. Уланов, А.О. PETG- и PLA-филаменты и испытания физико-

механических характеристик изделий из них / А.О. Уланов, Я.Г. Иньшина // Молодой учёный. – 2020. – № 52 (342). – С. 98–101 [Электронный ресурс]. URL: <https://moluch.ru/archive/342/77092> (дата обращения: 07.09.2026).

51. Грибовский А.А. Аддитивные технологии и быстрое производство в приборостроении : учебное пособие / А.А. Грибовский, А.И. Щеколдин. – СПб. : Университет ИТМО, 2018. – 48 с.

52. ISO 6721. Пластмассы. Определение механических свойств при динамическом нагружении. – [Б. м. : б. и.], [б. г.].

53. DIN 53440. Пластмассы и слоистые вибропрочные системы. – [Б. м. : б. и.], [б. г.].

54. ГОСТ Р 56803-2015. Пластмассы. Определение механических свойств при динамическом нагружении. – Введ. 2016-01-01. – М. : Стандартинформ, 2015. – 12 с.

55. Круголапов В.Е. Метод улучшения виброакустических характеристик кузова легкового автомобиля применением вибродемпфирующих материалов : диссертация ... кандидата технических наук. – Москва: Московский государственный технический университет «МАМИ», 2006. – 165 с.

56. Фесина М.И. Автомобильные акустические материалы. Проектирование и исследование низкошумных конструкций автотранспортных средств : монография / М.И. Фесина, А.В. Краснов, Л.Н. Горина, Л.А. Паньков. – Тольятти : Тольяттинский государственный университет, 2010. – Ч. 1. – 220 с.

57. Елесин А.Н. Методика и результаты оценки источников шума автомобиля с учетом его положения на измерительном участке / А.Н. Елесин, Ю.В. Галевко, Т.В. Иванова, В.П. Тюрин // Вектор науки Тольяттинского государственного университета. – 2011. – № 2 (16). – С. 108–112.

58. Воробьева Л.С. Определение акустических характеристик

волоконистых звукопоглощающих материалов / Л.С. Воробьева, А.И. Комкин, Г.Г. Надарейшвили, С.И. Юдин // Защита от повышенного шума и вибрации : сборник докладов Всероссийской научно-практической конференции с международным участием / под редакцией Н.И. Иванова. – 2013. – С. 489–494.

59. Наумов А.В. Совершенствование средств повышения экологической безопасности тракторов путем снижения уровня шума (на примере трактора «Кировец») : диссертация ... кандидата технических наук. – Саратов, 2011. – 165 с.

60. Реунов С.В. Снижение вибронагруженности и структурного шума каркасных кабин тракторов : диссертация ... кандидата технических наук. – Волгоград, 2001. – 142 с.

61. Разумовский М.А. Основы технической акустики и методы уменьшения шума колесных тракторов : диссертация ... доктора технических наук. – Минск, 1987. – 310 с.

62. Кузнецов А.Н. Разработка системы активного шумоподавления в глушителях тракторов сельскохозяйственного назначения : диссертация ... кандидата технических наук. – Воронеж, 2022. – 145 с.

63. Дробаха М.Н. Снижение шума транспортных машин глушителями (на примере трактора МТЗ-82) : автореферат диссертации ... кандидата технических наук. – Ростов-на-Дону, 2022. – 24 с.

64. Малкин И.В. Разработка средств снижения шумовых излучений системы газообмена двигателя легкового автомобиля : автореферат диссертации ... кандидата технических наук. – М., 2014. – 24 с.

65. Brüel & Kjær Application Notes. Measurement of the Complex Modulus of Elasticity: A Brief Survey. – [Б. м. : б. и.], [б. г.].

66. Technical Review No. 2 1970. To Advance Techniques in Acoustical, Electrical, and Mechanical Measurement. – [Б. м.] : Brüel & Kjær,

1970.

67. Methodology for Reducing Engine-Radiated Noise in Tractors // SAE Technical Paper. – 2026. – № 2026-26-0068. – 8 p.

68. Tractor Cabin Structure Borne Noise Reduction in the Virtual Environment // SAE Technical Paper. – 2026. – № 2026-26-0101. – 10 p.

69. NVH Refinement on the Agriculture Tractor using Coupled Test and Simulation Approach // SAE Technical Paper. – 2026. – № 2026-26-0316. – 9 p.

70. Модульный принцип конструирования глушителей шума тракторов / [авт. кол.] // Репозиторий Белорусского государственного аграрного технического университета. – 2024. – С. 45–52.

71. Shekh M. Optimization of UAV propeller performance through design, development, and testing of diverse propeller geometries / M. Shekh, S. Rani // Journal of Mechanical Engineering Science. – 2026. – Vol. 240, № 2. – P. 215–230.

72. Lightweight Design of Tractor Bodies Based on Damped Vibration Damping Materials // Journal of Agricultural Engineering. – 2025. – Vol. 56, № 1. – P. 88–95.

73. Снижение шума в кабинах машинистов при проектировании, ремонте и модернизации : монография / под редакцией В.И. Прокопенко. – Ростов-на-Дону : Донской ГАУ, 2020. – 220 с.

74. Проектирование тракторов и автомобилей. Сцепление : методические указания к выполнению курсового проекта / составитель А.Б. Иванов. – пос. Персиановский : Донской ГАУ, 2022. – 45 с.

75. Малошумный тяговый электродвигатель : патент 2021101323 Рос. Федерация. – заявл. 22.01.2021 ; опубл. 27.07.2022, Бюл. № 21. – 12 с.

76. Муравьева А.М. Использование композиционных материалов для повышения тепло-звукоизоляции автомобилей / А.М. Муравьева, Н.В. Перевозчикова // Чтения академика В.Н. Болтинского : сборник статей. – М. : РГАУ-МСХА им. К.А. Тимирязева, 2024. – Ч. 2. – С. 51–55.

77. Гаркуша А.В. К вопросу снижения шума в кабине трактора / А.В. Гаркуша, Т.В. Севастюк, К.В. Гаркуша, Л.Е. Процко, А.Н. Гурина // Современные проблемы и пути развития технического сервиса в АПК : материалы Международной научно-практической конференции (Минск, 5–6 июня 2024 г.). – Минск : БГАТУ, 2024. – С. 281–283.

78. Галевко В.В. Направления снижения шума от автомобильного транспорта в Европейской Экономической Комиссии / В.В. Галевко, А.И. Щепкин, М.И. Фесина // II Всероссийская научно-практическая конференция с международным участием «Защита населения от повышенного шумового воздействия» (Санкт-Петербург, 17–19 марта 2009 г.). – СПб., 2009. – С. 200–206.

79. Васильев Б.С. Методы снижения шума двигателей [Электронный ресурс] // Автомобиль. Дорога. Инфраструктура : электронный научный журнал. – 2015. – № 4(6). – URL: <http://www.adijournal.ru> (дата обращения: 05.06.2026).

80. Швецов А.В. Методы снижения шума автотранспорта / А.В. Швецов, А.В. Дороничев, Н.А. Кузьмина // International Journal of Advanced Studies: Transport and Information Technologies. – 2021. – № 2. – С. 115–124.

81. Прокопович Е.А. Оценка эффективности снижения внутреннего шума в легковом автомобиле с помощью звукоизолирующих, звукопоглощающих и вибропоглощающих материалов / Е.А. Прокопович, И.В. Прокопович // Юный учёный. – 2015. – № 2. – С. 164–167.

82. Фанина Е.А. Разработка функциональных композиционных материалов для улучшения звукоизоляционных характеристик транспортных средств [Электронный ресурс] // Вестник ХНАДУ. – 2012. – Вып. 59. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/razrabotka-funktsionalnyh-kompozitsionnyh-materialov-dlya-uluchsheniya-zvukoizolyatsionnyh-harakteristik-transportnyh-sredstv> (дата обращения: 05.06.2026).

83. 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.

84. Малкин И.В. 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.

85. Звукоизоляция и звукопоглощение: в чём разница? [Электронный ресурс]. – URL: <https://stp-russia.ru/blog/zvukoizolyatsiya-i-zvukopogloshchenie-v-chyem-raznitsa> (дата обращения: 18.05.2026).

86. ГОСТ 23499-2009. Материалы и изделия звукоизоляционные и звукопоглощающие строительные. Общие технические условия. – Введ. 2010-07-01. – М. : Стандартиформ, 2009. – 16 с.

87. ГОСТ 33678-2015. Тракторы сельскохозяйственные и лесохозяйственные. Внешний шум. Нормы и методы оценки. – Введ. 2016-07-01. – М. : Стандартиформ, 2015. – 12 с.

88. ГОСТ Р 51920-2002 (ИСО 5131:1996). Тракторы сельскохозяйственные и лесохозяйственные. Внешний шум. Нормы и методы оценки. – Введ. 2003-01-01. – М. : Госстандарт России, 2002. – 8 с.

89. ГОСТ Р 53490-2009. Тракторы сельскохозяйственные. Шум на рабочем месте оператора. Методы и условия измерений. – Введ. 2011-01-01. – М. : Стандартиформ, 2010. – 12 с.

90. ГОСТ 12.1.003-83. ССБТ. Шум. Общие требования безопасности. – Введ. 1984-07-01. – М. : Изд-во стандартов, 1983. – 8 с.

