

На правах рукописи



Ворон Олег Андреевич

**МЕТОДОЛОГИЯ РАЗВИТИЯ ИННОВАЦИОННОГО
ИЗОТЕРМИЧЕСКОГО ПОДВИЖНОГО СОСТАВА
В ТРАНСПОРТНОЙ СИСТЕМЕ СТРАНЫ**

Специальность: 05.22.07 – Подвижной состав железных дорог,
тяга поездов и электрификация;
05.22.01 – Транспортные и транспортно-технологические
системы страны, ее регионов и городов,
организация производства на транспорте

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Ростов-на-Дону
2022

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Ростовский государственный университет путей сообщения» (ФГБОУ ВО РГУПС).

Научный консультант – доктор технических наук, профессор
Мамаев Энвер Агапашаевич, заведующий кафедрой «Логистика и управление транспортными системами», ФГБОУ ВО РГУПС, г. Ростов-на-Дону

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Петров Геннадий Иванович, заведующий кафедрой «Вагоны и вагонное хозяйство», ФГАОУ ВО «Российский университет транспорта» РУТ(МИИТ), г. Москва;

доктор технических наук, профессор
Лапшин Василий Федорович,
ФГБОУ ВО «Уральский государственный университет путей сообщения»,
г. Екатеринбург;

доктор технических наук, руководитель центра развития и размещения производительных сил,
Петров Михаил Борисович,
Институт экономики Уральского отделения Российской академии наук, г. Екатеринбург

Ведущее предприятие: АО «Всероссийский научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта» (АО «ВНИИЖТ»).

Защита состоится 11 апреля 2022 года, в 14 часов на заседании диссертационного совета Д218.010.01 при Ростовском государственном университете путей сообщения по адресу: 344038, г. Ростов-на-Дону, пл. Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения, 2, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Ростовского государственного университета путей сообщения.

Автореферат разослан _____ 2022 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
д.т.н., профессор



В. А. Соломин

Общая характеристика работы

Актуальность темы. В современных условиях резервом увеличения прибыли и повышения конкурентоспособности является оптимизация управления интегрированными цепями поставок товаров. Система интеграции подразделений различных видов транспорта и других участников товародвижения с целью достижения синергетического эффекта взаимодействия включает развитие транспортной инфраструктуры, технологий организации перевозок, подвижного состава и терминальных комплексов обслуживания транспортных средств. Рассмотрение системы через призму синергии позволяет сформировать критерии эффективности и успешности развития подвижного состава и определить «точки приложения усилий» для получения максимального результата при малых затратах, которые должны быть сформированы с учетом результатов отечественного опыта и зарубежных исследований.

Стратегическая ориентация отечественной экономики нацелена на производство товаров и услуг с высокой добавленной стоимостью на пути их движения от производства до потребления, проходящих этапы технологической обработки (заготовка сырья, производство продукта, его хранение, транспортировка, распределение, потребление), совокупность которых формирует пространственные и транспортно-технологические цепочки, объединенные в категорию логистические цепи поставок.

Одной из технологически сложных цепей поставок являются логистические цепи доставки товаров с температурным режимом хранения с использованием специализированного изотермического подвижного состава (ИПС). Эти потоки объединяются в понятие непрерывной холодильной цепи, включающее в себя комплекс средств холодильной техники и технологий, направленных на обеспечение режимов термообработки и хранения на всем пути от производителя до потребителя, что является развитием этой категории грузов в организации перевозок.

ИПС (как грузовые единицы) и транспортно-технологические решения формируют инфраструктурные предпосылки развития видов экономической деятельности с продукцией, требующей непрерывных холодильных цепей железнодорожного транспорта. Изотермический подвижной состав рассматривается одним из ключевых звеньев цепи поставок товаров, которое должно подчиняться общим принципам данной цепи поставок и учитывать интересы всех участников товародвижения.

Существующий железнодорожный рефрижераторный подвижной состав (РПС) и ИПС морально и физически устарел и уже не может в полной мере удовлетворять потребность в перевозках, поэтому использование стареющего парка с каждым годом обходится все дороже. Средний возраст изотермических вагонов, принадлежащих как частным компаниям, так и ОАО «РЖД», составляет более 25 лет. Ежегодное выбытие подвижного состава составляет более тысячи вагонов, что уже привело практически к полной утрате специальных железнодорожных транспортных средств для перевозки продуктов питания. Причиной этому, на наш взгляд, является физический и моральный износ по-

движного состава, не отвечающего современным требованиям и критериям эффективности логистических и транспортно-технологических решений в сфере организации перевозок скоропортящейся продукции.

Современный рынок транспортно-логистических услуг требует формирования инфраструктуры рефрижераторного подвижного состава (РПС) и ИПС. Несопоставимая с другими странами география перевозок ставит вопросы обеспечения мультимодальности перевозок, развития типологии РПС и ИПС, а также терминальной инфраструктуры обеспечения перевозок СПГ. Всё это подтверждает актуальность проблемы совершенствования конструкций и методов эксплуатации железнодорожного ИПС, транспортно-технологических процессов организации перевозок, решение которых будет способствовать дальнейшему повышению продовольственной безопасности Российской Федерации.

На основании анализа фактического состояния ИПС можно отметить, что для создания новых конструкций вагонов необходима разработка нового подхода к их оценке и актуализации транспортно-технологических решений, определяющих развитие методологических подходов организации перевозок скоропортящихся грузов в отечественной экономике.

Цель работы. Развитие методологии организации СПГ, включая разработку теоретических основ, обоснование и реализацию технических решений современных технических средств и технологических мероприятий, создание новых типов и рациональную модернизацию существующего ИПС, с использованием взаимоувязанных принципов совместного конструирования на базе единого кузова, позволяющих реализовывать автономные системы энергоснабжения и энергоохлаждающее оборудование востребованных отечественным рынком типов ИПС для повышения продовольственной безопасности страны.

Реализация поставленной цели направлена на развитие теории и практики организации перевозок скоропортящихся грузов (СПГ) и ускорение научно-технического прогресса на железнодорожном транспорте.

Задачи исследования. Основные задачи, определенные целью исследования и решаемые в рамках данной работы, следующие.

1. Провести системный анализ теории и практики организации перевозок СПГ, инфраструктуры транспортно-технологических систем, методов конструирования и эксплуатации изотермических вагонов в современных рыночных условиях.

2. Выполнить обзор конструкций изотермических вагонов в отечественной практике и за рубежом, определить характерные признаки и параметры перспективных вагонов и на их основе выполнить их классификацию.

3. Определить главные функции проектируемых вагонов на основе анализа подсистем изотермических вагонов с использованием принципа выделения и рассмотрения структуры с двухуровневой иерархией. Построить комплексную структуру универсального вагона в виде графа функционального взаимодействия элементов исследуемой технической системы и на ее основе разработать методику и общий алгоритм конструирования, отражающий специфические особенности назначения и конструкции специализированных изотермических вагонов, востребованных современным рынком перевозок СПГ.

4. Разработать прикладные методические подходы расчета прочностных, динамических и эксплуатационных характеристик изотермических вагонов, учитывающих специфику их конструкции, особенности эксплуатации в разных условиях.

5. Сформировать положения о создании типоразмерного ряда вагонов, выполненных на основе единой модели изотермического кузова и других специализированных вагонов на основе разработанной адаптированной методики конструирования.

6. Разработать инновационные технические решения и математические модели функционирования силовых элементов кузова, ходовых частей, энергохолодильного оборудования и систем термостатирования для различных типов ИПС, направленные на улучшение его потребительских качеств.

7. Разработать уточненные методики статической и динамической нагруженности элементов вагона с учетом модификации систем ИПС.

8. Выполнить комплекс экспериментальных работ по оценке принятых технических решений и точности полученных результатов предлагаемых технических решений (силовых элементов кузова, ходовых частей, энергохолодильного оборудования и систем термостатирования).

9. Оценить экономическую эффективность различных вариантов технических решений в предложенных конструкциях.

Решение поставленных задач проводилось путем комбинирования аналитических расчетов, компьютерного моделирования, обобщения результатов эксплуатационных испытаний, стендовых и натурных экспериментов в реальных условиях эксплуатации.

Научная новизна работы заключается в развитии ИПС для обеспечения холодильных цепей поставок в национальной транспортно-технологической системе, включающем внедрение конструкционно-технологических решений в создание новых и модернизацию существующих РПС и ИПС, которые должны формировать новую технологическую платформу в сегменте перевозок СПГ. В частности, к положениям научной новизны относятся следующее.

1. Формирование перспективных требований к транспортно-технологической системе организации перевозок СПГ с учетом географии перевозок, структуры грузопотоков, сезонности перевозок и других факторов.

2. Развитие методических подходов к оценке спроса на ИПС для обеспечения мультимодальных и интермодальных перевозок.

3. Выполненный с использованием обобщенной конструктивной схемы (информационной модели), функциональный анализ основных систем рефрижераторного вагона и полученная в виде графа функционального взаимодействия элементов технической системы и окружающей среды структура вагона позволяют реализовывать высокоэффективные автономные системы энергоснабжения и энергохолодильное оборудование для востребованных рынком типов ИПС.

4. Определены и обоснованы рациональные сферы применения автономных систем энергоснабжения для изотермических и рефрижераторных вагонов с технической и экономической точек зрения.

5. Разработаны и реализованы математические модели колебаний и определены динамические характеристики модернизированной тележки КВЗ-И2: текстропным приводом от средней части оси подвагонного генератора.

6. Впервые для изотермического вагона (ИВ) предложена и проработана новая концепция обогрева грузового помещения (ГП) для термосопригодных грузов, на основании которой разработана и апробирована математическая модель термообработки штабеля груза в ГП ИВ, учитывающая естественное гравитационное движение термообработанного теплого воздуха вокруг штабеля груза, которая позволяет реализовать новые транспортно-технологические схемы организации перевозок СПГ.

7. Разработана математическая модель термообработки штабеля груза с использованием жидкого азота в грузовом помещении вагона-термоса. Получены расчетные параметры расхода хладагента и потребного времени термообработки для различных видов замороженных грузов.

8. Адаптирована модель и выполнен расчет напряженно-деформированного состояния кузова изотермического вагона от воздействия парожидкостной смеси азота при захолаживании груза в ГП.

9. Созданы варианты математических моделей напряженно-деформированного состояния кузова ИВ в зависимости от компоновки специального оборудования. При этом были рассмотрены компоновочные решения энергохолодильного оборудования автономного рефрижераторного вагона (АРВ), как базового, наиболее востребованного типа вагона.

10. Разработаны уточненная методика оценки статической нагруженности модернизированной конструкции кузова и методика оценки динамической нагруженности усовершенствованных частей РПС.

Практическая значимость работы заключается в использовании результатов исследований при решении научных и практических задач, связанных с созданием специализированного изотермического и РПС, а также средств доставки крупнотоннажных рефрижераторных контейнеров.

С учетом анализа результатов опроса специалистов методом экспертных оценок сформулированы технические требования к перспективному типу ИПС и его основным функциональным подсистемам (блокам) с учетом передовых достижений в вагоностроении, электро- и холодильном машиностроении, а также сфере информационных технологий.

Сформулированный общий алгоритм проектирования позволяет на основе блочно-модульного подхода конструировать основные функциональные блоки изотермических и рефрижераторных вагонов, обеспечивающих специализацию вагонов по набору выполняемых ими функций и с учетом создания и поддержания специальных условий перевозки, необходимых для транспортировки СПГ.

Предложена структура железнодорожного рефрижераторного транспорта для перевозок СПГ, которая обеспечит конкурентное ценовое преимущество отечественной продукции на внутреннем и внешнем рынках.

Сформированы концептуальные и компоновочные решения для создания типоразмерного ряда изотермических вагонов с поддерживаемым в грузовом

помещении температурным режимом. Разработан видоразмерный (типоразмерный) ряд специализированного подвижного состава для транспортировки СПГ, где на базе унифицированного теплоизолированного кузова могут быть реализованы различные типы изотермических и рефрижераторных вагонов с несколькими вариантами организации их энергоснабжения, обеспечивающие развитие технологических решений перевозок.

Разработаны все этапы рабочей конструкторской документации и изготовлен опытный образец автономного комплекса энергоснабжения на базе подвагонного вентильно-индукторного генератора (ВИГ) для перспективного рефрижераторного вагона.

Получены и проанализированы результаты мониторинга скоростей движения рефрижераторной пятивагонной секции в груженом и порожнем состоянии. Полученные экспериментальные данные о продолжительности движения грузового поезда в диапазонах скоростей 25–40, 40–65, 65–85 км/ч на направлении Дальний Восток – Центр позволили формализовать исходные данные для оптимального проектирования ВИГ по двум критериям. Первый – достижение максимальной мощности для самого продолжительного по времени диапазона скоростей движения рефрижераторной секции (60–70 км/ч), и второй – набор номинальной мощности со скорости движения 25 км/ч.

Разработаны все этапы рабочей конструкторской документации, изготовлен и прошел эксплуатационные испытания опытный образец системы захлаживания грузового помещения с помощью жидкого азота для модернизированного вагона-термоса с расширенными функциональными возможностями.

С учетом специальных требований, предъявляемых к транспортировке термочувствительных СПГ, предложены и прошли апробацию в эксплуатационных условиях конструктивное устройство и технология работы новой системы обогрева «теплый пол».

