

РОСЖЕЛДОР

**Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования**

«Ростовский государственный университет путей сообщения»

(ФГБОУ ВО РГУПС)

На правах рукописи

Ворон Олег Андреевич

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

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

Диссертация
НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ
ДОКТОРА ТЕХНИЧЕСКИХ НАУК

Научный консультант
доктор технических наук, профессор
Мамаев Энвер Агапашаевич

Ростов-на-Дону

2021

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	7
1. АНАЛИЗ РАЗВИТИЯ ТРАНСПОРТНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ ОРГАНИЗАЦИИ ПЕРЕВОЗОК СКОРОПОРТЯЩИХСЯ ГРУЗОВ И НАПРАВЛЕНИЙ РАЗВИТИЯ ИЗОТЕРМИЧЕСКОГО ПОДВИЖНОГО СОСТАВА В СОВРЕМЕННЫХ УСЛОВИЯХ	17
1.1 Рынок скоропортящихся грузов и тенденции его развития	18
1.2 Роль непрерывной холодильной цепи для обеспечения продовольственной безопасности в транспортно-логистической системе страны	32
1.2.1 Анализ проблемных звеньев непрерывной холодильной цепи	33
1.2.2 Особенности технического обслуживания изотермического подвижного состава	38
1.3. Анализ методического обеспечения проектирования изотермических вагонов. Оценка направлений развития при конструировании изотермических вагонов	40
1.3.1. Состояние вопроса о проектировании изотермического подвижного состава	40
1.3.2. Опыт создания вагона термоса модели 16-1807-04 ПАО «Азовобщемаш»	45
1.3.3. Автономный рефрижераторный вагон с комбинированной системой охлаждения модели 16-2155	46
1.3.4. Изотермические вагоны производства АЗТМ	49
1.4 Формулировка проблемы и постановка задач исследований	54
2. АКТУАЛИЗАЦИЯ ПОЛОЖЕНИЙ И ТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ КОНСТРУИРОВАНИЯ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННОГО ПОДВИЖНОГО СОСТАВА ДЛЯ ПЕРЕВОЗОК СКОРОПОРТЯЩИХСЯ ГРУЗОВ	61
2.1. Концептуальные подходы к актуализации технических решений	61

2.2. Конструкционные решения основных систем и кузовов изотермического подвижного состава: отечественный и зарубежный опыт.....	66
2.2.1. Конструктивные особенности изотермических и рефрижераторных вагонов отечественных железных дорог.....	66
2.2.2. Железнодорожные перевозки скоропортящихся грузов в Европе	70
2.2.3. Современные рефрижераторные вагоны китайских железных дорог .	76
2.2.4. Рефрижераторные вагоны Америки	78
2.3 Формирование функциональных подсистем для перспективного ИПС .	81
2.4. Формирование приоритетных критериев проектирования вагонов с улучшенными потребительскими качествами.....	88
2.4.1. Экспертные методы для оценки критериев создания новых типов ИПС	88
2.4.2. Формирование и методика оценки критериев для создания новых изотермических вагонов	90
2.4.3. Результаты анализа методом экспертных оценок	92
2.4.4. Взаимосвязь основных функциональных систем вагона с критериями экспертных оценок	98
2.5 Выводы ко второй главе.....	102
3. РАЗВИТИЕ ИННОВАЦИОННОГО ИПС И СРЕДСТВ ДОСТАВКИ КРУПНОТОННАЖНЫХ РЕФРИЖЕРАТОРНЫХ КОНТЕЙНЕРОВ КАК ИНФРАСТРУКТУРЫ ТРАНСПОРТНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ.....	104
3.1. Развитие концептуальных принципов формирования инновационного ИПС для обеспечения рынка транспортных услуг	104
3.2 Совершенствование и унификация конструкций изотермических и рефрижераторных вагонов	113
3.2.1 Пути совершенствования технико-экономических параметров	113
3.2.2. Возможности унификации и модернизации различных типов ИПС .	119
3.3. Вариантное конструкционное решение одиночного изотермического вагона	124
3.3.1. Отапливаемый изотермический вагон	124

3.3.1.1. Необходимость создания и общие требования к отапливаемому изотермическому вагону.....	124
3.3.2. Изотермические вагоны с охлаждением жидким азотом.....	130
3.3.3. Модернизация вагонов-термосов для расширения их функциональных возможностей.....	136
3.4. Автономный рефрижераторный вагон.....	140
3.4.1. Основные принципы конструирования АРВ.....	141
3.4.2. Возможности комплектования базовой модели АРВ системами энерго- и холодоснабжения.....	152
3.5. Выводы к третьей главе.....	154
4. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ В ГРУЗОВОМ ПОМЕЩЕНИИ ИЗОТЕРМИЧЕСКОГО ВАГОНА.....	157
4.1. Методы расчета процессов теплопереноса при термообработке продуктов.....	157
4.2. Моделирование тепловых процессов при термообработке скоропортящихся грузов в отапливаемом изотермическом вагоне.....	165
4.2.1. Общие положения.....	165
4.2.2. Расчет параметров пограничного слоя при естественной конвекции воздуха в грузовом помещении ИВ.....	168
4.2.3. Расчет распределения температур в штабеле перевозимого груза....	177
4.3. Численное моделирование термообработки штабеля с помощью нагревательной системы «теплый пол».....	186
4.4. Моделирование термообработки штабеля груза с помощью жидкого азота.....	197
4.4.1. Методология и программное обеспечение расчетов.....	202
4.5. Выводы к четвертой главе.....	204
5. РАЗВИТИЕ СИСТЕМ АВТОНОМНОГО ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЯ ДЛЯ ИПС И СРЕДСТВ ДОСТАВКИ КРК В ТРАНСПОРТНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ ПЕРЕВОЗОК СПГ.....	206

5.1. Особенности развития контейнерных перевозок в международных транспортных коридорах в современных условиях	206
5.2. Системы энергоснабжения для КРК и перспективных средств доставки рефрижераторных контейнеров	211
5.2.1. ДГА для контейнерных сцепов	215
5.2.2. Автономная дизель-генераторная установка для индивидуального энергоснабжения КРК.....	217
5.2.3. Централизованное энергоснабжение от локомотива через высоковольтный статический преобразователь	218
5.3. Вентильно-индукторный подвагонный генератор	223
5.4. Использование сжиженного природного газа в качестве моторного топлива для ДГА	232
5.4. Выводы к пятой главе	239
6. ОБОБЩЕННЫЕ КОНСТРУКТИВНЫЕ СХЕМЫ ИПС ДЛЯ ТРАНСПОРТНОЙ СИСТЕМЫ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ РОССИИ.....	240
6.1. Компонировочные решения энергохолодильного оборудования АРВ	240
6.2. Расположение холодильного оборудования и полезный объем ГП вагона	249
6.3. Построение математических моделей напряженно-деформированного состояния кузова изотермического вагона в зависимости от компоновки специального оборудования	258
6.3.1. Описание программы	260
6.3.2. Моделирование объекта исследования для расчетной модели.....	261
6.3.3. Анализ результатов	265
6.3.4. Рекомендации по совершенствованию конструкции кузова	273
6.4. Обоснование технических решений различных вариантов размещения холодильно-нагревательного оборудования.....	275
6.4.1. Анализ вариантов размещения ХНУ и выбор их рациональных параметров.....	279
6.4.1.1. Варианты размещения и критерии выбора технических решений .	279

6.5. Исследование напряженно-деформированного состояния кузова изотермического вагона при интенсивной термообработке замороженного груза с впрыском жидкого азота	284
6.6. Выводы к шестой главе	292
7. КОНСТРУКТИВНЫЕ РЕШЕНИЯ ХОДОВЫХ ЧАСТЕЙ ИННОВАЦИОННОГО ИЗОТЕРМИЧЕСКОГО ПОДВИЖНОГО СОСТАВА ..	294
7.1. Классификация ходовых частей подвижного состава, применимого для ИПС	294
7.1.1. Технико-экономические параметры ходовых частей грузовых вагонов	294
7.1.2. Анализ ходовых частей для специализированных грузовых вагонов	299
7.2. Генераторно-приводные установки для автономных систем энергоснабжения пассажирских и рефрижераторных вагонов	303
7.2.1. Перспективные виды приводов на грузовых тележках	305
7.2.2. Агрегатированная необслуживаемая генераторно-приводная установка	310
7.3. Моделирование динамики изотермического вагона с текстропным приводом генератора средней части оси	312
7.4. Результаты экспериментальных исследований динамических характеристик ходовых частей	324
7.5. Модернизация конструкции тележки для ИПС	336
7.5.1. Модернизация тележки КВЗ-И2	336
7.5.2. Модернизация привода подвагонного ВИГ	338
7.6. Выводы к седьмой главе	342
Заключение	344
Список использованных источников	348
Приложение 1	379
Приложение 2	398
Приложение 3	399
Приложение 4	400

ВВЕДЕНИЕ

Реформы и современные тенденции развития железнодорожного транспорта РФ предполагают решение таких стратегических задач, как повышение безопасности движения и качества предоставляемых услуг, разделение функций и развитие конкурентной среды в сфере перевозок грузов и ремонта подвижного состава, доступности и устойчивости его работы, равноправное обеспечение доступа к инфраструктуре федерального железнодорожного транспорта независимых операторов и собственников подвижного состава.

В рамках единой рыночной транспортной системы страны стали создаваться условия для самостоятельного функционирования специализированных логистических систем организации потоков отдельных видов грузов. Переход на новые формы хозяйствования с учетом различных форм собственности приводит к росту конкуренции на рынке транспортных услуг, причем решающим фактором являются интересы пользователя услуг [202].

В рыночных условиях хозяйствования важнейшим инструментом развития экономики продовольственного товародвижения является специализированный транспорт, обеспечивающий спрос грузовладельцев на перевозки продовольственных товаров. Мировой рынок транспортных услуг считается сбалансированным и устойчивым, если имеет некоторый избыток тоннажа рефрижераторного транспорта над продовольственными грузами, требующими температурно контролируемых режимов перевозки.

За последние десятилетия российская система холодильного транспорта, и в первую очередь логистика рефрижераторных грузов, радикально изменилась. Дистрибьюторские компании все больше становятся логистическими организациями, успех и развитие которых напрямую зависят от качества принимаемых долгосрочных стратегических решений и эффективности системы управления.

Стратегия российского правительства в сфере снабжения населения продуктами питания нацелена на формирование крупных холодильных комплексов и поддержку конкурентоспособных логистических компаний, ориентированных на инновационные пути развития.

В этих условиях транспортные компании должны обеспечить максимальный перечень предоставляемых услуг по приемлемой цене, сжатые сроки исполнения. Сезонность, изменение объемов и структуры перевозимых железнодорожным транспортом скоропортящихся грузов, односторонняя направленность грузопотоков заставляют транспортные компании работать весьма оперативно и браться за перевозку низкодоходных, непрофильных грузов в обратном направлении. Понятно, что это является вынужденной мерой, и экономическая эффективность всей перевозки будет зависеть от множества факторов, но решающее значение будут иметь такие технические характеристики изотермического подвижного состава (ИПС), как грузоподъемность и полезный объем кузова, наличие холодильно-нагревательной установки (ХНУ) для поддержания требуемого температурного режима. Однако оставшиеся в рабочем парке пятивагонные рефрижераторные секции, вагоны-термосы проектировались во времена функционирования плановой экономики с абсолютно иной логистикой перевозок. Наличие и функционирование мощной агроиндустрии в Украине, Белоруссии, Молдавии, Грузии, Азербайджане, Армении, огромные объемы контрактов на поставку импортного продовольствия делали возможными долговременные прогнозы и обеспечивали достаточно стабильную загрузку ИПС. Поэтому технические параметры существующего в настоящее время ИПС были сформированы именно из этих условий функционирования непрерывной холодильной цепи. Пик перевозок скоропортящихся грузов (СПГ) пришелся на 1988 год, когда объемы перевозок составили более 30 млн т. После этого начался затяжной спад, обусловленный прежде всего политическими причинами. Изменившиеся дальность, структура, регионы погрузки-выгрузки, уменьшение веса повагонной

отправки привели к кардинальной трансформации логистических маршрутов, к конкуренции с автоперевозчиками и серьезному кризису в этой сфере.

Однако в настоящее время санкции на поставку импортного продовольствия, ужесточение тарифной политики в части большегрузных автоперевозок и поставленный на государственном уровне вопрос о возрождении хладотранспорта создали благоприятные предпосылки к оживлению железнодорожных перевозок.

В свете этого важной задачей является создание инновационного ИПС, отвечающего реалиям рынка транспортных услуг по транспортировке СПГ. Наделение ИПС новыми потребительскими качествами, расширение его функциональных возможностей, улучшение технических характеристик за счет применения в его конструкции новых технических решений и технологий в области вагоностроения, электромашинного, холодильного машиностроения и информационных технологий позволит транспортным компаниям более активно включиться в борьбу и занять более достойное место на рынке перевозок СПГ.

Актуальность исследования. 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 превышает тысячу вагонов, что уже привело к практически полной утрате специальных железнодорожных транспортных средств для перевозки продуктов питания. Причиной этому, на наш взгляд, является физический и моральный износ подвижного 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 транспортировки 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 энергохолодильное оборудование востребованных отечественным рынком типов ИПС для повышения продовольственной безопасности страны.

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

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 следующие.

По специальности 05.22.01:

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.

По специальности 05.22.07:

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

2. 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.

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

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

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

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

Практическая значимость исследования. 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 ГП 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.

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. Содержание диссертации опубликовано в 72 печатных работах из них: 23 публикации в ведущих рецензируемых научных журналах и изданиях, входящих в перечень ВАК Минобрнауки РФ; 4 – в журналах и научных изданиях, входящих в международную базу Scopus и Web of Science; опубликованы 2 монографии; получено 4 авторских свидетельства и 7 патентов РФ на изобретения.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, 7 глав, заключения и списка использованных источников из 250 наименований и 4 приложений. Общий объем работы 378 страниц, в тексте содержится 131 рисунок и 35 таблиц.

1. АНАЛИЗ РАЗВИТИЯ ТРАНСПОРТНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ ОРГАНИЗАЦИИ ПЕРЕВОЗОК СКОРОПОРТЯЩИХСЯ ГРУЗОВ И НАПРАВЛЕНИЙ РАЗВИТИЯ ИЗОТЕРМИЧЕСКОГО ПОДВИЖНОГО СОСТАВА В СОВРЕМЕННЫХ УСЛОВИЯХ

Затянувшийся на тридцатилетний период процесс деградации железнодорожных перевозок скоропортящихся грузов требует инновационного варианта развития транспортной системы. Это предполагает ее ускоренное и сбалансированное развитие, которое позволит обеспечить транспортные условия для развития инновационной составляющей экономики, повышения качества жизни населения, перехода к полицентрической модели пространственного развития страны. При реализации такого варианта транспортная система должна развиваться опережающими темпами по сравнению с отраслями экономики и социальной сферы, для того чтобы снять инфраструктурные ограничения перспективного социально-экономического развития страны, зависящие от транспорта [106]. Основные положения развития транспортной отрасли, разработка концепций, моделей и механизмов логистического менеджмента, формирование отраслевых и территориальных логистических транспортных систем с вопросами практической их реализации, инновационных проектов на примере международных транспортных коридоров представлены в многоплановых работах ведущих ученых: Л. А. Андреевой, В. В. Белиновой, А. С. Балалаева, В. А. Гудкова, А. Ф. Котляренко, А. Г. Кирилловой, Б. А. Левина, Э. А. Мамаева, Л. Б. Миротина, М. Б. Петрова, С. М. Резера [77, 106, 124, 150].

При разработке инновационных продуктов и технологий исследование обладает следующими чертами: имеет дело с конкретными объектами; в нем дифференцировано решаются эмпирические, логические и теоретические познавательные задачи; характерно четкое разграничение между установленными фактами и гипотетическими предположениями; его цель не только объяснение фактов и процессов, но и предсказание их [106].

Ориентация стратегических направлений развития транспортной инфраструктуры (ТИ) на потребности российской экономики, обеспечение поступательного развития и устранения технологических барьеров, сформулированные в национальных транспортных программах и стратегиях, требует локализации определенных задач на плоскости научно-технических инновационных разработок.

1.1 Рынок скоропортящихся грузов и тенденции его развития

Пищевые продукты на пути их движения от производства до потребления проходят ряд этапов технологической обработки (заготовка сырья, производство продукта, его хранение, транспортирование, распределение). Совокупность этих этапов называют непрерывной холодильной цепью (НХЦ). Она включает в себя комплекс средств холодильной техники и технологии, а также организационные мероприятия, направленные на обеспечение режимов холодильной обработки и хранения сельскохозяйственной продукции, рыбопродуктов и продовольствия на всем пути их следования от производителя до потребителя [10, 13, 15, 200, 205, 221, 247].

Именно поэтому железнодорожный транспорт, в частности ИПС, надо рассматривать как одно из звеньев цепи поставок товаров, которое должно подчиняться общим принципам формирования данной цепи поставок и учитывать интересы всех участников товародвижения.

Более двадцати лет назад на постсоветском пространстве перестал действовать механизм планового производства и снабжения населения скоропортящейся продукцией и продовольствием. При этом исчезла монополия роль железнодорожного хладотранспорта, который доминировал при перевозках СПГ на всей территории страны [88, 199].

Дочернее общество РЖД ОАО «Рефсервис» с каждым годом сдает свои монопольные позиции, списывая подвижной состав по сроку службы и теряя при этом собственную ремонтную базу – рефрижераторные вагонные депо.

Консерватизм, присущий дочерним компаниям РЖД, подпитывает конкурентную среду в лице частных транспортно-экспедиторских компаний и автоперевозчиков, осложняя работу на этом рынке. Поэтому для определения путей совершенствования этого рынка необходимо проанализировать, что возят, кто возит, в чем и куда доставляют скоропортящиеся грузы.

Эксплуатируемый в настоящее время ИПС по типам вагонов делится на групповой рефрижераторный подвижной состав (РПС), изотермические вагоны-термосы (ИВТ), вагоны-термосы (ВТ) и крытые утепленные грузовые вагоны. Часть термосопригодных грузов, не требующих точного поддержания температурных режимов, перевозится в обычных крытых вагонах [2, 28, 175].

Еще одним типом ИПС являются крупнотоннажные рефрижераторные контейнеры (КРК). Объем перевозок в КРК растет год от года. Это связано с тем, что контейнер отвоевывает позиции у изотермического вагона. При условии равной цены он дает гораздо более выгодные позиции за счет возможности обеспечения малопартионных отправок, отсутствия лишних перегрузов, возможности перевозки за одной пломбой и более высокой технологичности в целом. Клиентам зачастую удобнее отправлять груз малыми партиями, тем самым избавляясь от необходимости хранить на своих складах избыточные запасы продовольствия [36]. Объемы перевозок по видам СПГ представлены на рисунке 1.1.

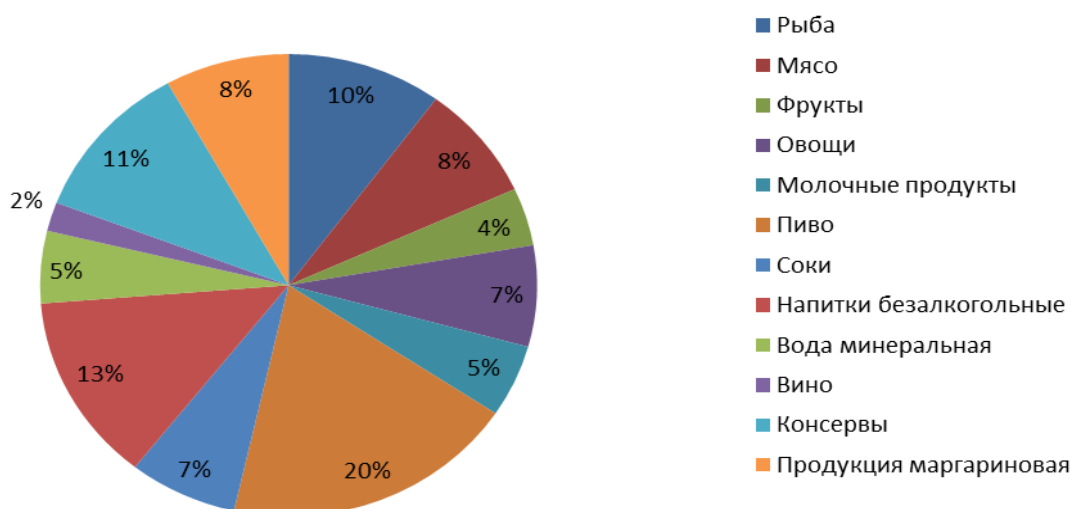


Рисунок 1.1 – Объемы перевозок СПГ в 2020 году

Среднегодовая потребность в использовании подвижного состава по родам показывает, что доля перевозок в рефрижераторах составляет 5,76 %, в вагонах-термосах – 10,16 %, в ИВ-термосах – 27,86 %.

Главные направления перевозок в рефсекциях – из портов (Санкт-Петербург, Калининград, Владивосток) и таможенных терминалов (Москва) в центр страны.

Особенностью рынка является крайне узкая номенклатура перевозимых грузов, основную долю которых составляют импортируемые грузы, а также сезонная зависимость от объема вылова и реализации на внутреннем рынке рыбы на Дальнем Востоке [92, 167, 192].

На рынке перевозок грузов в рефрижераторных вагонах наблюдаются значительные отклонения в доходности различных направлений перевозок. Это связано с существованием кольцевых маршрутов, обеспечивающих минимальный порожний пробег, и маршрутов, не имеющих обратной загрузки. Основные грузопотоки СПГ, перевозимых в рефсекциях, направлены из портов вглубь страны. Из рефрижераторных вагонов, прибывающих с продовольствием на Урал, около 90 % не имеют обратной загрузки, при перевозках в Сибирь не имеют обратной загрузки 70 % вагонов, обеспечение погрузки рефсекций на Калининградской железной дороге осуществляется полностью порожними вагонами [36].

На маршрутах, не имеющих обратной загрузки, перевозки в собственном подвижном составе нерентабельны. В связи с этим отсутствует заинтересованность в развитии РПС, поскольку существующего парка более чем достаточно для обеспечения перевозок на закольцованных маршрутах.

Эффективность использования вагонов-термосов и ИВ-термосов значительно снижается в результате сезонности перевозок, вызванной значительной конкуренцией с собственными универсальными крытыми вагонами при перевозках термосопригодных грузов.

Условия перевозок СПГ, в том числе пива, соков, напитков, консервов, вина, предусмотрены Правилами перевозок железнодорожным транспортом СПГ

и зависят от наименования груза, типа подвижного состава и предельных сроков перевозки продукции [161].

Перечень СПГ и предельные сроки их перевозок в вагонах-термосах и ИВ-термосах согласно указанным Правилам устанавливаются перевозчиком и утверждены распоряжением ОАО «РЖД» от 4 ноября 2004 г. № 3531р.

Согласно указанным Правилам [161, 191] в крытых вагонах перевозки ограниченной номенклатуры СПГ разрешены только в переходный и часть летнего периода года, т. е. фактически 4 месяца в году (апрель-май, сентябрь-октябрь). Пиво, консервы мясорастительные, рыбные, молочные, а также плодовая и ягодная консервированная продукция, воды минеральные, напитки безалкогольные и слабоалкогольные могут перевозиться сроком доставки до 15 суток, консервы мясорастительные, рыбные, овощные и вина виноградные и плодово-ягодные полусухие – до 10 суток, вина виноградные и плодово-ягодные полусладкие и крепленые – до 18 суток.

Перевозка в остальные периоды года данных грузов, а также всей остальной номенклатуры СПГ в крытых вагонах не допускается.

Однако в соответствии со статьей 8 Федерального закона «Устав железнодорожного транспорта Российской Федерации» по обращениям в ОАО «РЖД» грузоотправителей и грузополучателей разрешается перевозка основной номенклатуры термосопригодных грузов во все периоды года на договорной основе на особых условиях в универсальных собственных вагонах, с модернизируемой по технологии ОАО ВНИИАС теплоизоляции [128].

В результате ценовая неконкурентоспособность ИВ-термосов и вагонов-термосов приводит к существенному оттоку СПГ со специализированного ИПС в универсальный. В определенные периоды года доля крытых вагонов в общем объеме железнодорожных перевозок СПГ увеличивается с 32 до 55 %, а ИПС сокращается в 1,5–2 раза, в результате чего учащаются простои неиспользуемых специализированных вагонов и снижается эффективность их использования [36, 175].

Объемы перевозок СПГ по типам подвижного состава представлены на рисунке 1.2.

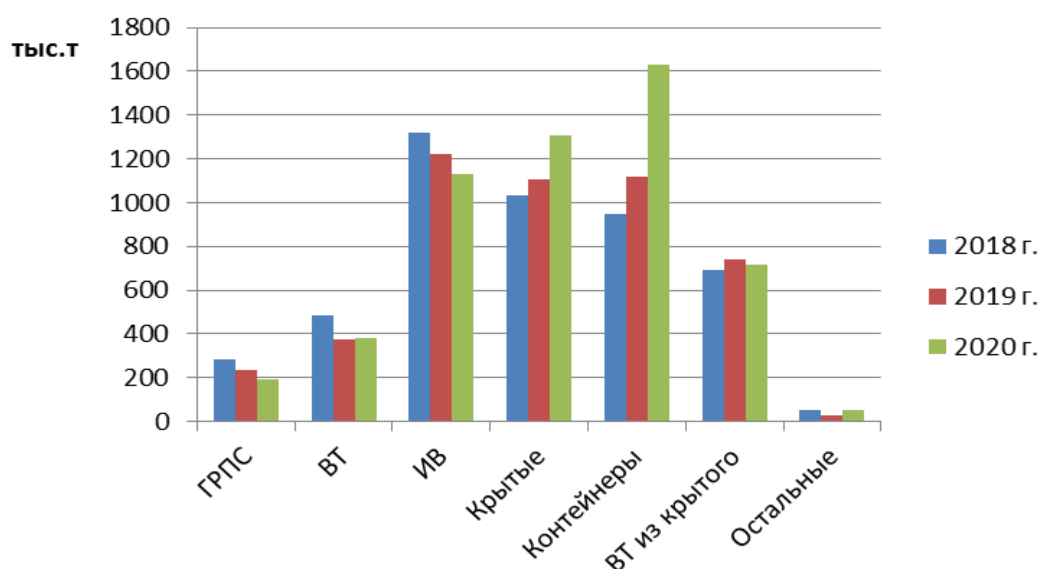


Рисунок 1.2 – Объемы перевозок СПГ по типам подвижного состава, т

Приведение уровня тарифов на перевозки грузов в ИВ-термосах и вагонах-термосах к тарифным условиям крытого вагона приведет к повышению конкурентоспособности перевозок в термосах и позволит эффективно задействовать весь парк термосов.

Анализ показывает, что для рынка СПГ характерна неравномерность объема и сезонность перевозок, и наряду с изменениями объемов перевозок и уменьшением количества вагонов рабочего парка показатели работы отрасли ухудшаются. При этом показатели работы операторов рынка СПГ остаются примерно на прежнем уровне. ОАО «Рефсервис» контролирует до 25 % перевозок морепродуктов с Дальнего Востока. Кроме этого следует учитывать географические факторы этого рынка – значительную удаленность регионов зарождения и потребления продукции. Перемещение СПГ происходит, как правило, с периферийных дорог (Октябрьской, Дальневосточной, Северо-Кавказской) в центральную часть страны. Объемы перевозок СПГ железнодорожным транспортом за 2017–2019 гг. представлены в таблице 1.1.

Таблица 1.1. – Объемы перевозок СПГ железнодорожным транспортом
в 2017–2019 гг., тыс. т

Сегмент	2017 г.		2018 г.		2019 г.	
	Объем	Доля, %	Объём	Доля, %	Объем	Доля %
ОАО» «Рефсервис»	1190	18,2	908	19,77	971	20,22
Частный ИПС	2310	35,2	1578	34,36	536	11,16
Крытые РЖД	1949	29,7	1121	24,42	1104	23,01
Контейнеры	1086	16,6	985	21,45	1054	21,96
ВТ из крытых	-	-	-	-	742	15,45
Остальные (в т. ч. ИПС СГН)	21	0,3	-	-	393	8,2
Общий итог	6556	100	4592	100	4800	100

Как видно из представленных данных, этот рынок подвержен влиянию как внутренних, так и внешних, в т. ч. политических, факторов. В 2010 г. из-за запрета ввоза куриного мяса из США, слабой лососевой путины, 6 % снижения объемов производства пива (ввиду повышения акцизов) объемы перевозок существенно упали. Кроме этого благодаря развитию регионального производства пищевой продукции снижаются объемы перевозок мяса (прежде всего мяса птицы) и отмечается уход на автотранспорт с рейсами протяженностью до 3000 км. У автомобильного транспорта есть одно конкурентное преимущество – существующие правила и технологии перевозок грузов железнодорожным транспортом не в полной мере соответствуют состоянию рынка. Кроме этого при перевозках в ИВ-термосах в дополнение к соблюдению «Правил перевозок СПГ» каждая компания – владелец подвижного состава, осуществляющая перевозки данного типа, должна согласовывать в течение длительного времени с ОАО «РЖД» «особые условия» перевозок, – процесс очень длительный и дорогостоящий. Не желая ждать, потенциальный клиент переключает свои грузы на автотранспорт [14, 92].

По данным Росстата, в 2019 году прирост грузооборота автотранспорта составил 3,3 % и достиг 275 млрд т·км, а всего им было перевезено 5,734 млрд т грузов. При рассмотрении структуры перевозимых грузов определено, что на долю продуктов питания приходится около 25 %. При этом анализ структуры парка, насчитывающего 6 млн грузовых автомобилей, показывает, что на долю авторефрижераторов приходится около 2 %. Причем до 29 % автомобилей – большегрузные с грузоподъемностью от 10 до 15 т [14].

Большая стоимость перевозок, повышенные риски при транспортировке СПГ автотранспортом не являются препятствием в освоении новых маршрутов компаниями-операторами. Однако следует принимать во внимание общеевропейские тенденции по ограничению движения большегрузных автомобилей на определенных маршрутах и направление развития политики Министерства транспорта РФ в сторону перевода части грузопотока на железнодорожный транспорт для разгрузки отечественных автодорог.

Решающим фактором стало внедрение системы оплаты «ПЛАТОН» для проезда большегрузных автомобилей по ставке 2,2 руб/км. Предполагаемое увеличение тарифа в 2021 г. до 2,34 руб/км еще более ухудшит экономические показатели автоперевозчиков, что должно повысить привлекательность железнодорожного транспорта.

Исследования ГНУ ВНИХИ Россельхозакадемии, представленные в [13], показали, что на этапах НХЦ доли продукции, хранимой и транспортируемой с соблюдением нормативного температурного режима, распределены следующим образом:

- производственный холодильник – 69 %;
- транспорт – 80 %;
- распределительный холодильник – 98 %;
- холодильные камеры магазинов – 81 %;
- торговое холодильное оборудование – 60 %.

Количество перевозок с нарушением температурного режима, показывающее состояние дел на транспорте, вызывает у специалистов

определенные сомнения ввиду неполноты данных по автотранспорту. Однако с учетом личного опыта работы автора в сфере железнодорожных перевозок эта цифра, отражающая фактическое состояние железнодорожного ИПС (особенно с учетом перевозок в ИВ-термосах и крытых вагонах с утеплением), может оказаться еще более пессимистичной.

Средний возраст ИВ, как частных, так и ОАО «РЖД», составляет более 25 лет. В зависимости от года выпуска ежегодное выбытие подвижного состава составляет более тысячи вагонов, что в ближайшие годы приведёт практически к полной утрате специальных железнодорожных транспортных средств для перевозки продуктов питания [175]. Структура и потребность в ИПС представлены на рисунке 1.3.

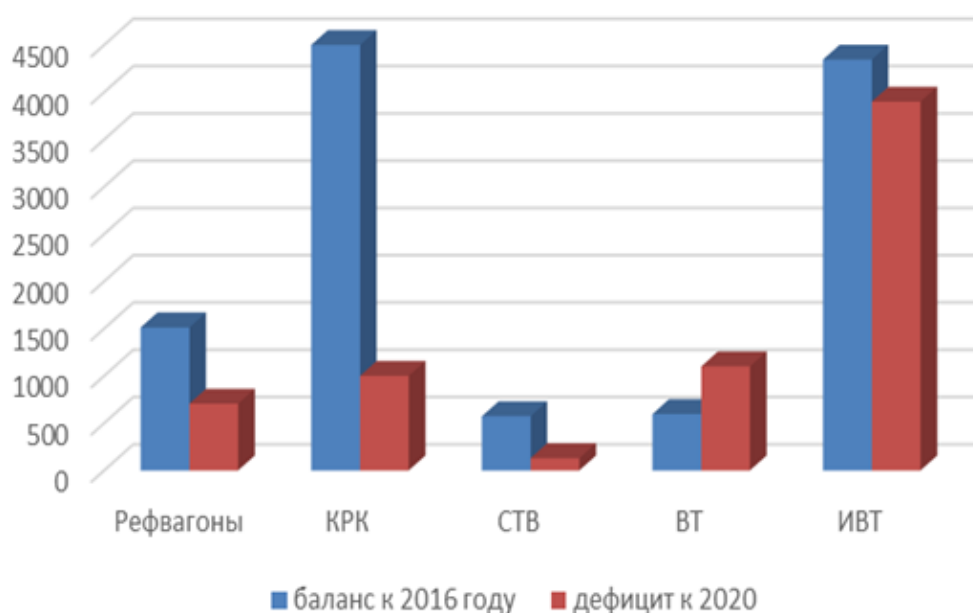
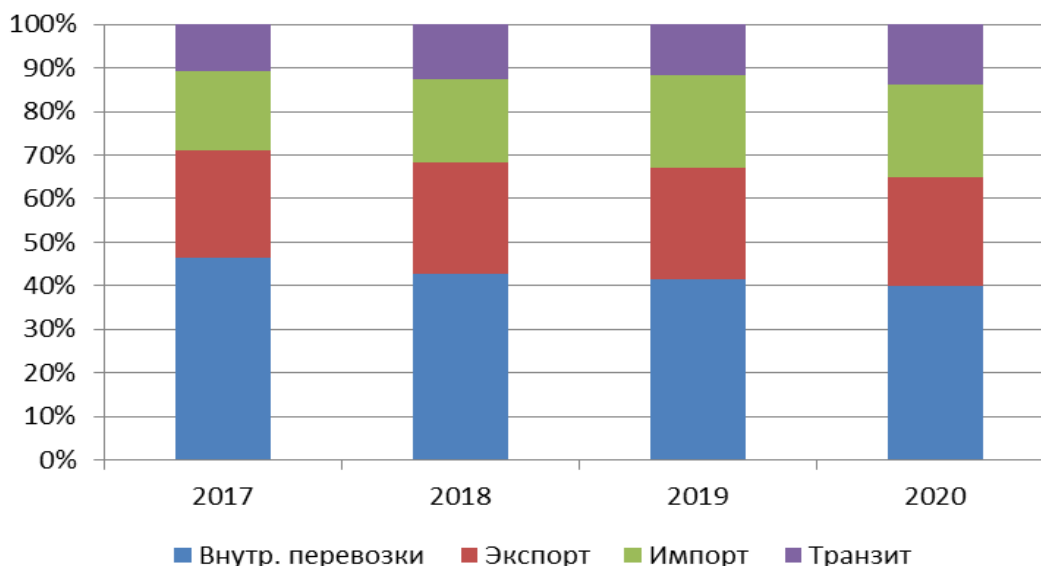


Рисунок 1.3 – Структура и потребность в ИПС

С учетом наибольшей положительной динамики роста объемов перевозок всех грузов в крупнотоннажных контейнерах на рисунке 1.4 представлены общие показатели изменения числа перевезенных контейнеров в зависимости от вида сообщения – внутреннего, на экспорт, импорт и транзит.



а



б

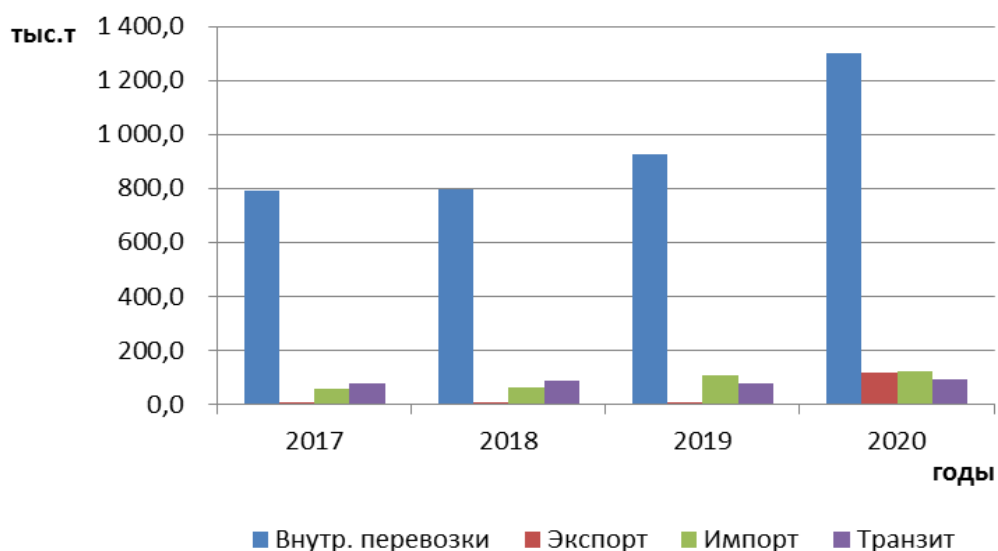
Рисунок 1.4 – Структура и динамика перевозок в крупнотоннажных контейнерах в период 2017–2020 гг.:

а – число перевезенных контейнеров в тыс. ДФЭ;

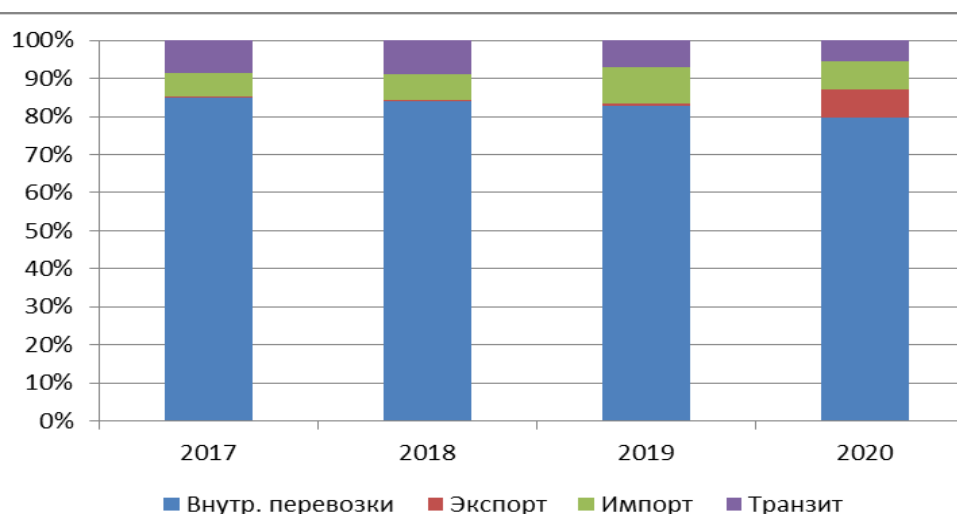
б – доля контейнеров в процентах по видам сообщения

Анализ этих данных показывает устойчивый рост объем в крупнотоннажных контейнерах во всех видах сообщений [61, 193].

Особенностью перевозок СПГ в КРК за этот же период является многократное увеличение объемов СПГ на экспорт – с 6,9 тыс. т в 2019 г. до 119 тыс. т в 2020 г.



a



б

Рисунок 1.5 – Объемы перевозок скоропортящихся грузов в крупнотоннажных изотермических и рефрижераторных контейнерах в период 2017–2020 гг.

a – объемы перевозок СПГ в тыс. т; *б* – доля перевозок по видам сообщения

Общие выводы по динамике изменения контейнерных перевозок можно сформулировать следующим образом.

1. Около 70 % перевозок осуществляется в 40 футовых крупнотоннажных контейнерах (тип 1А, 1АА, 1ААА).

2. За указанный период средний прирост контейнерных перевозок в целом составил 14,5 %, а наибольшую динамику роста показывают транзитные перевозки – 26,5 %.

3. Общее число поездов с груженными контейнерами в 2020 году выросло по сравнению 2019 г. на 19,3 % (10 181 против 12 147).

4. На динамику перевозок грузов в контейнерах наибольшее влияние оказывает возможность таких перевозок в контейнерных поездах.

5. Повышенную привлекательность для клиентуры и перспективы имеют контейнерные поезда в экспортных направлениях – через морские порты и погранпереходы. Методологические основы оптимизации транспортных процессов во взаимодействии морского и железнодорожного транспортов рассмотрены в работе [223]. И именно в этом сегменте отмечен самый значительный рост объемов СПГ в КРК – с 6,9 тыс. т в 2019 г. до 118,6 тыс. т в 2020 г.

6. Постоянная загруженность участков инфраструктуры, задействованной в экспортных перевозках, будет являться основным фактором, сдерживающим рост перевозок контейнеров.

7. Одиночные и групповые отправки имеют перспективы развития при условии увеличения числа станций и путей необщего пользования, открытых для выполнения грузовых операций с крупнотоннажными контейнерами.

На этом фоне компании-операторы стали наращивать объемы контейнерных перевозок КРК на специализированных электрифицированных сцепках, состоящих из вагон-дизель-электростанции (ДЭС) и 12 фитинговых платформ. Причем используются морально устаревшие и физически изношенные вагоны ДЭС от старых пятивагонных рефрижераторных секций. Попытки ОАО «Рефсервис» запустить в регулярную эксплуатацию автономные энергооснащенные фитинговые платформы с автоматизированными дизель-генераторными установками (АДГУ) для питания КРК не нашли спроса на рынке, а сложности в эксплуатации заставили прекратить продвижение этой технологии [2]. Вместе с тем рефконтейнерные перевозки не смогут заменить классические перевозки скоропортящейся продукции по железной дороге. Нужно принять во внимание планы крупных игроков рынка по строительству мощных хладотерминалов вместимостью несколько десятков тысяч тонн. Они

будут размещены в узловых точках транспортных потоков страны и не будут привязаны к инфраструктуре контейнерных терминалов [1, 23].

При этом доля контейнерных перевозок по итогам 2020 г. составила около 30 % (объем около 1631 тыс. т по всем видам сообщения), что с учетом сложностей в инфраструктуре обслуживания КРК на контейнерных терминалах не позволяет говорить о безусловной перспективе их преобладающего развития.

Как следует из анализа статистических данных по объемам перевозок СПГ, представленных на рисунке 1.1, наиболее стабильными группами продуктов, для транспортировки которых необходим РПС, являются рыба и мясо. Хотя общая доля этих продуктов в номенклатуре СПГ составляет в среднем немногим более 22 %, именно наличие в продуктовой корзине этих продуктов характеризует качество жизни и уровень потребления населения. Доктрина продовольственной безопасности определяет долю отечественного производства рыбной продукции не менее 80 %, и увеличение объемов вылова и доставки рыбной продукции продекларировано государственными организациями [91]. В 2020 году объемы вылова рыбных биоресурсов составили 4,97 млн.т, при этом вывоз рыбной продукции за рубеж достигал 60 % [167].

Следующими по значимости объемов перевозок в порядке убывания стоят пиво, консервы, соки и безалкогольные напитки. Эта продукция относится к категории термосопригодных грузов, допускающих изменение температуры в ГП вагона в достаточно широком диапазоне, что в большинстве случаев подразумевает транспортировку в ИВ и вагонах-термосах.

Спецификой рынка рыбной продукции является протяженность маршрутов перевозки, связанная с тем, что абсолютное большинство рыбы вылавливается и отгружается с Дальнего Востока назначением в крупные города [92].

Положительное влияние на рынок оказала практика формирования ускоренных рефрижераторных контейнерных поездов (УРП) с ДВЖД с маршрутными скоростями более 1000 км/сутки [185].

Такие скорости движения грузовых составов позволяют повысить эффективность перевозок и конкурентоспособность железнодорожного

транспорта а также, в перспективе, за счет использования подвагонных генераторов для энергоснабжения холодильного оборудования ИПС – сократить эксплуатационные затраты на дизельное топливо. Здесь важно отметить, что приоритетной целью формирования комбинированных сцепов является не получение дополнительной прибыли от перевозки в универсальных контейнерах за счет доставки в различных комбинациях с рефрижераторными, а обеспечение регулярности и мультимодальности отправок для привлечения грузоотправителей, формирование устойчивого грузопотока. Регулярные транспортировки сцепов крайне важны для СПГ, дорогостоящее хранение которых в ожидании отправки может сделать перевозку нерентабельной.

Конкуренция на этом рынке достаточно высокая, так как имеет место превышение предложения над спросом. Основной формой конкуренции является ценовая, как единственно возможная в силу предложения однотипного товара, высокого уровня информационной осведомленности рынка о предложении и низких издержек переключения покупателей. Частные перевозчики, располагая меньшим парком ИПС, более гибко могут реагировать на конъюнктурные изменения рынка, прежде всего за счет меньших эксплуатационных затрат.

Основным показателем эффективности использования РПС у операторских и логистических компаний является в настоящее время удельная стоимость перевозки 1 кг скоропортящегося груза. С учетом наличия в рабочем парке РПС только группового подвижного состава – пятивагонных рефрижераторных секций, грузоподъемность четырех грузовых рефрижераторных вагонов составляет 200 т. Для энергоснабжения этих вагонов в состав секции включен вагон-дизель-электростанция, который оплачивается при перевозке по отдельному тарифу. В целях повышения эффективности использования в состав секции стали включать еще один грузовой вагон, т. е. общая грузоподъемность рефрижераторной единицы стала составлять 250 т. Мощности ДГА в этом случае достаточно для обеспечения электроэнергией всех 10 ХНУ шестивагонной рефрижераторной секции, хотя и с большим коэффициентом рабочего времени дизелей. Такое решение позволяет снизить

стоимость перевозки для клиента на 10–15 % в зависимости от расстояния перевозки.

Кроме этого, вместо ИВ для сезонных перевозок термосопригодных грузов частные компании-операторы применяют также большое количество крытых вагонов и сухогрузных контейнеров, утепляемых по имеющимся технологиям. Так, стоимость транспортировки рыбопродукции в 2012 г. в изотермическом и РПС при расстоянии до 4,5 тыс. км составляла 2,5–5 руб/кг при протяженности более 4,5 тыс. км – от 3,4 до 8 руб/кг. В 2020 г. перевозки в КРК обходились дороже на 17–27 %, чем в изотермических и рефрижераторных вагонах, и в 2,5 раза дороже транспортировки в «сухих» крупнотоннажных контейнерах [36, 70].

Учитывая, что стоимость перевозки СПГ в крытом вагоне или сухогрузном контейнере приблизительно в 2–3 раза меньше, чем в специализированном, собственники стараются использовать для таких перевозок именно эти транспортные средства. Кроме того, существует достаточно широкая номенклатура грузов, пригодных для обратной загрузки после перевозок СПГ. К таким грузам относятся: комбикорма, автомобильные запчасти, сырье лекарственное, мыло, медикаменты, бумага и картон, пластмассовые, металлические, резиновые, трикотажные, швейные изделия, санитарно-гигиенические товары, аппараты и приборы, посуда и др. В этом случае, экономическая эффективность использования подвижного состава еще более увеличивается. В этой связи необходимо, чтобы используемый в рефперевозках перспективный специализированный подвижной состав реализовывал как приемлемые технико-экономические параметры нового вагона, так и обеспечивал оптимальное размещение и максимальную вместимость попутного груза в ГП вагона [36,58].

1.2 Роль непрерывной холодильной цепи для обеспечения продовольственной безопасности в транспортно-логистической системе страны

Доктриной продовольственной безопасности Российской Федерации предусматривается существенный прирост отечественной растительной и животной продовольственной продукции. В общих положениях этого документа говорится о необходимости самообеспечения основными видами отечественной сельскохозяйственной продукции. К рискам отнесено недостаточное количество хранилищ для сельскохозяйственной продукции, сырья и продовольствия. А в основных направлениях государственной политики в сфере обеспечения продовольственной безопасности предусматриваются:

- развитие транспортной и логистической инфраструктуры, в т. ч. в отдаленных регионах, для гарантированного и равномерного по времени продовольственного снабжения населения;
- создание оптово-розничных центров для закупки продукции у сельхозпроизводителей, ее подработки, переработки, хранения и сбыта;
- участие в формировании товаропроводящей сети в рамках единого агропродовольственного рынка Евразийского экономического союза;
- обеспечение сбалансированности товаропроизводящей цепочки, включая производство продовольствия, транспортно-логистическую инфраструктуру, оптово-распределительные центры, оптовую и розничную торговлю [101].

Федеральным проектом «Транспортно-логистические центры» предусматривается развитие узловых грузовых мультимодальных транспортно-логистических центров с учётом синхронизации планов различных ведомств и организаций, в том числе оптово-распределительных центров Минсельхоза России. Кроме того, на базе инфраструктуры транспортно-логистических центров планируется организовать регулярное грузовое маршрутное сообщение.

1.2.1 Анализ проблемных звеньев непрерывной холодильной цепи

Для обеспечения эффективного хранения и сохранности пищевой продукции недостаточно только наличия достаточного количества стационарных холодильников различного назначения, также необходима отлаженная, четко функционирующая НХЦ от мест производства до потребителя [10, 15].

НХЦ представляет собой совокупность холодильных технологий, технических средств, организационных мероприятий, обеспечивающих необходимые режимы хранения и транспортировки охлажденных или замороженных скоропортящихся грузов. Она включает холодильные мощности в местах заготовки и переработки сырья, транспортные рефрижераторы, распределительные охлаждаемые терминалы, торговое холодильное оборудование, а также бытовые холодильные приборы потребителей [5, 239].

Холодильные цепи для различных видов продовольствия в зависимости от мест и сроков его производства и потребления отличаются друг от друга, имеют различную протяженность и разветвленность, в них могут использоваться разные виды и типы холодильных складов, транспорта, торгового оборудования. Однако все они должны рассматриваться как сложные технологические системы, организовываться и функционировать на общих научных принципах, иметь единые основы построения [4, 8, 224,239].

Проблемы функционирования НХЦ в нашей стране остались в нашей стране с 1980-х годов. Несмотря на функционирование мощной агроиндустрии в республиках, огромные объемы долговременных контрактов на поставку импортного продовольствия в рамках плановой экономики, в работе хладотранспорта имелись серьезные проблемы [200].

В настоящее время проблемы НХЦ еще более усугубились, и увеличилось отставание от зарубежных стран в части холодильного оборудования и холодильных технологий. Потери овощей и фруктов они по физическим объемам достигают 40 %. Эти потери связаны с негативным воздействием на продукты динамических воздействий при движении транспорта, усилением

теплоотдачи в движущемся потоке набегающего воздушного потока, влиянием солнечной радиации [5]. Более предметно для рыбной и мясной продукции эти факторы рассмотрены в работах [10, 14, 15, 36, 205, 230, 233].

Необходимость комплексного подхода к решению проблем транспортировки СПГ признают все участники перевозочного процесса. В этой связи возможно развитие по следующим проблемным направлениям совершенствования НХЦ:

1. Стационарные холодильники.
2. Морские промысловые морозильные суда-траулеры.
3. Локальные имеющиеся холодильные цепи сети ритейла.
4. Железнодорожная инфраструктура хладотранспорта – ИПС, система технического обслуживания и экипировка.

Важным обстоятельством, сдерживающим рост эффективности системы хранения продовольствия в России, является значительный дефицит холодильных емкостей в стране. Например, для организации хранения и доставки рыбы из регионов Дальнего Востока необходимо дополнительно не менее 700 тыс. т холодильных емкостей [168, 195, 196]. Для хранения растительного сельскохозяйственного сырья требуется строительство не менее 2,5 млн т емкостей, в том числе не менее 20 % с регулируемой газовой средой [31, 84, 89, 105, 163, 190, 212, 219, 220].

Решить проблему сокращения потерь и сохранения качества производимой в стране пищевой продукции можно, только значительно увеличив количество транспортно-логистических центров с холодильными складами. С учетом того, что узловые грузовые мультимодальные транспортно-логистические центры будут обеспечивать обработку грузов различного назначения, целесообразно первоначально сформировать систему транспортировки и контроля скоропортящихся грузов с Дальнего Востока и в обратном направлении на основе указанных центров. В дальнейшем сеть транспортно-логистических центров будет расширяться, обеспечивая ускоренную доставку скоропортящихся грузов из всех и во все регионы страны [196].

Рыбопродукция является жизненно необходимой и неотъемлемой частью потребительской корзины населения. Общий комплекс проблем, имеющийся при снабжении рыбной продукцией, затрагивающий технические, технологические и тарифные сложности, представлен в [167]. Даже в 2019 г. потребление на душу населения рыбы составило не более 13 кг, что на 9 кг ниже нормы, рекомендуемой Минздравом для здорового питания. В целом же с 2015 г. потребление рыбы даже упало почти на 25 %, хотя её вылов вырос с 4,4 млн т до 4,97 млн т в 2020 году.

В работе [92] говорится о проблемах рыбопромыслового флота и необходимости увеличения количества низкотемпературных холодильников для рыбопромышленного комплекса вместимостью 5–10 тыс. т в портах.

В сфере промыслового флота последние новости – спуск второго траулера-морозильника проекта 170701 производительностью 100 т замороженной рыбы в сутки – внушает сдержанный оптимизм. Планируется выпуск серии из 10 судов. Общая стоимость 38, 4 млрд руб. свидетельствует о серьезности намерений появления инновационного траулера-морозильника (рисунок 1.6).



Рисунок 1.6 – Морозильный траулер «Капитан Соколов» [148]

Планировочные решения низкотемпературного холодильника для хранения замороженной продукции представлены на рисунке 1.7. В стандартном

низкотемпературном холодильнике вместимостью 5 тыс. т могут быть расположены 8 идентичных камер с температурным режимом -20°C вместимостью по 634 т каждая. Расчетная потребная холодопроизводительность составляет 416 кВт. Предусмотрены автомобильный и железнодорожный грузовой пандусы. По экспертным оценкам, укрупненно строительная стоимость такого объекта составляет 10 тыс. рублей за 1 м^2 площади.

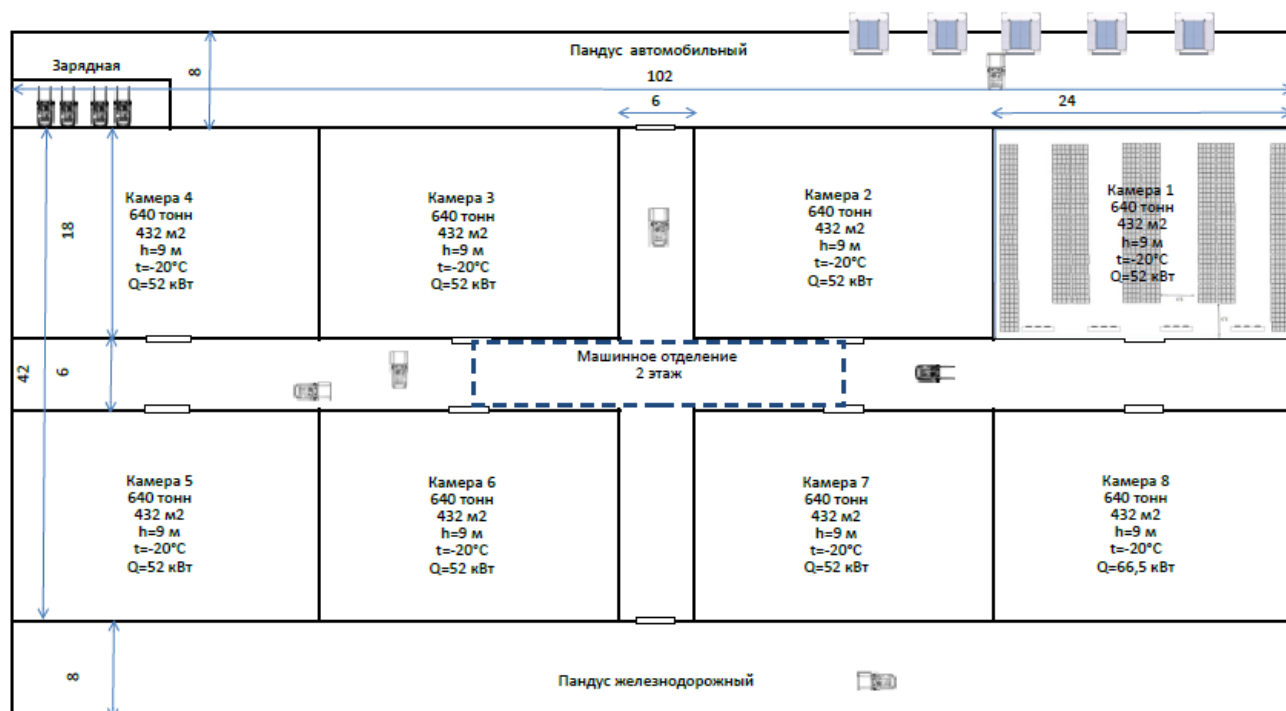


Рисунок 1.7 – Планировка камер низкотемпературного холодильника вместимостью 5 тыс. т

Неготовность имеющейся НХЦ не устраивает мощные торговые сети (ритейл). Поэтому для своевременного обеспечения своих магазинов и супермаркетов различных форматов они фактически воссоздали по типу классической НХЦ собственную транспортно-логистическую систему со своим специализированным транспортом и распределительными холодильными центрами. Ввиду того что этот вид бизнеса пришел к нам из Европы, то модель развития также была заимствована оттуда и рассчитана на приоритет автомобильного транспорта. Динамику развития можно рассмотреть на примере ЗАО «Тандер» – сети «Магнит». Анализ публикаций показывает, что если к

2007 г. был построен 21 распределительный центр, то в 2020 г. их стало уже 37. Для перевозок грузов используются более чем 6 тыс. автомобилей, для которых обеспечена вся погрузочная инфраструктура, а вот железнодорожные подъездные пути не предусмотрены [24, 125, 166].

Распределительные центры торговых сетей устроены и работают по другим принципам. Например, для обеспечения формирования товарных партий разнородных товаров в РЦ площадью 25 тыс. м² имеется 21 холодильная камера с 11 температурными режимами, которые в полной мере соответствуют назначению камеры и виду располагаемых в ней продуктов. Для среднетемпературных камер общей площадью 21,53 тыс. м² потребная холодопроизводительность составляет 2,7 МВт, а для камер с отрицательными температурами общей площадью 1,56 тыс. м² холодопроизводительность составляет 240 кВт. Планировочные решения типового распределительного центра представлены на рисунке 1.8. [24].



Рисунок 1.7 – Распределительный центр ЗАО «Тандер»

Как положительный пример можно привести современный агрологистический комплекс «Евразия» АО «Славтранс-Сервис» (рисунок 1.9), расположенный в р.п. Селятино Московской области. Это современное

предприятие с общим ежемесячным грузооборотом 75 тыс. т включает в себя холодильно-складской комплекс низкотемпературного хранения на 40 тыс. т, контейнерную площадку для рефрижераторных контейнеров, холодильный комплекс на 30 тыс. т с подъездными железнодорожными путями. Наличие развитой инфраструктуры позволяет использовать его при перевозках рыбопродукции с Дальнего Востока [140].



Рисунок 1.9 – Агрологистический комплекс «Евразия» АО «Славтранс-Сервис»

1.2.2 Особенности технического обслуживания изотермического подвижного состава

Наибольшие объемы перевозок СПГ были достигнуты в 1988 г., когда их величина составляла 32,98 млн т. Работа специализированных структур МПС была достаточно четко отлажена – на территории всей страны, включая места формирования массовых грузопотоков, работали 19 рефрижераторных вагонных депо, 30 пунктов экипировки топливом и хладагентом, в 58 локомотивных депо РПС мог заправляться дизельным топливом и моторным маслом. После этого начался затяжной спад, обусловленный прежде всего политическими и экономическими причинами [191].

Изменившиеся структура, регионы погрузки-выгрузки, уменьшение веса повагонной отправки привели к кардинальному изменению логистических маршрутов, оттоку объемов на автомобильный транспорт и серьезному системному кризису в сфере железнодорожных перевозок СПГ.

В настоящее время из специализированных рефрижераторных депо осталось только депо «Троицк» входящее в структуру АО «Рефсервис». Вопросы экипировки операторы решают самостоятельно, и связаны они со значительными потерями времени, т.к. требуется подача вагонов на специальные пути с автомобильным подъездом для автозаправщика.

Пункты экипировки моторным топливом как часть инфраструктуры остались только в локомотивном хозяйстве, и они задействованы в процессе эксплуатации локомотивов. Их отсутствие на маршрутах движения вынуждает разработчиков принимать неоптимальные конструкторские решения, существенно ухудшающие технико-экономические показатели подвижного состава, например полезную грузоподъемность:

- танки-контейнеры с дизтопливом или сжиженным углеводородным газом в проекте контейнерного поезда «Евросиб» [95, 96];
- вагон-дизель-электростанции «Твема» с 16 пластиковыми баками для дизтоплива внутри кузова пассажирского вагона (цена 60 млн руб.);
- централизованная система энергоснабжения от локомотива через статические преобразователи.

Система технического обслуживания в пути следования реализуется на пунктах технического обслуживания вагонных эксплуатационных депо, расположенных по маршрутам движения, которые обеспечивают следование по гарантийным плечам. Специалисты вагонного хозяйства отвечают за безопасность движения вагона в целом и контролируют кузов, ударно-тяговые приборы, тормозное оборудование, ходовые части, но никаким образом не отвечают за работоспособность энергохолодильного оборудования, которое имеет решающее значение для поддержания температурного режима, а значит, и сохранности перевозимого груза. Поэтому обеспечение доступности своевременного сервиса в пути следования является важнейшей задачей.

Анализ последних разработок вагоностроителей в области подвижного изотермического состава показывает, что приоритет отдается одиночным вагонам – автономным рефрижераторным и термосам. В качестве холодильного оборудования предлагаются агрегатированные холодильные установки с дизель-генераторной установкой для большеобъемных авторефрижераторов моделей Carrier Transicold Vector HE 19 и Thermo King SLXI 400 [169, 170]. В этой связи необходимо учитывать месторасположение сервисных центров и готовность компаний – производителей транспортных холодильных машин расширять полигон их работы. Основные маршруты перевозок в этих вагонах будут связывать Дальний Восток – Москву – Санкт-Петербург. Обе эти компании имеют развитую дилерскую и сервисную сеть – Thermo King (всего 39, на маршруте 25), Carrier (41/17). Но характер взаимодействия с потребителями во многих случаях строится с позиции «диктата». А небольшие объемы выпуска (по сравнению с автомобильными холодильными агрегатами) вряд ли заставят изменить политику этих компаний. В этой связи целесообразно рассмотреть в рамках программ по импортозамещению производство подобного холодильного оборудования в России. Например, один из крупнейших производителей автомобильных холодильных установок в России – компания «ТерраФриго», имеющая в своем составе свою сервисную сеть из 105 центров, из которых 25 расположены на этом маршруте движения, проявляет интерес к этой тематике.

1.3. Анализ методического обеспечения проектирования изотермических вагонов. Оценка направлений развития при конструировании изотермических вагонов

1.3.1. Состояние вопроса о проектировании изотермического подвижного состава

Ранее заказчиком ИПС выступало Министерство путей сообщения, а изготовителем являлись предприятия министерств других отраслей промышленности и вагоностроительные заводы Германии, которые на

основании изучения потребностей в перевозках, по результатам проведенных научных исследований и прогнозов развития транспортного рынка, разрабатывали исходные технические требования (ИТТ) к новому вагону [104] В них обосновываются основные технические параметры и экономические показатели заказываемого вагона. Также в ИТТ оговариваются параметры ГП и условия размещения перевозимого груза, допустимые типы тары и упаковки, обеспечивающие согласованную работу с грузоподъемными средствами грузополучателей и отправителей. Обуславливаются конструктивные особенности теплоизолированного кузова, специализированного холодильного и энергетического оборудования, средств автоматизации их работы, что в комплексе должно обеспечивать надежную защиту СПГ от порчи в процессе транспортировки.

Разработчик технической документации и изготовитель продукции при реализации технических требований основывается на исследованиях отечественных и зарубежных ученых, инженеров, а также потребностях логистических и операторских компаний, занимающихся эксплуатацией и перевозок в ИПС.

Среди наиболее часто используемых работ в области выбора технических параметров и экономического их обоснования, прежде всего, необходимо отметить исследования отечественных ученых: Г. П. Виноградова, М. В. Винокурова, Г. П. Гладовского, В. И. Дмитриева, Г. И. Игнатенкова, В. В. Кобищанова, В. Н. Котуранова, Б. Г. Кеглина, В. В. Лукина, В. П. Лозбинева, М. М. Машнева, Е. В. Михальцева, Е. Н. Никольского, В. В. Повороженко, Л. А. Шадура, А. А. Хохлова, В. М. Акулиничева, К. А. Бернгарда, В. М. Богданова, Ю. П. Бороненко, А. А. Битюцкого, Т. В. Елисеевой, Л. А. Когана, Л. Д. Кузьмича, В. С. Лысюка, А. М. Макарошкина, В. Н. Орлова, М. М. Соколова, Е. Д. Ханукова, Ю. А. Хапилова, В. В. Чиркина, А. С. Чудова, Н. А. Чуркова, Ф. Г. Гохмана, И. Л. Хасмана и др.

Теоретические основы динамики подвижного состава, методики выбора оптимальных параметров ходовых частей вагонов и их динамической

нагруженности заложены в работах П. С. Анисимова, Е. П. Блохина, М. Ф. Вериги, С. В. Вершинского, М. В. Винокурова, В. И. Варавы, А. М. Годыцкого-Цвирко, Л. О. Грачёвой, В. Н. Данилова, В. Д. Дановича, Ю. В. Дёмина, А. А. Долматова, Е. П. Дудкина, О. П. Ершкова, И. П. Исаева, Л. А. Кальницкого, А. А. Камаева, В. А. Камаева, Н. А. Ковалёва, К. П. Ковалева, Н. Н. Кудрявцева, С. М. Куценко, М. Л. Коротенко, А. Я. Когана, Ю. Л. Кофмана, Л. Д. Кузьмича, Н. А. Костенко, В. А. Лазаряна, А. А. Львова, Л. А. Манашкина, В. Б. Медея, Л. Н. Никольского, Н. А. Орловой, А. М. Панькина, М. Н. Пахомова, Г. И. Петрова, Х. Х. Погорелова, А. А. Попова, Ю. С. Ромена, А. Н. Савоськина, А. В. Смольянинова, М. М. Соколова, Т. А. Тибилова, В. Ф. Ушкалова, В. Д. Хусидова, И. И. Челнокова, Ю. М. Черкашина, В. Ф. Яковлева, Л. И. Бартеневой, Г. П. Бурчака, О. Г. Бойчевского, А. Б. Сурвило, А. Д. Кочнова.

В исследованиях многих авторов проблема повышения эффективности связывается с задачей построения типоразмерного ряда. В работах [6, 104, 134] приведены теоретические основы построения оптимальных типоразмерных рядов вагонов. Рассмотренные методы, достаточно строгие с точки зрения специалиста по прикладной математике, опираются, как правило, на идеализированные модели и ограничиваются задачей получения весьма небольшого числа параметров.

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 и др.

Исследованиям теплотехнических параметров ограждающих конструкций и их тепловых полей в изотермических кузовах посвящены работы В. Ф. Барабанщикова, Г. И. Верникова, М. А. Зворыкина, К. В. Иванова, Б. Н. Китаева, В. Н. Панферова, С. А. Сапожникова, Ю. П. Сидорова, А. А. Шустера и др.

Вопросы совершенствования конструкции и технологии перевозок СПГ в РПС представлены в работах В. П. Гольцева, В. А. Гудковского, А. П. Дюбко,

И. П. Екимовского, Д. К. Касымовой, А. В. Коковихина, Л. В. Куликовской, М. Н. Тертерова, И. В. Ткачева, В. К. Мироненко, В. Н. Пирожинского, В. Н. Панферова и др.

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

Однако абсолютное большинство этих работ выполнялись более 30 лет назад и не учитывают современные достижения в области холодильного и электротехнического машиностроения, информационных технологий, новых материалов и не отражают потребностей клиентуры на современном рынке транспортных услуг при перевозках СПГ. За этот период произошли огромные изменения в структуре, объемах и логистических маршрутах перевозок СПГ.

Проведенный анализ состояния разработок и использования систем проектирования на вагоностроительных предприятиях за последние годы показал, что в вагоностроении накоплены значительный методический материал и опыт его практического применения, основанные на использовании вычислительных комплексов и вычислительных средств различного стандарта, а также проектирующих подсистем, разработанных на различных методических подходах. Причем все разработки касаются грузовых и пассажирских вагонов, а для ИПС, который не производится уже четверть века, такие разработки отсутствуют.

Методы конструирования ИВ должны существенным образом отличаться от метода создания универсальных вагонов как алгоритмом синтеза, так и методологией расчета и испытаний их работоспособности ввиду разных величин

расчетных внешних нагрузок и сильной зависимости от работы энергохолодильного оборудования, делающего возможной перевозку груза с требуемыми климатическими параметрами. В частности, одним из расчетных режимов для грузовых вагонов является нагрузка от воздействия груза при его сдвиге равной $1/3$ грузоподъемности, что характерно для сыпучих грузов, которые в ИПС не перевозятся.

Не делая детального анализа конструкций вагонов, автор считает, что наиболее близкими к ИПС конструктивно являются пассажирские вагоны, так как в них также имеются аналогичные специальные системы энергоснабжения и поддержания температурного режима, которые самым существенным образом влияют на конструкции остальных подсистем и формирование окончательного образа вагона. Например, при изготовлении пассажирских вагонов используется продукция более 2500 предприятий – изготовителей деталей, узлов и агрегатов.

Опыт, накопленный в смежных областях машиностроения, показывает, что в последнее десятилетие получили развитие специализированные системы проектирования энергетического, холодильного оборудования, а также информационно-управляющих систем. При этом разработчик каждой из систем является высококвалифицированным профессионалом в своей области и пользуется исходными техническими требованиями и техническим заданием предприятия – изготовителя конечной продукции – ИВ. Однако имеющиеся производственные мощности по выпуску рефрижераторных вагонов были перепрофилированы на выпуск другой продукции много лет назад, кадры утеряны. Из-за серьезных изменений в условиях рыночной экономики при совершенствовании ИПС имеет место размытость не только в формировании технических характеристик вагона, но и относительно назначения и условий его эксплуатации.

1.3.2. Опыт создания вагона термоса модели 16-1807-04 ПАО «Азовобщемаш»

Учитывая выход из эксплуатации устаревших изотермических вагонов-термосов, эксплуатируемых в настоящее время, для рынка стран СНГ был разработан вагон-термос модели 16-1807-04. Данная модель вагона производилась на предприятии ПАО «Азовобщемаш», входящем в группу предприятий «Азовмаш» (г. Мариуполь, Украина). Вагон-термос представлен на рисунке 1.10.



Рисунок 1.10 – Вагон-термос

Вагон-термос модели 16-1807-04 предназначен для перевозки СПГ, требующих при перевозке железнодорожным транспортом защиты от воздействия температур наружного воздуха, термически подготовленных до погрузки (замороженные, охлажденные, обогретые) со сроком годности менее 10 суток и не выделяющих биологическое тепло (свежие плоды, овощи, картофель, ягоды и бахчевые культуры), а также нескоропортящихся продовольственных и непродовольственных тарно-штучных грузов, не оказывающих вредного влияния на внутреннее оборудование вагона-термоса, по железным дорогам колеи 1520 мм стран СНГ, Грузии, Латвийской Республики, Литовской

Республики и Эстонской Республики. Вагон-термос изготавливается с обеспечением эксплуатационной надёжности работы в диапазоне температур от минус 60 °С до плюс 50 °С [26].

Общий коэффициент теплопередачи вагона-термоса 0,25 Вт/(м²·К), что выгодно отличает вагон от существующих аналогов по этому параметру. Такой низкий коэффициент теплопередачи обеспечивают применение жесткого пенополиуретана «Эластопор-Н» и новая технология напыления изоляции. Вагон имеет напыляемую теплоизоляцию «Эластопор» со средней плотностью напыления 40-45 кг/м³ и заявляемым коэффициентом теплопроводности 0,0205 Вт/м²·К. Коэффициент теплопередачи кузова, полученный при испытаниях, составляет 0,25 Вт/ м²·К.

Ограждающие теплоизоляционные конструкции кузова устроены таким образом, что сначала на металлическую обшивку стен и потолка прикрепляются деревянные бруски, образуя в вагоне отдельные ячейки (секции). Данные ячейки наполняются изоляционным слоем, который напыляется из пневмоаппаратов. После отвердевания избыточная теплоизоляция срезается и устанавливается внутренняя обшивка грузового помещения. Данный способ обеспечивает достаточную скорость выполнения работ, хорошее качество изоляционного слоя, так как при отвердевании пенополиуретановой массы не образуется воздушных прослоек, в которых в процессе эксплуатации может образовываться конденсат, ухудшая теплотехнические характеристики кузова и сокращая срок его службы [39].

1.3.3. Автономный рефрижераторный вагон с комбинированной системой охлаждения модели 16-2155

АО «Алтайвагон» разработал АРВ, оснащенный комбинированной системой охлаждения и подогрева [4]. Вагон имеет два машинных отделения, расположенных по торцам кузова. С одной стороны кузова расположены жидкоазотная система охлаждения и блок подогрева пола на жидком топливе, а с

другой стороны смонтирована фреоновая холодильная установка с дизель-генераторным агрегатом (ДГА) холодопроизводительностью 18 кВт при 0 °С. Использование этих систем позволяет обеспечивать температуру внутри вагона от –20 до +15 °С при температуре окружающей среды от –60 до +55 °С. Вагон оборудован напольной системой циркуляции воздуха, подобной используемой в КРК. Распределительные устройства для жидкого азота смонтированы в верхней части грузового помещения за фальшпанелью. За основу взят кузов серийно выпускаемого АО «Алтайвагон» универсального крытого вагона модели 12-2135-01. При этом АРВ имеет грузоподъемность 50 т, объем кузова 108 м³, внутренние габариты ГП составляют 15 744 мм (длина) и 2438 мм (ширина). Коэффициент теплопередачи кузова составляет $K_{т.п.} = 0,25 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}$. В качестве ходовых частей используются трехэлементные грузовые тележки 2-го типа с осевой нагрузкой 23,5 т модели 18-2128.

В этом АРВ можно перевозить и нескоропортящиеся тарно-штучные грузы, а также иные грузы, не оказывающие вредного воздействия на внутреннюю обшивку. Вагон оснащен дистанционной системой мониторинга и управления работой оборудования по каналам GSM. Обслуживание и заправка оборудования дизельным топливом и жидким азотом производятся снаружи вагона через технологические люки. АРВ модели 16-2155 представлен на рисунке 1.11.



Рисунок 1.11 – АРВ модели 16-2155

Ведущим предприятием страны по производству рефрижераторных вагонов являлся «Брянский машиностроительный завод», который выпускал рефрижераторные вагоны более 25 лет (до 1991 г.). Одной из последних его разработок в этом направлении стал нереализованный проект вагона-термоса модели 16-3127, в котором был учтен его многолетний собственный опыт и опыт вагоностроителей немецкого предприятия «Вагонбау» (г. Дессау).

В нем за основу была принята конструкция отечественного вагона-термоса с выполнением ограждений кузова в технике «сэндвич» панельного типа как наиболее технологичная и рациональная, с внутренним расположением подкрепляющих элементов.

Наружные размеры вагона-термоса приняты такими же, что и в ранее выпускаемых БМЗ рефрижераторных вагонах, а использование площади машинного отделения позволяет увеличить полезный объем вагона и повысить его грузоподъемность. Для облегчения механизированной погрузки дверные проемы погрузочных дверей увеличены до габаритов 2700×2300 мм.

Кузов вагона выполнен в технике «сэндвич» и собирается из полностью изготовленных панелей крыши, блока «рама – пол», четырех боковых стен, дверных проемов, торцевых стен путем приварки их к раме и между собой так, что подкрепляющие элементы панелей и балки образуют замкнутый несущий корпус. Для наружной обшивки кузова применяется гофрированный прокат толщиной 1,5 мм из низколегированных сталей по ГОСТ 19281-89. Внутренняя обшивка выполняется из оцинкованной стали толщиной до 1 мм. Полы выполняются из пластиковых досок толщиной 25 мм. В качестве среднего изоляционного и несущего слоя панелей выбран пенополиуретан, который может быть вспенен двумя способами: напылением и заливкой. Дверное место армируется обвязкой из пластика. Толщины ограждений панелей кузова предварительно приняты следующие: стены боковые – 200 мм, стены торцевые – 210 мм, крыша – 220 мм, пол – 220 мм. Полностью изготовленные и изолированные панели кузова поступают на сборку кузова, где они соединяются путем сварки [130].

1.3.4. Изотермические вагоны производства АЗТМ

На базе и в развитие предыдущих разработок ПАО «Азовобщемаш» на Армавирском машиностроительном заводе были разработаны две модели ИВ [25]. Первая – вагон-термос модели 16-6962 – была доведена до изготовления и сертификации. Другая – АРВ модели 16-6973, к сожалению, не был окончательно реализован в опытном образце, но АО «Уралвагонзавод» по аналогичной компоновочной схеме изготовил и сертифицировал АРВ модели 16-5213. Вагоны моделей 16-6962 и 16-6973 представлены на рисунках 1.12 и 1.13.



Рисунок 1.12 – Вагон модели 16-6962

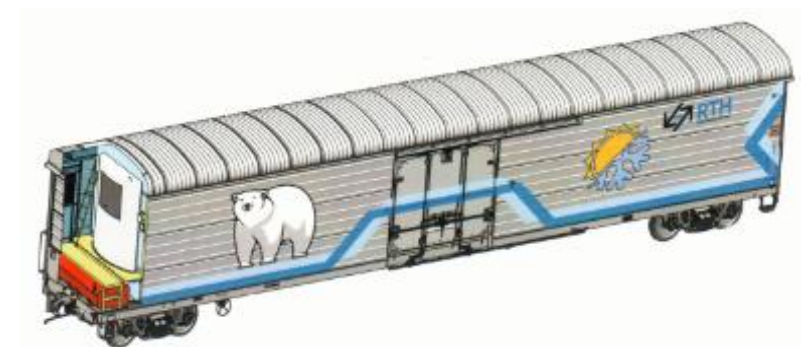


Рисунок 1.13 – Вагон модели 16- 6973

Инновационная модель вагона-термоса производства Армавирского машиностроительного завода, которая превосходит по многим техническим параметрам существующие аналоги, решает на рынке железнодорожных перевозок одну из основных задач – снижение дефицита ИПС на фоне отсутствия серийного производства новых современных вагонов такого вида.

Дополнительную прочность конструкции изделия обеспечивает многослойная система профилей из композитных материалов с низкой теплопроводностью, установленных на раме цельносварной конструкции, что повышает прочность пола при работе автопогрузчика. Применяемый в конструкции изделия жесткий пенополиуретан позволяет в течение всего срока службы вагона сохранять его высокие теплоизоляционные свойства, что является определяющим фактором при эксплуатации вагона-термоса. Технические характеристики ИВ производства АЗТМ представлены в таблице 1.2.

Таблица 1.2 – Технические характеристики изотермических вагонов

Наименование параметров	Величина параметров	
	Вагон модели 16-6962	АРВ модели 16-6973
Ширина колеи, мм	1520	1520
Масса тары, т	37,3	42
Грузоподъемность, т, не более	62,7	58
Максимальная расчетная статическая нагрузка от колесной пары на рельсы, кН (тс)	245 (25)	245 (25)
Объем кузова м ³ / Площадь пола, м ²	137/51,2	115/47,2
Длина вагона по осям сцепления автосцепок, мм	22160	22160
База вагона, мм	16800	16800
Коэффициент теплопередачи ограждения кузова, Вт/м ² ·К, не более	0,2	0,2
Конструкционная скорость км/ч	120	120
Габарит по ГОСТ 9238	1-ВМ	
Назначенный срок службы, лет	32	
Время работы холодильной установки в автономном режиме		До 30 суток

Заявленные характеристики ВТ модели 16-6962 по грузоподъемности отличные, но достигнуты они за счет использования тележек с увеличенной осевой нагрузкой, а тара получилась более чем на 4 т тяжелее вагона ТН4-201, который выполнялся с напольными решетками (а это добавляет к таре еще примерно одну тонну).

В автономном вагоне модели 16-6973 использована навесная автомобильная интегрированная холодильная установка импортного производства с собственным ДГА. В машинном отделении на полу смонтирован топливный бак

На этапе конструирования не были решены вопросы соответствия холодопроизводительности холодильной машины и воздухораспределения термообработанного воздуха в ГП. Эта модель холодильной установки предназначена для продувки ГП определенной длины авторефрижератора, которая меньше длины ГП АРВ модели 16-6973. Кроме этого, до конца не был решен вопрос и о типе ходовых частей для вагона. Использование новых моделей грузовых тележек с одинарным рессорным подвешиванием с нагрузкой 25 т на ось не обеспечивает приемлемых динамических характеристик для этого типа вагонов.

В 2020 г. ПАО «УВЗ» провело сертификацию и подготовило к серийному выпуску АРВ модели 16-5213. Компонировочные и технические решения энергохолодильного оборудования идентичны АРВ модели 16-6973. Одностороннее расположение холодильного оборудования в кузове длиной 21 м позволяет достичь полного объема 126 м³ при полезном объеме 115 м³ [169, 170].



Рисунок 1.14 – Машинное отделение АРВ модели 16-5213

Еще одним способом сохранения численности ИПС является продление срока использования изотермических вагонов-термосов. В 1990-е годы из-за не востребоваемости РПС в перевозках СПГ часть рефрижераторных вагонов была отставлена в резерв, запас и на консервацию.

В то же время на транспортном рынке стала ощущаться нехватка одиночных изотермических вагонов. Дефицит одиночных вагонов и плачевное состояние рефрижераторных вагонов, находящихся в «холодном запасе», заставили ОАО «Рефсервис» переоборудовать АРВ и грузовые вагоны рефрижераторных секций из «холодного отстоя» в изотермические вагоны-термосы (ИВ-термосы). При этом было демонтировано все энергетическое и холодильное оборудование и проведена модернизация и обновление теплоизоляционных ограждающих конструкций кузова. Переоборудование вагонов осуществляется по техническим условиям и включает в себя два варианта модернизации. Первый предусматривает заделку проема торцевой стены, образовавшегося после демонтажа холодильной машины. При этом увеличивается грузоподъемность, а полезный объем ГП остается неизменным. Во втором случае осуществляется демонтаж торцевых перегородок. Машинное отделение подвергается доработке – вместо вентиляционных решеток устанавливаются листы гофрированной обшивки боковых стен, и на торцевые и боковые стены машинных отделений накладывается теплоизоляция, которая закрывается листами внутренней обшивки. В этом случае полезный объем кузова увеличивается до 126 м³.

В настоящее время срок службы этих вагонов подходит к концу. Ввиду дефицита изотермического подвижного состава и необходимости его приведения в соответствие требованиям ТР ТС-2011-01 было принято решение о проведении модернизации с продлением срока службы. Для этих целей используются рефрижераторные вагоны моделей 16-380 и 16-3000 рефсекций БМЗ и ЦБ5-659 рефсекций немецкого производства [130].

Проведение указанных работ по модернизации и продление срока службы на 12 лет позволят снизить дефицит списываемых рефрижераторных и ИВ. Однако модернизация и продление срока службы рефрижераторных вагонов экономически нецелесообразны по следующим причинам:

- физический износ и исчерпание моторесурса холодильного и дизельного оборудования;

- появление на рынке нового поколения более энергоэффективного холодильного и дизельного оборудования;
- невозможность использования при проведении работ по капитальному ремонту вагоноремонтных заводов вследствие их перепрофилирования;
- ужесточение экологических требований к энергохолодильному оборудованию.

Анализ особенностей конструкций и эксплуатации существующих рефрижераторных вагонов и вагонов-термосов показал, что они морально и физически устарели и не удовлетворяют требованиям экономичности, экологичности и надежности.

В этой связи появляется необходимость разработки новых и серьезной переработки старых методик и подхода к конструированию типажа ИВ нового поколения, удовлетворяющих запросам операторов и собственников ИПС. Поэтому в нынешних условиях экономического кризиса и значительно изменившейся структуры производства, распределения и потребления скоропортящейся продукции формирование технических требований по созданию ИПС нового поколения и актуализация технических решений для создания типоразмерного ряда ИВ с расширенными функциональными возможностями и потребительскими качествами, улучшенными технико-экономическими и динамическими параметрами являются актуальной задачей.

На основании обобщения ранее выполненных исследований и анализа конструкций основных систем ИПС различных производителей, необходима актуализация технических решений функциональных систем ИВ для перевозок разных видов СПГ. Это потребует решения ряда важных задач по созданию различных типов конкурентоспособного инновационного ИПС с расширенными потребительскими качествами и более совершенными техническими характеристиками, удовлетворяющими требованиям современного рынка транспортных услуг.

1.4 Формулировка проблемы и постановка задач исследований

Ориентация стратегических направлений развития транспортной инфраструктуры (ТИ) на потребности российской экономики, обеспечение поступательного развития и устранения технологических барьеров, сформулированные в национальных в транспортных программах и стратегиях, требуют локализации определенных задач на плоскости научно-технических инновационных разработок.

Локализация проблемы развития ТИ на конкретной группе грузов, со специфическими условиями организации, требованиями к парку транспортных средств, терминальным комплексам обслуживания грузопотоков и транспортных средств в пути их следования, трансформирует типовые методологические подходы к исследованию транспортных систем.

Обеспечение мобильности потоков пищевых продуктов на большие расстояния по территории Российской Федерации направлено на повышение продовольственной безопасности страны. Комплексный подход, предусматривающий рассмотрение экономических аспектов технологических концепций и решений, требует качественного анализа текущего состояния ТИ и возможных направлений ее стратегического развития. При этом стратегические решения базируются на анализе ключевых трендов в макроэкономике, влияющих на транспортно-логистический рынок СПГ, таких как индексы роста отраслей экономики, демографии и доходов населения, влияющие на структуру и содержание потребительской корзины; индексы цен и тарифов; институциональные изменения на рынке транспортно-логистических услуг и технологий перевозочного процесса; инновации в развитии транспортных услуг; инвестиции в основные средства транспорта и сферы логистических услуг и другие [16, 77, 150, 151, 236]. К существенным факторам развития данного сегмента относятся геополитические, транснациональные и национальные факторы, такие как конкуренция в сфере экспорта транспортных услуг, развитие транспортных коридоров, «борьба» видов транспортной работы за мощности ТИ [16, 124, 226, 236, 242].

Необходимость отдельного рассмотрения экономических и технологических основ развития подвижного состава (ПС) и ТИ для перевозок СПГ связана со снижением инвестиционной активности в последние десятилетия в развитие специализированного изотермического подвижного состава (ИПС) и транспортных средств для перевозки СПГ. В то же время влияние этой инфраструктуры на обеспечение продовольственной безопасности нашей страны, географически несоизмеримой с другими территориями, требует рассмотрения проблемы с учетом отечественной специфики [77, 136, 150, 152].

Укрупненные этапы стратегических исследований ТИ для перевозок СПГ в транспортной системе страны представлены в таблице 1.3 [74].

Таблица 1.3 – Этапы и содержание исследований ТИ для перевозок СПГ

Наименование этапа	Содержание исследований
1	2
Прогнозирование и локализация объемов перевозок СПГ в ТС страны и формирование транспортно-экономических балансов	На основе динамики перевозок грузов и грузопотоков, спроса и предложения товаров, резервов и прогноза роста отраслей экономики, требующих перевозок СПГ, и с учетом локализации пунктов производства и потребления СПГ определяется прогноз перевозок грузов и грузопотоков СПГ в ТС с использованием балансовых моделей
Распределение объемов перевозок между видами транспорта	С учетом конфигурации транспортной сети, грузопотоков СПГ по сети, доступных транспортно-технологических решений с использованием моделей распределительных задач производственно-транспортного планирования определяется распределение грузопотоков СПГ на транспортной сети
Определение потребности в развитии транспортной инфраструктуры для перевозок СПГ с учетом инновационных решений	Определяются технологические параметры организации перевозок СПГ по видам транспорта, на основе анализа отечественного и зарубежного опыта, современных требований к инновационным проектам и решениям в разработке ИПС, рефрижераторного ПС (РПС), крупнотоннажных контейнеров (КТК) (энергоэффективность, экологичность и др.), методов и технологий проектирования ИПС и холодильных цепей, а также моделей и методов загрузки транспортных средств и оборудования
Оценка необходимости и пересмотра грузопотоков СПГ в ТС страны	На основе анализа и оценки характеристик проектируемых (перспективных) инновационных и эксплуатируемых ПС, условий для изменения схемы транспортировки СПГ с привлечением аппарата экспертных оценок, количественных методов оценки эффективности схем транспортировки принимается решение по изменению грузопотоков и технологий транспортировки

Продолжение таблицы 1.3

1	2
Разработка и локализация технических решений для перевозки СПГ в отечественной ТС и формирование решений по трансформации ТИ	На основе анализа технических условий, регламентов, стандартов и нормативно-правового окружения инновационных решений (патенты), проводятся изменения технологических платформ проектирования и эксплуатации ИПС, развитие ТИ перевозки СПГ

С методических позиций прогнозирование объема перевозок СПГ – достаточно сложная задача, которая базируется на эмпирической базе маркетинговых данных спроса на продукты категории СПГ, тарифных ставок на транспортировку грузов с учетом расстояния и транспортно-логистических решений и технологий, сложившейся сегментации рынка по видам продукции и других данных. Сложность рассмотрения этой задачи и получения адекватных оценок связана с необходимостью проведения исследований с привлечением детализированных баз данных различных отраслей, ведомств и предприятий.

Ключевым элементом в разработке и реализации такой стратегической задачи является прогнозирование и формирование транспортно-экономических балансов.

Общая методологическая схема исследования ТИ для перевозок СПГ в транспортной системе страны имеет вид, представленный на рисунке 1.15.

С позиции транспортной отрасли, при решении вопроса развития ТИ допускается агрегирование товаропотоков, формирующее вагонопотоки или потоки с иными грузовыми единицами по признаку однородности технологий транспортировки. К таким признакам для агрегирования грузопотоков относится требование к подвижному составу и видам транспорта. На железнодорожном транспорте для перевозки СПГ используются различные типы ПС, но в целом рекомендуется однородный ИПС.

В силу этого решение задач первых этапов исследования, представленных в таблице 1.3, может быть сведено к общему анализу динамики грузопотоков СПГ, с возможностью оценки спроса на транспортную инфраструктуру с локализацией по типологии ИПС.

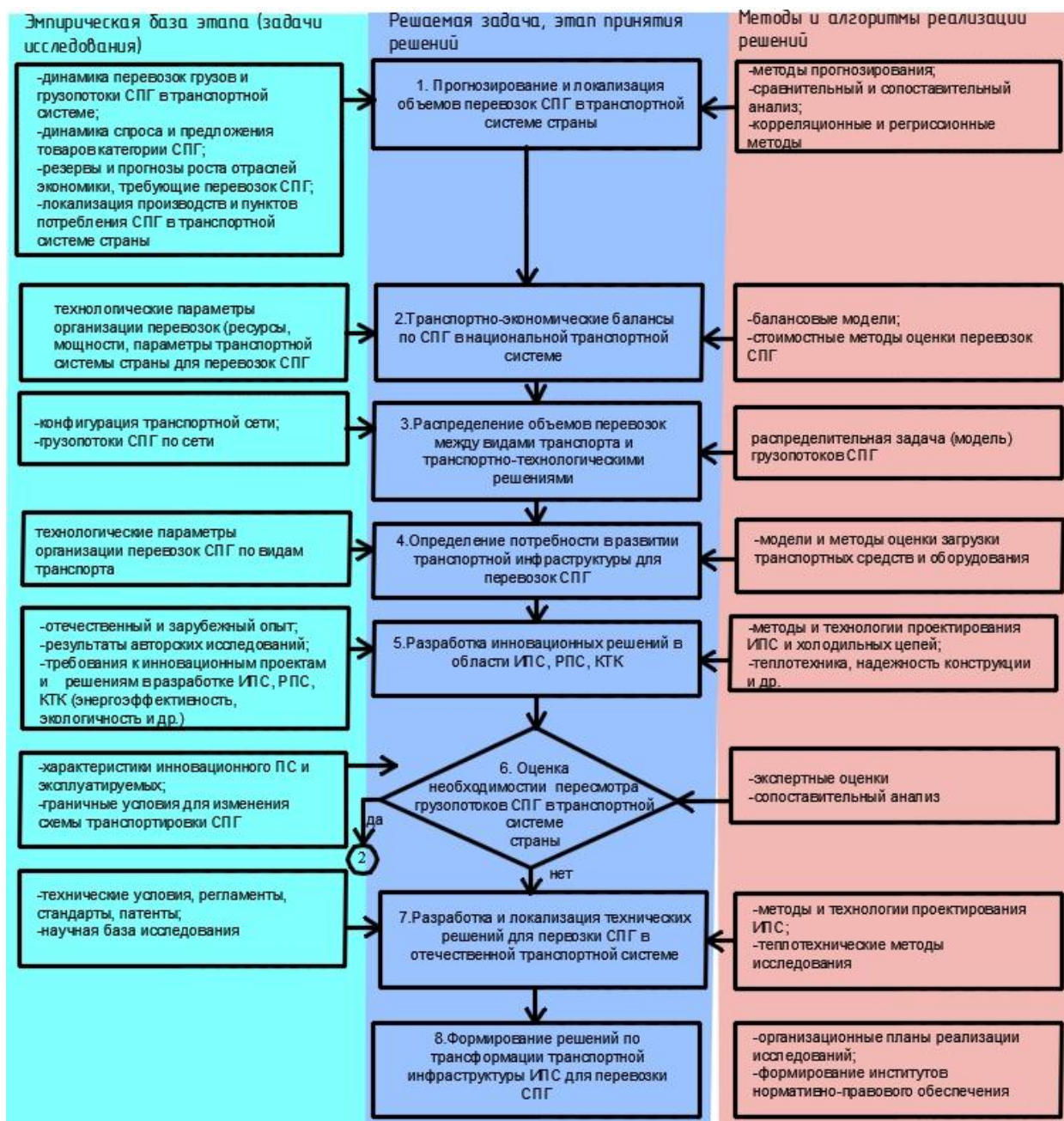


Рисунок 1.15 – Общая методологическая схема исследования ТИ для перевозок СПГ [61]

Таким образом, стратегическая задача развития ТИ для перевозки СПГ решается комплексно в экономических и технологических сферах исследований.

При этом следует отметить, что в современных рыночных и конкурентных условиях в лице различных транспортных и операторских компаний появляется необходимость создания специализированных вагонов с новыми функциональными возможностями и улучшенными потребительскими параметрами.

Однако существующие методики конструирования грузовых вагонов не могут быть эффективно использованы при разработке новых специализированных ИВ, так как в них не используются особенности современных конструктивных решений специализированного оборудования этого подвижного состава.

В связи с этим возникла необходимость в структурно-системном подходе к конструированию специализированных ИВ. Появляется необходимость адаптивирования уже созданных методик конструирования грузовых вагонов, основанных на блочно-модульном принципе проектирования, к созданию специализированного ИПС. Создание эффективной конструкции может быть реализовано при наиболее полном учете связей между этими элементами путем построения функциональных зависимостей между частями механической системы и факторами транспортной системы, взаимодействующими с ней [104]. Для этого предлагается использовать метод актуализации технических решений.

Метод актуализации технических решений – это подход в методологии науки, согласно которому на основе изучения современных процессов в конструировании и эксплуатации ИПС можно прогнозировать развитие аналогичных транспортных средств в будущем.

Метод актуализации опирается на широкое обобщение эмпирического материала по эксплуатации подвижного состава, что в итоге дает возможность вскрыть общие закономерности его развития. Органической частью этого метода является процесс регулярного уточнения расчетных моделей подвижного состава с учетом всех накапливающихся изменений и отказов конструкций, а также различных условий их эксплуатации.

В соответствии с вышеизложенным основной целью настоящей работы является развитие методологии организации перевозки 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 энергохолодильное оборудование востребованных отечественным рынком типов ИПС для повышения продовольственной безопасности страны.

Для достижения поставленной цели были сформулированы для последующего решения приведенные ниже задачи:

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

2. АКТУАЛИЗАЦИЯ ПОЛОЖЕНИЙ И ТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ КОНСТРУИРОВАНИЯ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННОГО ПОДВИЖНОГО СОСТАВА ДЛЯ ПЕРЕВОЗОК СКОРОПОРТЯЩИХСЯ ГРУЗОВ

2.1. Концептуальные подходы к актуализации технических решений

Развитие организации перевозок СПГ в существующих условиях сдерживается из-за предельного физического и морального износа имеющегося и оставшегося в рабочем парке ИПС, железнодорожной инфраструктуры, всех составных элементов единой холодильной сети, технического обслуживания и ремонта такого подвижного состава.

Поэтому, в идеальном варианте, новый ИПС для СПГ должен представлять собой типаж разнопланового подвижного состава, отличающегося габаритно-весовыми параметрами кузова вагонов, конструкцией ходовых частей, тормозного оборудования с разными управляющими и исполнительными механизмами, а самое главное – типом автономных систем энергоснабжения и систем термостабилизации (холодильным и нагревательным оборудованием).

ИПС имеет большую стоимость и относится к специализированному транспорту, для которого характерными являются значительные порожние пробеги. Для улучшения экономических показателей его использования практикуются перевозки попутных нескорпортящихся грузов, для которых удельные экономические показатели будут зависеть от грузоподъемности.

В условиях неясностей и нестабильности товаропотоков СПГ на маршрутах перевозок проявляется неопределенность и в требованиях к технико-экономическим параметрам ИПС.

После реформирования МПС в отрасли исчезла государственная организация, координирующая деятельность разноплановых технологических операций при организации и выполнении перевозок СПГ (техническое обслуживание и подготовка к перевозке, погрузка, перевозка, выгрузка) на всех этапах НХЦ.

Все эти этапы были отданы на откуп различных организаций – участников этого рынка транспортных услуг (ЦФТО, ЦД, ЦМ, АО «Рефсервис» и операторских и логистических компаний) у которых преобладает свой ведомственный подход. В этих условиях формирование универсальных, единых и обоснованных требований к типу и технико-экономическим параметрам ИПС становится просто невозможным.

Для вагоностроительных заводов характерной является возможность универсализации комплектующих узлов и деталей, которые будут использоваться при выпуске различных типов ИПС. С учетом относительно небольшого объема выпуска таких вагонов в современных условиях, он имел бы очень высокую цену, значительный срок окупаемости и не нашел бы спроса у операторских компаний, которые отдадут свое предпочтение КРК.

Поэтому более рациональным является другой подход к организации перевозок СПГ, при котором для конкретных транспортных компаний, работающих на устойчиво сложившихся маршрутах, производится ситуационная адаптация ИПС. Это достигается путем оснащения существующих базовых конструкций изотермического кузова вагона энергосиловым и холодильным оборудованием нужной комплектации с минимальными затратами и сроками переоборудования. Более глубокое переоборудование и модернизация ИПС возможны и на вагоностроительных заводах по конкретным требованиям заказчика. Проведение такой модернизации должно основываться на методе актуализации технических решений, описанию которого посвящен данный раздел работы.

Развернутая структура блок-схемы метода актуализации технических решений включает шесть блоков, взаимодействующих между собой через систему прямых и обратных связей, обеспечивающих реализацию поставленных задач (рисунок 2.1).