91. ГОСТ 12.2.019-2005. ССБТ. Тракторы сельскохозяйственные и лесохозяйственные. Требования безопасности при эксплуатации. – Введ. 2006-07-01. – М. : Стандартиформ, 2006. – 16 с.

92. ГОСТ 31326-2006 (ИСО 9612:1997). Шум. Измерение шума на рабочих местах для оценки воздействия на органы слуха. Аудиометрический метод. – Введ. 2008-07-01. – М. : Стандартиформ,

2007. – 20 с.

93. ГОСТ Р 53187-2008 (ИСО 1996-1:2003). Шум. Акустический мониторинг городских территорий. – Введ. 2010-01-01. – М. : Стандартиформ, 2009. – 28 с.

94. ИСО 10844:2011. Акустика. Требования к испытательным путям для измерения уровня шума, производимого дорожным транспортом. – [Б. м.] : ISO, 2011.

95. ISO Standard 140/III. Материалы звукоизоляционные и звукопоглощающие. Методы испытаний. – [Б. м. : б. и.], [б. г.].

96. SAE J1400. Laboratory Measurement of the Airborne Sound Barrier Performance of Automotive Materials and Assemblies. – [Б. м.] : SAE International, [б. г.].

97. ГОСТ 31704-2011 (EN ISO 354:2003). Материалы звукопоглощающие. Метод измерения звукопоглощения в реверберационной камере. – Введ. 2013-01-01. – М. : Стандартиформ, 2012. – 20 с.

98. ISO 354:2003. Acoustics – Measurement of sound absorption in a reverberation room. – [Б. м.] : International Organization for Standardization, 2003.

99. ГОСТ 16297-79. Материалы звукоизоляционные и звукопоглощающие. Методы испытаний. – Введ. 1980-07-01. – М. : Изд-во стандартов, 1980. – 24 с.

100. A North European Tractor Cab / [авт. кол.] // SAE Technical Paper. – 2025. – № 2025-01-0792. – 8 p.

101. Multi-channel Active Noise Control System for Tractor Cabin: Preliminary Study / [авт. кол.] // Proceedings of the International Conference on Noise and Vibration Engineering (ISMA). – Leuven, Belgium, 2024. – P. 2345–2356.

102. Electric Tractors: Noise Reduction and Environmental Benefits / [авт. кол.] // BIS Research Market Analysis. – 2024. – 25 Oct. – 45 p.

103. Филь О.А. Обоснование технического обеспечения строительства при определении себестоимости работы строительной техники // Современные тенденции в экономике и управлении: новый взгляд. – 2015. – № 37-2. – С. 151–154.
104. Овчинникова Е.М. Особенности определения доходов и расходов от предоставления в аренду специализированной техники // Ученые записки Российской академии предпринимательства. – 2024. – Т. 23, № 4. – С. 9–13.
105. Дружиловская Т.Ю. Аренда: проблемные аспекты учета и формирования отчетной информации / Т.Ю. Дружиловская, Э.С. Дружиловская // Учет. Анализ. Аудит. – 2020. – Т. 7, № 2. – С. 30–39.
106. Капранова Л.Д. Инвестиции в лизинг: проблемы и перспективы развития лизинга в современной России // Национальные интересы: приоритеты и безопасность. – 2021. – Т. 17, № 1. – С. 39–66.
107. Аксенов И.А. Проблемы и риски лизинговых операций с субъектами малого предпринимательства // Индустриальная экономика. – 2020. – № 3. – С. 27–30.
108. Карпова Н.В. Выбор варианта инвестирования в основные средства предприятия строительной отрасли // Известия Дагестанского ГАУ. – 2021. – № 1(9). – С. 127–136.

Приложение 1

Результаты лабораторных исследований различных комбинаций материалов звукоотражающих деталей.

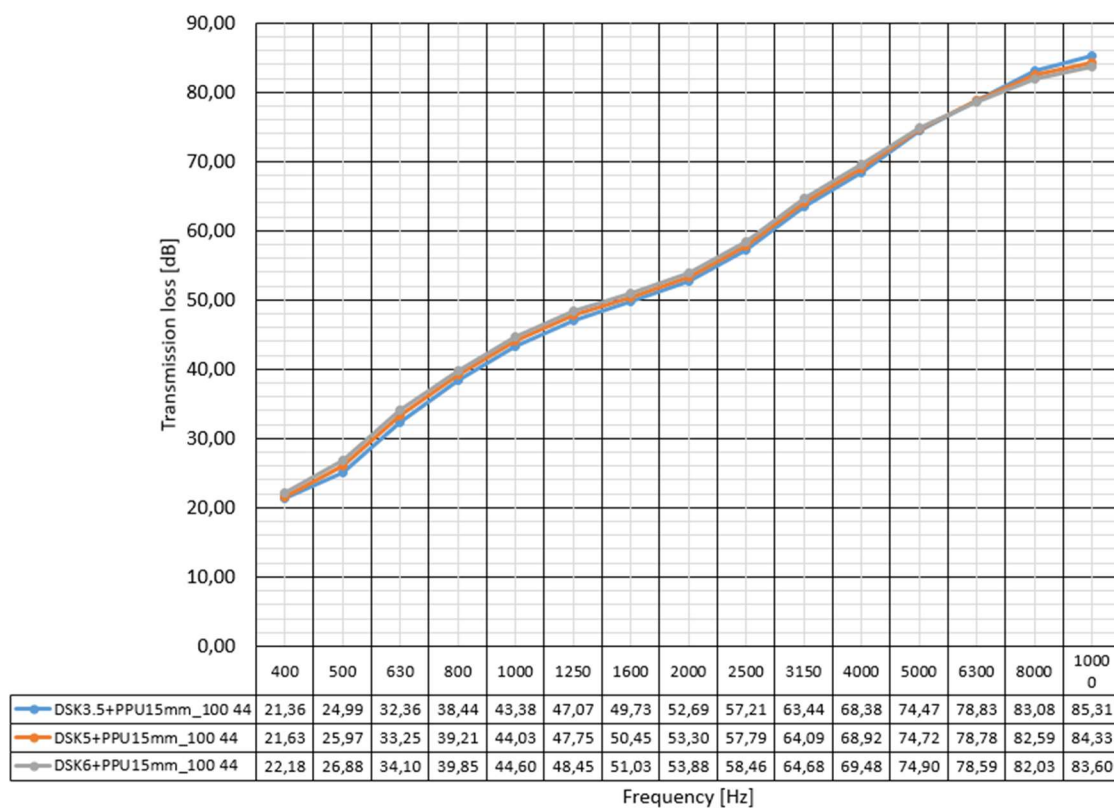


Рисунок 1 – Графики показателя TL ППУ толщиной 15 мм (соотношение 100/44) с разным звукоизоляционным слоем (dsk)

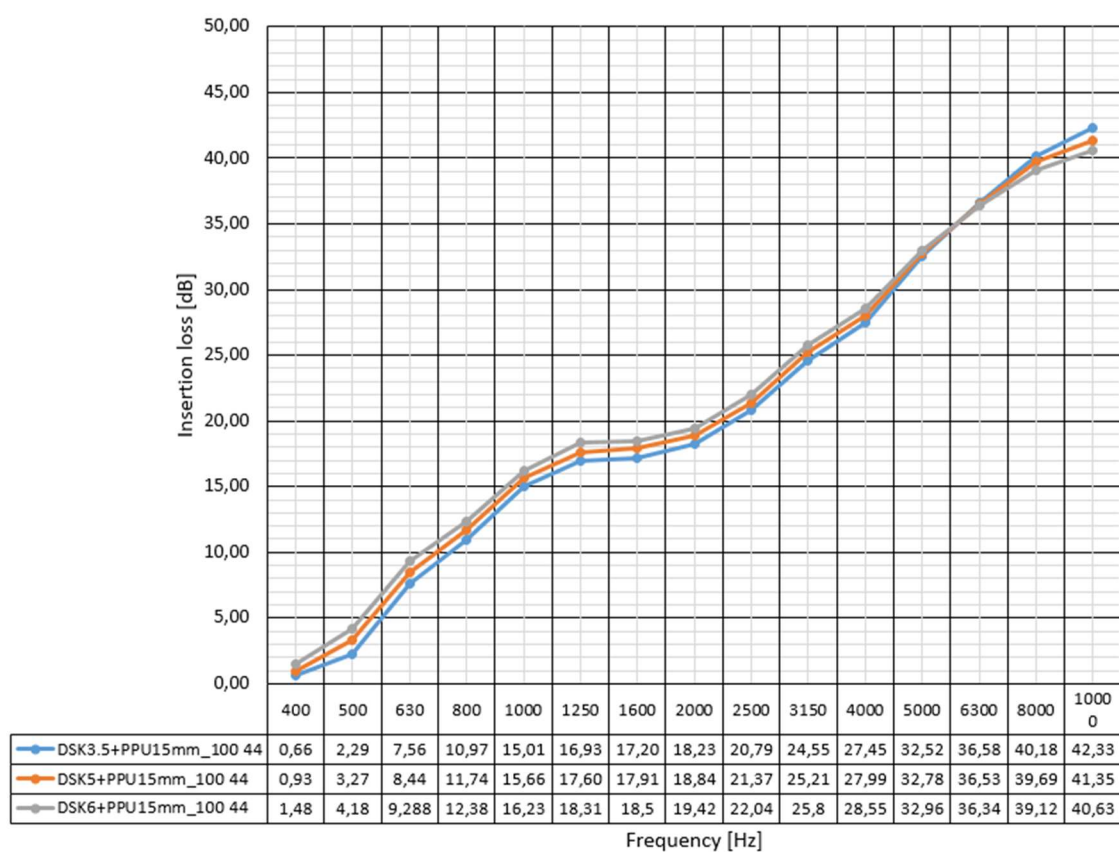


Рисунок 2 – Графики показателя IL ППУ толщиной 15 мм (соотношение 100/44) с разным звукоизоляционным слоем (dsk)