Вышеназванные технические решения были частично использованы при проектировании вагона-термоса модели 16-6962 и изотермического автономного вагона модели 16-6973 производства Армавирского машиностроительного завода – филиала ОАО «Новозыбковский машиностроительный завод». Использование результатов работы подтверждается актом об использовании.

Основные методы научных исследований. В работе использовались методы математической статистики, технической термодинамики, теории тепломассообмена, теории подобия, метод анализа иерархий (Саати), экспертных оценок, метод актуализации технических решений (МАТР). Для автоматизации расчетов и отображения графических зависимостей использовались пакеты прикладных программ ANSYS 12.0, расчетной среды ANSYS Workbench, системы расчета и проектирования механических конструкций и оборудования в области машиностроения APM WinMachine, программный комплекс «Универсальный механизм» программы Simpack. Экспериментальные исследования выполнены методом активного многофакторного эксперимента с помощью приборных измерений, которые проводились на современном сертифицированном и поверенном оборудовании с использованием апробированных методик проведения прочностных и динамических испытаний.

Соответствие паспорту специальности. Диссертация посвящена вопросам совершенствования и повышения эффективности изотермического подвижного состава. В работе рассмотрены и предложены новые для этого типа подвижного состава технические решения по системам термостабилизации и энергоснабжения.

Диссертационная работа соответствует пунктам паспортов научных специальностей:

05.22.07 «Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация»:

п. 1 «Эксплуатационные характеристики и параметры подвижного состава, повышение их эксплуатационной надежности и работоспособности...», п. 4 «Совершенствование подвижного состава...», п. 5 «Подвижной состав нового поколения...» п. 6 «Оценка динамических и прочностных качеств подвижного состава...»;

05.22.01 «Транспортные и транспортно-технологические системы страны, ее регионов и городов, организация производства на транспорте»:

п. 1 «Транспортные системы и сети страны, их структура, технологии работы», п. 2 «Оптимальная структура подвижного состава», п. 5 «Технологии перевозок различными видами транспорта, мультимодальные перевозки; международные и транзитные перевозки».

Апробация работы

Материалы диссертационной работы докладывались на заседании Научно-технического совета МПС РФ (секция вагонное хозяйство, 2001 г.); Международном конгрессе «Межтриботранс» г. Ростов н/Д, РГУПС, 2003 г.; 4-й Всероссийской научно-практической конференции «Проблемы и перспективы развития вагоностроения», г. Брянск, 2008 г.; Международной конференции «Подвижной состав XXI века: идеи, требования, решения», г. С.-Петербург, 2005, 2007, 2011, 2015, 2019 гг.; Международной научно-практической конференции «Транспорт и логистика: инновационное развитие в условиях глобализации технологических и экономических связей», г. Ростов н/Д, РГУПС, 2017 г.; Международной конференции «Современные направления и перспективы развития технологий обработки и оборудования в машиностроении 2019» (ICMTMTE 2019), г. Севастополь; Международном железнодорожном салоне пространства 1520 «PRO// Движение. Экспо», г. Щербинка, 2019 г.; заседании Объединенного ученого Совета ОАО «РЖД» 2020 г.; международных научно-практических конференциях «Перспективы развития локомотиво-, вагоностроения и технологии обслуживания подвижного состава», г. Ростов н/Д, РГУПС, 2020 и 2021 гг.; ACED 2021 (2021 XVIII International Scientific Technical Conference Alternating Current Electric Drives (ACED)); Первой Международной научно-практической конференция «Наука 1520 ВНИИЖТ: Загляни за горизонт», г. Щербинка, 2021 г.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 72 печатные работы, в том числе 23 в журналах из перечня ВАК и 4 статьи в журналах, входящих в международную базу Scopus, 2 монографии и 11 патентов.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, 7 глав, заключения и списка использованных источников из 239 наименований и приложения. Общий объем работы 395 страниц, в тексте содержится 131 рисунок и 35 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Введение содержит обоснование актуальности выбранной темы, сформулированы цель работы, задачи для достижения поставленной цели, изложена общая характеристика диссертационной работы, указаны научная новизна и практическая значимость полученных результатов.

В первой главе представлен анализ состояния перевозок СПГ в условиях современного рынка транспортных услуг, который показал динамику колебания объемов перевозимых СПГ и тенденции к их снижению. Отражены специфика и сезонность перевозок различных видов СПГ на наиболее значимых маршрутах перевозки. Произведена экономическая и организационно-техническая оценка влияния конкурентных видов хладотранспорта – авторефрижераторов и крупнотоннажных рефрижераторных контейнеров.

Выполнен маркетинговый анализ рынка СПГ по типам используемого ИПС и определены основные критерии и тенденции его развития. Показано, что существующий групповой РПС физически устарел и не может обеспечить потребные объемы перевозок охлаждаемых грузов из-за ежегодного выбытия и списания из рабочего парка. На этом фоне достаточно стабильными остаются объемы перевозок в вагонах-термосах и ИВ-термосах, которые хотя и имеют ограничения по видам СПГ, срокам и дальности транспортировки, но являются преобладающим типом ИПС, активно используемым транспортными логистическими компаниями. На фоне дефицита РПС отмечается увеличение перевозок в крупнотоннажных рефрижераторных контейнерах (КРК), несмотря на худшие по сравнению с вагонами экономическими (стоимостными) показателями.

Рассмотрены и рекомендованы технологические факторы повышения сохранности СПГ при хранении и транспортировке.

Проанализировано методическое обеспечение при проектировании изотермических вагонов (ИВ). Осуществлена оценка направлений развития методов конструирования ИВ и рассмотрено фактическое состояние вопроса о создании нового ИПС в современных условиях.

Теоретические основы теплотехнических расчетов, энергетической эффективности и выбора энергохолодильного оборудования представлены в работах В. М. Алексенко, Е. Т. Бартоша, В. Н. Васильева, Е. А. Васюковой, К. В. Иванова, Б. Н. Китаева, С. Н. Науменко, В. Н. Панферова, Ю. П. Сидорова, В. В. Скрипкина, G. Beckmann, P.U. Gilli, В. Alkan, А. Celen и др.

Исследованиям теплотехнических параметров ограждающих конструкций и их тепловых полей в изотермических кузовах посвящены работы В. Ф. Бара-

банщикова, Г. И. Верникова, М. А. Зворыкина, К. В. Иванова, Б. Н. Китаева, В. Н. Панферова, С. А. Сапожникова, А. А. Шустера и др.

Вопросы совершенствования конструкции и технологии перевозок СПГ в ИПС представлены в работах В. П. Гольцева, А. П. Дюбко, Д. К. Касымовой, А. В. Коковихина, Л. В. Куликовской, М. Н. Тертерова, И. В. Ткачева, В. К. Мироненко, N. Nodali и др.

Вопросы прочности и динамики подвижного состава рассматривались в работах П. С. Анисимова, В. Ф. Лапшина, Г. И. Петрова, В. Д. Хусидова, В. Н. Филиппова, М. А. Rezvani, D. Hanson, A. H. Wickens, J. Zhou, R. Goodall и др.

В этих работах созданы предпосылки для формирования теоретических требований к экономической оценке эксплуатационных параметров изотермических вагонов. Параметры вагона оцениваются в результате анализа и изучения грузовых потоков на конкретных направлениях в различные периоды года и возможных изменений доли порожнего пробега в результате введения в оборот на этих направлениях специализированных изотермических вагонов. Исследуется также влияние дальности перевозок на величину экономического эффекта в сфере эксплуатации от особенностей конструктивного исполнения изотермического вагона.

Однако абсолютное большинство этих работ выполнялись более 30 лет назад и не учитывают современные достижения в области холодильного и электротехнического машиностроения, информационных технологий. За этот период произошли огромные изменения в структуре, объемах и логистике маршрутов перевозок, и они уже не отражают потребностей клиентуры на современном транспортном рынке при перевозках СПГ.

Во второй главе обоснована и разработана структура блок-схемы метода актуализации технических решений (МАТР), которая состоит из шести блоков, взаимодействующих между собой через систему прямых связей, обеспечивающих реализацию поставленных задач. Блок-схема построения исследований с применением этого метода представлена на рисунке 1.

Выполненный обзор и анализ отечественных и зарубежных конструкций изотермических вагонов выявил следующие характерные особенности:

- наилучшие технико-экономические показатели реализуются у вагонов с наиболее полным использованием габаритного пространства и осевых нагрузок. Отечественные и зарубежные рефрижераторные вагоны имеют существенные различия в конструкции, но наилучшие показатели имеют американские вагоны, далее следуют вагоны российских и европейских производителей;
- специфика устройства используемого энергохолодильного оборудования и электронных компонентов систем управления, а также желательное улучшение динамических качеств и конструкционной скорости вынуждают применять на этом виде подвижного состава специальные типы ходовых частей, ударно-тяговых приборов и тормозного оборудования;
- требования к теплотехническим характеристикам и климатическому исполнению изотермических кузовов российских вагонов имеют более жесткие нормируемые значения.



Рисунок 1 – Блок-схема построения исследований

Предложена классификация функциональных систем ИПС по группам, включающим в себя следующие конструкции: рамы и кузова, энергосилового и холодильного оборудования. Построена функциональная структура автономного рефрижераторного вагона (АРВ) в виде графа функционального взаимодействия элементов технической системы и объектов.

Выполненная классификация позволила обобщить конструктивную схему специализированного рефрижераторного вагона в виде АРВ. Она использована в качестве концептуальной модели с возможностью гибкого изменения и сочетания основных подсистем при проведении функционального анализа рассматриваемого типа подвижного состава. Проведенный функциональный анализ АРВ нового поколения, как самого сложного типа ИПС, был выполнен тремя этапами.

На первом этапе АРВ разделяем на функциональные элементы (модули), используя в дальнейшем осуществленное разделение в качестве иерархической информационной модели АРВ с тремя уровнями иерархии.

На втором этапе определяем функции каждого элемента. Для описания функций технической системы (ТС) применяем естественную форму, которую формализованно можно представить состоящей из трех компонент:

$$P = (D, G, H), \quad (1)$$

где D – указание действия, производимого рассматриваемой ТС приводящего к желаемому результату;

G – указание объекта (объектов), на который направлено это действие;

H – указание особых ограничений, при которых выполняется действие.

На третьем этапе строится иерархическая структура ТС функционального взаимодействия между элементами (модулями).

При функциональном анализе ТС удобным является принцип выделения и рассмотрения структур с двухуровневой иерархией. Согласно этому принципу первоначально определяется главная функция (функции) рассматриваемой ТС, которая представляет верхний уровень иерархической структуры ТС.

После определения главной функции устанавливаются функциональные элементы, обеспечивающие ее выполнение, которые в свою очередь, образуют первый иерархический уровень.

Далее каждый функциональный элемент первого уровня рассматривается как самостоятельная ТС, что позволяет выделить конструктивные элементы второго уровня, обеспечивающие функционирование элементов первого уровня. Аналогично проводится разделение на функциональные элементы третьего и четвертого уровней.

На основании проведенного анализа функций специализированного рефрижераторного вагона и построенной его функциональной структуры были сделаны следующие обобщения.

Рефрижераторный вагон является сложной технической системой, которая сочетает в себе и может выполнять функции в трех различных вариантах использования:

- специализированного рефрижераторного вагона для перевозок СПГ, требующих поддержания необходимого температурного режима за счет работы холодильно-нагревательного оборудования;

- изотермического вагона при перевозках термосопригодных СПГ, которые сами формируют температурный режим в грузовом помещении;

- универсального грузового вагона, обеспечивающего перевозку и целостность любого (в т. ч. попутного) рода груза.

Метод конструирования изотермических вагонов должен существенным образом отличаться от метода создания универсальных вагонов как алгоритмом синтеза, так и методологией расчета и испытаний их работоспособности ввиду разноплановости и сильной зависимости от работы энергохолодильного оборудования, делающего возможной перевозку груза с требуемыми климатическими параметрами. Поэтому для совершенствования конструкций и методов эксплуатации железнодорожного ИПС целесообразно использование метода актуализации технических решений.

Сформулированы критерии, которые позволили с использованием индивидуального метода и метода Дельфи определить приоритеты требований к техническим параметрам функциональных систем ИПС нового поколения, позволяющие сформулировать универсальную концепцию функционирования вагона.

В качестве экспертов выступили специалисты различных организаций, занимающиеся вопросами производства, эксплуатации, продажи и организации осуществления перевозок СПГ.

На основании выставленных оценок определяется вес каждого показателя в системе остальных показателей, данных экспертом.

$$q_{ij} = Q_{ij} / \sum_{i=1}^n Q_{ij} \cdot \quad (2)$$

Значение весового коэффициента i -го показателя определяется по следующей формуле:

$$q_i = \sum_{j=1}^n q_{ji} / \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m q_{ij} \cdot \quad (3)$$

Затем рассчитывается коэффициент вариации, характеризующий согласованность мнений группы экспертов в оценке i -го критерия:

$$V_i = \frac{\sigma_i}{M[Q_{ij}]}, \quad (4)$$

где $M[Q_{ij}]$ – средняя оценка экспертов по показателю;

$$M[Q_{ij}] = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m Q_{ij};$$

$$\sigma_i = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{j=1}^m (M[Q_{ij}] - Q_{ij})^2} - \text{среднеквадратическое отклонение.}$$

Коэффициент компетентности рассчитывается по следующей формуле:

$$E_{ij} = \frac{|Q_{ij} - M[Q_{ij}]|}{M[Q_{ij}]} \cdot \quad (5)$$

При проведенных исследованиях все эксперты отдавали безусловный приоритет такому техническому показателю, как надежность, который имел наименьший коэффициент вариации, что свидетельствует о его безусловном приоритете.