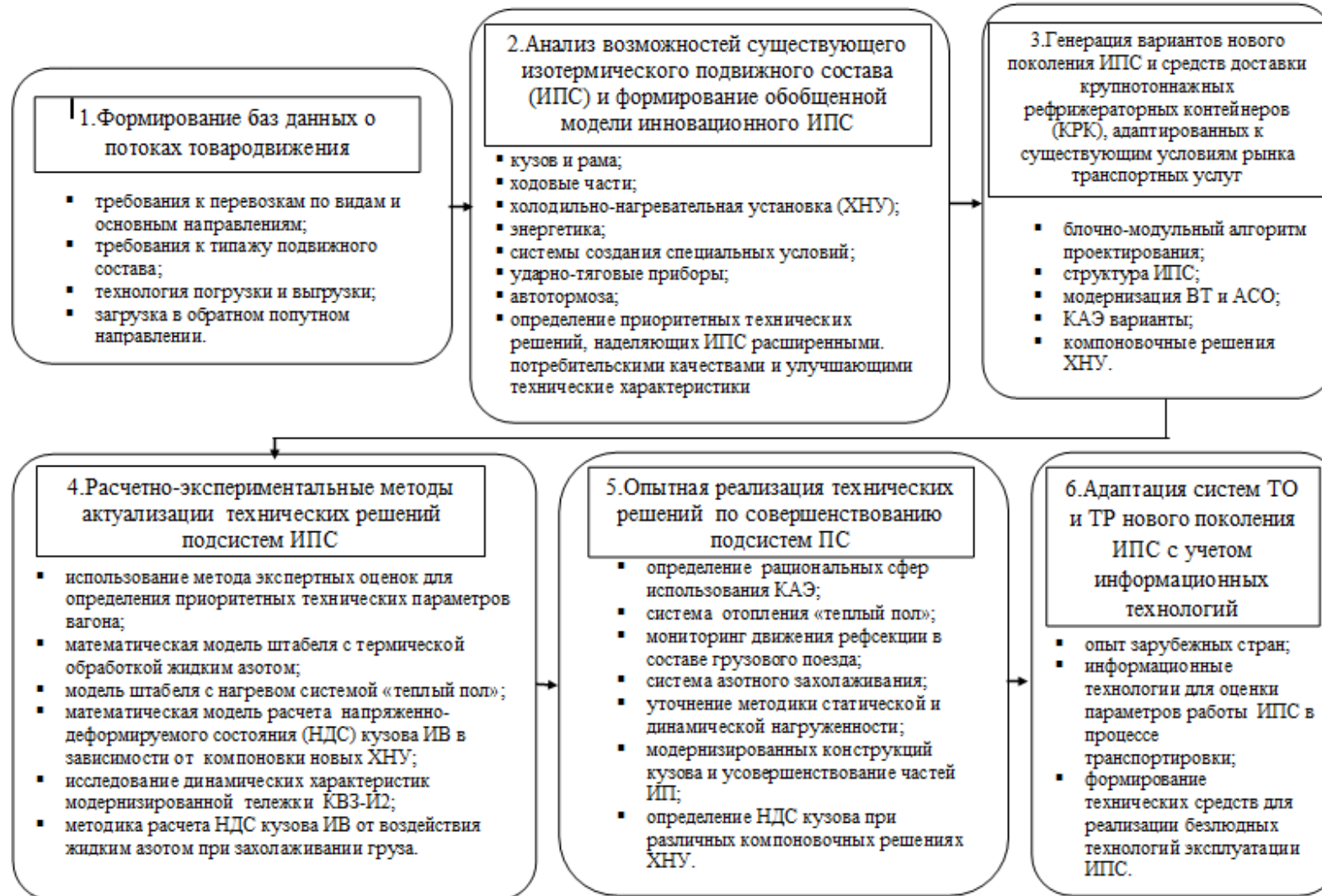


Рисунок 2.1 – Система прямых и обратных связей исследований

Первый блок предназначен для формирования банка данных о потоках товародвижения скоропортящихся продуктов по территории России с фиксацией на крупно- и среднеоптовых базах их хранения и подготовки к перевозкам по городам и мегаполисам

В подблоках раскрываются требования к перевозке разных видов грузов, к таре и упаковке, к технологии погрузки и выгрузки. Формируется банк данных по структуре потоков СПГ, распределению их по крупным и средним оптовым базам подготовки и хранения товаров по регионам России.

Приводятся логистические особенности организации транспортировки товаров железнодорожным транспортом при обслуживании крупных городов и мегаполисов России.

Во втором блоке производится оценка возможностей существующего железнодорожного ИПС России и основных стран мира по перевозке СПГ и разработка обобщенной модели такого вида транспортных экипажей с их специфическими подсистемами для сохранности качества перевозимых грузов.

В подблоках анализируются особенности ИВ России и зарубежных стран. Формируются основные направления в развитии ИВ нового поколения. Разрабатывается обобщенная схема изотермического экипажа с различными вариантами изотермического кузова, рамы, холодильного оборудования, автоматики и контроля как технического состояния, так и местонахождения экипажа на сети железных дорог.

Третий блок освещает генерацию вариантов нового поколения ИВ 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 и выполняемых им функций при транспортировке СПГ. Предложена структура железнодорожного рефрижераторного транспорта для перевозки СПГ в рамках Евразийского экономического союза (ЕАЭС). Сформирован алгоритм модернизации вагона-термоса, позволяющий существенно расширить его функциональные возможности.

В четвертом блоке приводятся модернизированные расчетно-экспериментальные методики актуализации технических решений подсистем ИПС.

В подблоках раскрываются особенности разработанной математической модели термообработки штабеля груза с использованием жидкого азота. Приводятся модернизированные математические модели расчета напряженно-деформированного состояния кузова ИВ в зависимости от компоновки специального оборудования.

Разработаны и исследованы на ЭВМ динамические характеристики модернизированной тележки КВЗ-И2 с текстропным приводом от средней части оси подвагонного генератора.

Описывается методика расчета напряженно-деформированного состояния кузова ИВ от воздействия парожидкостной смеси азота при захолаживании груза в ГП экипажа.

Пятый блок раскрывает особенности опытной реализации важных технических решений по совершенствованию подсистем ИВ, обеспечивающих повышение конкурентоспособности железнодорожных перевозок СПГ.

В подблоках приводится функциональный анализ основных систем рефрижераторного вагона и структура вагона в виде графа функционального взаимодействия элементов технической системы и объектов окружающей среды. Определены наиболее рациональные сферы применения автономных систем энергосбережения, создана интеллектуальная система управления компрессором холодильной установки, уточнена методика статической и динамической нагруженности модернизированных конструкций кузова и усовершенствованных частей РПС.

Шестой блок обобщает адаптацию систем ТО и ТР нового поколения ИВ вагонов, к существующим техническим средствам с учетом современных информационных технологий.

В подблоках приводится опыт зарубежных стран по организации ТО и ТР ИПС по техническому состоянию основных его подсистем, на основе автономных

систем диагностики. Показывается возможность организации ТО и ТР в существующей системе обслуживания пассажирских вагонов и на вагоноремонтных заводах России.

Выполняется технико-экономическое обоснование различных вариантов автономных систем энергоснабжения для ИВ и фитинговых платформ для транспортировки КРК.

2.2. Конструкционные решения основных систем и кузовов изотермического подвижного состава: отечественный и зарубежный опыт

2.2.1. Конструктивные особенности изотермических и рефрижераторных вагонов отечественных железных дорог

Основу парка группового РПС составляют рефрижераторные секции, состоящие из двух энергетических систем: грузовых рефрижераторных вагонов и вагона с дизель-электростанцией и служебным помещением [130, 135].

Брянским машиностроительным заводом (БМЗ) в течение 25 лет выпускались рефрижераторные секции (рисунок 2.2) различных модификаций. С 1965 по 1990 г. заводом был освоен выпуск пяти моделей, отличающихся типом холодильного, дизельного оборудования, а также различными видами систем циркуляции и распределения термообработанного воздуха. Все они состоят из четырех грузовых вагонов с кузовом длиной 21 м и вагона ДЭС, расположенного в середине секции. Вагон ДЭС имел кузов длиной 17 м.



Рисунок 2.2 – Пятивагонная рефрижераторная секция типа БМЗ

Грузовые вагоны рефрижераторной секции – четырехосные, цельнометаллические габарита 1-Т, оснащены тележками пассажирского типа с двойным рессорным подвешиванием КВЗ-И2.

Кузов сварной конструкции имеет несущие гофрированные стенки. Наружная обшивка стен и крыши выполнена из низколегированной стали толщиной 2 мм, внутренняя обшивка стен и потолка ГП – из листов алюминия марки АМГ6 толщиной 2 мм.

Грузовой вагон имеет ГП и машинное отделение. В машинном отделении расположены один над другим компрессорно-конденсаторные агрегаты холодильно-отопительные установки ВР-1М, работающей на хладоне R12 с электропитанием.

Вагон с ДЭС и служебным помещением рефрижераторной секции БМЗ имеет дизельное отделение, кабину управления, салон-кухню, котельное помещение, туалет-душевую, тамбур, отделение для отдыха бригады и аккумуляторную.

В дизельном отделении размещены два дизель-генератора мощностью 75 кВт каждый, водяные и масляные радиаторы с вентилятором, стартерные кислотные батареи, два вентилятора дизельного помещения (производительность каждого 4000 м³/ч) и другое оборудование. Заводом «Вагонбау Дессау» (Германия) с 1970 по 1993 г. выпускались и поставлялись секции типа ZB-5 (рисунок 2.3). В состав каждой секции также входят четыре грузовых вагона с кузовом длиной 21 м, общий грузовой объем которых составляет 400 м³, и расположенный в центре вагон ДЭ с кузовом 17 м.



Рисунок 2.3 – Грузовые вагоны рефрижераторной секции типа ZB-5

Грузовые вагоны рефрижераторной секции типа ZB-5 имеют двухосные бесчелюстные тележки типа ЦМВ-Дессау с двойным рессорным подвешиванием, рассчитанные на скорость 120 км/ч. База тележек равна 2400 мм, нагрузка от оси на рельсы составляет 22,5 Тс. Применен кузов облегченной сварной конструкции. Его наружная обшивка выполнена из стального листа толщиной 1,5 мм с частыми дольными гофрами. Внутри стены обшиты стальным оцинкованным листом толщиной 2 мм с вертикальными гофрами. Потолок выполнен из твердолокнистых плит, пол – из деревянных брусьев, промежутки между которыми заполнены теплоизоляцией. На брусья уложены доски толщиной 45–50 мм, на них наклеены листы биологически нейтральной резины. Теплоизоляция кузова выполнена из полистирола [218].

В вагоне ДЭС рефрижераторной секции расположены служебные помещения и дизельное отделение, в котором размещены два главных дизель-генератора мощностью по 97кВ·А каждый и один вспомогательный мощностью 19 кВ·А.

Также заводом «Дессау» выпускались АРВ модели МК4-424 (рисунок 2.4).

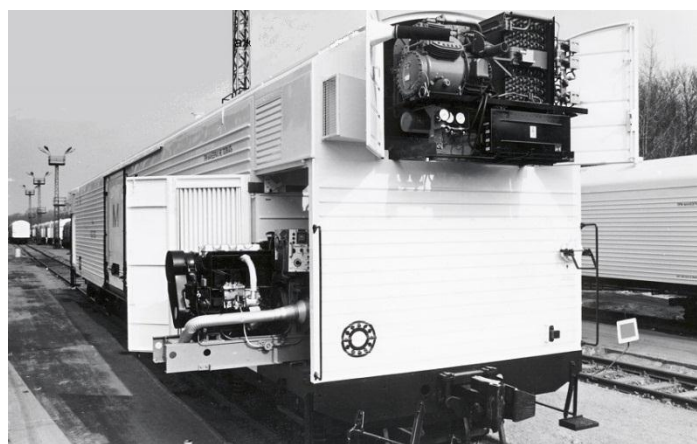


Рисунок 2.4 – АРВ модели МК4-424

Кузов вагона МК4-424 унифицирован с кузовом рефрижераторного вагона рефсекции. Рамы дверей ГП и монтажных люков изготовлены из стеклопластика. В отделениях с каждой стороны торцевой стороны вагона расположены машинные установки, выполненные по блочно-агрегатному принципу. Они

состоят каждая из одного ДГА и одной компрессорной холодильной установки для охлаждения ГП.

АРВ модели МК4-424 выведены из эксплуатации с 1997 г. в связи с упразднением сети пунктов технического обслуживания АРВ.

Кроме рефрижераторных на российских железных дорогах используются ИВ-термосы модели ТН4-201 производства Германии (рисунок 2.5).



Рисунок 2.5 – Вагон-термос модели ТН4-201

Вагоны ТН4-201 рассчитаны на перевозку грузов, которые допускают определенное изменение температурного режима по отношению к состоянию на момент погрузки, чем существенно отличаются от рефрижераторных вагонов, в которых за счет работы энергохолодильного оборудования поддерживается необходимый температурный режим охлажденных или замороженных грузов в процессе их перевозки. В частности, в вагонах-термосах осуществляются перевозки таких продовольственных грузов, изменение температурного режима которых в процессе перевозки допускается в пределах $+10^{\circ}\text{C}$ (консервы, соки, яйца, масло, кондитерские изделия и т. д.). Кузов вагона имеет сварную листовую стальную обшивку, составленную из наружных покровных листов отдельных многослойных конструктивных элементов в виде секций крыши, боковых и торцевых стен, пола и дверей, толщины которых находятся в пределах от 185 до 200 мм. Переход от традиционного исполнения кузова из конструкционных сталей с закладной теплоизоляции к многослойному исполнению в технологии «сэндвич» позволил отказаться от капитального ремонта вагонов через каждые 14–16 лет и достичь безремонтного пробега в течение расчетного срока

эксплуатации 30 лет с минимальными потерями теплоизоляционных качеств ограждающих конструкций кузова.

Но наибольшую численность в парке ИВ РЖД составляют ИВ-термосы, переоборудованные из рефрижераторных вагонов различных моделей путем демонтажа холодильного оборудования. Особенности их конструкции были представлены в п. 1.3.

2.2.2. Железнодорожные перевозки скоропортящихся грузов в Европе

Развитость сети автомобильных дорог в Европе сделала автомобильные перевозки СПГ доминирующими. Железнодорожный холодильный транспорт в странах Европы главным образом используется для перевозок дальностью свыше 300 км или длительностью более 2 суток.

Исторически сложилось, что для Европы основным производителем ИПС ранее (до 1991 г.), являлось предприятие «Вагонбау Дессау» (Германия), которое произвело и поставило в СССР более 50 000 ИВ (из них более 41 тыс. вагонов), Китай, Польшу, Чехословакию, Болгарию, Румынию, Венгрию, Югославию, Грецию, Швейцарию, Корею, Сирию, Иран и даже Кубу.

Номенклатура ИВ весьма разнообразна и включает в себя 2- и 4-осные вагоны-термосы, вагоны-ледники, АРВ, рефрижераторные секции и поезда с различным количеством грузовых рефрижераторных вагонов. На единой технологической платформе, по желанию заказчиков, выпускались различные модификации вагонов с различной компоновкой энергохолодильного оборудования. В зависимости от принятой нагрузки на ось, для каждого заказчика предлагались вагоны определенной грузоподъемности.

Кроме этого, для каждой страны учитывались климатическое исполнение и температурный диапазон эксплуатации вагонов и предлагались различные типы теплоизоляции – от традиционной из полистирольных плит, до крупнопанельных элементов конструкций кузова, выполняемых по технологии «сэндвич».

АРВ модели МК4-434 (рисунок 2.6) предназначался для эксплуатации на железных дорогах Германии. Особенностью компоновки энергетического и холодильного оборудования является отсутствие в машинном отделении прохода. Обслуживание специализированного оборудования осуществляется с наружной площадки, снабженной лестницами и располагаемой на торцевой стене вагона. Другой особенностью этой модели является наличие четырех погрузочных дверей (вместо обычных двух). Такое устройство позволяет сократить время простоя вагона под грузовыми операциями. Внутреннее устройство ГП и энергохолодильное оборудование идентичны конструкциям АРВ модели МК4-424, поставляемых в Советский Союз.



Рисунок 2.6 – АРВ модели МК4-434

В Европе для перевозок небольших партий СПГ используются два типа двухосных вагонов – термосы и вагоны-ледники [244, 245].

Особенностью конструкции изотермических вагонов-термосов является мощная теплоизоляция. В Европе они используются для перевозки таких замороженных продуктов, как:

- рыба, моллюски, упакованные в лед;
- замороженные или быстрозамороженные продукты, температура которых должна поддерживаться сухим льдом.

Двухосный вагон-термос представлен на рисунке 2.7.

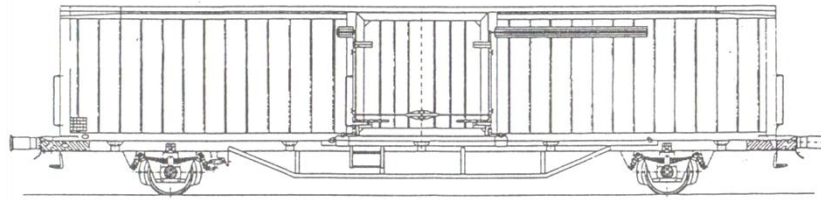


Рисунок 2.7 – Двухосный вагон-термос

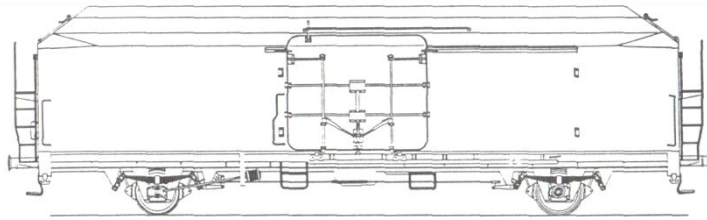
В охлаждаемых изотермических вагонах-ледниках, в основном, используется водный лед (не более 6 тонн). Особенностью конструкции двухосного вагона-ледника модели ЕК2-008 является торцевое расположение баков для водного льда и наличие маломощного подвагонного генератора для привода электровентиляторов для циркуляции воздуха в ГП.

Такие вагоны хорошо приспособлены для перевозки свежих фруктов и овощей при температурах от 0 до +10 °С. Баки для водного льда должны дозаправляться через 24–36 часов после отправления в средиземноморские климатические пояса. Количество вагонов-ледников в Европе резко сократилось, вследствие исчезновения заводов по производству льда и развития вагонов, оборудованных холодильными установками для перевозки фруктов и овощей.

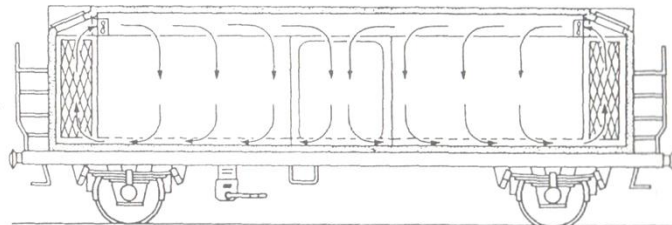
Некоторые ИВ имеют охлаждающее оборудование с расходуемым хладагентом – жидким азотом или углекислотой.

Вагоны модели ЕК2-015 предназначены для использования сухого льда. Сухой лед представляет собой твердую углекислоту, которая при отборе теплоты от груза непосредственно переходит в газообразное состояние, т. е. сублимируется. При атмосферном давлении температура испарившихся паров составляет –78,9 °С, теплота сублимации составляет 574 кДж. Однако в настоящее время практическая реализация этого способа охлаждения нерентабельна из-за его высокой стоимости и особых требований к его хранению и транспортировке. Конструкции вагонов-ледников этих моделей представлены на рисунке 2.8.

Рефрижераторные вагоны с механическим охлаждением разработаны как часть рефрижераторных секций. Рефрижераторная секция и контейнерный поезд представлены на рисунках 2.9 и 2.10.



a



б

Рисунок 2.8 – Двухосный вагон-ледник:

a – общий вид; *б* – схема циркуляции воздуха

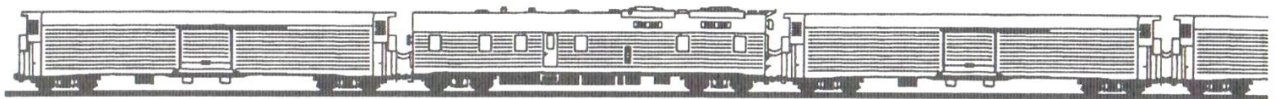


Рисунок 2.9 – Рефрижераторная секция

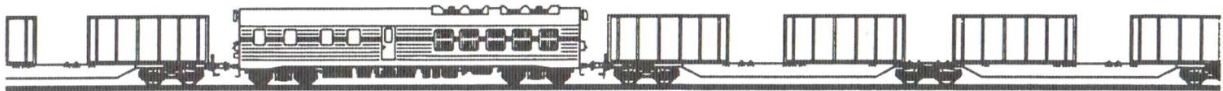


Рисунок 2.10 – Контейнерный поезд

Поездная единица (блок-трейн) обеспечивает централизованное энергообеспечение для рефрижераторных контейнеров, размещение поездной бригады.

Некоторые вагоны в секции могут использоваться как отдельные единицы; если так, то они дополнительно оборудуются индивидуальными автономными генераторами.

Поездная единица представляет собой контейнерный поезд, собранный из нескольких вагонов с энергоустановками для контейнеров, в т. ч. и контейнеров для водного и наземного транспортирования, которые могут находиться на раме или под полом фитинговой платформы.

Для того чтобы обеспечить условия транспортировки по территориям некоторых стран (например, длительное время транспортировки, минимум инфраструктуры и экстремальные наружные температуры от -40 до $+50$ °С), используются рефрижераторные секции. Они состоят из нескольких рефрижераторных вагонов или контейнеров, размещаемых на фитинговых платформах, холодильное оборудование которых получает электроэнергию от центральной энергоустановки (вагон или контейнер), снабженной мощными дизель-генераторными установками. Эта энергоустановка обслуживается бригадой из двух или трех механиков [237].

Эти рефрижераторные вагоны с механическим охлаждением оборудуются энергохолодильным оборудованием, имеющим запас автономной работы от 10 до 13 часов. Холодильная установка поддерживает требуемую температуру в течение поездки. Подобно большегрузным авторефрижераторам, они пригодны для перевозки свежих фруктов и овощей, так как снабжены устройствами продолжительной термообработки и циркуляции воздуха, температурным датчиком на выходе из испарителя холодильной установки и точно настроенными устройствами для слежения за процессом охлаждения и температурой испарения хладагента.

Полезный объем ГП зависит от типа вагона. Он может изменяться от 16 ISO P10 паллет, или 20 ISO P8 паллет, – в Великобритании, где железнодорожная колея отличается от остальной в Европе, до 34 ISO P10 паллет, или 44 ISO P8 паллет, для так называемых большегрузных вагонов. Полезная высота варьируется от 2 м до 2,3 или 2,4 м для новейших вагонов. Рефрижераторные вагоны моделей WAF-36 и WAF-28В представлены на рисунках 2.11 и 2.12.

Общий вид ГП с системой воздухораспределения представлен на рисунке 2.13.

Двухосная модификация WAF-26 может иметь грузоподъемность до 28,7 т при полезном объеме ГП $74,7 \text{ м}^3$. Четырехосные модификации WAF 34.2 и WAF 36 могут иметь грузоподъемность соответственно 49 и 58,5 т при полезном объеме соответственно 96 и 107 м^3 . ХНУ с энергоснабжением от дизель-

генераторной установки мощностью 12 кВт поддерживают в ГП температуру от – 25 до +25 °С, запасы топлива обеспечивают автономность работы вагона до 10–14 суток. Для удобства погрузочно-выгрузочных работ двери ГП имеют расширенный до 3 м проем, а на четырехосных модификациях они располагаются попарно на каждой стороне вагона (см. рисунок 2.11).



Рисунок 2.11 – Рефрижераторный вагон модели WAF-36



Рисунок 2.12 – Рефрижераторный вагон модели WAF-28B



Рисунок 2.13 – Расположение воздуховода в ГП рефрижераторного вагона

Двухосные изотермические вагоны модели WAF-28В предназначены для перевозок бананов. Отличительной особенностью этих вагонов являются более «мягкие» тележки с лучшими динамическими характеристиками. Для поддержания необходимого температурно-влажностного режима вагон оборудован системой электрического подогрева пола и вентиляционной установкой, которые получают электроэнергию от осевого генератора или внешнего источника энергии. Устройства воздухораспределения термообработанного воздуха выполнены в виде тканевого рукава, размещаемого на потолке и доходящего до середины ГП. При полезном объеме кузова 84,8 м³ в ГП располагаются 35 европоддонов размерами 0,8×1,2 м. В зависимости от допускаемых осевых нагрузок вагон может иметь грузоподъемность до 28,9 т. Холодильные установки имеют полуторакратный запас холодопроизводительности и могут поддерживать температуру до –25 °С при наружной температуре +40 °С. В них используются системы с потолочным распределением воздуха, которые имеют следующие недостатки [129]:

- небольшая площадь подачи термообработанного воздуха (20 %);
- центр, начинающийся с трети длины ГП(50 %);
- худшие условия для подачи термообработанного воздуха в дальней стороне ГП (30 %).

2.2.3. Современные рефрижераторные вагоны китайских железных дорог

По данным [93, 94], на китайских железных дорогах к 2007 г. курсировало около 8000 ИВ различных моделей. Среднегодовой рост производства основных видов СПГ в Китае составляет 14,7 %. Основу парка РПС КНР составляют 9-вагонные рефрижераторные секции производства «Вагонбау Дессау» (Германия) модели ZB-9-653 и 5-вагонные секции ZB-5-658. Всего в китайскую народную республику это предприятие поставило 2312 вагонов – в том числе 200 4-осных вагонов-ледников, 442 АРВ, 60 вагонов ДЭС, десять 23-вагонных поездов,

тридцать 12-вагонных рефрижераторных секций и 204 пятивагонные рефрижераторные секции. Отличительными особенностями секций этих моделей является иное расположение энергетического и холодильного оборудования.

Около трети рефрижераторных вагонов уже выработали свой ресурс и должны быть списаны. В то же время национальная корпорация по рефрижераторным перевозкам на железных дорогах, имеющая собственный ИПС, должна эксплуатировать 2500 вагонов-ледников и 1585 рефрижераторных вагонов [93].

В 2006 г. вагоностроительный завод в г. Гуанчжоу приступил к выпуску рефрижераторного вагона собственной разработки. Созданы две модификации вагона – со служебным помещением для механика и без него. Масса тары первой модификации составляет 40 т, полезный объем – 82 м³. Параметры второй модели соответственно – 38 т и 91 м³. При принятой в КНР нагрузке на ось 21 т грузоподъемность вагона составляет 38 т.

Кузов вагона имеет длину 17 м, и служебное помещение располагается с торца вагона. Двери ГП двустворчатые распашного типа размером 2,1×1,5 м. В качестве теплоизоляции используются традиционные полимерные материалы типа пенополиуретана и полистирола.

С другой стороны кузова к его торцевой стене крепится навесная холодильная машина китайского производства холодопроизводительностью около 20 кВт. Вагон не имеет собственного источника электроэнергии, и холодильная установка получает электроэнергию от внешней стационарной сети на станции при погрузке. При необходимости вагон может быть включен в состав рефрижераторной секции. Для аккумуляции холода при работе холодильной установки под крышей ГП смонтированы восемь емкостей с эвтектическим раствором (эвтектические плиты).

Технология перевозок СПГ в этих вагонах предусматривает охлаждение продукции внутри вагона и аккумуляцию холода в эвтектических плитах. После этого вагон движется в режиме вагона-термоса без термообработки груза в пути следования. Теплотехнические характеристики кузова позволяют обеспечивать поддержание приемлемого для СПГ температурного режима течение 4–5 суток.

2.2.4. Рефрижераторные вагоны Америки

До 50-х годов прошлого века перевозки СПГ в США осуществлялись вагонами с охлаждением льдосоляной смесью. С 1970-х годов приоритет стал отдаваться рефрижераторным вагонам с паровой компрессионной машиной. В 1976 г. на железных дорогах США эксплуатировались 150 000 вагонов-термосов, 25 000 рефрижераторных вагонов и 10 000 вагонов-ледников [98, 149]. Причем стратегически предполагалось, что приоритет будет отдаваться вагонам-термосам, а парк рефрижераторных вагонов будет сокращаться. Именно в этот период началось интенсивное развитие перевозок СПГ в автомобильных рефрижераторных полуприцепах, которое продолжается по настоящее время [149, 160].

В конце 1990-х годов направление развития рефрижераторных вагонов изменилось. Вместо напыляемой жидкой теплоизоляции стали использовать жесткий пенопласт. Система воздухораспределения термообработанного воздуха стала встраиваться в теплоизоляцию крыши. Но самое существенное изменение коснулось энергохолодильного оборудования. Вместо традиционного разделения на дизель-генераторный и холодильный агрегаты вагоны стали оснащать интегрированной моноблочной рефрижераторной установкой, объединяющей в общем корпусе холодильное и дизель-генераторное оборудование. Такие установки используются для большегрузных авторефрижераторов [227, 238].

Другими отличительными особенностями подвижного состава США являются увеличенные осевые нагрузки на колесную пару и применение тепловозной тяги, при которой отсутствует контактный провод. Эти два решающих фактора позволяют изготавливать грузовые вагоны с увеличенными линейными размерами (прежде всего высотой) и грузоподъемностью. Этот факт наглядно подтверждается самой последними разработками вагоностроительного концерна Trinity Rail Group – автономными рефрижераторными вагонами TRINCool с длиной кузова 19,5 и 22 м. Причем последняя модель используется

для перевозок легковесных грузов. Основные технические характеристики рефрижераторных вагонов TRINCOol представлены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Основные технические характеристики рефрижераторных вагонов TRINCOol™

Параметры	Большегрузный	Стандарт
Внутренняя длина кузова, м	22,0	19,5
Объем кузова, м ³	218	193
Грузоподъемность, т	84	88

Автономные рефрижераторные вагоны TRINCOol™ с различной длиной кузова представлены на рисунках 2.14 и 2.15.



Рисунок 2.14 – Рефрижераторный вагон TRINCOol™ (64-футовый)



Рисунок 2.15 – Рефрижераторный вагон TRINCOol™ (72-футовый)

Встроенное в холодильную установку компьютерное оборудование обеспечивает в режиме реального времени посредством спутниковой связи

контроль дислокации вагона, температуры груза, уровня топлива и работы холодильной установки. Система управления воздушным потоком наряду с особенностями конструкции вагона позволяют существенно оптимизировать условия перевозки свежих и замороженных СПГ.

Теплоизолированные кузова выполняются из композитных материалов с теплоизоляцией, выполненной по технологии «сэндвич» с заполнителями из пористых материалов (например, пенополиуретана). Благодаря этому внутри ограждающих конструкций кузова сокращается число тепловых мостиков, что позволяет при плотности пенополиуретанового заполнителя от 30 до 150 м³/кг и толщине 200 мм обеспечить значение среднего коэффициента теплопередачи около 0,18 Вт/м²·К [197]. В то время как у изотермических кузовов, выполненных по традиционной технологии, он составляет 0,3 Вт/м²·К. Отсутствие внутри ограждающих конструкций полостей с воздухом исключают конденсацию водяных паров между внутренней и наружной обшивками, а значит, и их коррозию. Это позволяет обеспечить эксплуатацию кузова вагона без капитального ремонта в течение всего срока его службы.

Рефрижераторный вагон *TRINCool* имеет кузов, собранный из сэндвич-панелей. Такие конструкции уже давно используются для изотермических кузовов крупнотоннажных контейнеров и авторефрижераторов, – их преимуществом является низкая тара.

Для навешиваемого энергохолодильного оборудования на раме вагона с одной стороны устроена площадка с защитным ограждением, которая консолью выступает за пределы теплоизолированного кузова. На раме в нижней ее части смонтирован топливный бак. В зависимости от комплектации может быть установлен алюминиевый бак емкостью от 30 до 200 галлонов, либо стальной – вместимостью 120 галлонов (1 галлон составляет 3,785 л). Топливные баки могут иметь как цилиндрическую, так и прямоугольную форму.

2.3 Формирование функциональных подсистем для перспективного ИПС

Конструктивная схема отражает структуру базовых частей вагона и их связей, взаимодействия между собой и со специализированным оборудованием. Выбор рациональной конструктивной схемы вагона зависит от многих экономических и эксплуатационных факторов и обычно производится на основании сложных многовариантных технико-экономических расчетов [104, 133, 202].

В рамках поставленных для решения задач в данном разделе работы была определена узконаправленная цель по обобщению и анализу конструктивных схем изотермических вагонов для применения и реализации метода актуализации технических решений для создания различных типов конкурентоспособного инновационного ИПС с расширенными потребительскими качествами (техническими характеристиками), удовлетворяющими требованиям современного рынка транспортных услуг.

Проведенный краткий обзор современных технологий хранения и транспортировки, конструкций ИВ для перевозок СПГ показывает, насколько разнообразны конструкции их основных систем и узлов. Причем решающее влияние на формирование технических параметров имеют четыре системы – кузов, энергетическое оборудование, холодильная установка и ходовые части. В зависимости от назначения вагона, способа его эксплуатации, требуемой автономности и степени автоматизации работы оборудования функциональные узлы вагона можно объединить и классифицировать (рисунок 2.16).

При составлении классификационной схемы были рассмотрены все существующие варианты конструкций элементов кузова и рамы, системы энергоснабжения, холодильного оборудования отечественных и зарубежных ИВ.

При составлении классификационной таблицы были выделены группы по конструкции кузова и рамы, холодильное и энергетическое оборудование, а также учтено их взаимное расположение [37, 40].



Рисунок 2.16 – Функциональные подсистемы рефрижераторного вагона

Как видно из представленного обзора, в мировой практике нашли применение весьма разнообразные конструктивные решения, которые могут использоваться в конструкциях изотермических и рефрижераторных вагонов в различных сочетаниях. Функциональный анализ такой сложной технической системы (ТС), как АРВ, может быть выполнен по следующему алгоритму. 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 ТС применяем естественную форму, которую формализованно можно представить состоящей из трех компонент:

$$P = (D, G, H), \quad (2.1)$$

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

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

H – указание особых условий и 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 трехуровневой 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. Такая методика была предложена в работе [104] и была адаптирована для АРВ [37].

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.

Рассматриваемая ТС разделена на функциональные элементы первого и второго уровня, при этом элементы второго уровня обеспечивают функционирование элементов первого уровня, а последние, в свою очередь, – функционирование ТС в целом. Элементы первого уровня обозначены через E_i , функции этих элементов – через F_i где $i = 0, 1, 2 \dots n$, а элементы второго уровня и функции – соответственно через E_{i-k} и F_{i-k} где $i = 0, 1, 2 \dots n$; $k = 1, 2, \dots m$.

Некоторые элементы рассматриваемого рефрижераторного вагона выполняют более одной функции и обозначены для первого и второго уровней соответственно через F_i , F_i и F_{i-k} , F_{i-k} . Объекты, на которые направлено действие рассматриваемой ТС посредством ее элементов, обозначены через V_i ; $i = 1, 2, 3, 4$, причем – объекты V_i совпадают с компонентой G в описании функции F по формуле (2.1).

Функциональная структура ТС рефрижераторного вагона с иерархически упорядоченными элементами ТС, полученными при ее конструктивном разделении, и функциями, выполняемыми этими элементами, представлена в таблице 2.2. Она позволяет построить граф функционального взаимодействия элементов ТС и объектов. Вершинами графа функционального взаимодействия являются функциональные элементы и объекты. Вершины – функциональные элементы – расположены в графе в иерархической последовательности. В верхнем горизонтальном ряду находятся элементы-вершины, относящиеся к первому иерархическому уровню, во втором ряду – элементы-вершины второго уровня. Взаимосвязь конструктивных элементов показана на графе линиями со стрелками.

Функции элементов представлены в виде ребер графа. При этом они выходят из вершин, функции которых описывают, и входят в вершины-элементы, которым они обеспечивают функционирование и работоспособность, или в вершины-объекты, с которыми взаимодействуют [104].

Обозначения вершин-элементов, вершин-объектов и ребер на графе соответствуют принятым в таблице 2.2.

Таблица 2.2 – Анализ функций автономного рефрижераторного вагона

Элемент	Функция
<p>E – автономный рефрижераторный вагон</p> <p>V_1 – железнодорожный путь</p> <p>V_2 – скоропортящиеся грузы</p> <p>V_3 – другие вагоны или локомотив</p> <p>V_4 – окружающая среда</p>	<p>F – перевозка скоропортящихся грузов</p> <p>F'' – поддержание заданных условий перевозки (температуры, вентиляции)</p>
<p>E_0 – термоизолированный кузов</p>	<p>F_0 – размещение груза и укладка груза</p> <p>F_0 – сохранность скоропортящегося груза в процессе перевозки</p> <p>F_0 – размещение энергохолодильного оборудования</p>
<p>E_1 – рама</p>	<p>F_1 – размещение элементов (E_0), (E_2), (E_3)</p>
<p>E_2 – ударно-тяговые приборы</p>	<p>F_2 – обеспечение сцепления вагона в составе поезда с другими вагонами или локомотивом</p>
<p>E_3 – тормоза</p>	<p>F_3 – создание искусственного сопротивления движению, остановке и удержанию на месте</p>
<p>E_4 – ходовые части</p>	<p>F_4 – обеспечение безопасности движения вагона по рельсовому пути с передачей нагрузки на путь (V_1), от груза (V_2) и кузова E_0; рамы E_1; E_2; E_5; E_6; взаимно с E_6</p>
<p>E_5 – холодильно-отопительное оборудование</p>	<p>F_5 – создание и поддержание требуемых параметров температуры</p>
<p>E_6 – энергосиловое обеспечение</p>	<p>F_6 – выработка и распределение электроэнергии для работы холодильного оборудования (E_5)</p>
<p>E_{5-1} – компрессорно-конденсаторный агрегат</p> <p>E_{5-2} – испаритель холодильного оборудования</p> <p>E_{5-3} – вентиляционная установка</p> <p>E_{5-4} – теплоэлектронагреватели</p>	<p>F_{5-1} – передача тепла от холодильного оборудования в окружающую среду</p> <p>F_{5-2} – термообработка воздуха в ГП</p> <p>F_{5-3} – вентиляция ГП и воздухообмен с окружающей средой</p> <p>F_{5-4} – нагрев воздуха в ГП</p>
<p>E_{6-1} – дизель – генераторный агрегат</p> <p>E_{6-2} – подвагонный генератор</p>	<p>F_{6-1} – выработка электрической энергии при работе дизеля</p> <p>F_{6-2} – выработка электрической энергии при движении вагона</p>
<p>E_{6-3} – двигатель внутреннего сгорания</p> <p>E_{6-4} – главный электрический распределительный щит</p>	<p>F_{6-3} – совершение механической работы для привода компрессора холодильного оборудования элемента E_{5-1}</p> <p>F_{6-4} – распределение электроэнергии от источника и потребителям электричества $E_{5-1}(F'_{6-4}; F'_{5-1})$; $E_{5-2}(F''_{6-4}; F''_{5-2})$; $E_{5-3}(F'''_{6-4}; F'''_{5-3})$; $E_{5-4}(F''''_{6-4}; F''''_{5-4})$</p>

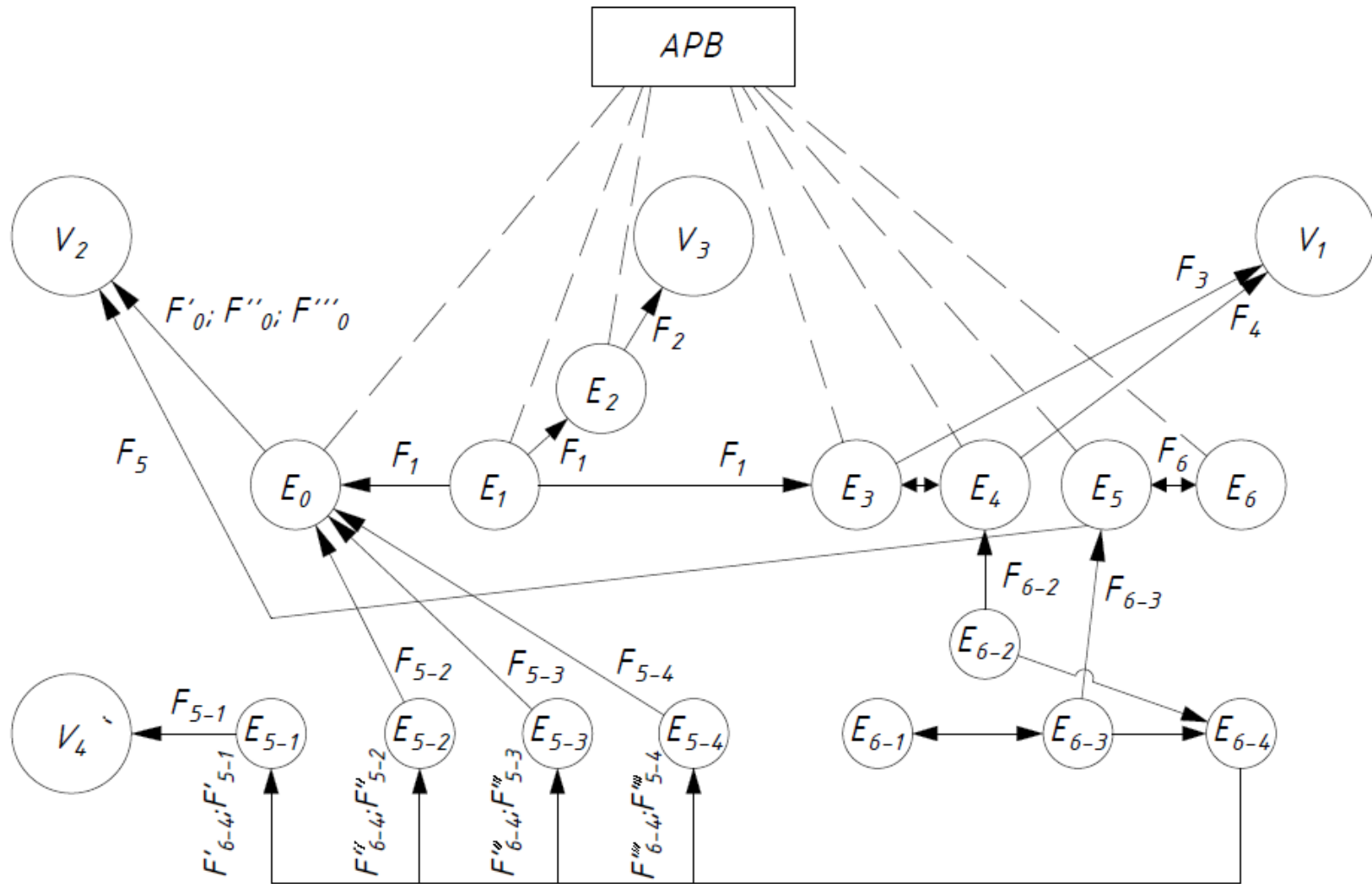


Рисунок 2.17 – Функциональная структура специализированного рефрижераторного вагона

На основании проведенного анализа функций специализированного рефрижераторного вагона (см. таблицу 2.2) и построенной его функциональной структуры (рисунок 2.17) можно сделать следующие обобщения. Рефрижераторный вагон является сложной технической системой, сочетающей в себе и способной выполнять функции в трех различных вариантах использования:

- универсального грузового вагона обеспечивающего перевозку и целостность любого (в т. ч. попутного) рода груза;
- ИВ при перевозках термосопригодных СПГ, которые сами формируют температурный режим в ГП;
- специализированного рефрижераторного вагона для перевозок СПГ, требующих поддержания необходимого температурного режима, за счет работы холодильно-нагревательного оборудования.

Представленная функциональная структура специализированного рефрижераторного вагона обеспечивает максимально возможное выполнение функций при транспортировке СПГ с поддержанием температурного и вентиляционного режима автономной системой энергоснабжения.

При исключении из схемы некоторых элементов получаются схемы вагонов с меньшими функциональными возможностями. Например, грузовой рефрижераторный вагон получается при исключении элемента E_6 , а вагон-термос – при исключении элементов E_5 , E_6 . Из этого следует, что вариативность выбора этих элементов имеет решающее значение при формировании базового вагонокомплекта.

Таким образом, методы конструирования ИВ должны существенным образом отличаться от метода создания универсальных вагонов как алгоритмом синтеза, так и методологией расчета и испытаний их работоспособности ввиду разноплановости и сильной зависимости (взаимосвязи) от работы энергохолодильного оборудования, делающего возможной перевозку груза с требуемыми климатическими параметрами.

Причем варианты выбора типов энергохолодильного оборудования позволяют получить требуемую конфигурацию (специализацию) типа ИВ.

Для совершенствования конструкций и методов эксплуатации железнодорожного ИПС целесообразно использование метода актуализации технических решений.

Использование этого метода при разработке типажа ИПС заключается в выборе базового элемента вагонокомплекта и внесения в него изменений и дополнений, вытекающих из назначения вагона, целей и условий эксплуатации создаваемого объекта. Указанные условия реализуются как при создании различных типов ИПС, так и основополагающих подсистем – энергоснабжения, термостабилизации (холодильного оборудования), ходовых частей, которые имеют решающее значение при формировании основных технических характеристик ИВ [37].

2.4. Формирование приоритетных критериев проектирования вагонов с улучшенными потребительскими качествами

2.4.1. Экспертные методы для оценки критериев создания новых типов ИПС

Экспертный метод является одним из методов оценки показателей качества промышленной продукции, основанным на обобщении опыта специалистов определенного профиля. Экспертные методы применяются для определения состава и структуры показателей качества, а также коэффициентов их весомости (рангов). Они используются в тех случаях, когда затруднительно оценить показатели количественной мерой и приходится использовать соотношение «больше-меньше» или «лучше-хуже».

Экспертные методы могут применяться на ранних стадиях проектирования – при постановке технического задания и технического предложения. Классификация наиболее часто применяемых экспертных методов приведена на рисунке 2.18 [47].



Рисунок 2.18 – Виды экспертных методов

Сложность формализации ранних стадий проектирования вызвана неполнотой и нечеткостью используемой на этих стадиях информации. Для устранения этого недостатка нами предпринята попытка собрать и систематизировать основные признаки новых типов ИПС, в которых рефрижераторный вагон был бы представлен как готовый для рынка транспортных услуг продукт. Для решения этой задачи был применен метод экспертных оценок.

При оценке критериев для создания новых типов изотермических и РВ мы прибегли к индивидуальному методу (письменное интервью) и методу Дельфи. Индивидуальный метод широко используется при решении задач по определению показателей качества продукции на стадиях ее разработки (проектирования), производства и эксплуатации. Он позволяет выявить мнения отдельных специалистов (без их общения друг с другом) и объективно оценить показатели качества.

Использование экспертных методов оценки основывается на определенном алгоритме. Первая задача, которая является определяющей, – постановка цели

экспертизы, формирование состава показателей (критериев) оценки, состава группы специалистов (экспертов) и составление необходимой документации. Затем проводится непосредственно опрос экспертов, по результатам которого производится предварительная оценка объектов исследования и уточняется, корректируется список оцениваемых критериев. Заключительный этап состоит в обработке и анализе результатов опроса – ранжировании критериев и выявлении доминирующих параметров [172, 173, 174, 182].

Для оценки критериев, которые являются определяющими при создании новых типов изотермических и РВ, были разработаны карточки эксперта, включающие две группы оцениваемых показателей – технические и экономические [76].

2.4.2. Формирование и методика оценки критериев для создания новых изотермических вагонов

К техническим критериям для создания новых типов РВ и ИВ отнесены следующие:

1. Специализация ИПС для перевозок нескольких групп СПГ.
2. Универсализация ИПС для перевозок всех групп СПГ.
3. Обеспечение возможности трансформирования одного типа ИПС в другой.
4. Надежность работы оборудования.
5. Экологическая чистота.
6. Защищенность от вандализма и хищений.
7. Теплотехнические характеристики кузова.
8. Грузоподъемность.
9. Грузовместимость.
10. Автономность вагона – степень автоматизации оборудования.
11. Необходимость присутствия обслуживающего персонала на вагоне.
12. Возможность обеспечения требуемых параметров климата.
13. Максимальная скорость движения вагона.

К экономическим критериям отнесены:

1. Минимальные эксплуатационные затраты.
2. Минимальная стоимость ИВ или РВ.
3. Минимальный тариф.
4. Использование отечественной элементной базы в конструкции ИВ или РВ.

Опрошенных экспертов разделили на три группы, в зависимости от их вида деятельности – коммерческая (потребители услуг железнодорожного транспорта), техническая (сотрудники конструкторских организаций и машиностроительных заводов), и работники соответствующих департаментов или структурных подразделений МПС.

Экспертам предлагались для заполнения анкеты, в которых критериям (как техническим, так и экономическим) должны быть проставлены оценки по следующему принципу: очень важно – 4, важно – 3, желательно – 2, несущественно – 1. Если, по мнению экспертов, несколько признаков не различаются по важности и влиянию на исследуемый объект, им присваиваются одинаковые оценки.

Количество опрошенных экспертов (во всех трех группах) – 16 человек ($n = 16$). Число критериев – 13 технических ($m_1 = 13$) и 4 экономических (m_2). На основании этих данных составлялись две итоговые матрицы оценок (отдельно по техническим и экономическим показателям).

Итоговая матрица оценок представлена в таблице 2.3.

Таблица 2.3 – Итоговая матрица оценок

Эксперт \ Критерий	1	2	...	j	...	m
1	Q_{11}	Q_{12}	...	Q_{1j}	...	Q_{1m}
2	Q_{21}	Q_{22}	...	Q_{2j}	...	Q_{2m}
...
i	Q_{i1}	Q_{i2}	...	Q_{ij}	...	Q_{im}
n	Q_{n1}	Q_{n2}	...	Q_{nj}	...	Q_{nm}

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

$$q_{ij} = Q_{ij} / \sum_{i=1}^n Q_{ij}.$$

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

$$q_i = \sum_{j=1}^m q_{ij} / \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m q_{ij}.$$

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

$$V_i = \frac{\sigma_i}{M[Q_{ij}]},$$

где $M[Q_{ij}]$ – средняя оценка экспертов по показателю, $M[Q_{ij}] = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m Q_{ij}$;

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

(Чем меньше величина V_i , тем выше согласованность мнений экспертов по данному показателю.)

Коэффициент компетентности рассчитывается по следующей формуле:

$$E_{ij} = \frac{|Q_{ij} - M[Q_{ij}]|}{M[Q_{ij}]}.$$

Чем меньше величина коэффициента компетентности, тем ближе оценка эксперта по данному критерию к средней оценке этого критерия всеми экспертами.

2.4.3. Результаты анализа методом экспертных оценок

Автором были сформулированы признаки, соответствующие определенным техническим и эксплуатационным характеристикам вагона, сведенные в карточку эксперта. В качестве экспертов выступили ведущие специалисты во всех четырех категориях сформулированных факторов, оценивающие каждый признак по четырехбалльной системе: 4 – очень важно, 3 – важно, 2 – желательно, 1 –

несущественно. Результаты опросов экспертов отражены в работах [47, 76], а основные оценки, в порядке значимости параметров, представлены в таблице 2.4.

Таблица 2.4 – Результаты оценки значимости показателей

Технические показатели	Весовые коэфф.	Коэфф. вариации
Технико-эксплуатационные показатели		
Надежность работы оборудования	0,0961836	0,0000000
Теплотехнические характеристики кузова	0,0884778	0,1305529
Максимальная скорость движения	0,0809237	0,2056488
Защищенность от вандализма и хищений	0,0808855	0,2480218
Возможность обеспечения требуемых параметров климата	0,0807757	0,2480218
Грузоподъемность	0,0792137	0,2045299
Обеспечение возможности трансформирования из одного типа ИПС в другой	0,0788149	0,2045299
Автономность вагона, степень автоматизации оборудования	0,0785498	0,2494765
Экологическая чистота	0,0783609	0,2874798
Грузовместимость	0,0781441	0,2874798
Универсализация ИПС	0,0701732	0,3794845
Специализация ИПС	0,0636963	0,5252357
Необходимость присутствия персонала на вагоне	0,0458006	0,5792131

При анализе технических показателей наибольший весовой коэффициент (0,096) – у 4-го показателя, и у него же самый маленький коэффициент вариации (равен 0). То есть 4-й показатель («надежность работы оборудования») все эксперты единогласно поставили на первое место по важности.

Затем, примерно на одинаковом уровне оценены такие показатели, как теплотехнические характеристики кузова (0,088), защищенность от вандализма и хищений (0,080), возможность обеспечения требуемых параметров климата (0,080) и максимальная скорость движения вагона (0,080).

Более низкие оценки (весовые коэффициенты от 0,08 до 0,07) получила группа из шести следующих показателей: грузоподъемность (0,079), обеспечение возможности трансформирования одного типа ИПС в другой (0,0788), автономность вагона – степень автоматизации оборудования (0,0785), экологическая чистота (0,0783), грузовместимость (0,0781), универсализация ИПС для перевозок всех групп СПГ (0,070). При ранжировании критериев этой группы

мнения экспертов разошлись больше всего при оценке второго показателя (коэффициент вариации составляет 0,37).

Самые низкие весовые коэффициенты были получены для критериев «специализация ИПС для перевозок нескольких групп СПГ» и «необходимость присутствия обслуживающего персонала на вагоне» (весовые коэффициенты соответственно 0,063 и 0,045). И по этим же показателям мнения экспертов разошлись больше всего (коэффициенты вариации 0,52 и 0,57).

При анализе экономических показателей наибольший весовой коэффициент (0,26) – у 1-го показателя, и у него же самый маленький коэффициент вариации (0,20). То есть 1-й показатель (минимальные эксплуатационные затраты) все эксперты единогласно поставили на первое место по важности.

Остальные показатели имеют примерно одинаковые весовые коэффициенты и располагаются следующим образом (по мере снижения важности): минимальный тариф, минимальная стоимость ИВ или РВ, использование отечественной элементной базы в конструкции ИВ или РВ. При этом мнения экспертов разошлись больше всего при оценке 4-го показателя (коэффициент вариации 0,28).

После этого опроса прошло около 10 лет, за которые состояние в области перевозок СПГ еще более ухудшилось – объемы перевозок сократились, подвижной состав еще более устарел морально и физически, и его численность уменьшилась более чем на 4000 вагонов, на рынке транспортных услуг возникли новые операторы с новыми логистическими маршрутами. Эти факторы показали всю остроту проблемы и необходимости создания нового подвижного состава, а значит, и необходимости проведения опроса экспертов в новое время.

В качестве экспертов выступили специалисты различных организаций, занимающиеся вопросами производства, продажи, организации и реализации (осуществления) перевозок СПГ – агрофирм, логистических и операторских компаний, рефрижераторных вагонных депо, ОАО «Рефсервис», ОАО ВНИИЖТ, ОАО ВНИИАС, преподаватели вузов (специализаций «Рефрижераторный подвижной состав» и «Грузовая и коммерческая работа»).

По предложениям самих экспертов критерии были откорректированы и уточнены, некоторые в силу потери своей актуальности исключены. Так, например, был уточнен критерий «возможность поддержания параметров климата в точных пределах». С учетом развития уровня информационных технологий был введен дополнительный критерий – «возможность контроля параметров работы оборудования (только мониторинг с дистанционным управлением)».

Критерии, получившие самые низкие весовые коэффициенты в первом опросе (соответственно 0,063 и 0,045), были исключены – это «специализация ИПС для перевозок нескольких групп СПГ» и «необходимость присутствия обслуживающего персонала на вагоне».

Обработка результатов нового опроса также проводилась по трем категориям экспертов:

- коммерсанты – потребители услуг железнодорожного транспорта;
- сотрудники конструкторских и научных организаций, вузов и машиностроительных заводов;
- работники структурных подразделений и дочерних зависимых обществ РЖД.

Как и ранее, самым главным и актуальным показателем осталась надежность работы оборудования. Далее следуют теплотехнические характеристики кузова и автономность работы вагона. Результаты анализа представлены на рисунке 2.19. Достоверность анализа выражает коэффициент вариации экспертных оценок, который показывает разность мнений экспертов. Его значения представлены на рисунке 2.20.

Улучшение технико-экономических характеристик ИПС – повышение грузоподъемности, увеличение скоростей движения, экономичности и экологической чистоты также не является самоцелью, а связано с конечной задачей – стремлением вернуть утраченные ранее позиции железнодорожного хладотранспорта в конкурентной борьбе с автоперевозчиками.

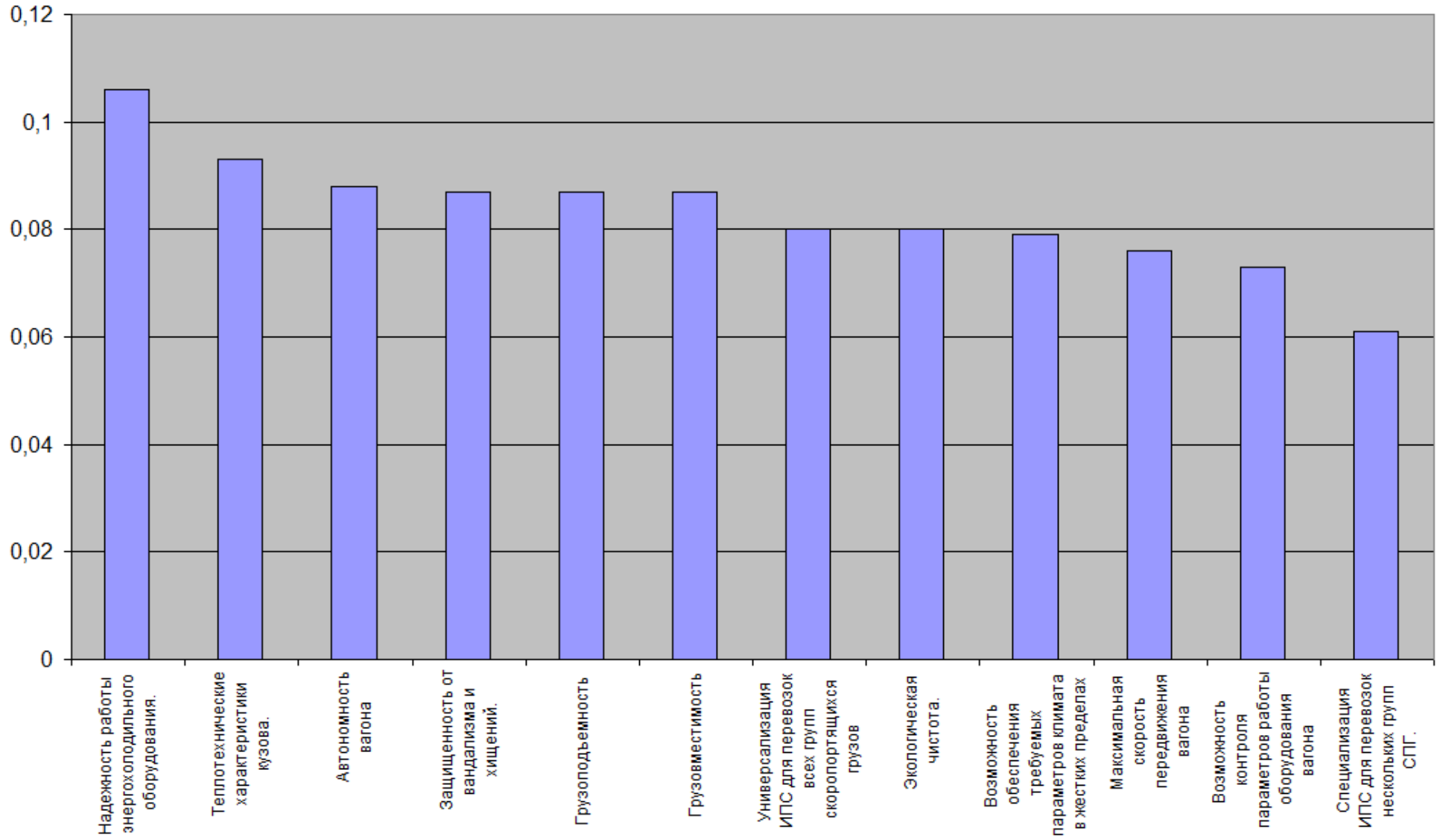


Рисунок 2.19 – Результаты анализа

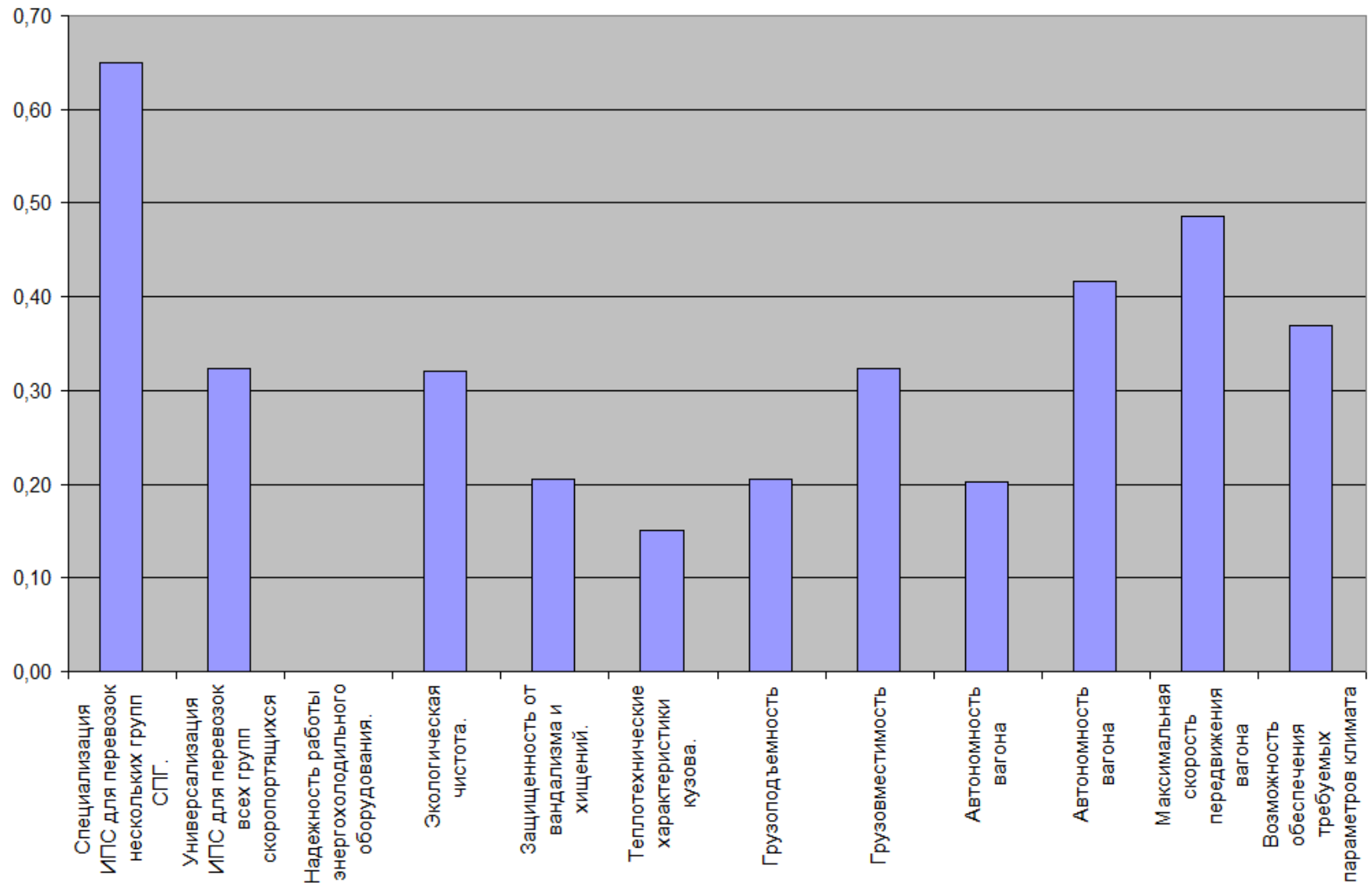


Рисунок 2.20 – Коэффициент вариации

Для потребителя транспортных услуг основными техническими характеристиками ИПС являются грузоподъемность и полезный объем ГП. Грузоподъемность определяется величиной осевой нагрузки и тарой вагона. Рост полезного объема возможен при увеличении длины кузова и допустимой высоты погрузки ГП, поскольку сама высота кузова ограничивается габаритом подвижного состава.

Таким образом, с помощью метода экспертных оценок в работе [76] было выполнено ранжирование и установлены взаимосвязи функциональных систем вагона в зависимости от потребительских характеристик инновационного АРВ, что позволило определить приоритетные направления исследований.

2.4.4. Взаимосвязь основных функциональных систем вагона с критериями экспертных оценок

При определении стратегических направлений проектирования ИПС необходимо сформировать приоритетные технические подсистемы ИПС, оказывающие решающее влияние на наиболее значимые технико-экономические параметры вагона, позволяющие отнести его к инновационному.

Недостаточное количество публикаций, а главное, отсутствие стратегии развития данного сегмента рынка у главного заказчика – ОАО «РЖД», затрудняют принятие конкретных технических решений в конструкциях ИПС нового поколения. Вместе с тем на основании анализа имеющегося опыта по созданию грузового и пассажирского подвижного состава нового поколения можно сделать некоторые выводы и тем самым избежать неминуемых ошибок на начальных стадиях проектирования ИВ. Наиболее показателен в этом отношении опыт разработки климатического и энергетического оборудования для последних типов пассажирских вагонов. 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 ГП, системы управления с функциями дистанционного мониторинга. Характер взаимосвязей функциональных систем ИВ по приоритетности и основные направления их совершенствования представлены на рисунке 2.21.

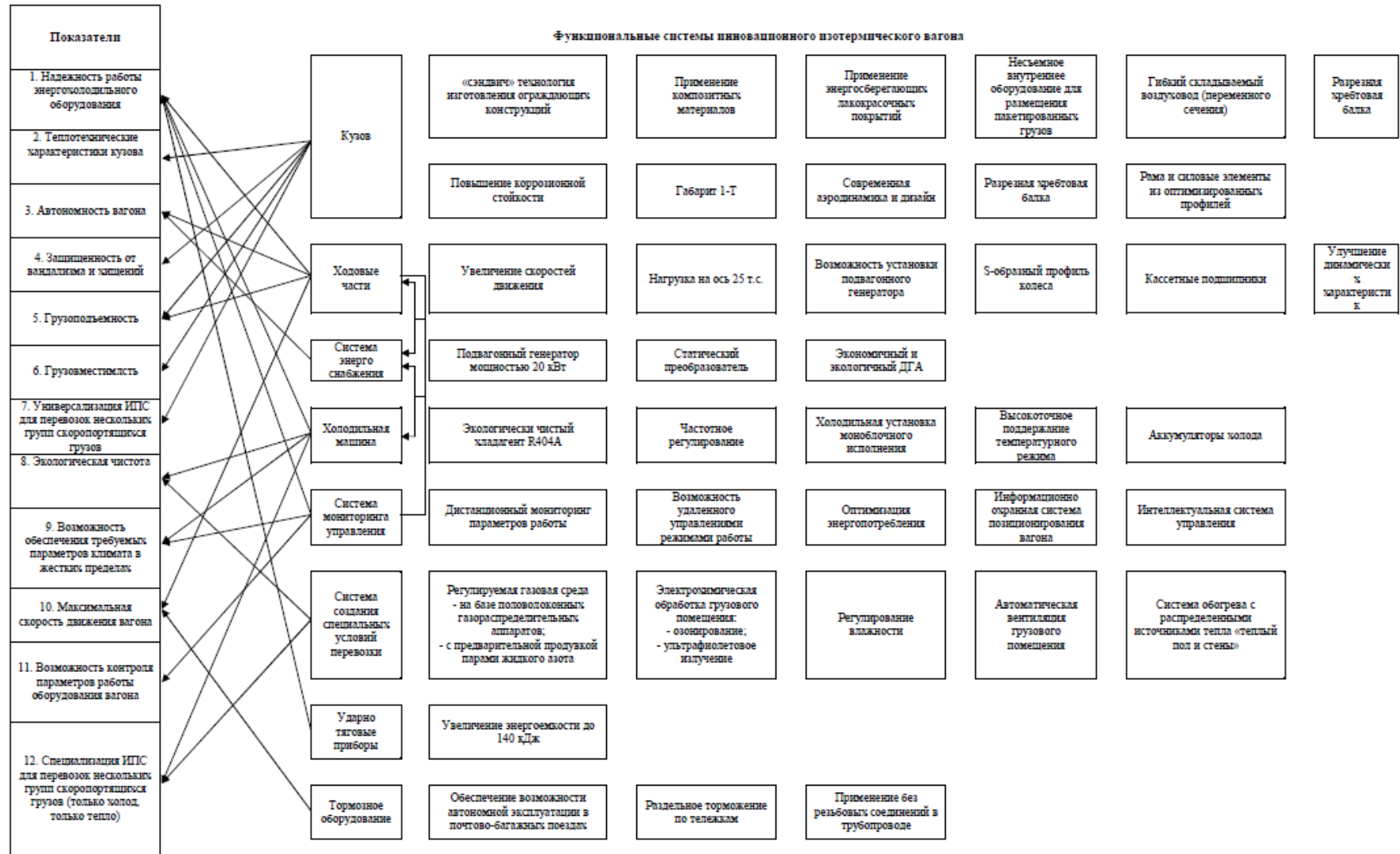


Рисунок 2.21 – Характер взаимосвязей функциональных систем изотермического вагона

По каждой из этих подсистем необходимо сформулировать конкретные требования для рефрижераторных вагонов нового поколения. При этом должен учитываться ресурс и стадии жизненного цикла вагона. В этом случае конструкция перспективного ИВ может быть разделена на группы составных частей с учетом порядка их ремонта, замены или восстановления.

К первой группе следует отнести составные части, которые должны служить до достижения предельного состояния вагона и замена которых невозможна или экономически нецелесообразна.

Ко второй группе относятся компоненты, ресурс которых составляет до ближайшего планового вида ремонта (как правило, деповского).

В третьей группе находятся компоненты, которые подлежат проверке и замене при промежуточных технических обслуживаниях.

Четвертую группу образуют узлы и детали, которые не влияют на работоспособность и безопасность эксплуатации и которые допускают несущественные отказы при эксплуатации вагона.

По мнению автора, 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. В этом случае узлы вагона условно можно разделить на две группы:

- унифицированные, традиционно применяемые в вагоностроении (тележки, тормозное оборудование, поглощающие аппараты, автосцепки);
- оригинальные – специализированные и адаптированные к конкретному типу вагона.

Для ИПС такой конструкцией может стать теплоизолированный кузов с универсальными проемами в торцевых стенах ГП, в которые смогут монтироваться холодильные машины или отопительно-вентиляционные агрегаты [1].

Для ходовых частей ключевыми параметрами тележки и объектами исследования и совершенствования являются осевые нагрузки, конструкционная

скорость, динамические характеристики, тип тормозного оборудования. Здесь также следует обращать внимание на эксплуатационные параметры, такие как вид поездов, в которых может эксплуатироваться вагон: грузовые, маршрутные, ускоренные контейнерные, почтово-багажные.

Для кузовов изотермических вагонов такими параметрами являются:

- величина теплопотерь, коэффициент теплопередачи;
- максимально возможный полезный объем;
- минимальная тара кузова;
- срок службы.

При разработке энергетического оборудования ключевыми показателями при формировании технического задания на проектирование должны стать:

- автономность работы (время необслуживаемой работы);
- необходимая периодичность экипировки;
- типы возможных систем энергоснабжения;
- вид потребляемого топлива.

Для разработки холодильного оборудования важнейшими параметрами будут возможности резервирования и надежность работы, экологически чистый и энергетически эффективный хладагент, высокоточное поддержание температурного режима во всем объеме ГП.

С учетом последних тенденций развития ж.-д. транспорта с приоритетами развития безлюдных и цифровых технологий в перевозочном процессе также существенную роль приобретает система управления работой оборудования РВ в целом со следующими функциями:

- система позиционирования вагона;
- дистанционный мониторинг параметров работы всего комплекса оборудования;
- возможность дистанционного управления работой оборудования.

Остальные подсистемы – ударно-тяговые приборы, тормозное оборудование, оборудование создания специальных условий перевозки хотя и влияют на работоспособность вагона в целом и расширяют его потребительские

свойства, но не имеют решающего влияния на коммерческие технико-экономические параметры вагона.

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, и элементы творческих и поисковых методов конструирования, обеспечивающие получение новых технических решений в части специализации вагона по набору выполняемых им рабочих функций.

2.5 Выводы ко второй главе

1. Выполнен обзор и анализ отечественных и зарубежных конструкций ИВ. Анализ устройства и конструктивных схем ИПС различного типа и различных стран производителей позволяет сделать вывод о том, что их основной частью является теплоизолированный цельнометаллический кузов (возможно использование полимерных и композитных материалов) в виде замкнутой оболочки с вырезами и подкреплениями, жестко соединенными с рамой.

2. Среди трех категорий ИПС – вагонов-ледников, вагонов-термосов и рефрижераторных вагонов, наибольшее распространение в настоящее время имеют последние два типа. Причем специализированное энергосиловое, холодильное оборудование имеет различное исполнение – встроенное и навесное.

3. Выполненный анализ конструктивного устройства ИПС для перевозок СПГ выявил следующие характерные особенности.

- наилучшие технико-экономические показатели реализуются у вагонов с наиболее полным использованием габаритного пространства и осевых нагрузок. Поэтому наилучшие показатели имеют американские вагоны, далее следуют вагоны российских и европейских производителей;

- ввиду простоты конструкции вагоны-ледники хотя еще и используются в некоторых странах, но их технические характеристики и возможности проигрывают остальным типам ИВ, и дальнейших перспектив они не имеют;

- специфика устройства используемого энергохолодильного оборудования и электронных компонентов систем управления, а также необходимость улучшения динамических качеств и конструкционной скорости вынуждают применять под этим типом 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.

4. Выполнена классификация, которая позволила констатировать, что обобщенной конструктивной схемой специализированного рефрижераторного вагона является схема автономного рефрижераторного вагона, использованная в данной работе в качестве концептуальной модели с возможностью гибкого изменения и сочетания основных подсистем при проведении функционального анализа рассматриваемого типа подвижного состава.

5. Предложена классификация функциональных систем ИПС по группам, включающим в себя конструкции рамы и кузова, энергосилового и холодильного оборудования. Построена функциональная структура АРВ в виде графа функционального взаимодействия элементов технической системы и объектов.

6. 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.

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

8. Проведен функциональный анализ АРВ нового поколения как самого сложного типа ИПС.

3. РАЗВИТИЕ ИННОВАЦИОННОГО ИПС И СРЕДСТВ ДОСТАВКИ КРУПНОТОННАЖНЫХ РЕФРИЖЕРАТОРНЫХ КОНТЕЙНЕРОВ КАК ИНФРАСТРУКТУРЫ ТРАНСПОРТНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ

3.1. Развитие концептуальных принципов формирования инновационного ИПС для обеспечения рынка транспортных услуг

В ранее принятых отраслевых программных документах, посвященных созданию грузовых и пассажирских вагонов нового поколения, уже сформулированы основные понятия и критерии, которым они должны соответствовать. Одним из принципиальных отличий грузовых вагонов нового поколения от прежних типов является повышение производительности на 20–30 %, которое достигается за счет увеличения осевых нагрузок. Другими требованиями являются снижение тары вагона, повышение надежности, сокращение количества текущих отцепочных ремонтов, уменьшение трудоемкости ремонта, минимизация стоимости жизненного цикла, блочно-модульный принцип компоновки малообслуживаемого оборудования [1,138].

Для укрепления рынка производителей вагонной продукции Минтранс РФ запретил продление срока службы абсолютного большинства типов грузовых вагонов с 1 января 2016 года. ИПС относится к специальному типу и пока не попал в список запрещенных к продлению сроков полезного использования. Но специфичность и сложность конструкции его энергосилового оборудования, на фоне отсутствия ремонтной инфраструктуры, делают продление сроков его использования нецелесообразным. Исключение коснулось только вагонов-термосов модели ТН4-201 с теплоизоляцией типа «сэндвич», для которых ОАО «Рефсервис» разработало технические условия и смогло реализовать капитальный ремонт в своем ремонтном рефрижераторном депо «Троицк». Методологические основы испытаний и оценки несущей способности кузовов на примере специализированных пассажирских вагонов представлены в работе [119]. Методы теплотехнических испытаний рассмотрены в работе [69].

Для стимулирования выпуска новых моделей вагонов государство ввело меры господдержки и субсидирования для предприятий, выпускающих и эксплуатирующих инновационный подвижной состав.

В соответствии с определением [186] к инновационной продукции относится продукция, технологические характеристики (функциональные признаки, конструктивное выполнение, дополнительные операции, а также состав применяемых материалов и компонентов) либо предполагаемое использование, которое является принципиально новым или существенно отличается от аналогичной ранее производимой продукции. Для вагонной продукции это понятие разделяется на две категории – из области технической эксплуатации и надежности, а также технических характеристик вагона. К первой (обязательной) относятся увеличение более чем в два раза межремонтных пробегов и отсутствие ограничений в длине гарантийных плеч. Ко второй (дополнительной) такие технические параметры, как грузоподъемность, тара, осевая нагрузка и объем кузова.

Улучшение технико-экономических характеристик ИПС – повышение грузоподъемности, увеличение скоростей движения, экономичности и экологической чистоты – свидетельствует о том, что новый ИПС должен соответствовать критериям инновационности, и связано с конечной задачей – стремлением вернуть утраченные ранее позиции железнодорожного хладотранспорта в конкурентной борьбе с автоперевозчиками.

Изотермические вагоны занимают особое место в структуре железнодорожного подвижного состава, так как предназначены для перевозки продовольственных грузов подверженных порче, для предотвращения которой необходимо поддержание в ГП определенных параметров перевозки. Остальные технические средства транспортной инфраструктуры служат лишь для обеспечения вагонам возможности этих перевозок. Все перевозимые грузы классифицируются по свойствам и способу их транспортировки. В таких вагонах могут перевозиться следующие категории грузов:

- замороженные;

- охлажденные;
- растительного происхождения;
- термосопригодные;
- прочие попутные грузы, требующие защиты от атмосферных воздействий.

Для выполнения сложной задачи транспортировки СПГ ИПС включает в себя подвижной состав различных конструкций, классификация и возможности использования которых приведены в [39, 55-57, 68, 72, 73, 75, 250].

Вагоны различных типов могут обеспечивать оптимальные условия для перевозимых грузов и обеспечивать их сохранность в пути следования.

По способу транспортировки можно выделить замороженные грузы, при перевозке которых требуется поддержание низкотемпературного режима. Охлажденные грузы требуют поддержания положительных температур в жестком температурном диапазоне. Для грузов растительного происхождения кроме температурного требуется поддержание и вентиляционного режима. Термосопригодные грузы (соки, воды, пиво, консервы и т. д.) допускают расширенный температурный диапазон при перевозке.

Объемы и структура СПГ имеют ярко выраженную сезонность и в значительной степени зависят как от внутренних факторов производства продуктов питания, так и внешних (включая санкционные действия государств-импортеров). Ранее выполненные работы по технике и технологиям железнодорожного хладотранспорта относились к периоду плановой государственной экономики, когда у государства имелись все виды системы управления этой сферой транспортных услуг. В работах В. К. Мироненко [131,199, 201] рассматривается период регресса отрасли, когда объемы перевозок СПГ ж.-д. транспортом ежегодно снижались с 32,98 млн т в 1988 г. и до 5,9 млн т в 1999 г. Причем в структуре и рабочем парке ИПС имелся значительный запас невостребованного ИПС. Это происходило на фоне полного доминирования автомобильных перевозок, парк которых стал пополняться большегрузными рефрижераторами импортного производства.

По мнению автора этих работ, в тот период для обеспечения требуемых оптимальных условий транспортировки СПГ и снижения общих эксплуатационных расходов хладотранспорта необходимо было иметь в его парке четыре основных класса (типа) ИПС: рефрижераторы увеличенной мощности (холодопроизводительности) – РБ; рефрижераторы уменьшенной мощности (РМ); вагоны-термосы (ВТ); другие, альтернативные типы вагонов (ВА) – вагоны-овощевозы, вагоны, охлаждаемые эвтектическими смесями, жидкими газами и др. В [199, 201] предложена методика для определения рационального соотношения в общем парке этих классов ИПС. Внутри каждого класса при необходимости возможна его специализация по грузовместимости.

По мнению автора, в ближайшей перспективе необходимо было ориентироваться на структуру парка ИПС, в которой было бы: РБ – примерно 25 %, РМ – 20 %, ВТ – 35 %, ВА – 20 %. При наиболее благоприятном развитии в области предварительного охлаждения грузов в парке ИПС должно быть до 60 % ВТ и не более 25 % РБ [199].

В связи с этим по обобщенной конструктивной схеме все вагоны было предложено разделить на четыре типа: групповой РПС (рефсекции), АРВ, ИВ с охлаждением расходуемым хладагентом (вагоны-ледники), вагоны-термосы.

Анализ перевозок СПГ в ИПС был представлен в первой главе. Из него видно, что доля термосопригодных грузов (т. е. не требующих активной термообработки ГП) составляет более 33 %. Для их перевозки используются ВТ и ИВТ.

Сдерживающим фактором и спецификой перевозок в КРК является ограниченность инфраструктуры по обслуживанию этого типа подвижного состава – на всей территории страны имеется 49 контейнерных терминалов, имеющих требуемые грузоподъемные механизмы, а число терминалов для КРК еще меньше.

Кроме этого, при сравнении технико-экономических показателей использования рефрижераторных вагонов и крупнотоннажных контейнеров необходимо учитывать резервы провозной способности основных

железнодорожных магистралей [240], При рассмотрении этих параметров для изотермического вагона и контейнера с учетом фитинговой платформы в работе [61] был проанализирован показатель удельного полезного объема грузового помещения этих типов подвижного состава на погонной длине. В расчете принимались изотермический вагон со стандартной длиной кузова 21 м (по осям сцепления 22,15 м) и КРК с тремя вариантами фитинговых платформ – соответственно с длиной 14,5, 19,6 и 25,5 м по осям сцепления. Кроме этого в работах [17, 19] были рассмотрены перспективные варианты съемных кузовов с габаритными размерами. С учетом линейных размеров съемного крытого кузова и толщины теплоизоляции были определены возможные размеры грузового помещения.

На рисунке 3.1 представлено масштабное изображение поперечного сечения кузовов ИВ при вписывании в габарит 1-Т, КРК типов 1АА и 1ААА, а также представлено масштабное поперечное сечение съемного кузова с толщиной теплоизоляции 200 мм [85].

Расчетные линейные размеры изотермических кузовов представлены в таблице 3.1.

При рассмотрении линейных размеров и полезного сечения грузового помещения различных типов изотермических кузовов видно преимущество вагонов и съемных кузовов. Однако использование полезной длины подвижного состава для них имеет свои особенности. Безусловно, полное использование этого показателя осуществляется только для вагонов. При рассмотрении съемных кузовов и крупнотоннажных контейнеров необходимо учитывать длину и тип «носителя» – фитинговых платформ различных моделей. Кроме этого, допускаемые схемы погрузки и использование двух типоразмеров КРК (20 и 40-футовых) в пункте формирования контейнерного поезда приводят к худшим показателям использования полезной длины поезда.

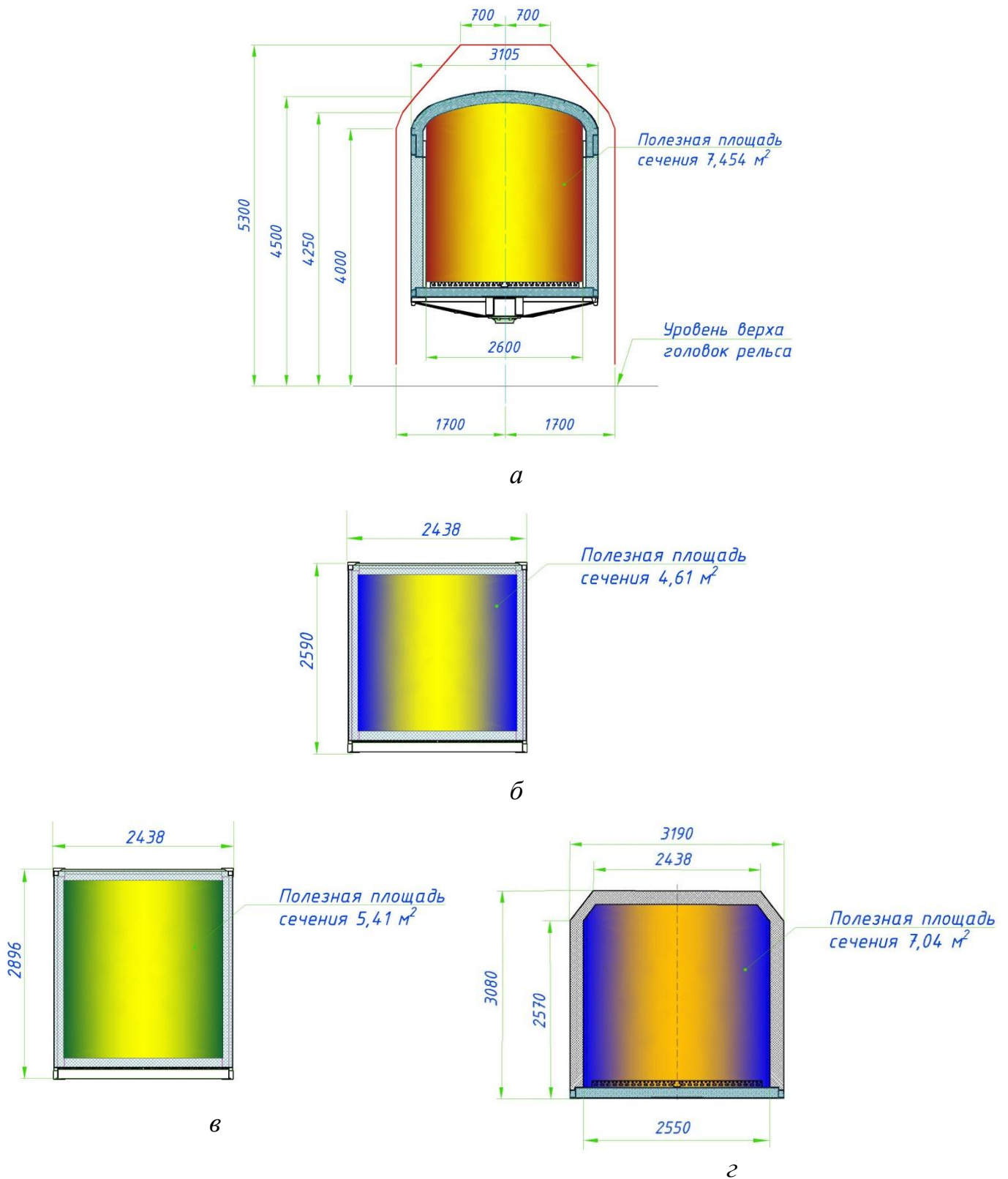


Рисунок 3.1 – Масштабное изображение поперечного сечения грузовых помещений изотермических кузовов:

а – изотермический вагон; б – КРК тип 1АА; в – КРК типа 1ААА;

г – съемного кузова

Таблица 3.1 – Расчетные линейные размеры кузовов различных типов
изотермического подвижного состава

Тип подвижного состава	Ширина наружная, м	Ширина полезная, м	Полезное сечение, м ²	Возможная длина, м	Высота полезная, м
Вагон	3,105	2,6	7,454	21,0	2,96
Съемный кузов	3,19	2,55	7,04	13,71	2,62
Крупнотоннажный контейнер 1АА	2,438	2,154	5,232	12,192	2,212
Крупнотоннажный контейнер 1 ААА	2,438	2,154	4,575	12,192	2,429

Средний возраст ИВ, как частных, так и АО «Рефсервис», составляет более 25 лет, и поэтому его эксплуатация обходится с каждым годом все дороже. В зависимости от года выпуска ежегодное выбытие подвижного состава составляет более тысячи вагонов, что приведет к практически полной утрате специальных железнодорожных транспортных средств для перевозки продуктов питания в ближайшее время. Например, уже сейчас в парке АО «Рефсервис» остались только вагоны-термосы, а рефрижераторные секции были полностью списаны.

При этом спецификой ИПС является некоторая двойственность, заложенная в его назначении – рефрижераторный вагон, например, имеет сложное высокотехнологичное энергохолодильное оборудование, которое обслуживается специальной бригадой, как у пассажирских вагонов. Но по назначению этот вагон является грузовым, и его конструкция способна обеспечивать наибольшую грузоподъемность. Часть оборудования проверяется обезличенно, например ходовые части, автотормоза и ударно-тяговые приборы. Для специализированного энергохолодильного оборудования характерными являются значительные эксплуатационные затраты, в первую очередь на горюче-смазочные материалы и затраты на обслуживающий персонал[1].

ИПС относится к специализированному подвижному составу, для которого характерными являются значительные порожние пробеги. Для улучшения экономических показателей использования практикуются перевозки попутных нескоропортящихся грузов, для которых удельные экономические показатели будут зависеть от грузоместимости.

Отсутствие комплексного анализа приводит к нынешней ситуации, когда ОАО «РЖД» это не интересно ввиду незначительности объемов (менее одного процента в общем грузообороте РЖД), а дочернее ОАО «Рефсервис» ориентируется на свои данные по структуре и объемам существующих перевозок, которые при долговременном анализе показывают регресс. Например, в 1988 г. грузооборот составлял 32 млн т, а в 2020 г. всего 5,3 млн т. Обилие продуктов на прилавках, по сравнению с 1988 годом, показывает насыщение продовольственного рынка, но понятно, что оно произошло за счет ухода огромных объемов перевозок на автомобильный транспорт. И вывод об отсутствии спроса на железнодорожный хладотранспорт будет неверным.

Основными техническими характеристиками для ИПС являются грузоподъемность и полезный объем ГП. Грузоподъемность определяется величиной осевой нагрузки и тарой вагона. Рост полезного объема возможен при увеличении длины кузова и допустимой высоты погрузки ГП, поскольку сама высота кузова ограничивается габаритом подвижного состава. И если по грузоподъемности и полезному объему их приоритет не вызывает сомнений, то для специализированного энергохолодильного оборудования эти показатели могут быть различными. Особенно это касается автономности работы вагона и мощности систем термостабилизации (холодильной и отопительной установки). Автономность работы энергооборудования подразумевает размещение на вагоне определенного количества расходуемого топлива для дизель-генераторной силовой установки или генераторно-приводной установки тележки. Естественно, что их наличие повлияет на полезную грузоподъемность и, в меньшей степени, на полезный объем ГП.

С учетом развития информационных технологий при построении логистического маршрута перевозки оператор, как правило, планирует предполагаемый и последующий груженный рейс. В зависимости от конкретного времени года, продолжительности перевозки одного и того же вида СПГ могут потребоваться различные виды термообработки ГП – охлаждение, отопление и просто термостатирование без работы специализированного оборудования, т. е.

режим вагона-термоса. Блок-схема взаимосвязей потребительских и организационно-технических критериев с элементами непрерывной холодильной цепи представлена на рисунке 3.2.

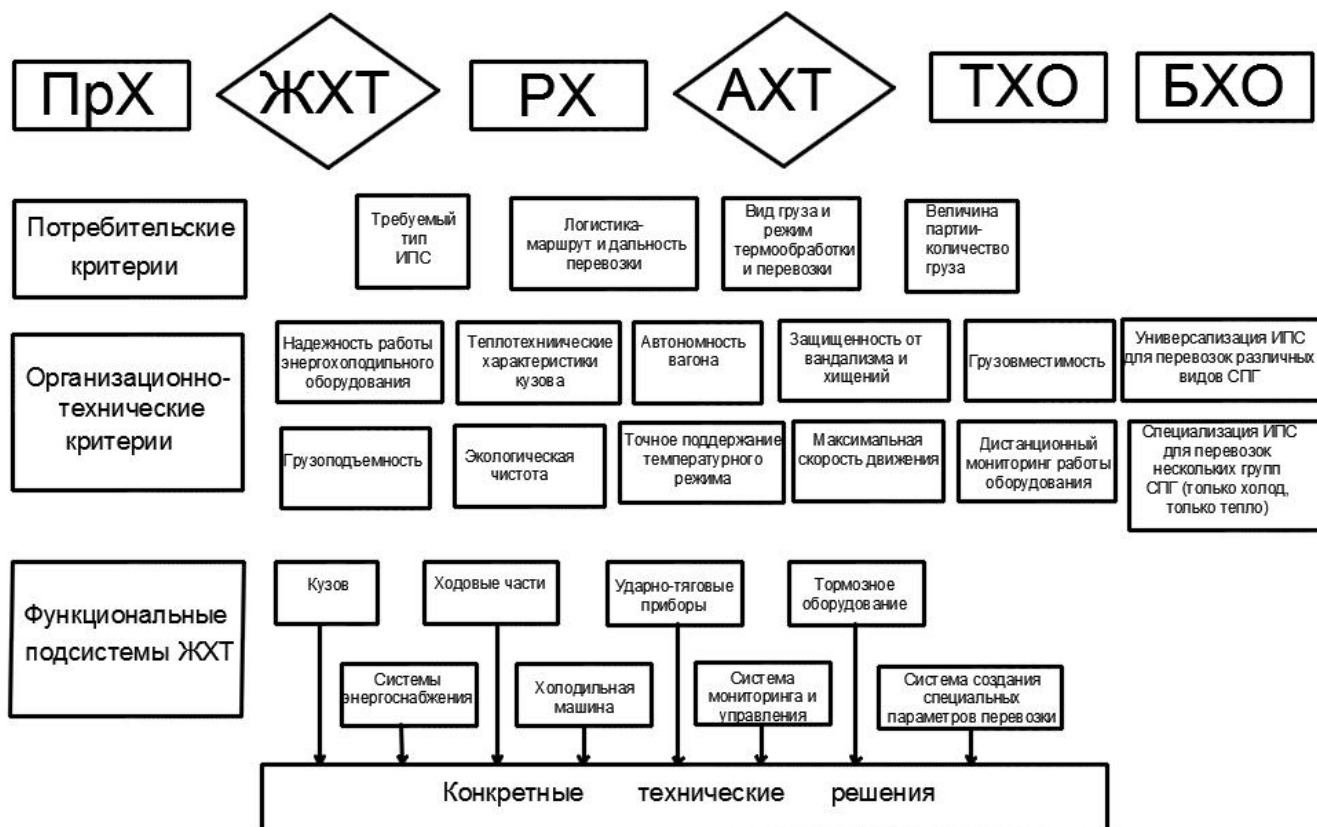


Рисунок 3.2 – Структурная схема взаимодействия клиента-оператора-перевозчика

Анализ схемы показывает, что технические решения основных функциональных систем вагонов находятся в нижнем уровне иерархии, а в верхнем – располагаются потребности клиентуры.

Таким образом, экономико-технологическое обоснование стратегии развития ИПС включает сопоставительный анализ следующих показателей, формирующих интегральную оценку варианта их развития [19, 186]:

- полезный объем транспортной единицы при соблюдении нагрузки на оси;
- минимальный объем отправления (с использованием различных типов РПС, КРК и др.) с учетом их технологических характеристик;
- мобильность транспортной единицы: возможность доставки «от двери до двери», мультимодальность;

- тарифные и временные составляющие перевозки;
- потребность в терминальной и промежуточной транспортной инфраструктуре в обеспечении перевозок СПГ.

Следует отметить, что наличие всех факторов в реализации НХЦ для перевозки СПГ является гарантией реализации транспортно-логистических цепей организации перевозок СПГ. Эта масштабная стратегическая задача может быть решена крупными компаниями при поддержке государства, на условиях государственно-частного партнерства [127] или иных условиях поддержки крупных транспортно-логистических операторов, поскольку ее решение обеспечивает развитие предприятий транспортного машиностроения, инфраструктуры транспортного холдинга ОАО «РЖД», активизацию предприятий отраслей пищевой промышленности, а также решение ряда институциональных задач развития транспортно-логистического рынка.

3.2 Совершенствование и унификация конструкций изотермических и рефрижераторных вагонов

3.2.1 Пути совершенствования технико-экономических параметров

Анализ технических характеристик выпускаемых автономных рефрижераторных вагонов и вагонов-термосов выявил, что технический уровень этих инновационных вагонов пока не превышает уровня РПС, разработанного в 1980-е годы в Германии и на Брянском машиностроительном заводе.

Опыт создания АЗТМ вагона-термоса показал, что при стоимости вагона около 7,5 млн рублей срок окупаемости будет значительным, а спрос со стороны операторов – ограниченным. Поэтому технико-экономические и эксплуатационные параметры требуют учета на всех стадиях жизненного цикла ИВ.

Традиционная компоновка, как правило, предусматривает два автономных комплекта ХНУ и ДГА с топливными баками в машинных отделениях (немецкие АРВ). Моноблок ХНУ и ДГА выполнен в виде отдельных агрегатов. Кроме этого

для европейских стран завод «Вагонбау Дессау» выпускал модификацию АРВ с расположением ДГА и топливного бака под кузовом вагона.

Преимуществами такого решения являются агрегатирование, резервирование холодопроизводительности, дублирование ХНУ, возможность быстрой смены агрегата. Кроме этого, торцевое расположение ХНУ обеспечивает относительно короткий циркуляционный контур термообработанного воздуха в грузовом помещении вагона. К недостаткам следует отнести уменьшение полезного объема на 26 м^3 . Наилучшие технические характеристики имеют АРВ американских железных дорог, но достигаются они за счет увеличенных осевых нагрузок и увеличенных по высоте габаритов, что позволяет большую высоту загрузки ГП (может достигать 3,6 м) [58].

Расположение ХНУ с одной стороны или посередине крыши кузова вагона позволяет при такой же длине кузова увеличить полезный объем ГП примерно на 20 м^3 . К основным технико-экономическим параметрам, влияющим на экономическую эффективность эксплуатации ИПС, следует отнести грузоподъемность и полезный объем ГП.

В работах [60, 76] были классифицированы и рассмотрены основные функциональные системы рефрижераторного вагона и определен характер их взаимосвязей и значимость.

Ходовые части и принятая величина осевой нагрузки являются самыми важными факторами, определяющими грузоподъемность. Рекомендации по выбору и использованию ходовых частей были рассмотрены в работах [3, 33, 34, 48, 52, 248, 249].

Для обеспечения максимального объема ГП необходимо реализовать наибольшие линейные размеры кузова с учетом габарита, с другой стороны, необходимо оптимальное размещение внутреннего оборудования ГП – воздухопроводов, испарителей, напольных решеток, элементов системы воздухораспределения.

Другим важным, но менее значимым параметром, влияющим на грузоподъемность, является масса тары ИВ с энергохолодильным оборудованием.

Влияние компоновочных решений по размещению ХНУ с анализом прочностных характеристик металлоконструкции кузова были рассмотрены в работах [42, 43, 63, 214]. При анализе в качестве перспективных возможных вариантов размещения основных узлов ХНУ были приняты три варианта их расположения. При этом потребовался учет влияния одного из важнейших элементов холодильной машины воздухоохладителя в составе системы циркуляции и распределения термообработанного воздуха в грузовом помещении. Из-за того что большинство видов СПГ имеют малый удельный вес, традиционно ИВ имеют большую длину кузова, что позволяет реализовывать больший полезный объем ГП.

В этой связи необходимо рассмотреть характер движения термообработанного (нагретого и охлажденного) воздуха внутри ГП. Для обеспечения продувки штабеля перевозимого груза в состав СЦРВ входят воздуховод, вертикальные гофры ГП и напольные решетки. Для рефрижераторов большой длины (более 15 м) при использовании таких устройств возникают проблемы с равномерным распределением воздуха и изотермичностью температурного поля из-за значительных аэродинамических (гидравлических) потерь в воздуховоде. Для снижения разности температур необходимо сокращать длину воздуховода. Однако размещение ХНУ возможно либо в машинном отделении, либо на силовых элементах торцевых стен кузова. Минимизация размеров холодильного оборудования за счет уменьшения его высоты наблюдается в новом развитии установок кондиционирования воздуха ж.-д. подвижного состава (пассажирских вагонов, моторвагонного пригородного подвижного состава, метрополитена и рельсовых автобусов). Эта возможность появилась благодаря применению горизонтальных спиральных компрессоров. Лучшие образцы СКВ имеют высоту (толщину) моноблочного агрегата 270–350 мм, что практически соответствует толщине теплоизоляционного слоя крыши ИВ. В случае расположения двухпоточного воздухоохладителя в средней части кузова длина воздуховода составит не более 8 м, что является вполне отработанным беспроблемным решением.

Схемы циркуляции термообработанного воздуха в грузовом помещении представлены на рисунке 3.3.