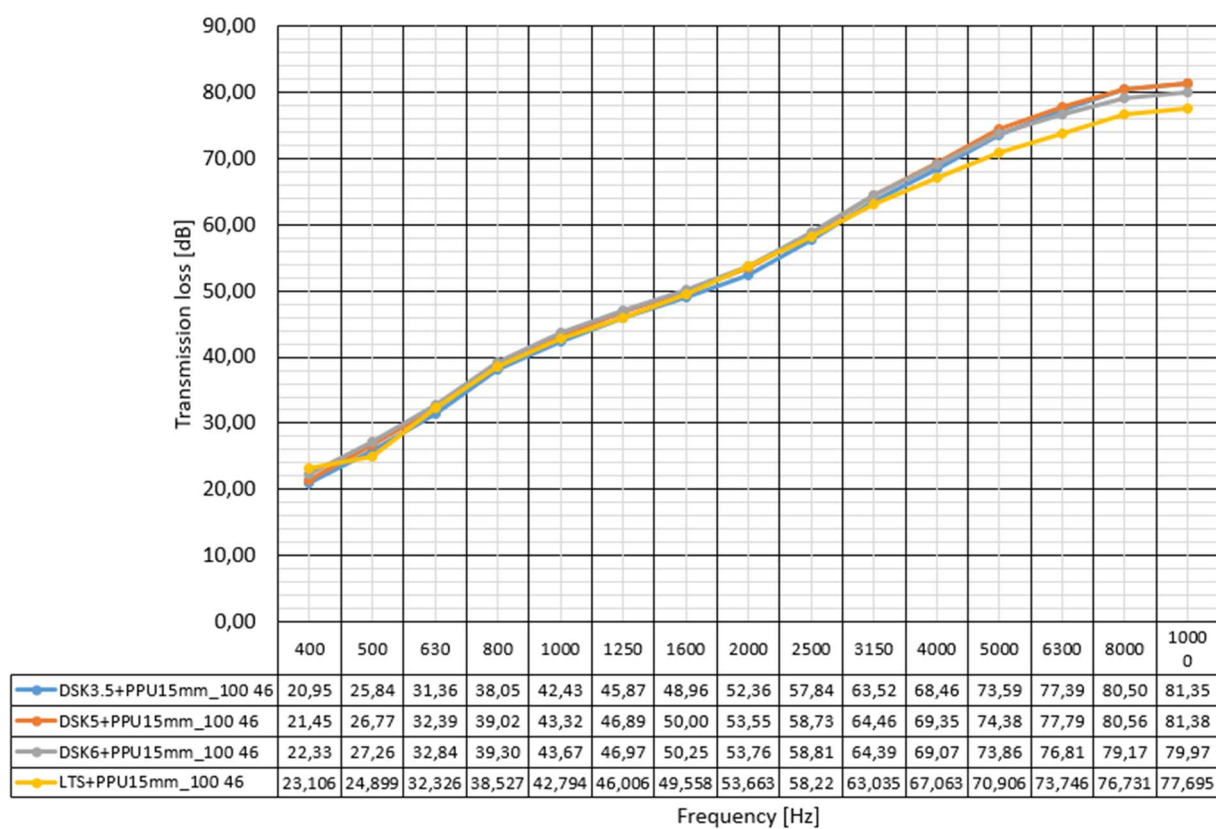


Рисунок 3 – Графики показателя TL ППУ толщиной 15 мм (соотношение 100/46) с разным звукоизоляционным слоем (dsk)

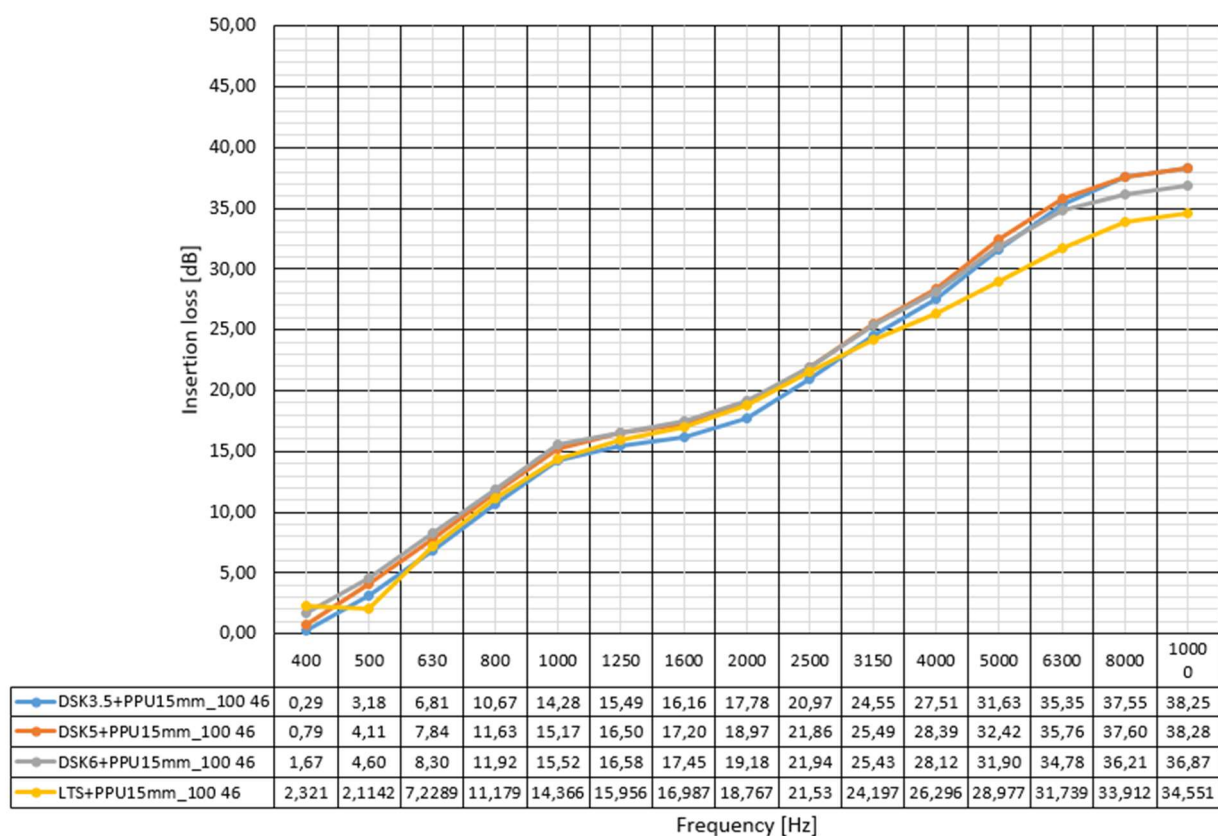


Рисунок 4 – Графики показателя IL ППУ толщиной 15 мм (соотношение 100/46) с разным звукоизоляционным слоем (dsk)