Составлена блок-схема взаимосвязей потребительских параметров и характерных функциональных систем ИПС по группам, определены основные направления и перспективы их совершенствования.

Новый рефрижераторный вагон можно представить в виде взаимосвязанных функциональных подсистем: кузова, ходовых частей, ударно-тяговых приборов, системы холодоснабжения, комплекса энергоснабжения, установок создания специальных параметров среды в грузовом помещении, системы управления с функциями дистанционного мониторинга.

По каждой из этих подсистем были сформулированы конкретные исходные технические требования для рефрижераторных вагонов нового поколения.

В этом случае конструкция перспективного изотермического вагона может быть разделена на группы составных частей с учетом порядка их ремонта, замены или восстановления.

Перспективный ИПС должен проектироваться исходя из основной концепции строительства – вагоны должны состоять из унифицированных блоков, нормализованных и стандартных узлов и деталей, которые позволят производить на базе одной основной конструкции многоцелевые вагоны. Предложенное условное функциональное и конструктивное разделение рефрижераторного вагона на отдельные подсистемы позволяет использовать при его конструировании уже разработанные методики, применяемые при проектировании грузовых и пассажирских вагонов, а также элементы поисковых методов конструирования, обеспечивающих получение новых технических решений в части специализации вагона по набору выполняемых им рабочих функций.

В третьей главе определены концептуальные принципы для проектирования современного ИПС с учетом требований к инновационности для вновь создаваемого подвижного состава.

Отмечены сложности в формировании технико-экономических параметров и структуры ИПС, связанные с изменением в современных условиях транспортного рынка звеньев непрерывной холодильной цепи ж.-д. инфраструктуры при перевозках СПГ.

Предполагается генерация вариантов нового поколения изотермических вагонов и контейнеров, которые могут адаптироваться к изменяющимся условиям рынка транспортных услуг и требованиям заказчиков перевозки СПГ.

В подблоках формируется общий алгоритм проектирования ИПС на основе блочно-модульного подхода по набору выполняемых им функций при транспортировке СПГ. Предложена структура железнодорожного ИПС для перевозки СПГ в рамках стран Евроазиатского союза, представленная на рисунке 2.

Технические решения, предлагаемые к использованию, можно разделить на концептуальные и локальные. Первые определяют основные технико-экономические параметры вагона. Их основу составляет единая модель вагонкомплекта на базе изотермического кузова для вагонов-термосов и рефрижераторных, а их разделение по типам осуществляется за счет возможности трансформации и оборудования различными вариантами энергохолодильного оборудования. Ко второй группе следует отнести локальные технические решения, улучшающие потребительские качества и расширяющие сферу их использования: тип источника энергоснабжения, холодопроизводительность холодильной машины и системы обогрева, конструкцию теплоизоляции кузова, системы дистанционного мониторинга, системы создания специальных параметров перевозок в грузовом помещении.

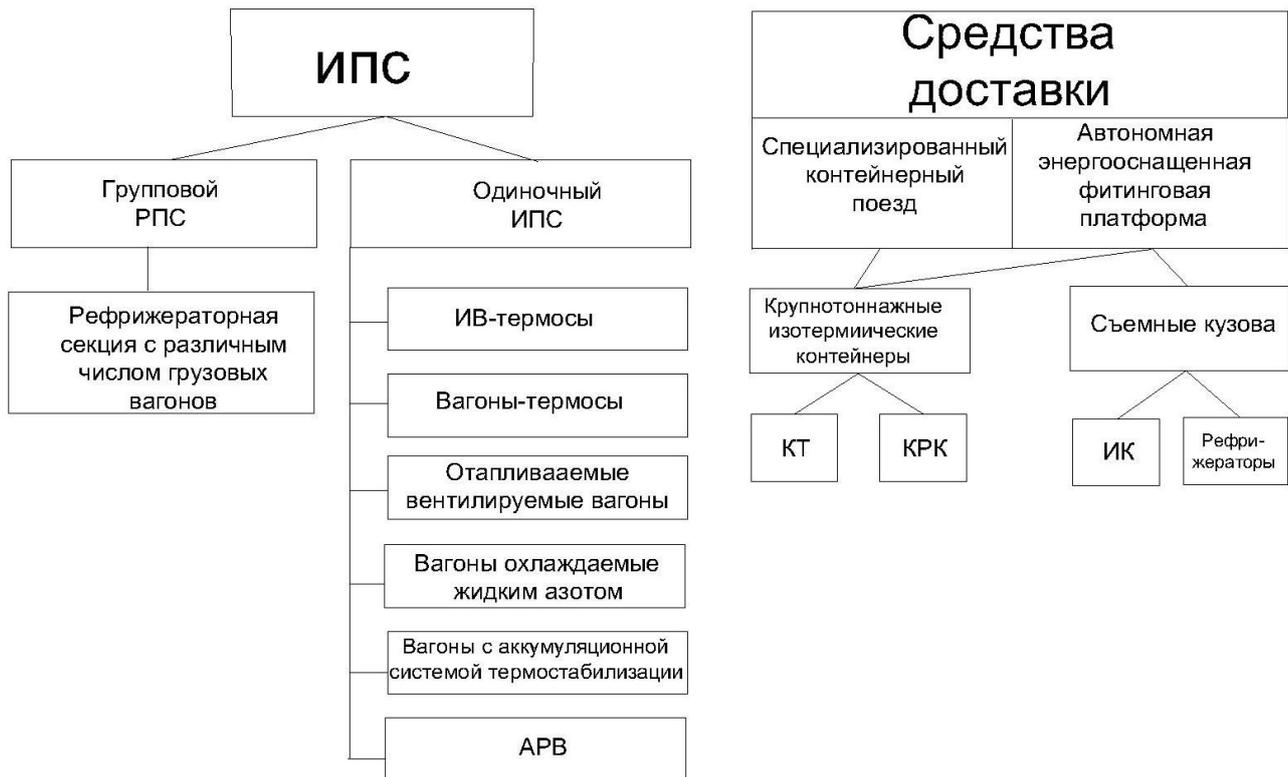


Рисунок 2 – Предлагаемая структура парка подвижного состава для транспортировки СПГ

Окончательное определение оптимальной структуры ИПС (изотермических и рефрижераторных вагонов, КРК и средств их доставки) может быть выполнено после продолжительной эксплуатации этого подвижного состава на определенных маршрутах перевозок СПГ. В зависимости от принятой технологии ускоренной доставки можно будет определить тип необходимых ходовых частей с востребованными осевыми нагрузками, который будет использоваться для ИПС.

С учетом этих требований предложены технические решения основных систем для следующего типажа подвижного состава для перевозок СПГ:

- вагон-термос изотермический (ИВТ);
- изотермические вагоны с охлаждением жидким азотом в виде автономного жидкоазотного вагона и модификации вагона-термоса с азотной системой захлаживания;
- вентилируемый и отапливаемый изотермический вагон;
- автономный рефрижераторный вагон.

Наличие и применение энергохолодильного оборудования существенным образом влияет на основные показатели рефрижераторных вагонов. Как следствие, возникает целый комплекс проблем, связанных с необходимостью создания ходовых частей, способных реализовать преимущества компоновки специального оборудования:

- устройства для выработки электроэнергии и холодильно-отопительное оборудование, размещаемые в кузове (дизель-генераторы, холодильные ком-

прессоры и теплообменное оборудование, вспомогательные преобразователи и т. п.), имеют значительный вес и объем. В результате центр масс вагона оказывается расположенным на бóльшей высоте, что крайне нежелательно с точки зрения динамики и требует оценки при принятии специальных решений;

– должны применяться кузова несущей конструкции, обеспечивающие увеличение объема для установки оборудования при одновременном снижении массы несущих металлоконструкций без ущерба для нормативных показателей прочности.

Решение обозначенных проблем потребовало развития научного обеспечения разработок ИПС нового поколения, что позволило исследовать сложные процессы в ходовых частях вагона на ранних стадиях проектных работ и избежать изготовления дорогостоящих макетных образцов. Применение современных методов динамических и прочностных расчетов позволит сократить сроки проектных работ и повысить эксплуатационную надежность ходовых частей вагона. Взаимосвязь функциональных подсистем рефрижераторного вагона представлена на рисунке 3.

В четвертой главе представлены теоретические и экспериментальные исследования тепловых процессов СПГ в грузовом помещении изотермического вагона. Рассмотрены методы расчета процессов теплопереноса и воздухо-распределения при термообработке перевозимых грузов.

В рамках исследовательских работ были предложены, реализованы и апробированы технические решения систем термостабилизации для отопления и охлаждения грузового помещения изотермического вагона.

Новая концепция обогрева грузового помещения отапливаемого изотермического вагона (актуальная для термосопригодных грузов и плодоовощной продукции) предлагает использование нагревательных кабелей петрушин. На основании новых технических решений системы обогрева в виде «теплого пола» была разработана математическая модель термообработки штабеля груза в грузовом помещении изотермического вагона.

В этой модели учитывается естественное гравитационное движение термообработанного (теплого) воздуха вокруг штабеля груза.

В отапливаемый вагон с геометрическими параметрами полезного объема грузового помещения a , b , c помещается груз с геометрическими параметрами h_1 , h_2 , h_3 . Исходя из типов перевозимого груза в отапливаемых ИВ будем считать груз твердым телом.

Задача о поддержании заданной температуры штабеля рассматривается как две сопряженные задачи. Первая, «гидродинамическая» задача связана с движением воздуха, обусловленным действием электронагревательных элементов, вызывающих нагревание стенок ГП. Вторая, «тепловая» задача связана с распространением теплоты внутри штабеля перевозимого груза и установлением функции, описывающей распределение температуры в этом штабеле.

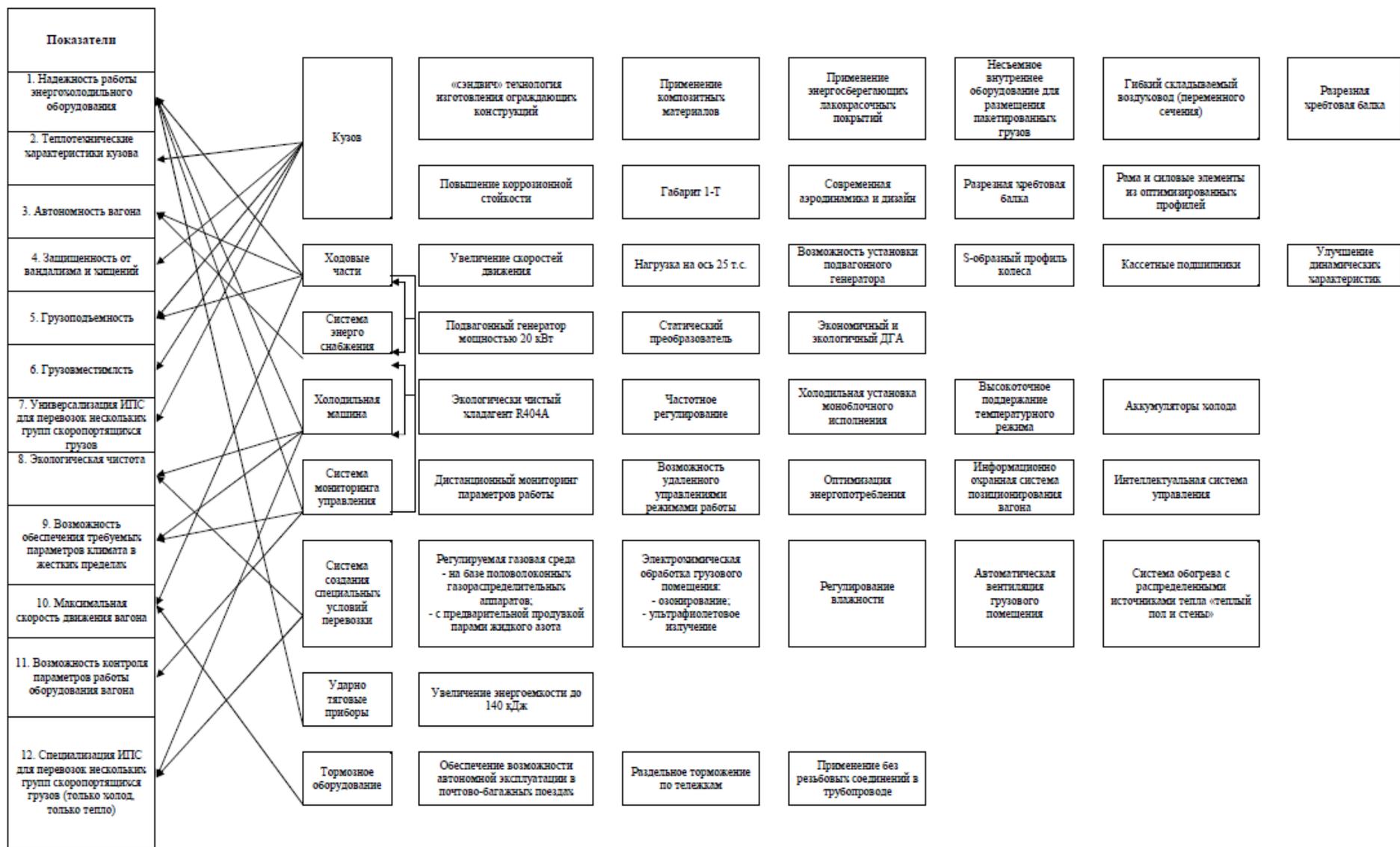


Рисунок 3 – Взаимосвязь функциональных подсистем рефрижераторного вагона

Движение воздуха рассматривается в канале прямоугольного сечения, который образуют обогреваемая стенка ГП, две вертикально установленные гофры внутренней обшивки и стенка штабеля из тары с перевозимыми продуктами. При этом приняты следующие допущения.