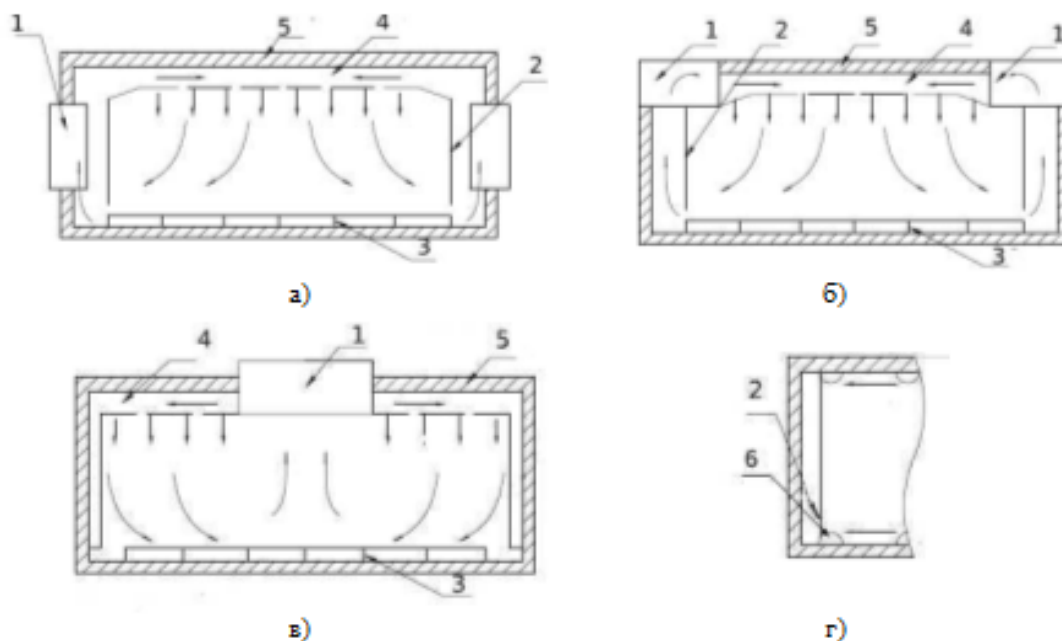


Рисунок 3.3 – Варианты расположения систем воздухораспределения:
 а) торцевое расположение ХНУ; б) крышное расположение ХНУ;
 в) потолочное расположение; г) расположение воздухозаборной перегородки (вид сверху); 1 – ХНУ; 2 – воздухозаборная торцевая перегородка; 3 – напольные решетки; 4 – воздуховод; 5 – теплоизолированный кузов; 6 – вертикальные гофры обшивки ГП

В случае использования такой компоновки проблемы возникают при конструировании крыши кузова вагона, так как в этой зоне мы имеем ослабленное из-за погрузочных дверей сечение кузова. И решение усиления конструкции традиционными способами (наращиванием сечения элементов) не является приемлемым. Вопросы технологичности реализаций конструкций такого типа для пассажирских вагонов рассмотрены в работе [27].

В последнее время при разработке инновационных моделей вагонов в вагоностроении стали использовать композитные материалы на основе стеклопластика. Например, УВЗ использует такие материалы для изготовления разгрузочных люков полувагонов и в конструкциях вагонов-хопперов: кузова для

модели 19-5167 и съемной композитной крыши для модели 19-5153-01. Освоение таких материалов и технологий делает возможным и целесообразным их применение и для кузовов ИПС [128].

Особый интерес вызывает использование этого варианта в конструкции крыши, поскольку при применении заливочных напыляемых теплоизоляционных материалов возникают технологические сложности при их нанесении именно на панель крыши собранного кузова. При использовании композитной крыши силовая конструкция кузова меняется существенным образом.

Для нашего случая можно рассмотреть вариант полукузова с силовыми дугами верхней обвязки крыши, используемыми для потолочного варианта размещения ХНУ и закрепления панели крыши. Для учета эксплуатационных условий эксплуатации ИВ наибольшего внимания заслуживает внутреннее устройство пола и крыши. Продолжительность жизненного цикла (срока службы) и межремонтный период в значительной степени зависят от состояния пола кузова, который испытывает постоянные механические воздействия от перевозимого груза, а еще в большей степени – погрузочно-выгрузочных механизмов.

Особо значимые нагрузки испытывают полы в зоне междверного пространства, так как здесь разворачиваются и маневрируют погрузчики. Частое воздействие влаги, талой воды от ХНУ и химически агрессивных промывочных растворов, периодическое замерзание и оттаивание воды, проникшей в теплоизоляцию, вызывают преждевременное разрушение теплоизоляции. Поэтому в этой зоне пол должен иметь повышенную прочность и эксплуатационную устойчивость.

Для стеновых панелей кузова внутренняя обшивка может быть изготовлена из стеклопластика с плоскими вертикальными гофрами для обеспечения циркуляции термообработанного груза между штабелем и внутренней обшивкой. Панели изготавливаются в виде секций необходимой длины со сплошной теплоизоляцией из жесткого пенопласта и монтируются с помощью специального клея внутри стального кузова, подкрепленного вертикальными ребрами жесткости.

Конструкция крыши влияет на величину внешних теплопритоков и теплопритоков от солнечной радиации. Одним из возможных вариантов может стать композитная крыша со светоотражающим покрытием снаружи и энергосберегающим – внутри. Технические параметры существующего и перспективного ИПС представлены в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Технические параметры существующего и перспективного ИПС

Показатели		Существующий РПС				Перспективный ИПС			
		РС-5	ЗВ-5	АРВ	ВТ ТН4- 201	АЗТМ		ВТ 16- 1807- 04	УВЗ АРВ 16- 5213
						ВТ16- 6962	АРВ 16- 6973		
1. Тара, т		39,0	41,0	46,0	33,0	37,3	42,00	35-36	42
2. Грузоподъемность, т		47,0	49,0	44,0*	60,0	62,7	58,0	58,0	55
3. Длина вагона, м	По осям автосцепки	22,1	22,1	22,2	22,2	22,2	22,2	19,84	22,33
	ГП	17,65	17,5	17,32	20,0	20,5	18,5	18,475	18,5
4. Полезный объем, м ³		111,8	100,0	100,0	128,0	137,0	115,0	145*	126
5. Полезная площадь, м ²		46,4	45,5	45,0	52,5	51,2	47,2	49,8	47,2
6. Коэффициент теплопередач, Вт/м ² ·К		0,32	0,35	0,32	0,18	0,20	0,20	0,25	0,2– 0,4
7. Теплопередающая поверхность кузова (расчетная), м ²		258,1	229,7	229,7	278,0	278,0	258,0	Н.д.	258

Таким образом, можно констатировать, что улучшение технико-экономических параметров ИПС может быть достигнуто за счет совершенствования следующих функциональных систем вагона:

1. Использование ходовых частей с повышенными осевыми нагрузками (позволит увеличить грузоподъемность до 10 %).

2. Совершенствование технологии и материалов для изготовления элементов ограждающих конструкций теплоизолированного кузова и внутреннего оборудования ГП вагона (позволит снизить тару на 3–5 %) [58].

3.2.2. Возможности унификации и модернизации различных типов ИПС

Разработку нового ИПС необходимо вести совместно с усовершенствованием всех звеньев НХЦ в рамках изменившихся рыночных условий и имеющейся инфраструктуры. Ранее методологические вопросы модернизации различных типов грузовых вагонов для международного сообщения были рассмотрены в работах [133, 134].

На основании анализа данных об объемах, видах, дальности и экономической эффективности перевозок СПГ коммерческими структурами и продовольственной безопасности страны можно сформировать наиболее эффективную структуру и потребность парка ИПС. При ранее выполненном анализе условий перевозок СПГ в рефрижераторных вагонах стало понятным, что групповой РПС в виде пяти- или шестивагонных секций постоянного формирования имеет худшие экономические показатели тарифа из-за наличия в своем составе вагона ДЭС и имеет слабые перспективы для развития. Спросом будут пользоваться автономные одиночные вагоны, эксплуатируемые в режиме безлюдных технологий.

При реализации таких видов различной комплектации ИВ при подготовке вагона к перевозке формируется комплект оборудования с учетом последующих перевозок. Резерв для повышения грузоподъемности имеется при оптимальной комплектации энергохолодильного оборудования, масса которого с учетом экипировки может достигать 5 т.

Это предполагает генерацию вариантов нового поколения ИВ и контейнеров, которые могут адаптироваться к изменяющимся условиям рынка транспортных услуг и требованиям заказчиков перевозки СПГ.

Возможность трансформации специализированного энергохолодильного оборудования целесообразна по двум направлениям и видам модернизации. Первое – на заводе при формировании технических возможностей и типа ИПС, и второе – когда используется съемное оборудование переменной комплектации в процессе подготовки вагона к перевозке самим грузоотправителем. Это позволит

при изготовлении малых серий формировать технический облик вагона под требуемые виды СПГ.

В подблоках формируется общий алгоритм проектирования ИПС на основе блочно-модульного подхода и выполняемых им функций при транспортировке СПГ. Предложена структура железнодорожного рефрижераторного транспорта для перевозки СПГ в рамках евроазиатского союза стран. Сформирован алгоритм модернизации вагона-термоса, позволяющий существенно расширить его функциональные возможности.

Технические решения, предлагаемые к использованию, можно разделить на две основные группы. Первая – концептуальные, определяющие основные технико-экономические параметры вагона. Их основу составляет единая модель вагонокомплекта на базе изотермического кузова для вагонов-термосов и рефрижераторных, а их разделение по типам производится за счет возможности трансформации и оборудования различными вариантами энергохолодильных установок. Другим основополагающим фактором является разработка или адаптация типажа ходовых частей для ИПС и средств доставки КРК.

Ко второй группе следует отнести локальные технические решения, улучшающие потребительские качества и расширяющие сферу их использования:

- тип источника энергоснабжения;
- тип холодильной машины и системы обогрева грузового помещения;
- эффективная конструкция теплоизоляции кузова;
- системы дистанционного мониторинга;
- системы создания специальных условий перевозки в ГП.

На основе проведения анализа технико-экономических исследований рынка производится выбор нескольких наиболее рациональных вариантов модернизации существующего парка вагонов в зависимости от предлагаемого освоения тех или иных маршрутов транспортировки СПГ и попутного груза. Однако сезонность, характерная для СПГ, непостоянство и непредсказуемость рыночного спроса делают проблематичным создание больших потенциальных провозных возможностей однотипного подвижного состава. В то же время транспортная

компания не желает упустить потенциального заказчика. Отсюда становится актуальной задача организации гибких и надежных провозных возможностей операторов, способных с минимальными экономическими затратами быстро отреагировать производством на возникший спрос. Решение этой задачи в условиях конкуренции наиболее эффективно достигается не экстенсивными мерами, а логистической реализацией транспортных услуг при оперативной модернизации и трансформации подвижного состава.

При выполнении этих актуальных требований рынка транспортных услуг операторские компании, обладая небольшим количеством и ограниченным типажом вагонного парка, должны освоить методы проведения быстрой и недорогой модернизации вагонов, что позволит экономично и рационально удовлетворять запросы клиентуры на перевозку грузов различных видов, объемов и упаковки [133].

В процессе генерации вариантов появляется возможность на базе основного вагонокомплекта получать разнотипные автономные ИВ различного назначения – термосы, рефрижераторные, отапливаемые, вентилируемые, а также изотермические с расходуемым хладагентом.

Для такого ИПС основой конструкции может стать теплоизолированный кузов (вагон-термос) с универсальными проемами в торцевых стенах ГП, в которые смогут монтироваться холодильные машины или отопительно-вентиляционные агрегаты (рефрижераторный, отапливаемый и вентилируемый вагоны).

В качестве дополнительных опций могут предлагаться различные типы систем энергоснабжения, холодильных машин, систем дистанционного мониторинга с определением месторасположения вагона и режимов работы энергохолодильного оборудования, емкости для расходуемого хладагента, устройства ввода и распределения хладагента, системы создания регулируемой газовой атмосферы.

Окончательное определение оптимальной структуры ИПС (изотермических и рефрижераторных вагонов, КРК и различных технологий и средств их доставки) возможно 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.

Концепция проектирования новых ИВ предлагает на базе единого теплоизолированного кузова реализовывать различные компоновочные схемы расположения холодильного и энергетического оборудования (парокомпрессионную холодильную машину, воздушную холодильную машину, азотную систему охлаждения, систему ввода и дохолаживания ГП в пути следования).

Заслуживает внимания и более тщательного экономического анализа рынок термочувствительных грузов, имеющих меньшие объемы, но значительно большую стоимость – например, медикаменты и косметическая продукция.

Комплексное решение оптимальной структуры парка РПС должно вестись с учетом сложившихся постоянных макрологистических маршрутов и специфических особенностей СПГ и грузов попутной загрузки.

Структура предлагаемого типажа ИПС представлена на рисунке 3.4.

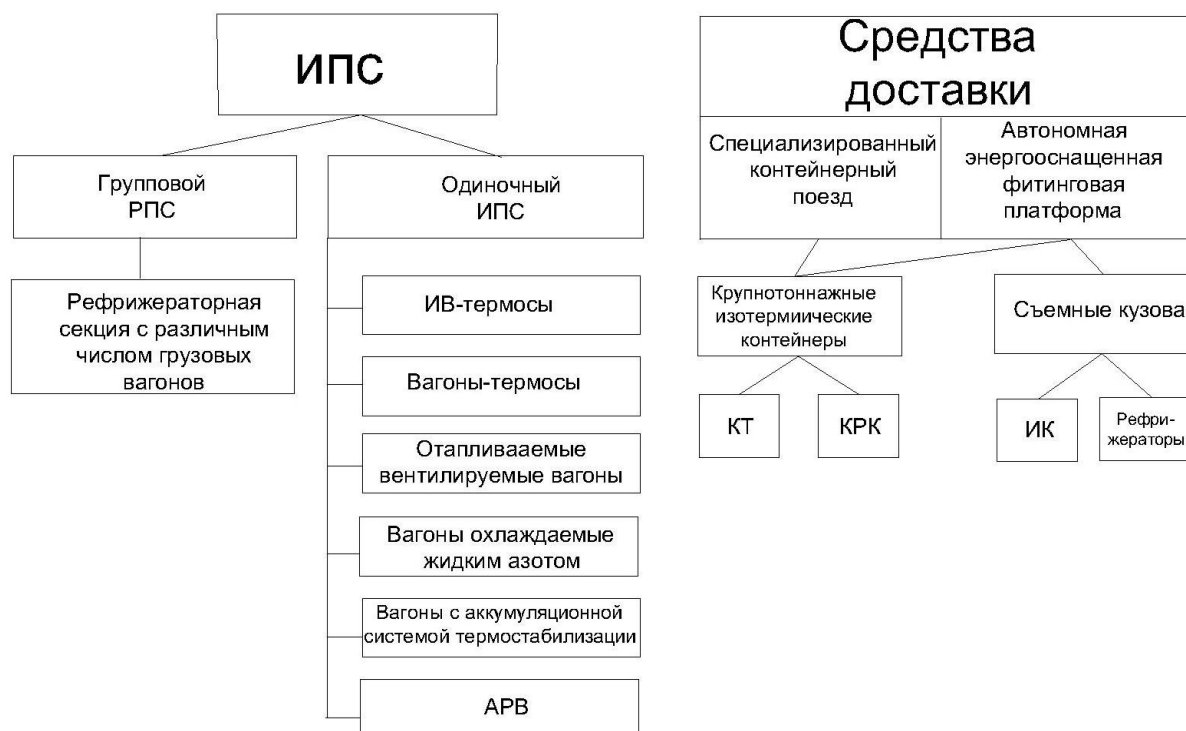


Рисунок 3.4 – Предлагаемая структура парка подвижного состава для транспортировки СПГ

К техническим мероприятиям следует отнести оптимизацию структуры и типажа ИПС путем создания инновационного подвижного состава с расширенными функциональными возможностями:

- рефрижераторного вагона с экологически чистым энергохолодильным оборудованием, которое может работать как в автономном (одиночном) режиме, так и в составе рефрижераторной секции с возможностью поддержания температурного режима в грузовом помещении -26°C ;

- вагона ДЭС с энергоэффективным и экологичным (на уровне ЕВРО-4) дизельным оборудованием, который предназначен для использования его в составе как контейнерных поездов, так и рефрижераторных секций с различным числом рефрижераторных вагонов;

- отапливаемого вагона на базе вагонов-термосов;

- изотермических вагонов с возможностью поддержания в грузовом помещении нескольких температурных режимов;

- использование безлюдных технологий за счет применения на РПС дистанционно управляемых интеллектуальных энергохолодильных комплексов оборудования, которые позволяют в дополнение к информационным возможностям Главного вычислительного центра (ГВЦ) РЖД реализовывать расширенный сервис – определение точного месторасположения, температурный режим ГП, параметры работы оборудования с выдачей сообщения при его выходе из строя [39, 59, 170];

- оснащение вагонов-термосов встроенными устройствами для обеспечения захолаживания ГП жидким азотом от стационарной криогенной цистерны, что позволит без перегруза увеличить продолжительность перевозки в вагонах-термосах. Более подробное описание инновационных технических решений для ИПС нового поколения представлено в работах [1, 45, 51, 62, 65,71].

С учетом этих укрупненных требований может быть сформирован типаж автономного и группового РПС, специализированного энергооснащенного подвижного состава для КРК, разработанных с применением новейших достижений в области холодильного и энергетического машиностроения,

вагоностроения и передовых информационных технологий, который в большей степени будет удовлетворять требованиям транспортного рынка СПГ и станет более органичным и востребованным звеном непрерывной холодильной цепи [36].

3.3. Вариантное конструкционное решение одиночного изотермического вагона

3.3.1. Отапливаемый изотермический вагон

3.3.1.1. Необходимость создания и общие требования к отапливаемому изотермическому вагону

Динамика объемов перевозок СПГ по железным дорогам России показывает, что более 30 % перевозимой продукции составляют грузы, которые требуют поддержания положительной температуры в грузовом помещении и не допускают подмораживания (соки, безалкогольные и слабоалкогольные напитки, овощные консервы и др.). В настоящее время перевозка таких грузов может осуществляться в пятивагонных рефрижераторных секциях и в изотермических вагонах-термосах (ИВ-термосах). Однако оба этих типа подвижного состава обладают рядом недостатков. Использование рефрижераторных секций нерационально из-за высокой себестоимости перевозки, обусловленной значительными эксплуатационными затратами. Основным недостатком ИВ-термоса является ограниченное время перевозки в переходный и зимний период.

Решить эту проблему можно при помощи отапливаемого изотермического вагона (ОИВ). Создание системы автономного обогрева (САО) для отапливаемых изотермических вагонов предполагается на базе грузовых рефрижераторных вагонов и вызвано необходимостью более рационального использования грузовых вагонов пятивагонных рефрижераторных секций, эксплуатируемых в режиме одиночных изотермических вагонов-термосов (ИВ-термос) [65].

ОИВ отличается от ИВ-термоса наличием системы обогрева, которая поддерживает необходимую положительную температуру в грузовом помещении. Данная система представлена в виде греющего кабеля, равномерно расположенного по полу и стенам ГП. Источником энергоснабжения является генератор с приводом от оси колесной пары, что обеспечивает его автономность. Кроме этого предусматривается возможность подключения вагона к внешнему источнику энергии для работы на стоянках. Очевидными преимуществами такой системы являются простота, надежность, малые затраты на эксплуатацию и возможность увеличения полезного объема ГП за счет отказа от машинного отделения и воздухопроводов в грузовом помещении [65, 145].

Так как под погрузку груз подается предварительно термически обработанным, то работа системы отопления сводится к компенсации теплопотерь через ограждения кузова. По предварительным расчетам, суммарные потери тепла при температуре наружного воздуха $-45\text{ }^{\circ}\text{C}$ и при температуре в грузовом помещении $+5\text{ }^{\circ}\text{C}$ для ОИВ составят не более 6–8 кВт [1]. Максимальная суммарная мощность греющего кабеля ограничена мощностью генератора и составляет 8 кВт, что позволяет с запасом обеспечивать ГП необходимым количеством теплоты и исключить потери продукции от подморозки. Таким образом, ОИВ позволяет значительно расширить географию перевозок вышеперечисленных грузов в переходный и зимний период, снижая при этом их себестоимость, а в случае необходимости может использоваться в качестве обычного вагона-термоса.

Для рефрижераторного вагона характерна достаточная проницаемость штабеля груза и принудительная циркуляция воздуха, необходимая для работы холодильной установки, которая регламентируется способами укладки грузов и Правилами перевозок. Номенклатура СПГ, перевозимых железнодорожными рефрижераторными вагонами, достаточно широка и многообразна. Как правило, продукты, предъявляемые к перевозке, имеют более высокую температуру, чем требуется при их транспортировке. Поэтому более теплый груз должен быть подвергнут термообработке, за счет охлажденного в воздухоохладителе воздуха,

проходящего через штабель груза. Скорость охлаждения в таких случаях зависит от многих факторов: вида продукта, теплоемкости, величины теплоты дыхания (для плодовоовощной продукции), способа укладки груза. Причем последний фактор особенно оговаривается в Правилах перевозок грузов [161, 191].

Однако существует достаточно многочисленная группа СПГ, для перевозки которых в зимний период года не требуется точное поддержание температуры в грузовом помещении. Например, для соков, пива, консервов, молочной продукции, минеральной воды и т. д. требуется простое поддержание положительных температур в грузовом помещении вагона без ущерба для качества продукции. Из рисунка 3.4 видно, что доля таких грузов составляет примерно 33 % от общей структуры перевозок филиала ОАО РЖД «Рефсервис»

Эта категория грузов допускается к перевозкам в вагонах-термосах с ограничением времени транспортировки. Допустимый срок транспортировки зависит от времени года и расстояния и регламентируется отдельными указаниями РЖД.

В этих условиях ОИВ может использоваться как универсальное транспортное средство для транспортировки вышеперечисленной номенклатуры грузов, причем для перевозки в летний период, а также для перевозки продуктов, требующих поддержания отрицательной температуры в грузовом помещении, ОИВ может эксплуатироваться в качестве обычного ИВ-термоса, а зимой система отопления позволяет намного увеличить дальность и эффективность перевозки грузов, не допускающих подморозки.

При поддержании температурного режима подогрев ГП осуществляется теплопроводностью и конвекцией. Однако расчетная модель штабеля груза в ОИВ должна иметь существенные различия от штабеля груза в рефрижераторном вагоне, т. е. изменен основной принцип поддержания температуры.

Основным принципом поддержания температурного режима для отапливаемого вагона является сохранение тепла, аккумулированного грузом, так как погрузка осуществляется со склада или другого транспортного средства, где ранее уже поддерживались требуемые для хранения этого груза положительные

температуры и нужная относительная влажность. Поэтому требования к укладке груза в ГП ОИВ будут заключаться в формировании более плотного штабеля, способствующего сохранению тепла, аккумулированного грузом.

Зазоры между штабелем и внутренней обшивкой должны быть минимальными для уменьшения конвективных потоков.

Работа системы отопления будет в этом случае сведена к компенсации теплопотерь, которые, в основном зависят от температуры окружающего воздуха и от теплоизоляционных качеств ограждающих конструкций кузова вагона

Основная часть ОИВ, по-видимому, будет эксплуатироваться в грузовых составах. Поэтому во время переработки вагонов на сортировочных станциях, когда время простоя может достигать 12–24 часов, перерывы в энергоснабжении приведут к понижению температуры в грузовом помещении. Решение этой проблемы видится несколькими способами: организационными (например, грузовые документы яркого цвета, обращающие внимание грузового и маневрового диспетчеров на наличие вагона с термочувствительным грузом и наличие соответствующего указания РЖД) и техническими. К техническим мероприятиям следует отнести программирование термостата ОИВ на верхний предел допустимого температурного режима для данного рода груза. Сразу после загрузки нагреватели вагона подключаются к внешней электрической сети и обогревают ГП. Во время движения и работы подвагонного генератора система обогрева повысит температуру груза и ГП до максимально допустимого значения. Учитывая теплоемкость груза и состояние ограждающих конструкций кузова, температура груза за одни сутки может понизиться на несколько градусов, что не сможет вызвать его подморозку и порчу. Во время дальнейшего продвижения вагона и работы подвагонного генератора, обеспечивающего энергоснабжение системы отопления, температурный режим будет восстановлен. Для сглаживания скачков температуры в ГП могут быть помещены специальные вещества-аккумуляторы холода-тепла.

Оставшиеся в рабочем парке рефрижераторные вагоны имеют ГП с вентиляционным каналом, с раздаточными отверстиями или щелями и осевым

вентилятором, которые оснащены устройствами для термообработки воздуха, выполненными в виде холодильной машины и теплонагревателей. Им присущи следующие недостатки:

- необходимо предусматривать специальное машинное отделение для дизель-генераторной установки;
- отопительно-вентиляционный агрегат занимает часть полезного объема ГП и ограничивает высоту загрузки;
- необходима периодическая дозаправка дизельным топливом в пути следования;
- сложность в эксплуатации и необходимость периодического обслуживания в связи с наличием дизельного и вентиляционного оборудования.

Преимуществами технических решений, представленных в проекте, являются:

- увеличение полезного объема ГП;
- снижение энергопотребления;
- увеличение равномерности распределения температурного поля ГП;
- повышение надежности системы в целом.

В современных типах вагонов все шире стали использоваться нагревательные кабели. Для пассажирских вагонов бизнес-класса в душевых комнатах и на сливных трубопроводах смонтирована система их обогрева. В конструкции РПС также могут найти применение аналогичные технические решения, позволяющие более экономично решить вопросы обогрева ГП.

Для этого в предлагаемом транспортном средстве система обогрева выполнена в виде греющего кабеля, равномерно расположенного по полу, боковым и торцевым стенам ГП. В качестве источника энергоснабжения могут быть использованы подвагонные серийно выпускаемые генераторы типов 2ГВ008, ЭГВ 01.У1 мощностью 8 кВт ($U = 54$ В) с приводом от колесной пары тележки КВЗ-И2. Все работы могут быть выполнены в условиях рефрижераторного депо аналогично переоборудованию рефрижераторных вагонов в ИВ-термосы. Благодаря новой системе обогрева и отказу от

воздуховода может быть увеличена высота (и соответственно объем) ГП вагона без изменения наружных размеров кузова, что особенно актуально при перевозках СПГ с малым удельным весом.

Для этого в предлагаемом транспортном средстве система обогрева выполнена в виде греющего кабеля, равномерно расположенного по полу ГП, а в зоне наибольших теплотерь, например нижней части погрузочных дверей, кабель имеет повышенную мощность. Источник энергоснабжения (генератор) имеет привод от оси колеса транспортного средства (например, колесной пары железнодорожного вагона) [65, 176, 177, 178].

Отсутствие вентиляционной установки, обеспечивающей принудительное движение термообработанного воздуха, снижает теплотери от инфильтрации, так как в этом случае отсутствует подпор воздуха со стороны ГП.

В результате этого существенно улучшается равномерность температурного поля штабеля и полностью исключается возможность подмораживания термочувствительных грузов.

Опытные перевозки, выполненные в РГУПС в ИВ, оборудованных такой системой, в переходный и зимний периоды года, подтвердили большую эффективность предлагаемой системы обогрева по сравнению с традиционной верхней раздачей термообработанного воздуха. Подмерзание груза в зоне пола и дверного проема в этом случае полностью исключается.

Схема расположения оборудования представлена на рисунке 3.5.

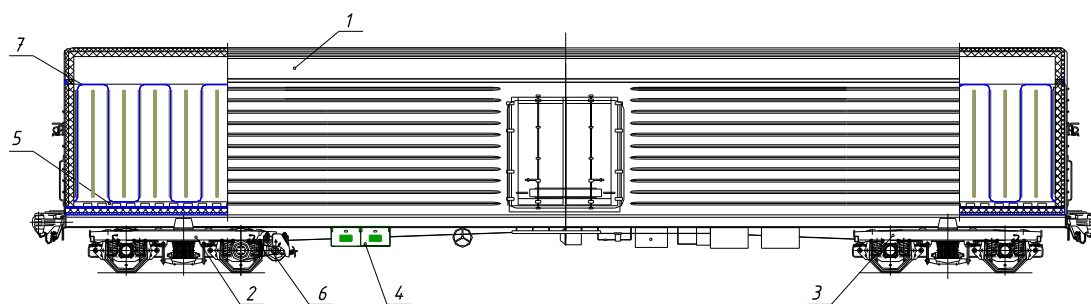


Рисунок 3.5 – Отапливаемый изотермический вагон:

- 1 – изотермический кузов; 2 – тележка КВЗ И2 с подвагонным генератором;
3 – тележка; 4 – система управления; 5 – напольные решетки; 6 – подвагонный генератор; 7 – секции нагревательного кабеля

3.3.2. Изотермические вагоны с охлаждением жидким азотом

Этот тип вагонов относится к классу ИПС с расходуемым хладагентом, подобных вагонам-ледникам, которые использовались для перевозок продовольственных грузов с эпохи зарождения железнодорожного транспорта и просуществовали в России до 1985 года.

В качестве хладагента в этих вагонах используется жидкий азот. Жидкоазотные системы охлаждения (ЖАСО) оснащены криогенными резервуарами со слоисто-вакуумной или экрано-вакуумной теплоизоляцией. Такие сосуды называются по имени их изобретателя – сосудами Дьюара. Особенности их конструкции является то, что внутренний сосуд помещается вовнутрь наружного и пространство между ними вакуумируется. Кроме этого для снижения величины теплопритоков внутренний сосуд оборачивается несколькими слоями фольги и специального стекловолокна, образующими дополнительный отражающий экран. Результаты исследований ЖАСО для крупнотоннажного контейнера представлены в работе [157].

Опыт создания автономных жидкоазотных вагонов (АЖВ) имеет Брянский машиностроительный завод. Изотермический автономный вагон с жидкоазотной системой охлаждения предназначен для перевозок всей номенклатуры СПГ, включая свежую плодоовощную продукцию, и требующих поддержания в грузовом помещении температуры от -20 до $+14^{\circ}\text{C}$. Охлаждение ГП осуществляется двумя автономными независимыми системами охлаждения, действующими по принципу впрыска в ГП жидкого или парожидкостного азота.

В АЖВ в качестве базового используется кузов грузового рефрижераторного вагона секции РС-5 производства БМЗ. Для размещения достаточного количества хладагента потребовалось устройство еще одного машинного отделения, с другой стороны кузова, поэтому АЖВ имеет одно ГП и два машинных отделения, расположенных по торцам вагона.

Система охлаждения АЖВ состоит из азотной системы охлаждения (АСО) и системы раздачи – азотовоздушной смеси. Схема эжекторной системы распределения хладагента представлена на рисунке 3.6 [159].

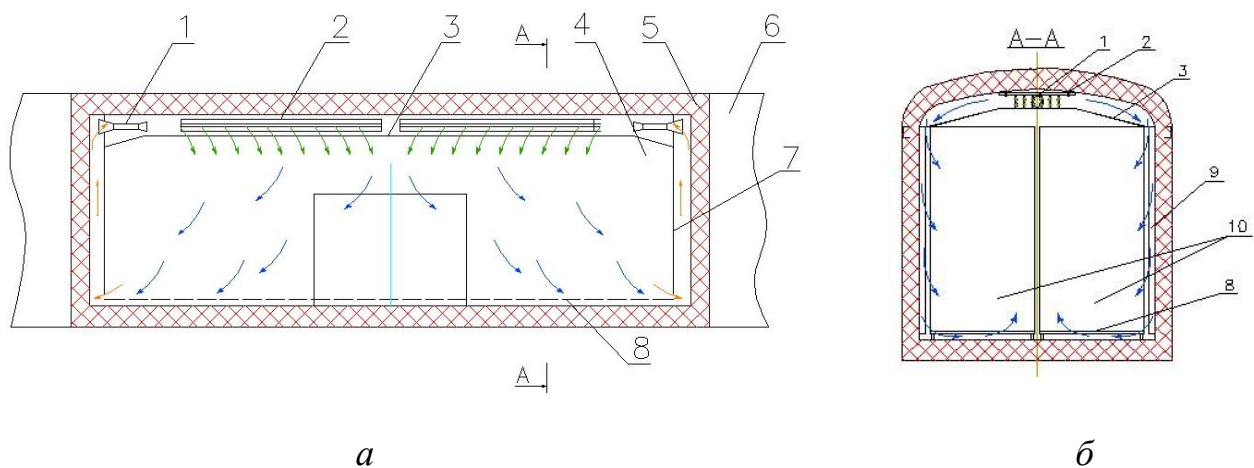


Рисунок 3.6 – Схема эжекторной системы распределения хладагента:

а – циркуляции газовой смеси в продольном сечении;

б – циркуляции газовой смеси в поперечном сечении;

- 1 – эжектор; 2 – теплообменник-испаритель; 3 – панели ложного потолка;
 4 – ГП; 5 – теплоизолированный кузов; 6 – машинное отделение;
 7 – газозаборная шахта; 8 – напольные решетки; 9 – боковые вертикальные каналы; 10 – штабель груза

В качестве охлаждающего агента в азотной системе охлаждения (АСО) газа применяется сжиженный азот (ГОСТ 9293-74), полученный из атмосферного воздуха способом глубинного охлаждения. Принцип охлаждения газа в вагоне основан на испарении жидкого азота, подаваемого в ГП, и нагреве этого газа от температуры испарения ($-196\text{ }^{\circ}\text{C}$) до температуры, установленной в соответствии с режимом перевозки груза. С целью обеспечения равномерного распределения температуры газа в грузовом помещении в АСО предусмотрено специальное устройство (высоконапорный эжектор), которое смешивает испарившийся азот с циркулирующим в вагоне газом (воздухом).

Принцип охлаждения груза основан на испарении жидкого азота, подаваемого в ГП вагона, и нагреве газа от температуры испарения жидкого азота до температуры, установленной в соответствии с режимом перевозки груза.

Управление работой системы АСО осуществляется с помощью приборов пневмоавтоматики по сигналам двух манометрических регуляторов температуры

РТПШ, датчики которых установлены на торцевой перегородке в грузовом помещении вагона. Сами приборы с информационной частью расположены на панели арматурного шкафа в машинных отделениях.

Оборудование АСО обеспечивает:

- хранение жидкого азота и регулируемую подачу его в ГП;
- охлаждение газа, циркулирующего в грузовом помещении вагона при охлаждении и термостатировании (поддержании температурных режимов) груза;
- напор (перепад давлений), обеспечивающий циркуляцию газа в грузовом помещении вагона;
- подачу газообразного азота, используемого в системе пневмоавтоматики;
- блокировку подачи жидкого азота при открытых дверях ГП вагона. Более подробно техническое устройство таких вагонов представлено в работе [130].

При подаче жидкого азота и его испарении объем азота будет увеличиваться более чем в 400 раз, что приведет к увеличению давления азотовоздушной смеси в грузовом помещении. Для ограничения давления и вывода отработавшей азотовоздушной смеси из ГП в окна перегородок устанавливаются два клапана газосброса.

Ввиду достаточной сложности и громоздкости эжекторной системы распределения проходила апробацию и коллекторная СРЦ, в которой распыление азота происходило через форсунки, а отличительной особенностью являлось то, что длина подводящего трубопровода к каждой распылительной форсунке по всей длине ГП была одинакова. Эта конструкция обеспечивала одинаковый расход азота с одинаковыми термодинамическими параметрами через каждую форсунку, расположенную в любой части ГП помещения [49, 55, 62, 71, 111, 117, 207, 209, 210].

Коллектор изготовлен из медных трубок диаметром 15 мм с толщиной стенки 2,5 мм и снабжен 32 фторопластовыми форсунками, равномерно расположенными по длине ГП (примерно через 1 м). Схема распределительного коллектора представлена на рисунке 3.7. Каждая форсунка имеет три отверстия диаметром 1,5 мм, причем оси двух отверстий расположены радиально, для

обеспечения более широкого факела распыливания азота, а одно отверстие выполнено строго по оси форсунки. При этих размерах каждая форсунка имеет ширину факела раскрытия струи около 1,4 м длины ГП.

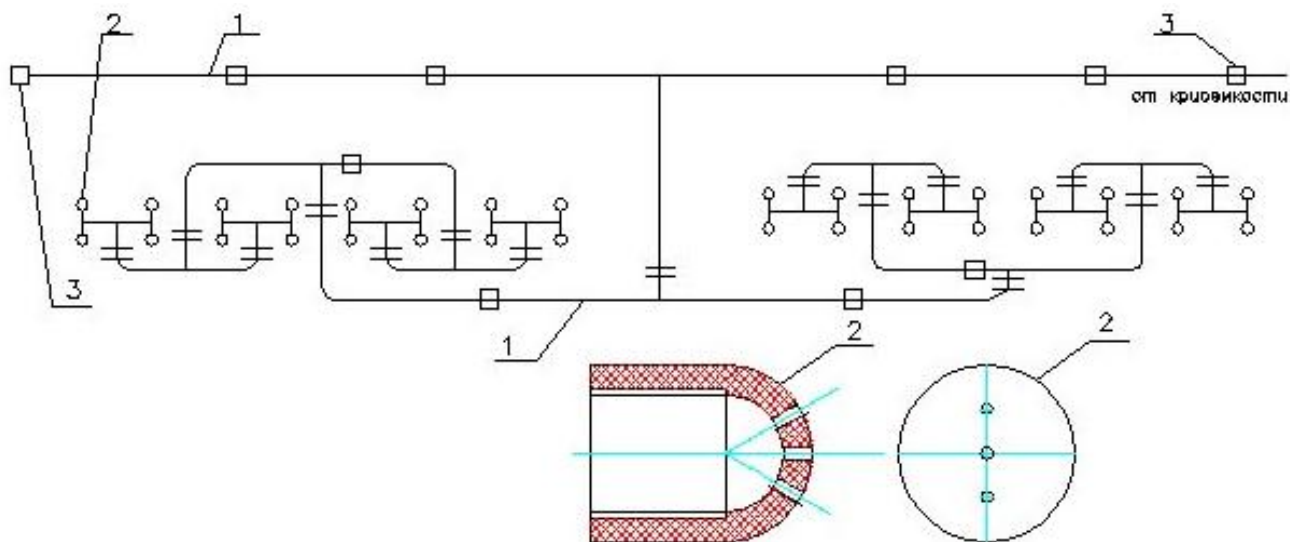


Рисунок 3.7 – Устройство распределительного коллектора и форсунок:

- 1 – соединительные трубопроводы; 2 – форсунка распылительная;
3 – штуцер соединительный

Дальнейшие исследования показали, что с учетом шага размещения форсунок через 1 м струи боковых отверстий соседних форсунок будут перекрываться на 20 см длины ГП, что предупреждает появление застойных зон в грузовом помещении. При повороте потока и опускании в пристенный циркуляционный канал скорость газообразного хладагента падает и на выходе из него в зоне напольных решеток он имеет меньшую скорость и более плавный профиль скоростей. Отопленная азотовоздушная смесь, поднимается через штабель груза и попадает в заборное окно ложного потолка под действием гравитационных сил и инжекции за счет работы форсунок распылительного коллектора. Система распределения и циркуляции газовой смеси с коллектором представлена на рисунке 3.8.

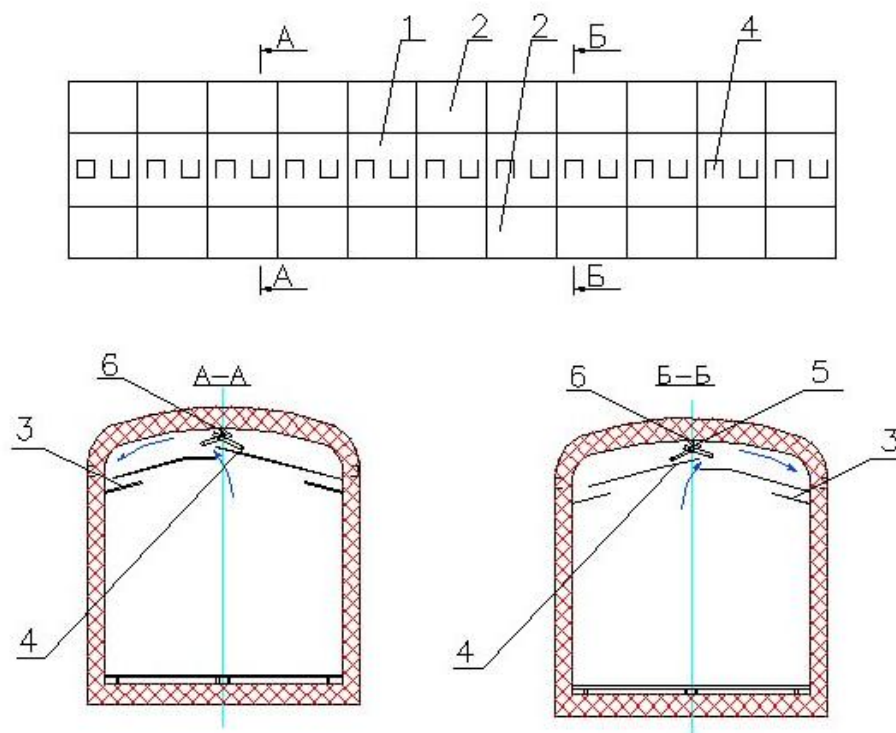


Рисунок 3.8 – Система распределения и циркуляции газозвушной смеси с коллектором:

- 1 – центральный поддон ложного потолка; 2 – боковые панели ложного потолка;
 3 – регулировочные козырьки; 4 – газозаборные окна ложного потолка;
 5 – распылительный коллектор; 6 – подающий трубопровод

Для определения экономической целесообразности использования АЖВ при перевозках СПГ была выпущена опытная партия, которая проходила опытную эксплуатацию на сети дорог. В процессе выполнения работ были осуществлены опытные перевозки яблок летних и зимних сортов созревания, капусты, сливы, томатов, перца сладкого, копченых колбас. На основании анализа результатов этих перевозок можно сделать следующие основные выводы:

– изотермические вагоны с жидкоазотной системой охлаждения более просты по устройству, надежны в эксплуатации, обеспечивают высокое качество перевозимых продуктов, в том числе плодоовощей и фруктов потребительской степени зрелости в удаленные районы Крайнего Севера и Дальнего Востока страны;

– перевозка плодоовощной продукции и колбас в среде, обогащенной азотом, уменьшает потери от порчи, усушки, сохраняет более высокие товарные и потребительские качества;

– температурный режим перевозки плодоовощей в изотермических вагонах с жидкоазотным охлаждением, а также и в рефрижераторных вагонах с инертной средой можно повысить до $+8...+10$ °С без снижения товарных потребительских качеств плодов, что позволяет существенно снизить расход азота.

Расход жидкого азота на захолаживание свежей плодоовощной продукции составляет около 4 т на вагон, величина расхода хладагента на поддержание температурного режима в грузовом помещении лежит в пределах 300–500 кг в сутки. Поэтому необходимость размещения в вагоне значительного количества азота уменьшает грузоподъемность вагона на 5–6 т, по сравнению с традиционными рефрижераторными вагонами, имеющими паровую компрессионную машину [117].

Расчетный график расхода жидкого азота при перевозках замороженных грузов представлен на рисунке 3.9.

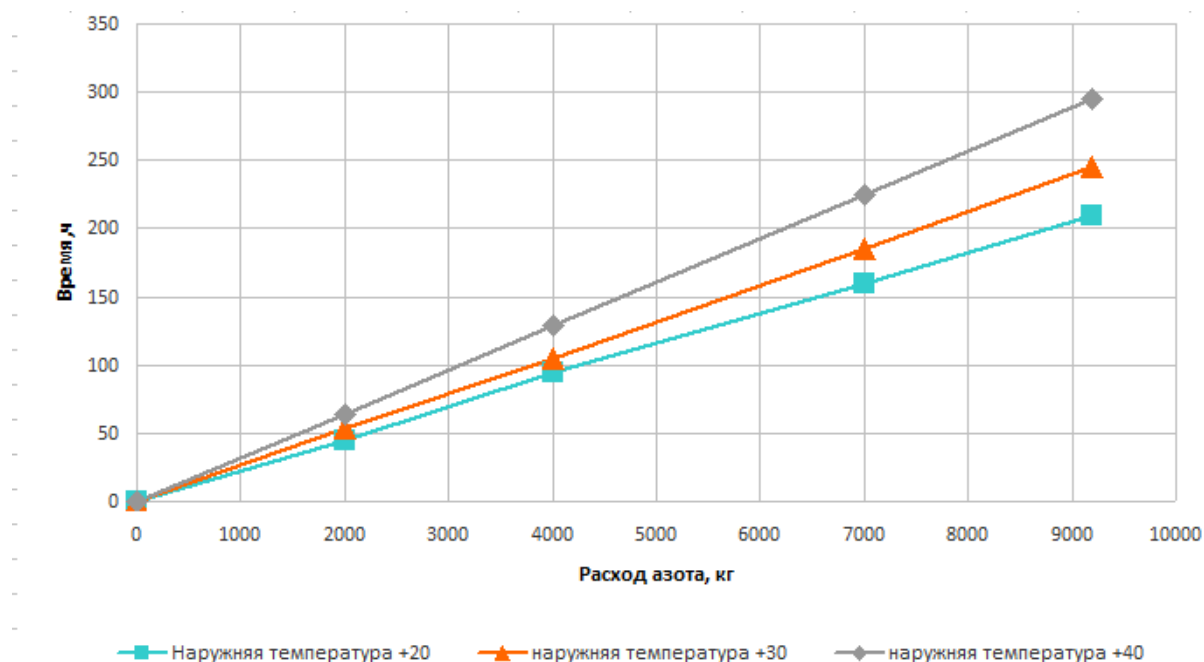


Рисунок 3.9 – Расчетный график расхода жидкого азота при перевозках замороженных грузов [78].

Хотя результаты опытных перевозок подтвердили положительный эффект и лучшую сохранность перевозимых СПГ, особенно явно это проявлялось при перевозках плодоовощной продукции, но экономические и политические события в 90-е годы прошлого века привели к повышению цен на электроэнергию и, как следствие, на жидкий азот, что сделало АЖВ неконкурентоспособными на транспортном рынке. Анализ графика с расходом жидкого азота за время перевозки позволяет определить, какие бортовые запасы хладагента должны быть израсходованы за расчетный период времени.

В развитие этого направления АО «Линде Газ Рус» представило в ОАО «РЖД» предложения о возможности нового этапа развития сервисной и экипировочной инфраструктуры при эксплуатации автономных вагонов с жидкоазотным охлаждением уже на новой технической базе. Использование инновационной технологии криогенных резервуаров позволит улучшить технико-экономические параметры вагона, такие как грузоподъемность и полезный объем.

В настоящее время рассматриваются проекты модернизации вагонов-термосов, в которых можно будет осуществлять дополнительное охлаждение груза в грузовом помещении вагона за счет подачи жидкого азота.

3.3.3. Модернизация вагонов-термосов для расширения их функциональных возможностей

В парке ИПС имеются вагоны-термосы типа ТН4-201 производства Германии. Эти вагоны предназначены для транспортировки термически подготовленных грузов, рыбных продуктов и кондитерских изделий. В последнее время ряд транспортных компаний, имеющих парк собственных вагонов-термосов с теплоизоляцией кузова «сэндвич», проявляют интерес к транспортировке замороженной продукции на дальние расстояния. Существующие Правила перевозок ограничивают срок доставки таких продуктов в летний период восемью сутками, в зимний период 17 сутками. Действующие в настоящее время правила исчисления сроков доставки не позволяют

осуществлять перевозки по этому маршруту даже в зимнее время. Для сохранения качества перевозимой продукции требуется поддержание температурного режима холодильной машиной либо понижение температуры груза до нижнего допустимого предела замораживанием в стационарных холодильниках. Первый вариант неприемлем по причине отсутствия в этом вагоне холодильной установки, а второй связан со значительными материальными издержками из-за погрузочно-выгрузочных работ и большим временем охлаждения в стационарных холодильниках. Однако отсутствие мощных станций по захолаживанию груза существенно ограничивает полигон и период использования вагона. Одним из главных условий, делающих эту технологию целесообразной, является высокая скорость захолаживания груза без выгрузки его из вагона. Это возможно реализовать при использовании охлаждения сжиженными газами. Например, при использовании жидкого азота в качестве хладагента появляется возможность снизить температуру груза за короткое время до нижнего допустимого предела и после этого продолжить транспортировку без дополнительного охлаждения и перегрузки вагона [64]. Программа работ по данной тематике должна предусматривать:

- организацию промежуточных пунктов захолаживания груза от стационарных криогенных хранилищ жидкого азота;
- дооснащение партии вагонов дополнительными устройствами подачи и распределения азота и дистанционными манометрическими термометрами;
- организацию опытных перевозок по маршруту Владивосток – Москва с целью накопления статистических данных по изменению температуры груза в процессе транспортировки и при захолаживании.

Для расширения полигона использования и повышения сохранности перевозимых СПГ в переходные периоды за счет дополнительного охлаждения груза в вагоне было предложено оснастить вагоны-термосы распределительным коллектором и системой газосброса.

Разработанные специалистами РГУПС материалы по совершенствованию конструкции системы захолаживания использованы ПКБ ЦВ, которое на

основании договора с РГУПС № 02Р/Р от 19.12.88 г. разработало конструкторскую документацию на размещение элементов этой системы в вагоне-термосе 1988 г. выпуска (М15.01.00.00.000 ПВ), которое представлено на рисунке 3.10 [45, 55, 210, 211].

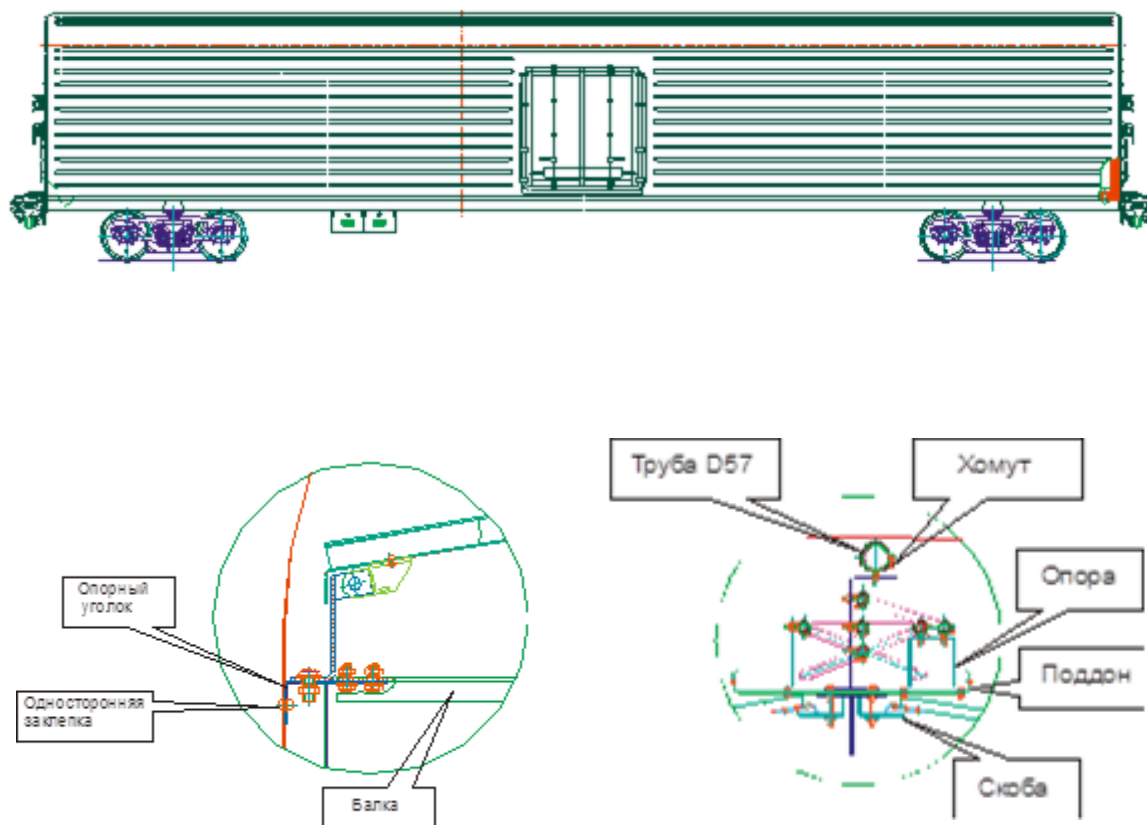


Рисунок 3.10 – Вагон-термос с азотной системой захлаживания

Распределительный коллектор жидкого азота представляет собой систему каскада труб диаметром 18 мм, размещаемых по центру ГП вагона под потолком. Вдоль продольной оси, по центру ГП под верхней обшивкой потолка располагается труба диаметром 57 мм с отверстиями для сбора отработанной азотовоздушной смеси, которая выведена через сливное отверстие пола под вагон.

Ввод трубопроводов подачи жидкого азота производится через круглое сливное отверстие пола. Там же установлен предохранительный клапан, обеспечивающий сброс азотовоздушной смеси при повышении давления в грузовом помещении вагона.

Запорный вентиль трубопровода подачи азота размещен на раме вагона. Внутри вагона жидкий азот подается к коллектору по трубопроводу, проложенному между щитом торцевой стены и торцевой стеной вагона и присоединенному к середине распределительного коллектора.

Во избежание попадания конденсата на перевозимый груз, а также для организации циркуляции хладагента распределительный коллектор закрыт поддонами, которые являются элементами системы распределения и циркуляции газовой смеси.

Центральный поддон расположен по центру вагона под коллектором. Вдоль продольных стен вагона установлены панели поддона, с которых конденсат, стекающий с центрального поддона, будет отводиться на пол вагона к сливным отверстиям. Эти панели выполнены подвижными, что обеспечивает допуск обслуживающего персонала к форсункам и элементам соединения трубопроводов коллектора.

Для крепления поддонов и коллектора поперек вагона с шагом 2,0 м устанавливаются балки, которые с помощью переходных угольников крепятся к обшивочным листам стен. Крепление переходных угольников производится односторонними заклепками. На эти балки крепятся опоры, к которым с помощью скоб, угольников и других элементов крепятся поддоны и коллектор. Предложенная система крепления элементов охлаждения не нарушает целостности конструкции вагона-термоса и может быть легко демонтирована из вагона.

Реализация этих работ позволит расширить функциональные возможности вагонов-термосов, привлечь дополнительные объемы перевозимых замороженных грузов без потери качества и значительно расширить номенклатуру СПГ при перевозках в летний и переходный периоды года.

Технология эксплуатации таких модернизированных вагонов следующая.

1. При перевозках замороженных грузов на значительные расстояния, когда срок транспортировки не позволяет использовать вагон-термос на выбранном маршруте для данного вида замороженного груза, определяется в соответствии с действующими правилами граничное допустимое расстояние перевозки.

2. На границе этого участка оборудуется стационарный пункт для захлаживания груза в вагоне за счет подачи в его грузовое помещение жидкого азота. Для этого на сортировочной станции, в непосредственной близости от специальных путей, устанавливаются транспортные криогенные резервуары. В общем виде эта операция подобна экипировке льдом на льдозаводах и льдопунктах вагонов-ледников, эксплуатировавшихся до 1980-х годов.

3. Вагон-термос, требующий захлаживания, после роспуска с сортировочной горки подается на специальный путь, где через соединительные фланцы к патрубкам распределительного коллектора через криогенные шланги подключается к стационарной криогенной цистерне.

4. Криогенная цистерна приводится в рабочее положение «Выдача азота», и по штатным приборам вагона контролируется температура и давление в грузовом помещении. При этом особое внимание следует уделять визуальному контролю выхода отработанных паров азота из ГП через специальные выпуски.

5. Расход жидкого азота определяется в зависимости от теплофизических характеристик и вида перевозимого замороженного груза, температуры наружного воздуха и температуры груза внутри верхнего ряда штабеля.

6. После достижения требуемых параметров температуры подача жидкого азота из сторонней криогенной емкости прекращается и криошланги отключаются. Заправочный штуцер и патрубок сброса избыточного давления заглушаются специальными пробками. После этого вагон готов к дальнейшей транспортировке.

3.4. Автономный рефрижераторный вагон

Снабжение продуктами питания небольших населенных пунктов и вывоз СПГ с мелких предприятий пищевой промышленности и сельского хозяйства вызывают необходимость иметь в парке ИПС не только групповой РПС, но и автономные вагоны. Они поставлялись из Германии с 1967 года.

АРВ были оборудованы стояночным тормозом и пролётной электромагистралью для электропневматического тормоза, что позволяло

эксплуатировать их в пассажирских поездах. Разновидностью АРВ были АРВ со служебным помещением (АРВ-Э). Серийная поставка таких вагонов началась в 1963 г. для перевозки дорогостоящих СПГ (например, эндокринного сырья), требующих поддержания температуры в грузовом помещении от +14 до –18 °С при температуре наружного воздуха от –45 до +40 °С.

Многочисленные исследования конъюнктуры рынка транспортных услуг и сложившаяся структура перевозок СПГ требуют наличия в парке ИПС 70–80 % одиночных вагонов той или иной конструкции. Оставшиеся 20–30 % могут составлять групповой РПС – секции с различным количеством рефрижераторных вагонов. АРВ с индивидуальным энергоснабжением не эксплуатируются и списаны уже более 20 лет назад, однако в США именно этот тип РПС имеет приоритет для перевозок СПГ.

Сейчас возникла ситуация, когда отсутствие одиночных АРВ и ограниченность применения вагонов-термосов привели к необходимости создания новых типов автономного ИПС. В работах [38, 39, 48, 50, 57] автором ранее были сформулированы задачи и предложения по их реализации.

3.4.1. Основные принципы конструирования АРВ

В новых одиночных ИВ должны быть реализованы следующие основные принципы конструирования подвижного состава:

1) разработка комплекса автономного энергоснабжения на основе современного технологического оборудования и комплектующих изделий, новейших достижений в смежных областях техники (силовой электронике, электротехнике, холодильном машиностроении);

2) унификация составляющих элементов и узлов и реализация принципа переменной комплектации на основе одной базовой модели – теплоизолированного кузова;

3) наличие системы самодиагностики и использования микропроцессорной техники для оптимизации энергопотребления и регулирования холодопроизводительности холодильной установки.

Вновь проектируемый энергооснащенный ИПС нового поколения должен создаваться исходя из тенденции малообслуживаемого вагона с минимальными эксплуатационными затратами и безлюдными технологиями. Для энергоснабжения своих новых рефрижераторных вагонов ОАО «БМЗ-Вагон» предлагает использование ДГА с воздушным охлаждением различной мощности. Однако продолжительность и скорость движения вагонов в груженом рейсе могут варьироваться в широких пределах, и решающим фактором станет моторесурс двигателя.

В настоящее время скорости грузовых поездов составляют 600–900 км в сутки, что позволяет поставить вопрос об использовании во время движения подвагонного генератора. В настоящее время на различных типах вагонов используются различные типы электрических машин (генераторы, электродвигатели) постоянного и переменного тока, причем последние находят все более широкое применение и в установках кондиционирования воздуха УКВ современных пассажирских вагонов. Основу такой системы составляют подвагонный генератор с редукторно-карданным приводом от средней части оси колесной пары и аккумуляторная батарея. Питание асинхронных электродвигателей УКВ осуществляется через статический преобразователь и инвертор, которые преобразуют постоянный ток 110 В в постоянный ток напряжением 530 В, а затем в переменный ток напряжением 380 В. При этом преобразователь имеет три канала управления электродвигателями компрессора, вентиляторов конденсаторов и воздухоохладителя с регулируемой частотой (от 20 до 70 Гц).

Такая схема позволяет частично устранить недостатки, принадлежащие системам электроснабжения вагонов предыдущих моделей:

– нерациональное распределение энергии, связанное с отсутствием единого устройства управления всеми потребителями;

– высокие пиковые нагрузки на электрооборудование, связанные как с одновременным включением мощных электрообогревателей, так и со спецификой работы климатического оборудования;

– избыточную установленную мощность электродвигателей для приводов компрессора, вентиляторов воздухоохладителя и конденсатора. Современное развитие техники и промышленности позволяет реализовать эту концепцию при условии использования в качестве источника энергоснабжения подвагонного генератора.

Предлагаемые технические решения в комплексе автономного энергоснабжения с использованием новых типов подвагонных генераторов позволяют разработать три типа автономного одиночного ИПС:

- отапливаемый изотермический вагон;
- вентилируемый изотермический вагон;
- автономный рефрижераторный вагон.

Российские железные дороги на примере АРВ (производства Германии) уже имеют значительный опыт эксплуатации специализированного автономного одиночного подвижного состава, эксплуатируемого с минимальным участием обслуживающего персонала. В этом случае достаточно сложная конструкция АРВ (дизель-генератор, холодильная машина) требовала контроля через 12–24 ч, что вызвало необходимость размещения пунктов технического обслуживания через 150–200 км на всем протяжении маршрута. Учитывая, что конструкция ИВ с энергоснабжением от подвагонного генератора значительно проще, чем силовая установка на базе двигателя внутреннего сгорания, а значит, и надежнее, то необходимость в столь частом техническом обслуживании отпадает. Опыт эксплуатации подвагонных генераторов пассажирских вагонов показывает, что контроль состояния подвагонного генератора осуществляется лишь в пунктах приписки и оборота, а на промежуточных станциях достаточно осмотра ходовых частей тележки КВЗ-И2, используемой в рефрижераторных вагонах, в рамках существующей технологии обслуживания в инструкции по осмотру вагонов ЦВ-ЦЛ-408.

С учетом того, что более 30 % перевозок СПГ составляют грузы, требующие охлаждения (мясо, рыба и т. д.), то одним из основных типов одиночного РПС может стать АРВ с энергоснабжением от подвагонного вентильно-индукторного генератора. Преимуществом вагона указанного типа будет отсутствие дизель-генераторной установки, которая требует частого технического обслуживания и экипировки, что сопряжено с необходимостью подачи вагона на специальные пути и значительной потерей времени.

Автономный вагон нового поколения должен воплотить в себя все перспективные новейшие технологии вагоностроения (теплоизоляция «сэндвич»), электротехники и электроники (вентильно-индукторные двигатели с регулируемой частотой вращения и генераторы) и холодильного машиностроения (спиральные компрессоры, эвтектические плиты, экологически чистые хладагенты) [37, 39, 51, 250].

Система энергоснабжения этого типа вагонов может быть выполнена по двум возможным вариантам.

Первый – использование серийно выпускаемых подвагонных генераторов мощностью более 20 кВт в комплексе со статическим преобразователем напряжения и частоты.

Специфика работы транспортных холодильных машин РПС заключается в неравномерной тепловой нагрузке, вызванной необходимостью работы холодильной машины в форсированном режиме для быстрого охлаждения ГП. Поэтому все проблемы, имеющиеся в работе энергетического и климатического оборудования, в случае применения этих технических решений для АРВ примут еще более острый характер.

Для решения этих задач предлагается в качестве основы автономной системы электрооборудования АРВ использовать высокоэффективные вентильно-индукторные подвагонные генераторы с высоким КПД, которые выполняются с максимальным использованием корпусных деталей и стыковочных узлов существующих генераторов.

Разрабатываемый типоразмерный ряд вентиляльно-индукторных электродвигателей позволяет на их основе унифицировать систему электрооборудования и осуществлять сопряжение отдельных блоков и узлов относительно простыми средствами, поскольку источником электроэнергии в этом случае служит также вентиляльно-индукторный генератор. Такой подход к формированию системы электрооборудования исключает из конструкции сложные, дорогостоящие и пока еще недостаточно надежные статические преобразователи.

Решающим фактором использования вентиляльно-индукторных двигателей (ВИД) является их способность работать в широком диапазоне напряжения питания без снижения своей производительности, а также в широком диапазоне скоростей вращения при сохранении высокого значения КПД. Поскольку эти приводы питаются импульсами постоянного тока, то при изменении частоты их чередования можно обеспечить регулирование скорости вращения, а значит, и производительности компрессора и вентиляторов

Это позволит обеспечить форсированный режим работы холодильной машины при охлаждении свежей плодоовощной продукции в грузовом помещении АРВ и экономичное энергопотребление при режиме термостатирования.

Использование в комплексе на АРВ вентиляльно-индукторных двигателей и подвагонного генератора позволит существенно упростить систему энергоснабжения вагона в целом. Тем более что в РГУПС уже разработаны три типоразмера ВИД, необходимых для использования в паровой компрессионной холодильной машине (электродвигатели компрессора, вентиляторов конденсатора и испарителя), а также две модификации подвагонного генератора. Более подробно этот вопрос рассмотрен в п. 5.2.

Принципиальная компоновочная схема такого АРВ, представленная на рисунке 3.11, включает в себя следующие подсистемы:

- вентиляльно-индукторный подвагонный генератор (ВИГ);

- холодильная машина (ХМ) с компрессорами с вентиляльно-индукторными приводами;
- аккумуляторы холода – эвтектические плиты;
- микропроцессорный контроллер, управляющий работой ВИГ и ХМ.

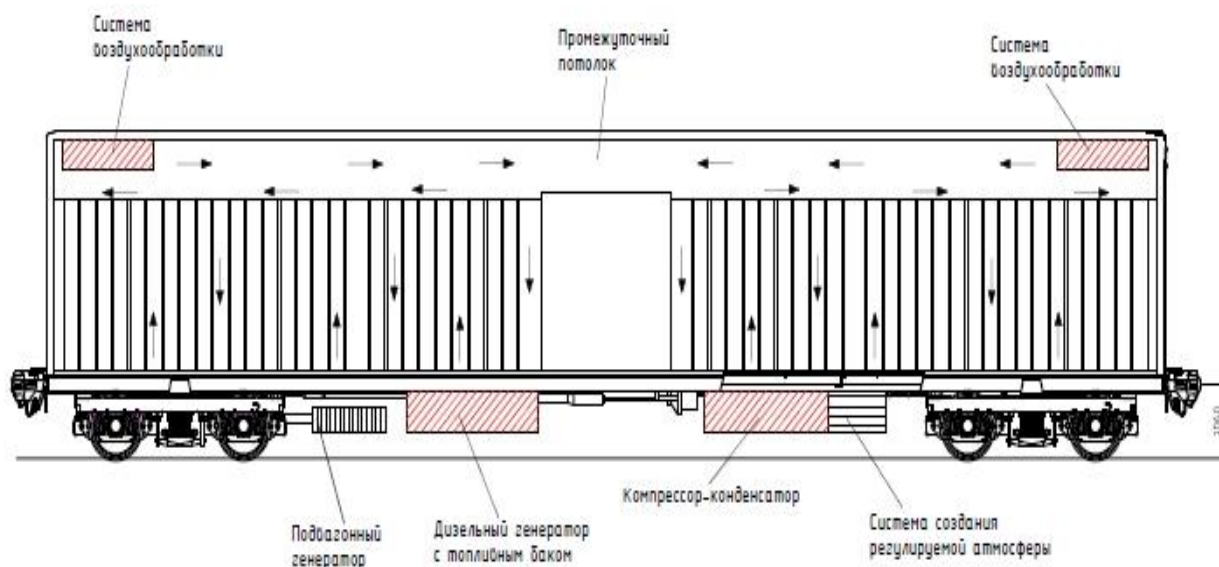


Рисунок 3.11 – Компоновочная схема автономного рефрижераторного вагона

Современные конструкции вагонов предусматривают изготовление вагона из специальных панелей типа «сэндвич», что дает возможность получить существенное снижение веса тары и при этом увеличить полезный объем ГП. Кузова вагонов конструкции типа «сэндвич» имеют более стабильные теплоизоляционные свойства и не требуют ремонта изоляции и внутренних поверхностей обеих обшивок, так как основные элементы ограждения кузова представляют собой монолитные долговечные конструкции [128, 129, 130].

Кузов четырехосного вагона монтируют из предварительно заготовленных отдельных элементов: рамы с полом, машинных отделений, дверных каркасов, крыши и боковых стен. Рама вагона – сварная из стали повышенной прочности.

Боковые и торцевые стены, двери ГП выполнены с наполнителем из пенистого полиуретана. Заполнитель пола состоит из пенистого поливинилхлорида с опорным каркасом из пластика.

Пол, изготовленный в виде отдельного элемента, соединяется с рамой, причем это соединение обеспечивает передачу всех усилий, возникающих при работе вагона. Верхний слой пола сделан из высококачественной фанеры, а нижний – из полиэфирной смолы, армированной стекловолокном. Прочность такого пола допускает использование в вагоне автопогрузчика.

Для повышения прочности пола применяется пенистый полиуретан повышенной плотности (около 100 кг/м^3), а между нижним слоем из полиэфирной смолы и верхним слоем из фанеры устанавливаются дополнительно специальные элементы жесткости.

Наружная обшивка боковых стен вагона изготовлена из стального листа толщиной 1 мм с горизонтальными гофрами, на внутреннюю сторону которого наносится антикоррозийное покрытие. Внутренняя обшивка из анодированного алюминиевого листа толщиной 1 мм имеет вертикальные гофры. Соединяются эти обшивки между собой слоем пенистого пенополиуретана, вспененного под давлением, что придает стенам требуемую прочность. Стенки воздушной шахты и ложный потолок также изготавливают из алюминиевых листов.

Наружная окраска кузова и крыши, а также внутренняя в машинном отделении надежно защищают вагон от коррозии в течение 10 лет. Внутренние стены кузова окрашивают полиуретановой грунтовкой и черным лаком на основе каменноугольной эпоксидной смолы.

Пенистый полиуретан, применяемый для изготовления панелей «сэндвич», имеет коэффициент теплопроводности не выше $0,024 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$ и объемный вес 50 кг/м^3 . Полиуретан не выделяет веществ, отрицательно влияющих на перевозимые скоропортящиеся грузы, и имеет лучшие (по сравнению с пенистым полистиролом) противопожарные свойства.

Вагоны, кузов которых изготовлен по технологии «сэндвич», а также и отдельные элементы панели успешно прошли комплекс статических и динамических испытаний и по своей прочности удовлетворяют нормам проектирования. Вагоны-термосы модели ТНЧ-201, поставленные Германией более 10 лет назад, хорошо зарекомендовали себя в условиях жесткой

эксплуатации на сети железных дорог и являются пока непревзойденным образцом ИПС [218].

Дальнейшее совершенствование кузовов рефрижераторных вагонов может быть осуществлено за счет применения полимерных материалов и уменьшения количества металлических конструкций. Так, принципиально возможно в панелях «сэндвич», применяемых для изготовления отдельных элементов кузова, заменить наружную стальную и внутреннюю алюминиевую обшивку стеклопластиковыми листами, изготовленными из полиэфирных смол и стеклотканей. При таком сочетании в кузове вагона практически полностью исключаются металлоконструкции, в результате чего отпадает необходимость в его защите от коррозии и окраске.

Холодильная машина АРВ имеет две гидравлические линии хладагента – одна для циркуляции хладагента и испарения его в воздухоохладителе, а другая проходит через эвтектические плиты, где происходит отбор тепла и аккумуляция холода. Контроллер с термостатом управляет ее работой следующим образом. При температуре в грузовом помещении выше температуры уставки хладагент испаряется в воздухоохладителе и охлаждает воздух ГП. При достижении температуры уставки поток хладагента переключается на циркуляцию через эвтектические плиты. Холод испарившегося хладагента «аккумулируется» эвтектическим раствором. При этом контроллер следит за температурой в грузовом помещении, чтобы не допустить переохлаждения воздуха в грузовом помещении. При приближении температуры к температуре уставки контроллер снижает до минимума число оборотов компрессора, однако ХМ не останавливается, что сводит к минимуму количество запусков компрессора – самого энергонапряженного периода работы холодильной машины [51].

Сразу после загрузки АРВ холодильная машина работает в форсированном режиме от стороннего источника энергии. При этом груз охлаждается и происходит накопление холода в эвтектических плитах. При движении АРВ со скоростью более 25 км/ч ВИГ начинает вырабатывать энергию, необходимую для

питания ХМ, которая в начальный период времени работает с максимальной нагрузкой.

Таким образом, предлагаемая схема позволяет

- организовать работу ХМ в щадящем и экономически более выгодном режиме;
- повысить точность поддержания температур в грузовом помещении;
- снизить установленную электрическую мощность приводов ХМ;
- обеспечить поддержание температурного режима при неработающей ХМ, хотя и в ограниченный период времени.

При традиционном подходе к вопросам энергосбережения в холодильной промышленности целесообразность применения аккумуляторов холода обусловлена наличием выраженного теплопритока, превышающего среднесуточный на 40–50 %, при его продолжительности не более 4 часов.

Аккумуляирование холода осуществляется путем понижения температуры определенного объема жидкого хладоносителя на 6–10 К в эвтектических плитах, либо намораживанием слоя льда на охлаждающих поверхностях. Специфика эксплуатации АРВ с энергоснабжением от подвагонного генератора заключается в возможности обеспечения холодоснабжения только во время движения вагона, а универсальность его функционального назначения для перевозок широкой номенклатуры СПГ делает нецелесообразным применение аккумуляторов холода, использующих теплоту фазового перехода «вода – лед». С учетом опыта эксплуатации авторефрижераторов представляется целесообразным остановить выбор на эвтектических плитах или панелях. Особенностью их конструкции является наличие емкости, заполненной жидким эвтектическим раствором, внутри которой по трубопроводам происходит циркуляция хладагента. Большая величина теплопритоков кузова вагона и ограниченный свободный объем ГП не позволяют разместить в вагоне аккумуляторы холода, полностью компенсирующие теплопритоки при отстое вагона на сортировочных станциях. Однако в сочетании с холодом, аккумулятированным штабелем перевозимого груза,

они позволяют снизить темп повышения температуры в грузовом помещении и грузе, а также уменьшить риск его порчи [40].

В нашем случае аккумуляционная система представляет собой эвтектические плиты и компрессорно-конденсаторный агрегат, находящийся в машинном помещении вагона. Эвтектические плиты расположены внутри воздуховода и закреплены при помощи кронштейнов на внутренней поверхности крыши. При достижении необходимой температуры соленоидные вентили перекрывают поступление жидкого хладагента в испарители. В то же время вентили, установленные на жидкостной магистрали перед эвтектическими плитами, открываются, и хладагент начинает поступать по трубопроводам внутри плит, отдавая холод солевому раствору. Такой алгоритм работы имеет свои неоспоримые преимущества:

- позволяет вагону достаточно продолжительное время находиться без понижения температуры в грузовом помещении;

- сокращается количество запусков и остановок компрессоров, тем самым увеличиваются ресурс и срок службы холодильной машины и повышается ее надежность.

Мировой опыт создания и эксплуатации рефрижераторного транспорта: судов, трейлеров, вагонов – свидетельствует о желании использовать в их конструкции информационные технологии. Последние позволяют отслеживать продвижение вагона и контролировать режимы работы оборудования, расход топлива, режим загрузки вагона – порожний либо груженный, проводить диагностику, включать или выключать холодильную установку.

Эти системы состоят из отдельных блоков, которые наилучшим образом подходят для решения поставленной задачи. Все узлы и подсистемы, т. е. регуляторы, контроллеры и устройства сбора информации, объединяются вместе, организуя общую систему обмена данных.

Поскольку одним из достоинств новой концепции РПС является возможность отказа от постоянного присутствия человека, считаем, что данная система должна применяться на современных рефрижераторных вагонах.

Систему дистанционного мониторинга и управления можно собрать из блоков, которые наиболее подходят для решения поставленной задачи, и затем расширять её по мере изменения требований.

С помощью специализированного программного обеспечения, установленного на персональный компьютер, конфигурация узлов и управление ими могут выполняться централизованно. В этом случае анализ динамики изменения данных замеров температуры и давления, проверка предыдущих наблюдений, аварийная сигнализация и дистанционный контроль будут проводиться средствами системы с помощью ПК и программного обеспечения. Возможно управление системой посредством модемной связи (например, при возникновении аварийной ситуации сигнал может передаваться как СМС-сообщение).

Система дистанционного мониторинга и управления состоит из электронных регуляторов, терморегулирующих вентилей с электронным управлением, датчиков температуры и давления, устройства регистрации данных.

Комплект оборудования, установленного на вагоне, позволяет выполнять следующие функции:

- контролировать давление, испарение и конденсацию;
- регулировать температуру внутри ГП;
- менять значение холодопроизводительности установки (от 10 до 100 %) в зависимости от тепловой нагрузки и условий окружающей среды непосредственно в пути следования вагона;
- регистрировать на ленте самопишущего прибора изменения параметров работы холодильной машины (причем несколько видов параметров одновременно);
- формировать пакет сообщений со всеми необходимыми данными, периодически отправляя его через ретранслятор оператора спутниковой связи к ответственному за груз лицу.

Электронная система управления должна быть адаптирована к системам связи, используемым РЖД, и дублировать сообщения о состоянии системы

холодоснабжения, передавая его в Главный вычислительный центр РЖД, вычислительный центр дороги, на которой находится вагон, и непосредственно на пульт управления диспетчерского центра организации оператора – владельца подвижного состава.

Информация о возникновении аварийной ситуации может передаваться непосредственно в виде СМС-сообщения на сотовые телефоны лицам, ответственным за эксплуатацию ИВ, для принятия решения и осуществления технических и организационных мероприятий по ликвидации последствий аварии.

Лишь благодаря наличию такой системы дистанционного мониторинга и управления становится возможной реализация безлюдных технологий обслуживания автономного РПС и намечаются пути к созданию «интеллектуального» транспортного средства, в котором оптимизированы работа систем энерго- и холодоснабжения.

3.4.2. Возможности комплектования базовой модели АРВ системами энерго- и холодоснабжения

Возможная комплектность функциональных систем (опции) для вариантов АРВ на базе единого изотермического кузова с возможностью реализации переменной комплектации под конкретные требования заказчика может быть представлена следующим образом .

1. Ходовые части:

– тележка для вагона-термоса типа 18-100 или другая, аналогичная трехэлементная;

– грузопассажирская – с улучшенными динамическими характеристиками и скоростями до 140 км/ч – для рефрижераторного вагона (КВЗ-И2 или 18-9834);

– с подвагонным генератором – возможна модернизация по первому и второму вариантам.

2. Энергетическая установка:

– дизель-генератор с двумя видами моторного топлива – дизельным или сжиженным природным газом метаном (СПГМ). СПГМ – источник топлива, который нельзя слить, и кроме этого при газификации можно получить дополнительное количество холода за счет размещения теплообменника в грузовом помещении;

– подвагонный генератор.

3. Система термостабилизации ГП:

3.1. ХНУ:

3.1.1. по месту расположению и количеству:

– с односторонним расположением;

– с двумя агрегатами по торцам кузова;

– с тандемом компрессоров и двумя воздухоохладителями по торцам кузова, по аналогии со станцией централизованного холодоснабжения, рассмотренной в 56];

3.1.2. по холодопроизводительности:

– для поддержания температурного режима (малой мощности);

– для обеспечения захолаживания (большой мощности);

3.1.3. с эвтектическими плитами для аккумуляции холода.

3.2. Кабельная система обогрева, встроенная в ограждающие конструкции кузова.

3.3. Встроенная система ввода и распределения жидкого азота для захолаживания от стационарной сторонней криогенной цистерны.

4. Система вентиляции:

– с ручным приводом,

– с автоматическим приводом.

5. Внутреннее устройство ГП.

Гофры и напольные решетки (вес решеток у БМЗ 1404 кг!!!) как элемент системы воздухораспределения с возможностью монтажа и демонтажа при погрузке:

- съемные вертикальные гофры как элемент системы воздухораспределения термообработанного воздуха,
- складывающийся тканевый воздуховод (до середины и до конца ГП) или интегрированный в крышу;
- воздушный канал в виде ложного потолка, являющегося частью конструкции ГП;
- элементы крепления груза (особо актуально для попутного груза – бумаги, полиэтилена в рулонах);
- мобильная перегородка для обеспечения поддержания двух различных температурных режимов в грузовом помещении;
- возможность монтажа в грузовом помещении эвтектических плит как аккумуляторов холода.

6. Установка создания и поддержания РГС на основе полуволоконных мембран – для компаний, занимающихся транспортировкой плодоовощной продукции и бананов.

Предложенные разнообразные технические решения с подсистемами кузова «сэндвич», энергохолодильного оборудования, системы дистанционного мониторинга и управления в конструкции новых типов ИПС смогут удовлетворить потребности различных перевозчиков всех видов СПГ и успешно конкурировать с другими видами транспорта [40, 67].

3.5. Выводы к третьей главе

Определены концептуальные принципы для проектирования современного ИПС с учетом требований к инновационности 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.

Общий алгоритм проектирования ИПС формируется на основе блочно-модульного подхода по набору выполняемых им функций при транспортировке СПГ. Рассмотрена предлагаемая ранее структура типажа ИПС, предлагаемого для экономики переходного периода. Предложена структура железнодорожного рефрижераторного транспорта для перевозки СПГ в рамках стран евроазиатского союза.

Технические решения, предлагаемые к использованию, можно разделить на концептуальные и локальные. Первые определяют основные технико-экономические параметры вагона. Их основу составляет единая модель вагонокомплекта на базе изотермического кузова для вагонов-термосов и рефрижераторных, а их разделение по типам сделать за счет возможности трансформации и оборудовании различными вариантами энергохолодильного оборудования. Ко второй группе следует отнести локальные технические решения, улучшающие потребительские качества и расширяющие сферу их использования:

- тип источника энергоснабжения;
- вид и холодопроизводительность холодильной машины и системы обогрева;
- эффективная конструкция теплоизоляции кузова;
- системы дистанционного мониторинга;
- системы создания специальных параметров перевозок в грузовом помещении.

Окончательное определение оптимальной структуры ИПС (изотермических и рефрижераторных вагонов, КРК и различных технологий и средств их доставки) возможно 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.

4. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ В ГРУЗОВОМ ПОМЕЩЕНИИ ИЗОТЕРМИЧЕСКОГО ВАГОНА

4.1. Методы расчета процессов теплопереноса при термообработке продуктов

Для пищевой и перерабатывающей промышленности вопросы тепло- и массопереноса, связанные с процессами холодильной обработки и длительного хранения мясной, рыбной и растительной продукции, также являются актуальными. Поэтому им посвящено значительное количество теоретических и экспериментальных работ.

В исследованиях М. А. Волкова, В. З. Жадана, Д. Г. Рютова, Г. Б. Чижова, В. Н. Эрлихмана и др. рассмотрены вопросы термообработки, усушки и создания оптимальных условий хранения с точки зрения сохранения качества хранимой продукции и минимизации ее потерь. Для длительного хранения в стационарных хранилищах рассматривается технологический процесс поддержания термовлажностного режима, связанный как с тепловой, так и с влажностной обработкой [35, 97, 194, 216, 217, 219, 220].

Анализ этих работ показывает, что и при физическом (метод аналогий), и при математическом (структурном) моделировании при описании реальных процессов тепло- и массообмена основные сложности возникают не в составлении систем простых дифференциальных или нелинейных алгебраических уравнений, а в учете граничных условий, которые описывают характер нестационарных внешних и внутренних взаимодействий системы «помещение – груз».

Для аналитических расчетов изменения температурных режимов зданий также принимается во внимание ряд допущений, учитывающих нестационарность тепловых процессов.

Использование имитационных моделей позволяет прогнозировать температурные режимы для определения холодопроизводительности

холодильной машины, которая сможет создавать и поддерживать необходимый температурный режим в помещении.

Принципиальные схемы и методики расчетов систем, обеспечивающих подачу и распределение воздуха в локомотивах и пассажирских вагонах, широко представлены в работах [112,180, 181]. Однако они предназначены для создания комфортных условий в кабинах локомотивов и пассажирских салонах. Особенности эксплуатации этих типов подвижного состава являются подача приточного воздуха в обслуживаемую зону и поддержание постоянства его параметров. Цель любой из используемых систем подачи воздуха – обеспечение регулировки направления и скорости притока воздуха для адаптации комфортных условий к индивидуальным особенностям пассажиров или машинистов.

Циркуляция воздуха в грузовом помещении вагона необходима для интенсификации теплообмена в испарителе холодильной машины и в охлаждаемом продукте, а также для выравнивания температурного поля в охлаждаемом объеме. Если скорость циркуляции воздуха недостаточна, то холодопроизводительность испарителя холодильной машины уменьшается, продукт охлаждается с недостаточной скоростью, ускоряется рост плесеней и бактерий в грузе. В случае излишне интенсивной циркуляции воздуха возрастает скорость испарения влаги с поверхности продукта, что приводит к повышенной усушке продукта и увеличению теплоступлений за счет роста коэффициента теплопередачи кузова.

В работах, посвященных исследованию процессов термообработки перевозимых СПГ в ИПС, изучались теплообменные процессы, обусловленные распределением воздуха в грузовом помещении различных типов транспортных рефрижераторов [225, 228]. Значительное число работ касались усовершенствования систем распределения и циркуляции воздуха в грузовом помещении.

Основой для этих теоретических исследований являются положения, разработанные А. Т. Бартошем в работах [11, 12].

Процессы охлаждения и отопления СПГ при перевозках в рефрижераторных вагонах преимущественно имеют нестационарный характер. Многообразие и сложность факторов, характеризующих такие переходные процессы, позволяют говорить лишь о приближенных методах расчетов.

Математическая модель температурного процесса в грузовом помещении рефрижераторного вагона [12,113], представлена в виде уравнения тепломассообмена. В дифференциальной форме это уравнение имеет следующий вид:

$$\sum_{i=1}^n W_i dt_i = (Q_n + Q_6 + Q_b + Q_o) dt_i, \quad (4.1)$$

где Q_n – теплопритоки от наружного воздуха;

Q_6 – биологические выделения плодоовощной продукции;

Q_b – теплопоступления от работающих вентиляторов-циркуляторов;

Q_o – теплоотвод за счёт работы холодильной установки;

W_i – водяной эквивалент системы «груз – воздух – кузов», кДж/к;

t_i – температура соответствующего элемента системы, С.

Автор вводит в расчёты водяной эквивалент системы и приведённый коэффициент её тепловой инерции:

$$W = \sum_{i=1}^n W_i, \quad (4.2)$$

$$\xi = \bar{W}_b + \sum_{i=1}^n \bar{W}_i \left(\frac{dt_i}{dt} \right) = \bar{W}_b + \sum_{i=1}^n \bar{W}_i \xi_i, \quad (4.3)$$

$$\bar{W}_i = \frac{W_i}{W},$$

где W_b – водяной эквивалент,

t – температура воздуха в грузовом помещении вагона.

Принимается, что основными тепловоспринимающими элементами системы являются: груз, теплоизолирующее ограждение кузова вагона W_T и воздух в грузовом помещении W_b . Источники тепловыделений – холодильная установка Q_o , теплообмен с окружающим атмосферным воздухом Q_n (включая

солнечную радиацию), биологическое выделение плодов и овощей Q_6 и тепловыделение ΔQ_B , эквивалентное мощности вентиляторов воздушной циркуляционной системы. Очевидно, что при перевозках в зимний период с отоплением вместо холодопроизводительности в расчёты должна быть введена интенсивность искусственного подвода тепла [12].

$$\xi W \frac{dt}{d\tau} = Q_H + Q_6 + \Delta Q_B - Q_0, \quad (4.4)$$

где $\xi = \overline{W}_B + \xi_{гр} \overline{W}_{гр} + \xi_{т} \overline{W}_{т}$;

$\xi_{гр} = \frac{dt_{гр}}{dt}$; коэффициенты тепловой инерции груза,

$\xi_{т} = \frac{dt_{т}}{dt}$ – коэффициенты тепловой инерции кузова вагона.

Далее автор анализирует и количественно оценивает влияние всех трех составляющих (груз – воздух – кузов) водяного эквивалента на переходные процессы при термообработке. Значения водяных эквивалентов для плодоовощной продукции и замороженных грузов представлены в таблице 4.1 [12].

Таблица 4.1 – Количественная оценка значений водяных эквивалентов

Составляющие водяного эквивалента	$\overline{W}_{гр}$	$\overline{W}_{т}$	\overline{W}_B
Мороженный груз	0,975	0,025	–
Плоды и овощи	0,975	0,025	–
Порожний вагон	-	0,960	0,04

Анализ данных таблицы показывает, что при перевозках СПГ в рефрижераторных вагонах доли водяных эквивалентов тары и воздуха составляют соответственно 2,5 % и 4 %. Это означает, что для большинства инженерных

расчетов для груженого вагона этими значениями можно пренебречь, а в расчете использовать только водяной эквивалент с параметрами перевозимого груза.

Процесс охлаждения груза за промежуток времени d описывается следующим дифференциальным уравнением:

$$W_{\Gamma} dt_{\Gamma} = a_{\Gamma} F_{\Gamma} (t_{\Gamma n} - t) d\tau, \quad (4.5)$$

где a_{Γ} – коэффициент теплоотдачи поверхности груза, Вт/ м²·К;

F_{Γ} – теплоотдающая поверхность груза, м²;

$t_{\Gamma n}$ – температура поверхности груза, °С;

t – температура воздуха в вагоне;

W_{Γ} – водяной эквивалент груза кДж/К.

В работах К. В. Иванова рассматривались процессы тепломассообмена и через ограждения кузова с учетом нестационарности процессов, происходящих при транспортировке СПГ [103].

В исследованиях В. Н. Васильева на основании анализа дифференциального уравнения тепло- и массообмена разработаны расчетные методики по определению характеристик процессов охлаждения СПГ, предложены критерии оценки устойчивости температурных режимов при двухпозиционном регулировании температуры [29].

В работах Е. А. Крутовой, с использованием вышеназванных исследований, был выполнен комплекс теоретических и экспериментальных работ по определению допустимой продолжительности транспортировки, позволивших разработать нормативную отраслевую базу для создания и внедрения вагонов-термосов на отечественной сети железных дорог [120].

В работах В. К. Мироненко была разработана математическая модель, методика расчета и анализа процесса охлаждения плотного штабеля плодоовощной продукции. Также была предложена модель и расчетная схема циркуляции воздушных потоков в грузовом помещении рефрижераторного вагона разных типов и в штабеле груза. Были получены простые номограммы для определения условий теплообмена различных видов СПГ [131].

Выполним анализ существующих методов расчета систем воздухораспределения рефрижераторных вагонов.

В настоящее время расчет системы циркуляции рефрижераторных вагонов сводится к определению аэродинамического сопротивления движению воздуха, производительности и необходимой мощности вентиляторов-циркуляторов. Исходными данными для гидродинамического расчета являются холодопроизводительность холодильных установок и температурный режим ГП.

Общее падение напора H_n воздушного потока в системе циркуляции определяется по известным формулам как сумма падений напора на отдельных участках h_i по пути движения воздуха [113]:

$$H_n = \sum_{i=1}^{i=n} h_i; \quad (4.6)$$

$$h_i = \left(\xi_i + \lambda \frac{l_i}{d_i} \right) \cdot \frac{w_i^2 \cdot \rho}{2}, \quad (4.7)$$

где ξ_i – коэффициент местного сопротивления соответствующего участка;

λ – коэффициент трения на участке;

l_i – длина участка, м;

d_i – эквивалентный гидравлический диаметр, м;

w_i – расчетная скорость потока, м/с;

ρ – плотность воздуха, кг/м³.

При конструировании устройств воздухораспределения в рефрижераторных вагонах за основу берется физическая модель процессов воздухообмена в грузовом помещении, аналогичная аэродинамике стационарных промышленных сооружений и холодильных камер и трюмов рефрижераторных судов. Такой подход объясняется тем, что вопросам воздухораспределения в сооружениях такого рода посвящено значительное число теоретических и экспериментальных работ [11, 20, 122].

Система распределения и циркуляции воздуха рефрижераторного вагона имеет воздуховод переменного сечения с равномерно распределенными по длине отверстиями.

Общие энергетические принципы конструкции систем воздухораспределения рефрижераторных вагонов были сформулированы Е. Т. Бартошем [12], а их дальнейшее развитие воплощено в работах А. В. Коковихина [113, 114].

В результате теоретических и экспериментальных исследований закономерностей распределения и циркуляции воздуха в грузовом помещении рефрижераторных вагонов в [29] была разработана комплексная методика расчёта параметров воздухораспределителя.

На основе физико-математического моделирования элементов циркуляционной системы вагона автор провёл анализ влияния параметров воздухораспределения на процесс формирования стабильного температурного поля. Благодаря выполненным работам были сформулированы основные направления совершенствования систем распределения и циркуляции воздуха в рефрижераторных вагонах. Практическим результатом всего комплекса работ стала разработка автором продольно-поперечной системы раздачи воздуха, которой с 1984 г. стали оснащаться все рефрижераторные секции постройки ПО БМЗ [113].

Автором подробно проанализированы факторы, влияющие на эффективность работы систем циркуляции рефрижераторных вагонов. Теоретическими и экспериментальными исследованиями подтверждается вывод о правомерности рассмотрения системы циркуляции вагона как замкнутой коллекторной системы с односторонним подводом и отводом теплоносителя, где равномерность распределения воздушного потока по длине ГП зависит от гидродинамических характеристик системы. Она улучшается с уменьшением сопротивления подводящего и отводящего коллекторов, а также с увеличением сопротивления отводящих воздухораспределительных каналов.

Автором также разработана методика определения параметров распределения воздуха в грузовом помещении при полной и частичной его загрузке.

Существующие нормы загрузки рефрижераторных вагонов, во избежание подмораживания верхних рядов груза, ограничивают высоту штабеля 2,2 или 2,4 м, в зависимости от типа вагона. В результате этого между штабелем и

распределительным воздуховодом остаётся воздушный зазор. Поэтому термообработанный воздух, выходя из воздуховода, вначале смешивается с воздухом в надштабельном пространстве, а уже затем начинает проходить через штабель перевозимого груза, другая часть холодного воздуха начинает опускаться по вертикальным пристенным воздушным каналам, образованным боковой стенкой ГП и штабелем груза.

Учитывая деление охлаждающего воздушного потока на внутриштабельный и пристенный, после ряда преобразований, автор приводит систему уравнений для циркуляционной системы в целом [113].

$$\left\{ \begin{array}{l} G_1 c_p \Delta t_1 = d_{r1} F_{r1} (t_{r.n1} - t' - 0,5\Delta t_1) + \beta K H_1 (t_H - t' - 0,5\Delta t_1) + G_{r1} q_{60} e^{x^{r1}} + Q_B \bar{G}_1 \\ G_2 c_p \Delta t_2 = \alpha_{r2} F_{r2} (t_{r.n2} - t' - 0,5\Delta t_2) + \beta K H_2 (t_H - t' - 0,5\Delta t_2) + G_{r2} q_{60} e^{x^{r2}} + Q_B \bar{G}_2 \\ G_1 \Delta t_1 + G_2 \Delta t_2 = \{f(t_k) + a_x [\bar{G}_1 (t' + 0,5\Delta t_1) + \bar{G}_2 (t' + 0,5\Delta t_2)]\} / c_p \end{array} \right. \quad (4.8)$$

где \bar{G}_1 и \bar{G}_2 – части общего воздушного потока, проходящего соответственно через штабель (1) и пристенный канал (2);

$$\bar{G}_1 = \frac{G_1}{G}; \quad \bar{G}_2 = \frac{G_2}{G}$$

где G – массовый расход воздуха через холодильную установку;

c_p – удельная теплоёмкость воздуха, кДж/кгК;

$\Delta t_1 = t_1'' - t_1'$ – перепад температур по высоте ГП;

$\Delta t_2 = t_2'' - t_2'$

βK – приведённый коэффициент теплоотдачи кузова, Вт/К;

t_H – наружная температура, °С;

$H_{1,2}$ – соответствующая поверхность ограждений; м²;

t_H' – наружная температура, °С;

q_{60} – удельная теплота дыхания плодов при 0 °С, Вт/кг;

x^r – температурный коэффициент, 1/°С;

a_x – угловой коэффициент [12].

Из анализа системы уравнений автор делает вывод, что для снижения перепада температур воздушного потока по высоте ГП (Δt_1 ; Δt_2) необходимо при

неизменной холодопроизводительности увеличить количество воздуха, проходящего через рассматриваемые элементы загруженного объема. Это может быть осуществлено за счёт использования воздухораспределительной системы, интенсифицирующей циркуляцию воздуха в загруженном объеме посредством вовлечения в движение воздушного потока из ГП и образования дополнительных контуров циркуляции.

4.2. Моделирование тепловых процессов при термообработке скоропортящихся грузов в отопляемом изотермическом вагоне

4.2.1. Общие положения

При поддержании температурного режима подогрев ГП осуществляется теплопроводностью и конвекцией. Однако расчетная модель штабеля груза в ОИВ должна иметь существенные отличия от штабеля груза в рефрижераторном вагоне, т. е. должен быть изменен основной принцип поддержания температуры.

При укладке груза в грузовом помещении рефрижераторного вагона необходимо обеспечить принудительную циркуляцию воздуха внутри штабеля, необходимую для работы холодильной установки. Номенклатура СПГ, перевозимых железнодорожными рефрижераторными вагонами, достаточно многообразна. Продукты, предъявляемые к перевозке, имеют более высокую температуру, чем требуется для транспортировки. Поэтому после окончания погрузки груз должен быть подвергнут термообработке за счет подачи охлажденного в воздухоохладителе воздуха в систему распределения (воздуховод) и далее вовнутрь штабеля груза. Скорость охлаждения в этом случае зависит от многих факторов – вида продукта, теплоемкости, величины теплоты дыхания (для плодоовощной продукции), способа укладки груза.

В случае транспортировки СПГ в рефрижераторных вагонах с традиционным холодильно-отопительным агрегатом, требующих отопления, например в зимний период года, задача термообработки воздуха решается аналогичным образом.

Однако существует достаточно многочисленная группа СПГ, для перевозки которых в зимний период года не требуется точное поддержание температуры в грузовом помещении. Например, для соков, пива, консервов, молочной продукции, минеральной воды и т. д. необходимо просто поддержание положительных температур в грузовом помещении вагона без ущерба для качества. Эта категория грузов даже допускается к перевозкам в вагонах-термосах, хотя и с ограничением времени транспортировки. Допустимый срок транспортировки зависит от времени года и расстояния перевозки и регламентируется отдельными указаниями РЖД.

Для ОИВ основным принципом является сохранение тепла, аккумулированного грузом. Поэтому требования к укладке груза в грузовом помещении вагона будут заключаться в формировании более плотного штабеля, способствующего сохранению тепла, саккумулированного грузом.

Система отопления в этом случае будет компенсировать теплопотери, которые зависят от температуры окружающего воздуха и от коэффициента теплопередачи изотермического кузова вагона.

Благодаря новой системе обогрева и отказу от воздуховода может быть увеличена высота ГП вагона без изменения наружных размеров кузова, что особенно актуально при перевозках СПГ с малым удельным весом.

Исходя из этих предпосылок сформируем следующие условия.

В ОИВ с геометрическими параметрами полезного объема ГП a , b , c , помещается груз с геометрическими параметрами h_1 , h_2 , h_3 . Исходя из типов перевозимого груза в ОИВ будем считать груз твердым телом.

Груз в начальный момент времени имеет температуру $T_0 = 7$ °С. Температура среды внутри вагона является величиной постоянной и принимает значение $T_{cp} = 2,5$ °С.

Физическая постановка задачи заключается в следующем: рассматривается ГП ИВ, выполненное в виде прямоугольного параллелепипеда, которое состоит из элементов: 1 – теплоизолированная стена кузова ИВ, состоящая из стального листа толщиной 2 мм, слоя теплоизоляции из пенополистирола толщиной 200 мм

и внутренней алюминиевой обшивки ГП (сплав АМг5) толщиной 2 мм. Общая средняя величина коэффициента теплопередачи кузова $k_{тп} = 0,3 \text{ Вт/м}^2\cdot\text{К}$; 2 – штабель перевозимого груза (стеклянные банки с соком, упакованные в картонные коробки вместимостью по 4 банки каждая). Конструкция системы циркуляции и распределения термообработанного воздуха в ГП образует воздушный зазор между штабелем и вертикальной стенкой толщиной 50 мм, а напольные решетки, на которых стоит груз, имеют высоту 100 мм. Моделирование термообработки штабеля с помощью нагревательной системы «теплый пол».

Задачи исследования:

1. Предложить и проработать новую концепцию обогрева ГП (актуальную для термосопригодных грузов и плодоовощной продукции), на основании которой апробировать математическую модель термообработки штабеля груза в грузовом помещении ИВ, учитывающую естественное гравитационное движение термообработанного (теплого) воздуха вокруг штабеля груза.

2. Выполнить численное моделирование термообработки штабеля с помощью нагревательной системы «теплый пол» с использованием пакета ANSYS и расчетной среды ANSYS Workbench.

3. Построить термограммы при перевозках плодоовощных соков.

4. Сравнить расчетные и экспериментальные данные.

Постановка задачи

Принимается, что конструктивно нагревательные элементы (теплый пол) располагаются встроенными в верхнюю часть пола, на которой лежат напольные решетки, а штабель груза располагается на напольных решетках.

Рассмотрим штабель термосопригодного груза, размещенного в грузовом помещении. На полу ГП, под штабелем, располагаются напольные решетки, являющиеся элементом системы циркуляции и распределения воздуха и обладающие минимальным аэродинамическим сопротивлением. С учетом того, что эти виды грузов укладываются плотным штабелем на напольные решетки, а сама продукция в большинстве случаев упакована в картон, нижнюю часть

штабеля можно представить в виде горизонтальной пластины. Предлагаемая система обогрева «теплый пол» монтируется в пол кузова вагона и покрывается снаружи влагостойким материалом, тоже имеет горизонтальное ориентирование, что позволяет рассмотреть работу этой системы в условиях теплоотдачи при свободной конвекции в ограниченном пространстве [121].