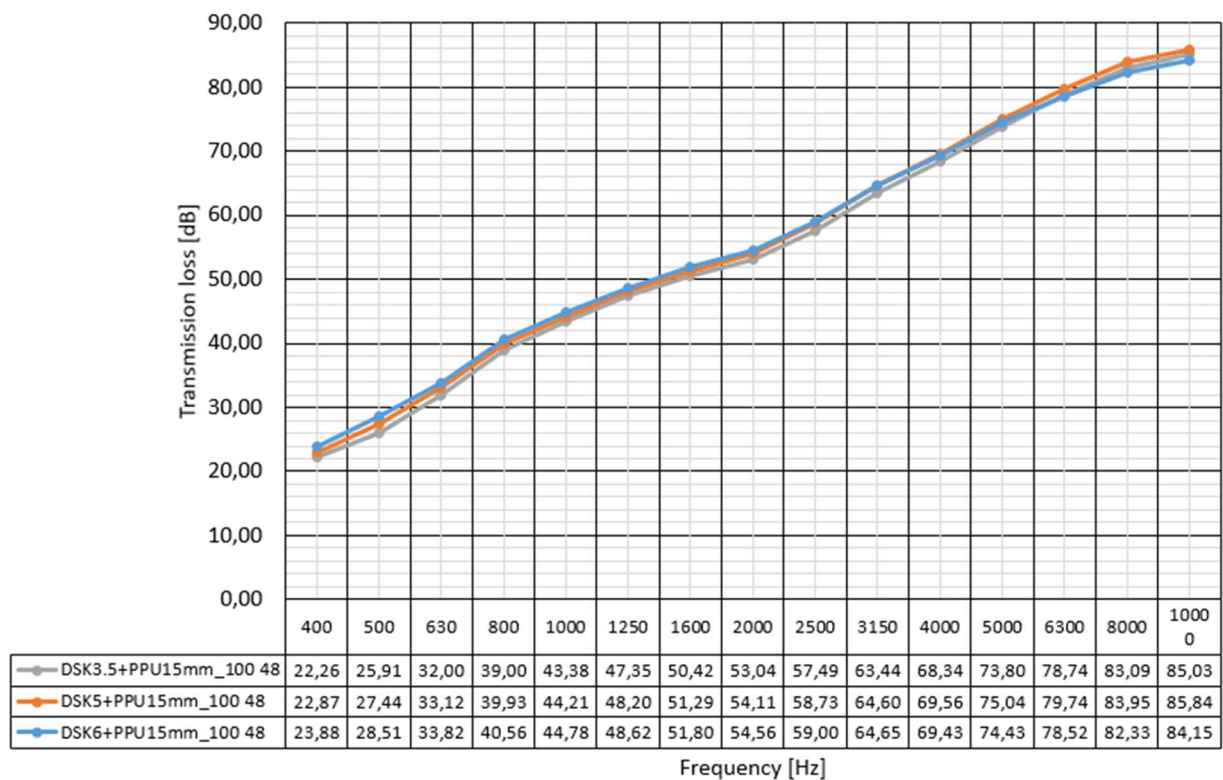


Рисунок 5 – Графики показателя TL ППУ толщиной 15 мм (соотношение 100/48) с разным звукоизоляционным слоем (dsk)

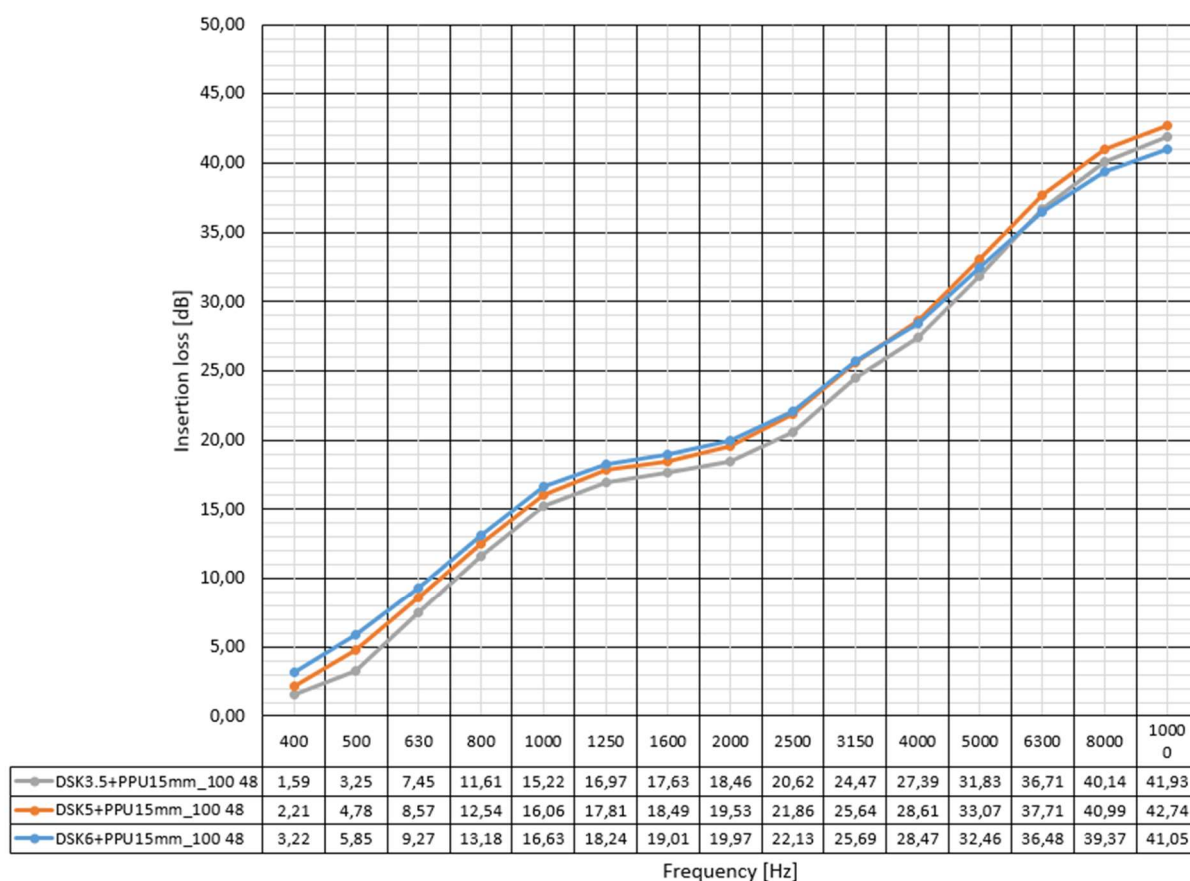


Рисунок 6 – Графики показателя ИЛ ППУ толщиной 15 мм (соотношение 100/48) с разным звукоизоляционным слоем (dsk)

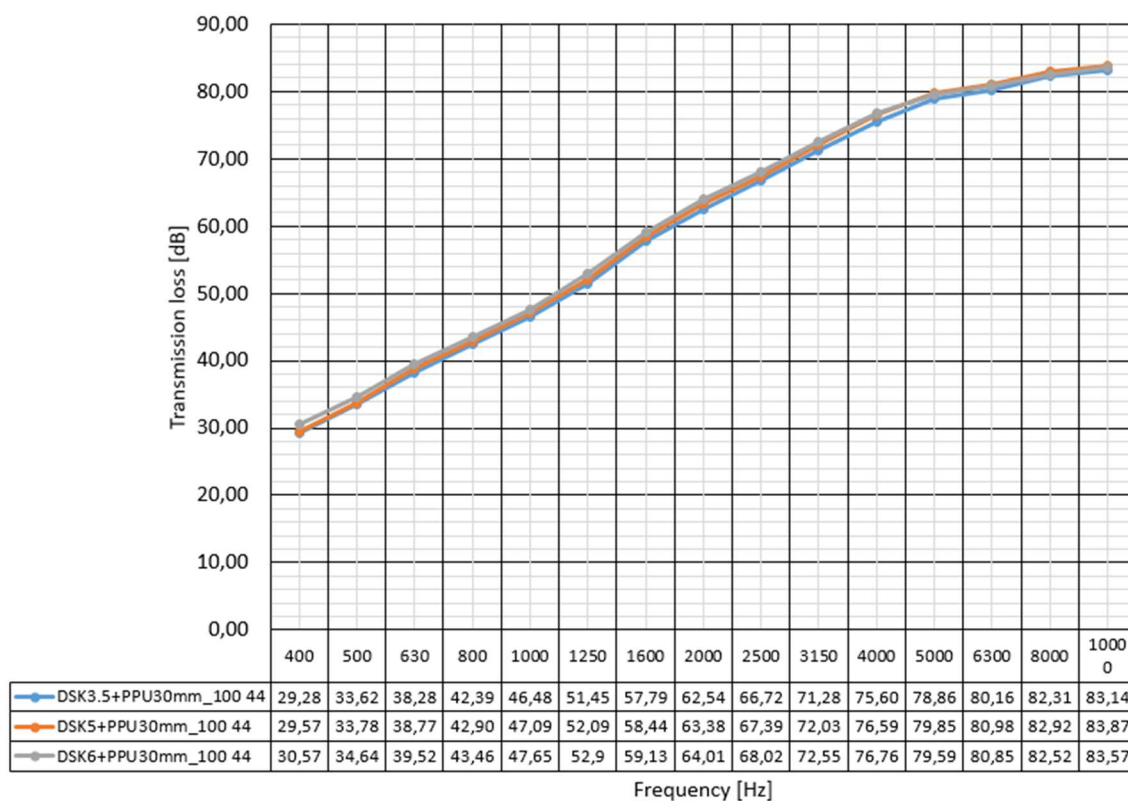


Рисунок 7 – Графики показателя ТЛ ППУ толщиной 30 мм (соотношение 100/44) с разным звукоизоляционным слоем (dsk)