– Движение воздуха происходит в тонком пристеночном слое толщиной δ , который называют «пограничным слоем».

– Толщина слоя увеличивается по мере движения его вдоль пластины (т. е. $\delta = \delta(x)$ и значения этой функции растут с увеличением координаты x).

– Скорость движения воздуха как векторная величина направлена вдоль оси абсцисс, имеет одну проекцию ω_x , но численное значение этой величины изменяется вдоль координаты y . Непосредственно на поверхности пластины и на внешней границе пограничного слоя скорость воздуха ω_x считается равной нулю.

– Движение воздуха в пограничном слое можно считать установившимся, происходящим с постоянной, не меняющейся со временем скоростью.

– У движущегося в пограничном слое воздуха силы инерции пренебрежимо малы по сравнению с силами тяжести и вязкости.

– Градиент давления равен нулю, а плотность воздуха меняется с температурой по линейному закону. Остальные физические параметры остаются постоянными.

Получено решение для скорости движения воздуха вдоль канала

$$\omega_x(y) = \frac{\rho_0 g \beta \theta_c \delta^2}{\mu} \left\{ \frac{1}{12} \left[1 - \left(\frac{y}{\delta} \right)^3 \right] - \frac{1}{3} \left[1 - \left(\frac{y}{\delta} \right)^2 \right] + \frac{1}{2} \left[1 - \left(\frac{y}{\delta} \right) \right] \right\}. \quad (6)$$

Найдено выражение для толщины пограничного слоя

$$\delta = 4,23 \cdot \sqrt[4]{\frac{\mu \lambda x}{c_p \beta \rho_0^2 g \theta_c}}. \quad (7)$$

Получена зависимость изменения коэффициента теплоотдачи с высотой ГП:

$$\alpha = \frac{2\lambda}{\delta} = 0,473 \cdot \sqrt[4]{\frac{c_p \beta \rho_0^2 g \theta_c \lambda^3}{\mu x}}. \quad (8)$$

Полученное выше описание движения воздуха и коэффициент теплоотдачи позволили решить задачу нестационарной теплопроводности плоской стенки, для параллелепипеда – тела, ограниченного шестью плоскими поверхностями, которым можно считать плотный штабель перевозимого груза в коробках. Это решение выражается произведением температурных функций, рассчитанных для пластины

$$\frac{\theta(x, y, z, \tau)}{\theta_0} = \frac{\theta(x, \tau)}{\theta_{0x}} \cdot \frac{\theta(y, \tau)}{\theta_{0y}} \cdot \frac{\theta(z, \tau)}{\theta_{0z}}, \quad (9)$$

где сомножители $\frac{\theta(x, \tau)}{\theta_{0x}}$, $\frac{\theta(y, \tau)}{\theta_{0y}}$ и $\frac{\theta(z, \tau)}{\theta_{0z}}$ находятся согласно решению

$$\theta(x, \tau) = \theta_0 \sum_{i=1}^{\infty} \left[\frac{2 \sin \delta_i}{\delta_i + \sin \delta_i \cos \delta_i} \cos \left(\frac{\delta_i x}{s/2} \right) \right] \cdot e^{-\delta_i^2 \cdot Fo}. \quad (10)$$

Положив в равенстве (10) $x = 0$, получим функцию, характеризующую изменение со временем температуры в середине пластины:

$$\theta(0, \tau) = \theta_m(\tau) = \theta_0 \sum_{i=1}^{\infty} \left[\frac{2 \sin \delta_i}{\delta_i + \sin \delta_i \cos \delta_i} \right] \cdot e^{-\delta_i^2 \cdot Fo}. \quad (11)$$

для соответствующих значений x , y и z .

Задача построения математической модели теплофизических процессов решалась с использованием пакета ANSYS 12.0 и расчетной среды ANSYS FLUENT – платформы, объединяющей все инструменты инженерного моделирования ANSYS. Адаптивная архитектура позволяет пользователю выполнять любые действия от стандартного анализа течения жидкости или газа до обработки сложных взаимодействующих систем.

По предоставленной геометрии конструктивных элементов вагона со штабелем груза были построены две расчетные сетки: одна для варианта с греющим кабелем на полу и другая для варианта с греющим кабелем на полу и на стенках грузового помещения. Размерности сеток составили 50 млн. ячеек и 58 млн. конечных объемов соответственно. Расчетные сетки были сгущены в областях с ожидаемыми максимальными градиентами параметров потока: поверхность греющего кабеля, конструктивные элементы пола грузового отсека и т. д. Для достоверного моделирования градиентов температуры на поверхности греющего кабеля был построен слой призматических ячеек. Расчетная сетка показана на рисунке 4.

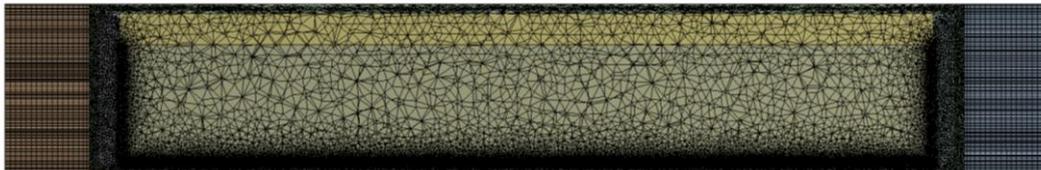


Рисунок 4 – Общий вид сетки в продольной плоскости грузового помещения

В целях достоверного моделирования конвекции были приняты следующие допущения – воздух задается как несжимаемый идеальный газ (плотность является функцией температуры), вязкость, теплоемкость и теплопроводность воздуха планируется задать константами, т. к. в ожидаемом диапазоне температур эти свойства изменяются незначительно.

Объем, занятый грузом, моделируется как твердое тело с изотропными теплофизическими свойствами. Для моделирования теплообмена через ограждающие конструкции грузового помещения был применен одномерный закон Рэлея, который предполагает наличие тепловых потоков внутри тонкой стенки только по нормали к ней. Модель вагона со штабелем груза представлена на рисунке 5.

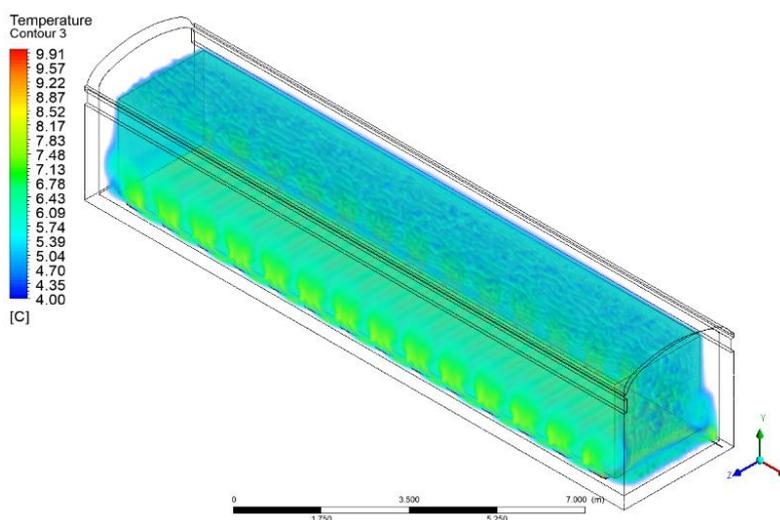


Рисунок 5 – Результаты моделирования нагретого до +6 °С вагона с фруктовым соком. Трехмерная модель ГП с изоляцией

Верификация результатов изменения среднеобъемной температуры для полной и двухмерной моделей предлагаемой системы обогрева грузового помещения изотермического вагона показала, что поставленные задачи:

- время прогрева порожнего вагона до +6 °С при различной температуре внешнего воздуха;
- время появления температур ниже 0 °С на внутренней поверхности ГП и зависимости минимальной температуры СПГ от температуры наружного воздуха;
- временные циклы работы нагревательного кабеля в грузе для различной внешней температуры;
- качественно соотносятся с экспериментальными данными, полученными в результате опытных перевозок с разницей не более 14,3 %.

График изменения температуры ГП и наружного воздуха от времени представлен на рисунке 6.

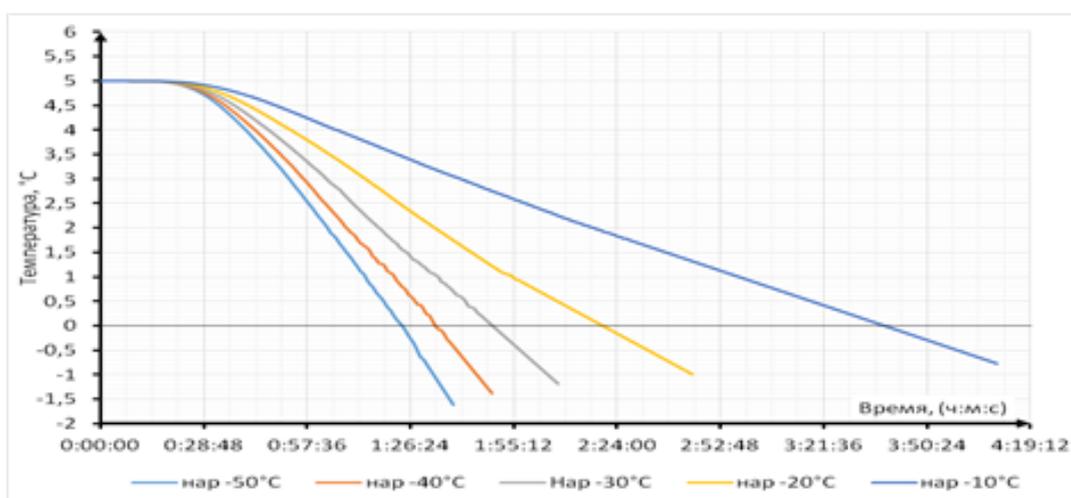


Рисунок 6 – Зависимость минимального значения температуры на внутренней поверхности стенок и пола ГП от времени остывания вагона

Кроме этого, была разработана математическая модель (рисунок 7) процесса охлаждения штабеля груза, в которой грузовое помещение изотермического вагона рассматривается как система циркуляции газового потока, обдувающего штабель груза, исходя из следующих предпосылок.

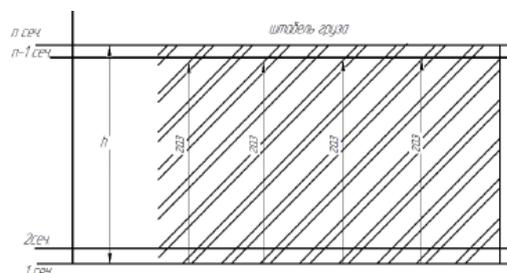


Рисунок 7 – Математическая модель взаимодействия штабеля продукта и проходящего через него газа

Штабель груза рассматривается как пористая среда и хладагент при прохождении через штабель груза находится в газообразном состоянии.

Процесс охлаждения груза рассматривается только в его внутреннем объеме. Влиянием фильтрации хладагента из пристенных каналов в боковую поверхность штабеля пренебрегаем, ввиду относительного большого гидравлического сопротивления штабеля. Ввиду малой разности давлений по высоте штабеля скорость проникновения газа через груз считаем постоянной.

Процесс прохождения газа через продукт, а также их тепловое взаимодействие, описывается системой дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} \frac{\delta T_{\text{п}}}{\delta t} = a \frac{\delta^2 T_{\text{п}}}{\delta x^2} - \gamma(T_{\text{г}} - T_{\text{п}}); \\ \frac{\delta T_{\text{г}}}{\delta t} = -v_r \frac{\delta T_{\text{г}}}{\delta x} + \gamma(T_{\text{г}} - T_{\text{п}}), \end{cases} \quad (12)$$

где $T_{\text{п}} = T_{\text{п}}(x, t)$ – температура продукта;

$T_{\text{г}} = T_{\text{г}}(x, t)$ – температура газа;

a – коэффициент температуропроводности продукта;

v_r – скорость газа;

γ – приведенный коэффициент теплоотдачи, который находится по формуле

$$\gamma = \frac{\alpha}{c \cdot p \cdot h}, \quad (13)$$

где α – коэффициент теплоотдачи «газ – продукт»;

c – удельная теплоемкость газа;

p – плотность газа;

h – высота штабеля продукта, через который проходит газ.

В начальный момент времени $t = 0$ температуры газа и продукта известны. Конечно-разностная схема расчетов представлена на рисунке 8.