Инженерная задача о поддержании заданной температуры штабеля включает 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 температур в этом штабеле.

4.2.2. Расчет параметров пограничного слоя при естественной конвекции воздуха в грузовом помещении ИВ

Первая, «гидродинамическая» задача сводится к следующему. Считаем, что стена ГП является вертикальной пластиной, температура которой поддерживается на постоянном уровне $T_c = \text{const}$. Стенка ГП находится в воздухе с температурой $T_0 = \text{const}$, воздух можно считать неподвижным вдали от стенки, причем $T_c > T_0$. Воздух, имеющий контакт с более нагретой (горячей) стенкой, нагревается сам, причем его нагревание сопровождается уменьшением плотности. У пластины возникает подъемное движение, называемое свободной конвекцией.

Движение воздуха рассматривается в канале прямоугольного сечения, который образуют, обогреваемая стенка ГП, две вертикально установленные гофры и стенка штабеля, сложенного из картонных коробок, содержащих перевозимые продукты. Геометрические параметры канала следующие: ширина $s_1 = 531 + 659 = 1190$ мм $\approx 1,2$ м, толщина, равная ширине гофры, $s_2 = 70$ мм = 0,07 м, и высота (равная высоте ГП) $s_3 = 2,5$ м.

Для математического описания конвективного движения воздуха обычно вводят систему координат, в которой ось абсцисс Ox направлена *снизу вверх*, т. е.

по направлению движения частиц среды (воздуха). Ось ординат Oy направлена по нормали к поверхности пластины, а ось аппликат Oz направлена вдоль её поверхности, т. е. перпендикулярно гофрам. Также вводят следующие упрощающие допущения:

- движение воздуха происходит в тонком пристеночном слое толщиной δ , который называют «пограничным слоем». Физические величины для расчета температурного режима в ГП представлены в таблице 4.2.

Таблица 4.2 – Физические величины для расчета температурного режима в грузовом помещении на уровне $T_0 \approx 5 \text{ }^\circ\text{C}$

Физическая величина	Обозначение, числовое значение, размерность
Динамическая вязкость	$\mu = 1,74 \cdot 10^{-5} \text{ Па}\cdot\text{с}$
Кинематическая вязкость	$\nu = 1,38 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$
Коэффициент объемного теплового расширения	$\beta = 1/273 = 0,037 \text{ град}^{-1}$
Коэффициент теплопроводности	$\lambda = 0,0248 \text{ Вт/м град}$
Удельная изобарная теплоемкость	$c_p = 1005 \text{ Дж/кг град}$
Физическая величина	Обозначение, числовое значение, размерность
Плотность воздуха	$\rho_0 = 1,2 \text{ кг/м}^3$
Критерий Прандтля	$Pr = 0,71 \text{ (безразм.)}$
Ускорение свободного падения	$g = 9,8 \text{ м/с}^2$

Толщина слоя увеличивается по мере движения его вдоль пластины (т. е. $\delta = \delta(x)$), и эта функция растет 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 . т. е. имеет место распределение скоростей по толщине пограничного слоя. Непосредственно на поверхности пластины и на внешней границе пограничного слоя скорость воздуха ω_x считается равной нулю:

$$\omega_x|_{y=0} = 0; \omega_x|_{y=\delta} = 0. \quad (4.9)$$

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

$$\frac{d\omega_x}{d\tau} = 0.$$

• У движущегося в пограничном слое воздуха силы инерции пренебрежимо малы сравнительно с силами тяжести и вязкости.

• Градиент давления равен нулю.

• Плотность воздуха меняется с температурой по линейному закону, остальные физические параметры остаются постоянными.

Для упрощения описания гидродинамического процесса вводят две «избыточные температуры»

$$\theta = T - T_0; \quad \theta_c = T_c - T_0. \quad (4.10)$$

Известно [126], что температура в движущемся пограничном слое меняется по параболическому закону

$$\theta(y) = \theta_c \left(1 - \frac{y}{\delta}\right)^2. \quad (4.11)$$

Уравнение (4.10) удовлетворяет стандартным граничным условиям, вводимым для пограничного слоя:

$$\theta|_{y=0} = \theta_c; \quad \theta|_{y=\delta} = 0. \quad (4.12)$$

Коэффициент теплоотдачи от стенки к пограничному слою определяется равенством:

$$\alpha = -\frac{\lambda}{\theta_c} \left(\frac{d\theta}{dy}\right)_{y=0}. \quad (4.13)$$

Выполняя дифференцирование равенства (4.11), получаем:

$$\frac{d\theta}{dy} = -\frac{2\theta_c}{\delta} \left(1 - \frac{y}{\delta}\right).$$

Положив $y = 0$, получаем:

$$\left(\frac{d\theta}{dy}\right)_{y=0} = -\frac{2\theta_c}{\delta}. \quad (4.14)$$

Подставляя (4.13) в (4.14), находим выражение для коэффициента теплоотдачи, эта величина зависит от толщины пограничного слоя δ :

$$\alpha = \frac{2\lambda}{\delta}. \quad (4.15)$$

Уже отмечалось, что толщина пограничного слоя $\delta = \delta(x)$ изменяется вдоль оси абсцисс, а теперь добавим, что это изменение связано со скоростью движения воздуха ω_x в пограничном слое.

Воздух при естественной конвекции имеет малую скорость движения, поэтому его можно рассматривать как несжимаемую жидкость. При сделанных выше оговорках относительно модели пограничного слоя, для условий естественной конвекции воздуха, уравнение его одномерного установившегося движения станет таким [126]:

$$\mu \frac{d^2 \omega_x}{dy^2} = -g(\rho_0 - \rho). \quad (4.16)$$

Здесь ρ_0 и ρ – плотность воздуха вне пограничного слоя и внутри него соответственно, кг/м^3 , остальные величины указаны в таблице 4.2. Обозначив через $\beta = 1/273$ 1/град коэффициент объемного теплового расширения воздуха, запишем известный закон уменьшения его плотности с ростом температуры:

$$\rho = \rho_0(1 - \beta\theta).$$

Тогда

$$\rho_0 - \rho = \rho_0\beta\theta. \quad (4.17)$$

Подставляя (4.11) в (4.17), а затем (4.7) в (4.16), получим обыкновенное дифференциальное уравнение, описывающее движение воздуха в пограничном слое:

$$\frac{d^2 \omega_x}{dy^2} = -\frac{\rho_0 g \beta \theta_c}{\mu} \left(1 - \frac{y}{\delta}\right)^2 = -\frac{\rho_0 g \beta \theta_c}{\mu} \left(1 - \frac{2y}{\delta} + \left(\frac{y}{\delta}\right)^2\right). \quad (4.18)$$

С целью упрощения дальнейших записей вводим следующие обозначения [126]:

$$N = \frac{\rho_0 g \beta \theta_c}{\mu \delta^2}; \quad M = \frac{2\rho_0 g \beta \theta_c}{\mu \delta} = 2\delta N; \quad P = \frac{\rho_0 g \beta \theta_c}{\mu} = \delta^2 N. \quad (4.19)$$

При этом уравнение (4.18) запишется так:

$$\frac{d^2 \omega_x}{dy^2} = -Ny^2 + My - P. \quad (4.20)$$

Однократное интегрирование уравнения (4.20) дает равенство:

$$\frac{d\omega_x}{dy} = -\int [Ny^2 + My - P] dy = -\frac{N}{3}y^3 + \frac{M}{2}y^2 - Py + C_1. \quad (4.21)$$

Повторное интегрирование дает результат

$$\omega_x = -\frac{N}{12}y^4 + \frac{M}{6}y^3 - \frac{Py^2}{2} + C_1y + C_2, \quad (4.22)$$

где C_1 и C_2 – постоянные интегрирования. Краевые условия (4.9), утверждающие, что $\omega_x(0) = 0$ и $\omega_x(\delta) = 0$, позволяют найти значения этих постоянных:

$$C_2 = 0; C_1 = \frac{N}{12}\delta^3 - \frac{M}{6}\delta^2 + \frac{P}{2}\delta. \quad (4.23)$$

Подставляем равенства (4.15) и (4.11) в уравнение (4.14) и, выполняя элементарные преобразования, получим формулу, описывающую распределение скоростей в пограничном слое:

$$\omega_x(y) = \frac{\rho_0 g \beta \theta_c \delta^2}{\mu} \left\{ \frac{1}{12} \left[1 - \left(\frac{y}{\delta} \right)^3 \right] - \frac{1}{3} \left[1 - \left(\frac{y}{\delta} \right)^2 \right] + \frac{1}{2} \left[1 - \left(\frac{y}{\delta} \right) \right] \right\}. \quad (4.24)$$

Положение максимума скорости потока воздуха в пограничном слое определяем из условия равенства нулю производной (4.21). Подставляя равенства (4.23) и (4.19) в уравнение (4.21) и приравнявая полученное соотношение нулю, находим, что максимум скорости будет при:

$$y = 0,388\delta \approx \frac{\delta}{3}. \quad (4.25)$$

Средняя скорость течения воздуха в пограничном слое определяется равенством:

$$\bar{\omega}_x = \frac{1}{\delta} \int_0^{\delta} \omega_x(y) dy. \quad (4.26)$$

Подставляя (4.24) в (4.26) и выполняя интегрирование, получаем:

$$\bar{\omega}_x = \frac{\rho_0 g \beta \theta_c \delta^2}{40\mu}. \quad (4.27)$$

Среднюю температуру воздуха, в пограничном слое определяем как среднеинтегральную по сечению слоя:

$$\bar{\theta} = \frac{1}{\delta} \int_0^{\delta} \theta(y) dy. \quad (4.28)$$

Подставляя (4.11) в (4.28) и выполняя интегрирование, находим:

$$\bar{\theta} = \frac{1}{\delta} \int_0^{\delta} \theta_c \left(1 - \frac{y}{\delta}\right)^2 dy = \frac{\theta_c}{3}. \quad (4.29)$$

Таким образом, при принятых условиях нагревания (или охлаждения) продукта величина средней температуры пограничного слоя не зависит от координаты x .

Расход воздуха через поперечное сечение пограничного слоя в рассматриваемом канале шириной s_1 , отсчитываемой вдоль оси z , равен:

$$G = \rho_0 \cdot \bar{\omega}_x \cdot \delta \cdot s_1. \quad (4.30)$$

Изменение расхода обусловлено тем, что воздух, имеющий плотность ρ_0 , вовлекается в движущийся пограничный слой и приобретает среднюю скорость $\bar{\omega}_x$, при этом толщина пограничного слоя возрастает с координатой x : $\delta = \delta(x)$.

Малое изменение расхода определяем дифференциалом:

$$dG = d(\rho_0 \cdot \bar{\omega}_x \cdot \delta). \quad (4.31)$$

Подставляя (4.27) в (4.31), и, выполняя дифференцирование, получаем:

В движение вовлекается воздух, имеющий начальную температуру T_0 , при движении вдоль нагретой стенки он нагревается. В пограничном слое возникает распределение температур, лежащих в интервале от T_0 до $T_{ст}$. В среднем он нагревается до температуры $\bar{\theta}_c$, и на это нагревание затрачивается теплота:

$$dQ = c_p \bar{\theta} dG. \quad (4.33)$$

Это количество теплоты в соответствии с законом Ньютона – Рихмана и при использовании (4.15) определим равенством:

$$dQ = \alpha \theta_c s_1 dx = \frac{2\lambda}{\delta} \cdot \theta_c s_1 dx. \quad (4.34)$$

Из двух последних соотношений и равенства (4.29) получаем:

$$dG = \frac{2\lambda \theta_c}{\delta \cdot c_p \bar{\theta}} dx = \frac{6\lambda}{\delta \cdot c_p} dx. \quad (4.35)$$

Приравнивая правые части соотношений (4.31) и (4.35), получим дифференциальное уравнение с разделенными переменными, описывающее изменение толщины пограничного слоя δ с высотой x :

$$\frac{3\rho_0^2 g \beta \theta_c}{40\mu} \delta^3 d\delta = \frac{6\lambda}{c_p} dx. \quad (4.36)$$

Выполняя интегрирование правой и левой частей последнего уравнения, получаем:

$$\frac{3\rho_0^2 g \beta \theta_c}{160\mu} \delta^4 = \frac{6\lambda}{c_p} x + C. \quad (4.37)$$

Для упрощения задачи введем допущение, что пограничный слой на боковой стенке ГП начинает формироваться от нижнего её края, т. е. при $x = 0$ будет и $\delta = 0$. В действительности некоторый поток воздуха в канал между гофрами может поступать из-под обогреваемого пола грузового помещения. Теоретически параметры этого потока воздуха оценить трудно, из-за того что пол покрыт решеткой. Однако поскольку на решетку уложено резиновое напольное покрытие, то есть основание полагать, что этот поток в основном будет проходить по внешней поверхности стенки и в самих вертикально расположенных гофрах, а не в канале между стенкой и штабелем груза.

Постоянная интегрирования C в равенстве (4.37) при условии, что $\delta|_{x=0} = 0$ становится равной нулю $C = 0$. Тогда из уравнения (4.37) после элементарных операций с числовыми коэффициентами легко получить, что:

$$\delta = 4,23 \cdot \sqrt[4]{\frac{\mu \lambda x}{c_p \beta \rho_0^2 g \theta_c}}. \quad (4.38)$$

Видим, что толщина пограничного слоя воздуха, поднимающегося вдоль боковых стен ГП и обеспечивающего обогрев ГП, медленно возрастает по мере подъема к потолку $\delta(x) \approx \sqrt[4]{x}$.

Задавшись значением температурного перепада $\theta_c = 5$ °С, высотой над полом ГП $x = 0,5$ м и подставляя значения величин, отмеченных в таблице 4.2, получим, что $\delta = 13,24$ мм, т. е. превысит поперечный размер гофры, определяющей

толщину рассматриваемого канала. Следовательно, пограничный слой на высоте меньшей $x = 0,5$ м заполнит уже весь рассматриваемый канал, и в нем возникнут круговые токи.

Подставляя (4.38) в равенство (4.15), находим изменение коэффициента теплоотдачи с высотой ГП:

$$\alpha = \frac{2\lambda}{\delta} = 0,473 \cdot \sqrt[4]{\frac{c_p \beta \rho_0^2 g \theta_c \lambda^3}{\mu x}}. \quad (4.39)$$

Задавшись тем же значением температурного перепада $\theta_c = 5$ °С, той же высотой над полом ГП $x = 0,5$ м и подставляя значения величин, отмеченных в таблице 4.2, получим, что $\alpha = 3,78$ Вт/м²·град.

Умножим правую и левую части равенства (4.39) на x/λ , а выражение под знаком радикала умножим и разделим на μ^2 :

$$\frac{\alpha \cdot x}{\lambda} = 0,473 \cdot \sqrt[4]{\frac{\beta \rho_0^2 g x^3 \theta_c \mu c_p}{\mu^2 \lambda}}. \quad (4.40)$$

Обозначим через a_B температуропроводность, а через ν_B – кинематическую вязкость воздуха. Эти величины имеют одинаковую размерность (м²/с) и определяются равенствами:

$$a_B = \frac{\lambda}{c_p \rho_0}, \quad (4.41)$$

$$\nu_B = \frac{\mu}{\rho_0}, \quad (4.42)$$

и введем в рассмотрение известные числа и критерии подобия: «число Нуссельта» Nu_x , «число Грасгофа» Gr_x и критерий Прандтля Pr . Эти безразмерные комплексы выражаются соотношениями:

$$Nu_x = \frac{\alpha \cdot x}{\lambda}, \quad (4.43)$$

$$Gr_x = \frac{g \beta \theta_c x^3}{\mu^2 / \rho_0^2} = \frac{g \beta \theta_c x^3}{\nu^2}, \quad (4.44)$$

$$Pr = \frac{\mu \cdot c_p}{\lambda} = \frac{\nu_B}{a_B}. \quad (4.45)$$

Схема движения токов воздуха между стеной ГП и штабелем груза представлена на рисунке 4.1.

У воздуха и температуропроводность, и кинематическая вязкость изменяются с температурой практически одинаковым образом, поэтому для интервала температур от 0 до +20 °С, при которых эксплуатируется рассматриваемый вагон-термос, критерий Прандтля можно считать постоянной величиной $Pr = 0,71$.



Рисунок 4.1 – Схема движения токов воздуха между стеной ГП и штабелем груза

С использованием названных комплексов уравнение (4.40) записывается в безразмерном виде

$$Nu_x = 0,473 \cdot (Gr_x \cdot Pr)^{0,25}. \quad (4.46)$$

В рассматриваемой задаче температура воздуха t_0 в грузовом помещении и температура стенки t_c считаются постоянными, будет неизменным и температурный напор $\theta_c = t_c - t_0$. Тогда равенство (4.39) можно записать так:

$$\alpha(x) = Cx^{-0,25},$$

где постоянную C образуют числовые значения всех величин, входящих (кроме координаты x) в (4.39).

Тогда среднее значение коэффициента теплоотдачи по обогреваемой стенке ГП можно вводить как среднеинтегральное:

$$\bar{\alpha}_l = \frac{1}{l} \int_0^l \alpha(x) dx = \frac{C}{l} \int_0^l x^{-0,25} dx = \frac{4}{3} Cl^{-0,25} = \frac{4}{3} \alpha|_{x=l}. \quad (4.47)$$

Здесь $\alpha|_{x=l}$ – локальный (местный) коэффициент теплоотдачи в точке обогреваемой стенки, имеющей координату $x = l$.

За эту точку естественно принять среднюю точку стенки ГП. Подставляя ранее полученное значение локального коэффициента $\alpha = 3,78$ Вт/м²град, найдем среднее его значение $\bar{\alpha}_l = \frac{4}{3} \cdot 3,78 = 5,03$ Вт/м²град. Это числовое значение будет исходным при рассмотрении второй, «тепловой» задачи описания температурного режима в ГП.

Произведение числа Грасгофа на критерий Прандтля объединяют в общий комплекс, называемый в теории подобия «числом Рэлея» Ra. Обозначив через l характерный размер области, где происходит тепловой процесс, и учитывая дополнительный коэффициент $4/3$, появляющийся в (4.47), перепишем равенство (4.46) уже для усредненной теплоотдачи:

$$Nu_l = \frac{4 \cdot 0,473}{3} (Gr_l \cdot Pr)^{0,25} = 0,63 Ra_l^{0,25}. \quad (4.48)$$

4.2.3. Расчет распределения температур в штабеле перевозимого груза

Прежде рассмотрения «тепловой» задачи о нагревании или охлаждении штабеля с грузом рассмотрим вспомогательную задачу о нагревании (охлаждении) плоской стенки (пластины). Задача формулируется следующим образом.

Имеется стенка толщиной s , выполненная из однородного материала, ограниченная плоскопараллельными поверхностями. Условия тепловой задачи таковы, что вектор плотности теплового потока можно считать направленным перпендикулярно стенке, при этом тепловая задача становится одномерной. До начального момента времени стенка во всех своих точках имела одинаковую температуру $T_a = \text{const}$.

В начальный момент времени $\tau = 0$ стенка с обеих сторон подвергается тепловому воздействию (нагреванию или охлаждению) окружающей среды с постоянной во времени температурой $T_0 = \text{const}$. Требуется найти распределение температуры в стенке и определить расход теплоты.

Так как стенка по условиям задачи должна изменять свою температуру симметрично по обе стороны от своей середины, то начало координат переместим в середину стенки, в точку O .

Температурное поле в стенке находится как решение одномерного дифференциального уравнения нестационарной теплопроводности:

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2}, \quad (4.49)$$

где θ – переменная во времени разность температур между точкой с координатой x внутри стенки и температурой окружающей среды (воздуха внутри ГП вагона):

$$\theta(x, \tau) = T(x, \tau) - T_0. \quad (4.50)$$

Уравнение рассматривается вместе с двумя краевыми условиям третьего рода на поверхностях стенки:

$$\left. \frac{\partial \theta}{\partial x} \right|_{x=\pm s/2} = -\frac{\alpha}{\lambda} \theta \Big|_{x=\pm s/2}, \quad (4.51)$$

и одним временным условием:

$$\theta \Big|_{\tau \rightarrow \infty} = 0. \quad (4.52)$$

Смысл последнего уравнения очевиден – при неограниченно долгом нагревании (или охлаждении) пластины движущимся воздухом, температура

которого поддерживается постоянной, температура пластины сравнивается с температурой воздуха.

Эта стандартная задача математической физики решается методом разделения переменных с получением собственных значений и собственных функций и подробно рассмотрена в работе [126]. С использованием этого метода уравнение в частных производных (4.49) сводится к системе из двух обыкновенных дифференциальных уравнений:

$$\theta_1'(\tau) + \varepsilon^2 a \theta_1(\tau) = 0, \quad (4.53)$$

$$\theta_2''(x) + \varepsilon^2 a \theta_2(x) = 0. \quad (4.54)$$

Причем

$$\theta(x, \tau) = \theta_1(\tau) \cdot \theta_2(x). \quad (4.55)$$

Решением уравнения (4.53) будет экспоненциальная функция, удовлетворяющая начальному условию (4.52):

$$\theta_1(\tau) = C e^{-\varepsilon^2 a \tau}. \quad (4.56)$$

Обыкновенному дифференциальному уравнению второго порядка (4.54) удовлетворяют две функции:

$$\theta_2(x) = G_1 \sin \varepsilon x \text{ и } \theta(x, \tau) = G_2 \cos \varepsilon x. \quad (4.57)$$

Подставляя равенства (4.56) и (4.57) в уравнение (4.55) и объединяя произвольные постоянные интегрирования, получаем два частных решения уравнения нестационарной теплопроводности (4.49):

$$\theta_i(x, \tau) = A(\varepsilon_i) e^{-\varepsilon_i^2 a \tau} \cos \varepsilon_i x, \quad (4.58)$$

$$\theta_i(x, \tau) = B(\varepsilon_i) e^{-\varepsilon_i^2 a \tau} \sin \varepsilon_i x. \quad (4.59)$$

Здесь ε_i^2 при $i = 1, 2, 3 \dots$ – это дискретно изменяющаяся произвольная величина, на которую применительно к тепловым задачам накладывается требование, что она должна быть действительной и положительной, эти величины называются «собственными значениями» частных решений уравнения теплопроводности (4.49).

$A(\varepsilon_i)$ и $B(\varepsilon_i)$ – также дискретно изменяющиеся величины, числовые значения которых определяются значениями чисел ε_i . Функции (4.57) и (4.58) называются «собственными функциями», определяющими частные решения уравнения теплопроводности (4.49).

Общее решение уравнения (4.49) получается суммированием всех собственных функций и образованием из них тригонометрического ряда (ряда Фурье):

$$\theta_i(x, \tau) = \sum_{i=1}^{\infty} [A(\varepsilon_i) \cos(\varepsilon_i x) + B(\varepsilon_i) \sin(\varepsilon_i x)] \cdot e^{-\varepsilon_i^2 a \tau}. \quad (4.60)$$

Функция (4.57) – четная, а функция (4.58) нечетная, а так как начало координат находится на средней плоскости пластины, то при изменении знака аргумента x на $-x$ функция (4.58) изменяет свой знак, а функция (4.57) – нет. По условию происходит симметричное изменение температуры стенок пластины, поэтому в тригонометрическом ряде (4.60), являющемся решением уравнения (4.49), следует оставить только четные функции (т. е. выполнить разложение температурной функции $\theta(x, \tau)$ в ряд Фурье «по косинусам»):

$$\theta(x, \tau) = \sum_{i=1}^{\infty} [A(\varepsilon_i) \cos(\varepsilon_i x)] \cdot e^{-\varepsilon_i^2 a \tau}. \quad (4.61)$$

Подставляя любое из слагаемых ряда (4.61) в равенство (4.51), определяющего краевые условия для рассматриваемой задачи, выполняя дифференцирование, получим

$$\varepsilon_i \operatorname{tg} \frac{\varepsilon_i s}{2} = \frac{\alpha}{\lambda}. \quad (4.62)$$

Введем обозначение: $\frac{\varepsilon_i s}{2} = \delta_i,$

откуда $\varepsilon_i = \frac{\delta_i}{s/2}. \quad (4.63)$

Подставляем последнее равенство в (4.62), получим:

$$\delta_i \cdot \operatorname{tg} \delta_i = \frac{\alpha \cdot s}{2\lambda}. \quad (4.64)$$

Вводим в рассмотрение два безразмерных комплекса:

– критерий Био:

$$Bi = \frac{\alpha \cdot s}{2\lambda}, \quad (4.65)$$

– и число Фурье, которое считается «безразмерным временем» теплового процесса:

$$Fo = \frac{a \cdot \tau}{(s/2)^2}. \quad (4.66)$$

С использованием критерия Био равенство (4.64) принимает вид:

$$\delta_i \cdot \operatorname{tg} \delta_i = Bi. \quad (4.67)$$

При этом равенство (4.61) становится таким:

$$\theta(x, \tau) = \sum_{i=1}^{\infty} \left[A(\delta_i) \cos \left(\frac{\delta_i x}{s/2} \right) \right] \cdot e^{-\delta_i^2 \cdot Fo}. \quad (4.68)$$

Очевидно, что в начальный момент времени теплового процесса $\tau = 0$ число Фурье $Fo = 0$. При этом равномерно сходящийся тригонометрический ряд (4.68) будет характеризовать начальное распределение температур в пластине, обозначим эту температуру через θ_0 :

$$\theta(x, 0) = \theta_0(x) = \sum_{i=1}^{\infty} \left[A(\delta_i) \cos \left(\frac{\delta_i x}{s/2} \right) \right]. \quad (4.69)$$

По виду функции $\theta_0(x)$ можно определить постоянные коэффициенты $A(\delta_i)$. Согласно методике, изложенной в теории рядов Фурье, для этого нужно правую и левую части равенства (4.69) умножить на $\cos \left(\frac{\delta_i x}{s/2} \right)$ и проинтегрировать все члены полученного равенства в пределах от $-s/2$ до $+s/2$.

В результате проведенных операций, подробно рассмотренных в [126], получаем искомые коэффициенты $A(\delta_i)$:

$$A(\delta_i) = \theta_0 \cdot \frac{2 \sin \delta_i}{\delta_i + \sin \delta_i \cos \delta_i}. \quad (4.70)$$

Подставляя (4.70) в (4.68), находим окончательное решение о распределении температур в пластине через время τ после начала нагревания (или охлаждения) пластины:

$$\theta(x, \tau) = \theta_0 \sum_{i=1}^{\infty} \left[\frac{2 \sin \delta_i}{\delta_i + \sin \delta_i \cos \delta_i} \cos \left(\frac{\delta_i x}{s/2} \right) \right] \cdot e^{-\delta_i^2 \cdot Fo}. \quad (4.71)$$

Положив в равенстве (4.71) $x = 0$, получим функцию, характеризующую изменение со временем температуры в середине пластины:

$$\theta(0, \tau) = \theta_m(\tau) = \theta_0 \sum_{i=1}^{\infty} \left[\frac{2 \sin \delta_i}{\delta_i + \sin \delta_i \cos \delta_i} \right] \cdot e^{-\delta_i^2 \cdot Fo}. \quad (4.72)$$

Изменение со временем температуры поверхности стенки находится при подстановке в (4.71) значений $x = \pm s/2$:

$$\theta_F(\tau) = \theta_0 \sum_{i=1}^{\infty} \left[\frac{2 \sin \delta_i \cdot \cos \delta_i}{\delta_i + \sin \delta_i \cos \delta_i} \right] \cdot e^{-\delta_i^2 \cdot Fo} = \theta_0 \sum_{i=1}^{\infty} \left[\frac{\sin 2\delta_i}{\delta_i + \frac{1}{2} \sin 2\delta_i} \right] e^{-\delta_i^2 \cdot Fo}. \quad (4.73)$$

Расход теплоты за время τ с обеих сторон пластины находится суммированием этой величины по всем элементарным объёмам, на которые можно разбить стенку:

$$Q_T = \int_{(V)} \rho C [\theta_0 - \theta_\tau] dV. \quad (4.74)$$

Подставляя (4.73) в (4.74), получаем:

$$Q_\tau = \rho C S \theta_0 \sum_{i=1}^{\infty} \left[\frac{2 \sin \delta_i}{\delta_i + \sin \delta_i \cos \delta_i} \right] \cdot (1 - e^{-\delta_i^2 \cdot Fo}), \quad (4.75)$$

$$\text{где } \rho C S \theta_0 = Q_0, \quad (4.76)$$

– общий расход теплоты за время полного нагревания (охлаждения) пластины.

Имея решение задачи нестационарной теплопроводности плоской стенки, ищем решение аналогичной задачи 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

$$\frac{\theta(x, y, z, \tau)}{\theta_0} = \frac{\theta(x, \tau)}{\theta_{0x}} \cdot \frac{\theta(y, \tau)}{\theta_{0y}} \cdot \frac{\theta(z, \tau)}{\theta_{0z}}, \quad (4.77)$$

где множители $\frac{\theta(x, \tau)}{\theta_{0x}}$, $\frac{\theta(y, \tau)}{\theta_{0y}}$ и $\frac{\theta(z, \tau)}{\theta_{0z}}$ находятся согласно решению (4.72) для соответствующих значений x , y и z .

Перейдем к оценке функции, характеризующей распределение температур в штабеле перевозимого груза при его нагревании потоками воздуха, движущимися между гофрами металлической стенки, и его охлаждению в отсутствие работы нагревательных элементов. Рассмотрение вопроса начнем опять с упрощенной модели плоской стенки. Расчетные параметры физической модели штабеля для режимов охлаждения и нагревания груза представлены в таблице 4.3.

Таблица 4.3 – Параметры физической модели штабеля в грузовом помещении ИВ

Материал	Параметр				Примечание
	ρ , кг / м ³	c , Дж/(кг·К)	λ , Вт / м·К	$a \cdot 10^5$, м ² /с	
Воздух влажный	1,24	1015	0,023	1,82743	При параметрах ГП
Резиновое покрытие (толщина 4 мм)	1200	1163	0,972	6,96475	
Дерево сосна поперек волокон	550	2300	0,15	1,18577	
Алюминиево- магниевый сплав	2640	840	155	6,98954	
Стекло	2500	840	0,76	3,61905	
Картон	700	1150	0,065	8,07453	
Соки фруктовые	1050	3750	0,554	1,40698	

Режим нагревания груза: соки фруктовые в стеклянной таре с их упаковкой в картонные ящики. Размеры картонного ящика 0,320×0,320×0,260 м. Последний параметр – высота коробки. Вес порожнего стеклянного 3-литрового баллона – 0,950 кг. Вес жестяной крышки – 15 г.

Вес картонного ящика на 4 баллона с картонными перегородками – 0,350 кг.

Вес фруктового сока в 3-литровом баллоне – 3,75–3,90 кг.

Таблица 4.4 – Теплофизические параметры штабеля перевозимого груза

Часть груза	Вес единицы	В ящике	В АРВ 825 (10000 баллонов) укладка в 7 ярусов	В АЖВ 809 (12 300 баллонов) укладка в 9 ярусов
1	2	3	4	5
Крышка жестяная	15 г	4 · 15 = 60 г	150 кг	184,5 кг
Баллон стеклянный	950 г	3800 г	9500 кг	11 685 кг

Продолжение таблицы 4.4

1	2	3	4	5
Ящик картонный	350 г	350 г	875 кг	1076,25 кг
Сок фруктовый	3800 г	15 200 г	38 000 кг	46 740 кг
Общая масса одного упакованного места	1 баллон – 4765 г	1 ящик – 19 410 г	48 525 кг	59 685,75 кг

Выше была дана оценка значения коэффициента теплоотдачи потоку воздуха, протекающему между гофрами металлической стенки ГП $\alpha = 5 \text{ Вт/м}^2\cdot\text{град}$, и, пренебрегая термическим сопротивлением самой металлической стенки, вычисляем число Био (4.65) для случая нагревания штабеля груза:

$$Bi = \frac{\alpha s}{2\lambda} = \frac{5 \cdot 2,6}{2 \cdot 0,554} = 11,73 \approx 12.$$

Видим, что число Био оказалось существенно больше единицы ($Bi \gg 1$). Известно [126], что в этих случаях температура поверхности нагреваемого или охлаждаемого тела близка к температуре окружающей среды. В частности, при больших значениях числа Био первые четыре корня уравнения (4.66) близки к числам:

$$\delta_1 \approx \frac{\pi}{2}, \quad \delta_2 \approx \frac{3\pi}{2}, \quad \delta_3 \approx \frac{5\pi}{2}, \quad \delta_4 \approx \frac{7\pi}{2}. \quad (4.78)$$

Для всех этих корней $\sin 2\delta_i \approx 0$, тогда из равенств (4.63) и (4.68) вытекает:

$$\theta_F(\tau) = t_F - t_0 \approx 0,$$

или

$$t_F \approx t_0.$$

Положив в равенстве (4.72) значения корней (4.74), при которых $\sin \delta_i = \pm 1$, а $\cos \delta_i \approx 0$, получаем функцию, описывающую изменение температуры в середине пластины. Эта функция получается в виде следующего сходящегося ряда:

$$\frac{\theta_m(\tau)}{\theta_0} = \frac{4}{\pi} e^{-\left(\frac{\pi}{2}\right)^2 Fo} \cdot \left[1 - \frac{1}{3} e^{-8\left(\frac{\pi}{2}\right)^2 Fo} + \frac{1}{5} e^{-24\left(\frac{\pi}{2}\right)^2 Fo} - \frac{1}{7} e^{-48\left(\frac{\pi}{2}\right)^2 Fo} + \dots \right]. \quad (4.79)$$

Задаваясь эквивалентной температуропроводностью груза $a = 2,19 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$, характерным размером пластины $s = 2,6 \text{ м}$, значением времени нагревания $\tau = 1 \text{ ч} = 3,6 \cdot 10^3 \text{ с}$, в соответствии с (4.67) запишем число Фурье, в котором время τ измеряется уже в часах:

$$Fo = \frac{a\tau}{(s/2)^2} = \frac{2,19 \cdot 10^{-6} 3,6 \cdot 10^3 \tau}{1,3^2} = 4,665 \cdot 10^{-3} \tau.$$

При том, что $(\pi/2)^2 = 2,465$, приводим предыдущее выражение к виду:

$$\frac{\theta_m(\tau)}{\theta_0} = \frac{4}{\pi} e^{-\left(\frac{\pi}{2}\right)^2 Fo} \cdot \left[1 - \frac{1}{3} e^{-0,092\tau} + \frac{1}{5} e^{-0,276\tau} - \frac{1}{7} e^{-0,552\tau} + \dots \right]. \quad (4.80)$$

Положив $\tau = 10$ ч, находим:

$$\begin{aligned} \frac{\theta_m(\tau)}{\theta_0} &= \frac{4}{\pi} e^{-\left(\frac{\pi}{2}\right)^2 Fo} \cdot \left[1 - \frac{1}{3} e^{-0,92} + \frac{1}{5} e^{-2,76} - \frac{1}{7} e^{-5,52} + \dots \right] = \\ &= \frac{4}{\pi} e^{-\left(\frac{\pi}{2}\right)^2 Fo} [1 - 0,133 + 0,0126 - 0,0017 + \dots]. \end{aligned}$$

Отсюда видно, что температурное поле в штабеле формируется таким, что уже через $\tau = 10$ ч после начала теплового процесса все слагаемые в сумме ряда (4.80), выделенного в скобках, становятся много меньше первого слагаемого. Положив $\tau = 24$ ч, легко вычислить, что второе слагаемое в скобках в выражении (4.80) уменьшится с 0,133 до 0,036, его уже можно считать пренебрежимо малым по сравнению с первым слагаемым.

Таким образом, в штабеле перевозимого груза формируется температурное поле, при котором в функции (4.80) с достаточной степенью точности всё выражение в квадратных скобках можно принять за единицу:

$$\frac{\theta_m(\tau)}{\theta_0} = \frac{4}{\pi} e^{-\left(\frac{\pi}{2}\right)^2 Fo} = \frac{4}{\pi} e^{-\left(\frac{\pi}{2}\right)^2 \frac{a\tau}{(s/2)^2}}. \quad (4.81)$$

Это будет переход к регулярному тепловому режиму.

Из выражения (4.81) легко найти время нагревания (или охлаждения) середины стенки до θ_m :

$$\tau = \frac{4}{\pi^2} \frac{(s/2)^2}{a} \ln \left(\frac{4 \theta_0}{\pi \theta_m} \right). \quad (4.82)$$

4.3. Численное моделирование термообработки штабеля с помощью нагревательной системы «теплый пол»

Задача построения математической модели процесса управления теплофизическими процессами решалась с использованием пакета ANSYS 12.0 и расчетной среды ANSYS Workbench – 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. Пользователи могут легко оценить производительность во множественных расчетных точках или сравнить несколько альтернативных конструкций. В ANSYS Workbench задачи стационарной теплопроводности решаются в модуле Thermal. При этом численно решаются уравнение Лапласа в однородном случае (при отсутствии источника тепла) или уравнение Пуассона в случае наличия источника тепла. В решении стационарной задачи теплопроводности ищется распределение температуры в узлах [102, 222]. Ранее в работах УрГУПС [123, 147] с помощью этого программного продукта рассматривались тепловые процессы для конструкций подвижного состава, подвергающегося интенсивному нагреву, и тепловые процессы при разогреве смерзшегося груза. Вопросы моделирования теплообменных процессов в кузове рефрижераторов также рассматривались в работах зарубежных авторов [225, 231, 235, 241].

Ожидаемый технический результат новых способов термообработки перевозимых СПГ при низких температурах воздуха заключается в снижении необходимости длительного подогрева. Снимаются вопросы, связанные с и ухудшением качества перевозимого продукта (например, его подмерзанием в нижней части штабеля и в зоне дверного проема), а также и расходами на содержание и эксплуатацию технологического оборудования, применяемого при обогреве ГП.

Алгоритм решения инженерно-математической задачи, описывающий процесс термообработки (охлаждения в летний период и отопления в зимний период), включает:

- разработку комбинированной модели ГП ИВ, сочетающей в себе применение жидкого азота для охлаждения и распределенной кабельной системы отопления;

- разработку тепловых процессов, возникающих при наличии вынужденной конвекции в грузовом помещении в случаях использования различных вариантов системы обогрева;

- образование в воздушной прослойке ГП слоя термообработанного газа, обладающего теплоизолирующими свойствами и создающего определенный барьер для теплообмена между грузовым помещением и окружающей средой;

- разработку гидродинамических процессов, связанных с возбуждением термогравитационной конвекции в грузовом помещении, при одновременном их подогреве, за счет использования распределенной кабельной системы отопления, устанавливаемой внутри ГП ИВ;

- создание модели ГП ИВ и проведение экспериментов в эксплуатационных условиях;

- математическую обработку результатов экспериментов и построение уравнения регрессии.

При проведении расчетов и дальнейших стендовых экспериментов использовались постулаты теории подобия с целью обеспечения соответствия полученных данных натурным условиям.

Последовательность решения данной нестационарной задачи теплопроводности выглядит следующим образом: создание модели, определение свойств материалов, геометрическое построение модели, создание конечно-элементной сетки, задание начальных условий, постановка граничных условий, сохранение модели (создание резервной копии базы данных), решение задачи, просмотр результатов расчета.

По предоставленной геометрии конструктивных элементов вагона 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 ГП. 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 4.2.

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, так как в ожидаемом диапазоне температур эти свойства изменяются незначительно.

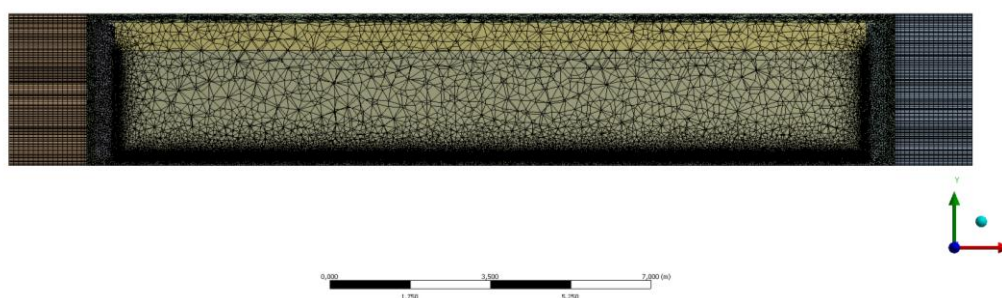


Рисунок 4.2 – Общий вид сетки в продольной плоскости ГП

Объем, занятый грузом, моделируется как твердое тело с изотропными теплофизическими свойствами. Для моделирования теплообмена через ограждающие конструкции ГП планируется применить одномерный закон Рэлея, который предполагает наличие тепловых потоков внутри тонкой стенки только по нормали к ней.

Постановка задачи

Для сохранности скоропортящегося груза исходя из требований правил перевозки СПГ были поставлены три задачи:

1. Исследование времени нагрева порожнего вагона до среднеобъемной температуры $+6\text{ }^{\circ}\text{C}$ наружных температур $-50, -40, -30, -20, -10$ и $0\text{ }^{\circ}\text{C}$.

2. Исследование временных интервалов циклов включения и выключения обогревателя в режиме транспортировки для наружных температур $-50, -40, -30, -20, -10$ и $0\text{ }^{\circ}\text{C}$. На основании результатов натурных экспериментов в вагоне № 58728809 на погрузочной площадке в Абинске (Чита, 2003 г.) принят момент включения обогревателя при среднеобъемной температуре ГП $+6,7\text{ }^{\circ}\text{C}$, а отключения – при $+9,2\text{ }^{\circ}\text{C}$.

3. Исследование времени появления температуры ниже $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ в объеме ГП после погрузки для наружных температур $-50, -40, -30, -20, -10\text{ }^{\circ}\text{C}$. Начальная температура ГП и груза из-за постоянного нарушения правил перевозки СПГ принимается равной $+5\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Схема расположения груза в грузовом помещении обогреваемого вагона представлена на рисунке 4.3.

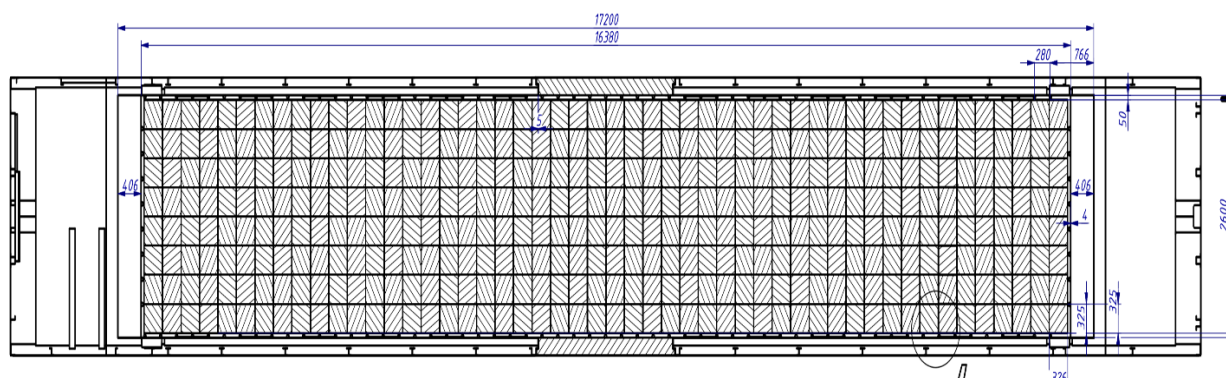


Рисунок 4.3 – Схема расположения груза в грузовом помещении обогреваемого вагона

По оценочным данным, основные теплообменные процессы в грузовом помещении будут происходить в вертикальном направлении по периметру груза. Так как боковые поверхности груза и вагона по площади в несколько раз превышают торцевые, то схема вагона была рассмотрена в его поперечном сечении (двухмерная модель).

Геометрическая модель

Геометрическая модель вагона представлена на рисунке 4.4.

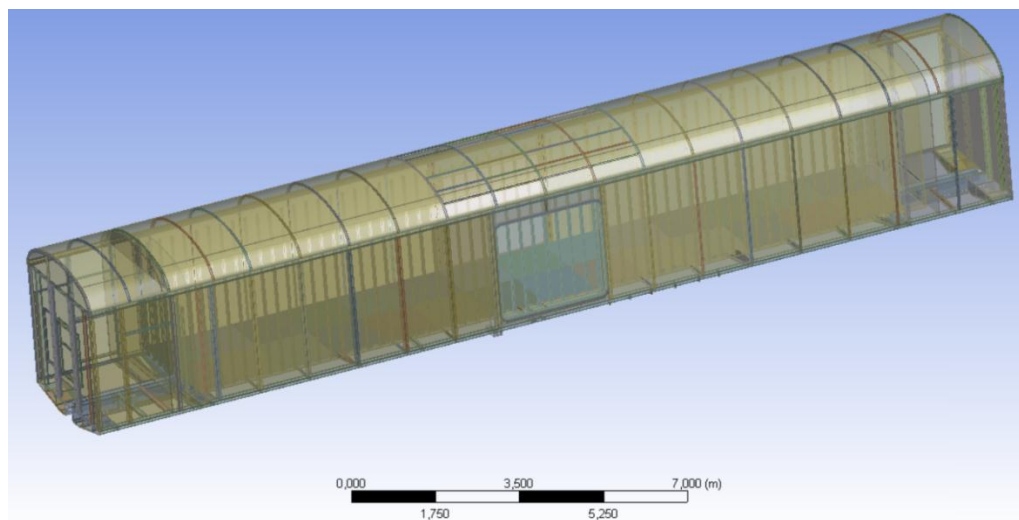


Рисунок 4.4 – Геометрическая модель вагона с термоизоляционным грузовым помещением

Согласно схеме вагона (рисунок 4.5) в поперечном сечении не отобразить расположенный кабель, поэтому из расчета объема воздуха и груза в грузовом помещении на один погонный метр обогреваемого кабеля с учетом высоты имеет место быть его эквивалентное расположение по схеме (см. рисунок 4.5).

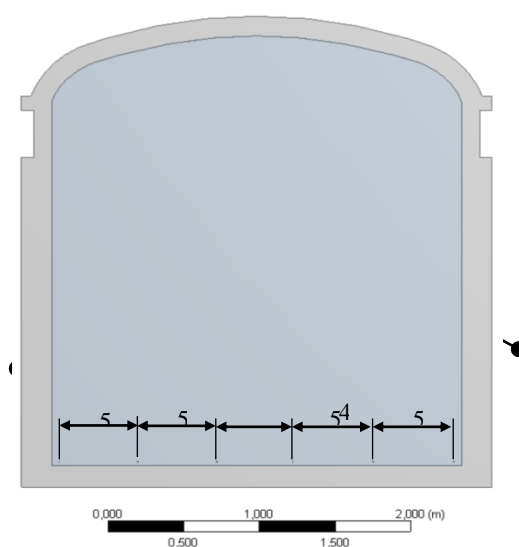


Рисунок 4.5 – Расчетная схема вагона без груза

Двухмерная модель

Из-за негерметичного внешнего каркаса вагона моделируется только ГП, герметично защищенное тепловой изоляцией из пенополистирола с плотностью 45 кг/м^3 , теплопроводностью $0,03 \text{ Вт (м}\cdot\text{К)}$.

Установка коробок с фруктовым соком производится без зазоров, поэтому груз моделируется как единый блок (рисунок 4.6) с плотностью 1050 кг/м^3 , теплоемкостью $3,75 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{К)}$, теплопроводностью $0,554 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$.

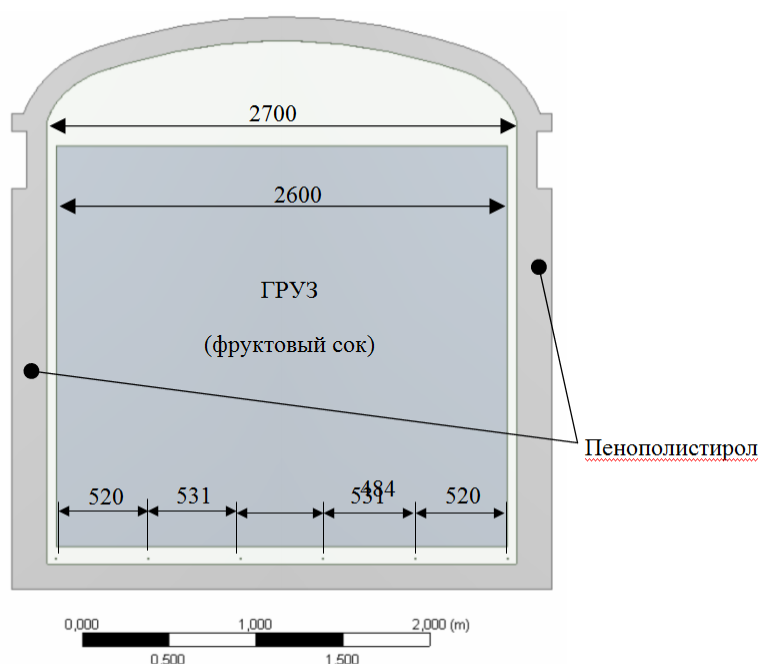


Рисунок 4.6 – Расчетная схема вагона с грузом. Двухмерная модель

Верификация эквивалентной модели

Так как основным исследуемым параметром будет среднеобъемная температура, то целесообразно получить результаты изменения среднеобъемной температуры для полной модели вагона и двухмерной модели с эквивалентным расположением нагревательного кабеля. Результаты нагретого до $+6 \text{ }^\circ\text{C}$ вагона с фруктовым соком от $-10 \text{ }^\circ\text{C}$ представлены на рисунке 4.7.

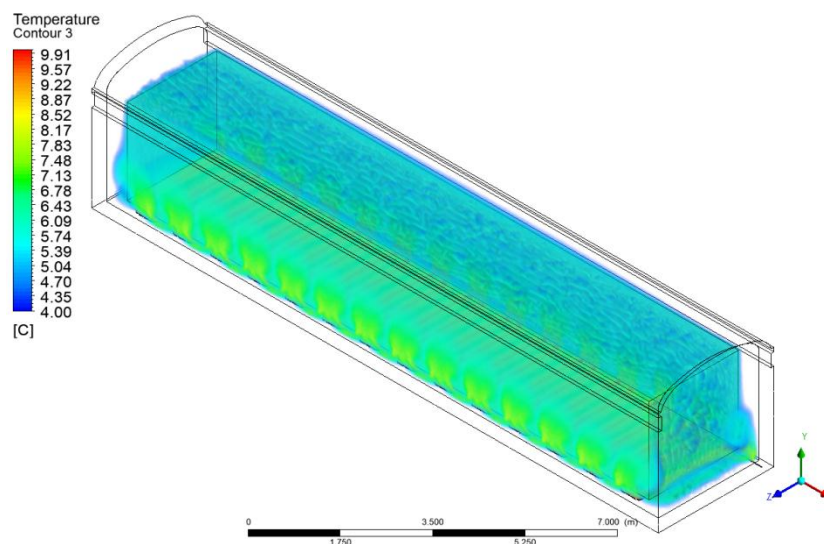


Рисунок 4.7 – Результаты нагретого от -10 до $+6$ °С вагона с фруктовым соком.

Трехмерная модель ГП с изоляцией

На данном изображении отключено отображение температуры в изоляции и на ее поверхности из-за перекрытия отображения распределения температуры воздуха внутри ГП. Также для повышения точности отображения температурных градиентов в воздушной среде ограничено отображение максимальной температуры от 10 до 65 °С из-за ее наличия только вблизи кабеля.

Зависимость температуры ГП от времени работы нагревающего кабеля представлена на рисунке 4.8.

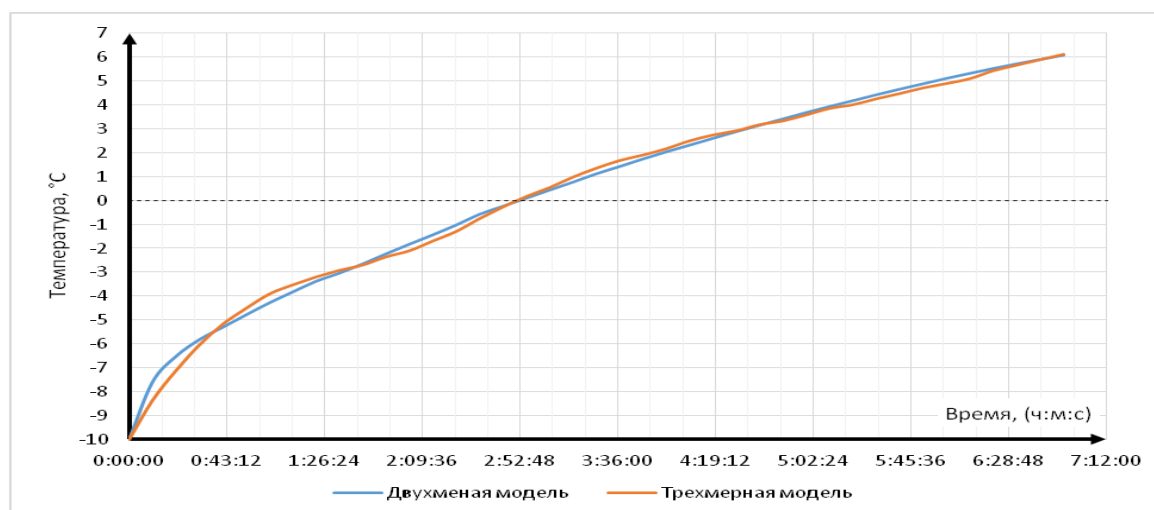


Рисунок 4.8 – Зависимость температуры ГП от времени работы нагревающего кабеля для трехмерной со штатным расположением и двухмерной модели с эквивалентным расположением кабеля

Рассмотрение результатов моделирования для двухмерной и трехмерной моделей показало, что максимальная погрешность между графиками зависимости температуры двухмерной и трехмерной модели – не более 4,8 %. Средняя погрешность между графиками зависимости температуры двухмерной и трехмерной модели не превышает 1,14 %.

На основании сравнения результатов зависимости среднеобъемной температуры от времени нагрева для двухмерной и трехмерной моделей можно сделать вывод о том, что двухмерная модель с эквивалентным расположением кабеля является применимой для дальнейшего решения задач по вагону с обогреваемым грузовым помещением. Поэтому для сокращения вычислительных ресурсов дальнейшие исследования велись на двухмерной модели.

Для анализа расчетов моделирования были приняты три случая, фактически возникающие при эксплуатации рефрижераторных вагонов, которые имеют большое практическое значение при погрузке и транспортировке.

1. Нагрев порожнего вагона. Эта ситуация возникает при необходимости перевозки термочувствительных грузов и плодоовощей в зимний период года, когда наружная температура ниже требуемого режима транспортировки. Характерное для начального периода работы отопительной системы температурное поле представлено на рисунке 4.9. При дальнейшем нагреве ГП возникают слабые конвективные восходящие потоки, которые имеют слабый градиент (рисунок 4.10). Поэтому дальнейший анализ температурных полей порожнего вагона не имеет практического смысла.

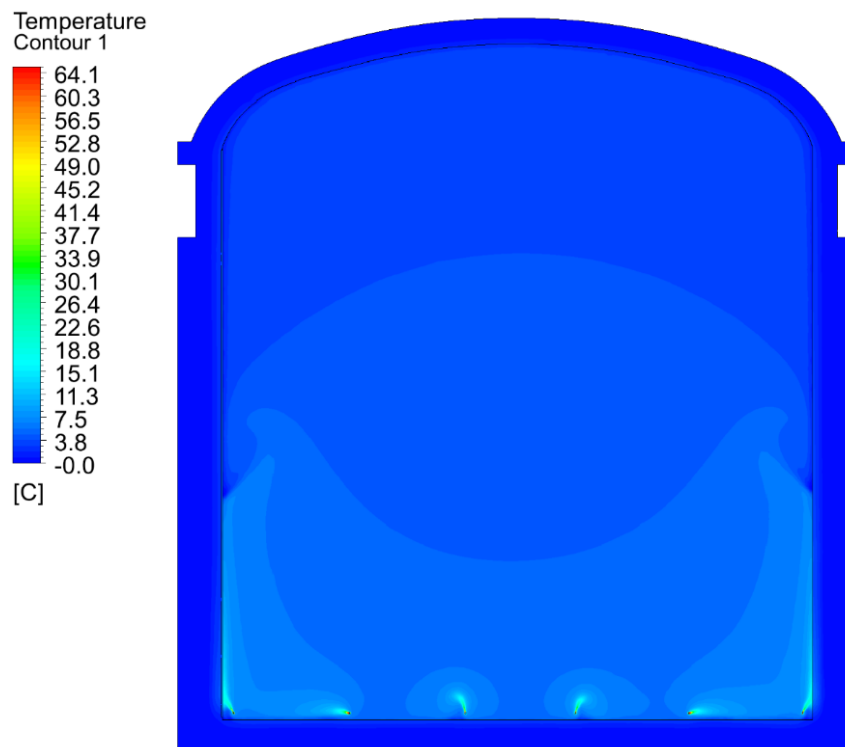


Рисунок 4.9 – Распределение температуры в вагоне через 15 мин после включения обогревающего кабеля при внешней температуре воздуха 0 °С

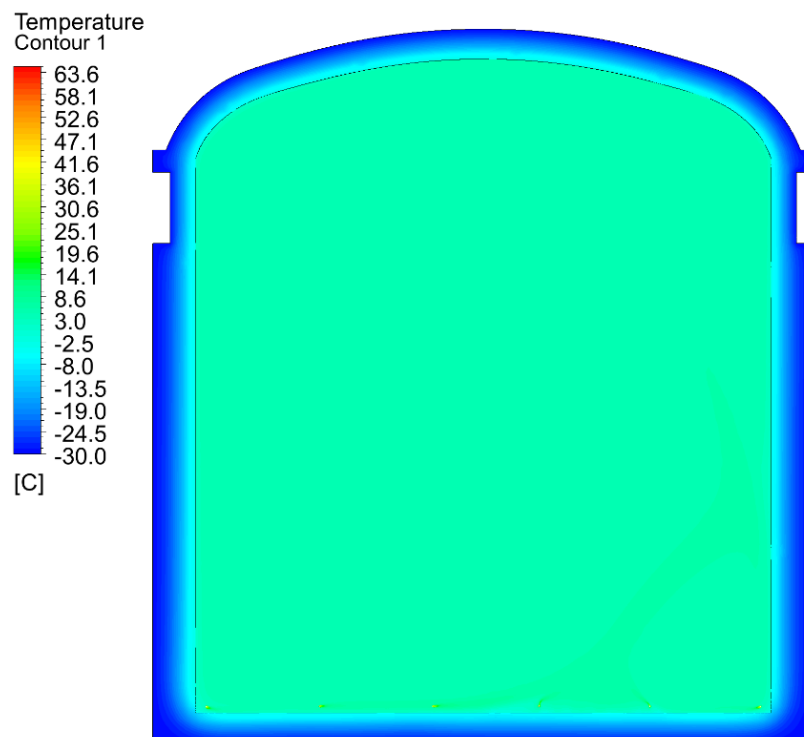


Рисунок 4.10 – Распределение температуры в вагоне через 3 ч 28 мин 20 с после включения обогревающего кабеля при внешней температуре воздуха -30 °С

Для ориентировочного расчета времени, необходимого для обогрева ГП вагона, следует использовать график, представленный на рисунке 4.11. На нем изображены зависимости времени нагрева грузового помещения до требуемой температуры $+6\text{ }^{\circ}\text{C}$ от температуры наружного воздуха. Из него следует, что наибольшее время – 7 ч 40 мин – потребуется при наружной температуре $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$.

2. Остывание груженого вагона после окончания погрузки (температура груза $+5\text{ }^{\circ}\text{C}$). Этот процесс является актуальным для случая, когда энергетическая установка вагона пока не работает. Информативны и имеют практическую пользу полученные зависимости времени до появления отрицательных температур в грузовом помещении в диапазоне от -10 до $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$. Время появления отрицательных температур на внутренней поверхности стен и пола ГП представлено на рисунке 4.12. Этот временной интервал предупреждает о возможности подмораживания груза, находящегося в грузовом помещении вагона.

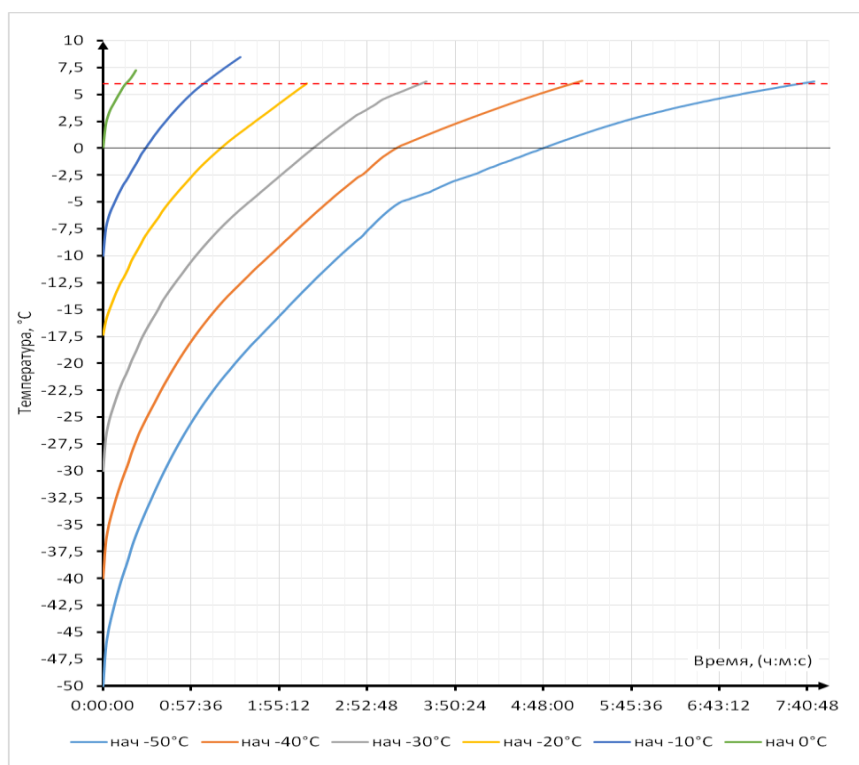


Рисунок 4.11 – Зависимость температуры вагона от времени работы одножильного нагревающего кабеля для различных температур наружного воздуха

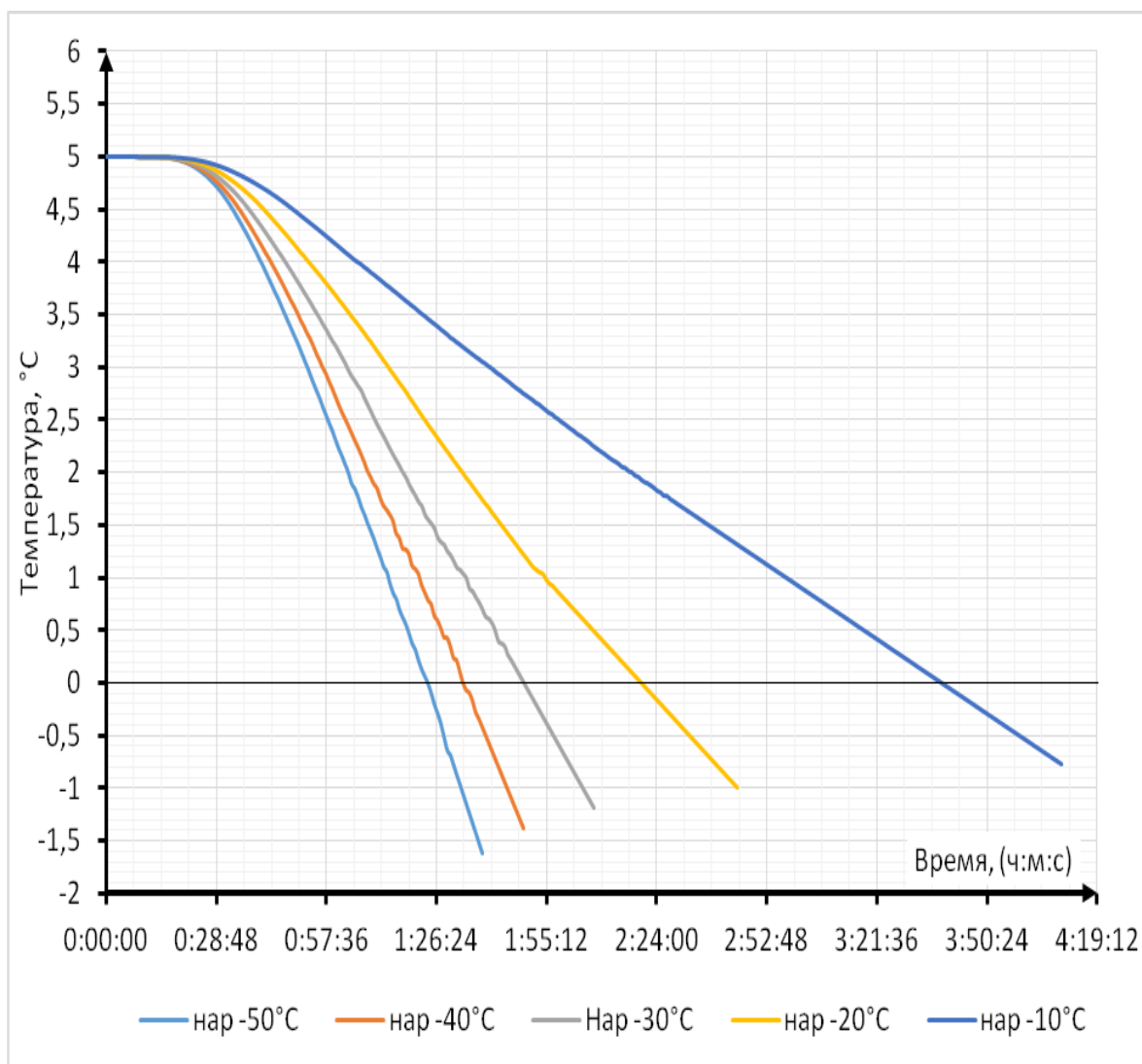


Рисунок 4.12 – Зависимость минимального значения температуры на внутренней поверхности стенок и пола ГП от времени остывания вагона

Время появления отрицательных температур на внешней поверхности штабеля груза в грузовом помещении представлено на рисунке 4.13. Анализ этих данных показывает, что подморозка крайних частей груза при $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ возможна уже через 20 минут, а при $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ этот временной интервал составляет около 1 ч.

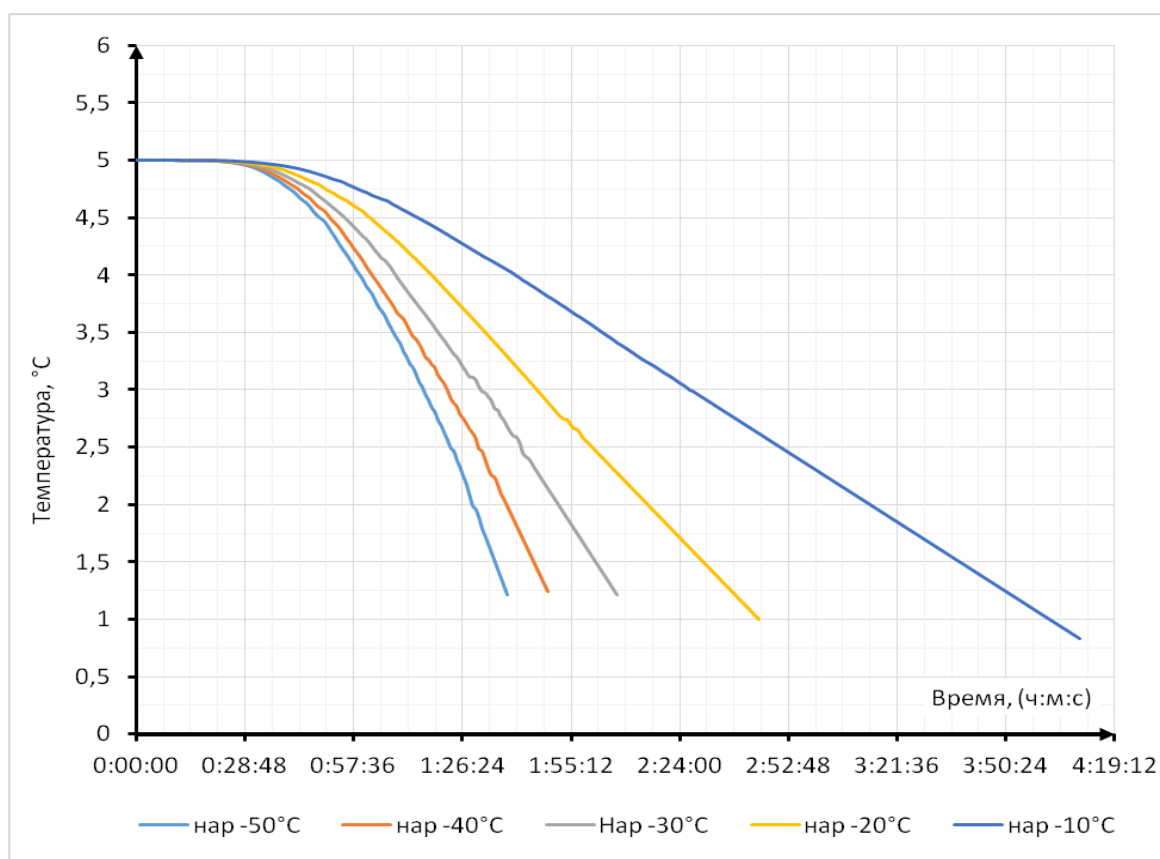


Рисунок 4.13 – Зависимость минимального значения температуры на внешней поверхности груза от времени остывания вагона

3. Работа системы обогрева в загруженном вагоне в режиме термостатирования для поддержания температуры транспортировки.

Анализ временных циклов работы нагревательного кабеля системы обогрева в грузе для различной внешней температуры, показал качественное соотношение с экспериментальными данными, полученными в результате опытных перевозок. Максимальная погрешность отклонения графиков составила не более 14,3 %.

4.4. Моделирование термообработки штабеля груза с помощью жидкого азота

В работе [71] рассматривается авторефрижератор с азотным охлаждением, который принимают как систему принудительной циркуляции газового потока, обдувающего продукт, в который впрыскивается жидкий азот из форсунки (см. рисунок 3.7).

Газовая смесь формируется в канале, образованном крышей авторефрижератора и ложного потолка, при движении от передней стенки кузова до загрузочной двери. В случае транспортировки крупных плодов (персики, яблоки и т. п.) в ящиках, конструкция которых не препятствует интенсивной циркуляции газа, штабель груза рассматривается как насадка, состоящая из элементов, равномерно распределенных по объему кузова и свободно омываемых газовым потоком. При перевозке продуктов с плотной упаковкой в ящиках (земляника, черешня и т. д.) штабель рассматривается как набор горизонтально расположенных «пластин», каждой «пластине» соответствует продольный ряд ящичков, омываемых газовым потоком.

Стенки ящичков, образующих штабель, создают естественное термическое сопротивление по направлению движения газового потока. Таким образом, скорость охлаждения продукта определяется интенсивностью распространения теплоты нормально к газовому потоку.

Процесс теплопереноса в продукте описывается дифференциальным уравнением распространения теплоты в твердом теле с учетом поперечной теплопроводности (ось абсцисс направлена вдоль кузова по направлению движения газового потока, ось ординат – нормально к нему):

$$\frac{\delta T_{\text{п}}}{\delta t} = a \frac{\delta^2 T_{\text{п}}}{\delta y^2}. \quad (4.83)$$

Граничные условия:

$$\begin{aligned} -\lambda \frac{\delta T_{\text{п}}}{\delta y} \Big|_{y=0} &= \alpha (T_{\text{г}} - T_{\text{п}} \Big|_y = 0, \\ -\lambda \frac{\delta T_{\text{п}}}{\delta y} \Big|_{y=h} &= \alpha_h (T_{\text{г}} - T_{\text{п}} \Big|_{y=h} = 0, \end{aligned} \quad (4.84)$$

где $T_{\text{п}}, T_{\text{г}}$ – температура продукта и газа соответственно;
 t – текущее время,
 α – коэффициент температуропроводности продукта;

λ – коэффициент теплообмена соответственно верхней (p) и нижней (h) поверхностей.

В случае, когда штабель рассматривается как насадка, осесимметричная задача и граничное условие принимают вид

$$\lambda \left. \frac{\delta T_{п}}{\delta y} \right|_{y=0} = 0. \quad (4.85)$$

Начальное условие: $T_{п}(0, y) = T_{по}$,

где $T_{по}$ – начальная температура продукта.

Изменение температуры газового потока по длине кузова авторефрижератора описывается одномерным дифференциальным уравнением в частных производных для усредненных по поперечному сечению ГП параметров:

$$\frac{\delta T_{г}}{\delta t} + U \frac{\delta T_{г}}{\delta x} = \frac{1}{F \rho_{г} c_{п}} \left[\alpha_{п} P (T_{п}|_{y=0} - T_{г}) + \alpha_{h} P (T_{h}|_{y} - T_{г}) + k P_{a} (T_{a} - T_{г}) \right], \quad (4.86)$$

где U – скорость газового потока;

F – площадь свободного сечения потока;

$c_{п}$ – удельная теплоемкость продукта;

P – периметр, омываемый газовым потоком;

k – коэффициент теплопередачи из окружающей среды;

P_{a} – периметр, омываемый окружающей средой;

$\rho_{г}$ – плотность газа.

Граничное условие: $T_{г}(t, 0) = T_{го}$. (4.87)

Начальное условие: $T_{г}(0, x) = T_{г}(x)$. (4.88)

Однако в этой модели есть некоторые существенные отличия от нашего случая, обусловленные как различием конструкций рефрижератора, так и принятыми допущениями.

1. Жидкий азот через форсунку впрыскивается в воздушный циркуляционный контур.

2. Реальный штабель груза нельзя рассматривать как пластину или как насадку, так как он представляет собой достаточно плотный пакет с определенными гидродинамическими параметрами.

3. Температуры газовой смеси и штабеля груза приняты равными.

В работе [71] автором была разработана математическая модель процесса охлаждения штабеля груза, в которой ГП АЖВ рассматривается как система циркуляции газового потока, обдувающего штабель груза, исходя из следующих предпосылок:

1. Штабель груза рассматривается как пористая среда.

2. Хладагент при прохождении через штабель груза находится в газообразном состоянии.

3. 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.

4. Ввиду малой разности давлений по высоте штабеля скорость проникновения газа через груз считаем постоянной.

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

$$\begin{cases} \frac{\delta T_{\text{п}}}{\delta t} = a \frac{\delta^2 T_{\text{п}}}{\delta x^2} - \gamma(T_{\text{г}} - T_{\text{п}}); \\ \frac{\delta T_{\text{г}}}{\delta t} = -v_r \frac{\delta T_{\text{г}}}{\delta x} + \gamma(T_{\text{г}} - T_{\text{п}}), \end{cases} \quad (4.89)$$

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

$$\gamma = \frac{\alpha}{c \cdot \rho \cdot h}, \quad (4.90)$$

где α – коэффициент теплоотдачи «газ – продукт»;

c – удельная теплоемкость газа;

ρ – плотность газа;

h – высота штабеля продукта, через который проходит газ.

В начальный момент времени $t = 0$ температуры газа и продукта известны.

Таким образом, начальные условия:

$$\begin{cases} T_{\text{п}}(x, 0) = T_{\text{по}}; \\ T_{\text{г}}(x, 0) = T_{\text{го}}. \end{cases} \quad (4.91)$$

Математическая модель взаимодействия штабеля продукта и проходящего через него газа представлена на рисунке 4.14.

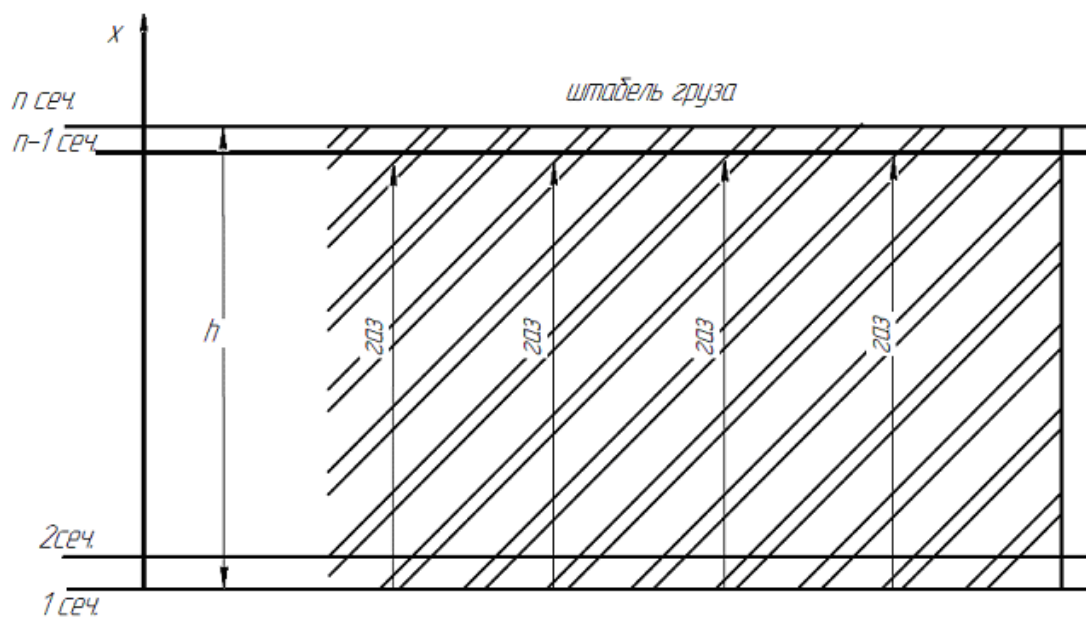


Рисунок 4.14 – Математическая модель взаимодействия штабеля продукта и проходящего через него газа

Конечно-разностная схема расчетов представлена на рисунке 4.15.

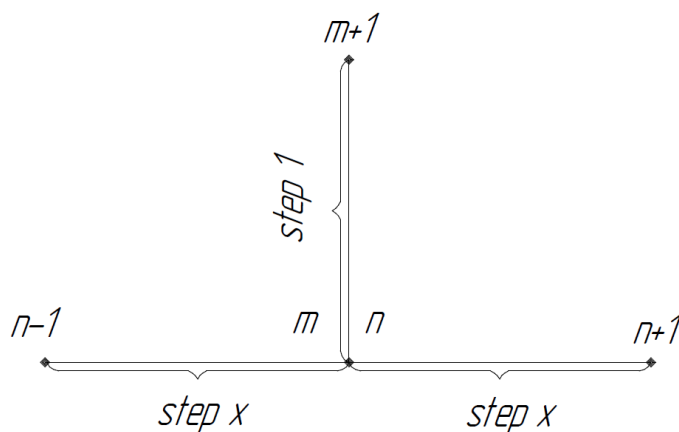


Рисунок 4.15 – Конечно-разностная схема расчетов. Граничные условия:

$$\left\{ \begin{array}{l} -\lambda \frac{\delta T_{\text{п}}}{\delta x} \Big|_{x=0} = \alpha (T_{\text{г}} - T_{\text{п}}) \Big|_{x=0}; \\ -\lambda \frac{\delta T_{\text{п}}}{\delta x} \Big|_{x=h} = \alpha (T_{\text{г}} - T_{\text{п}}) \Big|_{x=h}; \\ T_{\text{г}}(x, t) \Big|_{x=0} = T_{\text{г1}}, \end{array} \right. \quad (4.92)$$

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

4.4.1. Методология и программное обеспечение расчетов

Система дифференциальных уравнений в частных производных (4.89) с начальными (4.91) и граничными условиями (4.92) решается численным методом с помощью разностной схемы. То есть все производные системы заменяются конечно-разностными соотношениями по шаблону (см. рисунок 4.15).

Пример замены производной первого порядка:

$$\frac{\delta T_{\text{п}}}{\delta x} = \frac{T_{\text{п}} \cdot (n+1) - T_{\text{п}}(n)}{(\text{step}x)^2}. \quad (4.93)$$

Пример замены производной второго порядка:

$$\frac{\delta^2 T_{\text{п}}}{\delta x^2} = \frac{T_{\text{п}} \cdot (n+1) - 2T_{\text{п}}(n) + T_{\text{п}}(n-1)}{(\text{step}x)^2}. \quad (4.94)$$

Далее разложение производных подставляется в систему (4.89), и находятся формулы для вычисления $T_{\text{п}}[i]$ и $T_{\text{г}}[i]$ в каждой точке разбиения $[i]$.

Рассмотрим результаты моделирования со следующими исходными данными:

Начальная температура газа, °С –	5
Скорость диффундирования газа, м/с –	0,002
Время численных расчетов, с –	2400
Температуропроводность продукта, м/с –	$11,8 \cdot 10^{-8}$
Теплопроводность продукта, Вт/м ² ·К –	0,47
Коэффициент теплоотдачи, Вт/м ² ·К	6,2

Теплоемкость газа, Дж/кг·К –	1041
Плотность газа, кг/м ³ –	1,25
Теплоемкость продукта, Дж/кг·К –	3940
Плотность продукта, кг/м ³	1007

Результаты расчетов приведены на рисунках 4.16 и 4.17.

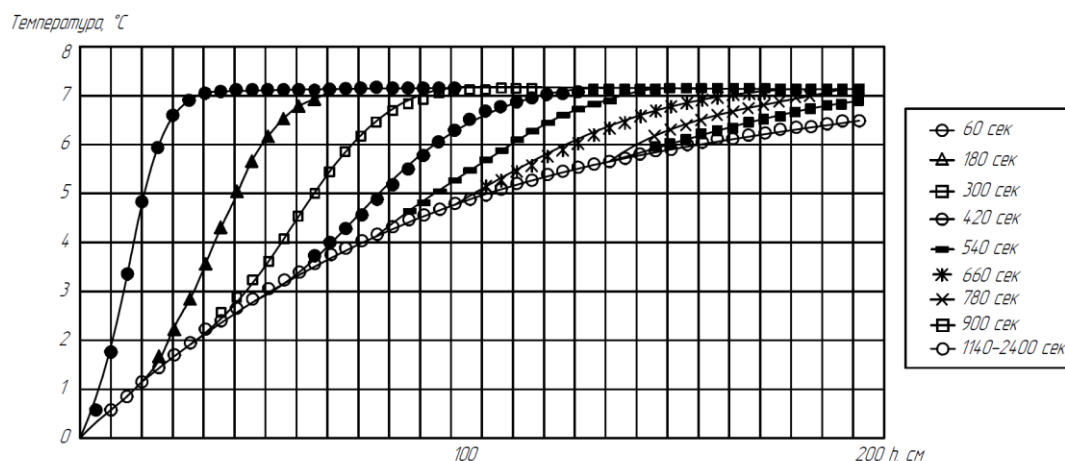


Рисунок 4.16 – Изменение температуры газа в штабеле

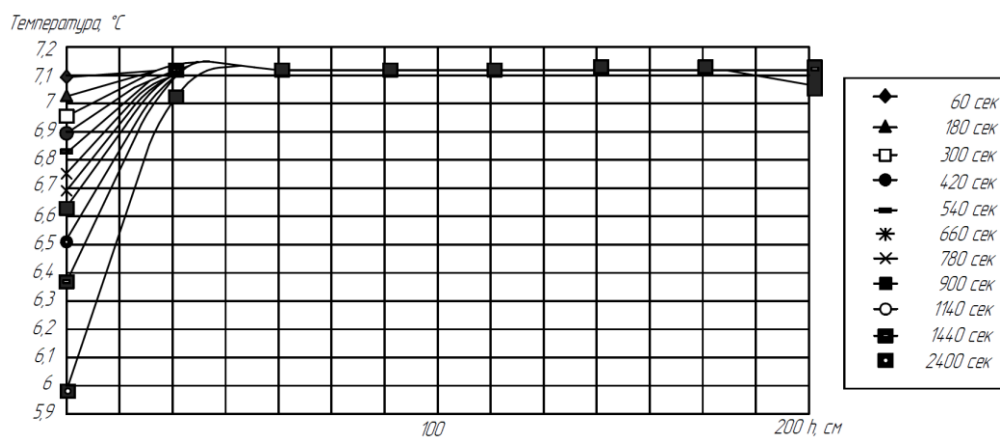


Рисунок 4.17 – Изменение температуры продукта в штабеле

Сравнение расчетных температур газа и продукта с экспериментальными данными, полученными в опытных перевозках, показывает качественное совпадение результатов. Ошибка моделирования определялась для сечений вагона, в которых устанавливались платиновые термометры ТСП-0879. Относительная ошибка моделирования не превышала 10–12 % в течение рассматриваемого периода 2400 с.

4.5. Выводы к четвертой главе

1. Для длительного хранения в стационарных хранилищах рассматриваются технологические процессы поддержания термовлажностного режима, связанные с тепловой и влажностной обработкой. Вопросы термообработки, усушки и создания оптимальных условий хранения рассматриваются с точки зрения сохранения качества продукции и минимизации ее потерь. При физическом (метод аналогий) и математическом (структурном) моделировании при описании реальных процессов тепло- и массообмена основные сложности возникают не в составлении систем простых дифференциальных или нелинейных алгебраических уравнений, а в учете граничных условий, которые описывают характер нестационарных внешних и внутренних взаимодействий системы «охлаждаемое помещение – груз».

2. Проведенный анализ результатов теоретических и экспериментальных исследований тепловых процессов в охлаждаемых изотермических транспортных средствах показал, что изучались теплообменные процессы, обусловленные распределением воздуха в грузовом помещении рефрижераторного вагона. Также различными авторами были предложены модели и расчетные схемы циркуляции воздушных потоков в грузовом помещении рефрижераторных вагонов и в штабеле груза, а также методики расчета и анализа процесса охлаждения штабеля перевозимого груза.

3. Для режима отопления СПГ в грузовом помещении вагона основным принципом является сохранение тепла, аккумулированного грузом. Работа системы отопления в этом случае сведена к компенсации теплотерь, которые зависят от температуры окружающего воздуха и от теплоизоляционных качеств ограждающих конструкций кузова вагона.

4. Предложена математическая модель термообработки штабеля груза в грузовом помещении ИВ, учитывающая естественное гравитационное движение термообработанного (теплого) воздуха вокруг штабеля груза.

5. Апробированы технические средства и конструктивное исполнение системы обогрева «теплый пол» с новой концепцией обогрева ГП, актуальной для термосопригодных грузов и плодоовощной продукции.

6. Выполнено численное моделирование термообработки штабеля с помощью нагревательной системы «теплый пол» с использованием пакета ANSYS и расчетной среды ANSYS Workbench.

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

- время прогрева порожнего вагона до $+6\text{ }^{\circ}\text{C}$ при различной температуре внешнего воздуха;

- время появления температур ниже $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ на внутренней поверхности ГП и зависимости минимальной температуры СПГ от температуры наружного воздуха;

- временные циклы работы нагревательного кабеля в груженом рейсе для различной внешней температуры

- качественно соотносятся с экспериментальными данными, полученными в результате опытных перевозок плодоовощных соков с разницей не более 14,3 %.

8. Разработана математическая модель процесса охлаждения штабеля груза азотом, в которой ГП рассматривается как система циркуляции потока газа, обдувающего штабель груза. Сравнение расчетных температур газа и продукта с данными, полученными в опытных перевозках, показывает качественное совпадение результатов. Ошибка моделирования определялась в сечениях ГП вагона по показаниям установленных терморезисторов. Относительная ошибка моделирования в течение рассматриваемого периода не превышала 10–12 %.

5. РАЗВИТИЕ СИСТЕМ АВТОНОМНОГО ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЯ ДЛЯ ИПС И СРЕДСТВ ДОСТАВКИ КРК В ТРАНСПОРТНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ ПЕРЕВОЗОК СПГ

5.1. Особенности развития контейнерных перевозок в международных транспортных коридорах в современных условиях

При выборе направлений развития и определения потребной структуры железнодорожного хладотранспорта наблюдается отраслевая заинтересованность и лоббирование своих интересов различными ведомствами в части выбора приоритетов типа подвижного состава и контейнеров. В работах [37, 43, 61, 63] были представлены результаты сравнительных расчетов полезного объема грузовых помещений изотермических вагонов, контейнеров и съемных кузовов, которые доказали, что наилучшие показатели для максимальной провозной способности железных дорог имеют вагоны. Но это может однозначно трактоваться только для внутреннего сообщения и для перевозок на пространстве стран СНГ с российской широкой колеей 1520 мм. В то же время наблюдается устойчивый рост контейнерных перевозок во всех видах сообщения и расширение номенклатуры перевозимых грузов, в том числе и скоропортящихся.

Изменяющиеся условия функционирования контейнерного рынка перевозок (пандемия, срыв графиков доставки из-за блокировки Суэцкого канала) заставили операторов морских перевозок искать новые логистические маршруты.

В работе [164] оценено состояние международного транспортного коридора (далее – МТК) «Север – Юг», который связывает Индию, Иран, страны Персидского залива через страны Кавказа и Средней Азии с Россией и странами Европы.

Основным преимуществом МТК «Север – Юг» является то, что большая часть маршрута проходит по суше и сам маршрут короче морского пути, что обеспечивает значительное ускорение доставки грузов. Развитие железнодорожной сети в Прикаспийском регионе и Центральной Азии определило несколько вариантов маршрута коридора. На рисунке 5.1 приведены

характеристики вариантов маршрута по дальности перевозки, срокам доставки и стоимости транспортировки груза. Сегодня стоимость перевозки даже по западной ветви МТК значительно превышает стоимость морской перевозки через Суэцкий канал. Ввиду этого и других факторов, снижающих эффективность и конкурентоспособность перевозок по МТК, предлагается в первую очередь организовать контейнерные перевозки на участке МТК между Россией, Азербайджаном и Ираном. Такие перевозки могут стать особенно востребованными для продовольственных товаров (в том числе скоропортящихся) по направлению с юга на север. Целесообразна организация обращения по расписанию контейнерного поезда постоянной составности по маршруту Астара–Москва – Санкт-Петербург с применением новой транспортной технологии «Грузовой экспресс 2.0» [164]. Большой грузопоток проходил через инфраструктуру Монголии, России и Казахстана. Причем последний, наряду с маршрутом через Россию, наращивал альтернативный трафик – через Транскаспийский международный транспортный маршрут (ТМТМ), в сотрудничестве с Азербайджаном и Грузией.



Рисунок 5.1 – Евразийские транспортные коридоры

В настоящее время наблюдается стремительный рост контейнерного рынка международных перевозок Китай – Европа – Китай, что сделало роль стран-транзитеров более существенной. Именно на этом направлении появился мощный транспортный игрок в лице Казахстана. Транзит через Республику Казахстан имеет ряд преимуществ, среди которых главным является значительно меньшее время доставки продукции от производителя к потребителю из стран Юго-Восточной Азии в страны Европы по сравнению с морским путем.

В 2020 г., несмотря на пандемию, объем перевозок грузов в контейнерах в сообщении Китай – Европа транзитом через территорию Казахстана составил 517,5 тыс. TEU, что на 65 % превысило уровень прошлого года. В I квартале 2021 г. объем транзитного контейнерного трафика из Китая в Европу и обратно вырос в 2,2 раза. К 2030 году объем перевозок может утроиться [146].

По сообщению Китайской национальной железнодорожной корпорации, число отправленных грузовых поездов за год увеличилось на 50 % – до 12,4 тысяч составов, а ежемесячное число поездов превысило одну тысячу. Было перевезено 1,135 млн TEU грузов, что на 56 % больше, чем за 2019 год. Общий объем загрузки контейнеров достиг 98,4 %. Расширилась также и география поездов Китай – Европа. Они были отправлены в более чем 90 европейских городов и свыше 20 стран. На 29 стало больше китайских городов, которым удалось отправить и принять 100 и более поездов Китай – Европа, до 73 увеличилось число специальных экспрессов на этом направлении [146].

Значительный вклад в обеспечение высокого качества, скорости и эффективности железнодорожных грузовых перевозок внесли страны транзита.

Выросла роль и других стран. Активно развивал свою железнодорожную инфраструктуру Узбекистан, а Иран и Афганистан теперь связаны железнодорожным сообщением. Первый поезд прибыл из Стамбула в Сиань. Важным событием стал новый сервис через Польшу и Украину, что разгрузило переход Брест – Малашевиче, где раньше часто наблюдались заторы.

Не менее интересной альтернативой в 2020 г. стал маршрут через Калининградскую область. Грузовые поезда следуют через Литву после

пересечения территории Белоруссии. Наибольший вклад в разгрузку границ в 2020 г. внесли Калининградская железная дорога и порты Калининградской области. Из морского порта грузы загружаются на фидерные суда, отправляющиеся в страны Скандинавии, Бенилюкса и Великобританию. Появились несколько примечательных маршрутов: Чэнду – Роттердам, Калининград – Росток – Верона и Сиань – Нойс – на сегодняшний день это самое быстрое железнодорожное сообщение между Китаем и Германией.

Чем больше стран вовлекаются в транзит, тем лучше они могут оптимизировать свои услуги, создав более эффективные связи между Азией и Европой.

Среди негативных тенденций развития Нового Шелкового пути в 2020 г. следует отметить дисбаланс контейнеров в Китай и из Китая. После первой волны пандемии баланс экспорта/импорта между Европой и Китаем был нарушен. Так, в ноябре Китай отправлял порядка десяти полных поездов в Европу в неделю. С европейской стороны количество поездов в Китай не превышало двух в неделю. Во многих случаях контейнеры возвращались в Китай пустыми, а иногда вообще не возвращались. В результате железнодорожный транспорт страны столкнулся с острой нехваткой контейнеров, в то время как европейские станции их накапливали. Эта ситуация повлияла на расходы, связанные с использованием контейнеров, и всемирный контейнерный индекс, который к июлю 2021 г. достиг величины 9330 долларов за сорокафутовый контейнер. Увеличение произошло более чем в 3,5 раза по сравнению с аналогичным периодом прошлого года. Проблема дисбаланса и нехватки контейнеров представляет одну из наиболее важных задач, которую железнодорожный сектор должен решить в 2021 году.

В настоящее время железные дороги Китая стараются сбалансировать поезда в восточном и западном направлениях. Правительство субсидирует только полные рейсы туда и обратно, чтобы снизить риск получения порожних контейнеров на обратном пути в Китай.

Одним из решений проблемы увеличения объемов железнодорожных грузовых перевозок в восточном направлении специалисты считают перевозки

Китай – Европа по системе холодильной цепи. Зимой поезда, следуя по этому маршруту, проходят через Казахстан, Россию, Беларусь и другие страны и регионы, где температура может быть ниже $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$. Для перевозки промышленной электроники, которая транспортируется в направлении Китай – Европа, необходима защита груза от воздействия низких температур, что отрицательно сказывается на производительности и качестве оборудования.

Ранее подобные грузы отправляли морским транспортом. Рефрижераторные контейнеры, установленные на железнодорожном подвижном составе, способны поддерживать необходимый температурный режим в течение всего времени транспортировки. Благодаря этому промышленные товары и сельскохозяйственная продукция, перевозка которых требует определенного температурно-влажностного режима, могут быть быстро доставлены по железной дороге.

Впервые такой поезд отправился в ноябре 2017 г. из Ухани через Россию в Чешскую Республику. А первый регулярный поезд с системой холодильной цепи для доставки китайской электроники в Европу был запущен 8 января 2020 г. Поезд с 50 рефрижераторными контейнерами в составе выехал из Ухани в немецкий Дуйсбург. Ухань становится главным китайским хабом для перевозок по системе холодильной цепи. Из Дуйсбурга часть груза была отправлена в голландский Арнем и французский Бордо. Весь путь от Ухани до заказчиков груза занял около 17 дней [146].

По экспертным оценкам группы компаний Asstra, прогнозируется прирост оборота железнодорожных контейнерных перевозок в направлении стран СНГ – Китай на уровне 15 %. Также ожидается, что перевозки в КРК станут регулярными, что еще более повысит привлекательность данного сегмента транспортных услуг [141].

Создание единого внутрироссийского и европейского экономического пространства ставит вопрос объединения национальных транспортных средств, пригодных для транспортировки КРК, с сохранением температурных режимов для СПГ. Для этого потребуются решение проблем совместимости систем электроснабжения железнодорожного, автомобильного и водного транспорта, а

также терминальных комплексов для хранения контейнеров. В этой связи необходимо рассмотреть один из ключевых вопросов автономной технической эксплуатации и функционирования энергохолодильного оборудования КРК, а также средств их доставки.

5.2. Системы энергоснабжения для КРК и перспективных средств доставки рефрижераторных контейнеров

Существующие в настоящее время системы электроснабжения подвижного состава не удовлетворяют современным требованиям по следующим признакам:

- 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.

Специфичность работы транспортных ХМ заключается в неравномерной тепловой нагрузке и, соответственно, требуемой холодопроизводительности. Для обеспечения пиковой нагрузки на вентилятор конденсатора требуется работа АД с более высокой частотой вращения, которая пропорциональна его объемному расходу. Для вентилятора воздухоохладителя важной является величина напора, который пропорционален частоте вращения во второй степени. Электроприводы, обеспечивающие работу УКВ и ХМ, работают постоянно в динамических режимах, поэтому оптимальное управление ими является актуальной задачей.

ИПС нового поколения 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. Для

этого необходима разработка технических и технологических решений, позволяющих реализовывать на базе основного вагонокомплекта, выполненного с высоким модернизационным ресурсом, ИВ требуемой комплектации и с заданными техническими параметрами, обеспечивающими потребительские качества в максимальной степени соответствующими требованиям рынка транспортных услуг.

В любом случае новые вагоны должны иметь надежный источник энергоснабжения дизель-генераторной установки или подвагонного генератора и могут быть выполнены в виде АРВ, ОИВ или вентилируемого изотермического вагона (ВИВ).

В рамках реализации новых технических решений проводятся исследования по разработке автономных комплексов энергоснабжения на базе подвагонных генераторов. Максимальный синергетический эффект от использования инновационных технологий для построения ИПС достигается при условии, что все или почти все компоненты и составные части согласуются по характеристикам и не составляют друг для друга дополнительных функциональных ограничений. Это должно быть цельное, гармонично работающее устройство. Одной из составных частей ИПС является источник электроснабжения, питающий электрооборудование системы обеспечения сохранности груза при перевозке. Для рационального формирования поезда при перевозке небольших партий груза желательно иметь автономный источник в виде электротехнического комплекса, основной частью которого является электрический генератор (ЭГ).

Современные тенденции развития ЭГ для автономного электроснабжения направлены на то, чтобы ЭГ мог гибко подстраиваться под изменяющиеся условия потребителя (по роду тока, частоте и амплитуде напряжения, перегрузочной способности) и в то же время был малочувствителен к качеству подводимой механической энергии (неравномерность частоты вращения, пульсации момента).

В этой связи могут быть рассмотрены возможные варианты систем энергоснабжения, которые могут использоваться для энергоснабжения как

одинокных АРВ, так и группового РПС – рефсекций с различным количеством грузовых рефрижераторных вагонов, следующих в составе ускоренного рефрижераторного поезда.

Специфической особенностью рынка скоропортящейся продукции является протяженность маршрутов перевозки, связанная с тем, что при дальности перевозки 3000 км железнодорожный транспорт проигрывает в конкурентной борьбе автомобильному, так как суточная скорость вагонов составляет около 400 км [36, 191].

Положительное влияние на рынок транспортных услуг оказала практика формирования УРП с Дальнего Востока с маршрутными скоростями более 1000 км/сут. Такие скорости движения, сопоставимые со скоростью пассажирских поездов, позволяют использовать для энергоснабжения генераторно-приводные установки с приводом от оси колесной пары тележки.

Генераторно-приводные установки с подвагонными генераторами различной мощности уже давно используются в системах энергоснабжения пассажирских, багажных и служебно-технических вагонов ДЭС. Для ИВ они не использовались ввиду малой эффективности из-за низких скоростей движения вагонов в составе грузового поезда, что не позволяло осуществлять стабильное энергоснабжение в течение всего времени перевозки.

Подвагонные генераторы, используемые на вагонах-рефрижераторах и пассажирских вагонах, работают в тяжелых условиях. В процессе эксплуатации на них действуют значительные динамические усилия, возникающие в результате вибрации и толчков, особенно при больших скоростях движения и при маневрировании. Это может привести к различным повреждениям: нарушению соединений проводов и обмоток, появлению трещин и порче электроизоляционных материалов. Поэтому при выборе конструктивного исполнения генератора стремятся использовать простые и надежные технические решения [48, 68, 87, 153].