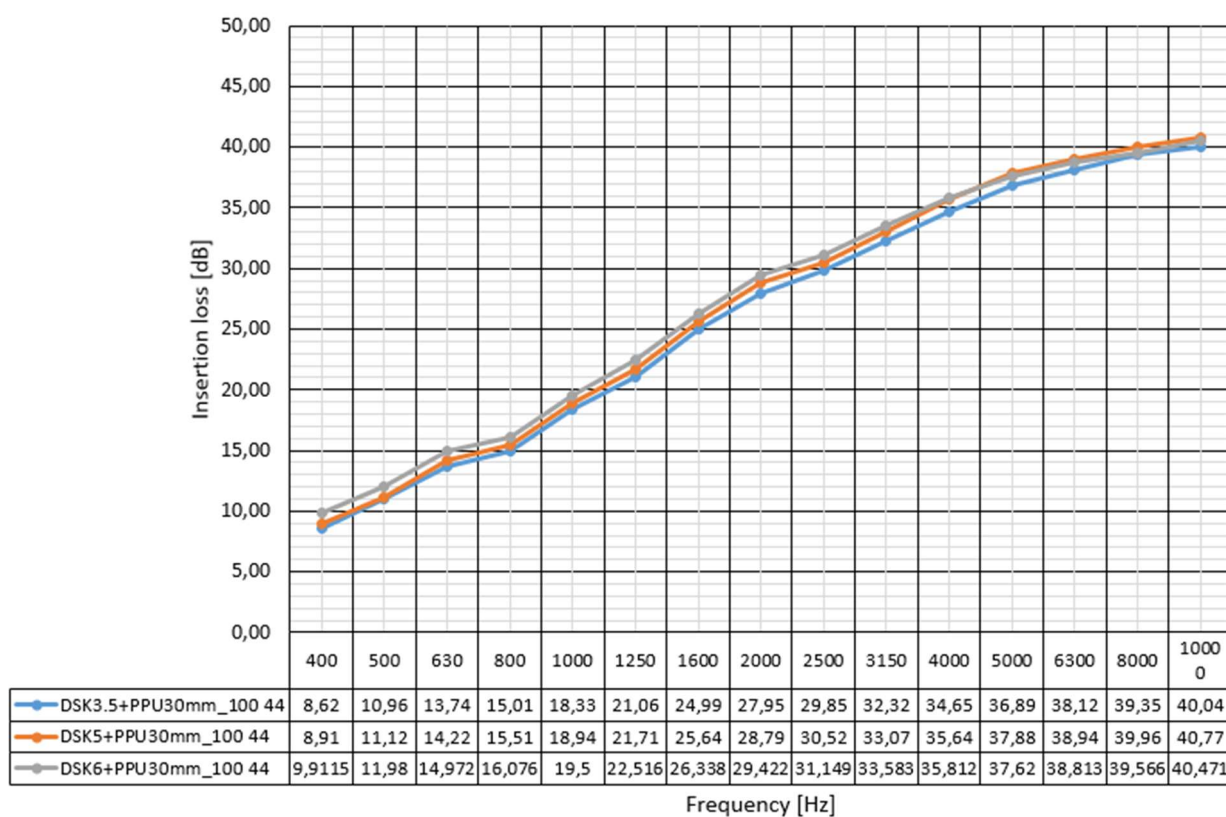


Рисунок 8 – Графики показателя ИЛ ППУ толщиной 30 мм (соотношение 100/44) с разным звукоизоляционным слоем (dsk)

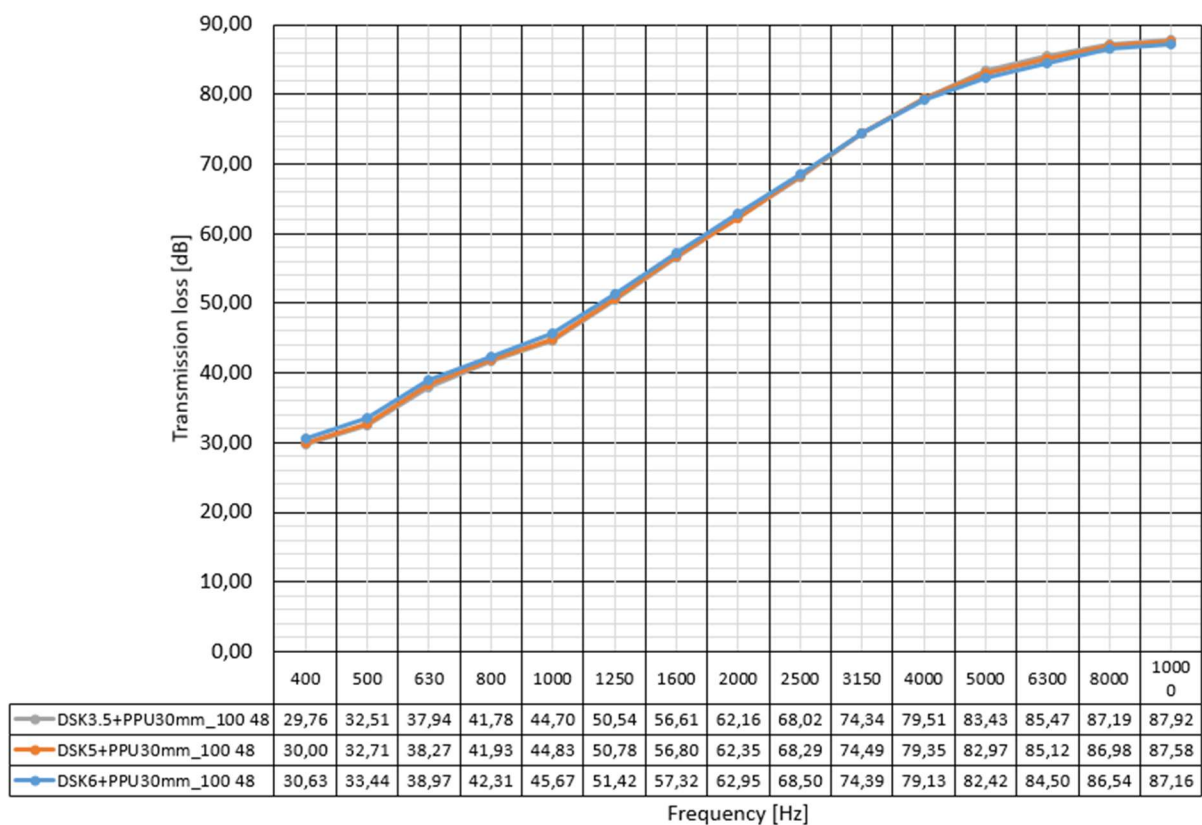


Рисунок 9 – Графики показателя ТЛ ППУ толщиной 30 мм (соотношение 100/48) с разным звукоизоляционным слоем (dsk)

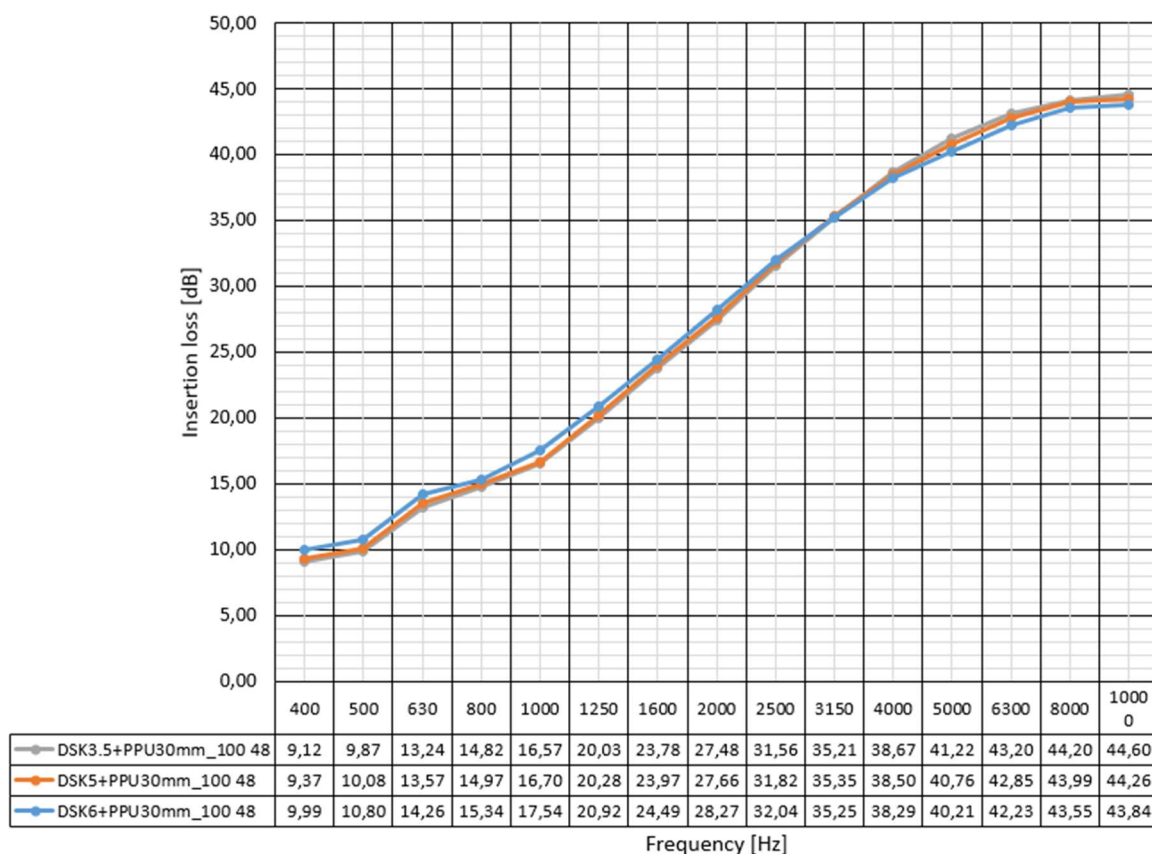


Рисунок 10 – Графики показателя IL ППУ толщиной 30 мм (соотношение 100/48) с разным звукоизоляционным слоем (dsk)