Т.о. начальные условия:

$$\begin{cases} T_{\text{п}}(x, 0) = T_{\text{по}}; \\ T_{\text{г}}(x, 0) = T_{\text{го}}. \end{cases} \quad (14)$$

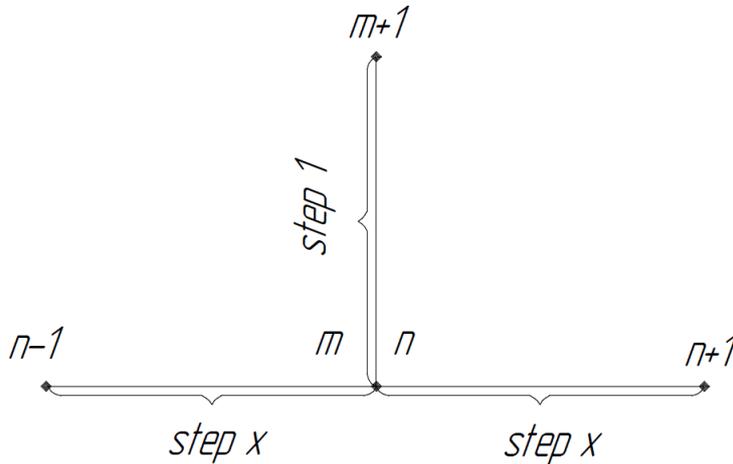


Рисунок 8 – Конечно-разностная схема расчетов. Граничные условия:

$$\begin{cases} -\lambda \frac{\delta T_{\text{п}}}{\delta x} \Big|_{x=0} = \alpha (T_{\text{г}} - T_{\text{п}}) \Big|_{x=0}; \\ -\lambda \frac{\delta T_{\text{п}}}{\delta x} \Big|_{x=h} = \alpha (T_{\text{г}} - T_{\text{п}}) \Big|_{x=h}; \\ T_{\text{г}}(x, t) \Big|_{x=0} = T_{\text{г1}}, \end{cases} \quad (15)$$

где λ – коэффициент теплопроводности продукта;
 α – коэффициент теплоотдачи «газ – продукт».

Сравнение расчетных температур газа и продукта с экспериментальными данными, полученными в опытных перевозках, показывает качественное совпадение результатов. Ошибка моделирования определялась в сечениях ГП вагона с установленными терморезисторами. Относительная ошибка моделирования в течение рассматриваемого периода не превышала 10–12 %.

В пятой главе представлены материалы по системам энергоснабжения для ИПС. С учетом особенностей развития контейнерных перевозок в современных условиях проанализированы варианты систем энергоснабжения холодильного оборудования.

Существующие системы электроснабжения ИПС не удовлетворяют современным требованиям по следующим причинам:

– нерациональное распределение энергии, связанное с неравномерностью ее расхода и отсутствием единого устройства управления всеми потребителями;

- высокие пиковые пусковые нагрузки на электрооборудование, связанные с одновременным включением мощных потребителей;
- избыточная установленная мощность асинхронных двигателей (АД) приводов компрессора, вентиляторов конденсатора и воздухоохладителя, вызванная необходимостью работы холодильных машин (ХМ) в форсированном режиме для быстрого охлаждения груза в вагоне.

Классификация возможных систем энергоснабжения для перспективного ИПС и средств доставки КРК предусматривает технические решения с применением вагонов дизель-электростанций (ДЭС), подвагонных генераторов, централизованного энергоснабжения от локомотива через высоковольтный статический преобразователь.

Важными критериями при выборе вариантов систем энергоснабжения АРВ являются компактность и ограниченность в весе установки и возможность обеспечения бесперебойной работы.

В качестве основной энергосиловой установки для выработки электроэнергии ИПС применяются дизель-генераторные агрегаты, работающие на дизельном топливе. Для исключения промежуточной экипировки дизельным топливом в пути следования рефрижераторный вагон должен иметь бортовые запасы топлива в количестве 1-1,5 т. Превышение этого количества приводит к уменьшению грузоподъемности вагона, которая зависит от веса специализированного оборудования. В этой связи были рассмотрены варианты систем энергоснабжения, которые могут использоваться для энергоснабжения разных типов РПС. Для повышения автономности работы АРВ без дозаправки целесообразно использование комбинированной энергосиловой установки, в которой для выработки электроэнергии используется дизель-генераторная установка (ДГУ) и подвагонный генератор, что позволяет использовать блочно-модульный принцип формирования энергохолодильного оборудования.

Генераторно-приводные установки с подвагонными генераторами различного типа давно используются для энергоснабжения пассажирских вагонов. Для изотермических вагонов они не использовались ввиду малой эффективности на низких скоростях движения вагонов в составе поезда, что не позволяло осуществлять энергоснабжение в течение всего времени перевозки.

В системе электроснабжения ИПС целесообразно использовать ВИГ. Это позволит реализовать следующие преимущества: обеспечит высокое значение КПД; даст возможность устанавливать величину напряжения на выходе и обеспечит возможность гибко перестраивать ее в случае любой модернизации электрооборудования ИПС; обеспечит выработку электроэнергии во всем диапазоне скоростей движения ИПС, в том числе на скоростях менее 25 км/ч. Простая конструкция ВИГ с безобмоточным ротором обеспечит высокую надежность эксплуатации. Применение управляемого электромагнитного возбуждения позволит получать стабилизированное выходное напряжение при изменении частоты вращения вала генератора в широком диапазоне. Источником возбуждения генератора служит аккумуляторная батарея, а в случае ее отсутствия используется принцип самовозбуждения.

В рамках работ по созданию нового ИПС, с возможностью эксплуатации в режиме безлюдных технологий, были разработаны две модификации ВИГ мощностью 16 и 20 кВт.

Эксплуатационные качества этих электрических машин в достаточной мере удовлетворяют тем жестким условиям, в которых работают электрические машины на железнодорожном транспорте, так как в процессе эксплуатации подвижного состава на изоляцию ВИГ и его элементы конструкции агрессивно воздействуют окружающая среда и значительные динамические нагрузки. Ввиду того, что ВИГ является обратимой электрической машиной перевод в двигательный режим осуществляется системой управления путем подачи импульсов питания в моменты времени, соответствующие двигательному режиму. Это может потребоваться, например, для перемещения вагонов-рефрижераторов на небольшие расстояния при погрузке-разгрузке. Питание в этом случае осуществляется от аккумуляторной батареи либо от внешнего источника.

Система управления, получая информацию от датчиков, осуществляет подачу управляющих импульсов на силовые транзисторы и обеспечивает стабильное напряжение на выходе генератора и его защиту от аварийных ситуаций. Многофазное исполнение ВИГ позволяет подключать к отдельным фазам преобразователь частоты для получения переменного напряжения.

Для определения динамических характеристик ВИГ были использованы следующие соотношения:

$$\frac{di}{dt} = \frac{1}{L_d(i, \theta)} \cdot \left(u - i \cdot R - \omega \cdot \frac{\partial \psi(i, \theta)}{\partial \theta} \right), \quad (16)$$

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{J} \cdot (M_\omega - M_c - b \cdot \omega), \quad (17)$$

где i – ток фазы, А; L_d – дифференциальная индуктивность фазы, Гн; u – выходное напряжение, В; R – активное сопротивление фазной обмотки, Ом; ω – частота вращения ротора, с⁻¹; ψ – потокосцепление фазы, Вб; θ – угол поворота ротора, эл. град; J – приведенный момент инерции ротора и других соединенных с ним вращающихся частей, кг·м²; M_ω – электромагнитный момент на валу, Н·м; M_c – момент сопротивления на валу ВИД, Н·м; b – коэффициент трения.

Мгновенный электромагнитный момент M_ω , произведенный каждой фазой, зависит от тока i и угла поворота ротора θ и может быть определен через производную коэнергии W_k :

$$M_\omega(i, \theta) = \left. \frac{\partial W_k(i, \theta)}{\partial \Theta} \right|_{i = \text{const}}. \quad (18)$$

Для снижения шума и вибраций генератор спроектирован с использованием методов оптимизации, для его управления использованы специальные алгоритмы управления.

Результаты экспериментальных исследований ВИГ на испытательном стенде представлены в таблице. Стабилизированное постоянное напряжение на

выходе ВИГ поддерживалось 540 В. Уровень напряжения выбран из расчета использования преобразователя частоты с выходным переменным трехфазным напряжением 380 В. Расчетные характеристики и стендовые испытания ВИГ позволяют сделать вывод о целесообразности его использования в составе электротехнического комплекса для электроснабжения ИПС.

Результаты измерений

Скорость движения ИПС, км/ч	Частота вращения ВИГ n , мин ⁻¹	Ток нагрузки I , А	Выходная мощность ВИГ P_2 , кВт	Примечание
21	500	11,3	16,76	режим S1
32	750	25,3	25,13	режим S1
53	1250	55	41,84	кратковременный
75	1750	62	51,13	кратковременный
96	2250	62	47,83	расчетный
120	2750	62	36,57	расчетный
140	3250	62	23,82	расчетный

Важными критериями при выборе вариантов систем энергоснабжения АРВ являются компактность и ограниченность в весе установки, поэтому возможности перевозки больших запасов топлива для основного источника электроэнергии ДГУ весьма ограничены. В качестве дополнительного источника электроэнергии при движении вагона со скоростью 700–1000 км/сут предполагается использование ВИГ, установленного на тележке типа КВЗ-И2.

Использование двух источников энергоснабжения позволит увеличить автономность и сократить эксплуатационные затраты перспективного рефрижераторного вагона, а также повысить его конкурентоспособность.

В этом случае в базовом вагонокомплексе в качестве источника энергоснабжения предложен дизель-генератор, работающий на двух видах моторных топлив – дизельном или сжиженном природном газе (СПГ). С целью снижения эксплуатационных затрат и повышения экологичности вагона выполнены компоновка элементов криогенной топливной системы и обоснование использования сжиженного природного газа для энергоснабжения холодильной установки рефрижераторного вагона.

Результаты расчетов позволяют определить необходимый бортовой запас различных видов топлива для разных вариантов исполнения системы энергоснабжения, учитывающий скорость движения вагона. Эти данные могут использоваться на начальном этапе как при проектировании АРВ, так и операторскими компаниями, осуществляющими транспортную деятельность на определенных маршрутах перевозок.

Таким образом, для систем энергоснабжения АРВ использование сжиженного природного газа в качестве моторного топлива и дополнительного источника холода газификации СПГ имеет перспективы за счет повышения автономности вагона и невозможности хищений топлива при эксплуатации его в режиме безлюдных технологий.

Снижение эксплуатационных расходов достигается за счет уменьшения стоимости топлива и использования удельной теплоты парообразования СПГ для охлаждения перевозимого СПГ. Использование генераторно-приводной установки с подвагонным генератором, в зависимости от скоростей движения грузового поезда на маршрутах значительной протяженности, позволит экономить дизель-генераторной установке вагона от 30 до 70 % топлива.

В шестой главе проведен анализ компоновочных решений расположения энергохолодильного оборудования существующих рефрижераторных вагонов. Использование агрегатированного энергохолодильного оборудования и модернизационный ресурс – эти два принципа положены в основу формирования универсальной конструкции кузова рефрижераторного вагона.

Основными значимыми показателями являются минимальная масса тары и максимальный полезный объем грузового помещения, т. к. именно эти параметры интересуют грузоотправителя при выборе типа ИПС для перевозки. Выбор конструктивного исполнения кузова изотермического вагона для обеспечения минимальной массы тары проводился по пяти вариантам, обусловленным компоновкой энергохолодильного оборудования. Варианты исполнения объяснялись необходимостью согласования технологии изготовления, местом размещения и количеством комплектов энергохолодильного оборудования и рационализацией массы тары. В процессе разработки были созданы объемные модели кузовов с рамами, оценены технико-экономические параметры вагона (полезный объем и длина грузового помещения), выполнены расчеты прочности с целью определения принципиальной возможности обеспечения нормативных показателей,

Схема обоснования выбора рационального технического решения основывается на рассмотрении следующих параметров:

- соответствие нормируемым параметрам прочности;
- технико-экономические параметры грузового помещения (полезный объем и площадь пола);
- металлоемкость;
- трудоемкость обслуживания холодильно-нагревательной установки (ХНУ).

Если первый параметр по соответствию условиям прочности имеет множество уже многократно апробированных методик с использованием МКЭ, то размеры грузового помещения существенным образом зависят от зоны расположения ХНУ. Основным определяющим фактором в этом случае является конструкция системы распределения и циркуляции термообработанного воздуха (СРЦВ).

В качестве рассмотрения для выбора рациональных схем расположения ХНУ в кузове рассматриваются варианты, которые ранее не использовались для РПС, но являются возможными и целесообразными с точки зрения расположения ХНУ и увеличения полезного объема грузового помещения.

Кузова для рефрижераторных вагонов должны иметь проемы для монтажа холодильного оборудования, и для дальнейшего анализа были выбраны три варианта компоновочных решений ХНУ.

1. В первом варианте на обеих торцевых стенах кузова имеются проемы для расположения моноблочных ХНУ. В этом случае целесообразно использование агрегатированной ХНУ, включающей в себя и дизель-генераторную установку. Обслуживание оборудования может осуществляться с навесной площадки над автосцепкой.

2. Во втором варианте две моноблочных ХНУ расположены в верхней части кузова, в крыше – по типу пассажирских вагонов с моноблочной установкой кондиционирования воздуха, но с обеих сторон кузова.

3. Моноблочная ХНУ располагается посередине крыши – по типу установки кондиционирования воздуха у скоростных пассажирских вагонов. В оболочке кузова есть проемы на крыше и в боковых стенах для погрузочных дверей. Здесь возможен подвариант: моноблок ХНУ с силовым каркасом над дверным проемом металлический, а в обе стороны от него крепятся две композитные панели крыши.