В рамках реализации этих работ проводятся исследования по разработке автономных комплексов энергоснабжения на базе подвагонных генераторов [38, 53, 72, 75].

Анализ статистических данных графиков движения поездов показывает возможность выработки электроэнергии в среднем в течение 30 % времени движения «большой скоростью» и до 70 % (в среднем) при движении в составе УРП.

Такие скорости движения грузовых составов позволяют повысить эффективность перевозок и конкурентоспособность железнодорожного транспорта. Здесь важно отметить, что приоритетной целью формирования комбинированных сцепов является обеспечение регулярности отправок и привлечение грузоотправителей, формирование устойчивого грузопотока. Регулярные транспортировки сцепов крайне важны для СПГ, дорогостоящее хранение которых в ожидании отправки может сделать перевозку нерентабельной.

В этой связи необходимо рассмотреть возможные варианты систем энергоснабжения, которые могут использоваться для энергоснабжения как одиночных КРК, так и группы контейнеров, следующих в составе контейнерного поезда. Классификация возможных вариантов систем энергоснабжения представлена на рисунке 5.2.



Рисунок 5.2 – Системы энергоснабжения для КРК

5.2.1. ДГА для контейнерных сцепов

Для организации энергоснабжения потребителей рефрижераторных контейнеров в отечественной практике автором работ [88] была разработана технология перевозки КРК на специально оборудованных сцепах. В этом случае железнодорожный состав состоит из нескольких фитинговых платформ (от 6 до 12), который дополняется одним вагоном с дизель-генератором от рефрижераторной секции типа ZB-5 для обеспечения электроэнергией перевозимых рефрижераторных контейнеров. Следует отметить, что такое техническое решение является малоэффективным, поскольку используемый дизель-генератор рефрижераторной секции типа ZB-5 к настоящему времени находится за пределами физического и морального износа, а его ремонт фактически производится путем использования уже изношенных деталей заимствованных из списанного парка. В связи с этим надежность работы предлагаемого дизель-генератора крайне низка, а стоимость его ремонта и технического обслуживания – высока. Поэтому в настоящее время разработаны варианты энергооснащенного крупнотоннажного контейнера с несколькими (как правило, двумя) ДГА. Контейнерный модуль представлен на рисунке 5.3.



Рисунок 5.3 – Контейнерный модуль [95, 96]

Отличительной особенностью ДГА для большегрузных АРВ американских железных дорог и авторефрижераторов является сверхкомпактное расположение

его на одной раме с холодильным агрегатом. Это вызвано необходимостью минимизировать габаритные размеры для удобства вписывания в габариты автотягача. На автомобильных рефрижераторах используются два типа приводов компрессора холодильной установки: с механической передачей и с электрической. В первом случае (для небольших и внутригородских авторефрижераторов) приводной вал сальникового компрессора холодильной установки сообщается через соединительную муфту с двигателем внутреннего сгорания. Конструкция муфты обеспечивает работу с двумя скоростями – нормальной и пониженной, в зависимости от потребной холодопроизводительности холодильной машины.

Для большегрузных рефрижераторных прицепов используются, в основном, холодильные установки с полугерметичными холодильными компрессорами и электрическим приводом. Электрический генератор работает от своего ДВС, который может работать на двух скоростях – высокой (1950 об/мин, с выработкой электрического тока частотой 65 Гц) и низкой (1350 об/мин, с выработкой электрического тока частотой 45 Гц). Такое решение позволяет регулировать холодопроизводительность ХНУ, однако, кроме этого, холодильный компрессор оснащается двумя регуляторами производительности, которые работают по принципу отключения клапанов. Такие технические решения способствуют более точному поддержанию температуры в грузовом помещении, сокращению величины пусковых токов и снижению числа циклов «пуск – остановка» при малой потребной холодопроизводительности.

Для авторефрижераторов с холодильной установкой Pulsor компания Carrier разработала новую технологию E-Drive. Особенностью ее является использование в системе управления инвертора, связанного с электрическим генератором. Причем инвертор регулирует подачу электрической мощности на герметичный холодильный компрессор в зависимости от потребности в холоде. Благодаря этому компрессор постоянно работает в режиме безопасной эксплуатации (без перегрузки и лишних запусков) [25].

5.2.2. Автономная дизель-генераторная установка для индивидуального энергоснабжения КРК

В основу разрабатываемой технологии электроснабжения КРК положен зарубежный опыт перевозки рефрижераторных контейнеров автомобильным транспортом, который на сегодняшний день является наиболее отработанной технологией. Известно, что в настоящее время мировыми лидерами среди поставщиков КРК являются:

- Carrier Transicold Ltd. – контейнеры марки CARRIER;
- Thermoking Corporation – контейнеры марки THERMOKING;
- Sea Containers Ltd. – контейнеры марки SEACOLD и др.

Следует отметить, что работа КРК всех представленных фирм осуществляется от дизель-генераторов мощностью от 6 до 16,8 кВт (для 20- и 40-футовых контейнеров соответственно), которые вырабатывают трехфазное переменное напряжение 380–400 В частотой 50–60 Гц. Технические характеристики навесных ДГА типа «дженсет» представлены в таблице 5.1

Таблица 5.1 – Основные технические характеристики дизель-генераторов

Наименование характеристики	POWER LINE 69RG15	ThermoKing SGCO-3000
Ширина, мм	2324	2337
Длина, мм	706	705
Высота, мм	1078	1032
Масса (без топлива), кг	814	818
Объем топливного бака, л	492	473
Масса топлива, кг	442	425

В 2010 г. ОАО «Рефсервис» совместно с ЗАО «Русская контейнерная верфь» разработало АДГУ с дистанционным управлением на сети железных дорог РФ, предназначенную для электропитания рефрижераторных контейнеров при перевозке их железнодорожным транспортом. Установка состоит из дизель-генератора, транспортной системы и спутниковой системы мониторинга и дистанционного управления, в т. ч. и удаленного запуска ДГА. Преимуществом рассматриваемой АДГУ является наличие транспортной системы, которая

обеспечивает надёжное крепление как к контейнеру, так и к железнодорожной платформе с помощью угловых фитингов; замену рефрижераторного контейнера без снятия АДГУ с платформы; надёжную защиту дизель-генераторной установки от механического повреждения, а также от несанкционированного доступа, что позволяет эксплуатировать дорогостоящее оборудование без сопровождения. Однако часть погрузочной площади платформы занята установленной на ней транспортной системой АДГУ, что является недостатком, ухудшающим технико-экономические показатели перевозки. Расположение АДГУ на платформе представлено на рисунке 5.4.



а



б

Рисунок 5.4 – Расположение АДГУ на платформе:

а – вид на АДГУ с открытыми решетками; *б* – АДГУ на платформе

5.2.3. Централизованное энергоснабжение от локомотива через высоковольтный статический преобразователь

Выгодное географическое положение России позволяет ей получать значительные доходы от экспорта транспортных услуг, в том числе и от осуществления транзитных перевозок зарубежных стран по своим транспортным коридорам. В настоящее время по территории России проходят три общеевропейских транспортных коридора. Международный транспортный

коридор № 2 (Берлин – Варшава – Минск – Красное – Москва – Нижний Новгород) создан в целях согласованного развития транспортной инфраструктуры в Европе. Продление международного транспортного коридора № 2 до Екатеринбурга с последующим выходом коридора на Транссибирскую магистраль создаст сухопутный маршрут обеспечения связей между Европой и странами Азиатско-Тихоокеанского региона и составит серьезную конкуренцию морскому транспортному коридору.

Согласно Транспортной стратегии Российской Федерации до 2030 года предусматривается развитие транзитных перевозок СПГ между Атлантическим Транспортным Регионом (АТР) и Западной Европой, а для увеличения объемов перевозимых СПГ с помощью Российских железных дорог предполагается обеспечить переключение перевозок СПГ с крытых вагонов на рефрижераторные контейнеры.

Это в свою очередь требует создания унифицированной системы электроснабжения рефрижераторных контейнеров, пригодной для ее использования на железной дороге, автомобильном и водном транспорте.

В качестве транспортных средств для перевозки КРК предлагается использовать платформы модели 13-2116-01 или 1-13-4012М, разработанные в ОАО «АЛТАЙ ВАГОН», которые дооборудованы розетками для подачи напряжения в низковольтную магистраль, а также для подключения рефрижераторного контейнера и подачи напряжения к соседним платформам. Порядок размещения КРК и общий вид дооборудованных платформ представлены на рисунке 5.5.

Использование вагона-электростанции рассматривается как промежуточный вариант, поскольку он не в состоянии обеспечивать электроснабжение рефрижераторных контейнеров при следовании рефрижераторного состава по неэлектрифицированным участкам железной дороги. Поэтому может быть использован унифицированный контейнер-электростанция, который позволяет обеспечивать электроснабжение рефрижераторных контейнеров как при следовании РПС по

электрифицированным участкам (постоянного и переменного электрического тока), так и по не электрифицированным участкам железной дороги. Блок-схема разработанного контейнера-электростанции приведена на рисунке 5.6.



Рисунок 5.5 – Порядок размещения КРК и общий вид дооборудованных платформ:
 1 – розетка для подключения рефрижераторного контейнера; 2 – розетка для подачи напряжения в низковольтную магистраль; 3 – низковольтная магистраль для передачи электрической энергии

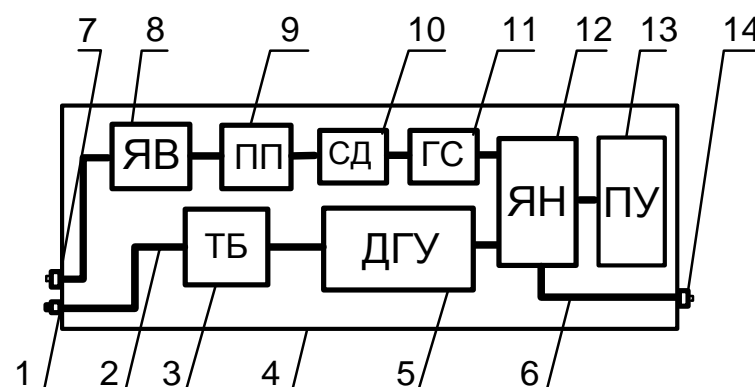


Рисунок 5.6 – Блок-схема контейнер-электростанции:
 1 – гидравлический разъем; 2 – топливопровод; 3 – топливный бак; 4 – контейнер-электростанция; 5 – дизель-генераторная установка типа А-9Д-Г-0,1 мощностью 942 кВт; 6 – низковольтный кабель; 7 – высоковольтная розетка; 8 – ящик высоковольтный; 9 – полупроводниковый преобразователь; 10 – синхронный электродвигатель типа СД-185; 11 – генератор синхронный типа ГСФ-200; 12 – ящик низковольтный; 13 – пульт управления; 14 – низковольтная розетка

Для перевозки КРК по не электрифицированным железным дорогам формируется «сцеп» (рисунок 5.7), включающий тепловоз 1 с дизель-генераторной установкой, контейнер-электростанцию 6 и ряд фитинговых платформ (от 6 до 12 штук), на которых размещаются перевозимые КРК 30.

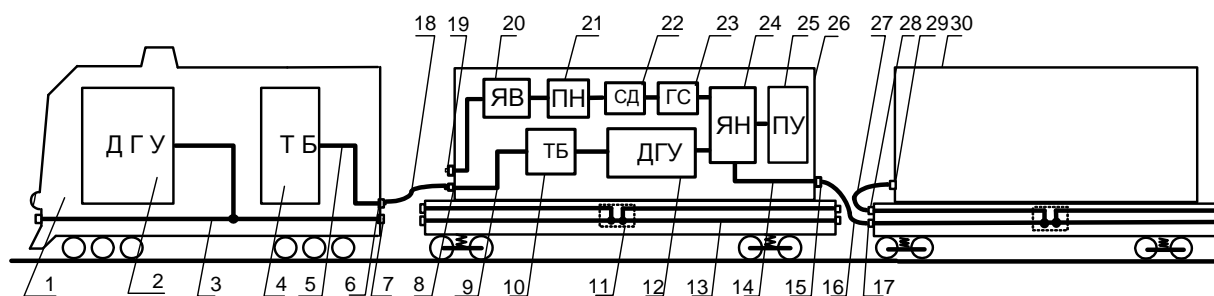


Рисунок 5.7 – Схема электроснабжения КРК от контейнера-электростанции для перевозки КРК по неэлектрифицированным железным дорогам

Электрическая энергия, выработанная с помощью дизель-генераторной установки 12, через низковольтный контактор 17 и кабель 19 подается в розетку 0, куда и подключаются перевозимые КРК 1. Для обеспечения длительной и непрерывной работы контейнера-электростанции дизельное топливо из бака тепловоза 4 через гидравлический разъем 8 и топливный трубопровод 9 поступает в топливный бак контейнера-электростанции.

Следует отметить, что в настоящее время ОАО «Коломенский завод» приступил к выпуску магистральных тепловозов типа ТЭП70БС, оснащенных системой электроснабжения пассажирских вагонов повышенной комфортности.

В случае перевозки КРК по электрифицированным железным дорогам формируется «сцеп» (рисунок 5.8), который состоит из электровоза 1 и контейнера-электростанции.

При движении РПС по электрифицированным участкам железных дорог электроснабжение КРК осуществляется в следующей последовательности. Напряжение из контактной сети 4 через токоприемник 5, высоковольтный выключатель 3, высоковольтную магистраль электровоза 6, розетку 7,

высоковольтный межвагонный соединитель 8 подается на высоковольтный контактор 9. Далее полупроводниковым преобразователем 10 высоковольтное напряжение преобразуется в трехфазное переменное напряжение 380 В, частотой 50 Гц, которое по низковольтным соединителям 18 подается к низковольтным розеткам 19, расположенным на фитинговых платформах для питания синхронных электродвигателей рефрижераторного контейнера 1.

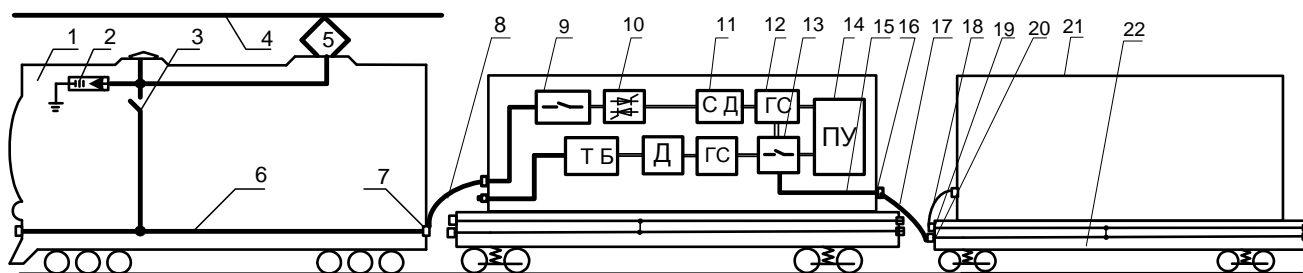


Рисунок 5.8 – Схема электроснабжения рефрижераторных контейнеров с электрической тягой поездов с питанием от контактной сети:

1 – электровоз; 2 – разрядник; 3 – высоковольтный выключатель; 4 – высоковольтная магистраль; 5 – токоприемник; 6 – контейнер-электростанция; 7 – розетка; 8 – кабель соединительный; 9 – высоковольтный контактор; 10 – преобразователь напряжения; 11 – синхронный двигатель; 12 – генератор; 13 – низковольтный контактор; 14 – пульт управления; 15 – низковольтный кабель; 16, 17, 20 – розетки; 18 – низковольтный соединитель; 19 – низковольтная розетка; 21 – рефрижераторный контейнер; 22 – фитинговая платформа

Таким образом, предлагаемая унифицированная система электроснабжения рефрижераторных транспортных средств является пригодной для работы в составах железнодорожного (электрифицированного и не электрифицированного участков), автомобильного и водного транспорта. Одновременно такая система характеризуется высокой энергетической эффективностью вследствие отсутствия промежуточных звеньев при получении и передаче электрической энергии потребителям.

Кроме этого, системы электроснабжения КРК имеют модульный принцип, по аналогии с современными отечественными пассажирскими вагонами конструирования, позволяют создавать унифицированное электрооборудование, которое можно размещать в контейнерах. Компоновка силовой части на базе IGBT-транзисторов позволяет обеспечивать существенный прогресс в области стандартизации, повышения надежности, и упрощения технического обслуживания систем электроснабжения рефрижераторных контейнеров [130].

5.3. Вентильно-индукторный подвагонный генератор

В настоящее время вентильно-индукторная электрическая машина достаточно изучена и имеет перспективы применения на железнодорожном транспорте, главным образом как двигатель в составе тяговых и вспомогательных электроприводов [87, 153-156, 162, 203, 204, 215, 243, 246]. Вместе с тем и в качестве генератора такая машина представляет значительный интерес для подвижного состава, где используется в качестве подвагонного генератора.

Основная отличительная особенность вентильно-индукторного генератора (ВИГ) заключается в отсутствии обмоток на зубчатом роторе. По сравнению с электрическими машинами других типов ВИГ конструктивно проще и технологичнее, имеет меньшие расходы меди и изоляционных материалов при практически одинаковых массах электротехнической стали. В итоге это позволяет достичь более высоких энергетических и массогабаритных показателей, снизить стоимость генератора и затраты на его эксплуатацию [87].

Компоновка ВИГ без изображения подшипниковых узлов показана на рисунке 5.9.

Применение ВИГ в системе электроснабжения ИПС позволит реализовать ряд преимуществ: обеспечит высокое значение КПД, даст возможность устанавливать род тока, величину напряжения на выходе и перестраивать их в случае любой модернизации электрооборудования ИПС; обеспечит выработку электроэнергии во всем диапазоне скоростей движения ИПС, в том числе и на

малых скоростях (менее 5 км/ч); регулируемое возбуждение ВИГ позволит плавно, без динамических ударов включать ВИГ в работу; простая конструкция ВИГ с безобмоточным ротором обеспечит высокую надежность эксплуатации.

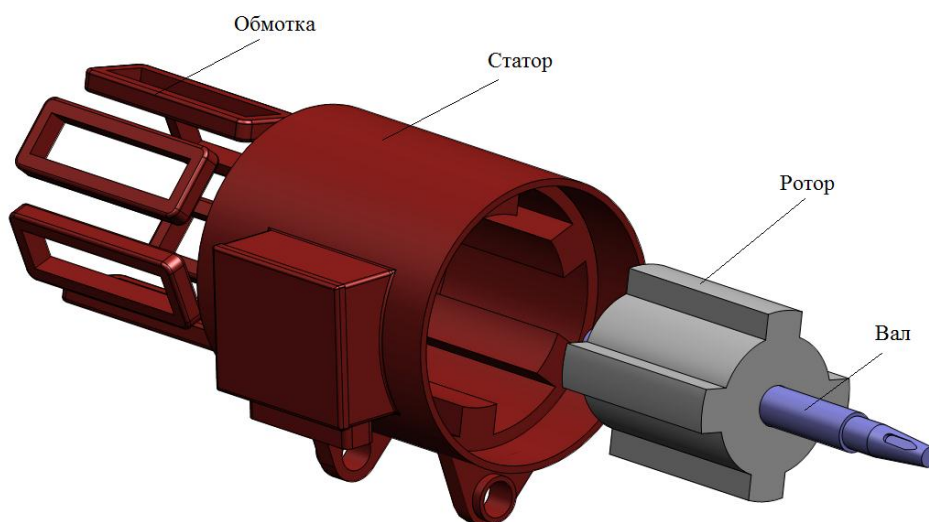


Рисунок 5.9 – Основные части ВИГ

Структурная схема системы электроснабжения ИПС показана на рисунке 5.10.

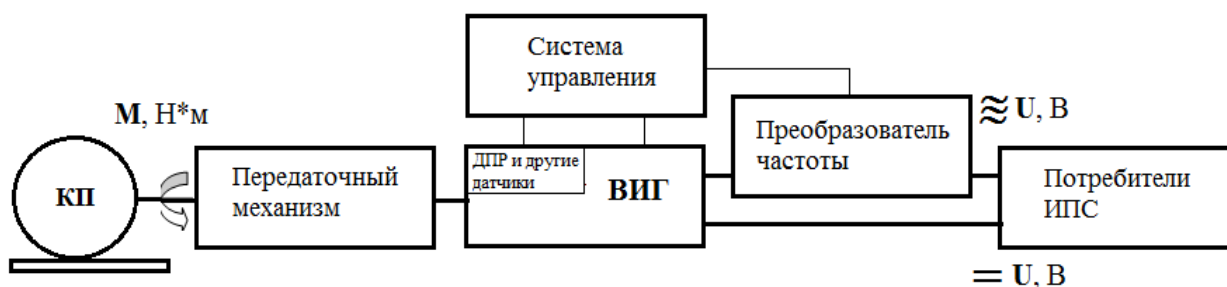


Рисунок 5.10 – Структурная схема системы электроснабжения ИПС:

КП – колесная пара, ДПР – датчик положения ротора

Вращение от колесной пары передается через передаточный механизм на вал ВИГ, где осуществляется преобразование механической энергии в электрическую. ВИГ оснащен датчиками: напряжения, положения ротора, температуры обмотки. 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. Таким образом, отсутствуют какие-либо ограничения со стороны системы электроснабжения в использовании любого электрооборудования, которое применяется или в перспективе может быть установлено для обеспечения сохранности груза при перевозке ИПС.

Применение управляемого электромагнитного возбуждения позволяет получать стабилизированное выходное напряжение при изменении частоты вращения вала генератора в широком диапазоне.

Для ИВ различных типов в РГУПС были разработаны два типа ВИГ. Первый – трехфазный ВИГ мощностью 16 кВт, для потребителей однофазного переменного напряжения 220 В. Напряжение в звене постоянного тока преобразователя ВИГ стабилизировано на уровне, равном амплитудному значению фазного напряжения $220\sqrt{2} = 311$ В, и преобразуется в переменное синусоидальное напряжение с помощью инвертора. На этой электрической машине отработывались технологические и схемные решения конструктивных элементов и системы управления [68, 184, 243].

Развитием этих работ стала разработка трехфазного низкооборотного ВИГ номинальной мощностью 20 кВт. Мощность генератора ограничена максимальным крутящим моментом ременного привода ТСО-20ТН – 565 Нм. Минимальная частота вращения 380 об/мин. Максимальная мощность ВИГ составляет 32 кВт, ограничена температурой обмоток и током силовых модулей преобразователя ВИГ [155].

Переменное трехфазное напряжение 380 В, необходимое холодильной установке вагона, получается преобразованием выходного напряжения ВИГ 540 В постоянного тока с помощью статического преобразователя.

Так как в холодильной установке имеются потребители двух видов напряжения – 380 В, 50 Гц, и 220 В, 50 Гц, то для питания потребителей

напряжением 220 В, 50 Гц применяется инвертор с функцией понижения напряжения.

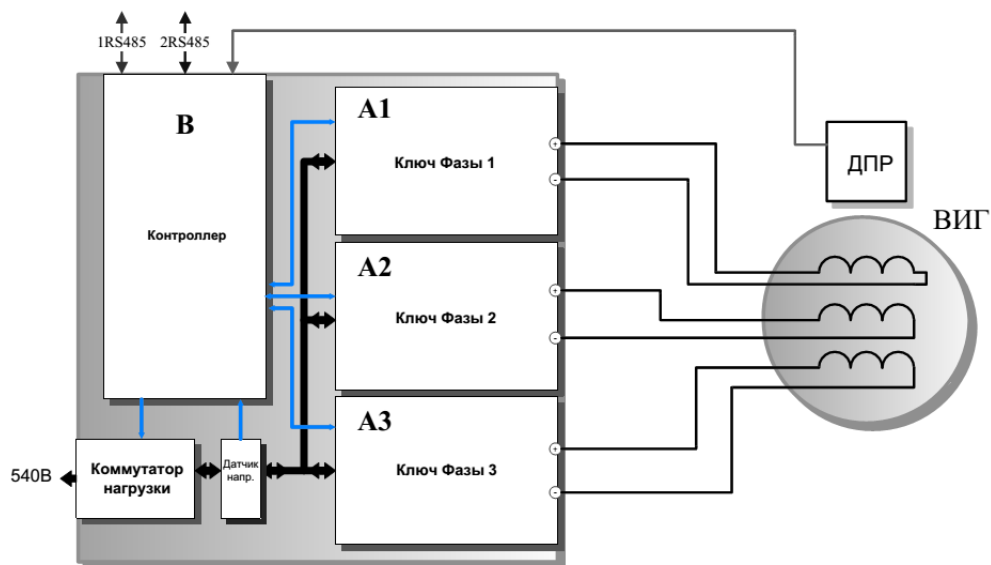


Рисунок 5.11 – Система управления вентильно-индукторным трехфазным генератором

Схемы системы управления и конструкции ВИГ представлены на рисунках 5.11 и 5.12.

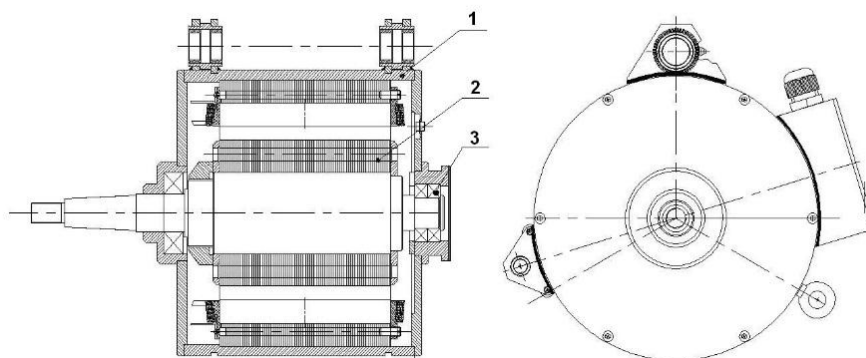


Рисунок 5.12 – Подвагонный ВИГ:

1 – статор; 2 – ротор; 3 – подшипник со встроенным ДПР

Подвагонный генератор вентильно-индукторного типа с пассивным ротором (без обмотки на роторе и коллекторно-щеточного узла) имеет

конфигурацию 18/12. Магнитопроводы статора и ротора выполнены из листовой электротехнической стали марки 411 толщиной 0,5 мм.

Подвагонный генератор снабжен подшипником типа SKF BMB-6209/080S2/EB002A со встроенным датчиком положения ротора (ДПР). Коммутация тока возбуждения выполняется по сигналам ДПР силовым преобразовательным устройством и микропроцессорной системой управления.

Микропроцессорное управляющее устройство совместно с силовым преобразователем обеспечивает рациональный режим работы и требуемые характеристики подвагонного генератора. Источником возбуждения генератора служит аккумуляторная батарея, а в случае ее отсутствия используется принцип самовозбуждения.

Поперечное сечение активной части ВИГ показано на рисунке 5.13. Магнитопроводы статора и ротора имеют выступающие полюса – зубцы (18 на статоре и 12 на роторе). Вопросы оптимизации проектирования активной части ВИГ рассматривались в работах [154, 156, 213].

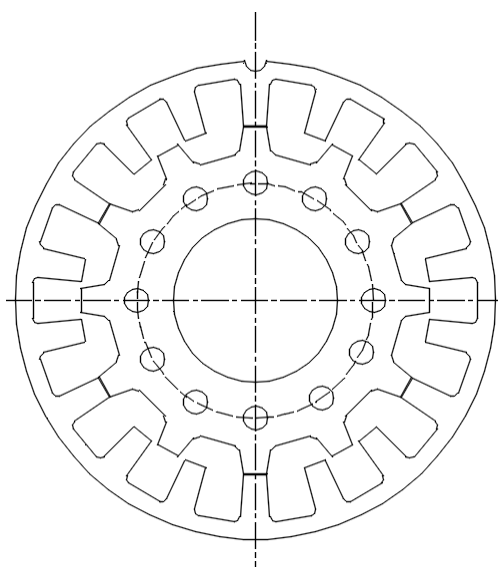


Рисунок 5.13 – Поперечное сечение активной зоны ВИГ конфигурации 18/12

Охлаждение ВИГ осуществляется через спинку статора путем обдува корпуса ВИГ вспомогательным вентилятором (на рисунке не показан).

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 внешней сети.

На рисунке 5.14 представлена принципиальная силовая схема фазы ВИГ.

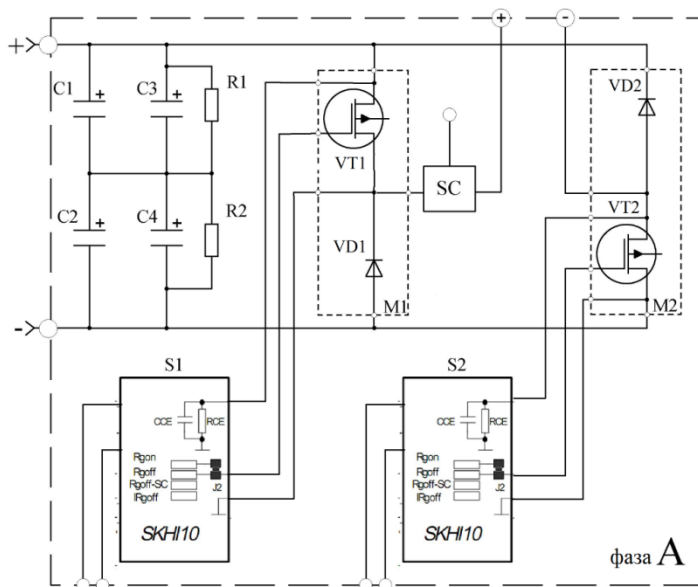


Рисунок 5.14 – Силовая схема одной фазы ВИГ

На рисунке 5.15 представлена компоновка электронного ключа управления фазой ВИГ.

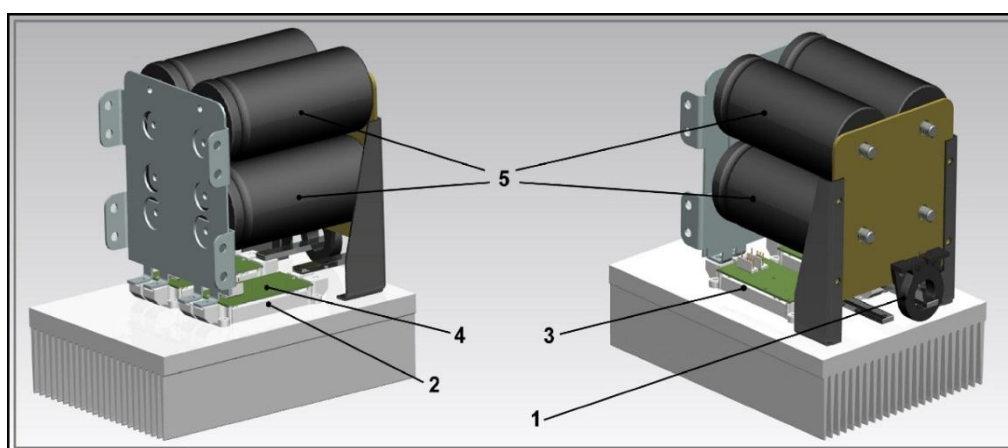


Рисунок 5.15 – Расположение элементов электронного ключа фазы ВИГ:

1 – SC-(CSLA2EN) датчик тока; 2 – транзистор IGBT верхнего ключа;

3 – транзистор IGBT нижнего ключа; 4 – S1, S2 драйверы затвора

IGBT-транзисторов; 5 – конденсаторы

Для определения динамических характеристик ВИГ были использованы известные соотношения [203]:

$$\frac{di}{dt} = \frac{1}{L_d(i, \theta)} \cdot \left(u - i \cdot R - \omega \cdot \frac{\partial \psi(i, \theta)}{\partial \theta} \right), \quad (5.1)$$

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{J} \cdot (M_\psi - M_c - b \cdot \omega), \quad (5.2)$$

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, $\text{кг} \cdot \text{м}^2$; M_ψ – электромагнитный момент на валу, Н·м; M_c – момент сопротивления на валу ВИД, Н·м; b – коэффициент трения.

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

$$M_\psi(i, \theta) = \left. \frac{\partial W_{\text{козн}}(i, \theta)}{\partial \theta} \right|_{i=\text{const}}. \quad (5.3)$$

На рисунке 5.16 показан один из вариантов расчета результирующего тормозного электромагнитного момента, действующего на ротор каждой из трех фаз ВИГ. Расчетные параметры: частота вращения вала 750 мин^{-1} ; выходная электрическая мощность 13,3 кВА. Пульсации момента неблагоприятно сказываются на виброакустических характеристиках ВИГ. Для снижения шума и вибраций генератор проектируют с использованием методов оптимизации [154, 155], увеличивают число фаз, а также используют специальные алгоритмы управления [246]. С учетом безлюдных технологий эксплуатации ИПС требования по шуму не имеют такого решающего значения, как для пассажирских вагонов.

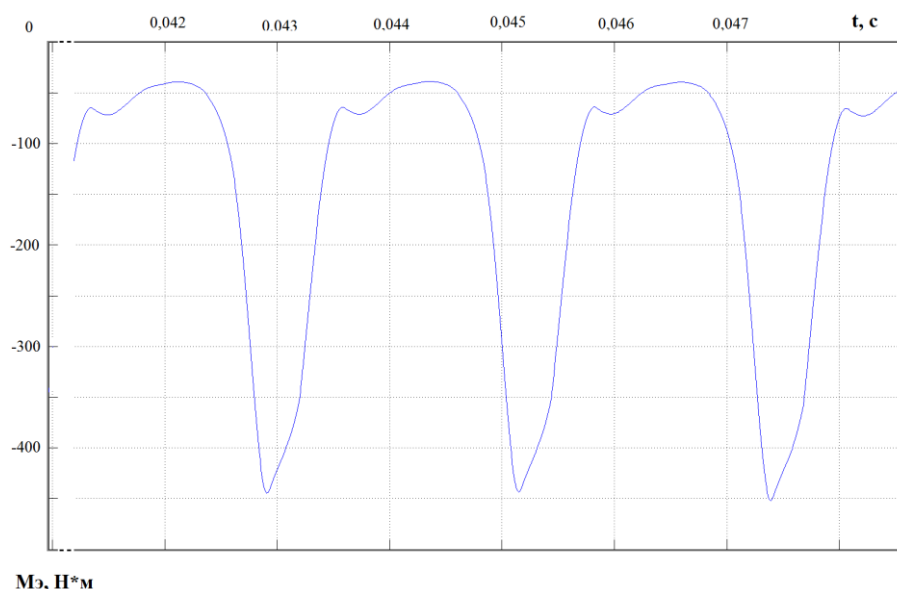


Рисунок 5.16 – Электромагнитный момент трехфазного ВИГ

Для подтверждения расчетных характеристик были проведены экспериментальные исследования ВИГ на испытательном стенде. Стабилизированное постоянное напряжение на выходе ВИГ поддерживалось 540 В. Уровень напряжения выбран из расчета использования преобразователя частоты с выходным переменным трехфазным напряжением 380 В. Результаты измерений приведены в таблице 5.2 и на рисунке 5.17.

Таблица 5.2 – Результаты измерений

Скорость, v , км/ч	Частота вращения ВИГ n , мин^{-1}	Ток нагрузки I , А	Выходная мощность ВИГ P_2 , Вт	M , Нм	$M_{\text{огр}}$, Нм	$P_{\text{огр}}$, Вт	P , Вт. Номинальный режим
15	350	5,5	11729	320	320	11729	11270
22	500	11,3	16755	320	320	16755	16750
32	750	25,3	25133	320	320	25133	20000
43	1000	45,0	33510	320	300	31416	20000
54	1250	55,0	41888	320	240	31416	20000
65	1500	62,0	50265	320	200	31416	20000
75	1750	62,0	51313	280	171	31337	20000
86	2000	62,0	50265	240	150	31416	20000
97	2250	62,0	47831	203	133	31337	20000
108	2500	62,0	43197	165	120	31416	20000
118	2750	62,0	36573	127	109	31390	20000
129	3000	62,0	29845	95	95	29845	20000
140	3250	62,0	23824	70	70	23824	20000

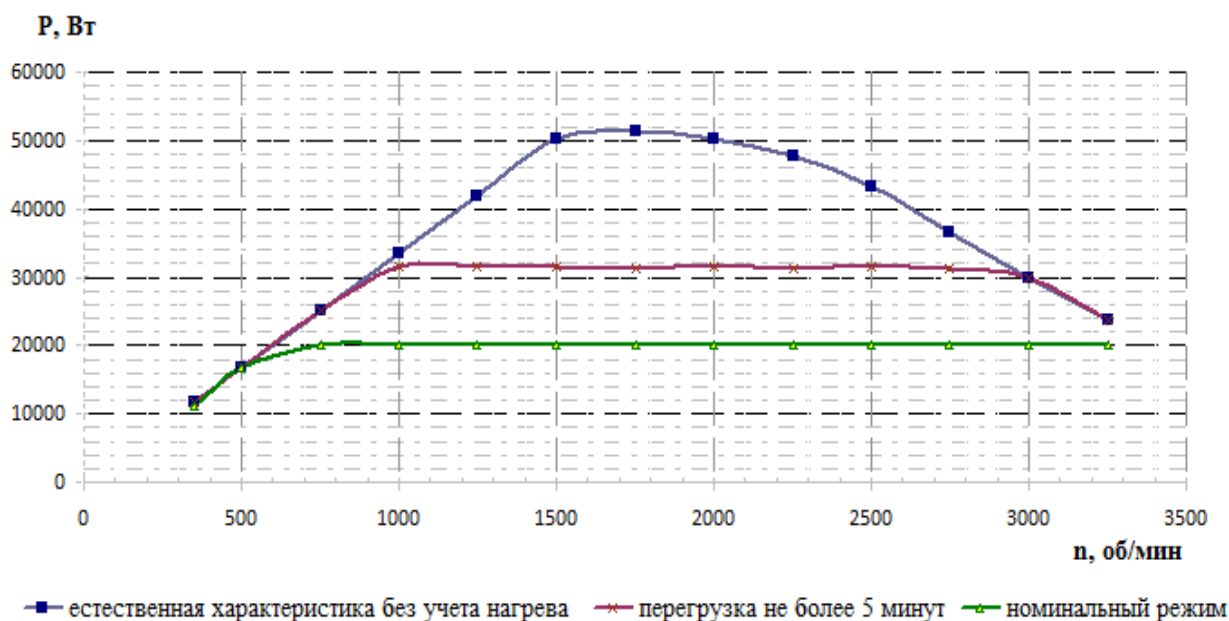


Рисунок 5.17 – Зависимость мощности генератора от частоты вращения

По исходным техническим требованиям и техническому заданию, выполненным с участием автора, в ПКБ ЦВ был разработан комплект рабочей конструкторской документации на модернизацию тележки КВЗ-И2 в части оснащения ее текстропным приводом от средней части оси типа ТСО-20 (проект М 1825.000), по которому в экспериментальном цехе ОАО «ТВЗ» была проведена модернизация тележки. Оригинальность технологии изготовления ВИГ подтверждена [189].

На рисунке 5.18 представлены тележка с установленным генератором и общий вид генератора.

Расчетные характеристики и стендовые испытания ВИГ позволяют сделать вывод о целесообразности его использования в составе электротехнического комплекса для электроснабжения ИПС. В этом случае можно сократить время работы дизель-генераторной установки рефрижераторного вагона и сэкономить, в зависимости от скоростей движения грузового поезда на маршрутах значительной протяженности, по предварительной оценке, от 30 до 70 % дизельного топлива.

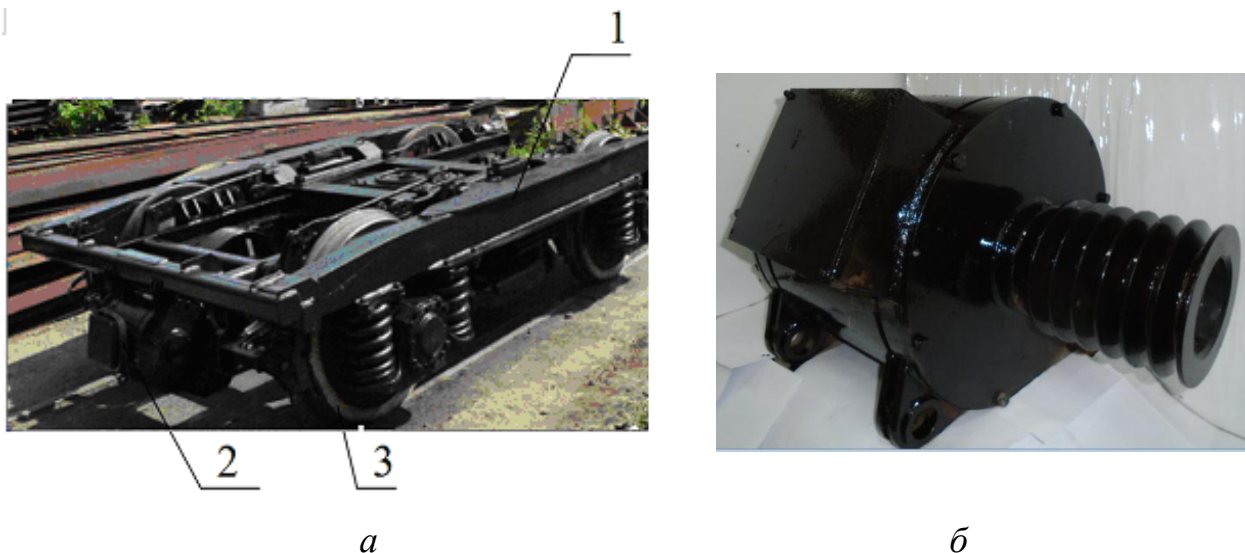


Рисунок 5.18 – Тележка с установленным генератором:

а – тележка с ВИГ в сборе (*1* – рама тележки; *2* – генератор; *3* – колесная пара);
б – общий вид ВИГ

5.4. Использование сжиженного природного газа в качестве моторного топлива для ДГА

В качестве основной энергосиловой установки для выработки электроэнергии ИПС применяются ДГА, 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 существенному уменьшению грузоподъемности вагона, которая и так невелика из-за значительного веса энергетического и холодильного оборудования. Например, в АРВ прежних моделей выпуска суммарный дополнительный вес топлива и оборудования составлял около 6 т при автономности работы до 6–10 суток в зависимости от рода груза и времени года.

Варианты систем энергоснабжения, которые могут использоваться для энергоснабжения одиночных АРВ и группового рефрижераторного подвижного состава – рефсекций с различным количеством грузовых рефрижераторных вагонов, следующих в составе ускоренного рефрижераторного поезда, рассмотрены в работе [129]. Поэтому для повышения автономности работы АРВ

без дозаправки целесообразно рассмотреть комбинированную энергосиловую установку, в которой для выработки электроэнергии используются дизель-генераторная установка и подвагонный генератор.

В работах [37, 39] предлагается использовать блочно-модульный принцип формирования специализированного оборудования для перспективного АРВ. Важными критериями при выборе вариантов систем энергоснабжения АРВ являются компактность и ограниченность в весе установки, поэтому возможности перевозки больших запасов топлива весьма ограничены. В связи с этим в качестве основного источника электроэнергии используется дизель-генераторная установка, а дополнительным источником электроэнергии при движении вагона со скоростью движения 700–1000 км/сут предполагается использовать вентильно-индукторный подвагонный генератор, установленный на тележке типа КВЗ-И2.

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

В этом случае в базовом вагонокомплекте в качестве источника энергоснабжения может быть предложен дизель-генератор, работающий на двух видах моторного топлива – дизельном или СПГМ. Компонировочные решения такого вагона представлены на рисунке 5.19.

На сегодняшний день для транспорта перспективными становятся технологии по применению в качестве моторного топлива сжиженного природного газа (метана). Вопросы транспортировки и применения СПГМ для различных видов транспорта ранее были рассмотрены автором в работах [44-46, 50, 109, 115, 116].

После начала работы завода по сжижению природного газа на Ямале (компания «Новатэк») кроме отправки на экспорт в Китай правительством была поставлена задача увеличения потребления СПГМ и на внутреннем рынке. Кроме использования его для газификации удаленных населенных пунктов целесообразно и дальнейшее применение СПГМ на транспорте в качестве моторного топлива.

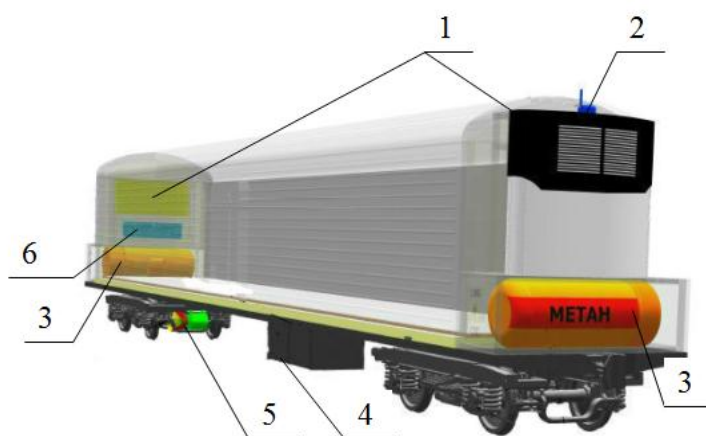


Рисунок 5.19 – Компоновка энергосилового оборудования автономного рефрижераторного вагона:

- 1 – холодильно-нагревательная установка с ДГА; 2 – система дистанционного мониторинга; 3 – криогенная топливная система; 4 – статический преобразователь; 5 – генераторно-приводная установка; 6 – криогенный газификатор

Отметим, что весь объем производимого СПГМ в России обеспечивается двумя заводами – «Сахалин-2» (запущен в 2009 г., мощность – 9,6 млн т/год) и «Ямал СПГМ» (работает с 2017 г., планируемая мощность – 16,5 млн т/год).

Кроме того, на международном транспортном маршруте «Европа – Западный Китай» в рамках Дорожной карты, подписанной на Петербургском международном газовом форуме ПАО «Газпром» и ГК «Автодор», предусматривается создание 14 криоАЗС. Также на этом маршруте в рамках программы ПАО «Газпром» развития малотоннажного производства и использования СПГМ будут построены шесть комплексов сжижения природного газа (КСПГМ).

Сжиженный метан – топливо, которое применяется во многих видах транспорта – автотранспорте, сельскохозяйственной технике, водном и железнодорожном транспорте. Использование СПГМ в качестве топлива для автомобильного транспорта закреплено в нормативных документах [86]. СПГМ – природный газ, переведенный в жидкое состояние при температурах меньше критической. Он представляет собой криогенную жидкость, получаемую из природного газа охлаждением до температуры конденсации $-161,5\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Температура его кристаллизации составляет $-182,5$ °С, плотность $0,42$ кг/л. Производят, хранят и транспортируют его с помощью специализированного криогенного оборудования. Главное преимущество СПГМ – при сжижении объем газа уменьшается примерно в 600 раз. На практике это означает, что в одинаковом объеме содержится СПГМ в 3 раза больше, чем сжатого природного газа при давлении 0 МПа. Так, при нормальных условиях в автомобильном баллоне емкостью 50 л при давлении 0 МПа содержится $10-12$ м³ природного газа в газообразном состоянии, что эквивалентно $12-15$ л бензина, при этом уменьшается масса тары для его хранения и перевозки.

На железнодорожном транспорте СПГМ используют в качестве топлива для газотепловозов и газотурбовозов.

Основные этапы начала использования СПГМ в качестве моторного топлива представлены в работе [188]. Кроме этого в период 1988–1990 гг. в РГУПС проводились НИОКР по использованию СПГМ на маневровом локомотиве ТЭМ-3 и магистральном тепловозе ТЭ 10Г.

С 2013 г. на Свердловской железной дороге ОАО «РЖД» эксплуатируется маневровый локомотив ТЭМ19 и два магистральных газотурбовоза ГТ1h. В качестве перспективного полигона для использования железнодорожного транспорта на СПГМ определен участок Войновка – Новый Уренгой, протяженность которого составляет около 1500 км.

На железнодорожной линии Обская – Бованенково запланирован перевод на СПГМ парка локомотивов Ямальского филиала ООО «Газпромтранс». Для этого на ГРС Обская предусмотрено строительство комплекса проектной производительностью $1,5$ т/ч, а также экипировочных пунктов на станциях Обская, Разъезде 15, Карская. Создание инфраструктуры СПГМ обеспечат «Газпром газомоторное топливо» и совместное предприятие «Газпром СПГМ технологии» [50].

Использование сжиженного природного газа в качестве топлива для энергетических установок рефрижераторных вагонов имеет следующие преимущества:

- экономия денежных средств на покупку топлива, так как цена эквивалентного количества сжиженного газа ниже, чем бензина или дизельного топлива;
- предохранение топливной системы от коррозии и загрязнений;
- экологическая чистота;
- возможность утилизации удельной теплоты парообразования (до 10 % потребной холодопроизводительности);
- невозможность хищений (его невозможно слить).

В работе [109] рассмотрены вопросы использования холода газификации СПГМ для различных видов транспорта и оценены возможности использования его для транспортных систем кондиционирования. Как показывает опыт эксплуатации дизель-генераторных установок, применяемых для энергоснабжения КРК, часовой расход дизельного топлива генераторной установкой при максимальной нагрузке составляет $Q_{\text{дт}}^{\text{час}} = 4$ л / ч [109]. Перед поступлением топлива в дизель СПГМ испаряют и нагревают до температуры окружающей среды. На эти процессы потребуется около 800–850 кДж/кг, в зависимости от требуемой температуры [109]. При этом возможно использование холодопроизводительности СПГМ от 0,72 кВт для индивидуальной энергоустановки КРК до 4,9 кВт для каждого ДГА вагона ДЭС. В случае использования СПГМ для других типов ИПС потребуется разработка схемных решений топливной системы транспортного средства с увязкой работы его холодильной установки. На первом этапе с учетом обеспечения резервного запаса топлива может быть использована система БКТ-850 производства ОАО «Криомаш-БЗКМ» объемом 850 л [50].

Расход СПГМ энергосиловой установкой определим теоретическим путем.

Массовый расход дизельного топлива определим по формуле

$$Q_{(\text{М})\text{дт}}^{\text{час}} = Q_{\text{дт}}^{\text{час}} \cdot \rho_{\text{дт}}, \quad (5.4)$$

где $\rho_{\text{дт}}$ – плотность дизельного топлива, кг/л;

$$Q_{(\text{М})\text{дт}}^{\text{час}} = 4 \cdot 0,86 = 3,44 \text{ кг / ч.}$$

Массовый расход СПГМ определим по формуле

$$Q_{(M)СПГ}^{час} = Q_{(M)ДТ}^{час} \cdot \frac{q_{ДТ}}{q_{СПГ}}, \quad (5.5)$$

где $q_{ДТ}$ – удельная теплота сгорания дизельного топлива (таблица 5.3);

$q_{СПГ}$ – удельная теплота сгорания СПГМ (см. таблицу 5.3).

Таблица 5.3 – Характеристики видов топлива

Вид топлива	Удельная теплота сгорания q , кДж/кг	Плотность, кг/л
СПГМ	48 500	0,422
Дизельное топливо	42 700	0,860

Массовый расход СПГМ будет равен

$$Q_{(M)СПГ}^{час} = 3,44 \cdot \frac{42\,700}{48\,500} = 3,03 \text{ кг / ч,}$$

Определим расход СПГМ в единицах объема

$$Q_{СПГ}^{час} = \frac{Q_{(M)СПГ}^{час}}{\rho_{СПГ}}, \quad (5.6)$$

где $\rho_{СПГ}$ – плотность СПГМ (см. таблицу 5.1);

$$Q_{СПГ}^{час} = \frac{3,03}{0,422} = 7,17 \text{ л / ч.}$$

Для решения вопроса использования СПГМ в качестве моторного топлива в НПО «Гелиймаш» и ОАО «Криомаш-БЗКМ» разработаны криогенные топливные баки (рисунок 5.20) и теплообменники-газификаторы, которыми можно оснащать дизельные двигатели различной мощности.



Рисунок 5.20 – Криогенный топливный бак

Криогенный топливный бак (см. рисунок 5.20) представляет собой горизонтальный двустенный сосуд Дьюара с высоковакуумной многослойной изоляцией, трубопроводами, холодной арматурой, регулирующими и предохранительными устройствами.

В НПО «ГЕЛИЙМАШ» разработан и изготавливается типоразмерный ряд криогенных топливных баков емкостью от 100 до 415 литров на рабочее давление от 0,5 до 1,6 МПа. Баки предназначены для обеспечения метаном двигателей различных конструкций и изготовителей.

Рабочее давление выдаваемого продукта обеспечивается подъёмом давления в криогенной емкости с помощью встроенного испарителя, а СПГМ испаряется в атмосферном испарителе за счет тепла окружающей среды. Таким образом, до 10 % потребной холодопроизводительности возможно получать за счет газификации СПГМ, размещая атмосферный испаритель в грузовом помещении вагона.

В ОАО «Криомаш-БЗКМ» разработаны компактные газификаторы на базе криогенных топливных баков объемом от 300 до 815 л. Характеристики криогенных топливных баков представлены в таблице 5.4.

Таблица 5.4 – Характеристики криогенных топливных баков

Наименование характеристики	Значение
Вместимость бака	185/850 л
Максимальное давление топлива в баке (режим хранения)	1,6/1,2 МПа
Рабочее давление в системе	до 0,6 МПа
Расчётное время бездренажного хранения СПГМ в баке при 0,1 МПа	14/21 сут
Геометрические размеры бака: диаметр длина	518/916 мм, 1500/2200 мм
Масса порожнего бака	150/260 кг

Габаритно-весовые характеристики этого оборудования позволяют разместить его на вагоне. Компонировочные решения по размещению энергохолодильного и криогенного оборудования представлены на рисунке 5.19.

5.4. Выводы к пятой главе

Дано обоснование использования новых технических решений для автономной энергоэффективной системы электроснабжения для ИПС. Предложен подход к разработке системы автономного электроснабжения ИПС, который позволит обеспечить в полной мере потребности действующих и перспективных систем электрооборудования для различных типов ИПС.

Рассмотрены возможные варианты систем энергоэффективного электроснабжения, которые могут использоваться как для одиночных АРВ, так и группового рефрижераторного подвижного состава – рефсекций с различным количеством грузовых рефрижераторных вагонов, следующих в составе ускоренного рефрижераторного поезда [183]. Поэтому для повышения автономности работы АРВ без дозаправки рассмотрена комбинированная энергосиловая установка, в которой для выработки электроэнергии используются дизель-генераторный агрегат и подвагонный генератор.

Предложено для перспективного АРВ использовать для комплектования систем энергоснабжения блочно-модульный принцип формирования энергохолодильного оборудования.

Для систем энергоснабжения АРВ использование сжиженного природного газа в качестве моторного топлива и дополнительного источника холода газификации СПГМ имеет перспективы за счет повышения автономности вагона и невозможности хищений топлива при его эксплуатации по безлюдным технологиям.

Снижение эксплуатационных расходов достигается за счет уменьшения стоимости топлива и использования удельной теплоты парообразования СПГМ для охлаждения перевозимого скоропортящегося груза.

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.

6. ОБОБЩЕННЫЕ КОНСТРУКТИВНЫЕ СХЕМЫ ИПС ДЛЯ ТРАНСПОРТНОЙ СИСТЕМЫ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ РОССИИ

6.1. Компоновочные решения энергохолодильного оборудования АРВ

Использование агрегатированного энергохолодильного оборудования и модернизационный ресурс – эти два принципа положены в основу анализа и формирования универсальной конструкции кузова рефрижераторного вагона. Обеспечение трансформации специализированного энергохолодильного оборудования возможно по двум направлениям модернизации. Первое предусматривает комплектацию базовым оборудованием на заводе при формировании типа и модели ИПС с различным исполнением. Второе получается при формировании съемным оборудованием переменной комплектации в зависимости от конкретной потребности при эксплуатации вагона грузоотправителем.

Основными достижимыми показателями являются минимальная масса тары и максимальный полезный объем ГП. Выбор конструктивного исполнения кузова ИВ 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 основные технико-экономические параметры вагона (полезный объем и длина ГП), проверены технические возможности их изготовления, выполнены базовые расчеты прочности с целью определения принципиальной возможности обеспечения нормативных показателей, оценены преимущества и недостатки каждого варианта при эксплуатации вагона.

Анализ конструктивных схем расположения ХНУ в изотермическом кузове представлен на рисунке 6.1.

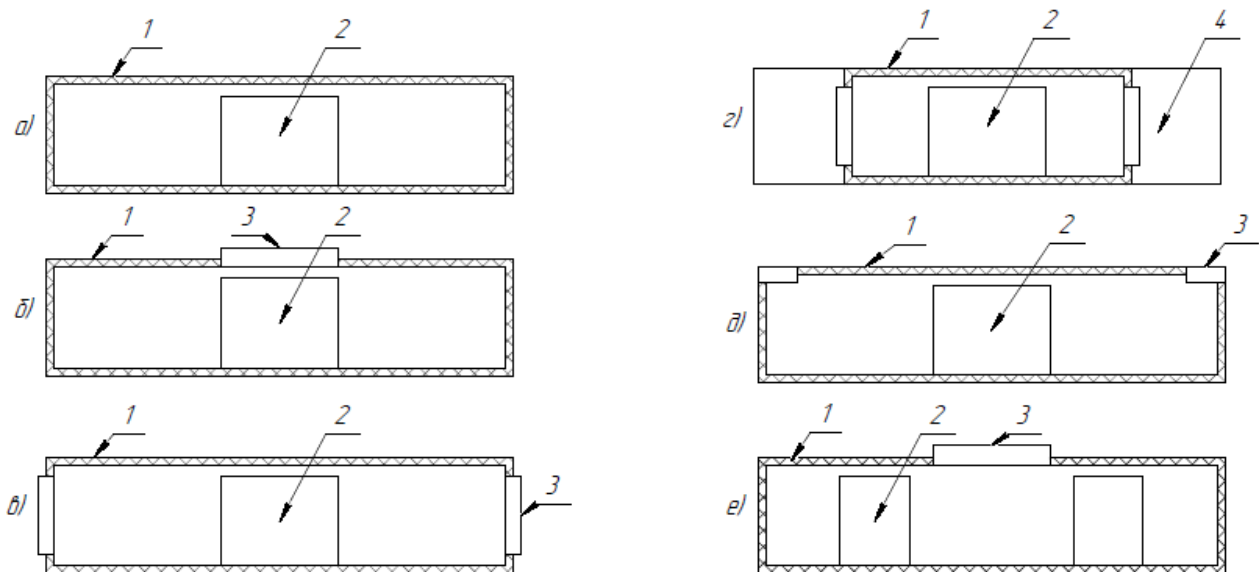


Рисунок 6.1 – Конструктивные схемы расположения ХНУ в изотермическом кузове:
 1 – изотермический кузов; 2 – погрузочная дверь; 3 – холодильно-нагревательная установка; 4 – машинное отделение

В качестве базового варианта принята металлоконструкция кузовов рефрижераторных вагонов производства Брянского машиностроительного завода (БМЗ) различных моделей [30].

Кузов вагона представляет собой сварную цельнометаллическую несущую оболочку, подкрепленную элементами жесткости. Боковые стены кузова выполнены без вырезов для окон и имеют только две погрузочные двери, по одной на каждой боковине напротив друг друга. Энергохолодильное оборудование может располагаться посередине кузова или в торцевых частях кузова, где для него выделены зоны размещения, оборудованные запорными устройствами и элементами крепления. Для размещения СПГМ в грузовом помещении вагона установлены напольные решетки, которые служат для размещения груза и одновременно являются элементом системы циркуляции и распределения термообработанного воздуха.

Кузов вагона – цельнометаллический сварной. За основу принята обобщенная модель кузова грузового рефрижераторного вагона пятивагонной секции БМЗ. Конструкция кузова отражает особенности планировки грузового и

машинного отделения вагона, а также особенности конструкции различных типов холодильного оборудования. Например, в опытных вагонах с жидкоазотным охлаждением (модель 16-3008) кузов был выполнен с двумя машинными отделениями и усилением пола под ними, монтажными люками в крыше по консолям кузова. Консольные части крыши, имеющие люки, усилены за счет установки дуг из гнутого уголка $80 \times 80 \times 4$. Обвязка люков выполнена из прокатных угольников $90 \times 56 \times 8$, по скатам крыши приварены дуги из гнутых угольников $80 \times 63 \times 4$. Наружная обшивка кузова выполнена из гофрированного профиля толщиной 2 мм с шагом гофр 250 мм, из низколегированной стали марок 10ХНДП и 09Г2Д.

Стойки стен выполнены из гнутого профиля (зет $80 \times 40 \times 3$) стали 09Г2Д, дуги крыши – из гнутого угольника $60 \times 40 \times 3$, продольная обвязка крыши – из гнутого швеллера $120 \times 60 \times 4$ той же марки стали.

Рама вагона сварной конструкции с хребтовой балкой из двух зетов высотой 310 мм стали 09Г2Д или 10Г2БД-12 ГОСТ 19281-2014 [80] с соблюдением требований [81, 82].

Боковые продольные балки изготовлены из горячекатаных угольников сечения $125 \times 80 \times 8$ стали 09Г2Д. Поперечные элементы рамы выполнены из гнутых профилей различного сечения.

Консольные части рамы в зоне крепления холодильного оборудования усилены поперечными балками (4 шт. на каждую консоль) из стали 09Г2Д или 10Г2БД-12. Продольные угольники консольных частей рамы усилены за счет приварки к ним прокатного угольника $125 \times 80 \times 8$ и образуют в сечении швеллер.

Настил рамы вагона выполнен из листовой стали толщиной 2 мм, а в зоне буферных балок – из металлического рифленого листа толщиной 4 мм.

С целью защиты кузова вагона от коррозии внутренние и наружные поверхности кузова грунтуются и окрашиваются. Поверхность рамы и внутренние поверхности стен ГП на высоту 300 мм от рамы, стойки на всю высоту, дуги крыши и нахлестка листов обшивки покрыты слоем антикоррозионной мастики 579.

Кузов вагона теплоизолируется пенополистиролом марки ПСБ. Плиты полистирола уложены в два слоя, с перекрытием стыков плит первого слоя плитами 2-го слоя. Между первым и вторым слоем пенополистирола и между вторым слоем и внутренней обшивкой установлена паронепроницаемая пленка.

Внутренняя обшивка стен и крыши выполнена из алюминиевых листов сплава АМГ2М толщиной 2 мм, гофры и лобовой щит – из сплава АМГ6М. Листы свариваются в щиты и крепятся к деревянным деталям армировки шурупами. Конструкция ложного потолка выполнена из листовых панелей из алюминий-магниевого сплава АМГ2М толщиной 2 мм.

На металлический настил пола приварены шпильки и скобы для крепления деревянных брусков армировки пола. Бруски армировки расположены вдоль вагона. Между брусками уложены плиты теплоизоляции, закрытые сверху деревянным настилом досок толщиной 45 мм, расположенных поперек вагона. Влагозащитное покрытие пола, выполненное из биологически нейтральной листовой резины толщиной 4 мм, приклеено к доскам клеем 88Н.

Для удаления талых и промывочных вод из ГП вагона в полу предусмотрены два сливных отверстия с гидравлическими затворами, конструкция которых аналогична сливным приборам рефрижераторных секций БМЗ различных моделей.

Исходя из анализа конструкций отечественных вагонов и РПС зарубежного производства, а также с учетом передового опыта вагоностроения и холодильного машиностроения могут быть рассмотрены следующие варианты [43,58].

Вариантность исполнения объяснялась необходимостью универсализации технологии изготовления и оптимизации массы тары кузовов для ИВ различного назначения. В процессе разработки проекта были созданы объемные модели кузовов, проверена техническая возможность их изготовления. Выполнены прочностные расчеты с целью определения принципиальной возможности обеспечения нормативных показателей при различных вариантах размещения холодильно-нагревательного оборудования.

Первый вариант (см. рисунок 6.1, а) – изотермический кузов вагона-термоса. Замкнутая оболочка без вырезов, кроме погрузочных дверей. Классическим примером реализации такой конструкции можно считать вагон-термос модели ТН4-201 производства Германии. Кузов этого вагона имеет сварную листовую стальную обшивку, составленную из наружных покровных листов отдельных многослойных конструктивных элементов в виде секций крыши, боковых и торцевых стен, пола и дверей, толщины которых находятся в пределах от 185 до 200 мм.

Сборочные панели кузова выполнены по технологии «сэндвич», т. е. когда каждый элемент кузова (пол, крыша, боковая стена и т. д.) изготавливается на специальном стенде, а заливаемый между наружной и внутренней обшивкой пенополиуретан вспенивается, образуя трехслойную несущую и теплоизолирующую конструкцию.

Кузов вагона-термоса имеет сварную раму, основными элементами которой являются хребтовая балка, шкворневые балки, продольные наружные балки и набор поперечных балок в средней части рамы. В консольных частях рамы хребтовая балка имеет коробчатое сечение для размещения ударно-тяговых устройств, а в средней части, между шкворневыми балками, выполнена из швеллера с полками, направленными вниз. Швеллер соединяется посредством сварки с расположенными над ним балками поперечного набора. Благодаря такой конструкции его масса тары меньше, чем у вагонов с закладной теплоизоляцией. Основным недостатком использования многослойных конструкций является высокая стоимость технологической оснастки (особенно при мелкосерийном производстве).

На начальном этапе эксплуатации этих вагонов в России выявилась недостаточная механическая прочность хребтовой и поперечных балок рамы, что вызвало необходимость установки на них дополнительных накладок и элементов жесткости. Модернизации были подвергнуты все 2225 вагонов, поставленных в период с 1987 по 1991 год.

В отличие от авторефрижераторов, оснащаемых одной ХНУ, в рефрижераторных вагонах наличие двух автономных комплектов холодильного оборудования обеспечивает примерно полутора кратный запас холодопроизводительности. Это гарантирует возможность поддержания заданных температурных условий перевозки и снижает риск порчи перевозимого груза в случае отказа одного из комплектов.

Поэтому для рефрижераторных вагонов целесообразно рассмотрение следующих вариантов размещения ХНУ.

Второй вариант (см. рисунок 6.1, б) – 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. С учетом последних тенденций в грузовом вагоностроении он уже может быть реализован в серийном производстве.

Третий вариант (см. рисунок 6.1, в) – на обеих торцевых стенах кузова имеются вырезы для расположения навесных моноблочных ХНУ. Обслуживание оборудования осуществляется с навесной площадки над автосцепкой.

Четвертый вариант (см. рисунок 6.1, г) аналогичен третьему, но стены ГП с проемами для размещения ХНУ находятся внутри кузова вагона. Таким образом, по торцам кузова имеются машинные отделения (по аналогии с пассажирскими тамбурами). Именно такая компоновка реализована в конструкции грузового рефрижераторного вагона немецкой пятивагонной секции ЦБ-5-659.

Пятый вариант (см. рисунок 6.1, д) – в верхней части кузова, в крыше по торцам, располагаются две моноблочные ХНУ – по типу пассажирских вагонов с моноблочной установкой кондиционирования воздуха УКВ-31, только с обеих сторон кузова. В качестве прототипа конструкции крыши можно использовать кузов автономного жидкоазотного вагона – у него в этой зоне расположены, для монтажа криогенного оборудования, проемы над машинными отделениями.

Особенностью изотермического кузова этого вагона модели 16-3008 является то, что в зоне машинных отделений между буферной и шкворневой балками рама имеет по три поперечные усиливающие балки (одна z-образная и два уголка) с каждой стороны кузова.

Шестой вариант (см. рисунок 6.1, е) является разновидностью второго варианта. Ввиду проблематичности реализации этого варианта из-за ослабленного сечения посередине вагона возможно выполнение двух погрузочных дверей на каждой боковой стене. Такая схема силовых элементов кузова была реализована в модификациях АРВ производства «Вагонбау Дессау» МК-4-343 для европейского рынка. Отличительной особенностью от вагонов АРВ модели МК-424, используемых в нашей стране, является другая компоновка энергохолодильного оборудования в машинном отделении. Отсутствие прохода для доступа к холодильному и дизельному агрегатам позволило отказаться от машинного отделения и обслуживать их снаружи, с легкой лестничной площадки шириной 600 мм, расположенной над автосцепным устройством. Благодаря этому площадь ГП у таких вагонов была практически такой же (43 м²), как и АРВ для СССР (45 м²).

АРВ производства Германии представлены в таблице 6.1.

Таблица 6.1 – АРВ производства Германии

Наименование		Ед. изм.	Модели вагонов			
			<i>МК 4-343 DR</i>	<i>МК 4-436 RAI</i>	<i>МК 4-432 CFR</i>	<i>МК 4-424 SZD</i>
1. Габарит			<i>UIC-505-3</i>	<i>UIC-505-3</i>	<i>UIC-505-3</i>	1 ВМ ГОСТ 9238
2. Наружная длина кузова		мм	19800	19800	19800	21000
3. Тара		т	36,5	37,5	36,5	44,3
4. Грузоподъемность		т	42	41	42	45,7
5. Нагрузка на ось		т	20	20	20	22,5
6. Размеры ГП	Длина	мм	16800	16800	16800	17320
	Ширина	мм	2550	2550	2550	2600
	Площадь пола	м ²	43	43	43	45
	Высота	мм	2000	2000	2000	2200
7. Объем		м ³	86	86	86	100
Грузовые двери	Количество	шт.	4	4	4	2
	Ширина	мм	2700	2700	2700	2200
	Высота	мм	1900	1900	1900	2000

Традиционное исполнение, с двумя автономными комплектами ХНУ и дизель-генераторными агрегатами (ДГА) с топливными баками в машинных отделениях, реализовано в конструкции АРВ МК-417 и МК-424 (рисунок 6.2, *а*). Моноблок ХНУ и ДГА выполнены в виде отдельных агрегатов. Кроме этого, для европейских стран завод «Вагонбау Дессау» выпускал модификацию АРВ с расположением ДГА и топливного бака под кузовом вагона.

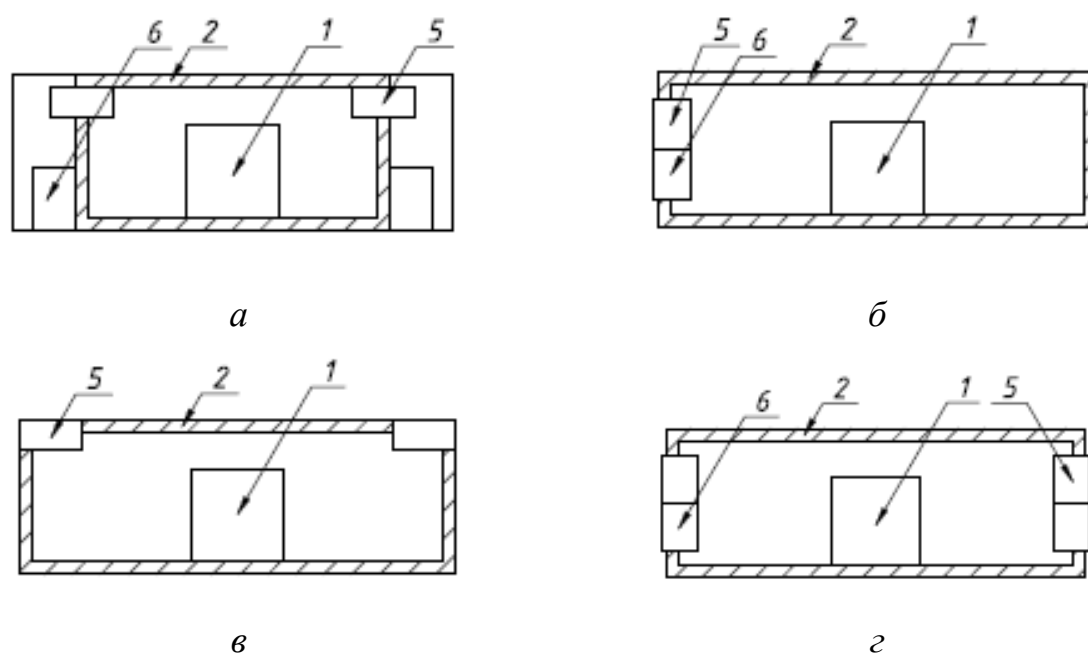


Рисунок 6.2 – Схемы расположения энергохолодильного оборудования:
 1 – грузовая дверь; 2 – теплоизолированный кузов; 3 – дизель-генераторный агрегат; 4 – холодильно-нагревательная установка

Преимуществом такого решения является агрегатирование и резервирование холодопроизводительности, дублирование ХНУ с возможностью быстрой смены агрегата. Кроме этого торцевое расположение ХНУ обеспечивает относительно короткий циркуляционный контур термообработанного воздуха в грузовом помещении вагона. К недостаткам следует отнести уменьшение полезного объема на 26 м³.

Крышевое исполнение ХНУ кузова позволяет при такой же длине кузова увеличить полезный объем ГП примерно на 15–20 %. Однако при этом возникают сложности с доступом для обслуживания оборудования.

Интересен опыт американских АРВ, для которых характерны торцевое одностороннее расположение моноблока ХНУ и ДГА с площадкой для обслуживания (см. рисунок 6.2, б).

Особенностями компоновки этой ХНУ является плотное сверхкомпактное размещение холодильных агрегатов и ДГУ на общей раме и в общем кожухе. Этот тип холодильной машины используется для автоприцепов. В торцевой стене теплоизолированного кузова выполнено отверстие для ввода испарителя холодильной машины в ГП, а по его периметру расположены кронштейны крепления всего навесного агрегата. Компрессорно-конденсаторный агрегат и ДГУ расположены снаружи теплоизолированного кузова.

Для новых большегрузных АРВ, изготовленных американской корпорацией National Steel Car, используется одна ХНУ – компании «Кэрриер» модификации «Ультима». В этом вагоне используется удлиненная на 1 м рама для расположения площадки для обслуживания ХНУ, ДГА и топливного бака. Другой особенностью кузова является использование в конструкции крыши композитных материалов и элементов внутреннего воздухораспределительного оборудования ГП [238].

В случае выбора компоновочной схемы с торцевым односторонним расположением ХНУ и ДГА (по типу американских) появляется возможность принятия за основу универсального теплоизолированного кузова, который будет одинаковым для вагонов-термосов, ОИВ и вентилируемого изотермического вагона. Для увеличения погрузочного объема ГП отопительно-вентиляционное оборудование можно интегрированно расположить в ограждающих конструкциях кузова. Для АРВ потребуется удлиненная на 1 м рама для расположения площадки для обслуживания ХНУ, ДГА и топливного бака. Также возможно рассмотрение и варианта облегченной откидывающей навесной площадки по типу вагонов-ледников. В этом случае ХНУ лучше размещать в крышевом варианте исполнения (см. рисунок 6.2, в), а дизель-генератор и топливные баки выносить

под вагон. Отказ от машинного помещения позволит снизить массу металлоконструкции кузова примерно на 500 кг за счет уменьшения числа торцевых перегородок-стен.

В пилотном проекте «Рефсервиса» при модернизации вагона АРВ модели МК-424 вместо штатных ХНУ типа ФАЛ-056 и ДГА смонтированы две моноблочные ХНУ с ДГА модели «Вектор» компании «Кэрриер» вертикального исполнения с торцевым расположением по обеим сторонам кузова (см. рисунок 6.2, з). Из-за плотной компоновки оборудования возможности размещения топливных баков весьма ограничены, и для повышения автономности вагона в качестве дополнительного источника электроэнергии предполагается использование вентильно-индукторного подвагонного генератора, установленного на тележке типа КВЗ-И2.

6.2. Расположение холодильного оборудования и полезный объем ГП вагона

В технико-экономических параметрах вагона самыми важными для перевозчика являются грузоподъемность и полезный объем. На величину первого наибольшее влияние оказывают ходовые части – осевые нагрузки, допускаемые тележками, и собственная тара вагона с энергохолодильным оборудованием и запасом топлива.

Максимальный объем ГП реализуется при наибольших линейных размерах кузова с учетом ограничения габарита подвижного состава. С другой стороны, необходимо рационализировать размещение внутреннего оборудования ГП – воздухопроводов, испарителей, напольных решеток, элементов системы воздухораспределения.

На РПС наиболее широкое применение нашли системы воздухораспределения канального типа. Бесканальные системы используются редко, в основном для контейнеров и вагонов малой вместимости.

Устройство и принцип работы воздухораспределительной системы канального типа может быть рассмотрено на примере организации распределения и циркуляции воздуха в грузовом помещении рефрижераторного вагона пятивагонной секции модели РС-5 производства Брянского машиностроительного завода (рисунок 6.3). Преимуществами канальной продольной системы распределения и циркуляции в грузовых вагонах секций БМЗ являются сравнительно небольшие геометрические размеры воздуховода переменного сечения, его малая металлоемкость и, соответственно, увеличенный полезный объем ГП, реализуемый за счет высоты – 2,41 см [113, 114].

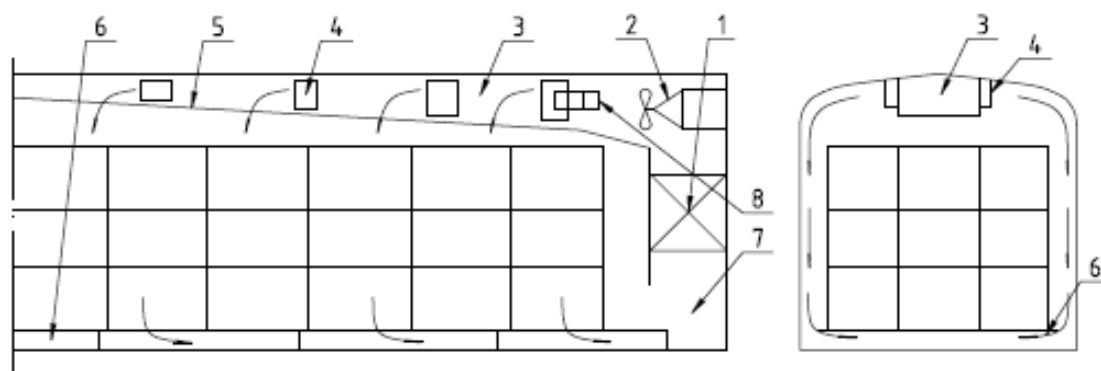


Рисунок 6.3 – Система воздухораспределения рефрижераторного вагона БМЗ:

- 1 – воздухоохладитель; 2 – вентилятор; 3 – воздуховод переменного сечения;
 4 – выпускные отверстия; 5 – панель; 6 – напольные решетки;
 7 – циркуляционный канал; 8 – завихрители

Основным элементом является нагнетательный воздуховод переменного сечения, в который при помощи вентилятора-циркулятора нагнетается воздух, термообработанный в воздухоохладителе или электронагревателе, и через направляющие панели подается к боковым стенкам ГП по всей его длине. При этом далее воздух опускается вниз и проходит между вертикальными гофраами боковых стен (высотой 50 мм), расположенных с шагом 280 мм, и штабелем груза, компенсируя внешние теплопритоки, а затем также поступает под напольные решетки, откуда через воздухозаборное устройство засасывается через воздухоохладитель (электронагреватель) для повторной термообработки.

В грузовом помещении вагона при этом образуются дополнительные внутренние поперечные контуры циркуляции. В грузовом объеме в этом случае циркулирует значительно больше воздуха, чем проходит в первичном потоке через воздухоохладитель.

Требуемое усиление циркуляции обеспечивается использованием воздухораспределителя усовершенствованной конструкции, снабженного специальным направляющим аппаратом. Благодаря этому термообработанный воздух непосредственно на выходе из распределительного канала с грузом не соприкасается. Контакт охлажденного воздуха с продуктами происходит уже после того, как основной воздушный поток присоединит к себе значительное количество воздуха из ГП, вследствие чего его температура существенно повысится. Система работает следующим образом. Воздух, термообработанный в охладителе 1 (см. рисунок 6.3), нагнетается вентилятором 2 в воздуховод и направляется через выпускные отверстия 4 в пространство между панелью 5 и потолком вагона. Двигаясь вдоль поверхности панели, воздушный поток турбулизируется в завихрителях 8 и перемешивается с воздухом ГП. После отрыва от панели воздух поступает в область размещения груза и, пройдя через штабель, зазоры между штабелем и боковыми стенами, попадает под напольные решетки 6, откуда по циркуляционному каналу 7 возвращается на повторную термообработку.

Вовлечение в циркуляцию больших объемов воздуха осуществляется за счет образования внутренних (поперечных) контуров циркуляции на основе эжекционного эффекта и способствует более равномерному распределению воздушных потоков по длине ГП в соответствии с гидродинамическими характеристиками элементов циркуляционной системы, включая штабель груза.

Грузовые вагоны рефрижераторных секций типа ZB-5 производства завода Дессау (Германия) оборудуются промежуточным ложным потолком (рисунок 6.4) [218].

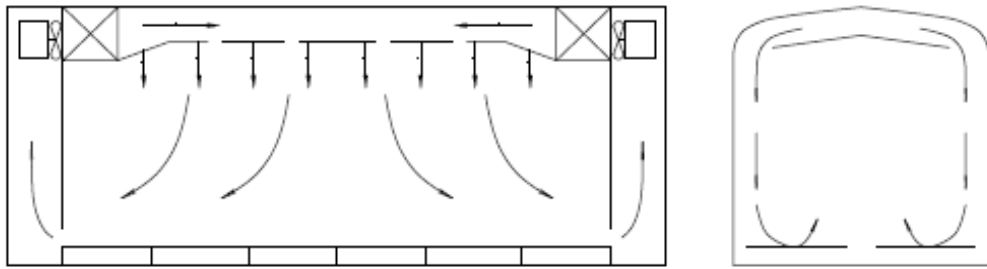


Рисунок 6.4 – Система распределения и циркуляции воздуха вагонов производства Германии со сплошным ложным потолком и пристенным подводом воздуха

К недостаткам всех систем воздухораспределения следует отнести перекося температурного поля по длине ГП при одной работающей холодильной машине, а также уменьшенный полезный объем ГП (погрузочная высота составляет 2,2 м).

Особо следует отметить, как для вагонов отечественного производства, так и для вагонов из Германии, что воздухозаборные отверстия холодильных установок этих рефрижераторных вагонов размещены в нижней части ГП. Таким образом, на повторную термообработку вентиляторами из нижней части вагона засасывается воздух, который еще не успел воспринять тепло от груза, что увеличивает время работы холодильных машин и вентиляторов-циркуляторов.

Однако рыночные условия диктуют вагоностроителям свои требования в части совершенствования их технико-экономических показателей – в первую очередь грузоподъемности и полезного объема. В настоящее время у клиентуры рефрижераторные секции отечественного производства, в которых полезный объем ГП составляет $111,8\text{ м}^3$, более востребованы грузоотправителями, чем немецкие вагоны, имеющие полезный объем 100 м^3 .

Улучшение этих показателей невозможно без серьезного изменения компоновочной схемы и применения передовых холодильных технологий.

По нашему мнению, увеличение полезного объема возможно сейчас за счет навесного компактного компрессорно-конденсаторного агрегата, что позволит при неизменной длине кузова довести полезный объем до 130 м^3 .

Влияние компоновочных решений по размещению ХНУ с анализом прочностных характеристик металлоконструкции кузова было рассмотрено в работах [43,58,63]. При анализе в качестве перспективных возможных вариантов

размещения основных узлов ХНУ были приняты три варианта их расположения. При этом потребовался учет влияния одного из важнейших элементов холодильной машины воздухоохладителя в составе системы циркуляции и распределения термообработанного воздуха в грузовом помещении. Из-за того что большинство видов СПГ характеризует малый удельный вес, традиционно ИВ имеют большую длину кузова, что позволяет реализовывать большой полезный объем ГП.

В качестве вариантов для выбора рациональных схем расположения ХНУ в кузове рассматриваются те, которые ранее не использовались для РПС, но являются возможными и целесообразными с точки зрения как расположения ХНУ, так и увеличения полезного объема ГП. Три варианта, выбранных для анализа, представлены на рисунке 6.1, *б*, *в*, *д*. Следует обратить внимание, что в случае торцевого исполнения холодильного агрегата целесообразно использование агрегатированной ХНУ, включающей в себя и дизель-генераторную установку.

В случае крышевого расположения холодильного оборудования размещение ДГА становится проблематичным, ввиду того что энергосиловая и холодильная установка рефрижераторного вагона является источником существенных дополнительных вибрационных нагрузок, действующих в процессе их работы на несущую конструкцию кузова и возникающих за счет эксцентриситетов вращающихся элементов дизеля и холодильного компрессора. Передача силовых нагрузок на кузов будет происходить в местах крепления, в зависимости от принятого компоновочного решения – на крыше, торцевой стене.

С учетом перехода на малообслуживаемые и безлюдные технологии выделение в кузове вагона машинного отделения является нецелесообразным, поэтому отличительной особенностью этих вариантов является отсутствие в объеме кузова машинного отделения в каком-нибудь виде.

Схема обоснования выбора рационального решения основывается на рассмотрении следующих параметров:

- соответствие нормируемым параметрам прочности;

- технико-экономические параметры ГП (полезный объем и площадь пола);
- металлоемкость;
- трудоемкость обслуживания.

Если первый параметр по соответствию условий прочности имеет множество уже многократно апробированных методик, как правило, с помощью метода конечных элементов (МКЭ), то размеры ГП существенным образом зависят от зоны расположения ХНУ. Основным определяющим фактором в этом случае является конструкция системы распределения и циркуляции термообработанного воздуха (СРЦВ). Классификация и описание их конструкций приведены в [20, 29, 113]. В этих же работах говорится о сложности поддержания равномерного температурного поля в изотермических кузовах большой длины.

Рассмотрим характер движения термообработанного (нагретого и охлажденного) воздуха внутри ГП. Для обеспечения продувки штабеля перевозимого груза в состав СРЦВ входят воздуховод, вертикальные гофры ГП и напольные решетки. Для рефрижераторов большой длины (более 15 м) при использовании таких устройств возникают проблемы с равномерным распределением воздуха и равномерностью температурного поля из-за значительных аэродинамических (гидравлических) потерь в воздуховоде. Для снижения разности температур необходимо сокращать длину воздуховода. Однако размещение ХНУ возможно либо в машинном отделении, либо на силовых элементах торцевых стен кузова. Минимизация размеров холодильного оборудования за счет уменьшения его высоты наблюдается в новом развитии установок кондиционирования воздуха ж.-д. подвижного состава (пассажирских вагонов, мотор-вагонного пригородного ПС, метрополитена и рельсовых автобусов). Эта возможность появилась за счет применения горизонтальных спиральных компрессоров. Лучшие образцы СКВ имеют высоту (толщину) моноблочного агрегата 270–350 мм, что практически соответствует толщине теплоизоляционного слоя крыши ИВ.

В случае расположения двухпоточного воздухоохладителя в средней части кузова длина воздуховода составит не более 8 м в каждую сторону ГП, что является вполне отработанным беспроблемным решением.

Для формирования замкнутого циркуляционного контура обязательным конструктивным элементом традиционных СРЦВ является торцевая перегородка, формирующая подачу воздуха через воздухоохладитель холодильной машины для его термообработки. Варианты расположения систем воздухораспределения были рассмотрены ранее, в третьей главе (см. рисунок 3.1).

Варианты компоновки агрегатов холодильных машин представлены на рисунках 6.5 и 6.6.

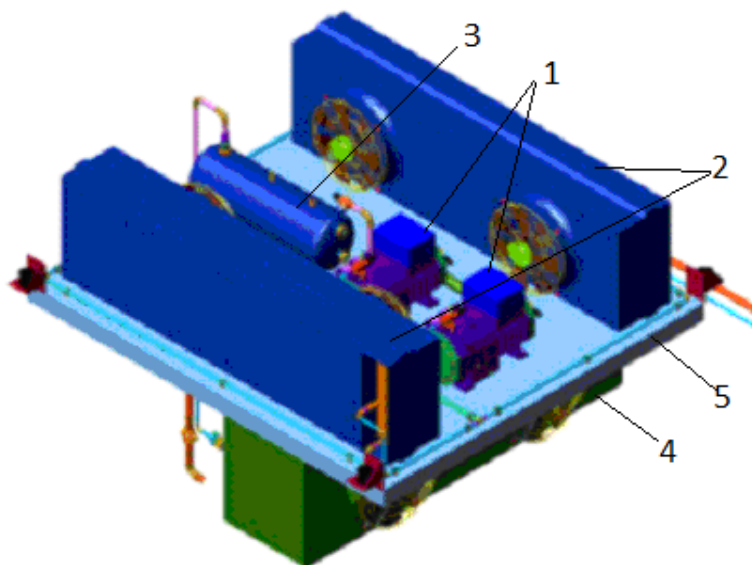


Рисунок 6.5 – Вариант компоновки агрегатов холодильных машин для торцевого крышевого исполнения:

1 – компрессоры; 2 – конденсаторы; 3 – ресивер; 4 – воздухоохладитель;
5 – теплоизолированная рама

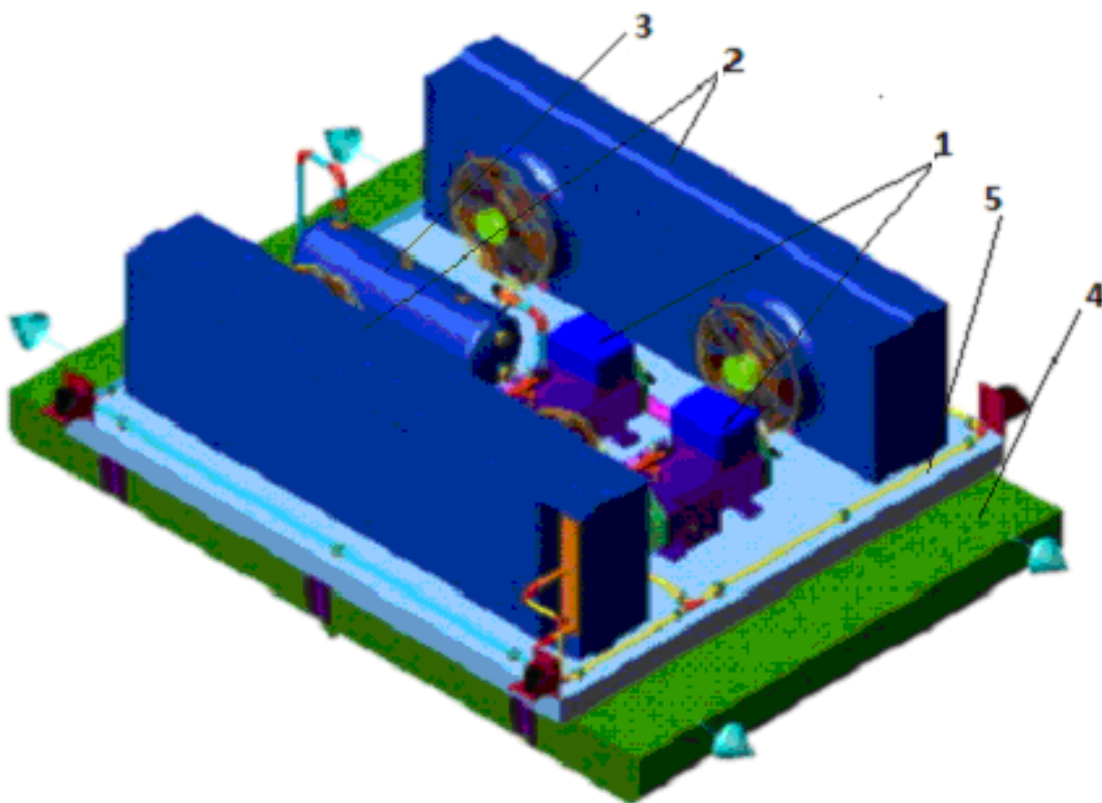


Рисунок 6.6 – Варианты компоновки холодильных машин для центрального крышевого исполнения:

1 – компрессоры; 2 – конденсаторы; 3 – ресивер; 4 – воздухоохладитель двухпоточный; 5 – теплоизолированная рама

Технические параметры существующего и перспективного ИПС представлены в таблице 6.2.

Таблица 6.2 – Технические параметры существующего и перспективного ИПС

Показатели	Существующий РПС				Перспективный ИПС					
	РС-5	ЗВ-5	АРВ	ВТ ТН4- 201	АЗТМ		ВТ 16- 1807- 04	АРВ		
					ВТ16 -6962	АРВ 16- 6973		1 в	2 в	3 в
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1. Тара, т	39,0	41,0	46,0	33,0	37,3	42,00	35–36	40– 42	40– 42	40– 43
2. Грузоподъемность, т	47,0	49,0	44,0*	60,0	62,7	58,0	58,0			

Продолжение таблицы 6.2

1		2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
3. Длина вагона, м	По осям автосцепки	22,1	22,1	22,2	22,2	22,2	22,2	19,84	22,1	22,1	22,1
	ГП	17,65	17,5	17,3	20,0	20,5	18,5	18,475	19,40	19,40	19,8
4. Полезный объем, м ³		111,8	100,0	100,0	128,0	137,0	115,0	145*	124	124	126
5. Полезная площадь, м ²		46,4	45,5	45,0	52,5	51,2	47,2	49,8	50,4	50,4	51,5
6. Коэффициент теплопередач, Вт/м ² ·К		0,32	0,35	0,32	0,18	0,20	0,20	0,25	0,2		
7. Теплопередающая поверхность кузова (расчетная), м ²		258,1	229,7	229,7	278,0	278,0	258,0	Н.д.	278		

В вагонах немецкого производства с двусторонним расположением ХНУ они располагались на расстоянии 400 мм от силовой стенки ГП, уменьшая полезную длину ГП на 800 мм. В рефрижераторных вагонах отечественного производства с односторонним расположением ХНУ полезная длина ГП из-за этого уменьшалась на 950 мм.

По итогам анализа трех представленных схем организации циркуляции термообработанного воздуха видно, что первые два варианта также потребуют установки воздухонаправляющей торцевой перегородки в грузовом помещении. Третий вариант позволяет расположить плоский воздухоохладитель в подкрышном пространстве, не используемом для размещения перевозимого груза, и организовать работу СРЦВ по циркуляционному контуру, имеющему в два раза меньшую длину. Перегородка в этом случае не потребуется, а для циркуляции воздуха в межстенном пространстве достаточно будет стандартных гофр внутренней обшивки ГП высотой 50 мм, которые имеются и на боковых стенах.

Как показывает анализ данных таблицы 6.2, среди предлагаемых вариантов компоновки лучшие показатели имеет потолочное расположение ХНУ в средней части кузова. Это может быть реализовано за счет использования компактных

горизонтальных спиральных компрессоров в моноблочном агрегате толщиной 270–350 мм, что практически соответствует толщине теплоизоляционного слоя крыши ИВ. Еще одним преимуществом являются возможности организации двух коротких, вместо одного длинного, циркуляционных контуров (эксплуатационный параметр), технологичность изготовления двух композитных секций крыши кузова (технологический параметр).

Другим резервом для уменьшения веса тары кузова (около 21 т для вагона БМЗ) является совершенствование внутреннего оборудования ГП – материалов и конструкции напольных решеток (1100 кг у существующего РПС) и воздуховода (400 кг). Рациональным техническим решением может стать конструкция крыши ГП с встроенным в нее полимерным или тканевым воздуховодом, а также использование композитных материалов для изготовления напольных решеток.

Таким образом, можно констатировать, что улучшение технико-экономических параметров ИПС может быть достигнуто за счет совершенствования ряда функциональных систем вагона:

1. Использование ходовых частей с повышенными осевыми нагрузками (позволит увеличить грузоподъемность до 10 %).

2. Разработка современных холодильных установок с горизонтальными спиральными компрессорами, позволяющими реализовать их компоновку без выделения машинного отделения в пределах габаритов кузова (позволит уменьшить тару вагона на 5–7 %).

3. Совершенствование технологии и материалов для изготовления элементов ограждающих конструкций теплоизолированного кузова и внутреннего оборудования ГП вагона (позволит уменьшить тару на 3–5 %).

6.3. Построение математических моделей напряженно-деформированного состояния кузова изотермического вагона в зависимости от компоновки специального оборудования

Качество продукции машиностроения напрямую зависит от уровня технических решений, принятых на начальном этапе создания продукции, и от их

всестороннего инженерного анализа. Это достаточно широкое понятие включает весь комплекс необходимых вычислений для получения информации по прочности, жесткости, долговечности и устойчивости конструкций, по расчету частот собственных колебаний и определению динамических характеристик создаваемого оборудования в условиях действия вынуждающих силовых факторов.

Очевидно, что все перечисленные инженерные задачи решаются для того, чтобы были созданы равнопрочные конструкции, имеющие минимальный вес, минимальные энергетические потребности, а также минимальные начальную стоимость и эксплуатационные затраты.

Зарубежные инструменты инженерного анализа (CAE) – системы, известные российскому пользователю (такие как хорошо зарекомендовавшие себя системы конечно-элементного (КЭ) анализа MSCNastran, ANSYS, COSMOS, MSCMarc, а также системы для описания кинематики и динамики больших перемещений: MSCAdams и ряд других), не локализованы и достаточно дороги, что является существенным препятствием для их продвижения на нашем рынке.

В [27] представлен обзор проблемно ориентированных программных комплексов при решении задач по механике вагонов, посвященных методам прочностных расчетов кузовов вагонов. В настоящее время для решения задач расчета тонкостенных подкрепленных систем используются приближённые численные методы. Наибольшую популярность получил МКЭ.

При использовании МКЭ для проведения проверочных расчётов кузов рассматривается в целом, со сравнительно крупными конечными элементами, но при этом расчётная схема обладает достаточно большим числом степеней свободы. Для уточнения результатов расчёта отдельных зон и кузова в целом существует ряд способов. Один из распространённых – это метод последовательного выделения областей с возрастающей густотой сетки (метод Л. Л. Кожевниковой) [23, 79].

Представленный ниже расчет произведен методом конечных элементов на основе использования системы расчета и проектирования механических

конструкций и оборудования в области машиностроения и строительства «APM WinMachine».

6.3.1. Описание программы

Система автоматизированного проектирования APM WinMachine – наукоемкий программный продукт, созданный на базе современных инженерных методик проектирования, численных методов механики, математики и моделирования, гармонично сочетающий опыт поколений конструкторов, инженеров-механиков и других специалистов с возможностями компьютерной техники и технологии [99, 100, 214] .

Возможности интеграции со сторонними программными продуктами (через обменные форматы) позволяют использовать для получения расчетных моделей ранее созданную графическую информацию, что существенно сокращает временные затраты в процессе проектирования.

Возможности инструментального обеспечения позволяют решать обширный круг прикладных задач, одной из которых является возможность выполнения анализа с использованием метода конечных элементов напряженно-деформированного состояния трехмерных объектов любой сложности при произвольном закреплении, статическом или динамическом нагружении.

APM Structure3D – модуль предназначен для расчета напряженно-деформированного состояния стержневых, пластинчатых, оболочечных и твердотельных конструкций, а также их произвольных комбинаций.

APM Structure3D организован таким образом, что в его рамках можно рассчитать все многообразие существующих конструкций, собирая их из вышеперечисленных макроэлементов. Внешняя нагрузка, так же как и условия закрепления конструкции, может быть произвольной как по характеру, так и по местоположению.

Расчет напряженно-деформированного состояния конструкций выполняется с использованием метода конечных элементов. При необходимости применяются также и другие методы строительной механики, адекватные поставленным выше

задачам. Число конечных элементов для разбиения конструктивных узлов и, следовательно, длительность времени расчета устанавливаются пользователем.

Для создания твердотельных и оболочечных элементов в модуле APM Studio предусмотрен специализированный генератор автоматического разбиения на конечные элементы, с помощью этого же инструмента можно задать условия закрепления и нагружения. Стержни также разбиваются на конечные элементы в автоматическом режиме с использованием встроенного генератора разбиения.

По умолчанию в программе существуют настройки, характерные для большинства расчетных случаев. Разбиение на конечные элементы пластинчатых и твердотельных элементов выполняется в полуавтоматическом режиме.

Модуль APM Structure3D позволяет рассчитать величины напряжений и деформаций в любой точке заданной конструкции с учетом как внешнего нагружения, так и собственного веса каждого из элементов.

Расчет элементов ведется с учетом всех концентраторов напряжений. Это позволяет более точно определять величины максимальных действующих напряжений.

6.3.2. Моделирование объекта исследования для расчетной модели

Объекты для КЭ-анализа обычно представляются в виде стержней произвольного поперечного сечения, пластин и оболочек, а также в виде твердотельных моделей и их произвольных комбинаций.