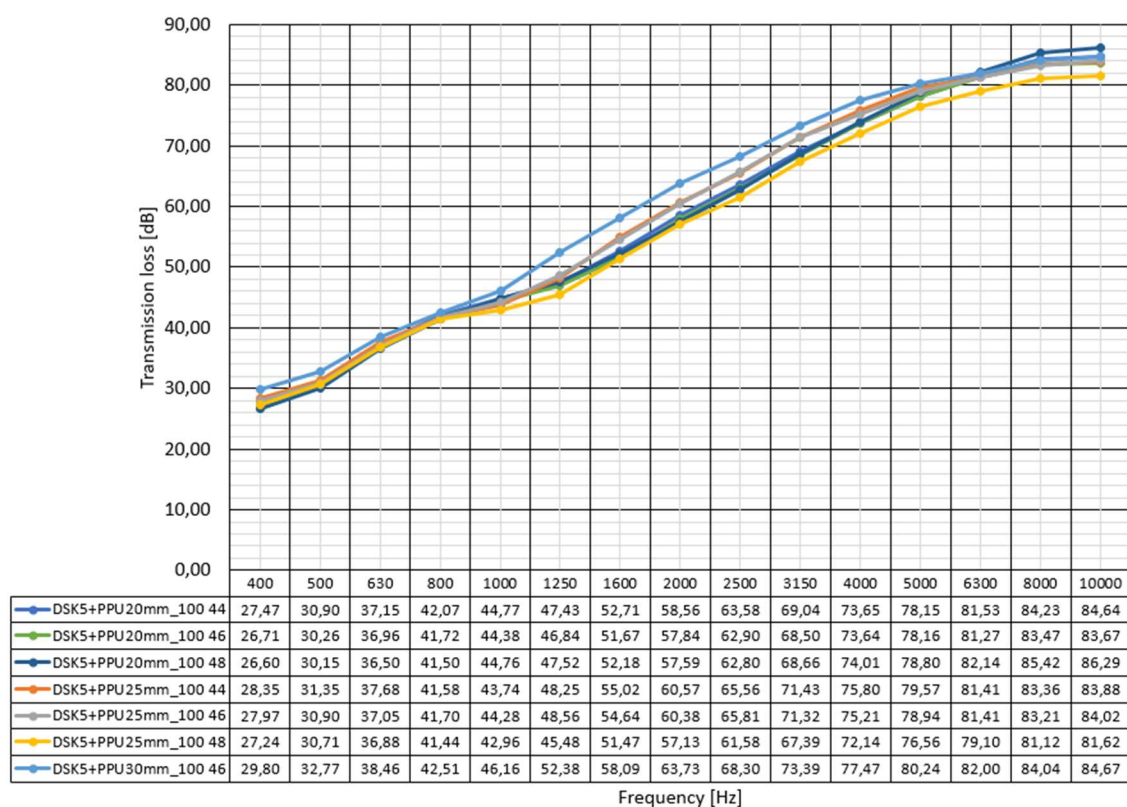


Рисунок 11 – Графики показателя TL ППУ с толщиной 20, 25, 30 мм с разным звукоизоляционным слоем (dsk)

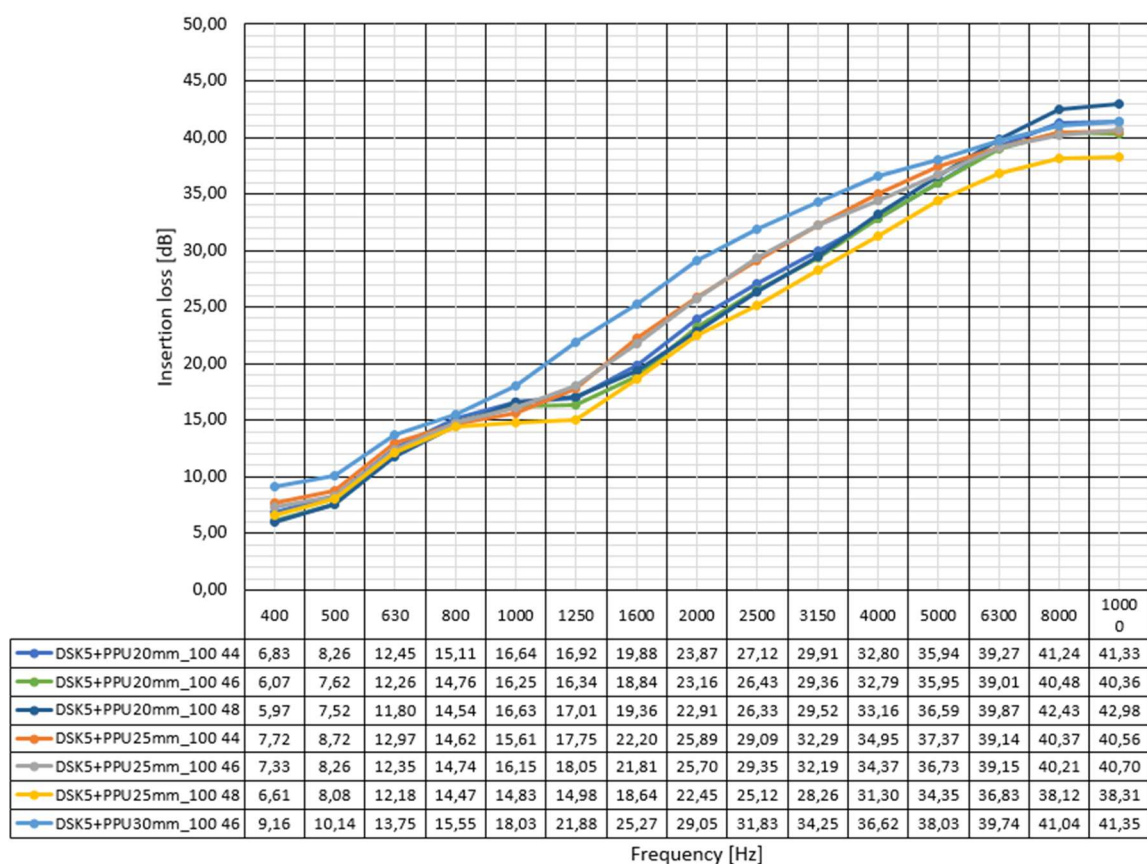


Рисунок 12 – Графики показателя IL ППУ с толщиной 20, 25, 30 мм с разным звукоизоляционным слоем (dsk)

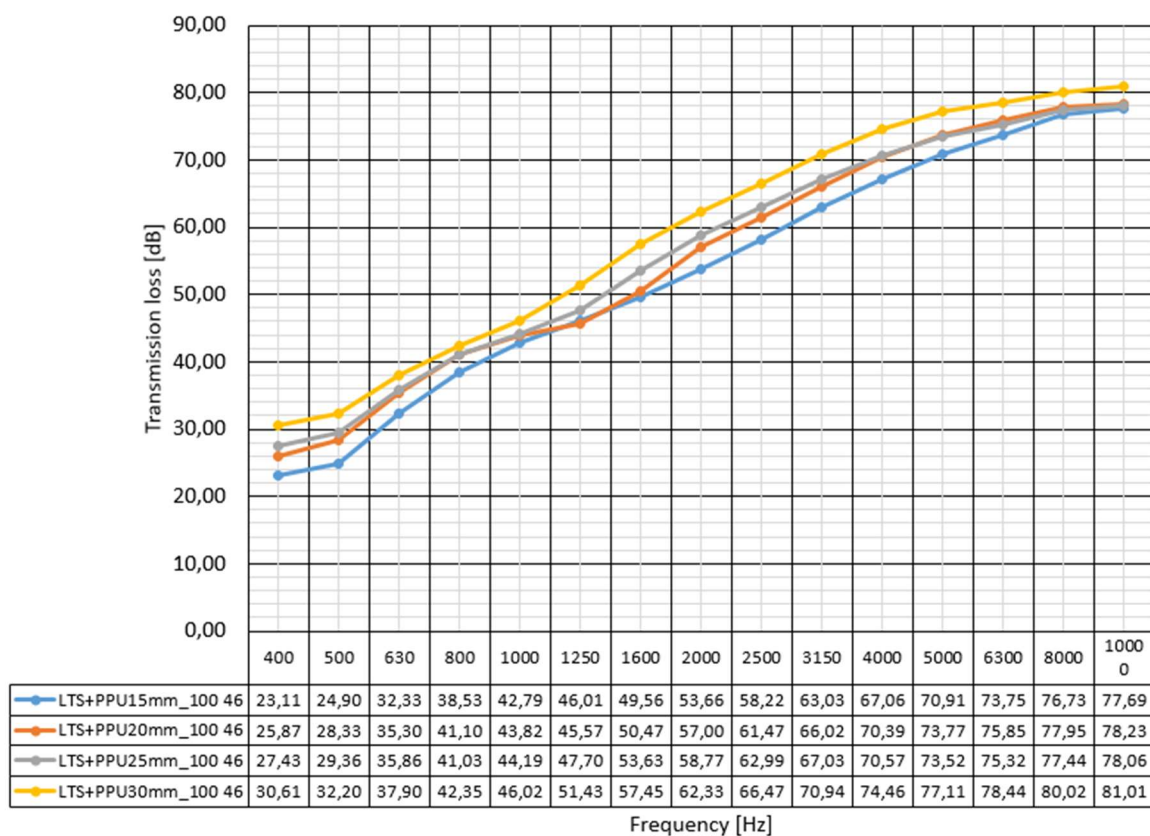


Рисунок 13 – Графики показателя TL ППУ с толщиной 15, 20, 25, 30 мм (соотношение 100/46) с звукоизоляционным слоем (LTS)