Преимуществом такого решения является агрегатирование, резервирование холодопроизводительности, дублирование ХНУ, возможность быстрой смены агрегата. Отказ от машинного помещения позволит снизить массу металлоконструкции кузова примерно на 500 кг за счет уменьшения числа торцевых перегородок-стен.

Для обеспечения максимального объема грузового помещения необходимо реализовать наибольшие линейные размеры кузова с учетом оптимального размещения воздухопроводов, испарителей, напольных решеток, элементов системы воздухораспределения в грузовом помещении.

Расчет вариантов исполнения кузова произведен методом конечных элементов на основе использования системы расчета и проектирования механических конструкций и оборудования в области машиностроения «АРМ WinMachine». Разработка конечно-элементной модели кузова вагона осуществлялась на основании комплекта конструкторской документации.

Конечно-элементная модель кузова и рамы вагона представляет собой пространственную пластинчатую расчетную систему, образованную трех- и четырехузловыми изотропными пластинчатыми элементами, учитывающими все внутренние силовые факторы (мембранные, сдвиговые, поперечные и изгибные) и позволяющими моделировать пластины значительной толщины. Общее количество пластинчатых элементов вагона составило 120 142. Элементы объединены в 117 276 узлах, число степеней свободы конечно-элементной модели составляет 703 656. Закрепление модели в пространстве осуществляется путем введения связей в вертикальном и поперечном направлениях, по опорной поверхности пятника.

В расчетной модели хребтовая, концевые, шкворневые, боковые и поперечные балки рамы, элементы кузова и обшивы представлены в виде пластин с соответствующими толщинами.

Хребтовая балка рамы вагона изготовлена из стали класса прочности 375 ($\sigma_t = 375$ МПа), остальные несущие элементы металлоконструкции вагона изготавливаются из стали класса прочности 345 ($\sigma_t = 345$ МПа).

Анализ результатов расчетов по всем трем вариантам размещения ХНУ показал достаточную прочность и возможность относительно простой модернизации имеющейся металлоконструкции кузова изотермического вагона. Вместе с тем в качестве мер по усилению узлов металлоконструкции кузова предложено при установке на крыше по периметру дополнительное усиление крыши продольными элементами, развитое на 2–3 соседних дуги, что необходимо для более равномерного включения в работу других несущих элементов крыши и боковин. Результаты прочностных расчетов показали следующие значения массы металлоконструкции кузова: 1-й вариант – 9940 кг, 2-й вариант – 9880, 3-й вариант – 9870 кг.

Для определения рациональной конструктивной схемы был применен метод анализа иерархий (МАИ), разработанный Т. Саати. Из трех рассматриваемых вариантов был осуществлен выбор рационального на основании поэтапного исследования с использованием следующих критериев: металлоемкость, прочность кузова, удобство эксплуатации, полезный объем кузова. Схема обоснования рационального варианта компоновок представлена на рисунке 9.

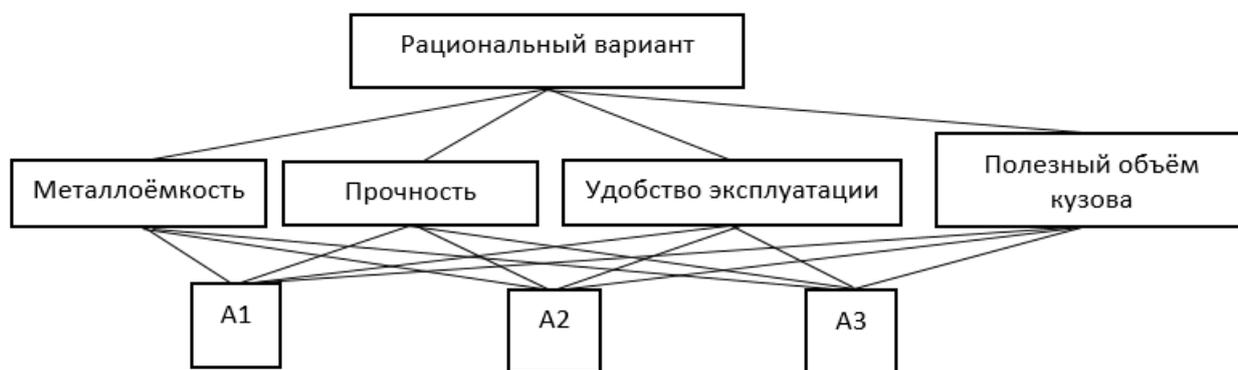


Рисунок 9 – Схема обоснования рационального варианта

Согласно расчетам, выполненным по этой методике, для установления приоритетности сравниваемых альтернатив необходимо вычислить правый собственный вектор матрицы, соответствующий максимальному собственному числу. Альтернатива третьего варианта показала больший «вес» приоритета, что свидетельствует о его преимуществах и увеличении полезного объема, при одинаковой длине кузова, довести полезный объем до 130 м^3 . Исполнение компоновки холодильного оборудования при центральном крышевом расположении представлено на рисунке 10.

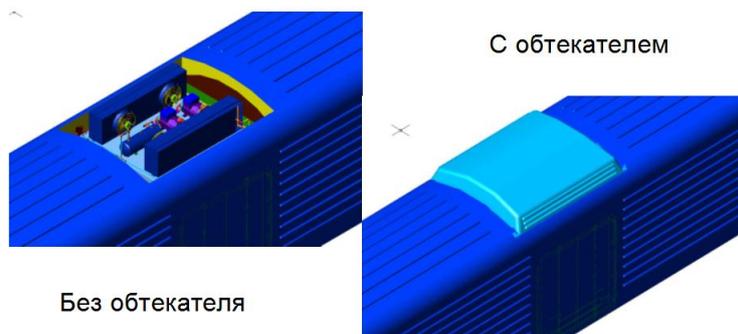


Рисунок 10 – Расположение холодильного оборудования при крышевом исполнении

Для случая использования жидкого азота для охлаждения груза в вагоне-термосе рассмотрены вопросы прочности кузова. Суть проблемы заключается в том, что жидкий азот при испарении в грузовом помещении увеличивает свой объем в 400–500 раз. При этом необходимо определить максимально допустимую скорость охлаждения с учетом восприятия холода грузом с учетом его теплофизических свойств. Рост давления внутри вагона (с учетом нормируемых показателей герметичности 50 Па) приводит к увеличению напряженно-деформированного состояния кузова вагона, поэтому для его оценки выполнен расчет напряженно-деформированного состояния (НДС) кузова изотермического вагона (ИВ) от воздействия парожидкостной смеси азота при захолаживании груза в грузовом помещении ИВ.

При увеличении давления наибольшие напряжения проявляются в элементах дверного проёма и, далее, на верхней обвязке торцевой стены.

Изменения НДС в зависимости от давления в грузовом помещении представлены на рисунке 11.

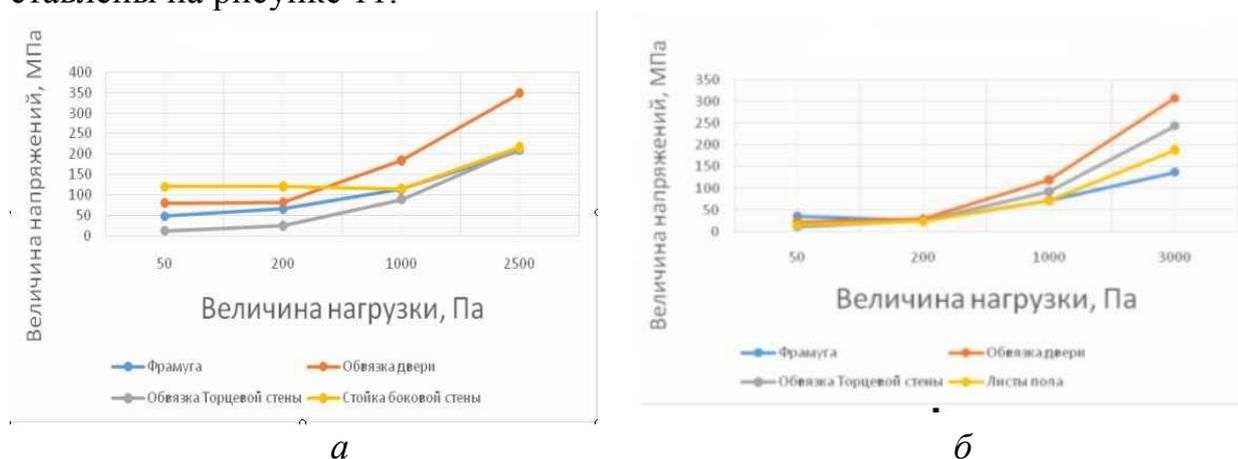


Рисунок 11 – Диаграммы напряжений в узлах кузова при создании избыточного давления:

а – грузовой вагон; *б* – порожний вагон

Выполненные расчеты показывают, что при нормируемой плотности кузова изотермического вагона в 50 Па для порожнего вагона величины предельных напряжений во фрамуге не превышают 10 %, а в обвязке двери 6,4 %. При

повышении давления до 3000 Па в обвязке двери возникают предельно допустимые напряжения (308 МПа).

При повышении давления в грузовом помещении вагона с замороженным грузом, при нормируемой плотности 50 Па, максимальные напряжения возникают в боковых стойках кузова (120 МПа), что составляет 35 % от нормируемого значения. При повышении давления до 2500 Па в обвязке двери возникают напряжения (349 МПа), превышающие допустимые.

Для исключения случаев возникновения повышенного давления в вагоне при захолаживании груза жидким азотом превышение над номинальным расчетным давлением в грузовом помещении должно регулироваться работой предохранительного клапана, который рассчитан на давление 50 Па с обеспечением необходимого запаса площади проходного сечения в нем.

В седьмой главе представлен комплексный анализ состояния исследований и разработок ходовых частей для ИПС. Рассмотрены особенности конструкций грузовых тележек различного назначения, грузоподъемности и скорости движения в рамках существующих нормативных документов. Четыре группы тележек предназначены для различных типов подвижного состава. В главе показана эволюция автономных систем энергоснабжения вагонов с подвагонными генераторами, которая эволюционировала от первых плоскоременных передач к клиноременным, текстропным редукторно-карданным, редукторно-карданным. Таким образом, задача определения наиболее рациональных ходовых частей для ИПС в данной части работы решалась путем оценки динамических качеств вагона с тележками выделенных классов с учетом возможной установки на них приводов генератора для автономной системы энергоснабжения. Для решения поставленной задачи использовались методы математического моделирования и экспериментальные исследования.

Модернизация тележки КВЗ-И2 включает в себя комплекс конструктивных мероприятий по установке на раме тележки подвагонного генератора с текстропным приводом от средней части оси типа ТСО-20. Ось колесной пары оборудуется разъемным ведущим шкивом. По исходным техническим требованиям и техническому заданию, выполненным с участием автора, в ПКБ ЦВ был разработан комплект рабочей конструкторской документации, а в ЗАО НО ТИВ выполнены работы по модернизации тележки КВЗ-И2 в части оснащения ее текстропным приводом от средней части оси типа ТСО-20. Для обеспечения работы генератора при движении в составе грузовых поездов была спроектирована и изготовлена генераторно-приводная установка, позволяющая выходить на номинальную мощность со скорости движения 25 км/ч.

Разработана компьютерная модель в программе «Универсальный механизм» для исследования колебаний вагона с тележками КВЗ-И2 и текстропным приводом подвагонного генератора учитывает нелинейные свойства тележки КВЗ-И2. Узел «пятник – подпятник» моделируется с помощью контактного взаимодействия. Зазоры в элементах конструкции описываются кусочно-линейными функциями вида $f(x) = cx + \frac{1}{2}c(|x - a| - |x + a|)$, где a – ширина зазо-

ра; c – контактная жесткость. Силовая характеристика рессоры Галахова учитывала гистерезис, обусловленный силами сухого трения.

Получен ряд собственных частот колебаний вагона до 30 Гц, который выглядит следующим образом: 0,59; 1,27; 2; 2,15; 3,89; 6,02; 7,53; 7,64; 9,11; 9,31; 9,51; 10,04; 10,89; 10,98; 13,04; 14,18; 27,59; 28,4. Установлено, что закрепление генератора на концевой балке тележки приводит к тому, что колебания становятся взаимосвязанными, например подпрыгивание и галопирование рамы тележки.

В работе выполнено моделирование системы подвешивания генератора в текстропном приводе от средней части оси колесной пары с учетом возможных изменений конструктивных параметров. Определены собственные частоты колебаний генератора для трех вариантов конструкции, которые составили 6,63305 Гц, 8,23809 Гц, 8,55098 Гц, и найдены области параметрического резонанса. Разработанная в программе Simpack компьютерная модель системы подвешивания генератора позволяет проводить расчеты вариантов конструкций с использованием различных моделей возмущений со стороны рамы тележки.

Получено уравнение колебаний генератора при гармоническом возмущении со стороны рамы тележки в виде

$$\ddot{\varphi} + \omega_0^2(1 + 2\mu \cos \omega t)\varphi = 0, \quad (19)$$

где $2\mu = \frac{z_o \omega^2}{l \omega_n^2}$, $\omega_0^2 = \frac{g}{l} + \frac{c}{m}$.

c – приведенная жесткость комплекта ремней и натяжного устройства; m – масса генератора, что позволяет аналитически определить зоны параметрического резонанса колебаний генератора.