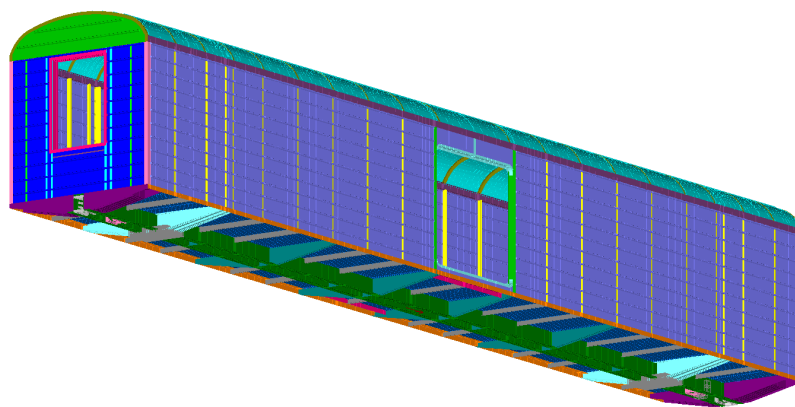
Твердотельную модель можно подготовить как в модуле APM Structure3D, используя его встроенные функции, так и с помощью редактора трехмерного моделирования APM Studio. Кроме того, посредством формата обмена STEP возможен импорт трехмерных моделей, созданных сторонними средствами. Расчетная модель создавалась с учетом того, что кузов вагона в расчете представляет собой стальную сварную несущую конструкцию, сформированную из листового и фасонного проката. Цельнометаллический кузов ИВ имеет достаточно жесткие контуры поперечных сечений благодаря наличию мощных силовых элементов рамы (хребтовой, шкворневых, боковых и поперечных балок)

и густой сетки обрешетки стен и крыши. Листовая гофрированная обшивка, имея малую изгибную жесткость, хорошо сопротивляется сдвигу в своих поверхностях. Вырезы в кузове располагаются в зоне погрузочных дверей и по концевым частям кузова для размещения ХНУ. Размеры проема соответствуют монтажным размерам транспортных навесных холодильных агрегатов «Carrier». Варианты КЭ-моделей для различного исполнения кузова приведены на рисунке 6.7.

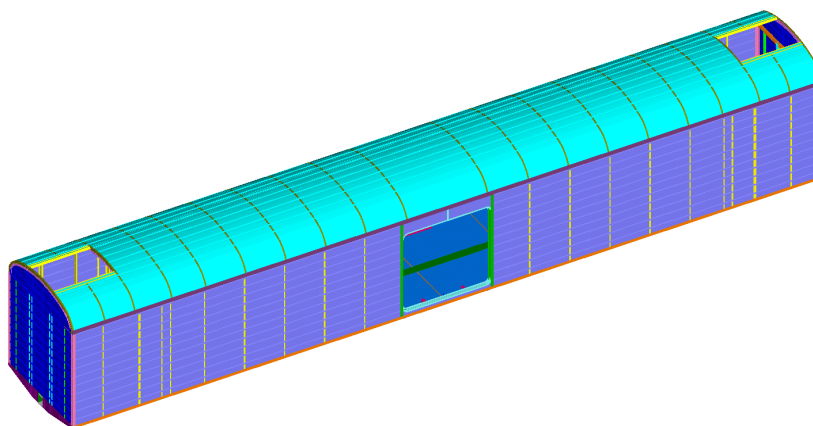
Оценка напряженно-деформированного состояния кузова и рамы вагона проводилась с использованием детализированной пластинчатой конечно-элементной модели. Использование при формировании конечно-элементной расчетной модели пластинчатых конечных элементов позволяет достаточно подробно моделировать конструкцию вагона, включая узлы стыковки балок, и обеспечивать компактность модели.

Разработка конечно-элементной модели кузова вагона осуществлялась на основании комплекта конструкторской документации кузова рефрижераторного вагона модели РС-3000 пятивагонной секции производства Брянского машиностроительного завода.

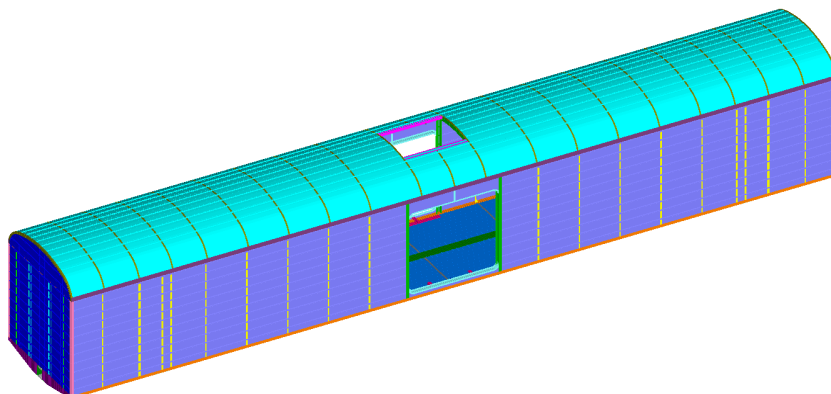
Конечно-элементная модель кузова и рамы вагона представляет собой пространственную пластинчатую расчетную систему, образованную трех- и четырехузловыми изотропными пластинчатыми элементами, учитывающими все внутренние силовые факторы (мембранные, сдвиговые, поперечные и изгибные) и позволяющими моделировать 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 введением связей в вертикальном и поперечном направлениях, по опорной поверхности пятника.



a



б



в

Рисунок 6.7 – Варианты конечно-элементных моделей кузова:

a – торцевое размещение ХНУ; *б* – торцевое крышевое размещение ХНУ;

в – центральное крышевое размещение ХНУ

Для эффективной реализации расчетных и графических процедур в модуле АРМ Structure3D имеется современный интерфейс специализированного

назначения. Интерфейсная часть, предназначенная для демонстрации результатов расчета, проста и удобна, сильно облегчает анализ полученных результатов и способствует принятию правильных решений

Интерфейс постпроцессора включает следующие визуализаторы:

- напряженно-деформированного состояния модели;
- распределения напряжений в любом текущем сечении любого стержневого элемента;
- силовых факторов и деформаций (линейных и угловых) в узловых точках;
- графиков функций, описывающих законы моментов изгиба и кручения, напряжений и деформаций, поперечных сил и т. п. по длине любого из стержней, входящих в состав конструкции.

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

Продольные нагрузки прикладываются к элементам, обозначающим передние или задние упорные угольники хребтовой балки.

Вертикальная нагрузка прикладывается согласно эксплуатационному размещению – равномерно, по всей площади пола вагона. Нагрузки от веса ХНУ прикладывались равномерно по периметру проёма. Нагрузки от веса и сила инерции рассчитаны по формуле (6.1) [7, 139].

Продольные силы инерции отдельных масс вагона в общем случае определяются по формуле:

$$N_{и} = N \cdot \frac{m}{m_{ваг}}, \quad (6.1)$$

где N – внешняя продольная сила удара или рывка, приложенная к автосцепке, либо тормозная сила вагона;

m – масса узла, детали, груза, для которой определяется продольная сила инерции;

$m_{ваг}$ – общая масса вагона.

Нагрузка от собственного веса рассчитывается программой автоматически. В соответствии с [139] допускаемые напряжения для сталей для первого

расчетного режима при ударных продольных нагрузках (удар, рывок) принимались равными пределу текучести материала. 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). В соответствии с [139] для приведенных в таблице 6.3 марок сталей модуль упругости принимался равным $2,1 \cdot 10^5$ МПа, коэффициент Пуассона принимался равным 0,3.

В соответствии с [139] допускаемые напряжения для сталей для первого расчетного режима при ударных продольных нагрузках (удар, рывок) принимались равными пределу текучести материала. Элементы и материалы кузова для расчетов представлены в таблице 6.3.

Таблица 6.3 – Элементы и материалы кузова для расчетов

Элемент кузова	Марка стали	Предел текучести, МПа
Балка хребтовая	09Г2Д 102БД-12 ГОСТ 52670-78	375
Балка шкворневая	09Г2С	345
Стойки стен	09Г2Д	345
Лобовая балка	09Г2Д 10Г2БД-12 ГОСТ 52670-78	345
Наружная обшивка	09Г2Д 10ХНДП	345
Боковая продольная балка	09Г2Д	345

6.3.3. Анализ результатов

В нормативной литературе [81, 82, 139] величина продольных нагрузок, принимаемых при расчете кузовов вагонов на прочность, зависит от типа вагонов и связана с допускаемыми нагрузками, возникающими в процессе эксплуатации. Именно поэтому численные значения для ИВ находятся между пассажирскими и грузовыми вагонами основных типов. Режимы нагружения продольными силами для ИВ представлены в таблице 6.4.

Таблица 6.4 – Режимы нагружения продольными силами для изотермических вагонов, МН [27]

Вид нагружения	I режим	III режим
Квазистатическое	-2,5/+2,5	-1/+1
Удар-рывок	-3/+2,5	-1/+1

Как видно из таблицы, самым напряженным является I режим удара силой 3МН, поэтому анализ результатов расчетов проведем для этого режима. Результаты прочностных расчетов показали следующие значения массы металлоконструкции кузова: 1-й вариант – 9940 кг (см. рисунок 6.7, а), 2-й вариант – 9880 (см. рисунок 6.7, б), 3-й вариант – 9870 кг (см. рисунок 6.7, в).

Анализ результатов расчетов по первому варианту, с торцевым расположением ХНУ, показал, что при ударе 3 МН в пустой вагон максимальные напряжения появляются в верхней обвязке торцевой стены (уголок 84×63, в зоне соединения с центральными торцевыми стойками).

Расчеты по второму варианту, с размещёнными в крыше торцевыми ХНУ, показали, что при режиме удара 3 МН в пустой вагон, с учетом нагрузки от веса и силы инерции, максимальные напряжения появляются в поперечной обвязке проёма (усиленная дуга торцевой стены, в зоне соединения с продольной обвязкой проёма).

Расчеты по третьему варианту, с размещёнными ХНУ в центре крыши, показали, что максимальные напряжения получились в поперечной обвязке проёма (усиленная дуга, в зоне соединения с продольной обвязкой проёма). В целом величина эквивалентных напряжений ниже, чем в предыдущих вариантах.

Конструкция менее жёсткая, симметричная в двух плоскостях, работает равнозначно, и напряжения распределяются равномернее.

Поля распределения эквивалентных напряжений в элементах конструкции кузова при торцевом варианте размещения ХНУ при I режиме нагружения «удар» (-3,0 МН) представлены на рисунке 6.8. Поля распределения эквивалентных напряжений в элементах конструкции кузова при крышевом

торцевом варианте размещения ХНУ при I режиме нагружения «удар» ($-3,0$ МН) представлены на рисунке 6.9. Поля распределения эквивалентных напряжений в элементах конструкции кузова при крышесом центральном варианте размещения ХНУ при I режиме нагружения «удар» ($-3,0$ МН) представлены на рисунке 6.10.

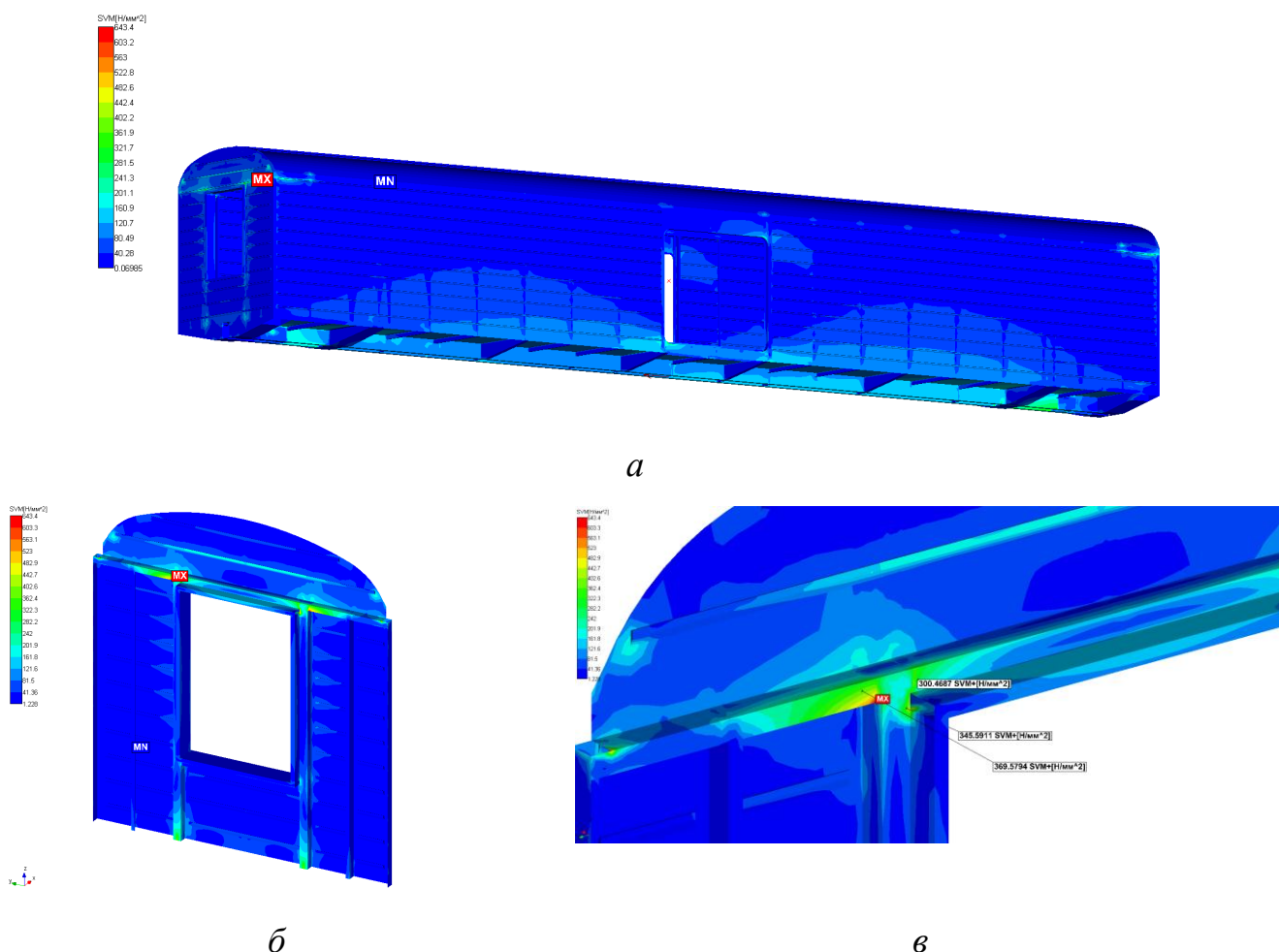
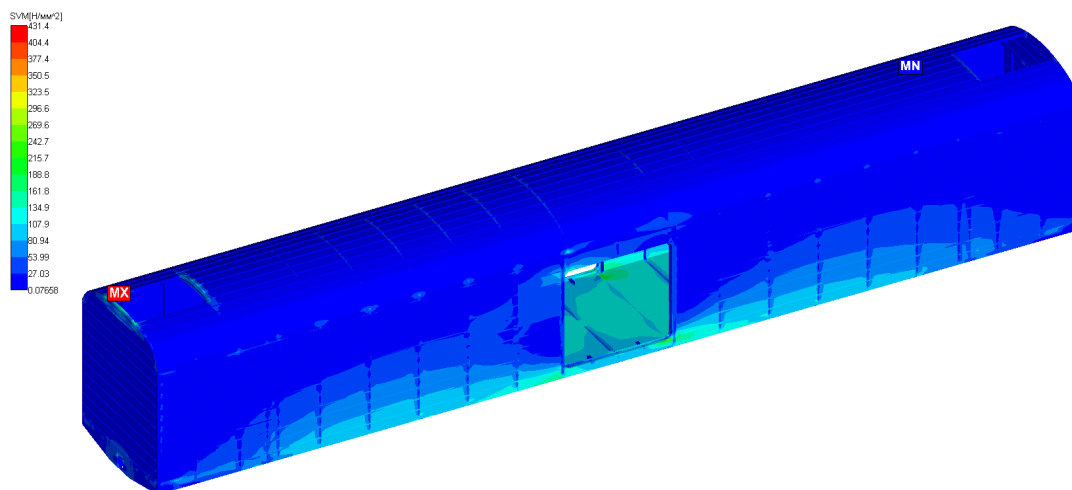


Рисунок 6.8 – Поля распределения эквивалентных напряжений в элементах конструкции кузова при торцевом варианте размещения ХНУ при I режиме нагружения «удар» ($-3,0$ МН):

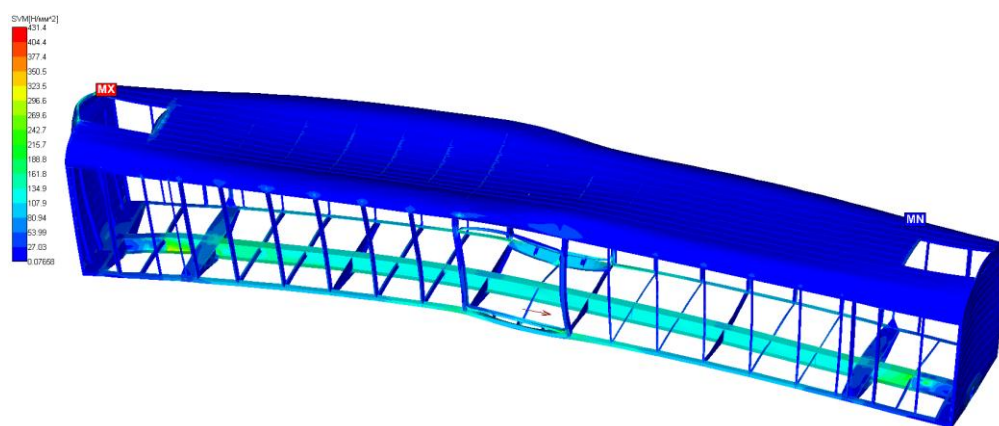
a – общий вид; *б* – проем ХНУ (вид изнутри);
в – верхняя часть проема ХНУ (вид изнутри)

Таблица 6.5 – Максимальные допустимые и расчетные напряжения элементов кузова при торцевом варианте размещения ХНУ при I режиме нагружения «удар» (–3,0 МН)

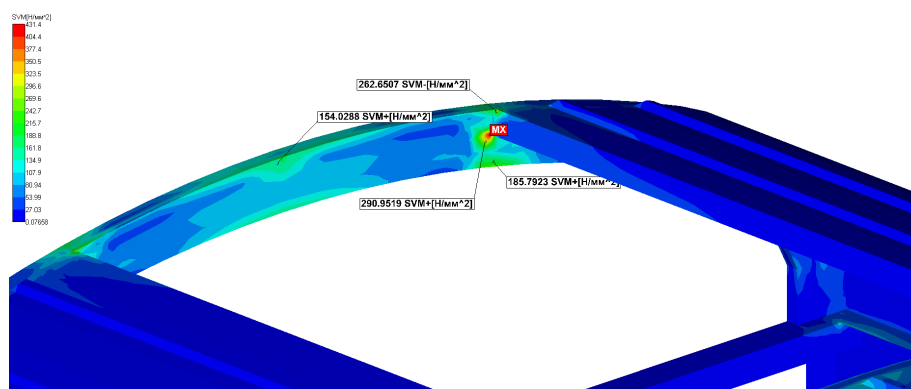
Узел конструкции вагона	Зона расположения максимальных эквивалентных напряжений, МПа	Допустимые напряжения, МПа	Расчетные напряжения, МПа
Хребтовая балка (на консоли)	в нижней полке зета, в зоне стыковки с задним упором	375	370
Шкворневая балка	в нижнем листе, в зоне стыковки с нижней полкой хребтовой балки	345	280
Концевая балка	в нижнем листе, в зоне стыковки с нижней полкой хребтовой балки	345	112
Поперечная усиленная балка	в нижней полке, в зоне стыковки с нижней полкой хребтовой балки	345	95
Боковая балка	в горизонтальной полке, в зоне основания дверных стоек	345	185
Верхняя обвязка боковой стены	в горизонтальной полке, в зоне соединения с центральными дугами	345	90
Стойка Z боковой стены	первая от дверного проёма стойка, в зоне соединения с боковой балкой	345	90
Обшивка боковой стены	в нижнем листе в зоне основания дверных стоек под порогом	345	180
Верхняя обвязка торцевой стены	в зоне соединения с боковой обвязкой стены	345	500
Стойка Z торцевой стены	в зоне основания стойки	345	90
Стойка Ω торцевой стены	в зоне основания стойки	345	320
Обшивка торцевой стены	в верхней части в соединении балок проема ХНУ	345	270
Угловая стойка	в зоне соединения с обвязкой торцевой стены	345	140
Поперечная балка Z	в консольной части вагона в верхней полке зона стыковки с хребтовой балкой	345	200
Дверной проем Дверная Ω стойка	в зоне соединения с дверной обвязкой	345	130
Дверная обвязка	в горизонтальной полке, в зоне скругления	345	180
Порог дверного проёма	в вертикальном листе, в центральной части	345	230
Дуга крыши	дуги торцевых стоек, в зоне основания	345	120
Обшивка крыши	В консольной част вагона, в зоне основания второй дуги	345	120
Вертикальная балка проема	в зоне стыковки с горизонтальной обвязкой верхней части проёма ХНУ	345	300
Горизонтальная балка проема ХНУ	в зоне стыковки с вертикальной балкой верхней части проёма ХНУ	345	300
Нижняя усиленная обвязка ХНУ	в зоне стыковки проёма ХНУ с торцевой стойкой	345	70



a



б

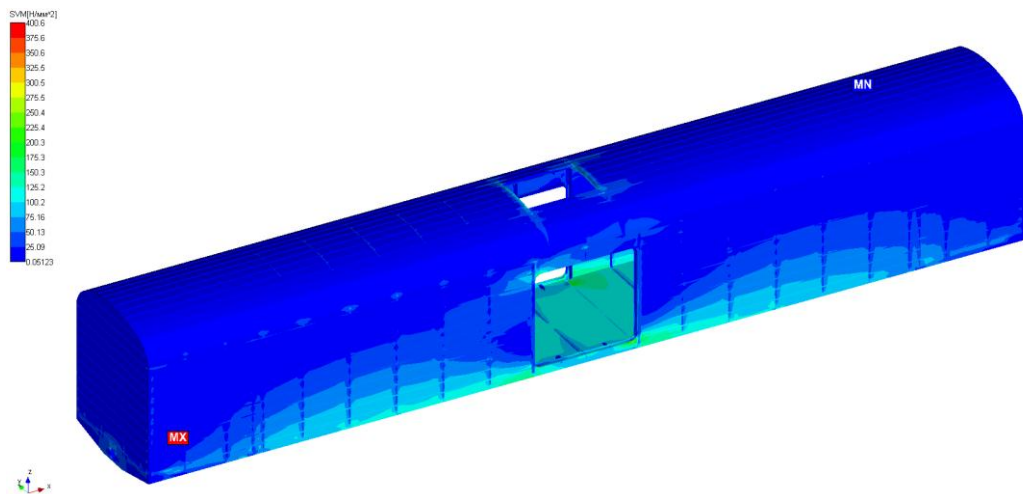


в

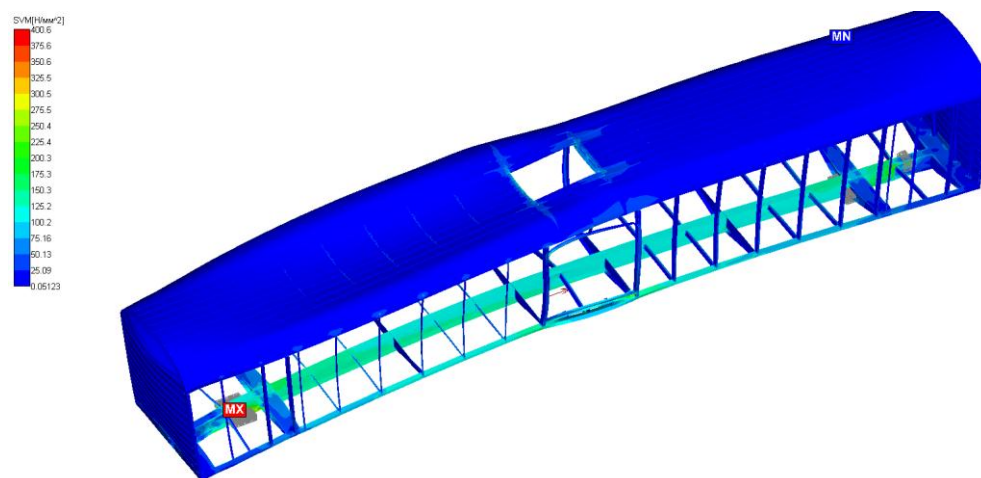
Рисунок 6.9 – Поля распределения эквивалентных напряжений в элементах конструкции кузова при крышевом торцевом варианте размещения ХНУ при I режиме нагружения удар ($-3,0$ МН):
a – общий вид; *б* – напряжения с деформацией;
в – торцевая дуга крыши (вид изнутри)

Таблица 6.6 – Максимальные допустимые и расчетные напряжения элементов кузова при торцевом крышевом варианте размещения ХНУ при I режиме нагружения удар (–3,0 МН)

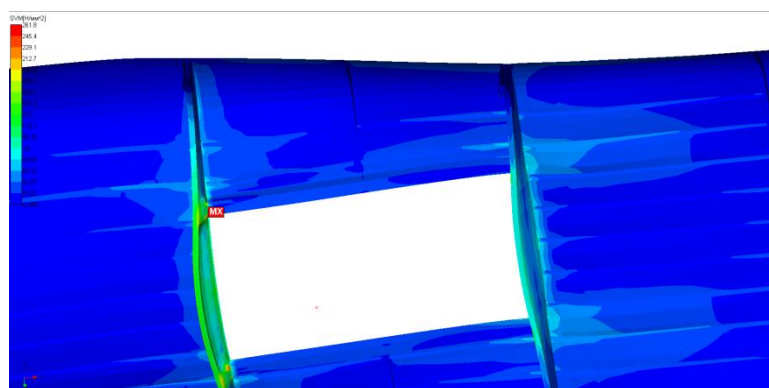
Узел конструкции вагона	Зона расположения максимальных эквивалентных напряжений, МПа	Допустимые напряжения, МПа	Расчетные напряжения, МПа
Хребтовая балка (на консоли)	в нижней полке зета, в зоне стыковки с задним упором	375	370
Шкворневая балка	в нижнем листе, в зоне стыковки с нижней полкой хребтовой балки	345	290
Концевая балка	в нижнем листе, в зоне стыковки с нижней полкой хребтовой балки	345	112
Поперечная усиленная балка	в нижней полке, в зоне стыковки с нижней полкой хребтовой балки	345	100
Боковая балка	в горизонтальной полке, в зоне основания дверных стоек	345	180
Верхняя обвязка боковой стены	в горизонтальной полке, в зоне соединения с центральными дугами	345	110
Стойка Z боковой стены	первая от дверного проёма стойка, в зоне соединения с боковой балкой	345	90
Обшивка боковой стены	в нижнем листе в зоне основания дверных стоек под порогом	345	175
Верхняя обвязка торцевой стены	в зоне соединения с боковой обвязкой стены	345	80
Стойка Z торцевой стены	в зоне основания стойки	345	53
Стойка Ω торцевой стены	в зоне основания стойки	345	60
Обшивка торцевой стены	в центральной , в зоне стыковки с усиленной дугой проема ХНУ	345	80
Угловая стойка	в зоне нижнего гофра	345	35
Поперечная балка Z	в консольной части вагона в верхней полке зона стыковки с хребтовой балкой	345	185
Дверной проем Дверная Ω стойка	в зоне соединения с дверной обвязкой	345	130
Дверная обвязка	в горизонтальной полке, в зоне скругления	345	225
Порог дверного проёма	в вертикальном листе, в центральной части	345	300
Дуга крыши	дуги дверных стоек, в зоне основания	345	105
Обшивка крыши	в центральной части, в зоне проёма ХНУ	345	100
Дуга усиленная	в зоне стыковки с продольной обвязкой торцевой части проёма ХНУ	345	400
Дуга укороченная	в зоне основания	345	20
Проем для ХНУ Продольная обвязка	в зоне стыковки с усиленной дугой торцевой части проёма ХНУ	345	350



a



б



в

Рисунок 6.10 – Поля распределения эквивалентных напряжений в элементах конструкции кузова крышевом центральном варианте размещения ХНУ при I режиме нагружения удар ($-3,0$ МН):
a – общий вид; *б* – напряжения с деформацией;
в – напряжения с деформацией в проеме ХНУ

Таблица 6.7 – Максимальные допустимые и расчетные напряжения элементов кузова при центральном крышевом варианте размещения ХНУ при I режиме нагружения удар (–3,0 МН),

Узел конструкции вагона	Зона расположения максимальных эквивалентных напряжений, МПа	Допустимые напряжения, МПа	Расчетные напряжения, МПа
Хребтовая балка (на консоли)	в нижней полке зета, в зоне стыковки с задним упором	375	370
Шкворневая балка	в нижнем листе, в зоне стыковки с нижней полкой хребтовой балки	345	283
Концевая балка	в нижнем листе, в зоне стыковки с нижней полкой хребтовой балки	345	112
Поперечная усиленная балка	в нижней полке, в зоне стыковки с нижней полкой хребтовой балки	345	98
Боковая балка	в горизонтальной полке, в зоне основания дверных стоек	345	180
Верхняя обвязка боковой стены	в горизонтальной полке, в зоне соединения с центральным вертикальным Z дверного проёма	345	82
Стойка Z боковой стены	первая от дверного проёма стойка, в зоне соединения с боковой балкой	345	105
Обшивка боковой стены	в нижнем листе в зоне основания дверных стоек под порогом	345	170
Верхняя обвязка торцевой стены	в средней части вертикальной полки	345	38
Стойка Z торцевой стены	в зоне основания стойки	345	50
Стойка Ω торцевой стены	в зоне основания стойки	345	52
Обшивка торцевой стены	в зоне розетки автосцепки	345	60
Угловая стойка	в зоне нижнего гофра	345	42
Поперечная балка Z	в консольной части вагона в верхней полке зона стыковки с хребтовой балкой	345	185
Дверной проем дверная Ω стойка	в зоне соединения с дверной обвязкой	345	130
Дверная обвязка	в горизонтальной полке, в зоне скругления	345	225
Порог дверного проёма	в вертикальном листе, в центральной части	345	300
Дуга крыши	дуги первые от дверных стоек, в центральной части вертикальной стенки уголка	345	100
Обшивка крыши	в центральной части, в зоне проёма ХНУ	345	80
Дуга усиленная	в зоне стыковки с продольной обвязкой проёма ХНУ	345	250
Дуга укороченная	в зоне стыковки с продольной обвязкой проёма ХНУ	345	20
Проем для ХНУ Продольная обвязка	в зоне стыковки с усиленной дугой проёма ХНУ	345	100

6.3.4. Рекомендации по совершенствованию конструкции кузова

В целом анализ результатов расчетов по всем трем вариантам размещения ХНУ показал достаточную прочность и возможность относительно простой модернизации имеющейся металлоконструкции кузова ИВ. 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 соседние дуги, что необходимо для более равномерного включения в работу других несущих элементов крыши и боковин. Анализ аналогичных цельнонесущих металлоконструкций кузовов пассажирских вагонов показывает, что величины напряжений в крыше имеют одни из самых меньших значений. Это подтверждается и анализом результатов расчетов во всех трех вариантах компоновок ХНУ. Для дуг и обшивки крыши коэффициент запаса лежит в пределах 3,1–4,7. Поэтому отдельно может быть рассмотрен вариант кузова с несущими стенами и силовыми дугами верхней обвязки крыши, используемыми для потолочного варианта размещения ХНУ. Для обшивки панелей крыши могут использоваться композитные материалы с интегрированной теплоизоляцией и элементами системы воздухораспределения. При использовании композитной крыши силовая конструкция такого кузова меняется существенным образом.

При торцевой установке ХНУ также целесообразно усиление каркаса поперечными элементами снизу до углов боковин, а сверху, как один из возможных вариантов, необходимы диагональные тяги, замкнутые на продольные обвязки боковин. Эти меры позволят включить в работу другие несущие элементы кузова и за счет перераспределения нагрузки снизить величину напряжений по периметру проема холодильной установки. Также для всех вариантов актуальным является изготовление силовых элементов проемов для холодильного оборудования со скругленными элементами в местах соединения поперечных и продольных балок. Варианты доработки конструкций кузова для всех трех вариантов представлены на рисунке 6.11.

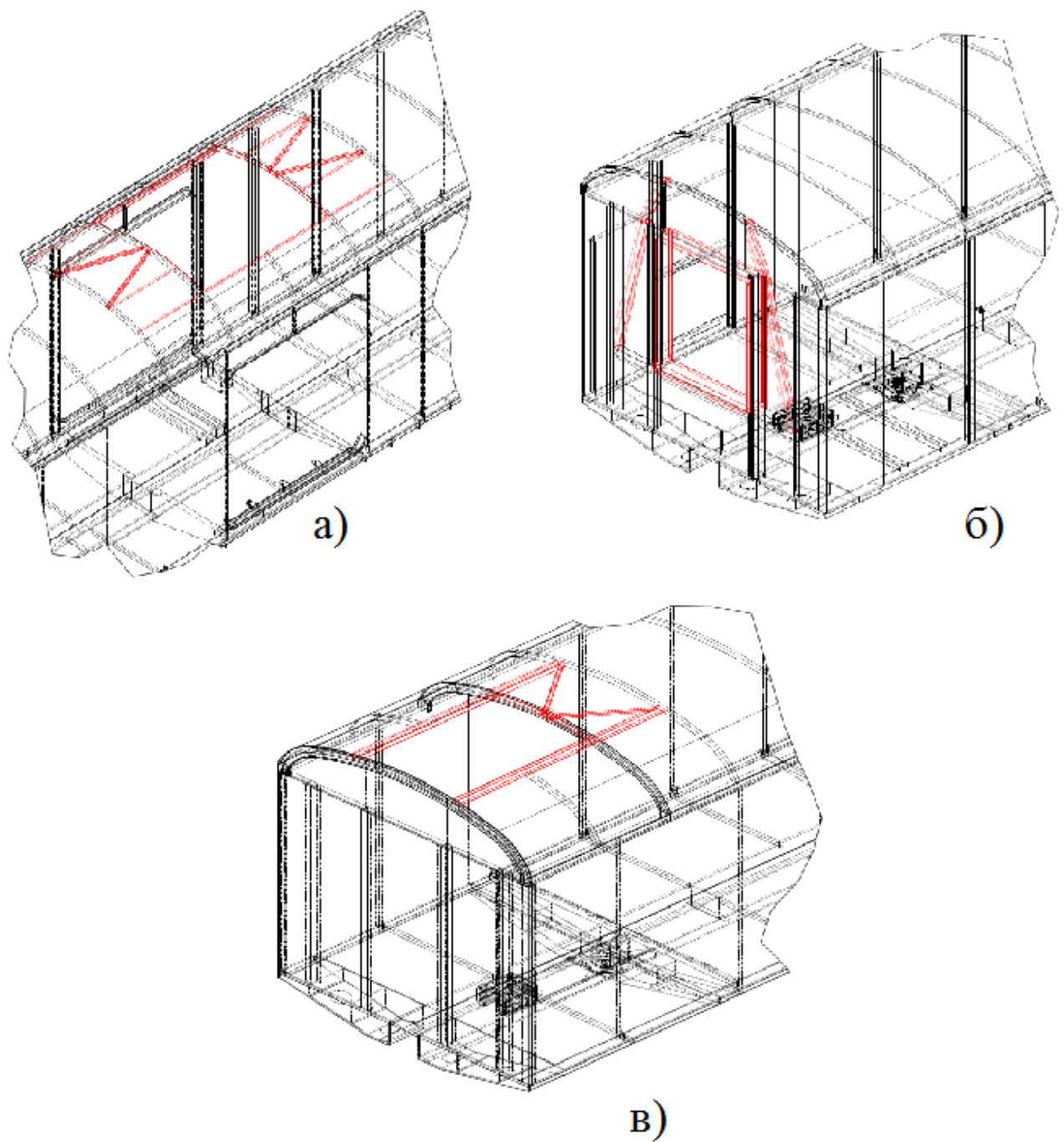


Рисунок 6.11 – Доработка трех вариантов усиления проемов ХНУ:
a – центральное крышное размещение ХНУ; *б* – торцовое размещение ХНУ;
в – торцовое крышное размещение ХНУ

6.4. Обоснование технических решений различных вариантов размещения холодильно-нагревательного оборудования

В задачах обоснования тех или иных технических решений экспертные методы получения данных являются преобладающими ввиду их экономичности по сравнению с расчетными и экспериментальными.

В реальных задачах цель выбора носит нечеткий характер, и само формирование показателей конкретизирующими степень достижения этой цели является отдельной многоплановой задачей. Важность этих показателей с точки зрения достижения цели выбора различна и, как правило, нечетко видна. Для установления относительной важности показателей экспертным методом следует использовать численную шкалу отношений предпочтений, которая ставит в соответствие сравниваемые объекты или параметры.

Во второй главе при определении потребительских качеств ИПС был использован экспертный метод Дельфи, с помощью которого были определены основные желаемые критерии ИПС. Для дальнейшей конкретизации конструкции перспективного ИПС и в частности, расположения ХНУ предлагается использовать метод анализа иерархий (МАИ), используемый для решения разноплановых задач с необходимостью совокупного сравнения разнообразных показателей [172, 173].

Сравнение этих двух методов представлено в работах Т. Л. Саати [174]. В методе Дельфи используются численные ответы, которые подвергаются статистическому и количественному анализу. Для иерархий в суждениях используются абсолютные числа от 1 до 9, представляющие собой шкалу предпочтений. Они отражают качественные суждения о парном сравнении и используются как часть получения точной оценки для основной шкалы отношений. В обоих случаях процесс анализа улучшает качество суждений, однако МАИ расчленяет суждения на отдельные компоненты и позволяет использовать его для решения более конкретных и локальных технических задач.

Использование этого метода при решении задач по рациональному проектированию ж.-д. подвижного состава представлено в работах В. А. Симонова (БИТМ) [182], Н. А. Атаманчук (ПГУПС) [7, 8].

Методика обоснования выбора технических решений

На стадии проектирования новых типов вагонов почти всегда возникает необходимость выбора между различными вариантами конструкции основных несущих элементов кузова и специализированного оборудования. Каждый вариант имеет свои преимущества и недостатки. Как правило, при этом рассматриваются множество критериев оценки, связанных с эксплуатационными, техническими и стоимостными показателями вагона. Поэтому выбор наиболее рационального и целесообразного варианта не всегда очевиден.

Важной особенностью использования ХНУ для ИВ является увеличение веса кузова с оборудованием. Поэтому для увеличения полезного объема ГП кузова необходимо рассмотреть возможные варианты размещения этого специализированного оборудования.

Для решения задачи выбора рационального технического решения предлагается использовать метод анализа иерархий (МАИ), описанный в работе [182]. Общая схема обоснования для выбора рационального технического решения представлена на рисунке 6.12.

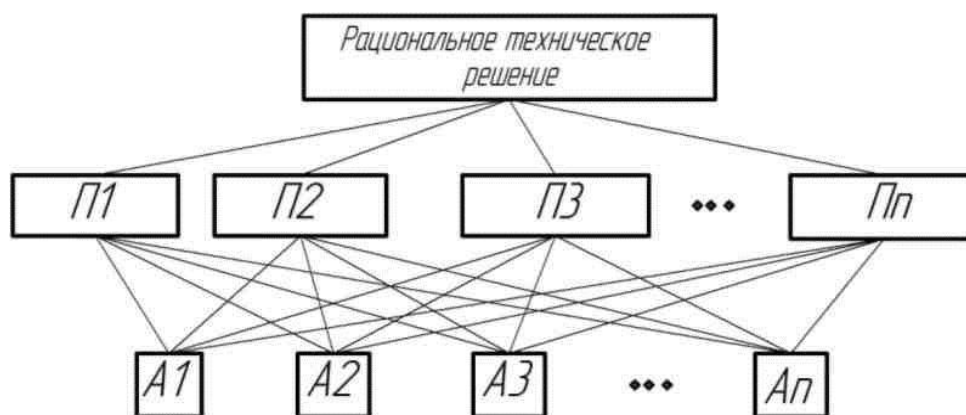


Рисунок 6.12 – Общая схема обоснования для выбора рационального технического решения:

P_1, P_2, P_3, P_n – показатели; A_1, A_2, A_3, A_n – альтернативы выбора

Для установления относительной важности критериев, а также для сравнения альтернатив по всем показателям предлагается использовать шкалу предпочтений, представленную в [182] (таблица 6.8).

Таблица 6.8 – Шкала предпочтений

Численная оценка	Лингвистическая оценка	Пояснения
1	Отсутствие предпочтений	Два объекта дают равный вклад в цель
3	Слабое предпочтение	Оценка слегка в пользу одного из объектов
5	Сильное предпочтение	Оценка существенно в пользу одного из двух объектов
7	Очень сильное предпочтение	Один объект сильно доминирует над другим
9	Абсолютное предпочтение	Очевидна высшая степень предпочтения
2, 4, 6, 8	Промежуточные оценки	Необходим компромисс

Алгоритм действий для упорядочения альтернатив по степени важности можно представить в виде нескольких шагов:

1) *Составление матрицы попарных сравнений.*

Матрица попарных сравнений составляется с использованием численных оценок, приведенных в таблице 6.8. Численная оценка в каждую строку матрицы записывается на основе сравнения и предпочтительности показателя в i -й строке с другими показателями. Сначала составляется матрица попарных сравнений показателей, затем – матрицы попарных сравнений альтернатив.

При этом принимается, что численная оценка обратного сравнения равна единице, деленной на численную оценку прямого сравнения, то есть [8]

$$P_{ij} = \frac{1}{n_{ij}}, \quad (6.2)$$

где P_{ij} – элемент матрицы P .

Порядок матрицы зависит от числа показателей (альтернатив).

В общем виде матрица попарных сравнений имеет вид:

$$P = \begin{array}{c} \begin{array}{|c|c|c|c|c|c|} \hline & П1 & П2 & П3 & \dots & П_{ji} \\ \hline П1 & 1 & & \ddot{e} & & \\ \hline П2 & & 1 & & & \\ \hline П3 & & & 1 & & \\ \hline \dots & & & & 1 & \\ \hline П_{ij} & & & & & 1 \\ \hline \end{array} \end{array} \quad (6.3)$$

2) *Вычисление значений максимального собственного числа матрицы и правого собственного вектора.*

Согласно МАИ, для установления приоритетности сравниваемых альтернатив необходимо вычислить правый собственный вектор матрицы, соответствующий максимальному собственному числу.

Правый собственный вектор $\vec{\omega}$, который соответствует максимальному собственному значению λ_{\max} , определяется по формуле:

$$\lim_{k \rightarrow \infty} \frac{A^k \cdot e}{e^T \cdot A^k \cdot e} = C \cdot \vec{\omega}, \quad (6.4)$$

где $e = \{1, 1, \dots, 1\}^T$;

$k = 1, 2, 3, \dots$ – показатель степени;

C – константа.

Собственный вектор выполняет функцию упорядочения по степени предпочтения сравниваемых объектов друг относительно друга.

Максимальное собственное значение определяется по формуле:

$$\lambda_{\max} = e^T \cdot A \cdot \vec{\omega}. \quad (6.5)$$

3) *Погрешность вычислений.*

Количество итераций зависит от достижения допустимой погрешности суммы элементов вектора предпочтений, такой, что

$$e^T \left| \omega^l - \omega^{(l+1)} \right| \leq \xi, \quad (6.6)$$

l – номер итерации, такой, что $l = 1$ соответствует $k = 1$, $l = 2$, $k = 2$ и т. д.;

ξ принимается равным 0,01.

4) *Оценка однородности суждений.*

Логичность суждений (оценка однородности суждений) определяется отклонением величины максимального собственного значения λ_{\max} от порядка матрицы. Индекс однородности определяется по формуле:

$$C.I. = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1}. \quad (6.7)$$

Также используется отношение однородности:

$$C.R. = \frac{C.I.}{M(R.I.)} \quad (6.8)$$

где $M(R.I.)$ – среднее значение индекса однородности случайным образом составленной матрицы сравнений.

В качестве максимально допустимого значения рекомендуется принимать $C.R. \leq 0,10$.

5) *Результат.*

Окончательный результат сводится к нахождению произведения:

$$\vec{\omega} = \left[\vec{\omega}_1 \vec{\omega}_2 \vec{\omega}_3 \dots \vec{\omega}_i \right] \times \vec{\omega}_\Pi, \quad (6.9)$$

где $\left[\vec{\omega}_1 \vec{\omega}_2 \vec{\omega}_3 \dots \vec{\omega}_i \right]$ – матрица, составленная из элементов собственных векторов матрицы попарных сравнений i -го количества альтернатив по каждому показателю;

$\vec{\omega}_\Pi$ – собственный вектор матрицы попарных сравнений показателей 8].

6.4.1. Анализ вариантов размещения ХНУ и выбор их рациональных параметров

6.4.1.1. Варианты размещения и критерии выбора технических решений

Одной из основных проблем при разработке конструкции кузова ИВ является тот факт, что кузов – основной несущий элемент вагона, который подвергается сложному силовому нагружению в процессе эксплуатации. Корректная оценка прочности этого ответственного узла позволяет повысить безопасность движения и создать оптимальную по металлоемкости конструкцию. Расположение ХНУ в кузове играет решающую роль при формировании технико-экономических параметров, таких как полезная площадь пола и полезный объем ГП.

В качестве перспективных возможных вариантов размещения основных узлов ХНУ были приняты три варианта их расположения, которые потребовали

учета влияния элементов холодильной машины – воздухоохладителя и системы циркуляции и распределения воздуха в грузовом помещении вагона.

Из-за того что большинство видов СПГ имеют малый удельный вес, традиционно изотермические вагоны имеют большую длину кузова, что позволяет реализовывать больший полезный объем ГП. В разделе 6.2 (см. рисунок 6.2) было принято решение из существующих вариантов расположения ХНУ для перспективных АРВ рассмотреть варианты металлоконструкций кузова с максимально возможным полезным объемом ГП: на обеих торцевых стенах, крышное по обеим сторонам кузова и крышное посередине кузова. Варианты расположения холодильного оборудования представлены на рисунке 6.13.

Для выбора рационального варианта из трёх рассматриваемых было проведено поэтапное исследование с использованием следующих критериев: металлоемкость (П1); прочность кузова (П2); удобство эксплуатации (П3); полезный объем кузова (П4).

Для определения рациональной конструктивной схемы была применен метод анализа иерархий.

Схема обоснования для выбора рационального варианта компоновки холодильного оборудования представлена на рисунке 6.14.

По уровню значимости эти критерии располагаются в следующем порядке: П2, П4, П3, П3.

Для определения рациональной конструктивной схемы был применен метод анализа иерархий.

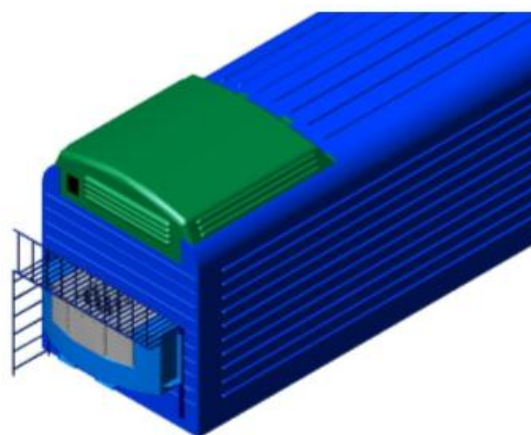
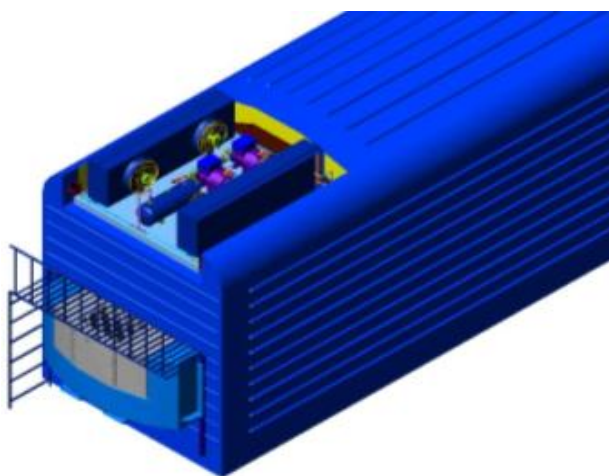
Матрица попарных сравнений для показателей приняла вид:

	Металлоёмкость	Прочность кузова	Удобство эксплуатации	Полезный объём кузова
Металлоёмкость	1	1/9	1/3	1/7
Прочность кузова	9	1	7	5
Удобство эксплуатации	3	1/7	1	1/5
Полезный объём кузова	7	1/5	5	1

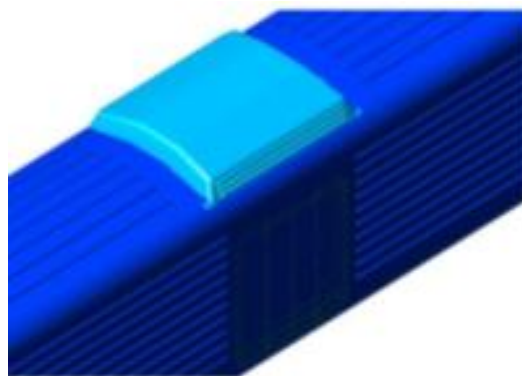
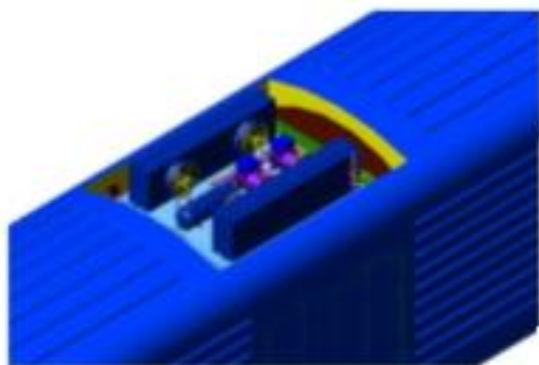
(6.10)



а



б



в

Рисунок 6.13 – Варианты реализации компоновочных решений ХНУ:
а – торцевое размещение ХНУ; *б* – торцевое крышное размещение ХНУ;
в – центральное крышное размещение ХНУ

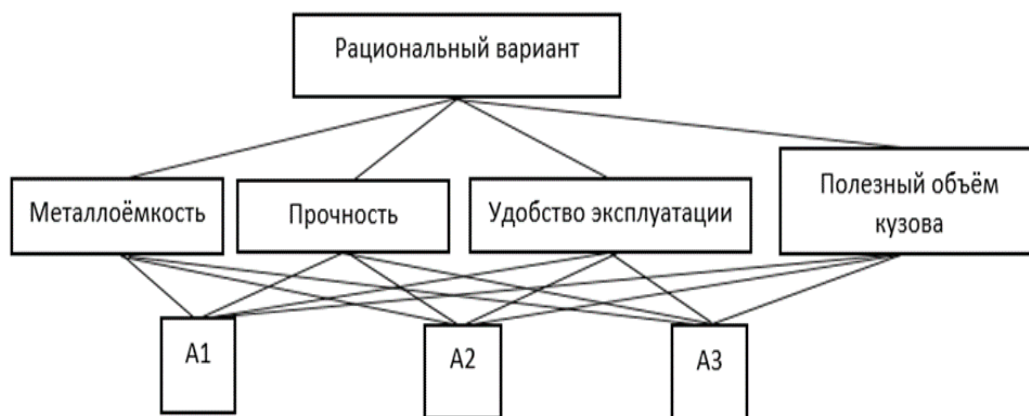


Рисунок 6.14 – Схема обоснования для выбора рационального варианта размещения холодильно-нагревательных установок:

А1 – торцевой вариант размещения ХНУ; А2 – торцевой крышевой вариант размещения ХНУ; А3 – крышевое центральное расположение ХНУ

Исследование альтернатив по показателям

Результаты прочностных расчетов показали следующие значения массы металлоконструкции кузова: 1-й вариант – 9940 кг, 2-й вариант – 9880 кг, 3-й вариант – 9870 кг.

Составим матрицу попарных сравнений альтернатив по показателю «металлоёмкость»:

$$A_M = \begin{array}{|c|c|c|c|} \hline \text{Металлоёмкость} & \text{1-й вар.} & \text{2-й вар.} & \text{3-й вар.} \\ \hline \text{1-й вар.} & 1 & 1/3 & 1/5 \\ \hline \text{2-й вар.} & 3 & 1 & 1/3 \\ \hline \text{3-й вар.} & 5 & 3 & 1 \\ \hline \end{array} \quad (6.11)$$

На основании результатов прочностных расчетов в таблицах 6.5–6.7 составим матрицу попарных сравнений альтернатив по показателю «прочность кузова»:

$$A_{ПК} = \begin{array}{|c|c|c|c|} \hline \text{Прочность кузова} & \text{1-й вар.} & \text{2-й вар.} & \text{3-й вар.} \\ \hline \text{1-й вар.} & 1 & 1 & 1/3 \\ \hline \text{2-й вар.} & 1 & 1 & 1/3 \\ \hline \text{3-й вар.} & 3 & 3 & 1 \\ \hline \end{array} \quad (6.12)$$

Параметр «удобство эксплуатации» определим с позиции обеспечения доступа к осмотру и техническому обслуживанию холодильного оборудования и составим матрицу попарных сравнений альтернатив по показателю «удобство эксплуатации»:

$$A_{\text{уд}} = \begin{array}{c} \begin{array}{|c|c|c|c|} \hline \text{Удобство} \\ \text{эксплуатации} & & & \\ \hline & \text{1-й вар.} & \text{2-й вар.} & \text{3-й вар.} \\ \hline \text{1-й вар.} & 1 & 3 & 5 \\ \hline \text{2-й вар.} & 1/3 & 1 & 3 \\ \hline \text{3-й вар.} & 1/5 & 1/3 & 1 \\ \hline \end{array} \\ (6.13) \end{array}$$

Возможные значения полезного объема ГП представлены в таблице 6.2. Матрица попарных сравнений по показателю «полезный объем кузова»:

$$A_{\text{по}} = \begin{array}{c} \begin{array}{|c|c|c|c|} \hline \text{Полезный} \\ \text{объем} & & & \\ \hline & \text{1-й вар.} & \text{2-й вар.} & \text{3-й вар.} \\ \hline \text{1-й вар.} & 1 & 1/3 & 1/5 \\ \hline \text{2-й вар.} & 3 & 1 & 1/3 \\ \hline \text{3-й вар.} & 5 & 3 & 1 \\ \hline \end{array} \\ (6.14) \end{array}$$

Подставив необходимые данные в формулы (6.4) и (6.5), получили правые собственные векторы и соответствующие им максимальные собственные значения матриц:

$$\omega_{\text{П}} = \begin{Bmatrix} 0,04 \\ 0,61 \\ 0,09 \\ 0,26 \end{Bmatrix},$$

$$\omega_{\text{М}} = \begin{Bmatrix} 0,11 \\ 0,26 \\ 0,63 \end{Bmatrix}.$$

Подставив результирующие значения в выражение (6.9), имеем:

$$\vec{\omega} = \begin{bmatrix} 0,11 & 0,2 & 0,63 & 0,11 \\ 0,26 & 0,2 & 0,26 & 0,26 \\ 0,63 & 0,6 & 0,11 & 0,63 \end{bmatrix} \times \begin{Bmatrix} 0,04 \\ 0,61 \\ 0,09 \\ 0,26 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0,212 \\ 0,223 \\ 0,565 \end{Bmatrix}.$$

Полученный результат означает, что наибольший приоритет имеет альтернатива АЗ: «вес» ее приоритета составляет 0,565.

Таким образом, по оценке комплекса выбранных критериев наилучшие показатели имеет третий вариант с центральным крышевым расположением холодильной машины.

6.5. Исследование напряженно-деформированного состояния кузова изотермического вагона при интенсивной термообработке замороженного груза с впрыском жидкого азота

В парке ИПС имеются вагоны-термосы типа ТН4-201 производства Германии с теплоизоляцией кузова типа «сэндвич». Эти вагоны предназначены для транспортировки термически подготовленных грузов, рыбных продуктов и кондитерских изделий. По данным ГВЦ, по состоянию на конец 2018 г. в собственности у предприятий РФ их находилось более 1200 штук. Несмотря на то что годы их выпуска и поставок приходились на 1988–1991 гг. и срок их эксплуатации истекал, благодаря ОАО «Рефсервис» была разработана технология ремонта с продлением срока использования этих вагонов.

В последнее время ряд транспортных компаний, имеющих парк собственных вагонов-термосов, проявляют интерес к транспортировке замороженной продукции из Владивостока в Москву. Существующие «Правила перевозок...»[161] ограничивают срок доставки таких продуктов в летний период 8 сутками, в зимний период – 17 сутками. Действующие в настоящее время правила исчисления сроков доставки не позволяют осуществлять перевозки по этому маршруту даже в зимнее время. Для сохранения качества перевозимой продукции требуется либо поддержание температурного режима холодильной машиной, либо понижение температуры груза до нижнего допустимого предела замораживанием в стационарных холодильниках. Первый вариант неприемлем по причине отсутствия в этом вагоне холодильной установки, а второй связан со значительными материальными издержками из-за погрузочно-выгрузочных работ

и длительным временем охлаждения парокомпрессионными холодильными машинами. Однако отсутствие мощных станций по захолаживанию груза существенно снижает полигон и период использования вагона, а также номенклатуру перевозимых грузов. Одним из главных условий, делающих эту транспортную технологию целесообразной, является высокая скорость захолаживания груза без выгрузки его из вагона. Это возможно реализовать при использовании охлаждения сжиженными газами. Например, при использовании жидкого азота в качестве хладагента появляется возможность снизить температуру груза за короткое время до нижнего допустимого предела и после этого продолжить транспортировку без дополнительного охлаждения и перегрузки вагона [55, 64].

Суть возникающей при этой технологии 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 в зависимости от его температуропроводности и теплопроводности. С другой стороны, рост давления внутри вагона (с учетом нормируемых показателей герметичности 50 Па) приводит к возникновению напряженно-деформированного состояния. При проведении экспериментальных мероприятий по повышению герметичности и подаче в ГП жидкого азота вагон «затрещал» (на слух). Это свидетельствует о возникновении в ограждающих конструкциях кузова дополнительных напряжений, обусловленных воздействием интенсивно испаряющегося азота. Для оценки прочности кузова при работе в этом, нехарактерном для ИВ режиме была откорректирована ранее разработанная модель кузова. В процессе расчетов моделируется напряженно-деформированное состояние кузова ИВ при интенсивной термообработке замороженного груза и впрыске жидкого азота [64].

При создании внутри ГП вагона-термоса избыточного давления напряженно-деформированное состояние несущей конструкции кузова будет изменяться. Диапазон исследуемых величин избыточного давления находится в зоне сохранения упругопластических свойств сталей, используемых для

изготовления рамы и металлоконструкции кузова вагона. При этом прогнозируется искажение первоначальной геометрии кузова. Оценка последствий воздействия такого повышения давления на напряженно-деформированное состояние кузова имеет важное значение. Эти расчеты необходимы для оценки несущей способности кузова и определения предельно допустимых давлений, возникающих при испарении азота в грузовом помещении. С другой стороны, это позволит определить максимально допустимый удельный (часовой) расход жидкого азота, при подаче его во внутрь ГП и рекомендуемые значения его герметичности, а также параметры предохранительных сбросных устройств (своего рода предохранительных клапанов).

Представленный ниже расчет произведен методом конечных элементов на основе использования системы расчета и проектирования механических конструкций и оборудования в области машиностроения и строительства «APM WinMachine» с помощью модуля APM Structure3D.

Оценка напряженно-деформированного состояния несущей конструкции кузова вагона-термоса с учетом избыточного давления в грузовом помещении проводилась по схемам МКЭ, разработанным с высокой степенью детализации по комплекту конструкторской документации.

Оценка напряженно-деформированного состояния рамы и кузова вагона осуществлена с применением детализированной пластинчатой конечно-элементной модели, аналогичной модели, описанной в п. 6.3. Использование при формировании конечно-элементной расчетной модели пластинчатых конечных элементов позволяет достаточно полно и компактно моделировать конструкцию вагона, включая узлы стыковки балок рамы и кузова.

Разработка конечно-элементной модели кузова вагона осуществлялась на основании комплекта конструкторской документации с учетом модернизации кузова после демонтажа ХНУ и переоборудования его в ИВ-термос.

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 123 040 [63]. Элементы объединены в 119886 узлах, число степеней свободы конечно-элементной модели составляет 719316. Закрепление модели в пространстве осуществляется введением 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.

Нагрузка от давления распределялась равномерно во всей внутренней поверхности кузова. Исследовалось два режима повышения давления. Первый – порожнего кузова, второй – с учетом размещения на полу ГП плотного штабеля замороженного груза с температурой -25°C .

По факту в грузовом помещении груз лежит на деревянных досках пола, уложенных поперек вагона. Эти доски лежат на шести продольных лагах, опирающихся на силовые элементы рамы – хребтовую, шкворневую и поперечные балки [64]. Расчетная схема пола представлена на рисунке 6.15.

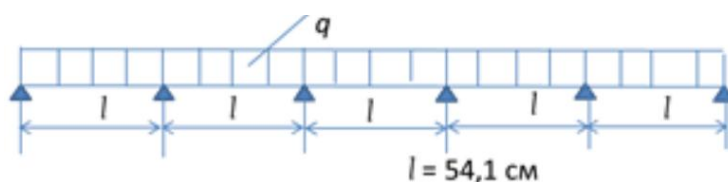


Рисунок 6.15 – Расчетная схема нагружения пола ГП вагона

Для решения этой поставленной задачи принимаем нагрузку от груза, расположенного на полу ГП, равномерно-распределенной.

Груз лежит на деревянных досках пола, уложенных поперек вагона. Эти доски лежат на шести продольных лагах, опирающихся на силовые элементы рамы – хребтовую, шкворневую и поперечные балки. Поэтому рассматриваем пол вагона в поперечном сечении как балку, лежащую на шести опорах, и определяем нагрузки, приходящиеся на продольные бруски пола (лаги). Эти бруски опираются на поперечные балки рамы, и поэтому приходящуюся на них нагрузку

передают поперечным балкам рамы, которые в свою очередь расположены между хребтовой балкой и боковиной.

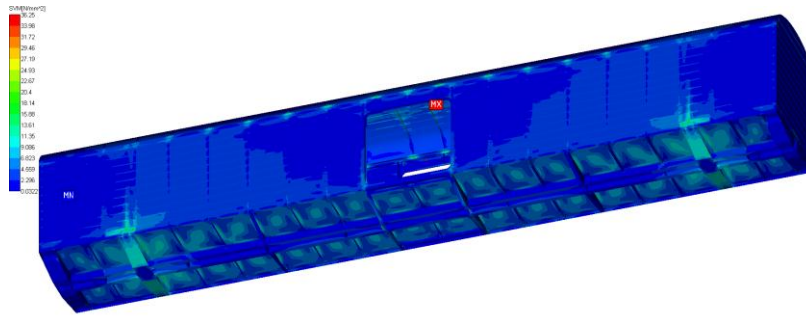
Ввиду отсутствия в реальной эксплуатации вагонов с жидкоазотным охлаждением режима охлаждения порожнего вагона есть смысл проведения расчетов по трём точкам – 50, 200 и 3000–3500 Па, до появления предельных значений.

При проведении расчетов с размещенным грузом в качестве начального взята нормируемая величина герметичности ГП 50 Па и с переменным шагом 100, 200, 400, 1000 и т.д. Па до появления предельных напряжений в наиболее напряженных местах тех же 3–4 силовых элементов металлоконструкции кузова. Величины напряжений, возникающих в конструкции пола рамы для этого варианта нагружения, представлены в табличном виде и на графиках. Полученные значения наиболее нагруженных элементов кузова занесены в таблицы 6.9, 6.10. На рисунке 6.16 представлены эквивалентные напряжения в узлах кузова с нормируемыми (50 Па) и предельными напряжениями.

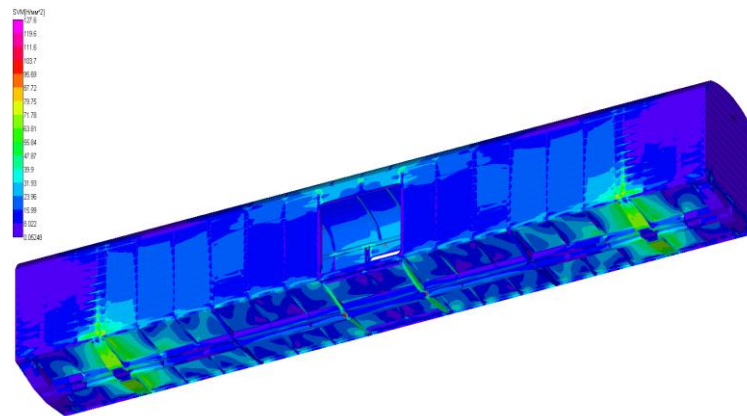
Диаграмма эквивалентных напряжений и диаграмма деформаций при росте давления в узлах кузова порожнего вагона представлена на рисунке 6.16.

Анализ результатов показал, что в первом расчёте порожнего вагона при избыточном давлении 50 Па максимальные напряжения появляются в ребре центральной дуги. Боковые стены распирает, и крыша деформируется вовнутрь. При нарастании давления такая тенденция роста напряжений увеличивается.

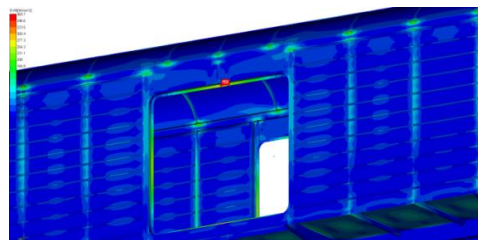
При расчете для груженого вагона вес груза был представлен в виде равномерно распределенной нагрузки на пол ГП. Результаты показали увеличение нагрузки на пол по балкам рамы вагона. В целом практически на всех режимах (кроме 3000 Па) концентраторы напряжений сместились на рамную зону. В кузове напряжения изменились в незначительной степени. Выросли напряжения в зоне стыковки боковых стоек и верхней части шкворневой балки, а также в центральном уголке порога, соединённого с поперечной балкой.



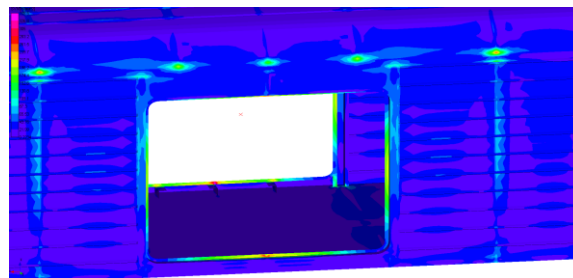
a



б



в

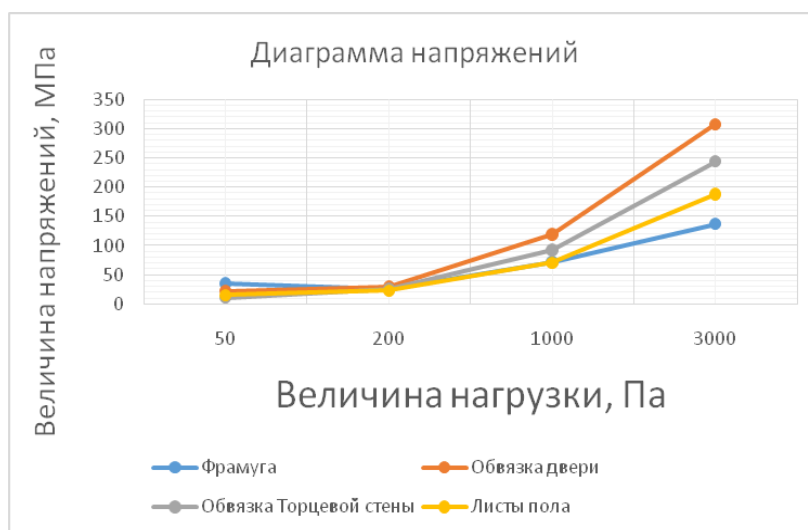


г

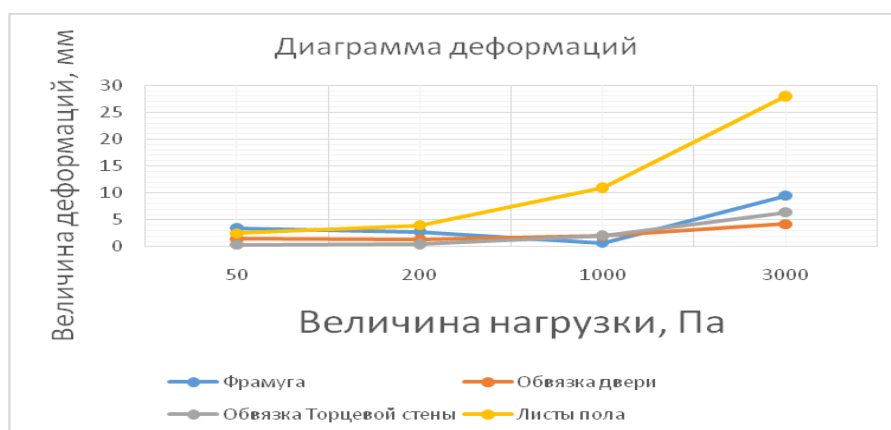
Рисунок 6.16 – Эквивалентные напряжения в узлах кузова порожнего и груженого вагонов при создании избыточного давления:
a – порожний при давлении 50 Па; *б* – груженный при давлении 50 Па;
в – порожний при давлении 3000 Па; *г* – груженный при давлении 2500 Па

Таблица 6.9 – Величины напряжений для порожнего вагона

Элемент кузова	Марка стали	Предел текучести, МПа	Эквивалентные напряжения, МПа (максимальные)				Максимальные общие деформации, мм			
			50 Па	200 Па	1000 Па	3000 Па	50 Па	200 Па	1000 Па	3000 Па
Фрамуга	09Г2Д	345	35	25,5	72 (25)	137	3,5	2,8	0,74	9,5
Обвязка двери	09Г2Д	345	22	29	119	308	1,5	1,4	2	4,2
Обвязка торцевой стены	09Г2Д	345	11	26	92	244	0,4	0,5	2,1	6,4
Листы пола	09Г2Д	345	15	23	70,5	188	2,8	4	11	28



а



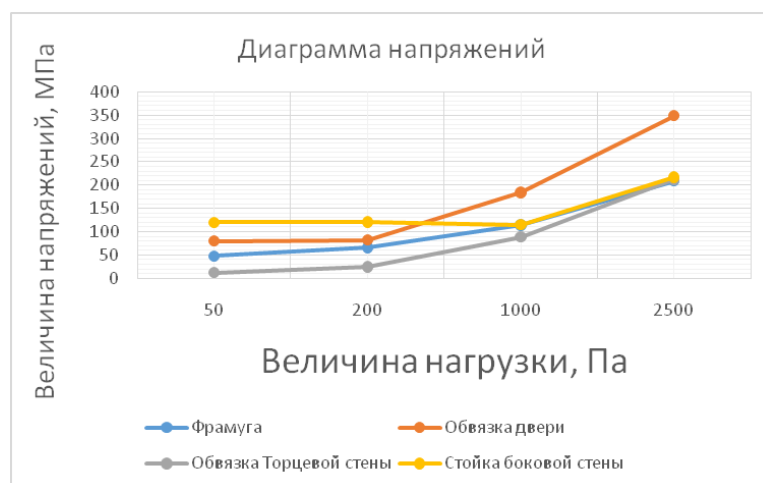
б

Рисунок 6.17 – Эквивалентные напряжения в узлах порожнего вагона

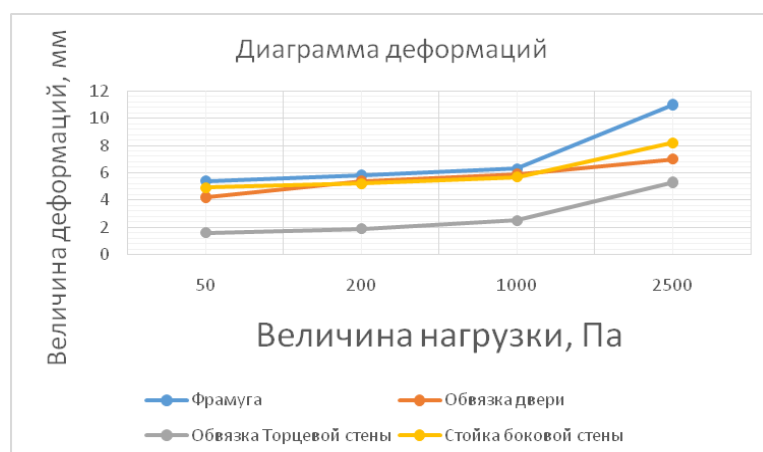
а – диаграмма напряжений; *б* – диаграмма деформаций

Таблица 6.10 – Величины напряжений для груженого вагона

Элемент кузова	Марка стали	Предел текучести, МПа	Эквивалентные напряжения, МПа (максимальные)				Максимальные общие деформации, мм			
			50	200	1000	2500	50	200	1000	2500
Фрамуга	09Г2Д	345	48	66	114	209	5,4	5,8	6,3	11
Обвязка двери	09Г2Д	345	80,1	82	184	349	4,2	5,4	5,9	7
Обвязка Торцевой стены	09Г2Д	345	12	24,8	89	212	1,6	1,9	2,5	5,3
Стойка боковой стены	09Г2Д	345	120	121	115	217	4,9	5,2	5,7	8,2



а



б

Рисунок 6.18 – Эквивалентные напряжения в узлах груженого вагона:

а – диаграмма напряжений; *б* – диаграмма деформаций

Выполненные расчеты показывают, что при нормируемой плотности кузова ИВ 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.

В реальной конструкции, для исключения возможностей возникновения в вагоне опасных для конструкции предельно допустимых напряжений в грузовом помещении должен быть предусмотрен предохранительный клапан, рассчитанный на давление 50 Па, с необходимым запасом площади проходного сечения в нем [64].

6.6. Выводы к шестой главе

1. Предложены обоснованные варианты компоновочных решений ХНУ и определены три перспективных по итогам комплексной оценки по следующим показателям:

- прочность кузова;
- лучшие технико-экономические параметры ГП,
- минимальная металлоемкость кузова;
- трудоемкость обслуживания ХНУ.

2. Разработаны четыре объемные конечно-элементные модели кузовов для изотермических вагонов:

- вагона-термоса;
- АРВ с торцевым расположением ХНУ;
- АРВ с крышевым торцевым расположением ХНУ;

– рефрижераторного вагона с крышевым центральным расположением ХНУ.

3. Выполненный анализ результатов расчетов по всем трем вариантам размещения ХНУ показал достаточную прочность и возможность относительно простой модернизации имеющейся металлоконструкции кузова изотермического вагона. В качестве мер по усилению узлов металлоконструкции кузова, предложено при установке на крыше по периметру дополнительное усиление крыши продольными элементами, развитое на 2–3 соседние 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 кг, 3-й вариант – 9870 кг.

4. С использованием метода анализа иерархий (МАИ) из трех рассматриваемых вариантов был осуществлен выбор рационального на основании поэтапного исследования с использованием следующих критериев: металлоемкость, прочность кузова, удобство эксплуатации, полезный объем кузова. Исполнение компоновки холодильного оборудования при центральном крышевом расположении ХНУ показало лучшие показатели.

5. Выполнен расчет и произведена оценка напряженно-деформированного состояния 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. Величина предельно допустимого давления в грузовом помещении составляет для порожнего вагона 3000 Па, для груженого – 2500 Па.

7. КОНСТРУКТИВНЫЕ РЕШЕНИЯ ХОДОВЫХ ЧАСТЕЙ ИННОВАЦИОННОГО ИЗОТЕРМИЧЕСКОГО ПОДВИЖНОГО СОСТАВА

7.1. Классификация ходовых частей подвижного состава, примененного для ИПС

7.1.1. Технико-экономические параметры ходовых частей грузовых вагонов

Ходовые части играют решающее значение при формировании одного из основных технико-экономических параметров фитинговой платформы – грузоподъемности, поэтому для определения конструкции перспективного подвижного состава необходимо проанализировать технические и эксплуатационные параметры грузовых тележек, находящихся в эксплуатации и в перспективных разработках. Кроме этого, динамические характеристики (возможности) тележек определяют показатели надежности энергохолодильного оборудования [179, 229, 234].

В настоящее время абсолютное большинство отечественных грузовых вагонов оснащены трехэлементными тележками ЦНИИ-ХЗ (модель 18-100) и тележками новых моделей такого же типа. В частности, вагоны-термосы модели ТНЧ-201 также оснащаются указанным типом тележек, и в проекте модернизации с продлением срока полезного использования замена типа тележек не планируется.

Разрабатываемые в настоящее время тележки предназначены для перспективного типажа грузовых вагонов в соответствии с программой развития вагоностроения, однако вопрос о новых тележках, предназначенных для рефрижераторных вагонов, остается открытым [1]. Скоростные тележки для фитинговых платформ для скорости 140 км/ч и с осевой нагрузкой 20 т в ближайшее время, по мнению автора, не будут востребованы перевозчиками КРК, так как их преимущества в скорости доставки не могут быть реализованы при существующей структуре локомотивного парка.

Абсолютное большинство грузовых вагонов нашей страны (в т.ч. и фитинговые платформы для транспортировки КРК) эксплуатируются на тележках модели 18-100 для осевой нагрузки 23,5 тс (брутто вагона до 94 т).

К серьезным недостаткам этих тележек можно отнести:

- межремонтный пробег не более 110 тыс. км;
- низкую надежность в период между деповскими ремонтами, частые текущие ремонты в эксплуатации;
- низкие показатели ходовых качеств, воздействия на путь и тормозной эффективности, приводящие к ограничению эксплуатационных скоростей движения грузовых вагонов до 90 км/ч для груженых составов и до 80 км/ч для порожних [9, 179].

В 2013 г. был принят межгосударственный стандарт ГОСТ 9246-2013 «Тележки двухосные трехэлементные грузовых вагонов железных дорог колеи 1520 мм. Общие технические условия», определяющий основные параметры и размеры тележек разных типов на перспективу [83].

В соответствии с ним вновь изготавливаемые двухосные тележки грузовых вагонов магистральных железных дорог колеи 1520 мм, вагонов промышленного транспорта подразделяются на четыре типа и должны соответствовать основным параметрам и размерам, приведенным в таблице 7.1.

Таблица 7.1 – Типы, основные параметры и размеры тележек [83]

Основные параметры и размеры	Тип тележки			
	1	2	3	4
1	2	3	4	5
Максимальная расчетная статическая нагрузка от колесной пары на рельсы, кН (тс)	196 (20)	230,5 (23,5)	245 (25)	294 (30)
Конструкционная скорость, км/ч	140	120	120	90
База тележки, мм, не более	1900	1850	1900	2200
Масса одной тележки в сборе, кг, не более	5000	4900	5300	6000
Расстояние от уровня головок рельсов до уровня опорной поверхности подпятникового места в свободном состоянии, мм	838	806	813	811
Расстояние между продольными осями боковых скользунов, мм	1524	1524	1524	1524
Расстояние между продольными осями рессорных комплектов, мм	2036	2036	2036	2036

Продолжение таблицы 7.1

1	2	3	4	5
Статический прогиб рессорного подвешивания под максимально допустимой нагрузкой брутто, мм, не более	70	60	65	90
Статический прогиб рессорного подвешивания под тарой, мм, не менее (при нагрузке от колесной пары на рельсы 60 кН)	38	11	17	15
Коэффициент относительного трения фрикционных гасителей колебаний в рессорном подвешивании под максимально допустимой нагрузкой брутто	(0,08–0,14)	(0,08–0,12)	(0,08–0,14)	(0,06–0,12)

Вновь созданные тележки для осевой нагрузки 23,5 тс (тип 2) направлены на устранение недостатков тележки модели 18-100. При этом, исходя из сложившейся на железных дорогах практики эксплуатации, их конструктивное устройство не должно существенно отличаться от эксплуатируемых тележек.

С 2009 г. на железных дорогах России повсеместно допускается осевая нагрузка 25 тс. К тележкам с увеличенной до 25 т/ось грузоподъемностью (тип 3) предъявляются повышенные требования по межремонтным пробегам, воздействию на путь, эксплуатационным скоростям движения. Конструктивное устройство, однако, также существенно не отличается от тележек модели 18-100.

Один из основных технических показателей тележек – конструкционная скорость движения вагона – составляет 120 км/ч для тележек типа 2 и 3, а увеличение скорости до 140 км/ч возможно лишь при уменьшении осевой нагрузки до 20 т/ось. Ограничителем эксплуатационной скорости, помимо состояния пути, является недостаточная тормозная эффективность вагонов, обусловленная применением в тележке схемы тормозной рычажной передачи с односторонним нажатием колодок на колесо. Существующие ограничения по длине тормозного пути грузового состава приводят к снижению возможной эксплуатационной скорости до 110 км/ч у тележек с осевой нагрузкой 23,5 тс и до 100 км/ч у тележек с осевой нагрузкой 25 тс. Поскольку в тележках нового поколения используется тормозная рычажная передача, унифицированная по передаточному числу с 18-100, то эта проблема пока не решена.

В неизношенном состоянии по показателям ходовых качеств тележка модели 18-100 обеспечивала конструкционную скорость 120 км/ч, однако по мере износа узлов в эксплуатации безопасная скорость движения опускалась до 70–80 км/ч, а для порожних вагонов – до 60 км/ч. Основными причинами крушений и аварий вагонов на тележках 18-100 являлись:

- нагрев подшипников и излом шейки оси колесной пары;
- излом боковой рамы по наружному и внутреннему углам буксового проема.

Для осевой нагрузки 25 тс и конструкционной скорости 120 км/ч большинство тележек имеет трехэлементную конструкцию с литыми несущими элементами (боковой рамой и надрессорной балкой).

Тележки с осевой нагрузкой 25 тс, так же как и тележки с осевой нагрузкой 23,5 тс, имеют одинаковые параметры, характеризующие их. Во всех тележках применена тормозная рычажная передача с односторонним нажатием колодок на колесо, с одинаковым передаточным числом, ограничивающая возможную скорость движения грузовых вагонов в эксплуатации до 100 км/ч.

Оставшиеся технические характеристики тележек, по которым тележки различаются, представлены в таблице 7.2 и разбиты на три группы:

- определяющие показатели ходовых качеств (в том числе их стабильность в эксплуатации) и воздействия на путь грузовых вагонов;
- определяющие надежность конструкции (в том числе ремонтпригодность и контролепригодность в эксплуатации);
- определяющие экономические показатели вагонов (масса, стоимость).

Себестоимость изготовления тележек нового поколения за счет увеличения массы крупного литья и колесных пар, усовершенствования узлов, применения комплектующих зарубежного производства на 20–40 % выше, чем у 18-100 М 1698, а себестоимость планового ремонта за срок службы – на 25–50 %. Окупаемость затрат возможна при подтверждении тележками в эксплуатации заявленных межремонтных пробегов, снижении количества отцепок в текущий ремонт, повышении ресурса колес [8,142-144].

Таблица 7.2 – Технические характеристики грузовых тележек

Техническая характеристика	Модель							
	18-100	18-9810	18-578	327	18-9855	18-194-1	26.В.503	ДП-3
Масса тележки, т	4,68	–	4,75	5,6	–	5,0	4,92	–
База, мм	1850	–	1850	2200	–	1850	1850	–
Конструкционная скорость, км/ч	120	–	120	140	–	120	120	140
Расстояние от уровня головки рельса до опорной поверхности подпятника, мм	801	–	811		–	818	–	–
Прогиб рессорных комплектов под статической нагрузкой, мм	49	–	68	100	–	62	62	–
Тип рессорного подвешивания	одноступенчатый центральный							одноступенчатый буксовый
Назначенный срок службы, лет	32	32	32	32	32	32	32	32
Осевая нагрузка, Тс	23,5	23,5	23,5	22,5	25	25	25	23,5

Значительное количество исследований этих современных моделей грузовых тележек было выполнено в ПГУПС Ю. П. Бороненко, А. М. Орловой и др. [18]. В работах А. М. Орловой [142-144] изложен иерархически-итерационный метод для исследования влияния на показатели ходовых качеств и выбора параметров силовых характеристик и конструктивных решений подвешивания тележек грузовых вагонов.

Показано, что конструктивные схемы тележек с жесткой в плане рамой и одноступенчатым буксовым подвешиванием и с нежесткой в плане рамой являются работоспособными как для увеличения осевых нагрузок, так и для повышения скоростей движения. Определены рациональные диапазоны параметров подвешивания, обеспечивающие устойчивость движения грузовых вагонов со скоростями до 130 км/ч. Однако ходовые части для специализированного ИПС в исследованиях не нашли такого подробного освещения.

7.1.2. Анализ ходовых частей для специализированных грузовых вагонов

В 90-е годы Брянским машиностроительным заводом была разработана тележка модели 327, предназначенная для эксплуатации под изотермическими вагонами с машинным охлаждением и скоростями движения до 38,89 м/с (140 км/ч) [3,107, 179, 132]. Тележка двухосная с одинарным центральным люлечным подвешиванием. Нагрузка от кузова вагона на раму тележки передается через надрессорную балку, опирающуюся на комплекты, состоящие из трехрядных пружин, установленных в поддонах люльки. Модификации тележки 327М и 327В имеют по 12 комплектов пружин, а 327В – шесть комплектов пружин, установленных параллельно продольной оси вагона. Рама опытной тележки состоит из двух полурам, связанных между собой при помощи упругих шарниров (сайлентблоков), расположенных по диагонали. Надрессорный брус имеет сварную конструкцию в виде балки равного сопротивления изгибу, коробчатого сечения в средней части и корытообразного – по концам.

В тележке модели 327В нагрузка от рамы тележки на колесные пары передается через типовые буксы с роликовыми подшипниками качения. Опорные поверхности обрешиненных буксовых проемов рамы развернуты в плоскости боковины на 15°. Подобное расположения буксовых узлов позволяет выбирать в буксовом проеме зазоры и уменьшать износ корпуса букс, который у тележки модели 18-100 может достигать 5 мм на одну сторону. Для компенсации технологических погрешностей и равномерного прилегания корпуса буксы к элементам рамы выполнено обрешинивание проемов с помощью резиновых прокладок-амортизаторов, закрепленных на внешней челюсти и опорной части рамы с помощью опорного седла с ограничителями и скобы с гайками.

Центральное рессорное подвешивание опытной тележки имеет люлечную конструкцию. Каждая люлька состоит из двух подвесок и поддона, в котором расположены комплекты пружин. Поддон корытообразного сечения имеет по концам проушины для шарнирного соединения с люлечными подвесками. Для исключения появления значительных кососимметричных нагрузок, обусловленных жестким опиранием рамы тележки на буксы, внутри поперечных

балок установлены сайлентблоки с диагональным расположением по вертикальным осям букс.

В тележках 327Б и 327В предусмотрен совмещенный фрикционный гаситель колебаний дискового типа, предназначенный для гашения вертикальных и горизонтальных колебаний. Тележка 327М оборудована отдельными для вертикальных и горизонтальных колебаний фрикционными гасителями.

Односторонний колодочный тормоз содержит типовые триангели с неповоротными башмаками и специальные параллелограммные устройства для параллельного отвода тормозных колодок от поверхностей катания колес.

Тележка ЦКБ ТМ модели 68-9953 предназначена для почтово-багажных вагонов для скоростей 160 км/ч с осевой нагрузкой 20 т, и 140 км/ч – 22 т/ось. Она разработана по заказу «Желдорэкспедиции» для багажных вагонов, и конструкция ее подобна, по сути, хорошо известной тележке КВЗ-ЦНИИ 2-го типа, но только с подрессорной балкой.

Ее отличительными особенностями являются следующие:

- усиленная сварная рама;
- надрессорная балка имеет две пары скользунов;
- центральный рессорный комплект устанавливается в сварной подрессорной балке, которая поддерживается четырьмя подвесками (по типу люлечного подвешивания тележки КВЗ-И2);
- гашение колебаний осуществляется парой вертикальных гидравлических гасителей;
- изменена конструкция кронштейна крепления поводка.

Тележка модели 18-9934 используется под вагонами специального назначения и рассчитана на скорость 140 км/ч с осевой нагрузкой 20 т [208].

Существенным отличием тележки 18-9934 от тележки 18-100 является то, что в ней реализована схема подвешивания с отдельным демпфированием вертикальных и боковых горизонтальных колебаний. Гашение колебаний в вертикальном направлении достигается за счет установки двух пар выносных фрикционных гасителей колебаний телескопического типа, устанавливаемых в

концевых частях надрессорной балки. Горизонтальные фрикционные демпферы постоянного трения установлены навстречу друг другу. Рессорный комплект тележки состоит из семи двухрядных пружин (аналогично тележке 18-100), на пять из которых опирается центр концевой части балки, а для опоры на две остальные (которые обычно предназначены для клиньев) балка имеет выступы, усиленные вертикальными ребрами. Для ограничения перемещения надрессорной балки в продольном направлении установлены поводки, крепление которых выполнено через резинометаллические шарниры. В случае обрыва поводков для выполнения их функций по бокам концевых частей балки располагаются вертикальные планки, взаимодействующие в этом случае со специальными плитами на боковине.

Для получения достаточной связанности несущих элементов тележки в плане, боковые рамы соединены диагонально расположенными упругими связями в виде стержней, проходящих под надрессорной балкой. Крепление стержней происходит через упругие шайбы. Необходимая жесткость тележки на сдвиг в плане достигается затяжкой этих шайб гайками.

Опираение боковых рам на кассетные подшипники колесных пар в тележке модели 18-9934 происходит через износостойкие накладки и адаптеры. Сложность конструкции тележки 18-9934 не позволяет применять ее массово, выпуск осуществляется единичными партиями.

Тележка модульной платформы ДП-3 с пониженным динамическим воздействием на путь разработана ОАО «ВКМ-инжиниринг» [171].

Данная тележка модульной платформы ДП имеет буксовую ступень рессорного подвешивания и однотипные системы опирания кузова, шкворневые узлы, тормозные системы, типовые колесные пары с кассетными подшипниками, поперечные балки, боковины.

Рама тележки Н-образная жесткого типа позволяет устранить один из главных недостатков, присущих трехэлементным тележкам – забегание боковин, являющееся причиной виляния тележки и ускоренного износа рабочих поверхностей колеса. На концах боковины имеются кронштейны для подвески внешних траверс.

Поперечная балка имеет прямоугольное коробчатое сечение с вырезами специального очертания в верхнем и нижнем листах, чем достигается снижение ее жесткости на кручение. Последнее существенно снижает разгрузки отдельных колес тележки и повышает запас устойчивости вагона против схода с рельсов, особенно при движении в переходных кривых. Соединение боковины со шкворневой балкой (поперечиной) выполнено на хук-болтах. В качестве буксового узла на тележке ДП-3 использован широко и длительно применяемый в конструкциях ведущих европейских вагоностроительных фирм челюстной буксовый узел с фрикционным гасителем Ленуара. В буксовом узле применены кассетные подшипники ТИМКЕН (130×250) мм, двукрыльчатая литая букса, две группы двойных пакетов витых пружин, имеющих билинейную характеристику с изменением почти в 3 раза жесткости подвешивания при переходе от порожнего к груженому режиму.

Литой челюстной блок, приваренный к концу боковины, имеет проем, в который входит букса. Трущиеся поверхности челюстей имеют противоизносные приварные накладки (возможно применение сменных композитных противоизносных вставок). Механизм Ленуара обеспечивает выбор продольного зазора в буксовом узле, прижатие трущихся поверхностей корпуса буксы и демпфера и изменение демпфирующей силы трения пропорционально вертикальной нагрузке буксового узла. Соотношение между вертикальной и горизонтальной составляющей силами механизма определено углом наклона серьги. Зарубежный опыт применения такого буксового узла подтверждает его межремонтный пробег до 1 млн км.

Опираение кузова осуществляется через две разнесенные боковые опоры, что снижает изгибающий момент поперечной балки и благоприятно сказывается на ее напряженном состоянии. Опоры имеют продольную и поперечную подвижность за счет перекатывания цилиндрических поверхностей сопряженных деталей. Геометрия поверхностей сопряжения выполнена таким образом, что при относительном смещении возникают квазиупругие возвращающие силы. Конструкция опоры позволяет вагону вписываться в кривые радиусом 60 м.

Тормозная передача выполнена двухсторонней, что необходимо для движения со скоростями 120 км/ч и с разделением тормозных передач двух тележек.

Ожидалось, что тележка ДП-3 позволит сократить расходы на обслуживание и ремонт пути и искусственных сооружений при статической нагрузке на ось грузовых вагонов до 25 тс и более за счет уменьшения разрушающего воздействия на путь. Однако проведенные испытания показали неудовлетворительные результаты, и эта модель тележки не может рассматриваться как перспективная.

7.2. Генераторно-приводные установки для автономных систем энергоснабжения пассажирских и рефрижераторных вагонов

В связи с сокращением парка РПС и отсутствием его производства с начала 1990-х годов становятся востребованными железнодорожные перевозки СПГ в КРК. Энергоснабжение таких контейнеров производится, как правило, от ДГА навесного или контейнерного исполнения [129, 130]. Стоимость электроэнергии, полученной таким способом, сравнительно высока, поэтому целесообразно организовывать контейнерные сцепы с централизованным энергоснабжением от вагона ДЭС. Однако данное техническое решение оправданно только при значительных объемах разовых погрузок. В случае перевозки небольшого количества рефрижераторных контейнеров целесообразно оборудовать фитинговые платформы подвагонной генераторно-приводной установкой, обеспечивающей автономное энергоснабжение холодильного агрегата. В отличие от пассажирских вагонов, на которых установка подвагонного генератора производится на раму тележки, применение такого способа для фитинговых платформ оказалось проблематичным из-за отсутствия на тележках грузовых вагонов жесткого кронштейна на раме [66, 177]. Классификация генераторно-приводных установок для различных типов вагонов представлена на рисунке 7.1.

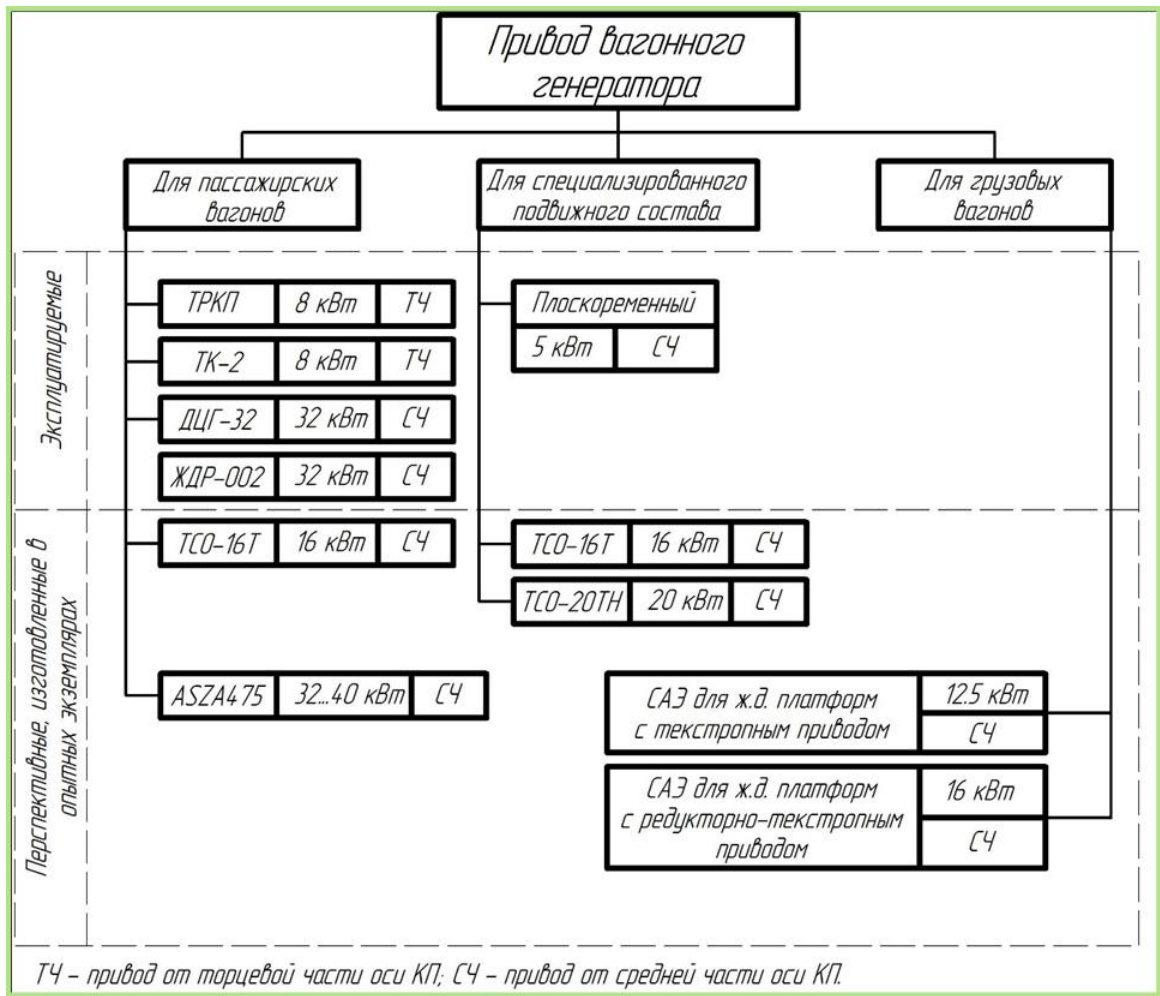


Рисунок 7.1 – Классификация конструктивных решений генераторно-приводных установок

Решение проблемы оснащения парка ИПС автономной энергетической установкой возможно двумя путями:

- разработка системы автономного электроснабжения (САЭ) для действующего парка фитинговых платформ, установленных на тележках модели 18-100;

- разработка (САЭ) на базе генераторно-приводной установки для перспективных рефрижераторных вагонов и фитинговых платформ, устанавливаемых на тележки типа КВЗ-И2, имеющих сварную раму.

7.2.1. Перспективные виды приводов на грузовых тележках

Поиск конструктивных решений, позволяющих оснастить эксплуатируемые фитинговые платформы подвагонным генератором, был произведен учеными ОАО «ВНИИЖТ». В результате была разработана и запатентована САЭ железнодорожных грузовых фитинговых платформ от оси колесной пары [110,137].

На рисунке 7.2 представлена общая схема САЭ, принцип работы которой состоит в следующем: генератор расположен в подвагонном пространстве на дополнительной площадке, которая через тягу, имеющую на концах сферические шарниры, соединена с хребтовой балкой платформы.

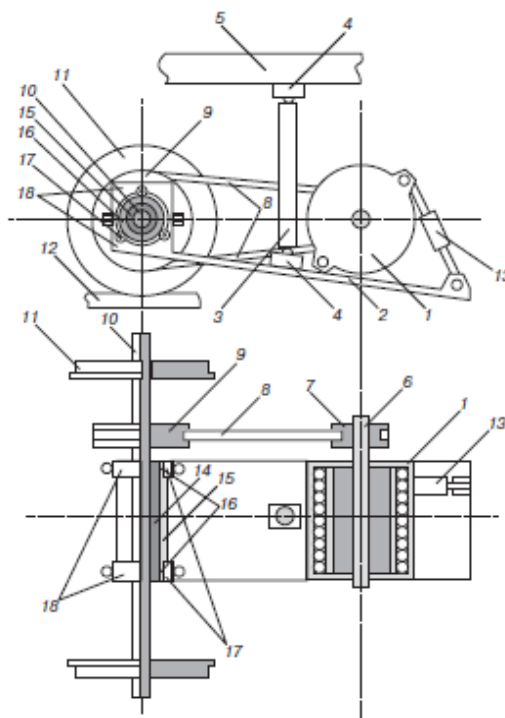


Рисунок 7.2 – Общая схема системы автономного электроснабжения железнодорожных грузовых платформ [137]:

- 1 – генератор; 2 – дополнительная площадка; 3 – тяга; 4 – шарниры; 5 – хребтовая балка вагона; 6 – вал генератора; 7 – ведомый шкив; 8 – приводной ремень; 9 – ведущий шкив; 10 – ось колесной пары; 11 – вагон-платформа; 12 – рельс; 13 – натяжное устройство; 14 – разрезная втулка; 15 – полый вал; 16 – проточка; 17 – ролики; 18 – разъемная опора

Для выработки электрической энергии вал генератора б приводится в движение через ведомый шкив, соединенный при помощи приводного ремня и ведущего шкива, соединенного с осью колеса платформы, расположенного на рельсе. Натяжение приводных ремней осуществляется натяжным устройством. Дополнительная площадка соединена с осью колеса при помощи разрезных резиновых втулок, обеспечивающих центровку оси колеса и передачу момента на разрезной полый вал, имеющий на концах своей поверхности концентрические проточки, для качения вдоль них выполненных в виде роликов разъемных опор, позволяющих оси колеса свободно вращаться.