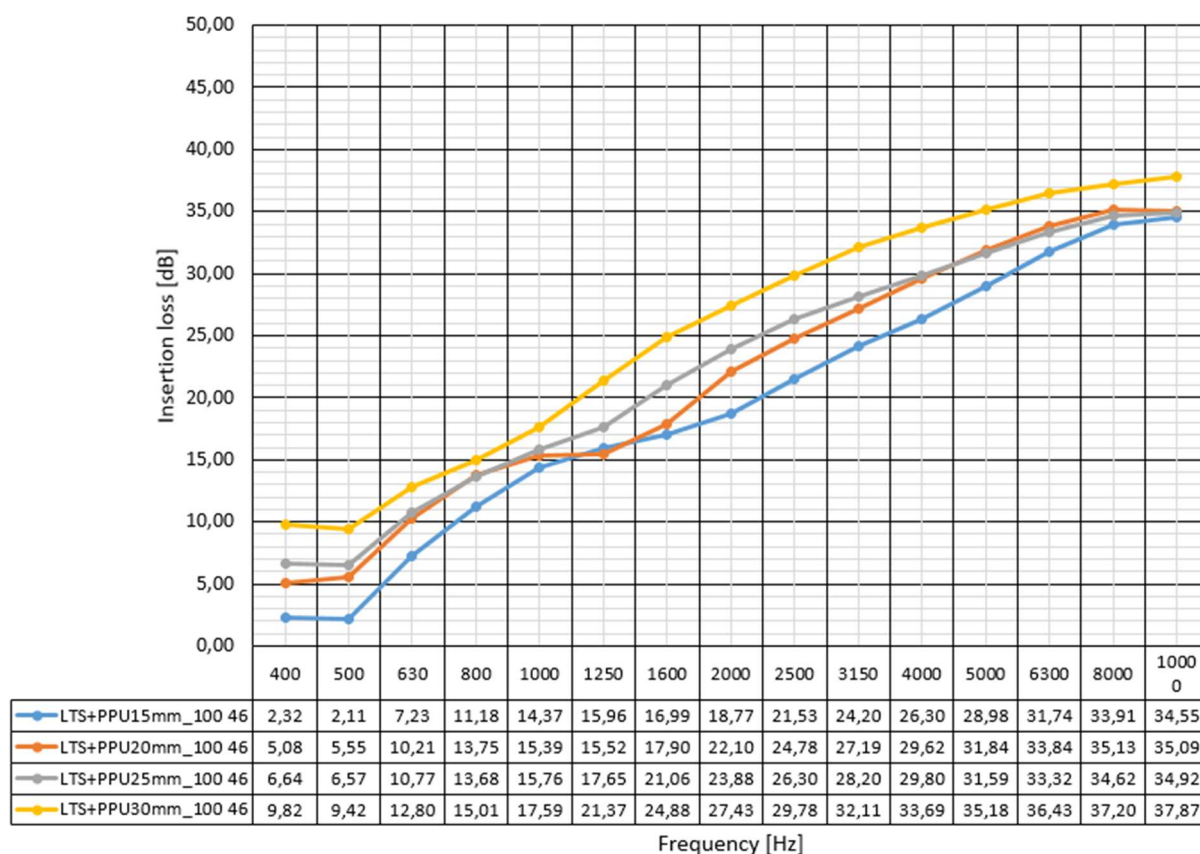


Рисунок 14 – Графики показателя IL ППУ с толщиной 15, 20, 25, 30 мм (соотношение 100/46) с звукоизоляционным слоем (LTS)

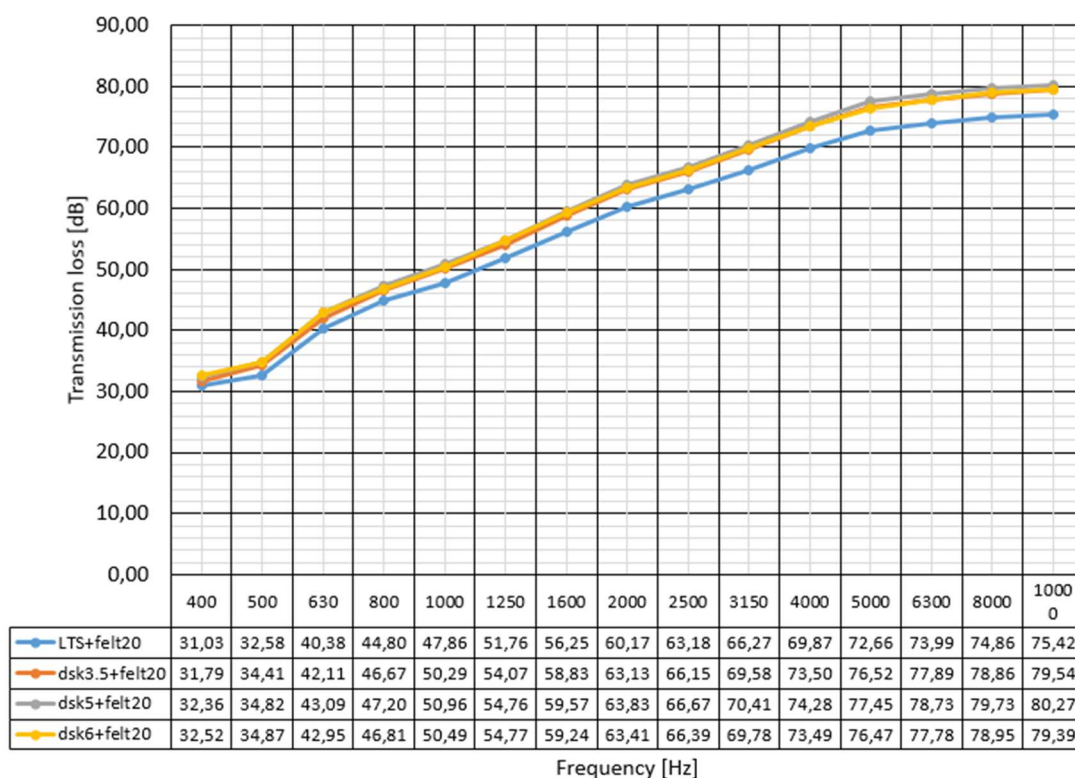


Рисунок 15 – Графики показателя TL ВФМ с толщиной 20 мм с разным звукоизоляционным слоем (dsk)

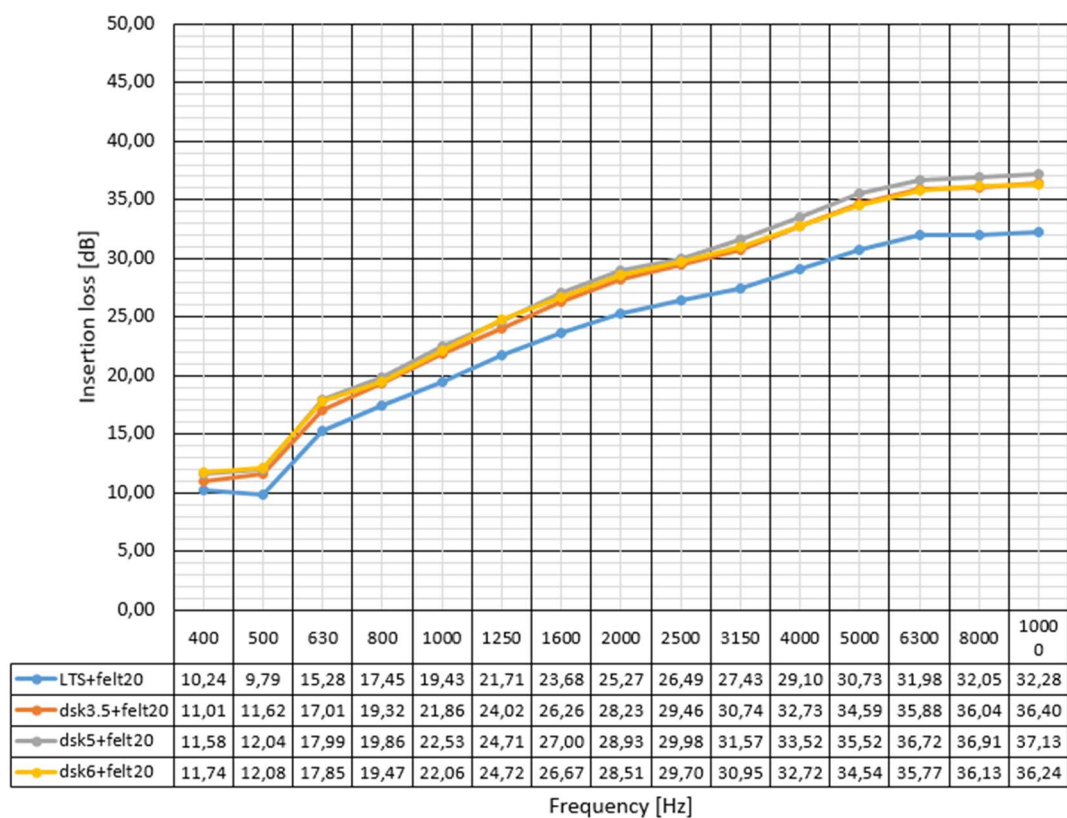


Рисунок 16 – Графики показателя ИЛ ППУ с толщиной 15, 20, 25, 30 мм (соотношение 100/46) с звукоизоляционным слоем (LTS)