Проведен сравнительный анализ динамических качеств ходовых частей пассажирского и грузовых вагонов с использованием экспериментальных данных, полученных автором и другими исследователями, а также средств математического моделирования. С помощью математического моделирования исследованы динамические качества рефрижераторного вагона с тележками типа КВЗ-И2, центральная ступень подвешивания которых имела упруго-диссипативные связи, соответствующие стандартным рессорам, их характеристика варьировалась коэффициентом относительного трения. Кроме того, отдельно моделировался случай с линейными упругими и диссипативными связями в центральной ступени.

На графиках, представленных на рисунках 12 и 13, отражены результаты экспериментов и математического моделирования. Экспериментальные данные представлены жирными кривыми, моделирования – тонкими, в случае линейного относительно скорости деформации рессорного подвешивания гасителя колебаний линии – штриховые.

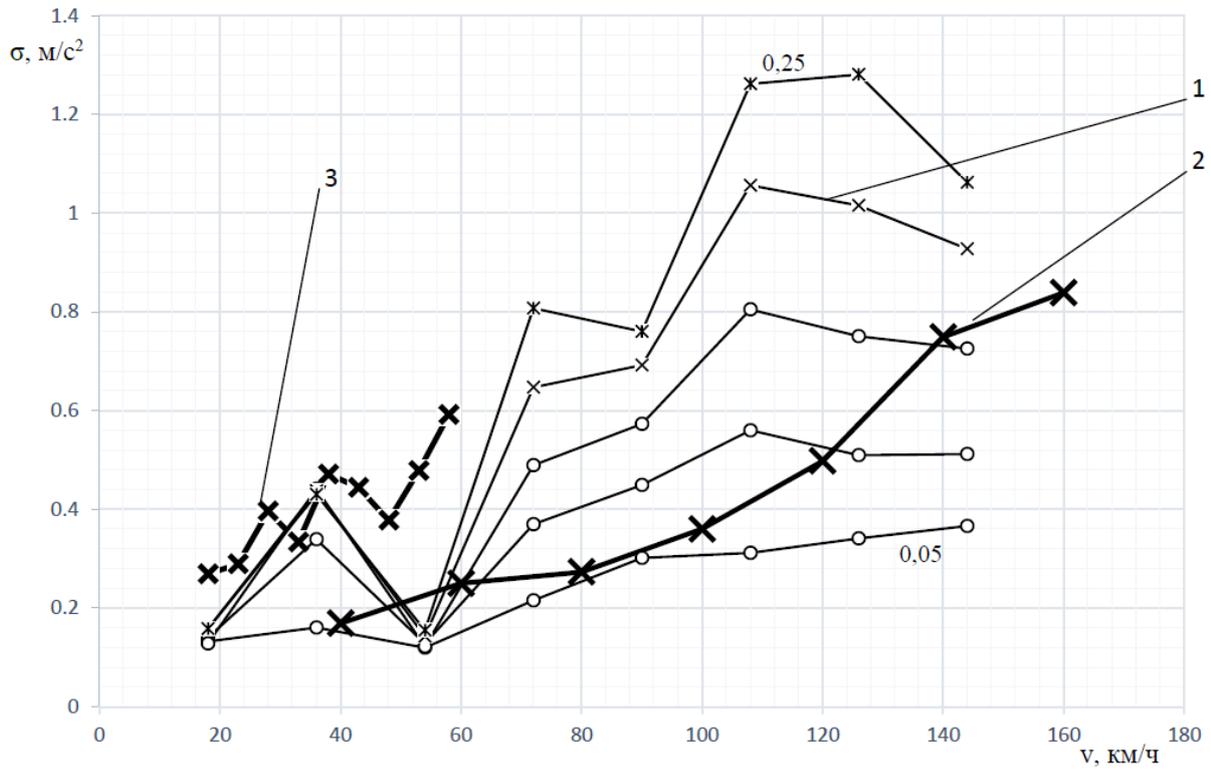


Рисунок 12 – Стандартное отклонение ускорений вагонов:
 1 – семейство кривых на основе нелинейной модели; 2 – экспериментальные данные пассажирского вагона; 3 – экспериментальные данные ДЭС

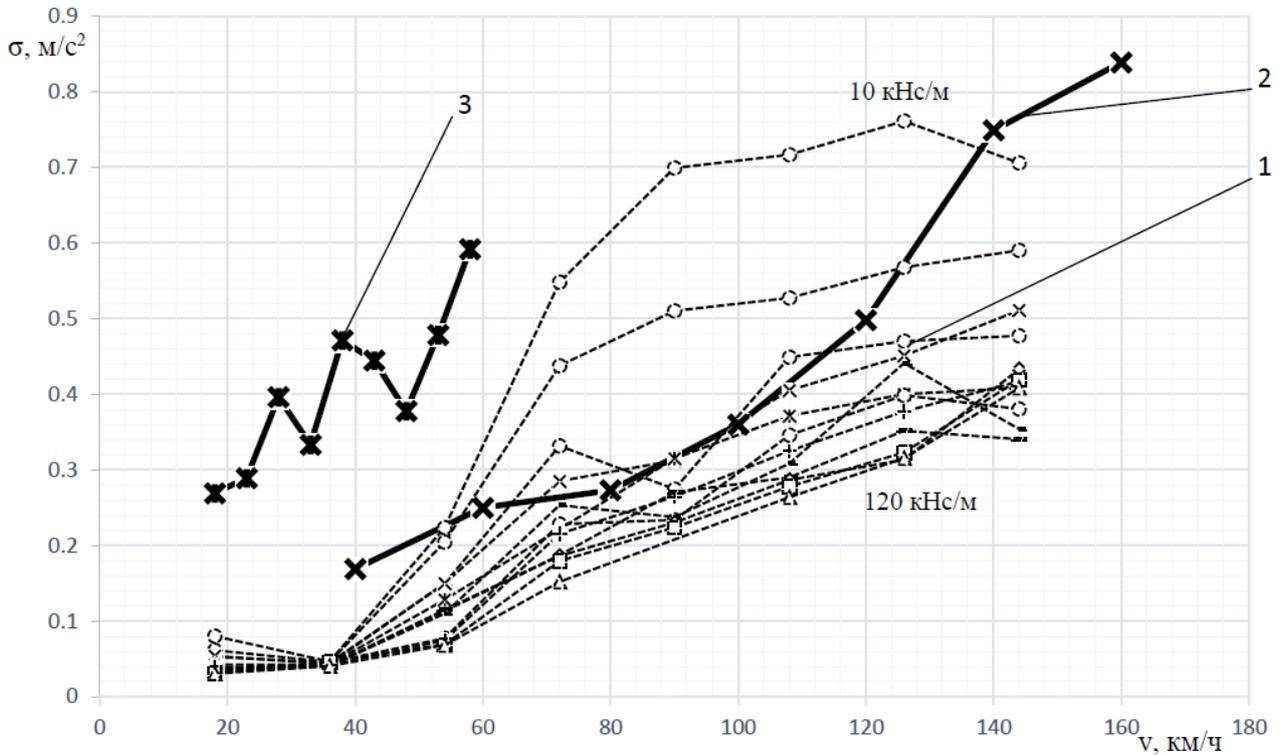


Рисунок 13 – Стандартное отклонение ускорений вагонов:
 1 – семейство кривых на основе линейной модели; 2 – экспериментальные данные пассажирского вагона; 3 – экспериментальные данные ДЭС

В линейной постановке демпфирование варьировалось в интервале 10–120 кНс/м с шагом 10 кНс/м, в нелинейной постановке варьировался коэффициент относительного трения в интервале 0,05–0,25 с шагом 0,05. Разработанные математические модели при анализе экспериментальных данных вагонов позволяют получить своего рода базис, который делает возможным сравнение разнородных данных.

Экспериментальные значения у ДЭС выше, чем у пассажирского вагона, что объясняется намного более мягким рессорным подвешиванием. В отдельных случаях результат моделирования указывает на то, что у изотермического вагона уровень ускорений может быть ниже, чем у пассажирского вагона. Близкие значения ускорений пассажирского и изотермического вагонов получены в интервалах коэффициента относительного трения 0,05–0,1 и демпфирования 30–120 кНс/м.

Моделирование и экспериментальные данные указывают на разницу динамических процессов, проходящих в середине (в центре масс) вагона и над подпятником или шкворневой балкой. Имеет место повышение амплитуд колебаний над подпятником при скоростях до 40 км/ч и снижение до первоначального уровня на скорости 50 км/ч, тогда как в середине вагона такого явления не наблюдается. При увеличении значения коэффициента относительного трения наблюдается повышение амплитуд колебаний на скорости около 70 км/ч.

На основании проведенных экспериментальных и теоретических исследований динамических качеств тележек можно сделать следующие выводы.

Для изотермических вагонов-термосов, не имеющих энергоохладительного оборудования, целесообразно использование трехэлементных тележек грузовых тележек 2-го или 3-го типов. Использование увеличенной осевой нагрузки инновационных моделей этих тележек до 25 т позволит повысить грузоподъемность вагона.

Тележка КВЗ-И2 со сварной рамой для рефрижераторных вагонов, благодаря двойному рессорному подвешиванию, по динамическим качествам занимает промежуточное положение между пассажирскими и грузовыми тележками. Преимуществом конструкции тележки является возможность ее модернизации в части оснащения ее генераторно-приводной установкой, что позволит оснастить вагон автономной системой энергоснабжения и повысить его эксплуатационные качества.

Автономная система энергоснабжения на основе текстропного привода вагонного генератора усложняет динамические процессы.

Установлено, что размещение генератора на концевой балке тележки и смещение из-за этого центра масс приводят к взаимному влиянию колебаний тележки и генератора. Генератор с шарнирной подвеской в ряде случаев может служить своего рода динамическим гасителем колебаний. Маятниковая подвеска генератора обуславливает возникновение параметрических резонансов, что, разумеется, нужно учитывать при проектировании привода.

В приложении представлены расчеты экономического эффекта от применения автономного комплекса энергоснабжения на базе подвагонного ге-

нератора для фитинговой платформы и изотермического отапливаемого и рефрижераторного вагонов.

Заключение

1. В результате анализа современного состояния ИПС в целом, конструкций энергохолодильного оборудования вагонов и технологий транспортировки СПГ сформулирована концепция разработки нового ИПС и средств доставки крупнотоннажных рефрижераторных контейнеров с применением структурно-технологической модернизации.

2. Сформулированы критерии и, с использованием метода экспертных оценок, определены приоритеты требований к техническим параметрам функциональных систем ИПС нового поколения, позволяющие разработать (сформулировать) универсальную концепцию функционирования.

3. Для повышения технологической, эксплуатационной и экономической эффективности предложена единая модульная платформа унифицированного изотермического кузова, позволяющая реализовывать на ее основе различные типы изотермических вагонов.

4. Предложен, обоснован и апробирован комплекс технических и технологических решений для систем термостабилизации и энергоснабжения, позволяющий реализовывать на базе основного вагонокомплекта, исполненного с высоким модернизационным ресурсом, изотермический вагон требуемой комплектации и с заданными техническими параметрами, обеспечивающими потребительские качества в максимальной степени соответствующими требованиям рынка транспортных услуг.

5. Теоретическое моделирование и экспериментальные исследования, а также опытно-конструкторские работы позволили довести до практического использования предложенные в работе следующие технические решения:

- модернизированную тележку КВЗ-И2 с генераторно-приводной установкой (проект ПКБ ЦВ М.1825.000);
- вентильно-индукторный подвагонный генератор с системой управления;
- азотную систему охлаждения для вагона-термоса (проект ПКБ ЦВ М15.01.00.00.000 ПВ);
- систему обогрева «теплый пол».

6. Численное моделирование термообработки штабеля груза с помощью жидкого азота показало качественное совпадение с экспериментальными результатами – относительная погрешность составляла 10–12 %.

7. Верификация результатов изменения среднеобъемной температуры для полной модели вагона и двухмерной модели предлагаемой системы обогрева грузового помещения изотермического вагона показала, что поставленные задачи:

- время прогрева порожнего вагона до +6 °С при различной температуре внешнего воздуха;

– время появления температур ниже 0 °С на внутренней поверхности ГП и зависимости минимальной температуры СПГ от температуры наружного воздуха;

– временные циклы работы нагревательного кабеля в грузе для различной внешней температуры

– качественно соотносятся с экспериментальными данными, полученными в результате опытных перевозок. Максимальная погрешность отклонения графиков составила не более 14,3 %.

8. Рассмотрены параметры и варианты систем энергоснабжения для автономных изотермических вагонов на базе генераторно-приводной установки и с использованием сжиженного газа в качестве альтернативы дизельному топливу, даны рекомендации по их применению.

9. На основании моделирования и экспериментальных исследований ходовых частей грузовых вагонов различного типа рекомендовано для вагонов-термосов, не имеющих энергоохладительного оборудования, использование грузовых тележек 2-го или 3-го типов. Для рефрижераторных вагонов с энергоохладительным оборудованием целесообразно применение грузопассажирских тележек с возможностью модернизации в части оснащения их генераторно-приводными установками.

10. Проанализированы зависимости прочности различных вариантов базовых металлоконструкций кузова изотермического вагона от компоновки энергоохладительного оборудования. При использовании в качестве хладагента жидкого азота определено местоположение и получены предельные значения допустимых напряжений кузова.