Дополнительная площадка предназначена для соединения генератора с осью колесной пары и обеспечения постоянного межосевого расстояния ременной передаче, чем и достигается работоспособность их привода. Со стороны генератора площадка соединена с хребтовой балкой платформы при помощи тяги, имеющей на концах сферические шарниры, которые обеспечивают перемещение площадки относительно хребтовой балки платформы, тем самым создавая условия для прохождения платформой кривых участков пути.

Для реализации технического решения были разработаны «Технические требования на опытный образец комплекса устройств для энергоснабжения фитинговых платформ от оси колесной пары тележки типа 18-100 грузового вагона».

По ряду причин данные разработки не доведены до стендовых или ходовых испытаний опытных образцов в составе САЭ фитинговых платформ.

Впоследствии совместной группой специалистов ПКБ ОАО «ВНИИЖТ» и компании ООО «Новека» была произведена оптимизация конструкции САЭ от оси колесной пары трехэлементной грузовой тележки типа 2 для фитинговых платформ. Данная САЭ в отличие от предыдущих вариантов имеет ряд преимуществ: относительно простая конструкция, возможность работы со всеми тележками второго типа, отсутствие рекуперативных потерь, увеличенный эксплуатационный потенциал.

В состав данной САЭ входят:

- двухступенчатый редукторно-текстропный (РТ) привод от средней части оси колесной пары;
- синхронный трехфазный генератор номинальной мощности 20 кВт;
- транспортный преобразователь частоты длительной выходной мощности 19 кВт;
- элементы подвески генераторно-приводной установки и преобразователя частоты на раме фитинговой платформы;
- электрокабельной разводки.

Генераторно-приводная установка новой САЭ показана на рисунке 7.3.

Она устанавливается с одной стороны на оси колесной пары *1*, а с другой стороны с помощью тяги и траверсы с корпусом *3* – к хребтовой балке рамы платформы. Таким образом, реализована классическая схема опорно-осевой подвески приводного механизма.

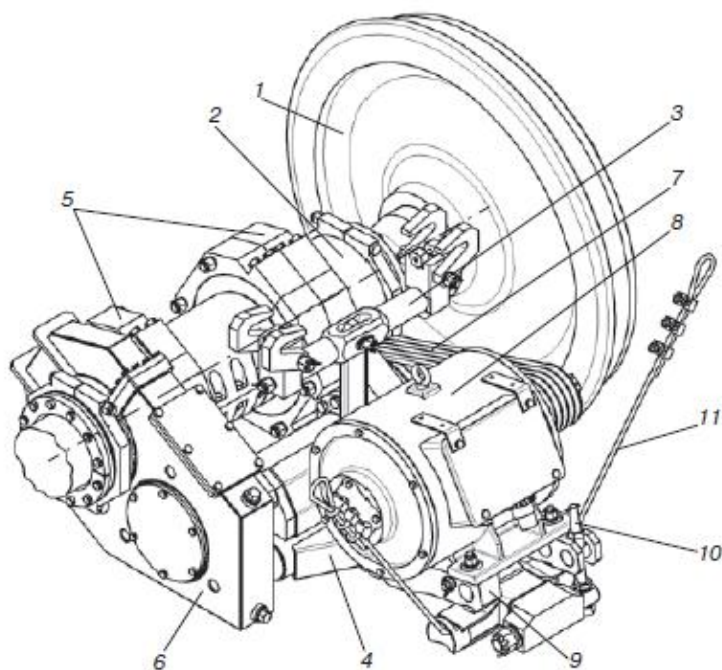


Рисунок 7.3 – Генераторно-приводная установка новой системы автономного электроснабжения [110]:

- 1* – ось колесной пары; *2* – ведущий вал; *3* – траверса с корпусом; *4* – рама;
5 – подшипниковая опора; *6* – редуктор; *7* – ведущий шкив клиноременной передачи; *8* – генератор; *9* – опора; *10* – натяжное устройство;
11 – страховочное устройство

С помощью разъемного полого ведущего вала производится установка на оси колесной пары. Ведущий вал закрепляется на оси с помощью резиновых втулок, затяжка которых обеспечивает центрирование ведущего вала и передачу крутящего момента от оси колесной пары к ведущему валу. На ведущем валу устанавливается рама с помощью подшипниковых опор. На ведущем валу устанавливается также разъемная ведущая шестерня одноступенчатого редуктора. Ведомая шестерня редуктора соединена с промежуточным валом, закрепленным в подшипниковых узлах на раме. Повышающий редуктор имеет передаточное отношение $i_p = 2,971$.

На другом конце промежуточного вала смонтирован ведущий шкив клиноременной передачи с расчетным диаметром $D_p = 250$ мм.

Генератор с помощью болтовых соединений устанавливается на поворотной площадке опоры, шарнирно соединенной с рамой. На выходном конце ротора устанавливается ведомый шкив клиноременной передачи, имеющий расчетный диаметр $d_p = 140$ мм. Натяжение клиноременной передачи осуществляется винтовым механизмом. Клиноременная передача оснащается комплексом из пяти ремней ХРВ-1600, имеет межцентровое расстояние $l_s = 500$ мм и начальное натяжение всего комплекта $F_0 = 3,1 \pm 0,6$ кН. Ременная передача, кроме увеличения общего передаточного отношения генераторно-приводной установки, выполняет функцию эластично-предохранительной муфты и предохраняет генератор или редуктор в случае заклинивания (разрушения) одного из них. В случае разрушения подвески 3 от падения на путь генераторно-приводной установки предусмотрено страховочное устройство.

Генераторно-приводная установка предназначена для обеспечения работы САЭ в диапазоне скоростей движения платформы от 30 ± 5 до 120 км/ч [110].

Оборудование фитинговых платформ на трехэлементных тележках системами автономного энергоснабжения обусловлено относительно невысокой стоимостью капитальных затрат. Применение подобных энергетических установок возможно в переходный период, для оборудования уже эксплуатируемого подвижного состава.

Стоит отметить, что динамические характеристики платформ на тележках 18-100 не позволяют обеспечить необходимую плавность хода, что отрицательно сказывается на сохранности перевозимого груза и надежности работы как энергетической, так и холодильной установки КРК. Данные меры применимы для модернизации существующих конструкций фитинговых платформ в условиях возрастающего объема и повышения требований к качеству и скорости перевозок.

Преимуществами тележек со сварной рамой перед трехэлементными тележками являются:

- отсутствие ограничений по скорости до 120 км/ч в порожнем и груженом состоянии по динамическим параметрам и оснащенности тормозными устройствами;

- возможности повышения скоростей до 140 км/ч за счет модернизации буксового подвешивания и установки в нем фрикционных гасителей колебаний (необслуживаемых);

- уменьшенные значения поперечных ускорений кузова, решающим образом сокращающих опасность повреждения чувствительного к вибрациям и ударам груза и аппаратуры и поперечного воздействия на путь;

- повышение безопасности движения и сокращение вероятности схода с рельс за счет отсутствия забегания боковин рамы;

- исключение интенсивно изнашивающихся узлов центрального рессорного подвешивания (фрикционных клиньев) за счет использования упругих элементов в виде эллиптических рессор, выполняющих одновременно роль гасителей колебаний. Это увеличивает межремонтный пробег и сокращает эксплуатационные расходы;

- увеличение срока службы колес (по данным американских исследований, при переходе от трехэлементной схемы к рамной конструкции, исключаящей забегание боковин, срок службы колес увеличивается в пропорции 1,9/2,2).

В связи с этим разрабатываются варианты установки генераторно-приводной установки на тележки рамного типа с двухступенчатым рессорным подвешиванием.

Такая тележка выпускалась серийно и использовалась для грузовых вагонов пятивагонной рефрижераторной секции РС-5 производства ОАО «БМЗ». Эта тележка (модель КВЗ-И2) с центральным рессорным подвешиванием рассчитана на ось с допускаемой нагрузкой 23,5 тс.

7.2.2. Агрегатированная необслуживаемая генераторно-приводная установка

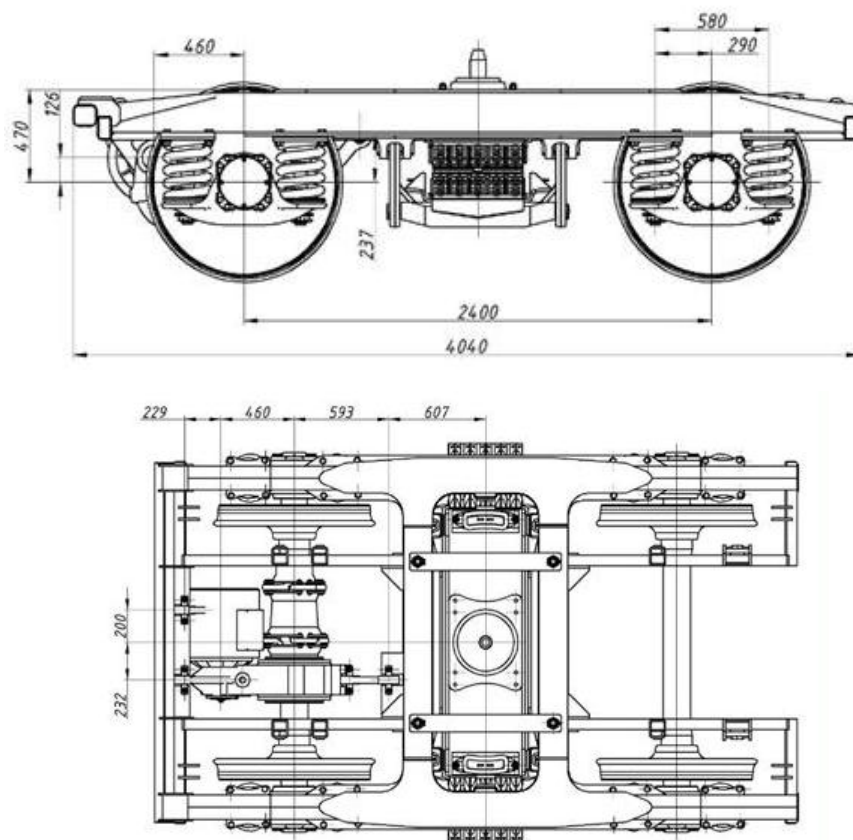
В пассажирском вагоностроении уже давно используются конструкции генераторно-приводных установок, применение которых возможно и на одиночном ИПС [177, 198]. Одним из таких решений является конструкция моноблочной малообслуживаемой генераторно-приводной установки ASZA 475 – совместная разработка отечественных производителей и фирмы Flender, в настоящее время вошедшей в состав концерна Siemens [108]. Эта установка разработана и испытана ООО «ТрансПриводТверь» и предназначена для пассажирских тележек рамной конструкции ТВЗ-ЦНИИ-М. Мощность этой установки от 32 до 40 кВт, и она обеспечивает работу генератора в диапазоне скоростей движения вагона от 35 до 200 км/ч.

Для использования установок ASZA 475 на одиночном РПС необходимо только увеличить передаточное отношение редуктора, чтобы обеспечить работу генератора на номинальной мощности, начиная со скорости 25 км/ч.

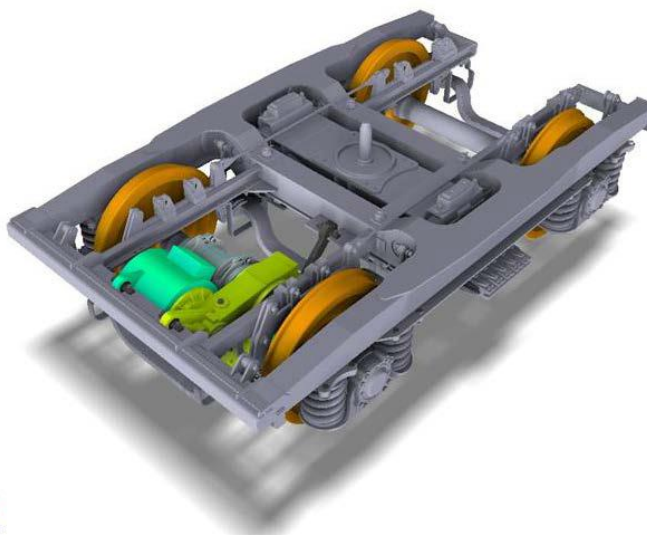
Вся генераторно-приводная установка (рисунок 7.4) подвешивается к раме тележки в трех точках. На оси колесной пары монтируется эластичная муфта, которая снимает крутящий момент при движении вагона. Крутящий момент от эластичной муфты передается на полый ведущий вал двухступенчатого редуктора с цилиндрической зубчатой передачей и эвольвентным профилем.

От выходного вала редуктора крутящий момент через предохранительную муфту передается на генератор.

Предохранительная муфта, установленная между генератором и редуктором, предназначена для защиты редуктора и других узлов привода от поломок при внезапной остановке от заклинивания генератора.



a



б

Рисунок 7.4 – Общий вид генераторно-приводной установки ASZA475 на тележке КВЗ-И2:

a – конструкторская документация; *б* – твердотельная модель

Благодаря сокращению количества элементов в генераторно-приводной установке повышается общая надежность системы энергоснабжения вагона. Соединение редуктора с осью посредством эластичной (шарнирно-шаровой) муфты компенсирует перемещения оси колесной пары в вертикальном, горизонтальном, аксиальном и, что особенно важно, угловом направлениях.

Крепление всей установки на раме тележки имеет ряд преимуществ: наименьший неподдрессоренный вес и, как следствие, меньшее воздействие на буксовые подшипники, снижение динамических нагрузок на элементы привода и повышение их долговечности, снижение динамического момента в приводе и повышение КПД передачи.

Применение современных технологий позволило получить высокие эксплуатационные показатели привода ASZA 475:

- требуемая периодичность осмотра зубчатой передачи – 500 тыс. км;
- назначенный ресурс редуктора до деповского ремонта 1,5 млн км, до капитального – 3 млн км [108].

7.3. Моделирование динамики изотермического вагона с текстропным приводом генератора средней части оси

В данном разделе разработаны теоретические положения, изложенные в работах [21, 22, 32-34, 52, 54, 232, 249], позволяющие обоснованно подходить к выбору ходовых частей ИПС, учитывая возможность установки на тележке текстропного привода генератора.

Математическое моделирование колебаний рефрижераторного вагона целесообразно выполнить в программе «Универсальный механизм» (УМ), которая значительно сокращает время разработки для систем с большим числом степеней свободы [158].

Изложим ключевые моменты в создании модели. Массо-инерционные характеристики тел, которые решено включить в модель, получены на основе трехмерных моделей, построенных средствами САД-программ.

Упругие характеристики пружин буксового подвешивания определены в УМ на основе их реальных размеров.

Люлечное подвешивание тележки с рессорой Галахова представлено как отдельная подсистема, которая учитывает нелинейные свойства рессоры и работу люльки. Силовая характеристика рессоры имела вид $p(\xi) = c(f_{st} + \xi)1 + \varphi \text{sgn}(\varphi)$, где c – жесткость рессоры; f_{st} – статический прогиб; φ – коэффициент относительного трения; ξ – дополнительный прогиб, отсчитываемый от статического. С помощью соответствующих шарниров она присоединена к раме тележки.

Генератор с ременной передачей и натяжным устройством также представлен отдельной подсистемой. Графический образ ремней и натяжного устройства не создавался. Натяжное устройство и комплект ремней описываются линейной силой упругости.

При опоре кузова на надрессорную балку используется контактное взаимодействие в узле «пятник – подпятник» и непостоянный контакт в скользунах.

Внешний вид модели тележки в УМ показан на рисунке 7.5.

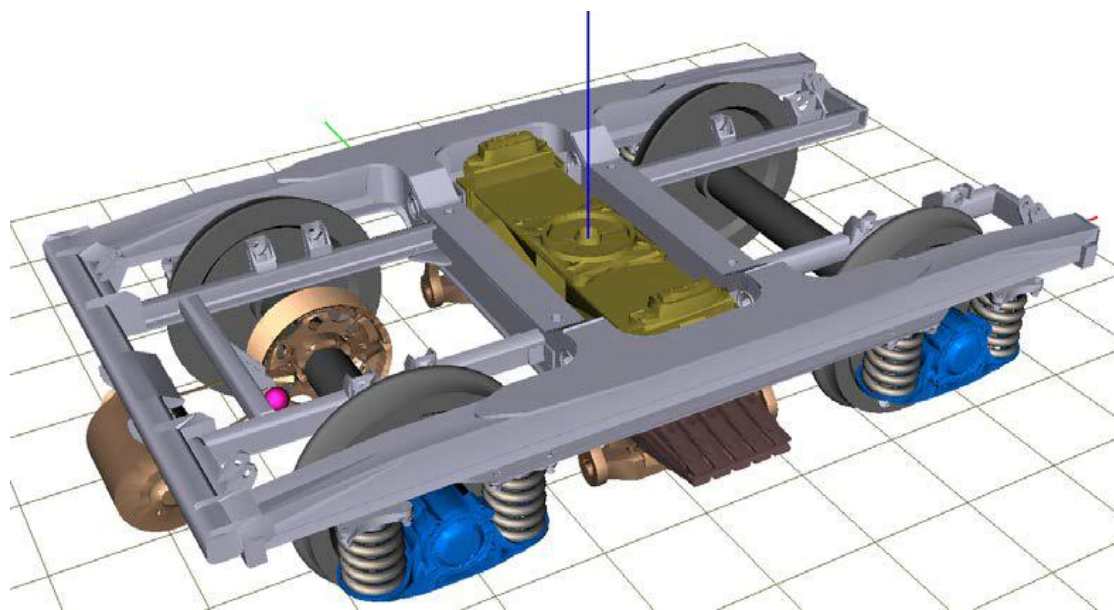


Рисунок 7.5 – Модель тележки КВЗ-И2 с текстропным приводом генератора от средней части оси в программном комплексе «Универсальный механизм»

Перспективная конструкция привода представлена на рисунке 7.6.

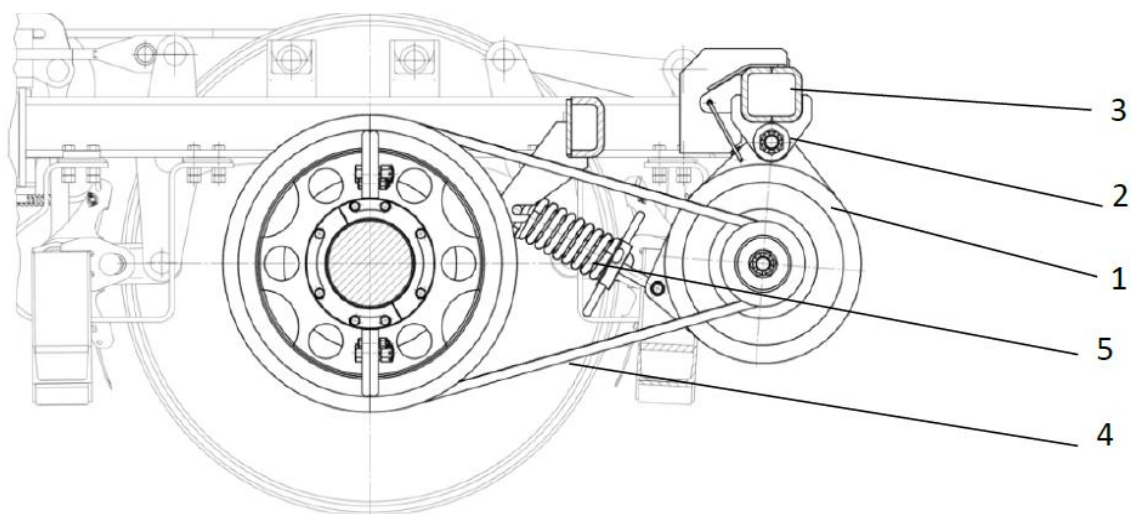


Рисунок 7.6 – Перспективный текстропный привод от средней части оси:

- 1 – генератор; 2 – шарнирное крепление; 3 – рама тележки;
4 – ременная передача, 5 – натяжное устройство

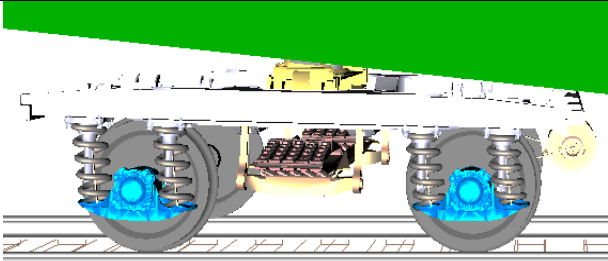

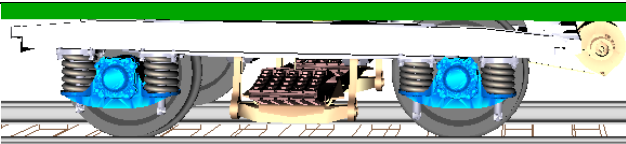

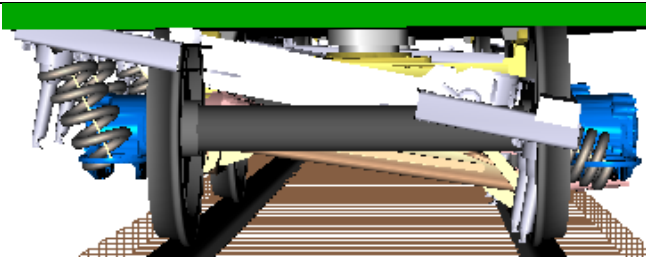
Как следует из рисунка, генератор может совершать угловые перемещения вокруг шарнира 2.

Рассмотрим динамические характеристики рефрижераторного вагона, такие как ускорение, плавность хода, собственные частоты колебаний. Это позволит выбрать наиболее рациональные конструктивные параметры ИПС.

Выполним расчет собственных частот колебаний при гибкости рессоры 4,12 мм/т, надбуксовой пружины 8,6 мм/т. Примем следующие характеристики привода: жесткость комплекта ремней 1400 Н/мм, жесткость натяжного устройства 150 Н/мм.

В таблице 7.3 приведены некоторые значения частот и соответствующая им форма колебаний. Ряд частот до 30 Гц 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. Как видно из результатов, генератор, закрепленный на концевой балке тележки, приводит к тому, что колебания становятся взаимосвязанными, например, подпрыгивания и галопирования рамы тележки.

Таблица 7.3 – Собственные частоты и форма колебаний

Частота, Гц	Форма колебаний
6,02	
9,11	
7,64	
3,98	
10,98	

Исследование колебаний при случайном возмущении со стороны пути проводилось во временной области. На основе формул для спектров неровностей «Международного объединения железных дорог» (UIC) получены неровности для пути длиной 5000 м. Состояние пути принято «плохое».

Расчеты выполнялись для скоростей 5–160 км/ч, в качестве функционала, характеризующего колебания, принято среднеквадратическое отклонение (СКО). Результаты расчета колебаний подпрыгивания рамы тележки показаны на рисунке 7.7.

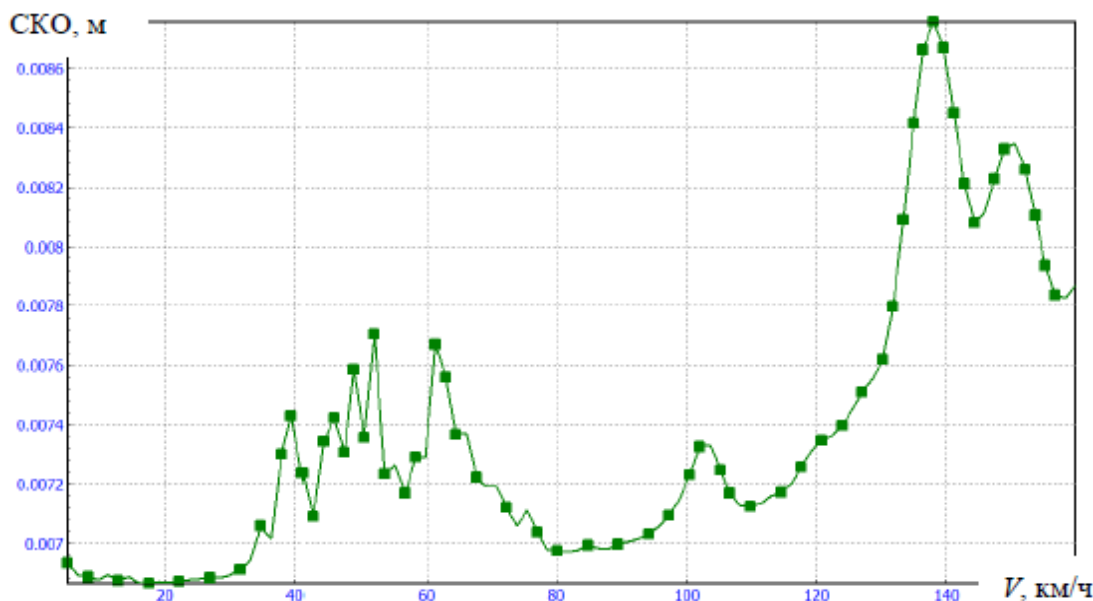


Рисунок 7.7 – Среднеквадратичное отклонение амплитуды колебаний подпрыгивания рамы тележки

СКО амплитуды колебаний имеет несколько локальных экстремумов. На скоростях 60–80 км/ч наблюдается снижение в сравнении со скоростями 40–60 км/ч. Значения СКО амплитуды для скоростей выше 120 км/ч приведены справочно, так как тележка конструктивно не предназначена для эксплуатации на этих скоростях.

Ввиду того что СКО амплитуды колебаний не несёт информации о частотах, рассмотрим спектральную плотность мощности колебаний рамы тележки и генератора на скоростях 40 и 80 км/ч (рисунок 7.8). На рисунке 7.8, *a* показаны частоты колебаний подпрыгивания рамы тележки без генератора. Спектры значительно различаются, в частности, на скорости 80 км/ч (рисунок 7.8, *в*) наблюдается появление колебаний на частотах 8–10 Гц.

Таким образом, результаты на рисунке 7.8 указывают на то, что установка привода и генератора на тележку приводит к взаимному влиянию различных видов колебаний и появлению эффектов гашения и усиления колебаний на определенных скоростях движения.

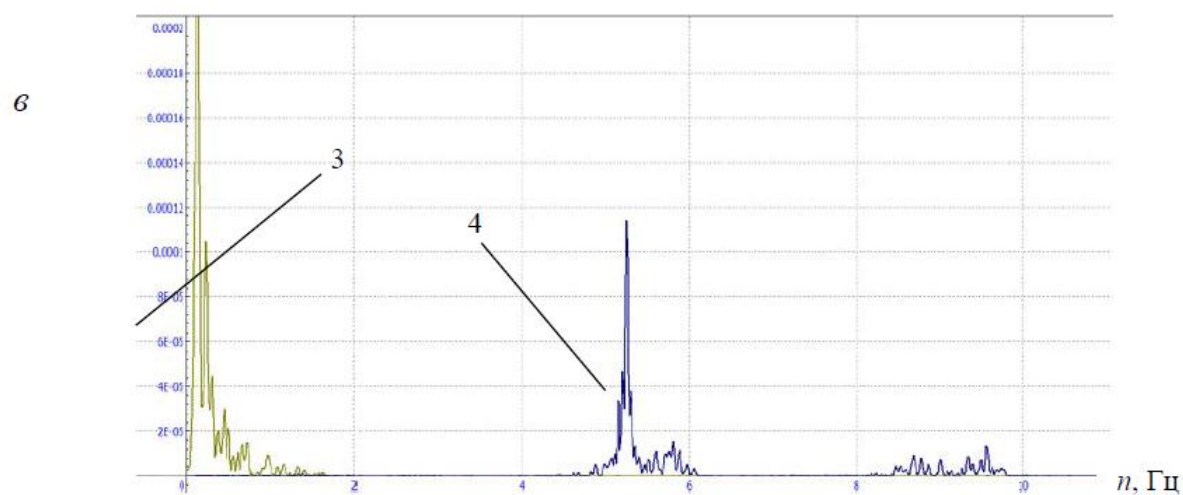
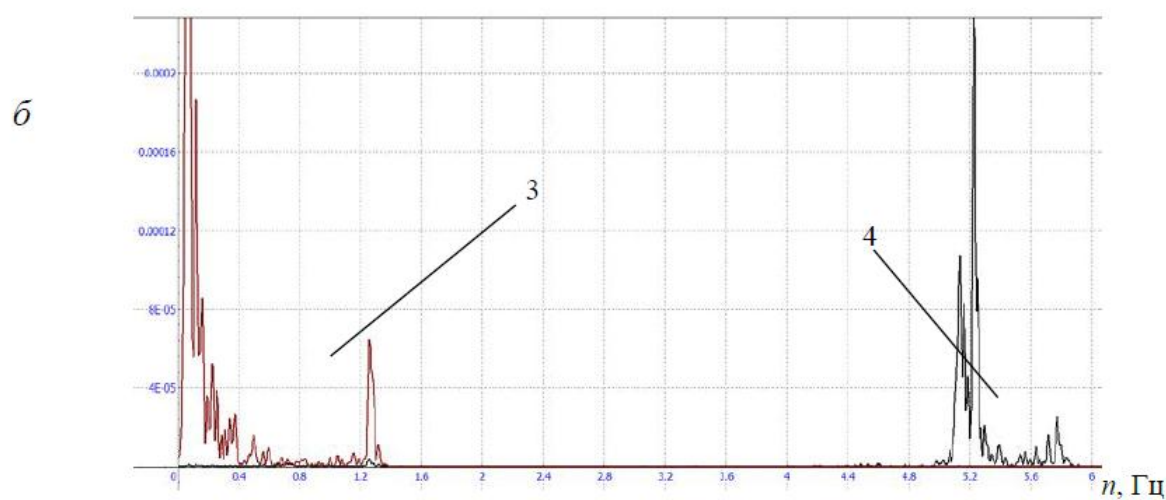
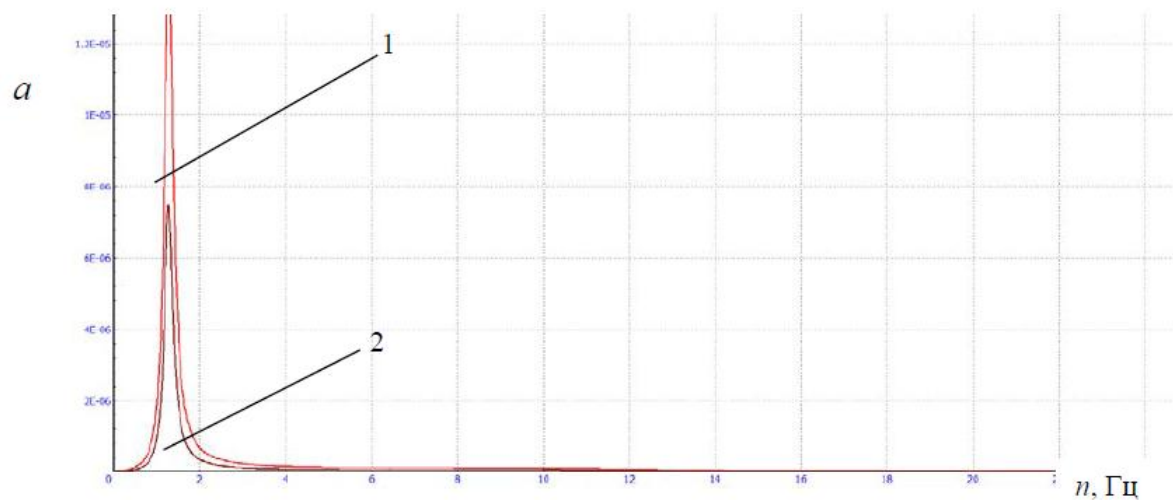


Рисунок 7.8 – Спектральная плотность мощности колебаний рамы тележки:
a – без генераторно-приводной установки; *б* – тележки с генератором на скорости 40 км/ч; *в* – тележки с генератором на скорости 80 км/ч

Рассмотрим работу системы подвешивания генератора с учетом возможных изменений параметров конструкции. Моделирование выполним с использованием программы Simpack, с помощью которой определены собственные частоты колебаний генератора для разных вариантов конструкции и найдены области параметрического резонанса.

Модель системы подвешивания генератора показана на рисунке 7.9. Буквой О обозначено шарнирное крепление, буквой А – ось ведомого шкива, точка приложения силы от натяжного устройства обозначена буквой Б.

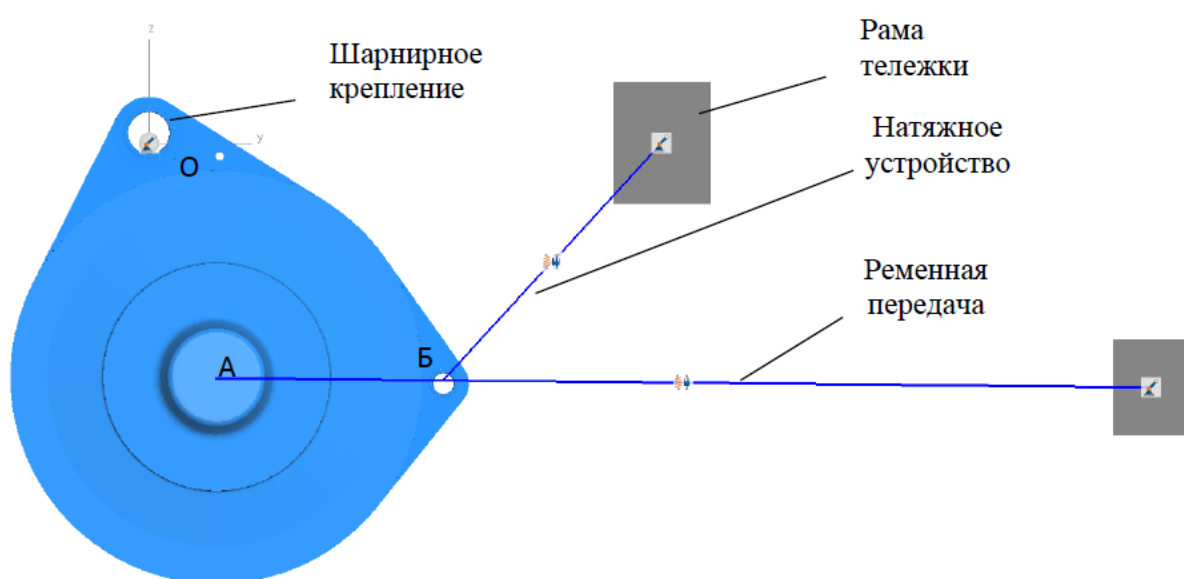


Рисунок 7.9 – Модель привода в программе Simpack

Для определения областей неустойчивости колебаний исследуем систему во временной области, в качестве критерия, характеризующего амплитуду колебаний, примем СКО. Возмущение в виде $Z_1 = A \sin \omega t$ приложим к шарнирному креплению в вертикальном направлении и проварьерируем частоту в интервале 1–30 Гц, амплитуду – в интервале 1–20 мм.

Технические характеристики вариантов исполнения приводов представлены в таблице 7.4.

Собственные частоты колебаний генератора в соответствии с вариантом представлены в таблице 7.5.

Таблица 7.4 – Характеристики привода

Вариант конструкции	Жесткость ременной передачи C_p , Н/мм	Жесткость пружины натяжного устройства J_{np} , Н/мм	Расстояние ОА, м	Расстояние ОБ, мм	Сила натяжения ремня, Н
1	880	105	0,23	0,36	4500
2	1400	150	0,23	0,4	6000
3	1500	150	0,3	0,3	6000

Таблица 7.5 – Собственные частоты колебаний

Номер варианта	Частота, Гц	Действительная часть	Мнимая часть
1	6,63305	0	41,6767
2	8,23809	0	51,7615
3	8,55098	0	53,7274

Результаты расчетов областей неустойчивости вариантов конструкции 1–3 представлены на рисунках 7.10–7.12 в виде изолиний СКО с заполнением цветом.

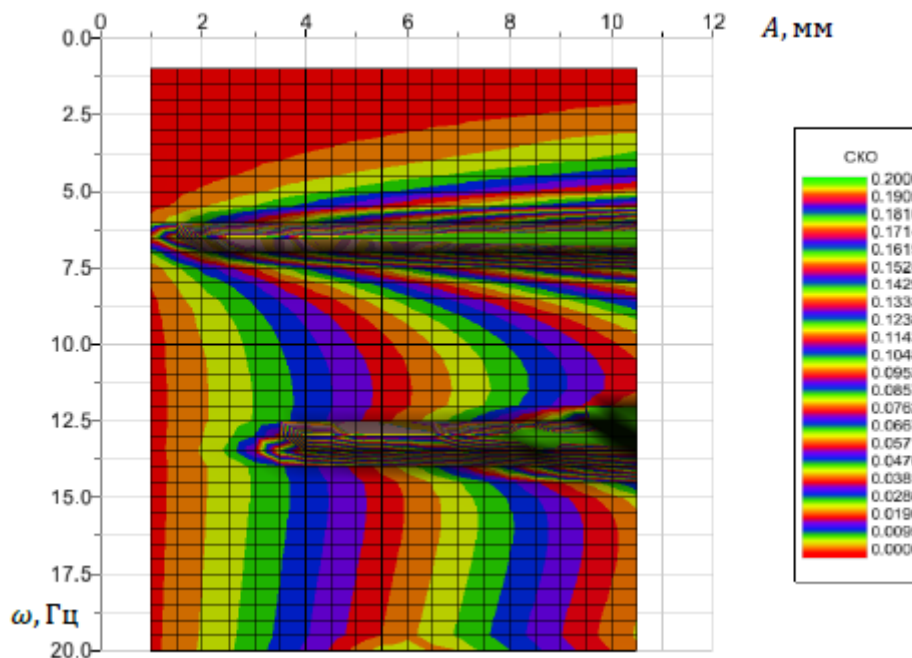


Рисунок 7.10 – Линии уровней СКО колебаний генератора варианта 1

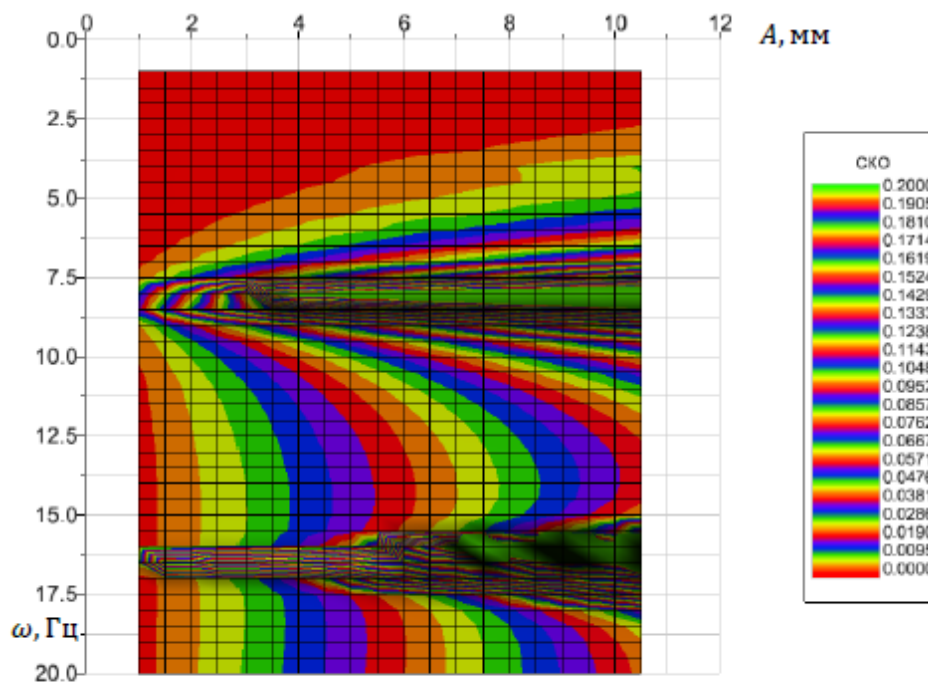


Рисунок 7.11 – Линии уровней СКО колебаний генератора варианта 2

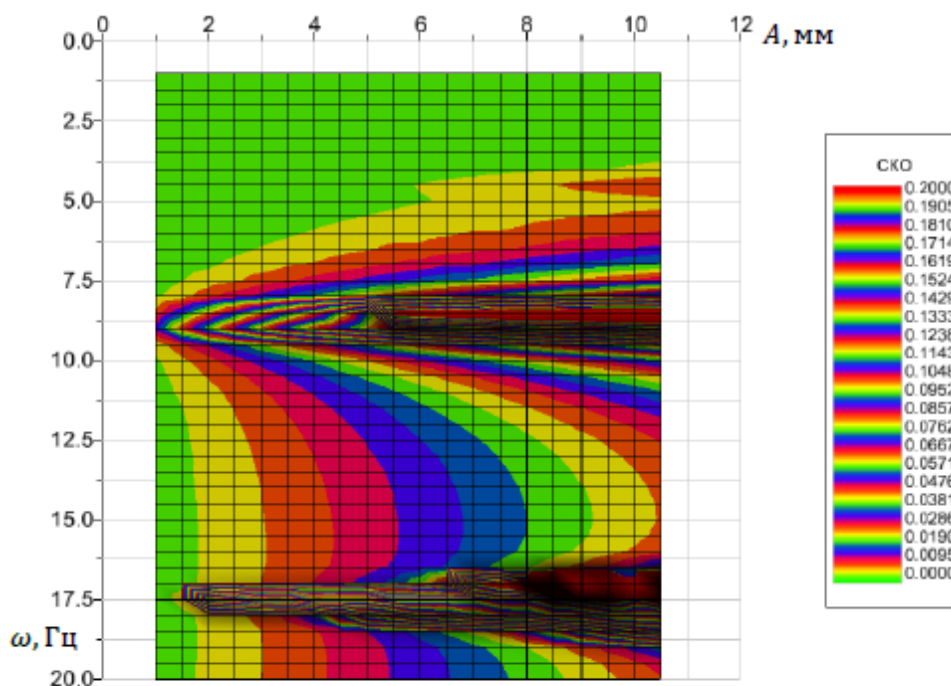


Рисунок 7.12 – Линии уровней СКО колебаний генератора варианта 3

На рисунках можно выделить две области неустойчивости, которые расширяются с ростом амплитуды возмущения, на частоте собственных колебаний генератора и на удвоенной собственной частоте.

Расчет областей неустойчивости занимает значительное время и требует наличия соответствующих программных средств для моделирования динамических систем, поэтому представляется целесообразным разработать инженерную методику оценки устойчивости колебаний.

В основе методики положим расчетную схему системы подвешивания, показанную на рисунке 7.13.

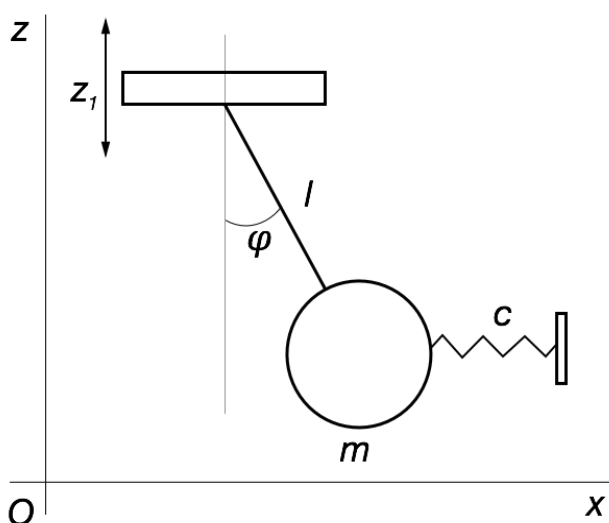


Рисунок 7.13 – Расчетная схема системы подвешивания:

c – приведенная жесткость комплекта ремней и натяжного устройства;
 m – масса генератора; φ – обобщенная координата; z_1 – возмущение со стороны рамы тележки

Вспользуемся уравнениями Лагранжа второго рода для системы:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{dT}{d\dot{q}_i} \right) - \frac{dT}{dq_i} = Q_i, \quad (7.1)$$

где T – кинетическая энергия;

q_i – обобщенные перемещения;

\dot{q}_i – обобщенные скорости;

Q_i – обобщенные силы.

Перемещение генератора в проекции на оси Ox , Oz :

$$s_x = l \sin \varphi,$$

$$s_z = l - l \cos \varphi + z. \quad (7.2)$$

Скорость

$$v_x = l \dot{\varphi} \cos \varphi,$$

$$v_z = l \dot{\varphi} \sin \varphi + \dot{z}. \quad (7.3)$$

Кинетическая энергия

$$T = \frac{m(v_x^2 + v_z^2)}{2}, \quad (7.4)$$

$$T = \frac{m((l \dot{\varphi} \cos \varphi)^2 + (l \dot{\varphi} \sin \varphi + \dot{z})^2)}{2}$$

Получим

$$\frac{dT}{d\dot{\varphi}} = ml^2 \dot{\varphi} + ml \dot{z} \sin \varphi,$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{dT}{d\dot{\varphi}} \right) = ml^2 \ddot{\varphi} + ml \dot{z} \sin \varphi + ml \dot{z} \dot{\varphi} \cos \varphi,$$

$$\frac{dT}{d\varphi} = ml \dot{\varphi} \dot{z} \cos \varphi. \quad (7.5)$$

Обобщенная сила

$$Q_\varphi = -\frac{d\Pi}{d\varphi}. \quad (7.6)$$

Где Π – потенциальная энергия системы.

$$\Pi = mg(l - l \cos \varphi) + \frac{cl^2 \varphi^2}{2} \quad (7.7)$$

Тогда

$$\frac{\partial \Pi}{\partial \varphi} = mgl \sin \varphi + cl^2 \varphi. \quad (7.8)$$

Тогда уравнение принимает следующий вид:

$$ml^2 \sin \varphi + ml\bar{z} \sin \varphi + mg \sin \varphi + cl^2 \varphi = 0. \quad (7.9)$$

Положим, что $\sin \varphi \approx \varphi$, тогда

$$ml^2 \varphi + ml\bar{z} \varphi + mg \varphi + cl^2 \varphi = 0.$$

Если $z(t)$ функция вида $z = z_0 \sin \omega t$ или $z = z_0 \cos \omega t$, то уравнение можно представить в виде [30]:

$$\bar{\varphi} + \omega_0^2(1 + 2\mu \cos \omega t)\varphi = 0, \quad (7.10)$$

где $\omega_0^2 = \frac{g}{l} + \frac{c}{m}$. (7.11)

Первые две области неустойчивости согласно [30] представлены на рисунке 7.13. Для того чтобы выяснить, устойчивы колебания или нет, необходимо задаться частой возмущения ω , определить $2\omega_0$ и найти соотношение $\frac{\omega}{2\omega_0}$.

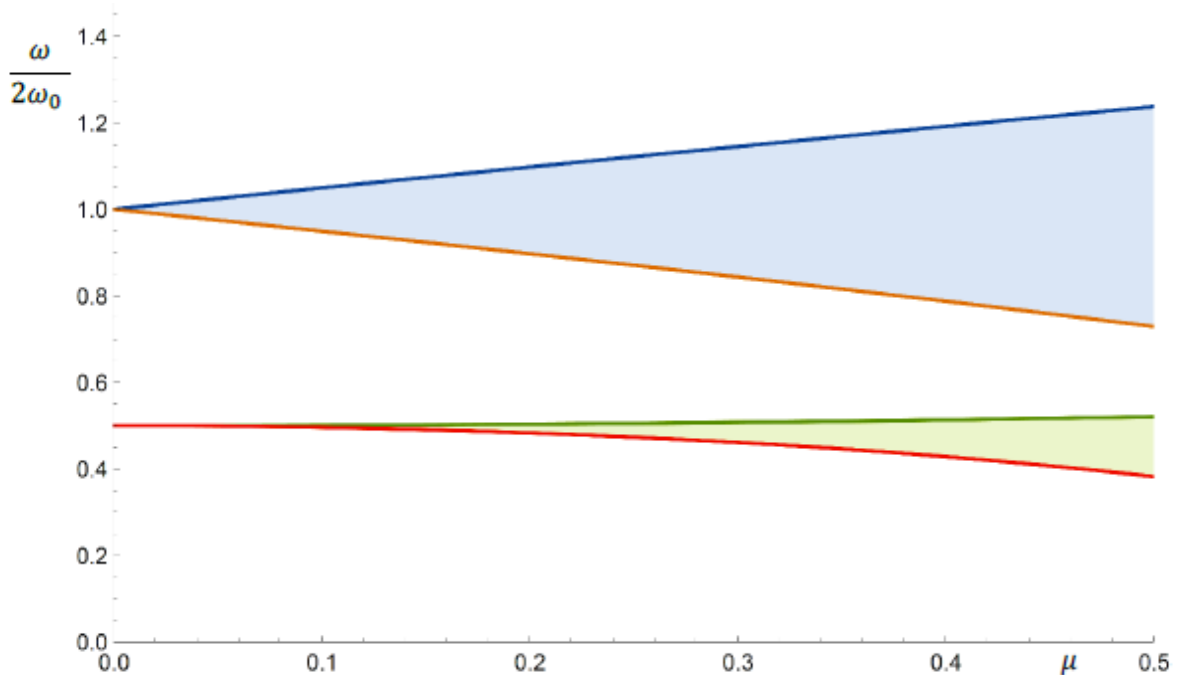


Рисунок 7.14 – Первые две области неустойчивости

Для упрощения расчета величины $2\omega_0$, которая зависит от l , c , m , введем соотношение $k = \frac{c}{m}$. Поварьируем величины l и k в интервале, который включает реализуемые на практике случаи. Величина $2\omega_0$ представлена на рисунке 7.15.

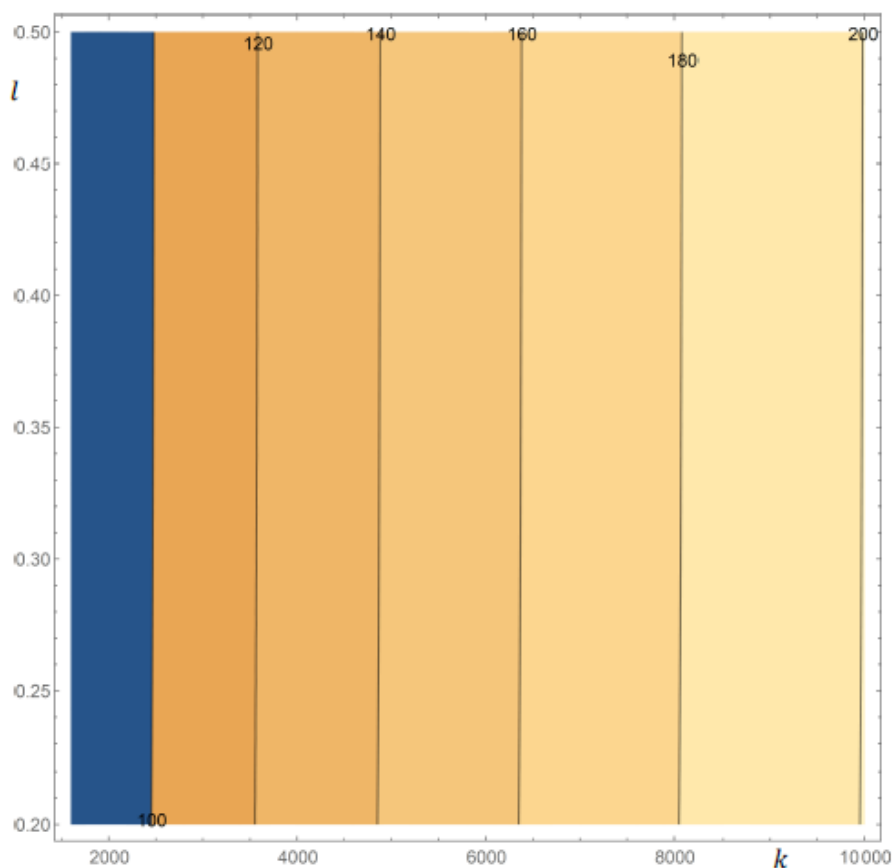


Рисунок 7.15 – Величина $2\omega_0$

7.4. Результаты экспериментальных исследований динамических характеристик ходовых частей

С целью выявления наиболее рациональных конструкций для применения на ИПС с учетом его особенностей ставится задача провести сравнительный анализ динамических качеств ходовых частей пассажирского и грузовых вагонов с использованием экспериментальных данных, полученных авторами и другими исследователями, а также средств математического моделирования.

Для анализа динамических качеств ходовых частей вагонов использовались данные [18, 22, 144]. Методология проведения эксперимента изложена в работе [52, 249]. В качестве объекта испытаний выбрана тележка КВЗ-И2, подкаченная под вагон ДЭС модели 16-3000 № 37686342 производства Брянского машиностроительного завода.

Размещение акселерометров и их направление показано на рисунке 7.16. Схема расположения датчиков на раме тележки показана на рисунке 7.17.

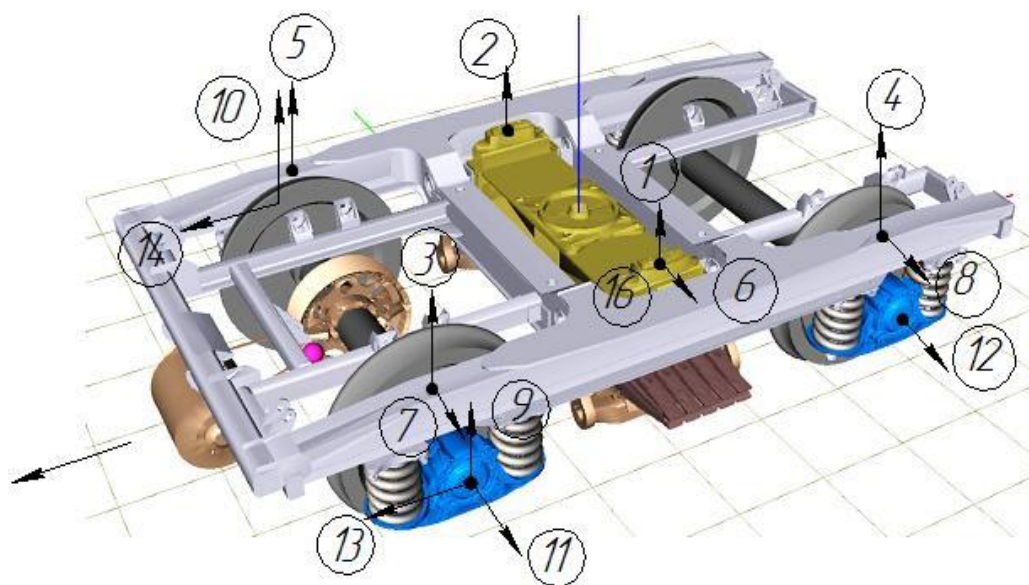


Рисунок 7.16 – Размещение акселерометров

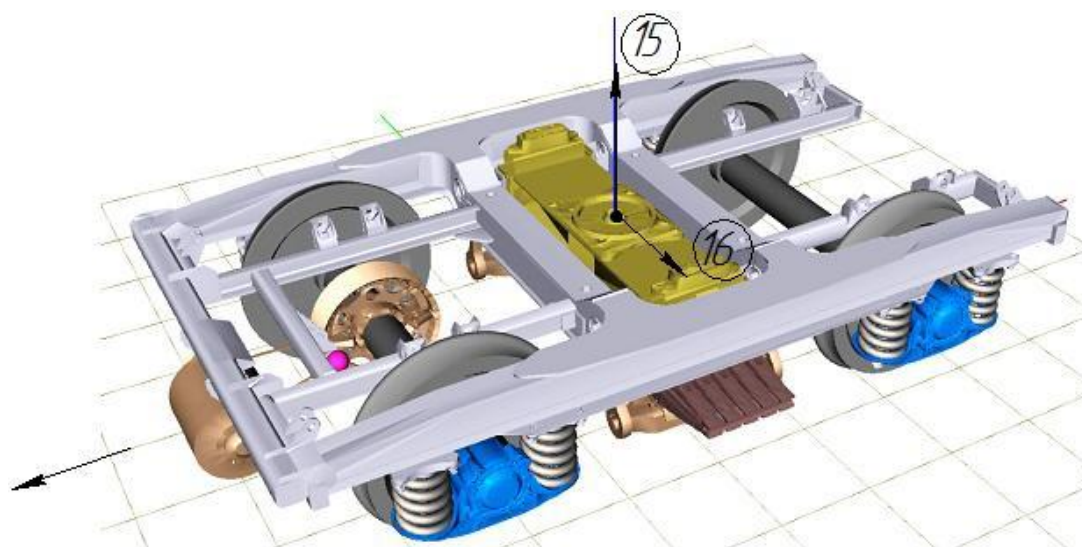


Рисунок 7.17 – Схема расположения датчиков на раме тележки

В процессе испытаний регистрируются следующие процессы.

На первой тележке по ходу движения регистрируются виброускорения (м/с^2):

1) вертикальные виброускорения надрессорного бруса в близи левого по ходу движения скользуна;

2) вертикальные виброускорения надрессорного в близи правого по ходу движения скользуна;

3) вертикальные виброускорения рамы тележки над левой по ходу движения буксой первой по ходу движения колесной пары;

4) вертикальные виброускорения рамы тележки над левой по ходу движения буксой второй по ходу движения колесной пары;

5) вертикальные виброускорения рамы тележки над правой по ходу движения буксой первой по ходу движения колесной пары;

6) горизонтальные поперечные виброускорения надрессорного бруса близи левого по ходу движения скользуна;

7) горизонтальные виброускорения рамы тележки над левой по ходу движения буксой первой по ходу движения колесной пары;

8) горизонтальные виброускорения рамы тележки над левой по ходу движения буксой второй по ходу движения колесной пары;

9) вертикальные виброускорения левой по ходу движения буксы первой по ходу движения колесной пары;

10) вертикальные виброускорения правой по ходу движения буксы первой по ходу движения колесной пары;

11) горизонтальные поперечные виброускорения левой по ходу движения буксы первой по ходу движения колесной пары;

12) горизонтальные поперечные виброускорения левой по ходу движения буксы второй по ходу движения колесной пары;

13) горизонтальные продольные виброускорения левой по ходу движения буксы первой по ходу движения колесной пары;

14) горизонтальные продольные виброускорения правой по ходу движения буксы первой по ходу движения колесной пары.

На второй тележке по ходу движения регистрируются виброускорения (м/с^2):

- 1) вертикальные виброускорения надрессорного бруса;
- 2) горизонтальные поперечные виброускорения надрессорного бруса.

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, что соответствует применению в центральной ступени пружин и гидравлического гасителя колебаний по типу тележки ТВЗ-ЦНИИ. Движение моделировалось на прямом участке пути со случайными неровностями по стандарту UIC с оценкой пути «хороший».

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.

Для получения спектральной плотности ускорений использовался метод Уэлча (Welch), который хорошо себя зарекомендовал в работах [21, 22]. Результаты обработки колебаний надрессорной балки и рамы показаны на рисунке 7.18.

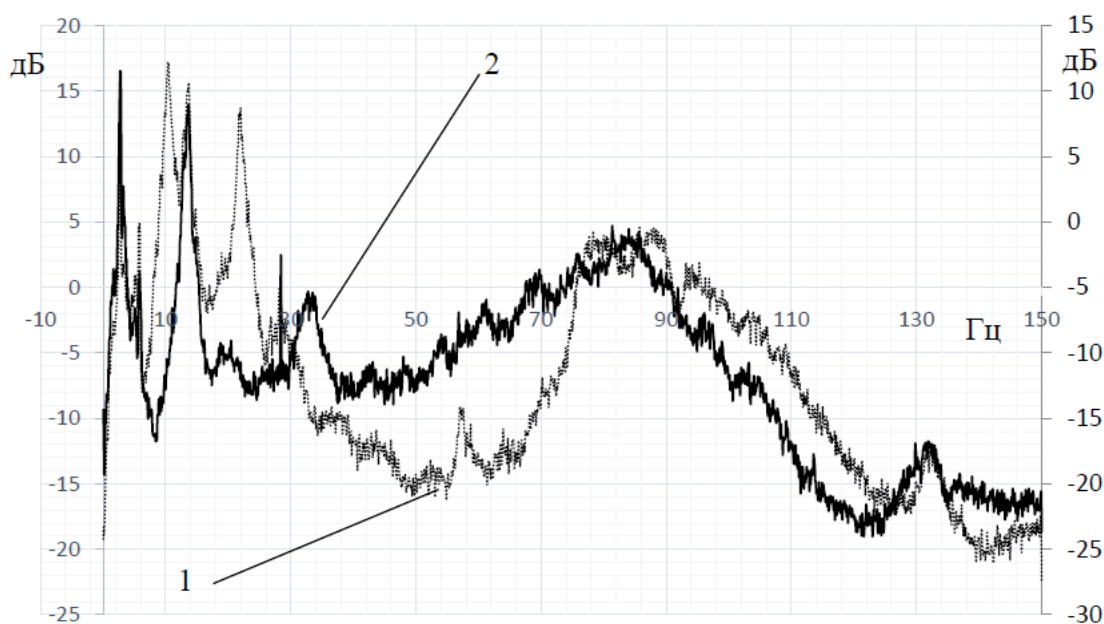


Рисунок 7.18 – Спектральная плотность вертикальных ускорений:

1 – рамы тележки (левая шкала); 2 – надрессорной балки тележки (правая шкала)

Высокая частота дискретизации позволила получить спектр в частотном диапазоне до 150 Гц. Из рисунков видно взаимное влияние колебаний рамы тележки и кузова вагона. Первые два экстремума надрессорной балки расположены на частотах 2,71 Гц и 13,62 Гц. Экстремальные значения ускорений рамы расположены на частотах 2,71, 5,8, 10,4, 13,62 Гц. В данном случае к колебаниям кузова вагона можно отнести частоту 2,71 Гц, высокая величина объясняется его малой массой.

Оценка изменения спектральной плотности ускорений во времени построена на рисунке 7.19, а. Ввиду того что спектральная плотность не отражает изменение ускорений во времени, представим в необработанном виде ускорения надрессорной балки (рисунок 7.19, б). В абсолютном выражении большинство значений лежит в пределах до 4 м/с^2 .

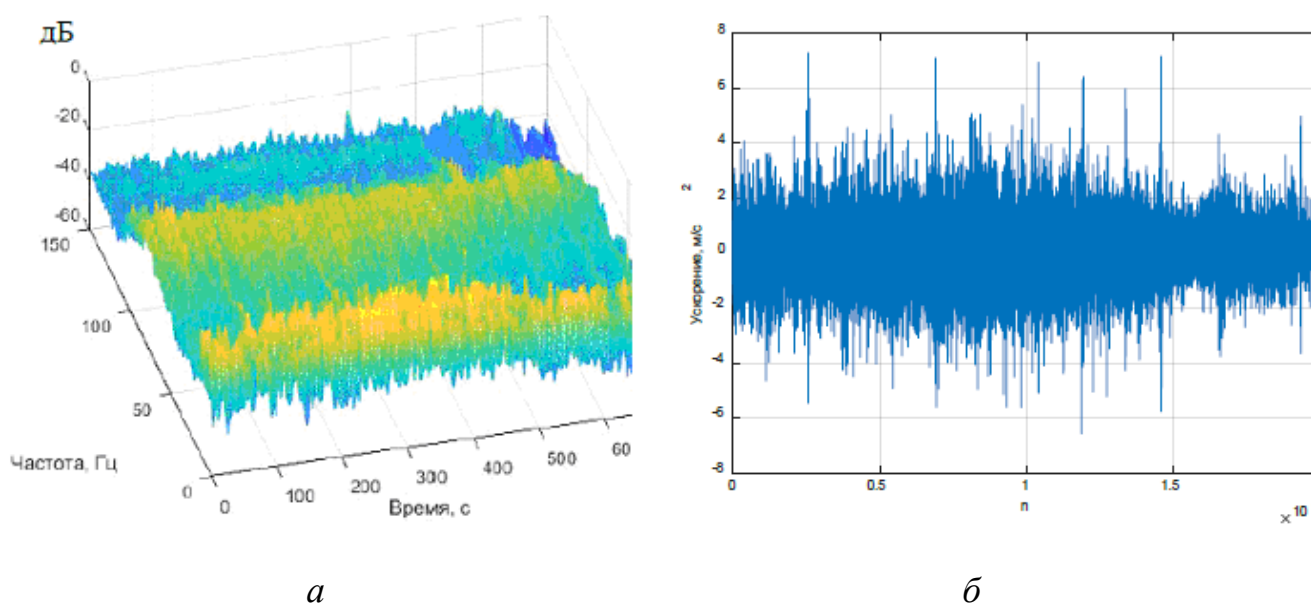


Рисунок 7.19 – Изменение во времени спектральных плотностей вертикальных ускорений надрессорной балки в зоне скользяна:

a – оценка изменения спектральной плотности ускорений во времени;

б – ускорения надрессорной балки

Дальнейшая обработка данных заключалась в расчете СКО (рисунок 7.20). Были проведены расчеты на основе полученных в результате измерений значений. Для того чтобы учесть вероятностную природу измерений, были проведены расчеты ожидаемого значения стандартного отклонения колебаний тележки согласно методике [90].

Результаты расчета указывают на то, что эмпирические значения получились несколько ниже, чем по методике [90], поэтому их можно интерпретировать как верхнюю границу значений. Также это указывает на то, что распределение ускорений не в полной мере соответствует нормальному закону, поскольку имеются выбросы значений различной природы.

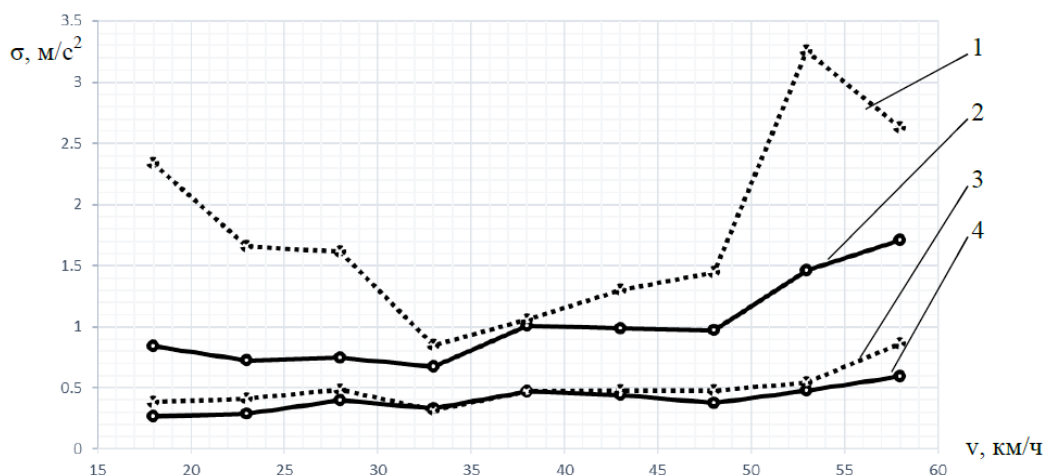


Рисунок 7.20 – СКО вертикальных ускорений надрессорной балки и рамы тележки:

1 – ожидаемое значение стандартного отклонения рамы; 2 – эмпирическое значение стандартного отклонения рамы; 3 – ожидаемое значение стандартного отклонения надрессорной балки; 4 – эмпирическое значение стандартного отклонения надрессорной балки

Дальнейшая методика анализа данных заключается в определении СКО ускорений, плавности хода и коэффициентов динамики с учетом варьирования демпфирования в системе подвешивания тележки. На графиках представлены результаты экспериментов и математического моделирования. Экспериментальные данные представлены жирными кривыми, моделирования – тонкими, в случае линейного относительно скорости деформации рессорного подвешивания гасителя колебаний линии – штриховые. В линейной постановке демпфирование варьировалось в интервале 10–120 кНс/м с шагом 10 кНс/м, в нелинейной постановке, при моделировании влияния рессоры Галахова, варьировался коэффициент относительного трения в интервале 0,05–0,25 с шагом 0,05. Применение математического моделирования при анализе экспериментальных данных вагонов, позволяет получить своего рода базис, который делает возможным сравнение разнородных данных.

Результаты расчета плавности хода вагонов показаны для нелинейной постановки задачи на рисунке 7.21, а линейной – на рисунке 7.22. Показатель

плавности хода обычно используют для оценки воздействия колебаний экипажной части на человека. Этот показатель нелинейно зависит от частоты колебаний, что необходимо учитывать при интерпретации результатов. Как следует из рисунка 7.21, плавность хода пассажирского вагона лучше рефрижераторного и ДЭС, данные моделирования рефрижераторного вагона занимают промежуточное положение в зависимости от демпфирования. В нелинейном случае, чем больше относительный коэффициент трения, тем выше положение кривой, наибольшее значение которой соответствует коэффициенту трения 0,25, а наименьшее – 0,05. В линейной постановке наблюдается обратная тенденция: большему коэффициенту демпфирования соответствует меньшая плавность хода. Согласно действующим нормативным документам допустимым для пассажирских вагонов является значение показателя плавности хода 3,25 (пассажирские вагоны естественно удовлетворяют этому требованию); для грузовых вагонов этот показатель не нормируется, но для обитаемых помещений ИПС показатель плавности хода не должен превышать величины 3,75. Результаты эксперимента с ДЭС (кривая 4) и рефрижераторным вагоном (кривая 2, рисунок 7.21 и кривая 1, рисунок 7.22) до скоростей 80 км/ч удовлетворяют этому требованию. Результаты моделирования с нелинейным демпфером с коэффициентом 0,05 и моделирование с линейным демпфером для значений от 30 кНс/м и выше указывают, что вагон также должен удовлетворять требованиям к плавности хода.

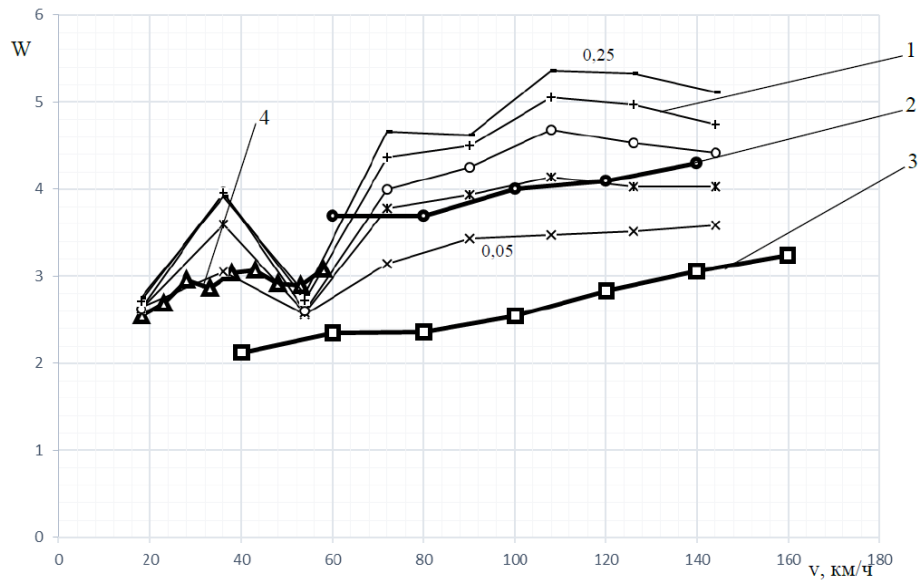


Рисунок 7.21 – Плавность хода вагонов:

1 – семейство кривых на основе нелинейной модели; 2 – экспериментальные данные рефрижераторного вагона; 3 – экспериментальные данные пассажирского вагона; 4 – экспериментальные данные ДЭС

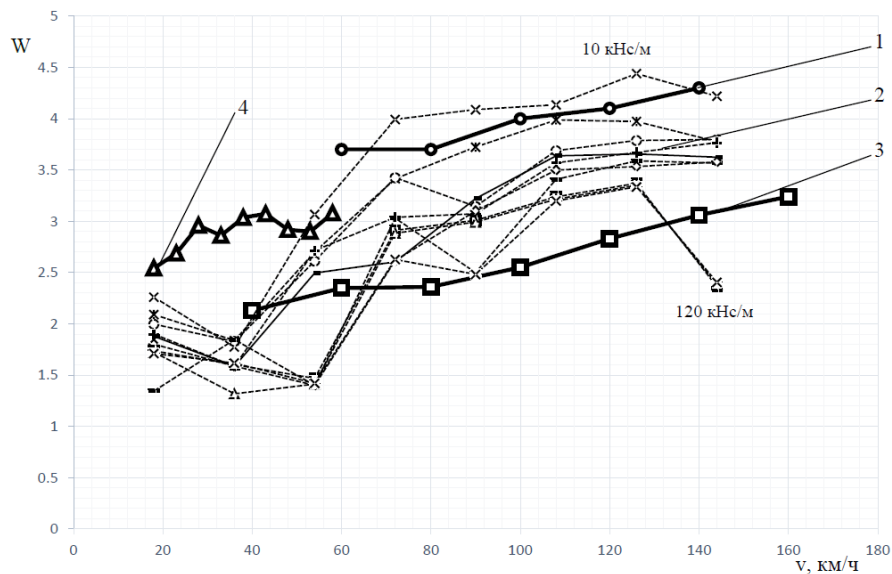


Рисунок 7.22 – Плавность хода вагонов:

1 – семейство кривых на основе линейной модели; 2 – экспериментальные данные рефрижераторного вагона; 3 – экспериментальные данные пассажирского вагона; 4 – экспериментальные данные ДЭС

Значения СКО ускорений показаны на рисунке 7.23 для нелинейного демпфирования и на рисунке 7.24 для линейного.

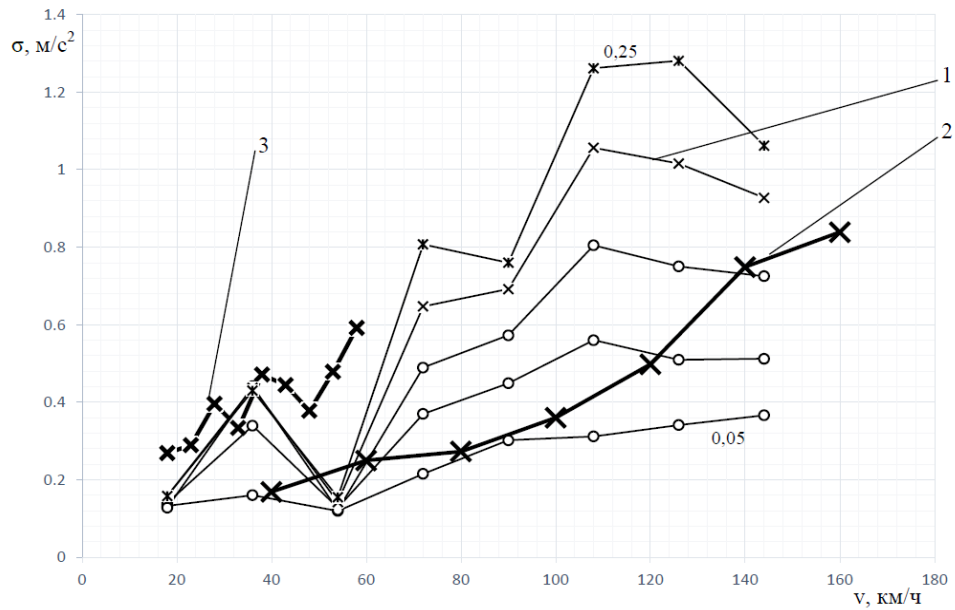


Рисунок 7.23 – Стандартное отклонение ускорений вагонов:

1 – семейство кривых на основе нелинейной модели; 2 – экспериментальные данные пассажирского вагона; 3 – экспериментальные данные ДЭС

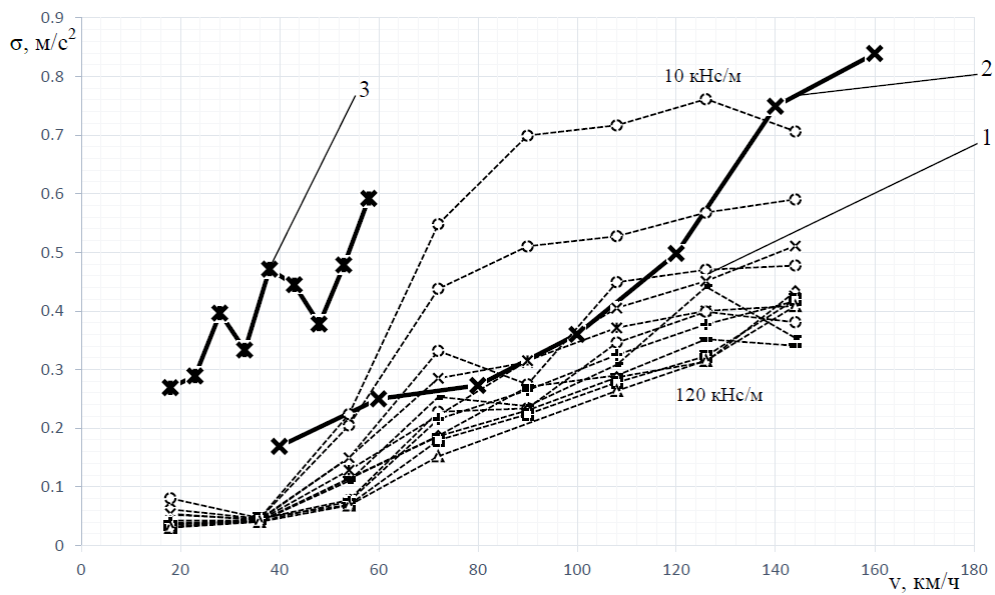


Рисунок 7.24 – Стандартное отклонение ускорений вагонов:

1 – семейство кривых на основе линейной модели; 2 – экспериментальные данные пассажирского вагона; 3 – экспериментальные данные ДЭС

Сохраняется тенденция, отмеченная выше, для результатов моделирования при варьировании коэффициента относительного трения и величины демпфирования. 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 ИВ с такими ходовыми частями 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.

Чаще всего в работах, посвященных экспериментальным исследованиям колебаний подвижного состава, публикуют коэффициенты динамики Кдв (динамической добавки) обрессоренных частей конструкции. Данный показатель является нормируемым и не должен превышать для груженого грузового вагона величины 0,65.

На рисунке 7.25 показаны графические зависимости коэффициентов динамики в середине вагона (в случае моделирования), а также в зоне подпятника пассажирского и грузового вагонов.

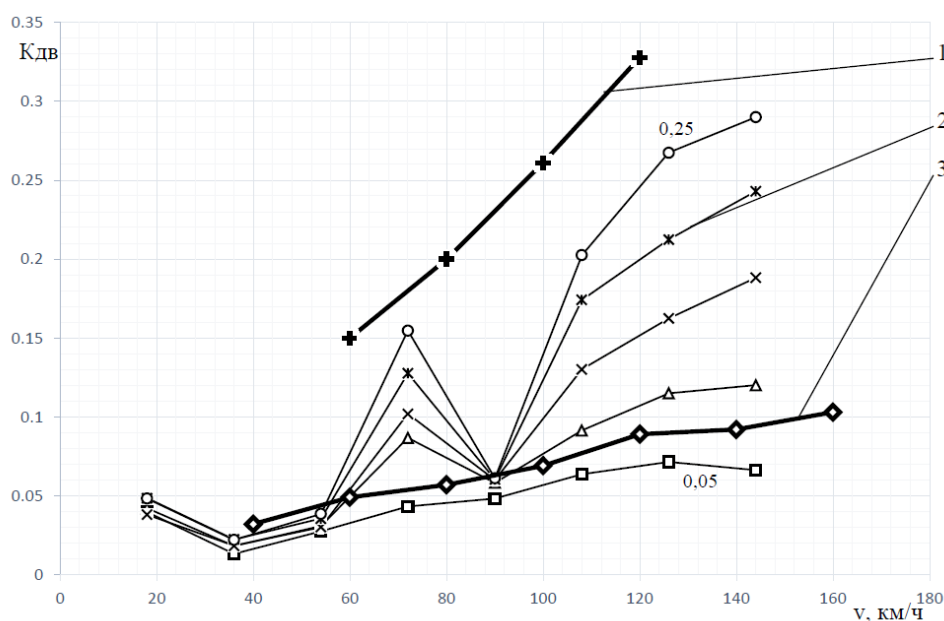


Рисунок 7.25 – Коэффициент динамической добавки:

- 1 – тележка 18-194-1; 2 – нелинейная модель рефрижераторного вагона;
- 3 – пассажирский вагон

Значения в середине вагона позволяют оценить нижнюю границу коэффициента динамической добавки, а экспериментальные данные над

тележками показывают его верхнюю границу. В данном случае пассажирский вагон имеет самый низкий коэффициент динамической добавки, грузовой вагон с трехэлементной тележкой – самый высокий, а данные моделирования соответствуют промежуточному результату. Сохранилось обнаруженное ранее свойство нелинейного подвешивания, при котором меньшему коэффициенту относительного трения соответствуют лучшие показатели, и обратное соотношение с линейным гасителем колебаний.

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.

Для более полного сравнения приведем на рисунке 7.26 экспериментальные данные по грузовым вагонам на различных тележках и рефрижераторного вагона.

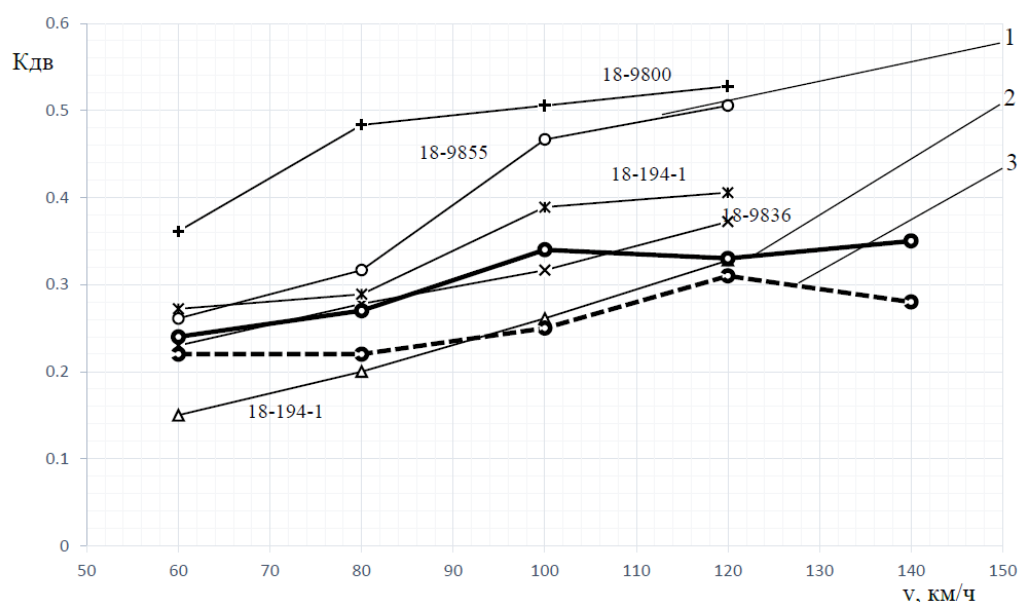


Рисунок 7.26 – Коэффициент динамической добавки:

- 1 – грузовые вагоны (сверху-вниз тележки: 18-9800, 18-9855, 18-194-1, 18-9836, 18-194-1); 2 – рефрижераторный вагон по рессорным комплектам;
3 – рефрижераторный вагон по шкворневой балке

Отметим, что ходовые части грузовых вагонов, для которых приведены данные, относятся к современному поколению трехэлементных тележек и превосходят по динамическим характеристикам тележку типа 18-100. Тонкие кривые сверху вниз соответствуют тележкам: 18-9800, 18-9855, 18-194-1, 18-9836, 18-194-1. Как следует из рисунка 7.26, коэффициент динамики рефрижераторного вагона лежит в нижней границе значений для грузовых вагонов, что свидетельствует об удовлетворительных динамических характеристиках тележки КВЗ-И2.

7.5. Модернизация конструкции тележки для ИПС

Приведенные в предыдущем разделе результаты по моделированию динамики ИВ с текстропным приводом генератора средней части оси позволили обоснованно подойти к выбору конструктивных параметров конструкции и осуществить модернизацию тележки КВЗ-И2.

7.5.1. Модернизация тележки КВЗ-И2

Основными типами используемых тележек для РПС являются тележки моделей КВЗ-И2 и ЦМВ, поэтому для определения возможности применения подвагонного генератора для энергоснабжения холодильной машины рефрижераторного вагона или потребителей электроэнергии КРК рассмотрен вариант модернизации тележки КВЗ-И2.

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. Модернизации подвергается тележка КВЗ-И2 после капитального ремонта, которая должна содержать следующие составные части:

– раму тележки с элементами крепления тормозной передачи, натяжного устройства привода, вентильно-индукторного генератора с устройством, предохраняющим генератор от падения на путь;

- колесные пары с буксовыми узлами, одна из которых оснащается ведущим шкивом диаметром 585 мм;
- узлы буксового подвешивания;
- узлы центрального подвешивания;
- узлы тормозного устройства;
- вентильно-индукторный генератор мощностью 20 кВт с установленным на хвостовике ротора ведомым шкивом диаметром 160 мм;
- узел натяжного устройства;
- комплект клиновых ремней СХ-2800 (6 шт.).

По исходным техническим требованиям и техническому заданию, выполненным с участием автора, в ПКБ ЦВ был разработан комплект рабочей конструкторской документации на модернизацию тележки КВЗ-И2 в части оснащения ее текстропным приводом от средней части оси типа ТСО-20 (проект М 1825.000), по которому в экспериментальном цехе ОАО «ТВЗ» была проведена модернизация тележки. Общий вид тележки с приводом и генератором представлен на рисунке 7.27.



Рисунок 7.27 – Общий вид тележки КВЗ-И2

Для крепления генератора рама тележки была оснащена поперечной сварной балкой с узлами натяжного устройства и крепления генератора, общий вид которых представлен на рисунке 7.28.



Рисунок 7.28 – Подвеска генератора на тележке КВЗ-И2
 (Тележка может комплектоваться круговыми и разъемными
 (с соединительными элементами) текстропными ремнями производства Дании)

7.5.2. Модернизация привода подвагонного ВИГ

В работах [176, 178] отмечается, что в настоящее время наиболее мощным безредукторным приводом вагонных генераторов является клиноременный привод ТСО-16Т от средней части оси колесной пары с размещением генератора на раме тележки. На рисунке 7.29 показан общий вид привода ТСО-16Т.

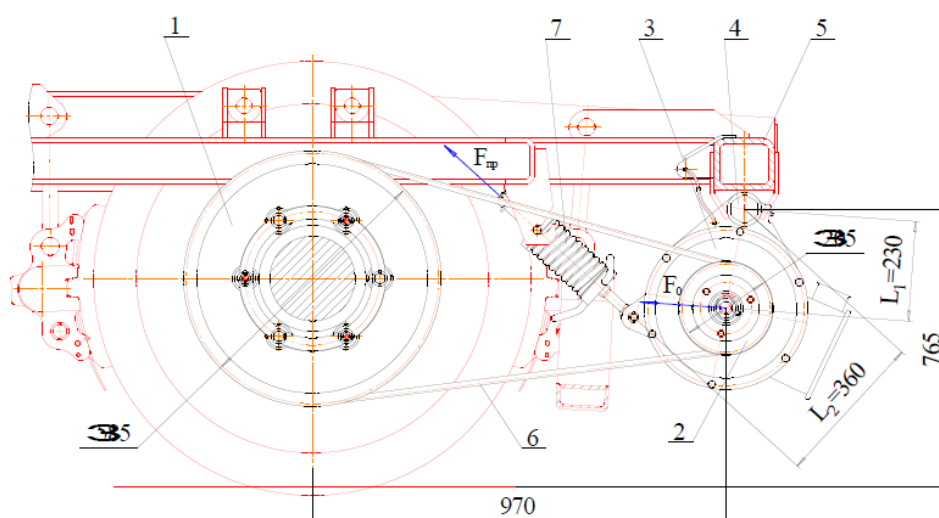


Рисунок 7.29 – Общий вид клиноременного привода ТСО-16Т
 от средней части оси колесной пары

Этот привод состоит из ведущего шкива 1 диаметром 585 мм, установленного на средней части оси колесной пары, и ведомого шкива 2 диаметром 205 мм, установленного на хвостовике ротора генератора. Генератор 3 с помощью шарнирной подвески 4 устанавливается на концевой балке 5 рамы серийной пассажирской тележки. Привод оснащается клиноременной передачей 6, состоящей из шести кордшнуровых клиновых ремней сечения «С» с расчетной длиной 3200 мм (С-3200Ш). Натяжение передачи осуществляется пружинно-винтовым натяжным устройством 7 с усилием натяжения 4,5 кН. Привод предназначен для генераторов мощностью 16–18 кВт. Однако, по результатам работы [176], привод ТСО-16Т обладает гораздо более высокими тягово-энергетическими показателями, что с учетом возможного применения ВИГ позволяет его рекомендовать для систем электроснабжения автономных вагонов-рефрижераторов или автономных фитинговых платформ.

Для увеличения передаточного отношения клиноременной передачи необходимо использовать зубчатые ремни классического сечения без обертки рабочих поверхностей типа СХ-3200. Это позволяет уменьшить диаметр ведомого шкива до 140 мм и довести передаточное отношение до 4,2 при сохранении диаметра ведущего шкива 585 мм. С целью уменьшения влияния реактивного момента на тяговую способность передачи увеличивается жесткость пружины натяжного устройства до 150 Н/мм взамен 105 Н/мм в базовом варианте. В приводах от средней части оси колесной пары наличие шарнирной подвески генератора на раме тележки приводит к изменению натяжения ременной передачи вследствие воздействия реактивного момента генератора. С точки зрения снижения взаимных влияний реактивного момента генератора, технологических и эксплуатационных факторов основных деталей натяжного устройства на стабильность натяжения передачи в процессе эксплуатации, значение величины плеча L_1 действия усилия F_0 должно быть равным значению величины плеча L_2 действия усилия $F_{пр}$. Этот привод получил обозначение ТСО-20ТН (низкооборотный).

Расчетное определение тягово-энергетических характеристик двух вариантов нового привода, созданных на базе опытного привода ТСО-16Т, были представлены в работе [48].

Для увеличения передаточного отношения клиноременной передачи необходимо использовать зубчатые ремни классического сечения без обертки рабочих поверхностей типа СХ-3200. Это позволяет уменьшить диаметр ведомого шкива до 140 мм и довести передаточное отношение до 4,2 при сохранении диаметра ведущего шкива 585 мм. С целью уменьшения влияния реактивного момента на тяговую способность передачи увеличивается жесткость пружины натяжного устройства до 150 Н/мм взамен 105 Н/мм в базовом варианте. В приводах от средней части оси колесной пары наличие шарнирной подвески генератора на раме тележки приводит к изменению натяжения ременной передачи вследствие воздействия реактивного момента генератора.

Данные исследования позволяют предложить привод и для специализированных пассажирских вагонов с мощностью генератора 20–22 кВт при минимальных изменениях параметров базового привода ТСО-16Т. Этот привод получил обозначение ТСО-20ТМ (модернизированный). В таблице 7.6 приведены основные параметры новых приводов и их узлов, разработанных на базе опытного привода ТСО-16Т.

Таблица 7.6 – Параметры приводов и характеристики их узлов, созданных на базе привода ТСО-16Т

Узел	Параметры и характеристики	Обозначение приводов		
		ТСО-16Т	ТСО-20ТМ	ТСО-20ТН
1	2	3	4	5
Генератор	Марка	2ГВ.008.16У1	Опытный	ВИГ
	Мощность, кВт	16	20	20
	n_{\min} , об/мин	(650±50)	(650±50)	(380±50)
	n_{\max} , об/мин	(2600±50)	(2600±50)	(2500±50)
	Скорость вагона при включении генератора $V_{в2}$, км/ч	(40±3)	(40±3)	≥25
Ременная передача	Передаточное отношение (без учета скольжения)	2,86	2,86	4,2
	$D_{вщ}$, мм	585	585	585
	$D_{вм}$, мм	205	205	140
	Количество ремней, шт.	6	6	6

Продолжение таблицы 7.6

1	2	3	4	5
	$\alpha_{ск} = (\alpha_{об})_{вм} \text{ } ^\circ/\text{рад}$	156,5/2,73	156,5/2,73	152,5/2,66
	Межцентровое расстояние l_s , мм	970	970	970
	$V_p(V_b = \min)$, м/с	6,82($V_b = 40$ км/ч)	6,82($V_b = 40$ км/ч)	4,28($V_b = 25$ км/ч)
Ремень	Тип ремня	С(В)-3200Г	ХРС-3200	СХ-3200
	$E_{р.пр.}$, МПа	535	965	965
	Жесткость комплекта J_p , Н/мм	880	1400	1400
	Верхняя ширина ремня, мм	22	21,5	22
	Высота ремня, мм	14	16	14
	Площадь сечения, мм ²	230	209	209
	Коэффициент трения $f_{тр}$	0,18	0,33	0,33
Натяжное устройство	От оси подвеса до линии действия F_0 , мм	230	230	300
	От оси подвеса до линии действия $F_{пр}$, мм	360	400	300
	$J_{пр}$, Н/мм	105	150	150
	F_0 , Н	4500	6000	6000

Таблица 7.7 – Расчетные параметры приводов

Тип привода	Основные расчетные параметры
ТСО-16Г	$d_{вм} = 0,205$ м, $J_p = 880$ Н/мм, $l_1 = 0,23$ м, $D_{вщ} = 0,585$ м, $J_{пр} = 105$ Н/мм, $l_2 = 0,36$ м, $K = 2057$
ТСО-20ГМ	$d_{вм} = 0,205$ м, $J_p = 1400$ Н/мм, $l_1 = 0,23$ м, $D_{вщ} = 0,585$ м, $J_{пр} = 150$ Н/мм, $l_2 = 0,4$ м, $K = 2104$
ТСО-20ГН	$d_{вм} = 0,205$ м, $J_p = 1400$ Н/мм, $l_1 = 0,23$ м, $D_{вщ} = 0,585$ м, $J_{пр} = 150$ Н/мм, $l_2 = 0,4$ м, $K = 2104$

Предельные значения механической мощности, реализуемой на ведомом шкиве для различных вариантов привода ТСО при минимальных скоростях вагонов приведены в таблице 7.8.

Таблица 7.8 – Предельные значения механической мощности, реализуемой на ведомом шкиве для различных вариантов привода ТСО при минимальных скоростях вагонов

V_b , км/ч	Ведущая ветвь	ТСО-16Г	ТСО-20ГМ	ТСО-20ГН
25	Верхняя	17	33,8	32,5
	Нижняя	10,5	17,4	22,5
40	Верхняя	27,2	54	52,1
	Нижняя	16,8	27,8	28

Анализ представленных данных показывает, что даже для движения в составе грузового поезда, с малыми скоростями вновь разработанные приводы ТСО-20ТМ и ТСО-20ТН с использованием клиновых ремней ХРС-3200, СХ-3200 позволяют использовать их как для пассажирских, так и рефрижераторных вагонов и автономных фитинговых платформ с системами электроснабжения мощностью 20 кВт с включением генератора на полную нагрузку со скоростей движения 25 км/ч [71,73].

7.6. Выводы к седьмой главе

1. Анализ технических характеристик ходовых частей грузовых и пассажирских вагонов показал, что существует ряд моделей ходовых частей грузовых, грузопассажирских и специализированных вагонов, которые могут быть использованы для ИПС.

Для специализированного ИПС необходимо использование тележек грузопассажирского типа с рациональным соотношением «скорость – осевая нагрузка».

2. Технические решения и возможности модернизации тележек в части оснащения их генераторно-приводными установками позволяют реализовать мощность подвагонного генератора от 8 до 32 кВт. Лучший модернизационный ресурс имеют тележки со сварной жесткой рамой.

3. В настоящей главе проведены исследования тележки КВЗ-И2, позволяющие качественно сравнить и оценить динамические характеристики грузовых, пассажирских и грузопассажирских тележек, полученные при прохождении испытательного скоростного участка Белореченская – Майкоп. Полученные данные позволили сравнить динамические качества различных типов ходовых частей вагонов при одинаковых условиях качества путей.

4. Установлено, что наличие генератора на концевой балке тележки приводит 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 необходимо учитывать при проектировании привода.

5. Учитывая необходимость размещения холодильного и энергетического оборудования в рефрижераторном вагоне, следует отметить, что высокий уровень ускорений отрицательно скажется на надежности их работы, так как это непосредственно ведет к высоким уровням динамических нагрузок. Поэтому для РПС предпочтительно использовать «мягкие» тележки с лучшими динамическими качествами, чем применяемые сейчас на грузовых вагонах.

6. Для вагонов-термосов, не имеющих энергохолодильного оборудования целесообразно использование грузовых тележек 2-го или 3-го типов. Использование увеличенной осевой нагрузки на ось до 25 т позволит повысить грузоподъемность вагона. Ввиду того что заказчиками изотермических вагонов будут операторские и логистические компании, при выборе типа тележки они будут отдавать предпочтение экономическим (стоимостным) и эксплуатационным (надежность и ремонтпригодность) показателям. Улучшенные динамические показатели тележек со снижением отрицательного воздействия на путь будут ими учитываться только после введения льготных тарифов для вагонов на таких тележках.

7. Для рефрижераторных вагонов с энергохолодильным оборудованием целесообразно применение грузопассажирских тележек с возможностью модернизации в части оснащения их генераторно-приводными установками.

8. Для фитинговых платформ, предназначенных для транспортировки КРК в составе контейнерных сцепов возможно использование грузовых тележек 1-го типа также с возможностью оснащения их генераторно-приводными установками.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполненная диссертационная работа представляет собой научно-квалификационную работу, направленную на разработку новых научно обоснованных технических решений для создания нового, инновационного ИПС.

Основными результатами работы являются:

1. На основании анализа современного состояния ИПС в целом, конструкций энергохолодильного оборудования вагонов и технологий транспортировки СПГ сформулирована концепция разработки нового ИПС и средств доставки КРК 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 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, ИВ 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 ГП ИВ показала, что поставленные задачи:

- время прогрева порожнего вагона до $+6\text{ }^{\circ}\text{C}$ при различной температуре внешнего воздуха;
 - время появления температур ниже $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ на внутренней поверхности ГП и зависимости минимальной температуры СПГ от температуры наружного воздуха;
 - временные циклы работы нагревательного кабеля в груженом рейсе 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 энергохолодильного оборудования, использование грузовых тележек 2-го или 3-го типов. Для рефрижераторных вагонов с энергохолодильным оборудованием целесообразно применение

грузопассажирских тележек с возможностью модернизации в части оснащения их генераторно-приводными установками.

10. Проанализированы зависимости прочности различных вариантов базовых металлоконструкций кузова ИВ в зависимости от компоновки энергохолодильного 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 груза жидким азотом не превышение номинального (расчетного) давления в грузовом помещении должно быть обосновано работой предохранительного клапана, который рассчитан на давление 50 Па, с необходимым запасом площади проходного сечения в нем. В случае повышения давления до 2500 Па в верхней обвязке погрузочной двери возникают напряжения (349 МПа), превышающие допустимые.

11. Выполнено технико-экономическое обоснование снижения эксплуатационных расходов рефрижераторного вагона, которое достигается за счет уменьшения стоимости топлива при использовании сжиженного природного газа, а при совместном использовании с генераторно-приводной установкой с подвагонным генератором, в зависимости от скоростей движения грузового поезда на маршрутах значительной протяженности, позволит экономить от 30 до 70 % топлива.

По результатам диссертационной работы сформулированы следующие рекомендации по развитию научных исследований, дальнейшему поиску технических решений и использованию новых технологий в конструкции ИПС:

- разработка теоретических основ работ по оптимизации структуры парка ИПС в изменяющихся условиях транспортного рынка скоропортящихся грузов, отражающей специфические особенности назначения и конструкции специализированных изотермических вагонов;

- по мере начала практической эксплуатации инновационного ИПС на сети дорог адаптация имеющихся и разработка новых энергоэффективных

технических решений для создания типоразмерного ряда вагонов, выполненных на основе единой модели изотермического кузова и других специализированных вагонов;

- апробация и поэтапное внедрение в конструкцию энергохолодильного оборудования инновационного ИПС – новых типов систем термостабилизации ГП и энергоэффективных автономных комплексов энергоснабжения;

- совершенствование конструкции и функциональных возможностей, а также оптимальных алгоритмов управления при создании автоматизированных систем управления вентильно-индукторными двигателями и генераторами для ИПС.