Приложение 2

Исходный код программы по загрузке координат поля, построения маршрута работы беспилотного трактора и отслеживания его положения.

```
using System;
using System.Collections.Generic;
using System.ComponentModel;
using System.Data;
using System.Drawing;
using System.Linq;
using System.Net.Http;
using System.Net.Sockets;
using System.Text;
using System.Threading.Tasks;
using System.Windows.Forms;
using Newtonsoft.Json;

namespace DDProgram
{
    public partial class Form1 : Form
    {
        public Form1()
        {
            InitializeComponent();
        }
        private string apiResponseContent; // Поле ответа api
        private Coordinates coordinates;

        private async void button1_Click(object sender, EventArgs e)
        {
            /* Адрес API. Заменить URL, если будет использоваться другой трекер.
            http://192.168.1.100:80/status
            http://server.gpsglaz.ru/api/
            */
            string droneReceiverApiUrl = "http://server.gpsglaz.ru/api/";

            try
            {
                using (HttpClient client = new HttpClient())
                {
                    // Таймаут для запроса
                    client.Timeout = TimeSpan.FromSeconds(5);

                    // Отправка GET-запрос к API
                    HttpResponseMessage response = await
client.GetAsync(droneReceiverApiUrl);

                    // Проверяем статус ответа
                    if (response.IsSuccessStatusCode)
                    {
                        apiResponseContent = await
response.Content.ReadAsStringAsync();
                        MessageBox.Show("Соединение успешно! Ответ API получен.",
"Успех", MessageBoxButtons.OK, MessageBoxIcon.Information);
                    }
                    else
                    {
                        MessageBox.Show($"Ошибка соединения. Код ответа:
{response.StatusCode}", "Ошибка", MessageBoxButtons.OK, MessageBoxIcon.Error);

```

```

        }
    }
    catch (HttpRequestException ex)
    {
        MessageBox.Show($"Не удалось подключиться к API: {ex.Message}",
            "Ошибка", MessageBoxButtons.OK, MessageBoxIcon.Error);
    }
    catch (TaskCanceledException)
    {
        MessageBox.Show("Запрос к API был отменен (возможно, таймаут).",
            "Ошибка", MessageBoxButtons.OK, MessageBoxIcon.Error);
    }
    catch (Exception ex)
    {
        MessageBox.Show($"Произошла ошибка: {ex.Message}", "Ошибка",
            MessageBoxButtons.OK, MessageBoxIcon.Error);
    }
}

private void button2_Click(object sender, EventArgs e)
{
    Close();
}

private void button3_Click(object sender, EventArgs e)
{
    /*try
    {
        if (!string.IsNullOrEmpty(apiResponseContent))
        {
            // Разбор ответа
            coordinates =
            Newtonsoft.Json.JsonConvert.DeserializeObject<Coordinates>(apiResponseContent);

            if (coordinates != null)
            {
                // Запись координат в поля
                TextCoordinate1.Text = coordinates.X.ToString();
                TextCoordinate2.Text = coordinates.Y.ToString();
            }
        }
        else
        {
            MessageBox.Show("Ответ API не был получен.", "Ошибка",
                MessageBoxButtons.OK, MessageBoxIcon.Warning);
        }
    }
    catch (Exception ex)
    {
        MessageBox.Show($"Ошибка при обработке ответа API: {ex.Message}",
            "Ошибка", MessageBoxButtons.OK, MessageBoxIcon.Error);
    }
    */
}

public class Coordinates
{
    public double X { get; set; }
    public double Y { get; set; }
}

private void button4_Click(object sender, EventArgs e)
{

```

```

    }

    private void button5_Click(object sender, EventArgs e)
    {
        Form2 form2 = new Form2();

        // Открываем вторую форму
        form2.ShowDialog();
    }
}

using System;
using System.Collections.Generic;
using System.ComponentModel;
using System.Data;
using System.Drawing;
using System.Linq;
using System.Text;
using System.Threading.Tasks;
using System.Windows.Forms;

namespace DDPProgram
{
    public partial class Form2 : Form
    {
        public Form2()
        {
            InitializeComponent();
        }

        private void Form2_Load(object sender, EventArgs e)
        {
            progressBar1.Minimum = 0;
            progressBar1.Maximum = 100;
            progressBar1.Value = 0;

            Timer timer = new Timer();
            timer.Interval = 100; // Интервал обновления (100 мс)
            timer.Tick += (s, args) =>
            {
                if (progressBar1.Value < progressBar1.Maximum)
                {
                    progressBar1.Value += 1; // Увеличиваем значение
                }
                else
                {
                    timer.Stop(); // Останавливаем таймер
                    MessageBox.Show("Тест завершен!");
                }
            };
            timer.Start();
        }
    }
}

```

Приложение 3

Акт внедрения разработок диссертационной работы во ФГУП
«НАМИ».



-НАМИ-

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ УНИТАРНОЕ ПРЕДПРИЯТИЕ
«Центральный ордена Трудового Красного Знамени научно-исследовательский автомобильный и автомоторный институт «НАМИ» (ФГУП «НАМИ»)
ИНН/КПП 7711000924/774301001, ОКПО 00234703, ОГРН 1027739228406

ул. Автомоторная, д. 2, г. Москва, 125438
info@nami.ru; nami.ru

Тел.: +7 495 456-57-00
Факс: +7 495 456-31-32

№ 1001Н-04/2026

на № _____ от _____



УТВЕРЖДАЮ

Заместитель генерального
директора
по науке ФГУП «НАМИ»

Г.Е. Надарейшвили
«28» сентября 2026 г.

АКТ ВНЕДРЕНИЯ

Изделий, разработанных на основе диссертационной работы Сергеева Данила Олеговича на тему: «Проектирование малошумной модульной платформы роботизированных комплексов для сельскохозяйственных работ», выполненной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 4.3.1. – Технологии, машины и оборудование для агропромышленного комплекса

Комиссия в составе: председателя – директора центра сельскохозяйственного машиностроения ФГУП «НАМИ» М.В. Шипова, и членов – начальника управления перспективных технологий ФГУП «НАМИ» к.т.н. С.Б. Карякина и главного специалиста управления перспективных технологий ФГУП «НАМИ» В.В. Козлова составила настоящий акт о том, что разработанные изделия термошумоизоляции (ТШИ) на основе диссертационной работы Д.О. Сергеева, были внедрены в самоходное беспилотное роботизированное транспортно-технологическое энергосредство мощностью до 130 л.с. (РБТТС-130) проекта «Полесад-2.0».

При разработке изделий ТШИ в период июнь-август 2026 г., использовалась методика, разработанная в рамках диссертационной работы: проведены расчёты тепловых потоков и величина нагрева элементов электрики и топливной системы в рамках проекта «Полесад-2.0». Полученные результаты использованы при доработке конструкции беспилотного трактора для повышения надёжности и долговечности работы указанных выше систем. На разработанные детали и установку выпущена КД.

Председатель комиссии:

М.В. Шипов

Члены комиссии:

к.т.н. С.Б. Карякин

В.В. Козлов

НОМЕР

Приложение 4

Акт внедрения разработок диссертационной работы на кафедру «Тракторы и автомобили» института механики и энергетики им. В.П. Горячкина.

УТВЕРЖДАЮ

И.о. директора института механики и энергетики имени В. П. Горячкина,
д.т.н., профессор

 А. И. Арженовский/
«07»  2026 года



АКТ

о внедрении результатов исследований, полученных в кандидатской диссертации аспиранта кафедры тракторов и автомобилей Института механики и энергетики имени В. П. Горячкина Сергеева Данила Олеговича на тему «Проектирование малошумной модульной платформы роботизированных комплексов для сельскохозяйственных работ»

Комиссия в составе: председателя – академика РАН, д.т.н., профессора, заведующего кафедрой тракторов и автомобилей Дидманидзе О.Н. и членов комиссии: д.т.н., доцента Евграфова А. В., к.т.н., доцента Митягина Г. Е., к.т.н., доцента Гузалова А. С. установила, что следующие материалы кандидатской диссертации Сергеева Д.О. внедрены на кафедре тракторов и автомобилей в учебный процесс по направлениям подготовки 35.03.06 и 35.04.06 «Агроинженерия», 23.03.03 и 23.04.03 «Эксплуатация транспортно-технологических машин и комплексов» и при выполнении научно-исследовательской работы:

- результаты лабораторных испытаний материалов изделий термозумоизоляции с различными параметрами – используются в научно-исследовательских работах;
- методы проектирования деталей и установок термозумоизоляции для платформенно-модульных беспилотных аграрных машин – используются при курсовом проектировании по дисциплине «Тракторы и автомобили» и выполнении выпускных квалификационных работ.

Председатель комиссии:
академик РАН, д.т.н., профессор
заведующий кафедрой

 О. Н. Дидманидзе

Члены комиссии:
д.т.н., доцент

 А. В. Евграфов

к.т.н., доцент

 Г. Е. Митягин

к.т.н., доцент

 А. С. Гузалов