Для исключения случаев возникновения повышенного давления в вагоне при захолаживании жидким азотом номинальное давление в грузовом помещении должно регулироваться предохранительным клапаном, рассчитанным на давление 50 Па. В случае повышения давления до 2500 Па в верхней обвязке погрузочной двери возникают напряжения (349 МПа) превышающие допустимые.

По результатам диссертационной работы сформулированы рекомендации по развитию научных исследований, дальнейшему совершенствованию технических решений и внедрению современных технологий в конструкцию инновационного изотермического подвижного состава.

Статьи в ведущих рецензируемых научных журналах и изданиях, входящих в перечень ВАК Минобрнауки РФ

1. Перспективы развития изотермических вагонов / А. Д. Петрушин, О. А. Ворон, А. В. Коковихин, Ю. П. Смачный // Железнодорожный транспорт. – 2001. – № 5. – С. 53–56. – ISSN 0044-4448.

2. Петрушин, А. Д. Оптимизация динамических режимов асинхронных электроприводов / А. Д. Петрушин, О. А. Ворон, С. С. Ковалев // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2002. – № 3. – С. 57–60. – ISSN 0201-727X.

3. Ворон, О. А. Автономный рефрижераторный вагон нового поколения / О. А. Ворон // Тяжелое машиностроение. – 2004. – № 9. – С. 36–40. – ISSN 1024-7106.
4. Модернизация холодильного оборудования вагона-ресторана / О. А. Ворон, М. Г. Украинцев, Р. А. Фролов, Д. М. Федоркив // Холодильная техника. – 2005. – № 8. – С. 30–32; № 10. – С. 42–44. – ISSN 0023-124X.
5. Петрушин, А. Д. Вентильно-индукторные машины для железнодорожного подвижного состава / А. Д. Петрушин, О. А. Ворон, Ю. П. Смачный // Вестник ВЭЛНИИ. – 2005. – № 1(48). – С. 147–159. – ISSN 1816-1928.
6. Генераторно-приводные установки автономных рефрижераторных вагонов и фитинговых платформ для перевозки скоропортящихся грузов / О. А. Ворон, С. Л. Самошкин, С. А. Соловьев, О. С. Самошкин // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2009. – № 2(34). – С. 23–29. – ISSN 0201-727X.
7. Подвагонный вентильно-индукторный генератор / О. А. Ворон, Н. В. Гребенников, А. А. Зарифьян, А. Д. Петрушин // Вестник ВЭЛНИИ. – 2009. – № 1(57). – С. 132–143. – ISSN 1816-1928.
8. Анализ мультимодальных перевозок сжиженного природного газа и перспективные маршруты его транспортировки / О. А. Ворон, В. И. Колесников, А. Н. Гуда, Н. С. Флегонтов // Бюллетень транспортной информации. – 2009. – № 10(172). – С. 3–12. – ISSN 2072-8115.
9. Развитие технологии перевозок сжиженного природного газа (СПГ) и перспективные маршруты его транспортировки / В. И. Колесников, Н. С. Флегонтов, А. Н. Гуда, О. А. Ворон // Автогазозаправочный комплекс + альтернативное топливо. – 2010. – № 2(50). – С. 18–27. – ISSN 2073-8323.
10. Аверков, Н. К. Концепция разработки и создания изотермических транспортных средств нового поколения / Н. К. Аверков, О. А. Ворон, С. Н. Науменко // Вестник ВНИИЖТ. – 2011. – № 1. – С. 29–32. – ISSN 2223-9731.
11. Voron, O. A. Design and Creation Concept for a Next Generation of Isothermal Rolling Stock / O. A. Voron, N. K. Averkov, S. N. Naumenko // VNIIZhT Bulletin. – 2011. – Iss. 2. – P. 34–37.
12. Ворон, О. А. Аспекты совершенствования железнодорожных перевозок СПГ в составе непрерывной холодильной цепи / О. А. Ворон, И. Г. Морчиладзе // Транспорт Российской Федерации. – 2014. – № 1(50). – С. 40–45. – ISSN 1994-831X.
13. Коршунов, С. Д. Комплексные испытания, оценка несущей способности и остаточного ресурса специализированного пассажирского вагона / С. Д. Коршунов, О. А. Ворон // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2014. – № 1(53). – С. 8–13. – ISSN 0201-727X.
14. Ворон, О. А. Фитинговые платформы с автономной системой электроснабжения – инновационный подвижной состав для перевозки скоропортящихся грузов / О. А. Ворон, С. Л. Самошкин, П. Ю. Семенов // Транспорт Российской Федерации. – 2015. – № 3(58). – С. 7–9. – ISSN 1994-831X.

15. Ворон, О. А. Моделирование колебаний вагона с тележками КВЗ-И2 и текстропным приводом подвагонного генератора / О. А. Ворон, Ю. П. Булавин, И. В. Волков // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2016. – № 3(63). – С. 14–22. – ISSN 0201-727X.

16. Ворон, О. А. К вопросу выбора ходовых частей для перспективного изотермического подвижного состава / О. А. Ворон, Ю. П. Булавин, И. В. Волков // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2018. – № 4(72). – С. 63–70. – ISSN 0201-727X.

17. Ворон, О. А. Автономная система электроснабжения изотермического подвижного состава / О. А. Ворон, А. Д. Петрушин, В. Г. Щербаков // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2019. – Т. 62, № 2. – С. 36–40. DOI 10.17213/0136-3360-2019-2-36-40.

18. Ворон, О. А. Использование сжиженного природного газа в комбинированной энергосиловой установке автономного рефрижераторного вагона / О. А. Ворон // Вестник ВНИИЖТ. – 2019. – Т. 78, № 3. – С. 188–192. – DOI 10.21780/2223-9731-2019-78-3-188-192.

19. Ворон, О. А. Актуализация технических решений для изотермического подвижного состава при перевозках скоропортящихся грузов / О. А. Ворон // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2020. – № 1(77). – С. 56–65. – ISSN 0201-727X.

20. Ворон, О. А. Использование метода актуализации технических решений для создания модели функционального взаимодействия систем автономного рефрижераторного вагона / О. А. Ворон // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2021. – № 2(82). – С. 86–94. – DOI 10.46973/0201-727X_2021_2_86.

21. Ворон, О. А. Особенности конструкции универсального кузова для инновационных изотермических вагонов / О. А. Ворон // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2021. – № 8(105). – С. 77–86. – DOI 10.30987/1999-8775-2021-8-77-86.

22. Ворон, О. А. Возможности использования криогенных технологий для инновационного изотермического подвижного состава / О. А. Ворон – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2021. – № 2(46). – С. 53-62. – ISSN 2220-4245.

23. Ворон, О. А. О методологии исследования потребностей развития транспортной инфраструктуры и подвижного состава для перевозок скоропортящихся грузов / О. А. Ворон // Мир транспорта. – 2021. – № 3(94). – С. 6-15. – ISSN 1992-3252.

Статьи в изданиях, индексируемых в международных базах Scopus и Web of Science

24. Voron, O. A. Self-contained refrigerator car of new generation / O. A. Voron // Tyazheloe Mashinostroenie. – 2004. – No. 9. – P. 36–40.

25. Modeling of the Cryogenic Section's Dynamics of an Experimental GAS-Diesel Locomotive / I. V. Volkov, Yu. P. Bulavin, V. V. Shapovalov, O. A. Voron //

International Journal of Applied Engineering Research. – 2017. – Vol. 12, No. 22. – P. 11885–11890. – ISSN 0973-4562. – URL: <http://www.ripublication.com>

26. Voron, O. A. Modelling the dynamics of an undercar generator with a v-belt drive of an isothermal railway vehicle / O. A. Voron, Y. P. Bulavin, I. V. Volkov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2020. – Vol. 709. – P. 033094.

27. Voron, O. A. Improving the Energy Efficiency of Electric Machines for Specialized Railway Rolling Stock / O. A. Voron, A. D. Petrushin // Proceedings of 18th International Scientific Technical Conference Alternating Current Electric Drives, ACED 2021 – 2021. – Art. no. 9462273. DOI 10.1109/ACED50605.2021.9462273.

Монографии

28. Матяш, Ю. И. Рефрижераторный подвижной состав: проблемы и пути их решения : монография / Ю. И. Матяш, В. П. Клюка, О. А. Ворон. – Омск : Омский научный вестник, 2014. – 264 с. – ISBN 978-5-91306-058-7.

29. Матяш Ю.И., Клюка В.П., Ворон О.А., Науменко С.Н. Хладотранспорт и основы теплотехники: монография. — Москва : ФГБУ ДПО «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2019. – 360 с. - ISBN 978-5-907055-92-6. – URL: <http://umczdt.ru/books/43/232064>.

Патенты на изобретения

30. А. с. 1495609 СССР, МКИ F25D3/10. Устройство для ввода хладагента в камеру охлаждения / Г. В. Калитенко, А. П. Косинов, О. А. Ворон (СССР). – № 4276294/27-13 ; заявл. 06.07.87 ; опубл. 23.07.89, Бюл. № 27. – 2 с. : ил.

31. А. с. 1597504 СССР, МКИ F25D3/10. Холодильник для продуктов / О. А. Ворон, В. Д. Карминский, А. М. Сидоров, К. Б. Комиссаров, Е. Д. Шарденков, Е. Б. Ферштер (СССР). – № 4468392/27-13 ; заявл. 29.07.88 ; опубл. 07.10.90, Бюл. № 37. – 3 с. : ил.

32. А. с. № 1597503 СССР, МКИ F25D3/10, 17/06. Холодильная камера / В. Д. Карминский, А. М. Сидоров, О. А. Ворон, К. Б. Комиссаров, Е. Б. Ферштер (СССР). – № 4468391/40-13 ; заявл. 29.07.88 ; опубл. 07.10.90, Бюл. № 37. – 4 с.

33. А. с. № 1645795 СССР, МКИ F25D3/10, B60 P3/20. Холодильная камера / О. А. Ворон, В. Д. Карминский, А. М. Сидоров, К. Б. Комиссаров, Е. Б. Ферштер (СССР). – № 4497558/13 ; заявл. 23.10.88 ; опубл. 30.04.91, Бюл. № 16. – 4 с. : ил.

34. Патент МКИ 21184885 RU. А 01 F 25/00. Способ хранения скоропортящихся продуктов / О. А. Ворон, В. М. Алексенко. – № 96109687/13 (015244) ; заявл. 12.05.96 ; опубл. 10.09.98, Бюл. № 25.

35. Патент № 44595, МПК В 60 Н 1/32. Контейнер-термос с охлаждением / О. А. Ворон, Д. О. Губарев, С. Н. Науменко, Н. Н. Губарева, А. Г. Резников. – № 2004131756 /22 ; заявл. 03.11.04 ; опубл. 27.03.05, Бюл. № 9.

36. Патент № 45684, МПК В 60 Р 3/20, В 60 Н 1/32. Универсальный контейнер-термос / О. А. Ворон, Д. О. Губарев, С. Н. Науменко, А. Г. Резников. – № 2004131757/22 ; заявл. 03.11.04 ; опубл. 27.03.05, Бюл. № 15.

37. Патент № 86060 U1, МПК НО2Р9/36, НО2К29/06. Система управления вентильно-индукторным генератором / О. А. Ворон, Н. С. Теймуразов, А. Д. Петрушин. – № 2009112177/22 ; заявл. 02.04.09 ; опубл. 20.08.09, Бюл. № 23.

38. Патент № 2390905 С1, МПК НО2К15/00, НО2К15/12. Способ изготовления вентильно-индукторного генератора / О. А. Ворон, Н. С. Теймуразов, А. Д. Петрушин. – № 2009114422/09 ; заявл. 17.04.09 ; опубл. 27.05.10, Бюл. № 15.

39. Патент № 2 621 834, МПК В 60 Р 3/00 Отапливаемое транспортное средство (преимущественно вагон) / О. А. Ворон, А. В. Селезнев, А. В. Соломин. – № 2015149202. 16.11.2015 ; заявл. 16.11.2015; опубл. 07.06.17, Бюл. № 16.

40. Патент №2 724 029, СПК В61D 27|00 Система обогрева бытовых помещений транспортных средств, содержащих дизель-генераторную установку / О. А. Ворон, О. Л. Игнатъев, А. А. Патенян, Д. И. Гончаров. – № 2019128212. 29.08.2019 ; заявл. 29.08.2019 ; опубл.18.06.2020, Бюл. № 17.

Автор выражает глубокую благодарность д.т.н., профессору Соколову Михаилу Матвеевичу и д.т.н. Морчиладзе Илье Геронтьевичу за ценные советы и замечания, высказанные ими в процессе работы над диссертацией.

Ворон Олег Андреевич

**МЕТОДОЛОГИЯ РАЗВИТИЯ ИННОВАЦИОННОГО
ИЗОТЕРМИЧЕСКОГО ПОДВИЖНОГО СОСТАВА
В ТРАНСПОРТНОЙ СИСТЕМЕ СТРАНЫ**

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени
доктора технических наук

Подписано в печать ____ . ____ .2022. Формат 60×84/16.
Усл. печ. л. 2,32. Тираж 100 экз. Заказ .

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Ростовский государственный университет путей сообщения»
(ФГБОУ ВО РГУПС)

Адрес университета: 344038, г. Ростов н/Д, пл. Ростовского Стрелкового Полка
Народного Ополчения, д. 2, www.rgups.ru