Список использованных источников

1. Аверков, Н. К. Концепция разработки и создания изотермических транспортных средств нового поколения / Н. К. Аверков, О. А. Ворон, С. Н. Науменко // Вестник научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. – 2011. – № 1. – С. 29–32. – ISSN 2223-9731.
2. Аверков, Н. К. Проблемы железнодорожного хладотранспорта требуют внимания государства / Н. К. Аверков // Транспорт Российской Федерации. – 2007. – № 11. – С. 74–77. – ISSN 1994-831X.
3. Алдюхов, В. А. Параметрическая оптимизация и надежность рессорного подвешивания рефрижераторного вагона : 05.05.01. «Локомотивы (тепловозы, электровозы, газотурбовозы) и вагоны» дис. на соискание ученой степени канд. техн. наук/ Алдюхов Владимир Александрович ; Брянский ин-т транспортного машиностроения.- Брянск, 1984. - 207 с. :
4. «Алтайвагон» представил автономный рефрижераторный вагон // Холодильная индустрия. Онлайн-журнал и каталог. – URL: <https://holodcatalog.ru/news/new-equipment/altayvagon-predstavil-avtonomnyu-refrizheratornyu-vagon> (дата обращения 01.09.2017).
5. Андреев, С. П. Холодильная цепь – основа обеспечения качества и конкурентоспособности российской пищевой продукции / С. П. Андреев // Холодильная техника. – 2016. – № 7. – С. 48–52. – ISSN 0023-124X.
6. Анисимов, В. М. Перспективы развития парка рефрижераторных вагонов и контейнеров / В. М. Анисимов // Вестник Всероссийского научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. – 2001. – № 1. – С. 44–48. – ISSN 2223-9731.
7. Атаманчук, Н.А. Выбор параметров и обоснование технических решений цистерны для светлых нефтепродуктов увеличенной вместимости: специальность 05.22.07 «Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация»: дис. на соискание ученой степени канд. техн. наук /Атаманчук Наталия

Александровна; С.-Петерб. гос. ун-тет путей сообщения.- Санкт-Петербург, 2016. –160с. – Библиогр.: с. 153-160.

8. Атаманчук, Н. А. Выбор конструкции опорных зон котла восьмиосного двухсекционного вагона-цистерны для перевозки светлых нефтепродуктов / Н. А. Атаманчук // Транспорт Российской Федерации. – 2014. – № 3(52). – С. 55–57. – ISSN 1994-831X.

9. Балон Л.В. Ходовые части, ударно-тяговые приборы и тормозное оборудование пассажирских вагонов : учебное пособие для вузов железнодорожного транспорта / Л. В. Балон, А. В. Челохьян, О. А. Ворон [и др.] ; под редакцией В. Ф. Криворудченко. – Ростов-на-Дону : РГУПС, 2010. – 291 с.

10. Бараненко, А. В. Непрерывная холодильная цепь – основа стратегии ресурсосбережения и обеспечения качества продовольствия / А. В. Бараненко, Г. А. Белозеров // Холодильная техника. – 2010. – № 3. – С. 9–12. – ISSN 0023-124X.

11. Бартош, Е. Т. Теоретические основы процесса воздухоподдачи в рефрижераторных вагонах / Е. Т. Бартош, А. В. Коковихин // Труды Всероссийского научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. – 1983. – Вып. 647. – С. 99–106.

12. Бартош, Е. Т. Энергетика изотермического подвижного состава / Е. Т. Бартош. – Москва : Транспорт, 1976. – 303 с.

13. Белозеров, Г. А. Холодильные технологии хранения продовольственных ресурсов в свете госпрограммы развития сельского хозяйства РФ / Г. А. Белозеров // Холодильная техника. – 2013. – № 5. – С. 4–6. – ISSN 0023-124X.

14. Белозеров, Г. А. Авторефрижераторный транспорт и контейнеры : учебное пособие / Г. А. Белозеров Б. С. Бабакин, А. А. Грызунов [и др.]. – Рязань : ГУП «Рязанская областная типография», 2010. – 298 с. – ISBN 978-5-91255-061-4.

15. Белозеров, Г. А. Непрерывная холодильная цепь – метод снижения потерь, гарантия качества и безопасности продовольствия на пути от производителя к потребителю / Г. А. Белозеров, С. П. Андреев // Мясные технологии. – 2012. – № 5. – С. 47–49. – ISSN 2308-2941.

16. Бондаренко, В. А. Становление клиентоориентированного подхода на рынке железнодорожных перевозок посредством диверсификации услуг операторских компаний / В. А. Бондаренко, Н. В. Гузенко // Маркетинг в России и за рубежом. – 2014. – № 6. – С. 105–112. – ISSN 1028-5849.
17. Бороненко, Ю. П. Выбор конструктивных решений устройств крепления контейнеров и съемных кузовов на железнодорожных платформах / Ю. П. Бороненко, А. С. Даукша, // Транспорт Российской Федерации. – 2017. – № 3(70). – С. 29–32. – ISSN 1994-831X.
18. Бороненко, Ю. П. Оценка возможности и эффективности повышения осевых нагрузок грузовых вагонов / Ю. П. Бороненко, А. В. Третьяков, М. В. Зимакова // Вестник Института проблем естественных монополий: Техника железных дорог. – 2017. – № 1. – С. 32–37. – ISSN 1998-9318.
19. Бороненко, Ю. П. Перспективы внедрения вагонов со съемными кузовами увеличенной грузоподъемности / Ю. П. Бороненко, А. С. Даукша, // Известия Петербургского университета путей сообщения. – 2017. – Т. 14, № 3. – С. 437–451. – ISSN 1815-588X.
20. Бражников, А. М. Технико-экономический анализ систем воздухораспределения в камерах холодильной обработки мяса. Обзорная информация / А. М. Бражников [и др.]. – Москва : АгроНИИТЭИММП, 1986. – 40 с.
21. Булавин, Ю. П. Динамические процессы в механической части привода вагонного генератора : монография / Ю. П. Булавин, И. В. Волков. – Ростов-на-Дону : РГУПС, 2007. – 135 с. – ISBN 978-5-88814-198-4.
22. Булавин, Ю. П. Моделирование системы подвешивания подвагонного генератора / Ю. П. Булавин, И. В. Волков // Электропривод на транспорте и в промышленности : труды 2-й Всероссийской научно-практической конференции. – Хабаровск : ДВГУПС, 2018. – С. 77–84. – ISBN 978-5-262-00831-5.
23. Булавин, Ю. П. Определение прочности кузова рефрижераторного вагона / Ю. П. Булавин, И. В. Волков, П. Ю. Коновалов // Транспорт: наука, образование, производство : сборник трудов Международной научно-практической

конференции. – Ростов-на-Дону : РГУПС, 2018. – С. 31–35. – ISBN 978-5-88814-811-2.

24. В Шахтах открылся 21-й распределительный центр ЗАО «Тандер» // Деловой квартал DK.RU. – 10.12.2013. – URL: <https://rostov.dk.ru/news/v-shaxtax-otkrylsya-21j-raspredelitelnyj-centr-zao-tander-236815711> (дата обращения 31.07.2019).

25. Вагон изотермический 16-6962. – URL: <http://nvzm.ru/index.php/izotermicheskij-vagon-termos-modeli-16-6962> (дата обращения 31.07.2019).

26. Вагоны нового поколения начали делать на ПЗТМ // Муниципальный телерадиоканал Север-Кказахстанской области. – 31.07.2019. – URL: <https://mtrk.kz/ru/2019/07/31/vagony-novogo-pokoleniya-nachali-delat-na-pztm> (дата обращения 31.07.2019).

27. Вагоны. Основы конструирования и экспертизы технических решений : учебное пособие для вузов железнодорожного транспорта / А. П. Азовский [и др.] ; под редакцией В. Н. Котуранова. – Москва : Маршрут, 2005. – 490 с.

28. Вальт, Э. Б. Железнодорожный холодильный транспорт на пути реформирования / Э. Б. Вальт // Холодильная техника. – 2006. □– № 2-3. – С. 40–44. – ISSN 0023-124X.

29. Васильев, В. Н. Характеристики нестационарных процессов в рефрижераторных вагонах с автономным охлаждением: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Васильев Вячеслав Николаевич. – Москва : ВНИИЖТ, 1974. (рукописн.).

30. Вибрации в технике. Справочник: в 6 т. / редакционный совет : В. Н. Челомей (пред.). Т. 1. Колебания линейных систем / под редакцией В. В. Болотина. – Москва : Машиностроение, 1978. – 352 с.

31. ВНИИ садоводства им. И. В. Мичурина: основные итоги исследований по совершенствованию технологий хранения плодоовощной продукции / В. А. Гудковский, Л. В. Кожина, А. Е. Балакирев, Ю. Б. Назаров // Хранение и переработка сельхозсырья. – 2013. – № 9. – С. 34–39.

32. Волков, И. В. К вопросу о повышении достоверности динамических характеристик перспективного изотермического подвижного состава / И. В.

- Волков, О. А. Ворон, Ю. П. Булавин [и др.] // Инженерный вестник Дона. – 2017. – Т. 47, № 4(47). – 12 с. – URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2017/4405.
33. Волков, И. В. Обобщенная математическая модель колебаний в вертикальной продольной плоскости динамической системы «кузов вагона – тележка – подвагонный генератор» / И. В. Волков, Ю. П. Булавин // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2002. – № 3. – С. 52–56. – ISSN 0201-727X.
34. Волков, И. В. Прогнозирование динамических характеристик перспективного рефрижераторного подвижного состава / И. В. Волков, Ю. П. Булавин // Механика и трибология транспортных систем – 2003 : сборник докладов Международного конгресса, Москва, 10–13 сентября 2003 года. – Ростов-на-Дону : РГУПС, 2003. – С. 205–206.
35. Волков, М. А. Тепло- и массообменные процессы при хранении пищевых продуктов / М. А. Волков. – Москва : Легкая и пищевая промышленность, 1982. – 272 с.
36. Ворон, О. А. Аспекты совершенствования железнодорожных перевозок скоропортящихся грузов в составе непрерывной холодильной цепи / О. А. Ворон, И. Г. Морчиладзе // Транспорт Российской Федерации. – 2014. – № 1(50). – С. 40–45. – ISSN 1994-831X.
37. 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. – С. 86–94. – DOI 10.46973/0201-727X_2021_2_86.
38. Ворон, О. А. Автономные системы энергоснабжения для специализированного подвижного состава / О.А. Ворон // Подвижной состав XXI века: идеи, требования, проекты : сборник докладов VII Международной конференции, 6–10 июля 2011 г. – Санкт-Петербург : ПГУПС, 2011. – 201 с.
39. Ворон, О. А. Автономный рефрижераторный вагон нового поколения / О. А. Ворон // Тяжелое машиностроение. – 2004. – № 9. – С. 36–40. – ISSN 1024-7106.

40. 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.
41. Ворон, О. А. Анализ времени доставки СПГ в составе ускоренных контейнерных поездов по маршруту Дальний Восток – Центр / О. А. Ворон, Е. Е. Супрун, Е. Н. Шведова // Транспорт: наука, образование, производство : сборник научных трудов. Т. 1 : Технические науки. – Ростов-на-Дону : РГУПС, 2017. – С. 20–23. – ISBN 978-5-88814-530-2.
42. Ворон, О. А. Анализ компоновочных решений энергохолодильного оборудования нового изотермического подвижного состава / О. А. Ворон // Транспорт-2013 : труды Международной научно-практической конференции, 24–26 апреля 2013 года. В 4 ч. Ч. 2 : Технические науки. – Ростов-на-Дону : РГУПС, 2013. – С. 135–136.
43. Ворон, О. А. Анализ силовых конструкций кузова рефрижераторного вагона с учетом компоновки энергохолодильного оборудования / О. А. Ворон, Ю. П. Булавин, В. И. Ширококов // Труды Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2016. – № 3(36). – С. 24–32. – ISSN 1818-5509.
44. Ворон, О. А. Возможности использования альтернативных источников топлива для систем энергоснабжения крупнотоннажных рефрижераторных контейнеров / О. А. Ворон, И. А. Степин, С. А. Попов, А. В. Патенян // Труды Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2018. – № 4. – С. 36–41. – ISSN 1818-5509.
45. Ворон, О. А. Возможности использования криогенных технологий для инновационного изотермического подвижного состава / О. А. Ворон // Известия Транссиба. – 2021. – № 2. – С. ??–??.
46. Ворон, О. А. Возможности перевозок сжиженного природного газа железнодорожным транспортом / О. А. Ворон, В. А. Фаустова // Труды Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2016. – № 5. – С. 129–134. – ISSN 1818-5509.

47. Ворон, О. А. Выработка критериев технических параметров новых типов изотермических вагонов с помощью метода экспертных оценок / О. А. Ворон, Е. А. Булавина // Труды научно-теоретической конференции профессорско-преподавательского состава. – Ростов-на-Дону : РГУПС, 2004.
48. Ворон, О. А. 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. – С. 23–29. – ISSN 0201-727X.
49. Ворон, О. А. Использование регулируемой газовой среды для хранения и транспортировки скоропортящейся продукции / О. А. Ворон, В. Ф. Криворудченко, В. Э. Майер // Совершенствование конструкции, технического обслуживания и ремонта подвижного состава: сборник. – Ростов-на-Дону : РИИЖТ, 1995.
50. Ворон, О. А. Использование сжиженного природного газа в комбинированной энергосиловой установке автономного рефрижераторного вагона / О. А. Ворон // Вестник научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. – 2019. – Т. 78, № 3. – С. 188–192. – DOI 10.21780/2223-9731-2019-78-3-188-192.
51. Ворон, О. А. Использование эвтектических плит в конструкции рефрижераторного подвижного состава нового поколения / О. А. Ворон, В. Л. Соловьев // Транспорт-2001 : труды научно-теоретической конференции. Ч. 2. – Ростов-на-Дону : РГУПС, 2001.
52. 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.
53. Ворон, О. А. Концепция развития энергооснащенного изотермического подвижного состава / О. А. Ворон, А. Ю. Ростокин // Подвижной состав XXI века: идеи, требования, проекты : сборник статей IV Международной конференции. – Санкт-Петербург, 2005. – 237 с.

54. 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. – С. 14–22. – ISSN 0201-727X.
55. Ворон, О. А. Модернизация специализированного оборудования для ИВ-термосов и вагонов-термосов с целью расширения их функциональных возможностей / О. А. Ворон // Подвижной состав XXI века: идеи, требования, проекты : сборник докладов V Международной конференции. – Санкт-Петербург, 2007.
56. Ворон, О. А. 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.
57. Ворон, О. А. Модернизированный комплекс энергохолодильного оборудования для рефрижераторного вагона / О. А. Ворон, К. О. Савельев // Транспорт-2010: труды Всероссийской научно-практической конференции. В 3 ч. Ч. 3 : Технические науки. – Ростов-на-Дону : РГУПС, 2010.
58. Ворон, О. А. Направления совершенствования технико-экономических и эксплуатационных параметров перспективных изотермических вагонов / О. А. Ворон, Ю. П. Булавин, О. В. Зиберов, А. В. Гаврилов // Труды Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2020. – № 1. – С. 17–21. – ISSN 1818-5509.
59. Ворон, О. А. Научное обоснование концепции создания современных типов изотермического подвижного состава / О. А. Ворон // Подвижной состав XXI века: идеи, требования, проекты : сборник докладов XIV Международной научно-технической конференции 9–13 июля 2019 г. – Санкт-Петербург : ПГУПС, 2019. – ISBN 978-5-7641-1346-3.
60. Ворон, О. А. О концепции создания перспективного изотермического подвижного состава / О. А. Ворон // Проблемы и перспективы развития вагоностроения : материалы 4-й Всероссийской научно-практической конференции. – Брянск : БГТУ, 2008.

61. 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.
62. Ворон, О. А. Оборудование автономного рефрижераторного вагона жидкоазотной системой охлаждения / О. А. Ворон, В. Ф. Криворудченко, В. Л. Соловьев [и др.] // Совершенствование конструкции, технического обслуживания и ремонта подвижного состава : сборник. – Ростов-на-Дону : РИИЖТ, 1991.
63. Ворон, О. А. Особенности конструкции универсального кузова для инновационных изотермических вагонов / О. А. Ворон // Вестник БГТУ. – 2021. – № 8(105). – С. 56–64.
64. Ворон, О. А. Особенности оценки прочности металлоконструкции кузова ИВ, охлаждаемого жидким азотом / О. А. Ворон, Е. А. Василькова, // Транспорт: наука, образование, производство : сборник научных трудов. Т. 3 : Технические науки. – Ростов-на-Дону : РГУПС, 2019. – С. 266–269 .
65. Ворон, О. А. Отапливаемый изотермический вагон с вентиляцией и автономной системой энергоснабжения / О. А. Ворон, В. В. Безуглый // Транспорт-2001 : труды научно-теоретической конференции. Ч. 2. – Ростов-на-Дону : РГУПС, 2001. – С. 113–115.
66. Ворон, О. А. Оценка работоспособности текстропно-карданных приводов генераторов пассажирских вагонов / О. А. Ворон, С. П. Рыжов, Е. А. Охотникова // Транспорт-2001: труды научно-теоретической конференции. Ч. 2.– – Ростов-на-Дону : РГУПС, 2001. – С. 115–116.
67. Ворон, О. А. Перспективы использования регулируемой атмосферы в рефрижераторном подвижном составе / О. А. Ворон, В. М. Алексенко // Научные подходы к решению проблем предприятий агропромышленного комплекса : материалы научно-практической конференции. – Ростов-на-Дону : МГТА, 2000.
68. Ворон, О. А. Подвагонный вентильно-индукторный генератор / О. А. Ворон Всероссийского научно-исследовательского и проектно-конструкторского, Н. В.

Гребенников, А. А. Зарифьян, А. Д. Петрушин // Вестник института электровозостроения. – 2009. – № 1(57). – С. 132–143. – ISSN 1816-1928.

69. Ворон, О. А. Применение тепловизионного контроля ограждающих конструкций вагонов / О. А. Ворон, А. В. Селезнев // Труды Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2013. – № 2(23). – С. 113–116. – ISSN 1818-5509.

70. Ворон, О. А. Проблемы транспортной инфраструктуры при перевозках рыбы в современных условиях / О. А. Ворон, И. А. Степин, Е. Е. Супрун, О.В. Калатурский // Труды Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2016. – № 3(36). – С. 33–39. – ISSN 1818-5509.

71. Ворон, О. А. Совершенствование устройств распределения хладагента в грузовом помещении изотермического вагона: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук : 05.22.07 / Ворон Олег Андреевич. – Ростов-на-Дону : РГУПС 1997. – 192 с. (рукописн.).

72. Ворон, О. А. Средства доставки крупнотоннажных рефрижераторных контейнеров по железной дороге / О. А. Ворон, В. В. Безуглый, А. В. Охотников // Проблемы повышения надежности подвижного состава : сборник научных трудов. – Ростов-на-Дону : РГУПС, 2001. – С. 24–26.

73. 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.

74. Ворон, О. А. Экономические и технологические основы развития подвижного состава и транспортной инфраструктуры для перевозок скоропортящихся грузов / О. А. Ворон, Э. А. Мамаев // Вестник Ростовского государственного экономического университета (РИНХ). – 2021. – № 2(74). – С. 30–40. – ISSN 1991-0533.

75. Ворон, О. А. Энергооснащенный подвижной состав для доставки крупнотоннажных рефрижераторных контейнеров / О. А. Ворон, А. Д. Петрушин // Механика и трибология транспортных систем – 2003 : сборник докладов

Международного конгресса, 10–13 сентября 2003 г. – Ростов-на-Дону : РГУПС, 2003. – С. 223–225. – ISBN 5-88814-136-4 .

76. Ворон, О.А. Формирование приоритетных технических параметров инновационного изотермического подвижного состава с оценкой различных вариантов теплоизоляционных материалов кузова / О. А. Ворон, А. В. Селезнев // Подвижной состав XXI века: идеи, требования, проекты : сборник тезисов докладов X Международной конференции. – Санкт-Петербург, 2015.

77. Вохмянина, А. В. Многокритериальный подход для оценки и обоснования приоритетов развития транспортной сети территорий, превосходящих региональный масштаб / А. В. Вохмянина, М. А. Журавская, М. Б. Петров // Вестник Уральского государственного университета путей сообщения. – 2018. – № 4(40). – С. 58–68. – DOI 10.20291/2079-0392-2018-4-58-68.

78. Временная инструкция по эксплуатации и техническому обслуживанию опытных вагонов с жидкоазотным охлаждением № 543-89 ПКБ ЦВ. – Москва : Транспорт, 1989. – 36 с.

79. Гончаров Д.И. Оценка динамической нагруженности несущих конструкций автотрис : специальность 05.22.07 «Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация»: дис. на соискание ученой степени канд. техн. наук/Гончаров Дмитрий Игоревич ; Моск. гос. ун-т путей сообщ.- Москва, 2015. –146 с. – Библиогр.: с. 133-146.

80. ГОСТ 19281-2014. Прокат повышенной прочности. Общие технические условия. – Москва : Стандартинформ, 2015. – 47 с.

81. ГОСТ 33211-2014. Вагоны грузовые. Требования к прочности и динамическим качествам. – Москва : Стандартинформ, 2014.

82. ГОСТ 33788-2016. Вагоны грузовые и пассажирские. Методы испытаний на прочность и динамические качества. – Москва : Стандартинформ, 2016.

83. ГОСТ 9246-2013. Тележки двухосные трехэлементные грузовых вагонов железных дорог колеи 1520 мм. Общие технические условия. – Москва : Стандартинформ, 2014.

84. ГОСТ Р 50421-92 (ИСО 6949-88). Фрукты и овощи. Принципы и технологические приемы хранения в регулируемых газовых средах. – Москва : Издательство стандартов, 1993.
85. ГОСТ Р 50697-94. Контейнеры грузовые серии 1. Ч. 2. Изотермические контейнеры. – Москва : Издательство стандартов, 1994. – 60 с.
86. ГОСТ Р 56 217-2014. Автомобильные транспортные средства, использующие газ в качестве моторного топлива. Общие технические требования к эксплуатации на сжиженном природном газе, техника безопасности и методы испытаний. – Москва : Стандартинформ, 2016. – 20 с.
87. Гребенников Н.В. Динамика и энергоэффективность перспективных единиц подвижного состава, оснащаемых вентильно-индукторными электрическими машинами: 05.22.07 «Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация»: дис. на соискание ученой степени докт. техн. наук / Гребенников Николай Вячеславович ; Рост. гос. ун-тет путей сообщ.- Ростов-на-Дону, 2012. –148 с. – Библиогр.: с. 134-148.
88. Губарев, Д. О. Специальные контейнерные поезда / Д. О. Губарев // Опасные грузы и контейнеры. – 2004. – № 1. – С. 20–25.
89. Гудковский, В. А. Технологические основы перевозки плодов и овощей с использованием ингибиторов этилена / В. А. Гудковский, Л. В. Кожина, В. Н. Панферов // Железнодорожный транспорт. – 2010. – № 9. – С. 29–31. – ISSN 0044-4448.
90. Гусев, А. С. Расчет конструкций при случайных воздействиях / А. С. Гусев, В. А. Светлицкий. – Москва : Машиностроение, 1984. – 240 с.
91. Доктрина продовольственной безопасности Российской Федерации : Указ Президента Российской Федерации от 21 января 2020 г. № 20 // Справочно-правовая система «КонсультантПлюс». – http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_343386 (дата обращения 02.01.2021).

92. Дубровин, Ю. Н. Состояние и меры по совершенствованию холодильной цепи в рыбопромышленном комплексе / Ю. Н. Дубровин // Холодильная техника. – 2012. – № 4. – С. 38–39. – ISSN 0023-124X.
93. Дугин, Г. С. Концепция реформирования рефрижераторных перевозок за рубежом / Г. С. Дугин, И. М. Пенязь // Экспедирование и логистика. – 2007. – № 4. – С. 41–44.
94. Дугин, Г. С. Реформирование специализированных перевозок скоропортящихся грузов в рефрижераторном подвижном составе (опыт Китая) // Бюллетень транспортной информации. – 2009. – № 2(164). – С. 22–26.
95. Евросиб считает оптимальными для рефперевозок сцепы с дизель-генераторными контейнерами. Новая перевозочная. – URL: <https://npktrans.ru/Doc.aspx?docId=102579&CatalogId=653> (дата обращения 25.02.2019).
96. «Евросиб-транспортные системы» в I квартале 2019 года начнет процедуру сертификации в РС дизель-генераторного контейнера // Селдон Новости. – URL: <https://news.myseldon.com/ru/news/index/204555916> (дата обращения 02.01.2020).
97. Жадан, В. З. Влагообмен в плодоовощехранилищах / В. З. Жадан. – Москва : Агропромиздат, 1985. – 197 с.
98. Железные дороги США на современном этапе // Железные дороги мира. – 2001. – № 11.
99. Замрий, А. А. Практический учебный курс. CAD/CAE система APM WinMachine / А. А. Замрий. – Москва : Изд-во АПМ, 2007. – 144 с. – ISBN 5-901346-07-6.
100. Замрий, А. А. Проектирование и расчет методом конечных элементов в среде APM Structure3D : учебное пособие / А. А. Замрий. – Москва : Изд-во АПМ, 2006. – 287 с. – ISBN 5-901346-06-8.
101. Иванкин, П. Г. Наша задача сделать «Рефсервис» самым прибыльным игроком на рынке СПГ / П. Г. Иванкин // РЖД-партнер. – 2010. – № 5(177). – С. 46–47.

102. Иванов, Д. В. Введение в Ansys Workbench : учебно-методическое пособие для студентов естественнонаучных дисциплин / Д. В. Иванов, А. В. Доль. – Саратов: Амирит, 2016. – 56 с. – ISBN 978-5-9909127-0-0.
103. Иванов, К. В. Характеристики теплообмена через ограждения кузовов рефрижераторных вагонов : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Иванов Константин Владимирович. – Москва : ВНИИЖТ, 1973 (рукописн.). – 171 с.
104. Игнатенков, Г.И. Создание комплекса специальных вагонов на основе метода адаптивного конструирования: специальность 05.22.07 «Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация»: дис. на соискание ученой степени докт. техн. наук / Игнатенков Геннадий Иванович ; С.-Петерб. гос. ун-тет путей сообщ.- Санкт-Петербург, 2002. –408 с. – Библиогр.: с. 373-403.
105. Ильинский, А. С. Сохранение качества и предотвращение развития физиологических заболеваний яблок при хранении в регулируемой атмосфере с минимально допустимыми концентрациями кислорода / А. С. Ильинский [и др.] // Вестник Мичуринского государственного аграрного университета. – 2012. – № 4. – С. 91–98. – ISSN 1992-2582.
106. Инновационные процессы логистического менеджмента в интеллектуальных транспортных системах: монография : в 4 т. / под общей редакцией профессора Б. А. Лёвина и профессора Л. Б. Миротина. – Москва : ФГБОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2015. – ISBN 978-5-89035-866-0. – Т. 2 : Формирование отраслевых логистических интеллектуальных транспортных систем. – 343 с. – ISBN 978-5-89035-868-4
107. Исследования по повышению эксплуатационных качеств и динамических характеристик тележки типа 327 для рефрижераторных вагонов. – Москва : Всесоюзный научно-исследовательский институт вагоностроения, 1984, № гос. регистр. 79062930. – 143 с.

108. Калиш, А. Новая генераторно-приводная установка для пассажирских вагонов / А. Калиш, В. И. и др. // Железнодорожный транспорт. – 2012. – № 3. – С. 42–43. – ISSN 0044-4448.
109. Карагусов, В. И. Использование холода газификации природного газа для кондиционирования на транспорте / В. И. Карагусов, В. Л. Юша, И. В. Карагусов // Транспорт на альтернативном топливе. – 2013. – № 5(35). – С. 66–67. – ISSN 2073-1329.
110. Каргин, В. Г. Разработка генераторно-приводной установки для трехэлементных тележек фитинговых платформ / В. Г. Каргин, С. Н. Науменко, В. В. Буров [и др.] // Вестник научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. – 2014. – № 5. – С. 44–49. – ISSN 2223-9731.
111. Карминский В Д.. Совершенствование жидкоазотной системы охлаждения в изотермических вагонах / В. Д. Карминский, К. Б. Комиссаров, О А.Ворон // Совершенствование конструкции, технического обслуживания и ремонта подвижного состава : межвузовский сборник научных трудов. – Ростов-на-Дону : РИИЖТ, 1995. – С. 38–43.
112. Китаев, Б. Н. Теплообменные процессы при эксплуатации вагонов / Б. Н. Китаев. – Москва : Транспорт, 1984. – 184 с.
113. Коковихин, А. В. Совершенствование системы распределения воздуха в рефрижераторных вагонах: специальность 05.22.07 «Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация»: дис. на соискание ученой степени канд. техн. наук / Коковихин Александр Владимирович; Всерос. научн. исслед. ин-тут ж.д. – Москва, 1984. – 211 с.- – Библиогр.: с. 199-209.
114. Коковихин, А. В. Повышение эффективности системы охлаждения пятивагонной рефрижераторной секции / А. В. Коковихин, С. К. Куликов, Ю. В. Корнев // Холодильная техника. – 1985. – № 7. – С. 14–17.
115. Колесников В. И. Развитие технологии перевозок сжиженного природного газа (СПГ) и перспективные маршруты его транспортировки / В. И. Колесников, Н. С. Флегонтов, А. Н. Гуда, О. А. Ворон // Автозаправочный комплекс + альтернативное топливо. – 2010. – № 2(50). – С. 18–27. – ISSN 2073-8323.

116. Колесников В.И. Анализ мультимодальных перевозок СПГ и перспективные маршруты его транспортировки / В. И. Колесников, Н. С. Флегонтов, А. Н. Гуда, О. А. Ворон, // Бюллетень транспортной информации. – 2009. – № 10(172). – С. 3–12. – ISSN 2072-8115.
117. Комиссаров К.Б. Подвижной состав железных дорог с низкотемпературными технологиями: специальность 05.22.07 «Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация»: дис. на соискание ученой степени докт. техн. наук /Комиссаров Константин Борисович; Рост. гос. ун-тет путей сообщ.- Ростов-на-Дону, 1997. –249 с. – Библиогр.: с. 231-248.
118. Контейнер-термос с охлаждением : пат. № 44595, МПК В 60 Н 1/32. / 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. № 9.4,002.
119. 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.
120. Крутова, Е. А. Исследования вопросов перевозки скоропортящихся грузов в вагонах-термосах : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук : 05.22.08 / Крутова Елена Алексеевна. – Москва : ВНИИЖТ, 1987. – 252 с. (рукописн.)
121. Кудинов, А. А. Строительная теплофизика : учебное пособие / А. А. Кудинов. – Москва : ИНФРА-М, 2013. – 262 с. – ISBN 978-5-16-005158-1 (в пер.).
122. Лаврова, Л. И. Сравнительная оценка различных систем воздухораспределения с помощью температурных полей / Л. И. Лаврова // Труды ВНИИЖТ. – Москва, 1979. – Вып. 599. – С. 53–59.
123. Лапшин, В. Ф. Модель термонагруженности вагона-термоса для транспортировки горячих металлургических заготовок / А.В Намятов., А.Г. .Охотников, В.Ф.Лапшин // Транспорт Урала. 2014. № 2 (41). С. 33-38.

124. Логистика : научная монография / В. В. Багинова, Л. С. Федоров, Е. А. Сысоева [и др.] / под общей редакцией В. В. Багиновой. – Москва, 2020. – 292 с. ISBN 978-5-00172-070-6.
125. Логистический центр поставок ЗАО «Тандер» (Магнит) // 56 Стройка. – URL: <https://56stroyka.ru/logisticheskij-czentr-postavok-zao-tander-2> (дата обращения 08.08.2020).
126. Лыков, А. В. Теория теплопроводности / А. В. Лыков. – Москва : Высшая школа, 1967. – 599 с.
127. Мамаев, Э. А. Государственно-частное партнёрство на транспорте / Э. А. Мамаев, Д. С. Хамбурова // Вестник Ростовского государственного экономического университета (РИНХ). – 2019. – № 4(68). – С. 102–110. – ISSN 1991-0533.
128. Матяш Ю.И.. Перспективы создания рефрижераторного подвижного состава /Ю. И. Матяш, В. П. Клюка, О. А. Ворон В. И. Рейнгольд // Совершенствование технологии ремонта и технического обслуживания вагонов : межвузовский тематический сборник научных трудов. – Омск : ОмГУПС, 2009.
129. Матяш, Ю.И. Рефрижераторный подвижной состав: проблемы и пути их решения: монография / Ю. И. Матяш, О. А. Ворон, В. П. Клюка. – Омск : Омский научный вестник, 2014. – 283 с. – ISBN 978-5-91306-058-7
130. Матяш, Ю.И. Хладотранспорт и основы теплотехники: монография / Ю. И. Матяш, В. П. Клюка, О. А. Ворон, С. Н. Науменко. – Москва : УМЦ ЖДТ, 2019. – 360 с. – ISBN 978-5-907055-92-6.
131. Мироненко, В. К. Теоретические основы совершенствования условий перевозок скоропортящихся грузов : диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук : 05.22.08 / Мироненко Виктор Кимович. – Санкт-Петербург : ПГУПС, 1993. – 329 с.
132. Миронов Н. И. Исследование ходовых динамических качеств опытных тележек типа 327 для рефрижераторных вагонов с машинным охлаждением / Н. И. Миронов // Труды ВНИИ вагоностроения. – 1973. – Вып. 21. – С. 88–91.

133. Морчиладзе И.Г. Ситуационная адаптация вагонов для международных перевозок грузов: 05.22.07 «Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация»: дис. на соискание ученой степени докт. техн. наук /Морчиладзе Илья Геронтьевич ; С.-Петербур. гос. ун-тет путей сообщ.- Санкт-Петербург, 2005. –352 с. – Библиогр.: с. 337-352.
134. Морчиладзе, И. Г. Модернизация вагонов для международных перевозок грузов : монография / И. Г. Морчиладзе. – Санкт-Петербург : ОМ-Пресс, 2005. – 128 с.
135. Науменко С.Н. Разработка и исследование энергетических систем для железнодорожных перевозок скоропортящихся грузов специальность: 05.14.01 «Энергет. системы и комплексы»: дис. на соискание ученой степени докт. техн. наук /Науменко Сергей Николаевич ; Моск. гос. ун-т путей сообщ.- Москва, 2008. –270 с. – Библиогр.: с. 250-269.
136. Науменко, С. Н. Обеспечение экологичности и эффективности изотермических транспортных средств / С. Н. Науменко ; ОАО «Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта» (ВНИИЖТ). – Москва : Интекст, 2010. – 160 с. – ISBN 978-5-89277-099-6.
137. Науменко, С. Н. Система автономного электроснабжения железнодорожных фитинговых платформ от оси колесной пары / С. Н. Науменко, Н. С. Теймуразов, А. В. Просеков // Вестник научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. – 2012. – № 3. – С. 17–19. – ISSN 2223-9731.
138. Некрасов, Г. И. Принципы модульности проектирования и обслуживания локомотивов / Г. И. Некрасов, В. Н. Балабин // Мир транспорта. – 2019. – Т. 17, № 2(81). – С. 80–90. – DOI 10.30932/1992-3252-2019-17-2-80-90.
139. Нормы расчета и проектирования вагонов железных дорог МПС колеи 1520 (несамоходных): утверждены Министерством тяжелого и транспортного машиностроения СССР и Министерством путей сообщения СССР в 1983 г. – Москва : ВНИИВ : ВНИИЖТ, 1983 (вып. дан. 1984). – 260 с.
140. О компании. ТЛК «Евразия» // Евразия. Торгово-логистическая компания. – URL: <http://sts-eurasia.ru/about.html> (дата обращения 08.08.2021).

141. Оборот контейнеров на поездах Китай-СНГ может вырасти до 15 % к 2022 г. // Chinalogist. Всё для бизнеса с Китаем. – 07.09.2021. – URL: <https://chinalogist.ru/news/oborot-konteynerov-na-poezdah-kitay-sng-mozhet-vyrasti-do-15-k-2022-g-21527> (дата обращения 08.09.2021).
142. Орлова А.М. Влияние конструктивных схем и параметров тележек на устойчивость, ходовые качества и нагруженность грузовых вагонов: 05.22.07 «Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация»: дис. на соискание ученой степени докт. техн. наук /Орлова Анна Михайловна ; С.-Петербург. гос. ун-тет путей сообщ.- Санкт-Петербург, 2008. –403 с. – Библиогр.: с. 380-402.
143. Орлова, А. М. Влияние технических характеристик грузовых вагонов на тележках модели 18-9855 на их сопротивление движению / А. М. Орлова, А. Н. Комарова // Вагоны и вагонное хозяйство. – 2016. – № 4(48). – С. 30–32. – ISSN 1817-6089.
144. Орлова, А. М. Результаты поездных испытаний тележки 18-9855 / А. М. Орлова, Д. В. Шевченко, Т. С. Куклин, С. В. Дмитриев // Вагоны и вагонное хозяйство. – 2015. – № 1(41). – С. 44–45. – ISSN 1817-6089.
145. Отапливаемое транспортное средство (преимущественно вагон): пат. № 2 621 834, МПК В 60 Р 3/00 / О. А. Ворон, А.В. Селезнев, А.В. Соломин – № 2015149202. 16.11.2015 ; заявл. 16.11.2015 ; опубл. 07.06.17, Бюл. № 16.
146. «ОТЛК ЕРА» обновила рекорд по контейнерным перевозкам между Европой и КНР // Гудок. Грузовые перевозки. Новости. – 06.07.2020. – URL: <https://gudok.ru/news/?ID=1526708> (дата обращения 07.07.2020)
147. Павлюков, А. Э. Исследование тепловых процессов в вагонах при восстановлении сыпучести смерзшихся грузов конвективным разогревом / А. Э. Павлюков, А. В. Занкович / Транспорт Урала. – 2010. – № 4(10). – С. 56–61. – ISSN 1815-9400.
148. Первый серийный: В Санкт-Петербурге спустили на воду траулер-процессор проекта 170701 // Военное обозрение. – 30.03.2021. – URL:

<https://topwar.ru/181452-pervyj-serijnyj-v-sankt-peterburge-spustili-na-vodu-trauler-processor-proekta-170701.html> (дата обращения 02.04.2021).

149. Перевозки скоропортящихся грузов на железных дорогах США // Железные дороги мира. – 2002. – № 3.

150. Петров, М. Б. Новые подходы к прогнозированию в целях управления развитием больших систем территориальной инфраструктуры / М. Б. Петров, К. Б. Кожов // Инновационный транспорт. – 2017. – № 2(24). – С. 3–10. – DOI 10.20291/2311-164X-2017-2-3-10.

151. Петров, М. Б. Прогнозирование взаимного влияния формирования грузопотоков на полигоне железной дороги и развития транспортной сети в евроазиатских экономических коридорах / М. Б. Петров, А. Л. Казаков // Экономический коридор «Китай – Монголия – Россия»: географические и экологические факторы и возможности территориального развития : тезисы Международной географической конференции / ответственный редактор И. Н. Владимиров. – Иркутск : Институт географии им. В. Б. Сочавы СО РАН, 2018. – С. 178–179. – ISBN 978-5-94797-325-9.

152. Петров, М.Б. Новые подходы к прогнозированию в целях управления развитием больших систем территориальной инфраструктуры/ М.Б. Петров, К.Б. Кожов // Инновационный транспорт. – №2 (24), – 2017, – С. 3-10.

153. Петрушин А.Д.. 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.

154. 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.

155. Петрушин, А. Д. Оптимизация активной части вентильно-индукторного электродвигателя методом Нелдера – Мида / А. Д. Петрушин, А. В. Шевкунова, А. В. Кашуба // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2016. –Т. 327, № 6. – С. 83–92. – ISSN 2500-1019.

156. 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.
157. Поварчук, М. М. Исследования большегрузного рефрижераторного контейнера с азотной системой охлаждения / М. М. Поварчук [и др.] // Холодильная техника. – 1984. – № 9. – С. 42–44. – ISSN 0023-124X.
158. Погорелов, Д. Ю. Универсальный механизм 7.0. Руководство пользователя. Введение / Д. Ю. Погорелов // Universal Mechanism. – URL: www.universalmechanism.com/pages/index.php?id=3, свободный (дата обращения 14.06.2016г.).
159. Попов, О. М. Жидкоазотная система охлаждения автономного изотермического вагона / О. М. Попов [и др.] // Холодильная техника. – 1990. – № 11. – С. 10–11. – ISSN 0023-124X.
160. Пополнение парка грузовых вагонов Северной Америки // Железные дороги мира. – 2006. – № 1.
161. Правила перевозок грузов железнодорожным транспортом : сборник-книга 1. – Москва : Юридическая фирма «Юртранс», 2007. – 712 с.
162. Применение реактивных индукторных двигателей на перспективном ЭПС / В. Г. Щербаков, Г. И. Колпахчян, Б. И. Хоменко [и др.] // Электровозостроение : сборник научных трудов / Всероссийский научно-исследовательский проектно-конструкторский институт электровозостроения. – 1998. – Т. 40. – С. 45–57.
163. Прогрессивные технологии и технические средства для хранения и транспортировки плодоовощной продукции / В. А. Гудковский, А. С. Ильинский, В. Н. Серебряков, В. Н. Панферов // Холодильная техника. – 1998. – № 1. – С. 8–10.
164. Прокофьев, М. П. Перспективы транспортного коридора «Север – Юг» / М. П. Прокофьев, М.М. Тохиров // Мир транспорта. – 2019. – Т. 17, № 5. – С. 200–213. – DOI 10.30932/1992-3252-2019-17-5-200-213.

165. Распоряжение ОАО «РЖД» от 28 ноября 2008 г. № 2538р «О методических рекомендациях по расчету экономической эффективности новой техники, технологии, объектов интеллектуальной собственности и рационализаторских предложений» / ОАО «РЖД». – Москва, 2008.
166. Распределительный центр Магнит, ЗАО Тандер // МЕАКОМ. – URL: <https://meakom.ru/contacts/18-clients/84-raspredelitelnyj-centr-magnit-zao-tander> (дата обращения 07.08.2021).
167. Рефперевозки. Чего ждёт рыба? // Fishretail. – 26.02.2020. – URL: <https://fishretail.ru/news/refperevozki-chego-gdyot-riba-405154> (дата обращения 07.08.2021).
168. Рукавишников, А. М. Склады-холодильники: стратегия выбора / А. М. Рукавишников // Холодильная техника. – 2012. – № 1. – С. 110–114. – ISSN 0023-124X.
169. «Русские Рефрижераторы» возрождают отрасль // СИБ Трансхолод. официальный дистрибьютор Carrier Transicold. – URL: <http://sivtrans.ru/russkie-refrizheratory-vozrozhdayut-otrasl.html> (дата обращения 26.02.2021).
170. «Русские Рефрижераторы» прошли сертификацию» // Холодильная индустрия. Онлайн-журнал и каталог. – 01.03.2021. – URL: <https://holodcatalog.ru/news/new-equipment/russkie-refrizheratory-proshli-sertifikatsiyu> (дата обращения 01.07.2021).
171. Рыбников, Е. К. Ходовые качества грузового вагона на тележках ДП-3 / Е. К. Рыбников [и др.]. // Вестник Института естественных монополий : Техника железных дорог. – 2012. – № 2(18). – С. 59–63. – ISSN 1998-9318.
172. Саати, Т. Л. Математические модели конфликтных ситуаций / Томас Л. Саати. – Москва : Советское радио, 1977. – 304 с.
173. Саати, Т. Л. Принятие решений при зависимостях и обратных связях: Аналитические сети / Томас Л. Саати ; перевод с английского О. Н. Андрейчиковой ; научные редакторы : А. В. Андрейчиков, О. Н. Андрейчикова. – Изд. 3-е. – Москва : URSS, 2010. – 357 с. – ISBN 978-5-397-01622-3.

174. Саати, Т. Л. Принятие решений. Метод анализа иерархий / Томас Л. Саати ; перевод с английского В. Г. Вачнадзе. – Москва : Радио и связь, 1993. – 314 с. – ISBN 5-256-00443-3 : Б. ц.
175. Савчук, В. Вагоны-рефрижераторы уходят с железных дорог / В. Савчук // Империя холода. – 2016. – № 1. – С. 38–39.
176. Самошкин, О. С. Исследование предельных тягово-энергетических характеристик клиноременных приводов от середины оси колесной пары / О. С. Самошкин // Подвижной состав XXI века: идеи, требования, проекты : тезисы докладов V Международной научно-технической конференции. – Санкт-Петербург : ПГУПС, 2007. – С. 137–139.
177. Самошкин, С. Л. Приводы генераторов индивидуальных систем энергоснабжения вагонов локомотивной тяги / С. Л. Самошкин, И. С. Доронин, А. А. Чернышев. – Москва : ЦНИИТЭИтяжмаш, 1986. – 44 с.
178. Самошкин, С. Л. Универсальный привод систем энергоснабжения пассажирских вагонов / С. Л. Самошкин // Железнодорожный транспорт. – 2003. – №11. – С. 41–43.
179. Селинов, В. И. Расчет и конструирование подвешивания вагонов / В. И. Селинов. – Москва : Машиностроение-1, 2002. – 250 с. – ISBN 5-94275-028-9.
180. Сидоров, Ю. П. Основы кондиционирования воздуха на предприятиях ж.д. транспорта и в подвижном составе : учебник для вузов железнодорожного транспорта / Ю. П. Сидоров. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва : Транспорт, 1984. – 208 с.
181. Сидоров, Ю. П. Разработка метода комплексной оценки теплотехнических характеристик ограждений подвижного состава и средств обеспечения микроклимата: диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук : 05.22.07 / Сидоров Юрий Павлович. – Москва : МИИТ, 1990. – 420 с.
182. Симонов, В. А. Обоснование выбора технических решений в задачах проектирования подвижного состава / В. А. Симонов; Брянский институт транспортного машиностроения, – Брянск : БИТМ, 1986. – 64 с.

183. Система обогрева бытовых помещений транспортных средств, содержащих дизель-генераторную установку : пат. № 2 724 029, СПК В61D 27/00 / О. А. Ворон, О. Л. Игнатъев, А. А. Патенян, Д. И. Гончаров. – № 2019128212, заявл. 29.08.2019 ; опубл.18.06.2020, Бюл. № 17.
184. Система управления вентильно-индукторным генератором : пат. № 86060 U1, МПК НО2Р9/36, НО2К29/06 / О. А. Ворон, Н. С. Теймуразов, А. Д. Петрушин. – № 2009112177/22; заявл. 02.04.09 ; опубл. 20.08.09, Бюл. №23
185. Скачков, А. А. Перевозка скоропортящихся грузов по технологии «Холодный экспресс» / А. А. Скачков, М. И. Мехедов, В. В. Петров // Железнодорожный транспорт. – 2018. – № 9. – С. 51–54.
186. Соколов А. М. Научные основы создания и оценка эффективности внедрения инновационных вагонов / А. М. Соколов // Бюллетень Объединенного ученого совета ОАО РЖД. – 2015. – № 2. – С. 1–13.
187. Соколов А.М. Методология синтеза нечетких моделей прочности для совершенствования соединений элементов конструкций: 05.22.07 «Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация»: дис. на соискание ученой степени докт. техн. наук /Соколов Алексей Михайлович; С.-Петербург. гос. ун-тет путей сообщ.- Санкт-Петербург,2006. –384с. – Библиогр.: с. 369-384.
188. СПГ для автомагистрального и железнодорожного транспорта // Транспорт на альтернативном топливе. – 2017. – № 6(60) – С. 6–7.
189. Способ изготовления вентильно-индукторного генератора: пат. № 2390905 С1, МПК НО2К15/00, НО2К15/12 / О. А. Ворон, Н. С. Теймуразов, А. Д. Петрушин. – № 2009114422/09 ; заявл. 17.04.09 ; опубл. 27.05.10, Бюл. №15
190. Способ хранения скоропортящихся продуктов : пат. МКИ 21184885 RU. А 01 F 25/00 / О. А. Ворон, В. М. Алексенко. – № 96109687/13 (015244) ; заявл. 12.05.96 ; опубл.10.09.98, Бюл. № 25.
191. Справочник-пособие по перевозке скоропортящихся грузов / под редакцией В. Н. Панферова. – Москва : РОО «Техинформ», 2007. – 307с.
192. Ставка на контейнеры. Станция Артём в Приморье принимает «скоропорт» // Корпоративное телевидение ОАО «РЖД». – URL:

<https://rzd-tv.ru/2021/03/21/ctavka-na-kontejnery-stancija-artjom-v-primore-prinimaet-skoroport> (дата обращения 21.03.2021).

193. Ставки фрахта рефконтейнеров продолжают расти в 2022 году
<https://www.rzd-partner.ru/wate-transport/news/stavki-frakhta-refkonteynerov-prodolzhat-rasti-v-2022-godu/>

194. Стефанович В. В. Анализ условий воздушного обтекания штабеля груза в рефрижераторном трюме / В. В. Стефанович, Б. В. Комарницкий // Судостроение. – 1972. – № 7. – С. 23–24.

195. Стратегия развития морских терминалов для комплексного обслуживания судов рыбопромыслового флота с учетом береговой логистической инфраструктуры, предназначенной для транспортировки, хранения и дистрибуции рыбной продукции : Приказ Минсельхоза России от 20 апреля 2017 г. № 189 // Справочно-правовая система «КонсультантПлюс». – URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_216180.

196. Стратегия развития рыбохозяйственного комплекса до 2030 г. : Распоряжение Правительства Российской Федерации от 26 ноября 2019 г. № 2798-р // Справочно-правовая система «КонсультантПлюс». – URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_338713.

197. Тенденции развития парка грузовых вагонов железных дорог США и Канады // Железнодорожный транспорт за рубежом : Экспресс-информация. Вып. 3–4. – Москва : ЦНИИТЭИ, 2003 (Ротапринтная ЦНИИТЭИ). – 64 с.

198. Терешкин, Л. В. Приводы генераторов пассажирских вагонов / Л. В. Терешкин. – Москва : Транспорт, 1990. – 152 с.

199. Тертеров М. Н. Проблемы развития железнодорожного холодильного транспорта / М. Н. Тертеров, В. К. Мироненко // Холодильная техника. – 1990. – № 11. – С. 2–7. – ISSN 0023-124X.

200. Тертеров, М. Н. Проблемы развития непрерывной холодильной цепи / М. Н. Тертеров // Холодильная техника. – Москва : Лёгкая и пищевая промышленность, 1981. – № 10. – ISSN 0023-124X.

201. Ткачев, В. Д. Нужен ли вагон-овощевоз? / В. Д. Ткачев, Н. Н. Тертеров, В. К. Мироненко // Железнодорожный транспорт. – 1990. – № 11. – С. 21–22. – ISSN 0044-4448.
202. Третьяков А.В. Управление индивидуальным ресурсом вагонов в эксплуатации: специальность 05.22.07 «Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация»: дис. на соискание ученой степени докт. техн. наук /Третьяков Александр Владимирович; С.-Петербур. гос. ун-тет путей сообщ.- Санкт-Петербург, 2004. –380 с. – Библиогр.: с. 323-346.
203. Тяговые электрические машины : учебник / В. Г. Щербаков [и др.] ; под редакцией В. Г. Щербакова, А. Д. Петрушина. – Москва : ФГБОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2016. – 641 с.
204. Тяговый синхронный двигатель индукторного типа / Л. Ф. Коломейцев, В. М. Павлюков, С. А. Пахомин, И. А. Прокопец // Электровозостроение : сборник научных трудов / Всероссийский научно-исследовательский проектно-конструкторский институт электровозостроения. – 1991. – Т. 32. – С. 64–69.
205. Уманский, В. Л. Проблемы развития морского звена холодильно-технологической цепи обработки, хранения и транспортирования водных биологических ресурсов / В. Л. Уманский, Е. Г. Бычков, В. И. Яковлев, А. А. Ковалев // Инновационные технологии обработки и хранения сельскохозяйственного сырья и пищевых продуктов : сборник научных трудов ученых и специалистов к 90-летию ВНИХИ. – Москва, 2020. – С. 423–428.
206. Универсальный контейнер-термос : пат. № 45684, МПК В 60 Р 3/20, В 60 Н 1/32 / О. А. Ворон, Д. О. Губарев, С. Н. Науменко, Н. Н. Губарева, А. Г. Резников. – № 2004131757/22 ; заявл. 03.11.04 ; опубл. 27.03.05, Бюл. № 15.
207. Устройство для ввода хладагента в камеру охлаждения : а. с. 1495609 СССР, МКИ F25D3/10 / 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.
208. Филиппов, В. Н. Анализ исследований по созданию двухосных тележек грузовых вагонов в России / В. Н. Филиппов, Г. И. Петров, В. Г. Солоненко, Н. К.

Игембаев // Вестник Академии транспорта и коммуникаций им. М. Тынышпаева, 2009. – № 4(59). – С. 33–40. – ISSN 1609-1817.

209. Холодильная камера : а. с. № 1597503 СССР, МКИ F25D3/10, 17/06 / 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.

210. Холодильная камера: а. с. № 1645795 СССР, МКИ F25D3/10, B60 P3/20. 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.

211. Холодильник для продуктов: а. с. 1597504 СССР, МКИ F25D3/10 / 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.

212. Хранение в регулируемой атмосфере РА (РГС) // Холодильное оборудование ИНФРОСТ. – URL: <https://www.infrost-agro.ru/keeping/regulate/> (дата обращения 02.01.2020) .

213. Шевкунова, А. В. Исследование влияния фрагментов магнитной системы вентильно-индукторного двигателя на среднее значение электромагнитного момента / А. В. Шевкунова // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2016. – № 3. – С. 116–124.

214. Шелофаст, В. Программный комплекс АРМ WinMachine – инструмент для проектирования современных машин, механизмов и конструкций / В. Шелофаст [и др.] // CADmaste. – 2005. – № 2. – С. 45–49.

215. Щербаков, В. Г. Индукторный тяговый электродвигатель для электропоезда. Параметры, особенности конструкции / В. Г. Щербаков, В. М. Павлюков, В. И. Захаров // Известия высших учебных заведений. Электромеханика, 2000. – № 3. – С. 57–58.

216. Эрлихман, В. Н. Математическое моделирование процессов охлаждения и замораживания тел с переменными теплофизическими характеристиками / А. Г. Ионов, В. А. Наумов, В. Н. Эрлихман // Инженерно-физический журнал. – 2000. – Т. 73, № 3. – С. 645–649. – ISSN 0021-0285.

217. Эрлихман, В. Н. Разработка принципов повышения эффективности технологических процессов холодильных производств : диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук : 05.18.04, 05.18.12 / Эрлихман Владимир Наумович. – Калининград, 2005. – 265 с
218. Юрьев, Ю. М. Изотермические вагоны постройки ГДР / Ю. М. Юрьев, Л. Б. Лаврик-Кармазин. – Москва : Транспорт, 1989. – 180 с. – ISBN 5-277-00466-1 : 80 к.
219. Янюк, В. Я. Основные проблемы и направления в проектировании современных холодильных складских комплексов / В. Я. Янюк // Холодильная техника. – 2009. – № 10, 11, 12; – 2010. – № 1. – ISSN 0023-124X.
220. Янюк, В. Я. Холодильные камеры для хранения фруктов и овощей в РГС / В. Я. Янюк, В. И. Бондарев ; под редакцией В. Я. Янюка. – Москва : Легкая и пищевая промышленность, 1984. – 128 с.
221. An effect of storage and transportation temperature on quantitative and qualitative composition of microflora of plant products / S. V. Avilova, V. N. Kornienko, A. A. Gryzunov, A. A. Vankova // Food Systems. – 2019. – Vol. 2, No. 4. – P. 42–47. – DOI 10.21323/2618-9771-2019-2-4-42-4.
222. ANSYS Workbench. Тепловой анализ : учеб. пособие / перевод с английского О. М. Огородниковой. – Екатеринбург : УрФУ, 2009. – Текст электронный. – URL: <http://cae.ustu.ru/download/ansys4.pdf> (дата обращения 20.11.2013).
223. Chislov, O. Methodological bases of modeling and optimization of transport processes in the interaction of railways and maritime transport (Методологические основы моделирования и оптимизации транспортных процессов во взаимодействии железнодорожного и морского транспорта) / O. Chislov, V. Zadorozhniy, D. Lomash, E. Chebotareva, I. Solop, T. Bogachev // Advances in Intelligent Systems and Computing. – 2020. – DOI 10.1007/978-3-030-34069-8_7.
224. Cold chain of chilled food in France / E. Derens-Bertheau, V. Osswald, O. Laguerre, G. Alvarez // International Journal of Refrigeration. – 2015. – Vol. 52. – P. 161–167. – DOI 10.1016/j.ijrefrig.2014.06.012.

225. Dynamic modeling and thermal performance analysis of a refrigerated truck body during operation / P. Artuso, A. Rossetti, S. Minetto [and others] // International Journal of Refrigeration. – 2019. – Vol. 99. – P. 288–299.
226. Efficient and secure logistics transportation system (Эффективная и безопасная логистическая транспортная система) / M. V. Kolesnikov, N. N. Lyabakh, E. A. Mamaev, M. V. Bakalov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2020. – DOI10.1088/1757-899X/918/1/012031.
227. Guid to refrigerated transport/ International Institute of Refrigeration. – Paris, 1995. –150 p.
228. Heat and mass exchanging processes in a refrigerated truck body during multi-drop urban distribution of fresh herbs / V. N. Kornienko, A. A. Gryzunov, N. S. Nikolaev [and others] . // Revista San Gregorio. – 2020. – Vol. 37. – P. 61–74. (WoS-(Q)). DOI 10.36097/rsan.v1i37.1251.
229. Influences of car body vertical flexibility on ride quality of passenger railway vehicles / J. Zhou, R. Goodall, L. Ren [et al.] // Proceeding of the institution of mechanical engineers. Part F: Journal of Rail and Rapid Transit. – 2009.– № 223(5). – P. 461–471.
230. Jakubowski, T. Temperature Monitoring in the Transportation of Meat Products / T. Jakubowski // J Food Process Technol. – 2015. – Vol. 6. – P. 10. – DOI 10.4172/2157-7110.1000502.
231. Kohnke, P ANSYS Theory Reference. Release 5.5 / edited by Ph.D. Canonsburg : ANSYS Inc., 1998.
232. Modeling of the Cryogenic Section’s Dynamics of an Experimental GAS-Diesel Locomotive / Igor V. Volkov, Oleg A.Voron,.Yuriy P. Bulavin, [и др.]// International Journal of Applied Engineering Research. – 2017. – Vol., 12, No. 22. – P. 11885–11890. – ISSN 0973-4562. – URL: <http://www.ripublication.com>.
233. Nodali, N. Time-temperature abuse in the food cold chain: Review of issues, challenges, and recommendations / Nodali Ndrahaa, Hsin-I. Hsiaoa, Jelena Vlajic, Min-Feng Yang, Hong-Ting Victor Lin // Food Control. – 2018. – Vol. 89. – P. 12–21. – DOI 10.1016/j.foodcont.2018.01.027.

234. Pacejka, H. B. *Tire and Vehicle Dynamics* / H. B. Pacejka. – SAE International and Elsevier, 2005. – 642 p.
235. Paúl, B. Thermal behavior of a refrigerated vehicle: Process simulation, / B. Paúl Torres Jara, Juan Aguirre Rivera, Carlos E. Buenaño Merino Efrén, Vázquez Silva, Gabriela Abad Farfán // *International Journal of Refrigeration*. – 2019. – Vol. 100. – P. 124–130.
236. Petrov, M. Criterion of comparative efficiency in planning of the transport network (Критерий сравнительной эффективности при планировании транспортной сети) / M. Petrov, V. Samuylov // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 12th International Scientific Conference on Agricultural Machinery Industry, INTERAGROMASH-2019. – 2019. – P. 012196.
237. Recommendations for chilled storage of perishable produce. Conditions recommandees pour la conservation des produits perissables a l,etat refrigere // *International Institute of Refrigeration – Institute International du Froid*. – Paris, 2000. – P. 219 .
238. Refrigerated railroad car design for shipping frozen meat using alternative refrigerants / B. Alkan, A. Celen, A. Çebi, [and others] // *American Society of Mechanical Engineers, Fluids Engineering Division (Publication) FEDSM*. – 2014. – URL: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84919935513> DOI: 10.1115/FEDSM2014-21068.
239. Rodrigue, J. P. *The Cold Chain and its Logistics* / J. P. Rodrigue, T. Notteboom // *The Geography of Transport Systems*. – New York : Routledge, 2020. – 456 p. – ISBN 978-0-367-36463-2.
240. Ryazanova. E. Capacity and Traffic Management on a Heavy-Traffic Railway Line / E. Ryazanova, V. Zubkov, E. Chebotareva, M. Bakalov, A. Gordienko // *VIII International Scientific Siberian Transport Forum, Vol. 2 Серия книг: Advances in Intelligent Systems and Computing*. Vol. 1116. – P. 934–949. – DOI 10.1007/978-3-030-37919-3_92.
241. Santhosh Kumar, P. S. Heat transfer analysis for different materials of ball bearing using ANSYS / P. C. Santhosh Kumar, R. Naveenkumar, S. K. Lakshmana

- Moorthy, M. Meignanammoorthy, M. Ravichandran // *Materials Today: Proceedings*, 2020.
242. Strategic Trends of Cargo Turnover in Major Hubs: Assessment, Clustering and Prediction (Стратегические тенденции грузооборота в крупных хабах: Оценка, кластеризация и прогнозирование) / E. A. Mamaev, A. N. Guda, B. A. Levin, [and others] // *International Journal of Economic Perspectives*. – 2017. – Vol. 11, Iss. 2, June. – ISSN 1307-1637.
243. Switched reluctance machine for a car stater alternator system / A. Vries, Y. Bonnassieux, M. Gabsi, [and others] // *IEEE International Electric Machines and Drives Conference*. – 2001. – P. 323–329.
244. Tanner, D. Refrigerated Transport / D. Nanner // *Reference Module in Food Science*. – Elsevier, 2016.
245. Technical guides of the International Institute of refrigeration. Control of the Cold Chain for Quick-Frozen Foods Handbook / International Institute of Refrigeration. – Paris, 1999. – P. 94.
246. The design of switched reluctance motor torque optimization controller / G. Xudong, W. Xudong, L. Zhongyu, Z. Yongqin // *International Journal of Control and Automation*. – 2015. – Vol. 8, No. 5. – P. 27–36. – DOI 10.14257/ijca.2015.8.5.03.
247. Time-Temperature Management Along the Food Cold Chain: A Review of Recent Developments / S. Mercier, S. Villeneuve, M. Mondor, I. Uysal // *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*. – 2017. – Vol. 16. – P. 647. – DOI 10.1111/1541-4337.12269.
248. 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.
249. 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 and I. V. Volkov // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 709 (2020) 033094.
250. Voron, O. A. Self-contained refrigerator car of new generation / O. A. Voron // *Tyazheloe Mashinostroenie*. – 2004. – Vol. 9. – P. 36–40.

ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ СФЕР
ИСПОЛЬЗОВАНИЯ КОМПЛЕКСА АВТОНОМНОГО ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЯ
НА БАЗЕ ВЕНТИЛЬНО-ИНДУКТОРНОГО ГЕНЕРАТОРА

П.1. Технико-экономическое обоснование использования комплекса автономного энергоснабжения фитинговых платформ для транспортировки крупнотоннажных рефрижераторных контейнеров (КРК)

В настоящее время для автономного получения электроэнергии стандартного напряжения и частоты на РПС используются ДГА. В качестве альтернативного дополнительного источника электрической энергии может быть использован подвагонный генератор со статическим преобразователем (по типу пассажирских вагонов) для фитинговой платформы для энергоснабжения КРК.

П.1.1. Производство электрической энергии от ДГА

Для формирования исходных технических данных примем существующую в настоящее время технологию доставки КРК специализированными контейнерными сцепами, когда для электроснабжения применяется ДЭС. Экономическую оценку приведем для более мощного генератора, поэтому для расчетов примем технические параметры вагона ДЭС рефсекции ZB-5, как более экономичной и надежной за счет применения малооборотного дизеля ($N = 1000$ об/мин). Аналогичный показатель вагона ДЭС производства БМЗ (дизелей К461М) хуже на 10–15 %. Согласно паспортным техническим характеристикам мощность ДГА составляет 94 кВА, мощность дизеля 85 кВт, при часовом расходе дизельного топлива 20,2 кг/ч угар масла 0,24 кг/ч. С учетом фактического износа дизелей (средний срок службы более 20 лет) при полной нагрузке эта величина будет существенно больше.

Расчет произведем из условий эксплуатации специализированного контейнерного сцепа на маршруте Владивосток – Москва.

Средняя продолжительность рейса при следовании в ускоренном контейнерном поезде составляет 16 суток. По условиям эксплуатации КРК, их энергоснабжение должно осуществляться непрерывно, поэтому время работы ДГА должно составлять около 23 ч в сутки. С учетом коэффициента рабочего времени холодильного оборудования КРК (в среднем 0,6–0,8) примем в среднем коэффициент загрузки для ДГА равным 0,7.

В этом случае общий расход топлива в груженом рейсе составит:

$$P_{\text{д}} = 16 \cdot 23 \cdot 20,2 \cdot 0,7 = 5203,5 \text{ кг.}$$

Расход масла: $P_{\text{м}} = 16 \cdot 23 \cdot 0,24 \cdot 0,7 = 61,8 \text{ кг.}$

При средней годовой цене дизтоплива (зимнее, летнее) 55 руб/кг расходы составят

$$D = 5203,5 \cdot 55 = 286\,192,5 \text{ руб.}$$

$$M = 61,8 \cdot 75 = 4635 \text{ руб.}$$

Общие расходы на горюче-смазочные материалы за один груженный рейс одним ДГА составят: $P_{\text{гсм}} = 286\,192,5 + 4635 = 290\,827,5 \text{ руб.}$

П.1.2 Производство энергии от подвагонного генератора

Стоимость комплекта автономного энергоснабжения (КАЭ) для фитинговой платформы на этом этапе работ можно оценить ориентировочно, исходя из цен, сложившихся на аналогичное оборудование для пассажирских вагонов.

В состав КАЭ входят:

- модернизированная тележка КВЗ-И2 с приводом (1700 тыс. руб.);
- подвагонный генератор (350 тыс. руб.);
- статический преобразователь (600 тыс. руб.);
- прочее дополнительное оборудование (100 тыс. руб.).

Таким образом, стоимость оборудования при изготовлении установочной серии 50 штук составит около 2750 тыс. рублей.

Контейнерные сцепы являются достаточно востребованным типом подвижного состава и эксплуатируются достаточно интенсивно. Принимаем среднюю продолжительность рейса с Дальнего Востока в Москву 16 суток. Отсюда можем сделать вывод, что сцеп выполнит 18 груженных рейсов в год.

Условно принимаем, что грузовой поезд на этом маршруте движется около 15 часов в сутки со скоростью более 25 км/ч (с которой начинается выработка электроэнергии).

В этом случае годовое суммарное время работы подвагонного генератора составит:

$$B = 15 \cdot 16 \cdot 18 = 4320 \text{ ч.}$$

В сравниваемом варианте энергоснабжения от ДЭС часовые затраты на горюче-смазочные материалы на один ДГА составят:

$$P_{\text{ГСМ}} = 20,2 \cdot 55 + 0,24 \cdot 75 = 1129 \text{ руб.}$$

С учетом мощности ДГА удельные затраты на производство одного кВт·ч электроэнергии составляют:

$$P'_{\text{уд}} = 474,2/85 = 13,28 \text{ руб/кВт·ч.}$$

При энергоснабжении от подвагонного генератора мощностью 20 кВт экономится ГСМ на сумму:

$$C = 13,28 \cdot 20 = 265,64 \text{ руб/ч.}$$

Однако оборудование платформы предполагает дополнительные затраты в размере 2750 тыс. руб.

Чтобы компенсировать капитальные затраты на переоборудование платформы, необходимо, чтобы время работы составляло:

$$\Theta = 2\,750\,000/265,64 = 10\,352,4 \text{ ч.}$$

Срок окупаемости составляет:

$$C_{\text{ок}} = \Theta/B = 10\,352,4/4320 = 2,4 \text{ года.}$$

При этом следует учитывать, что в расчет не вошли заработная плата механиков, обслуживающих ДГА, а также затраты на проведение деповского и текущих ремонтов ДГА, которые составляют около 25 000 руб. в год.

П.2. Технико-экономическое обоснование использования КАЭ для энергоснабжения отопляемого изотермического вагона (серийный генератор)

Краткий обзор перспективных технологий, которые могут найти применение на железнодорожном транспорте, условно можно разделить на два

взаимосвязанных вида. Первый касается технологии перевозок, а второй – совершенствования конструкции транспортных средств. При создании подвижного состава нового поколения эти технологии обязательно найдут свое место, хотя и с различной степенью значимости. Само понятие вагона нового поколения подразумевает повышение производительности, надежности вагона, а также увеличение межремонтных сроков. К сожалению, в настоящее время в ОАО «РЖД» не разработана стратегия развития и пополнения парка изотермических вагонов.

Поэтому экономическая оценка эффективности перспективных технологий первого вида на этом этапе работ вызывает определенные затруднения, связанные с отсутствием требуемых исходных данных. Например, оснащение вагонов установками создания в грузовом помещении контролируемой атмосферы повышает потребительские качества вагона за счет лучшей сохранности перевозимого груза и более широкой номенклатуры грузов, допускаемых к перевозкам. Однако стоимость такой установки составляет около 10 000 долларов, а количество перевезенного груза и полученный экономический эффект на этом этапе работ определить невозможно. Это связано и с определенной некорректностью учета потерь скоропортящегося груза при транспортировке. Более возможной и корректной является экономическая оценка от применения энергосберегающих технологий при модернизации энергохолодильного оборудования вагонов, так как это позволяет произвести сравнение с имеющимся аналогом.

П.2.1 Автономный отапливаемый изотермический вагон с энергоснабжением от подвагонного генератора

В современной структуре перевозок СПГ около 80 % парка ИПС должно приходиться на одиночные вагоны. Причем в номенклатуре СПГ существует многочисленные позиции грузов, которые требуют поддержания положительных температур в достаточно широких пределах. Для этих целей предлагается использовать автономный ОИВ с энергоснабжением от подвагонного генератора.

В качестве базового вагона могут быть использованы старогодние ИВ-термосы. Эти вагоны оснащаются новой кабельной системой обогрева, без традиционной отопительно-вентиляционной установки. Кроме этого, модернизации подвергается одна из тележек, которая оснащается подвагонным генератором с приводом.

Учитывая, что вагоны, предлагаемые к переоборудованию, были изготовлены 25 лет назад, то целесообразно выполнить работы по модернизации АОИВ в рамках капитального ремонта с продлением срока полезного использования (КРП). Ввиду того что в настоящее время ИПС не подвергается КРП, то его стоимость в данных расчетах не учитывается.

Для АОИВ необходимо проводить следующие виды технического обслуживания:

- ТО1 – перед погрузкой вагона (стоимость 1200 руб.);
- ТО2 – в пути следования вагона (стоимость 400 руб.) Принимаем, что в пути следования обслуживание в среднем выполняется три раза;
- ТО3 – после выгрузки вагона (стоимость 5000 руб.);
- УТО1 – укрупненное техническое обслуживание перед началом зимнего сезона перевозок (стоимость 4000 руб.);
- УТО2 – укрупненное техническое обслуживание после окончания зимнего сезона перевозок (стоимость 4000 руб.);
- ДР – деповский ремонт через 2 года или по пробегу (стоимость 80 000 руб.).

С учетом средней продолжительности рейса и специфичности перевозимых термочувствительных грузов, АОИВ может выполнить шесть груженых рейсов с использованием системы обогрева.

Исходя из годового срока эксплуатации в осенне-зимний период (6 поездок) количество технических обслуживаний будет следующим:

ТО1 – 6, ТО2 – 24, ТО3 – 6, УТО1 – 1, УТО2 – 1, ДР – 1/2.

Таким образом, суммарные годовые затраты на ремонт и обслуживание составляют:

$$Z_{\text{экспл}} = 6 \cdot 1200 + 24 \cdot 400 + 6 \cdot 5000 + 4000 + 4000 + 1/2 \cdot 80\,000 = 1\,018\,200 \text{ руб.}$$

Энергосиловое оборудование ОИВ определим по аналогии с комплексом автономного энергоснабжения фитинговой платформы.

В состав энергосилового оборудования входят:

- модернизированная тележка КВЗ-И2 с приводом (1700 тыс. руб.);
- подвагонный генератор (350 тыс. руб.);
- система управления генератора (100 тыс. руб.);
- прочее дополнительное оборудование (250 тыс. руб.).

Общая стоимость переоборудования ИВ-термоса в ОИВ составит 2 400 000 рублей.

П.2.2 Годовые доходы от использования АОИВ

Экономическая эффективность использования ОИВ с автономной системой энергоснабжения достигается за счет увеличения объемов перевозок термочувствительных грузов (соков, плодоовощной продукции, минеральной воды, пива, сыров сычужных) в осенне-зимний период времени.

В настоящее время действующие Правила перевозок накладывают ряд существенных ограничений как по срокам, так и по температурам окружающего воздуха на транспортировку этих специфических видов скоропортящейся продукции в специализированных вагонах-термосах.

Нехватка этого типа подвижного состава (а постройка таких вагонов осуществлялась в Германии) привела к необходимости переоборудования части грузовых рефрижераторных вагонов в вагоны-термосы. Однако следует учесть, что Правила перевозок рассчитаны на вагоны-термосы с усиленной теплоизоляцией ($k_{\text{тп}} = 0,22 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}$), в то время как рефрижераторные вагоны имели при постройке $k_{\text{тп}} = 0,3 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}$. С учетом старения теплоизоляции реальный коэффициент теплопередачи будет находиться в пределах $0,6\text{--}0,8 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}$.

Естественно, что в этом случае потребуется корректировка условий перевозок в сторону ужесточения по срокам доставки и допускаемым температурам окружающего воздуха.

Создание АОИВ позволит решить проблемы обогрева ГП, а значит, и существенно расширить полигон использования АОИВ и исключить зависимость от низких температур окружающего воздуха.

В связи с тем что модернизации подвергаются не новые вагоны, а существующие, остаток ресурса которого составляет 5–15 лет, то срок службы принимаем равным 10 годам.

Общий объем перевозок в осенне-зимний период времени на Северо-Кавказской железной дороге оценивается в 2400–2500 вагонов. Для расчетов примем, что половина этого объема перевозится на расстояния свыше 3000 км, в районы Крайнего Севера и Западной Сибири.

$$\sum N_{\text{отпр}} = 1/2 \cdot 2500 = 1250 \text{ вагонов.}$$

В последнее время темпы роста перерабатывающей промышленности достигли 30 %, поэтому в случае появления АОИВ мы можем ожидать увеличения объемов перевозок на 10–15 % и привлечения дополнительных объемов грузов (принимаем 12,5 %).

$$\sum N_{\text{отпр}} = 1250 \cdot 1,12 = 1400 \text{ вагонов.}$$

С учетом принятого количества груженых рейсов потребное количество ОИВ составит:

$$N_{\text{отпр}} = 1400/6 = 233 \text{ вагона.}$$

В настоящее время вагоны, находящиеся в запасе, приносят железной дороге убытки за счет расходов на охрану, отчислений налога на имущество (2,2 % от остаточной стоимости). Кроме этого они занимают запасные пути (233 вагона занимают около 5 км путей). Средняя остаточная стоимость рефрижераторного вагона составляет около 75 000 рублей.

Отчисление налога на имущество за один год:

$$O = 75\,000 \cdot 0,022 = 1650 \text{ руб.}$$

$$\sum O = 233 \cdot 750 = 384\,450 \text{ руб.}$$

За десять лет службы вагонов:

$$\Sigma O' = 10 \cdot \Sigma O = 10 \cdot 384\,450 = 3\,844\,500 \text{ руб.}$$

Затраты на охрану в данном расчете не принимаются во внимание.

Величина прибыли, получаемой за счет внедрения АОИВ, будет зависеть от количества транспортируемых грузов и расстояния перевозки.

Учитывая, что железная дорога ограничивает срок доставки вышеназванной категории термочувствительных грузов при низких значениях температур наружного воздуха 3–5 сутками, то при повагонной отправке расстояние перевозки не будет превышать:

$$L = 4 \cdot 380 = 1520 \text{ км.}$$

Перевозки СПГ в зимний период времени могут конкурировать с автомобильными перевозками, начиная с расстояния транспортировки свыше 3000 км.

Для дальнейших ориентировочных расчетов примем среднюю дальность перевозки 4125 км (ст. Минеральные Воды Северо-Кавказской ж.д. – ст. Инская Западно-Сибирской ж. д.).

За перевозку грузов в автономном ОИВ может быть использована ставка рефрижераторного вагона, так как и в том и другом случае требуется поддержание температурного режима. За перевозку 45 тонн груза второй группы тариф (в ценах 2014 года) составит в АРВ – 134 521 руб., в ИВ-термосе – 98 904 руб.

$$T_{\text{ОИВ}} = (134\,521 - 98\,904) \cdot 1400 = 49\,863\,800 \text{ руб.}$$

Таким образом, дополнительная прибыль за счет перевозки термочувствительных грузов за один зимний период в ОИВ составит около 50 миллионов рублей.

За весь оставшийся срок службы переоборудованного вагона (10 лет) общая сумма тарифа составит:

$$\Sigma T = 10T_{\text{ОИВ}} = 10 \cdot 49\,863\,800 = 498,6 \text{ млн руб.}$$

С учетом понесенных затрат чистая прибыль за весь оставшийся срок службы вагонов:

$$\begin{aligned} \Pi_{\text{общ}} &= 498\,638\,000 - 233 \cdot 42\,400 \cdot 10 - 220\,000 \cdot 233 + 10 \cdot 384\,450 = \\ &= 387\,331\,000 \text{ руб.} \end{aligned}$$

На один вагон чистая прибыль составит:

$$\Pi_{\text{аоив}} = 1\,662\,365 \text{ руб.}$$

За один год эксплуатации АОИВ при плановой норме прибыли 10 % от тарифа сумма составит:

$$\Pi_1 = (134\,521 \cdot 6 + 98\,904 \cdot 9)0,1 = 169\,726,2 \text{ руб.}$$

Обозначим срок окупаемости как неизвестное x и решим уравнение:

$$169\,726,2 \cdot x = (220\,000 + 42\,400 \cdot x), x = 1,72 \text{ года.}$$

Таким образом, срок окупаемости составит 1,72 года.

П.3. Технико-экономическое обоснование технических решений тележки для инновационного изотермического вагона

П.3.1 Общие сведения

В настоящее время ОАО «РЖД» поставило задачу по организации скоростных грузовых перевозок с вагонами нового поколения с нагрузкой на ось 23,5 тс и 25 тс на скорость 120 км/ч, что требует создания тележек с пониженным динамическим воздействием на путь в вертикальном и поперечном направлениях и сниженной стоимостью жизненного цикла (LLC).

Потребительские свойства и технико-экономические параметры должны быть существенно улучшены по сравнению с базовой моделью – тележкой 18-100.

Разрабатываемая модернизированная конструкция тележки типа КВЗ-И2 позволит:

- существенно снизить динамическое воздействие на путь как в вертикальном, так и в поперечном направлениях;
- сократить эксплуатационные расходы на содержание вагона за счет увеличения межремонтных пробегов и уменьшения стоимости текущего отцепочного ремонта;
- снизить время оборота вагона за счет повышения скоростей движения в грузе и порожнем состояниях;

- уменьшить износы в системе «колесо – рельс»;
- обеспечить максимально целесообразную унификацию узлов и деталей новой тележки с узлами и деталями тележек, выпускаемых в настоящее время вагоностроительными компаниями.

Таким образом, применение тележек типа КВЗ-И2 улучшенной конструкции с усовершенствованными системами рессорного подвешивания, безремонтными конструкциями пар трения в течение пробега до капитального ремонта, значимым снижением динамических нагрузок в несущих узлах вагонов и в элементах верхнего строения пути позволит полностью пересмотреть регламентные работы по проведению технического обслуживания и плановых ремонтов.

Экономический эффект от использования изотермических вагонов на модернизированных сварных тележках типа КВЗ-И2 будет обеспечен за счет:

- снижения расходов на ремонт тележек вследствие увеличения межремонтных пробегов;
- снижения затрат на текущий отцепочный ремонт вагонов по неисправности тележек;
- снижения времени простоя в ремонте и, соответственно, увеличения времени его полезного использования;
- увеличения скоростей движения и ускорения доставки грузов;
- уменьшения воздействия на путь и снижения затрат на ремонт и текущее содержание пути для ОАО «РЖД», а для перевозчиков в собственных вагонах дополнительная экономия может быть получена за счет снижения инфраструктурной части тарифов.

Основными показателями экономической эффективности предлагаемых мероприятий согласно [136] являются:

- чистая текущая стоимость проекта (NPV);
- рентабельность капитальных вложений (PI);
- срок окупаемости (T).

Чистая стоимость проекта определяется по формуле

$$NPV = \sum_1^n \frac{P_t}{(1-d)^t} - k,$$

где P_t – объем генерируемого проектом сокращение затрат и увеличение прибыли в периоде t , тыс. руб.;

d – норма дисконта, $d = 0,1$;

n – продолжительность периода действия проекта, $n = 10$ лет;

$1/(1+d)^t$ – коэффициент дисконтирования для каждого года;

– первоначальные инвестиционные затраты в оборудование, тыс. руб.

Рентабельность проекта определяется по формуле:

$$PI = \sum_1^n \frac{P_t}{(1+d)^t} / K.$$

Срок окупаемости проекта определяется по формуле

$$T_{ок} = N_{го} + \frac{C_n}{ДДП_{го}} \cdot 12,$$

где $N_{го}$ – число лет, предшествующих году окупаемости;

C_n – невозмещенная стоимость на начало года окупаемости;

$ДДП_{го}$ – дисконтированный денежный поток в год окупаемости.

Исходные данные для расчета показателей экономической эффективности от использования изотермических вагонов на модернизированных сварных тележках типа КВЗ-И2 представлены в таблице П.1.

Таблица П.1 – Исходные данные

Показатели	Ед. изм.	КВЗ-И2 модернизированная
1	2	3
Конструкционная скорость	км/ч	140
Статическая нагрузка на ось	т.с.	23,5
Масса тележки	кг	7600
Неподрессоренная масса	т/ось	1,5
Срок службы тележки	лет	32
Срок службы оси КП	лет	8,5
Долговечность подшипников	тыс. км	Не менее 800

Продолжение таблицы П.1

1	2	3
Срок службы подшипников	лет	Не менее 8
Гарантийный срок по прочности прессового соединения колес с осью	лет	15
Срок службы износостойких элементов	тыс. км	800–1000
Срок службы опор кузова	лет	16
Пробег вагона до ДР	лет	4
Пробег вагона до КР	лет	16
Частота поступления вагонов в отцепочный ремонт	раз/год	0,5

П.3.2 Определение величины единовременных капитальных вложений

Единовременные капитальные вложения (на приобретение, транспортировку, монтаж) определяются по формуле

$$K = K_0,$$

где K_0 – стоимость оборудования, тыс. руб.

Расчет затрат на оборудование приведен в таблице П.2.

Таблица П.2 – Расчет затрат на оборудование

Наименование	Количество κ_0 , ед.	Цена единицы Π_{06} , тыс. руб.	Всего, тыс. руб.
Тележка КВЗ-И2	1	1500	1500
Итого, K_0			1500

Графа «Всего» таблицы П.2 определяется по формуле

$$K_0 = \kappa_0 \cdot \Pi_{06},$$

где Π_{06} – стоимость единицы оборудования, тыс. руб.;

κ_0 – необходимое количество оборудования, шт.

Величина капитальных вложений составит

$$K = 1500 \text{ тыс. руб.}$$

П.3.3 Определение величины экономии годовых эксплуатационных расходов

Экономия годовых эксплуатационных расходов от применения на изотермическом вагоне новых сварных тележек типа КВЗ-И2 будет обеспечена за счет:

- снижения расходов на деповский и капитальный ремонты;
- снижения расходов на текущий ремонт из-за сокращения количества отцепок вагонов по неисправности узлов тележек.

Дополнительная прибыль будет обеспечиваться за счет:

- увеличения скоростей движения;
- сокращения времени оборота вагона.

П.3.3.1 Снижение расходов на деповский ремонт

По действующим нормам (приказ МПС России № 7 ЦЗ от 25.05.99 г.) ИВ поступает в плановый деповский ремонт один раз в год на 3-й год после выпуска и через год после КР, т. е. 26 раз за срок службы (32 года). При этом средняя стоимость деповского ремонта 42 142 руб. Тогда суммарные расходы на ДР за весь срок службы (LLC) составят

$$\sum \text{ДР} = \text{Ц}_{\text{др}} \cdot 26/32,$$

где $\text{Ц}_{\text{др}}$ – цена деповского ремонта тележки, тыс. руб.

$$\sum \text{ДР} = 45,0 \cdot 26/32 = 36,56 \text{ тыс. руб.}$$

По данным экспертной оценки, за счет применения на изотермическом вагоне тележки типа КВЗ-И2, затраты на деповский ремонт вагона сократятся на 22 %. Тогда сокращение расходов на деповский ремонт составит

$$\Delta \text{И}_{\text{др}} = \sum \text{ДР} \cdot 0,22,$$

$$\Delta \text{И}_{\text{др}} = 36,56 \cdot 0,22 = 8,04 \text{ тыс. руб.}$$

П.3.3.2 Снижение расходов на капитальный ремонт

По действующим нормам (приказ МПС России № 7 ЦЗ от 25.05.99 г.) ИВ на тележках модели 18-100 поступает в плановый капитальный через 13 лет после

выпуска и через 11 лет после предыдущего КР, т. е. два раза за срок службы (32 года). При этом средняя стоимость капитального ремонта 125 тыс. руб.

Таким образом, затраты на капитальный ремонт тележки модели 18-100 за жизненный цикл составят:

$$\sum KP = 125,0 \cdot 2/32 = 7,81 \text{ тыс. руб.}$$

Сокращение расходов на капитальный ремонт тележки типа КВЗ-И2 составит

$$\Delta I_{кр} = 7,82 \cdot 0,22 = 1,71 \text{ тыс. руб.}$$

П.3.3.3 Расчет экономии от снижения объема текущего отцепочного ремонта

Согласно данным департамента вагонного хозяйства, в 2017 г. количество отцепок вагонов от состава составило в среднем 2,21 раза в год. Из них 41 % отцепок – из-за неисправностей тележек. Средняя стоимость одного ремонта в объеме ТР-2 составляет 8 тыс. руб. Применение новой конструкции тележек типа КВЗ-И2 позволит снизить количество отцепочных ремонтов по неисправности тележек как минимум на 80 %. Исходя из этого экономия расходов от снижения текущего отцепочного ремонта составит:

$$\Delta I_{тр-2} = 8 \cdot 2,21 \cdot 0,41 \cdot 0,8 = 5,79 \text{ тыс. руб.}$$

Определение увеличения прибыли за счет уменьшения времени простоя в ремонте

По сводным данным ОАО «РЖД», прибыль от перевозки 1 тонны продуктов питания составляет

$$П = 1,5 \text{ тыс. руб.}$$

Увеличение прибыли за счет уменьшения времени простоя на ДР.

За срок службы вагон с тележкой 18-100 проходит ДР 26 раз за жизненный цикл, а вагон с тележкой типа КВЗ-И2 в соответствии с техническими требованиями к вагонам нового поколения – 6 раз. Время простоя на ДР (по

данным «Отчета о работе вагонного хозяйства за 16.01.2015» департамента ЦВ) – 103,2 часа. Высвобождаемое время за жизненный цикл составит

$$\Delta t_{LLC} = (26 - 6) \cdot 103,2 = 2064 \text{ ч.}$$

Высвобождаемое время в год в простое на ДР составит

$$\Delta t = \Delta t_{LLC} / 32,$$

$$\Delta t = 2064 / 32 = 64,5 \text{ ч.}$$

Время оборота вагона ($T_{об}$) составляет 8,35 суток, или 200,5 часов.

За год вагон совершает $365 / 8,35 = 44$ оборота. За счет сокращения простоя на ДР вагон совершит дополнительно 0,32 оборота.

Грузооборот вагона на старых тележках составит:

$$\sum PL_{18-100} = (365 / 8,35) \cdot 69,3 \cdot 0,7 = 2120 \text{ т.}$$

где 0,7 – процент груженого пробега;

69,3 – грузоподъемность вагона;

Грузооборот на тележках КВЗ-И2:

$$\sum PL_{КВЗ-И2} = (365 / 8,35 + 0,32) \cdot 69,3 \cdot 0,7 = 2136 \text{ т.}$$

Экономия эксплуатационных расходов от уменьшения времени простоя на ДР в расчете на один вагон в год составит:

$$\Delta I_{\text{прост, ДР}} = (\sum PL_{КВЗ-И2} - \sum PL_{18-100}) \cdot П,$$

$$\Delta I_{\text{прост, ДР}} = (2136 - 2120) \cdot 1,5 = 24 \text{ тыс. руб.}$$

Увеличение прибыли за счет уменьшения времени простоя на КР. За срок службы вагон с тележкой 18-100 проходит КР 2 раза за жизненный цикл, а вагон с тележкой типа КВЗ-И2 – 1 раз. Среднее время простоя на КР – 5,4 суток, или 129,6 часов. Высвобождаемое время за жизненный цикл составит

$$\Delta t_{LLC} = (2 - 1) \cdot 129,6 = 129,6 \text{ ч.}$$

Высвобождаемое время в год в простое на КР составит

$$\Delta t = \Delta t_{LLC} / 32,$$

$$\Delta t = 129,6 / 32 = 4,05 \text{ ч.}$$

За счет сокращения простоя на КР вагон совершит дополнительно 0,02 оборота. Тогда грузооборот на тележках КВЗ-И2 составит:

$$\sum PL_{КВЗ-И2} = (365 / 8,35 + 0,02) \cdot 69,3 \cdot 0,7 = 2121,5 \text{ т.}$$

Экономия эксплуатационных расходов от уменьшения времени простоя на КР в расчете на один вагон в год составит:

$$\Delta I_{\text{простКР}} = (2121,5 - 2120) \cdot 1,5 = 2,25 \text{ тыс. руб.}$$

Экономия эксплуатационных расходов от уменьшения времени простоя на текущем отцепочном ремонте

В 2017 г. на сети железных дорог РФ произведено примерно 12 млн отцепочных текущих ремонтов вагонов в пути следования.

Количество эксплуатируемых вагонов на сети – 1,5 млн шт., т. е. каждый вагон проходит текущий отцепочный ремонт 1 раз в год.

Среднее время простоя на текущем отцепочном ремонте (по данным «Отчета о работе вагонного хозяйства за 16.01.2015» департамента ЦВ) – 51,5 ч.

Простой вагона на текущем ремонте в год – 128,75 часа.

Высвобождаемое время – 41 % – 52,8 часа в год, т. е. 0,26 оборота.

Грузооборот на тележках КВЗ-И2 составит:

$$\sum PL_{\text{КВЗ-И2}} = (365/8,35 + 0,26) \cdot 69,3 \cdot 0,7 = 2133 \text{ т.}$$

Экономия эксплуатационных расходов от уменьшения времени простоя на текущем отцепочном ремонте в расчете на один вагон в год составит:

$$\Delta I_{\text{тр-2}} = (2133 - 2120) \cdot 1,5 = 19,5 \text{ тыс. руб.}$$

П.3.3.4 Определение величины увеличения прибыли за счет увеличения скорости движения

В настоящий момент максимально допустимая скорость движения грузовых поездов – 90 км/ч. На тележках типа КВЗ-И2 предполагаемая скорость движения увеличится до 100 км/ч, а в перспективе и до 120 км/ч.

При увеличении скорости движения до 100 км/ч. При максимально допустимой скорости движения 90 км/ч (даже если средняя скорость движения значительно меньше) вагон делает $365/8,35 = 43,7$ рейсов в год. Вагон, оборудованный новыми тележками КВЗ-И2, может двигаться с допустимой

скоростью 100 км/ч. За год он делает на 11 % больше оборотов, то есть 48,5. Таким образом, грузооборот на тележках КВЗ-И2 составит:

$$\sum PL_{\text{КВЗ-И2}} = 48,5 \cdot 69,3 \cdot 0,7 = 2353,7 \text{ т.}$$

Выручка от перевозки 1 т продуктов питания на экспорт, по сводным данным ОАО «РЖД», составит 1,5 тыс. руб. Прибыль от увеличения скоростей движения (до 100 км/ч) на один вагон в год составит:

$$\sum \Pi = (2352,7 - 2120) \cdot 1,5 = 349,05 \text{ тыс. руб.}$$

Определение величины суммарной экономии годовых эксплуатационных расходов и дополнительной прибыли

Суммарная экономия годовых эксплуатационных расходов и дополнительная прибыль составит:

$$P = \Delta I_{\text{ДР}} + \Delta I_{\text{КР}} + \Delta I_{\text{тр-2}} + \Delta I_{\text{простДР}} + \Delta I_{\text{простКР}} + \Delta I_{\text{тр-2}} + \sum \Pi,$$

$$P = 8,04 + 1,71 + 5,70 + 24 + 2,25 + 19,5 + 349,05 = 410,25 \text{ тыс. руб.}$$

П.3.4 Определение показателей экономической эффективности

Расчет показателей экономической эффективности применения тележки для инновационного ИВ для удобства представим в таблице П.3.

Таблица П.3 – Определение величины чистой стоимости проекта за 10 лет эксплуатации тележки КВЗ-И2

Наименование	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Капитальные вложения, тыс. руб.	1500										
Коэффициент дисконтирования, $1/(1 + E)$	1	0,925925926	0,85733882	0,793832241	0,735029853	0,680583197	0,630169627	0,583490395	0,540268885	0,500248967	0,463193488
Суммарная экономия P , тыс. руб.	0	410,25	410,25	410,25	410,25	410,25	410,25	410,25	410,25	410,25	410,25

Продолжение таблицы П.3

Наименование	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Суммарная экономия с учетом коэффициента дисконтирования, тыс. руб.	0	379,81	351,72	325,66	301,54	279,20	258,52	239,37	221,64	205,22	190,02
Чистый поток денежных средств, <i>NPV</i> , тыс. руб.	-1500	-1120,18	-768,41	-442,74	-141,19	138,0	396,53	635,91	857,55	1062,78	1252,81

Таким образом, чистая стоимость проекта за 10 лет эксплуатации тележки составит

$$NPV = 1252,81 \text{ тыс. руб.}$$

Срок окупаемости проекта определяется с помощью таблицы П.4.

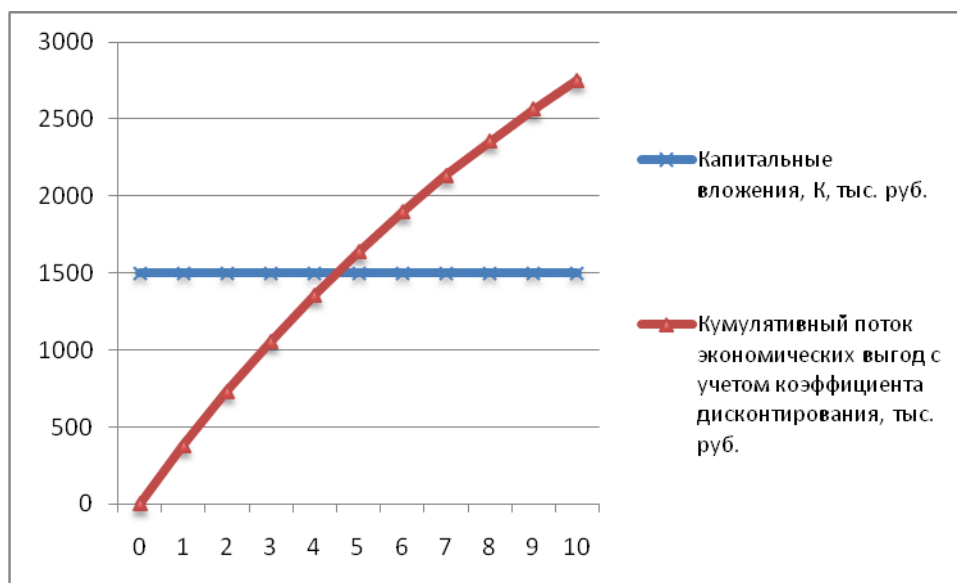
Таблица П.4 – Определение кумулятивной величины чистой экономии и прибыли

Год	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Кумулятивная величина экономии и чистой прибыли с учетом коэффициента дисконтирования, тыс. руб.	0	379,86	731,58	1057,25	1358,80	1638,0	1896,53	2135,91	2357,55	2562,78	2752,81
Капитальные вложения, тыс. руб.	15 000										

По данным таблицы П.4 строится график для определения срока окупаемости капитальных вложений (см. рисунок).

Срок окупаемости капитальных вложений для проекта тележки для инновационного ИВ составит

$$T_{\text{ок}} = 4 + \frac{1500 - 1358,8}{1638,01 - 1358,8} \cdot 12 = 4 \text{ года } 1 \text{ месяц.}$$



Кривые одновременных капитальных вложений и кумулятивной величины экономии и чистой прибыли проекта тележки для инновационного ИВ

На основании полученных показателей экономической эффективности проект тележки для инновационного ИВ экономически целесообразен.

Основными показателями экономической эффективности предлагаемых мероприятий являются:

- чистая текущая стоимость проекта (NPV) составила 1252,81 тыс. руб.;
- рентабельность капитальных вложений (PI) 410,25 тыс. руб.;
- срок окупаемости составил 4,1 года.



**ФИЛИАЛ ОАО «РЖД»
ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСКОЕ
БЮРО ВАГОННОГО ХОЗЯЙСТВА**

Волгоградский пр-т, 23,
г. Москва, 109316,
Тел.: (499) 262-39-36, факс: (499) 676-27-71
E-mail: zag@pkbcv.ru
Сайт: www.pkbcv.ru

« 08 » 11 2021 г. № 1553/215 ВВ

На № _____ от _____

АКТ

об использовании результатов диссертационной работы Ворона О.А.
на тему « Методология развития инновационного изотермического
подвижного состава в транспортной системе страны»

Результаты опытно-конструкторских работ диссертационной работы на соискание ученой степени доктора технических наук, заведующего кафедрой «Вагоны и вагонное хозяйство» ФГБОУ ВО РГУПС Ворона Олега Андреевича были использованы при разработке ПКБ ЦВ проекта генераторно приводной установки для изотермических вагонов.

Теоретическое моделирование и экспериментальные исследования, а также предложенные в работе технические решения для вентильно-индукторного подвагонного генератора мощностью 20 кВт с системой управления, были использованы при реализации проекта ПКБ ЦВ М1825.000 «Установка подвагонного генератора на тележке КВЗ-И2 с приводом от оси колесной пары ».

Заместитель директора

А.Ю. Сычев



АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО
«РЕФСЕРВИС»
(АО «Рефсервис»)

Акт об использовании

21 апреля 2021 г.

Москва

№ РСВ 1/6

Рассмотрев материалы диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук на тему **«Методология развития инновационного изотермического подвижного состава в транспортной системе страны»** представленные заведующим кафедрой «Вагоны и вагонное хозяйство» ФГБОУ ВО РГУПС Вороном Олегом Андреевичем подтверждаю, что результаты научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ, выполненных и представленных в диссертации актуальны для отрасли и имеют практическую ценность при модернизации имеющегося и разработке инновационного изотермического подвижного состава. Практическая ценность состоит в том, что результаты диссертации О.А. Ворона дают возможность:

- сформулировать технические требования к перспективному типу ИПС и его основным функциональным подсистемам с учетом передовых достижений в вагоностроении, электро- и холодильном машиностроении, а также информационных технологий;
- уточнить технико-экономические характеристики инновационного изотермического подвижного состава и сократить затраты времени на разработку исходных технических требований;
- обосновать использование генераторно-приводной установки с вентиляльно-индукторным подвагонным генератором для фитинговых платформ при транспортировке крупнотоннажных рефрижераторных контейнеров.

Заместитель генерального директора, к.э.н.



О.А. Богомолов



АРМАЗИРСКИЙ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫЙ ЗАВОД
 ФИЛИАЛ ОАО «НМЗ» в г. АРМАВИР
 352913, РФ, Краснодарский край, г. Армавир,
 Территория Северная Промзона, участок 121
 Тел./факс: +7 (861)372-51-40
 E mail: info@armvagon.ru

АКТ

**об использовании результатов диссертационной работы Ворона О.А.
 на тему «Методология развития
 инновационного изотермического подвижного состава
 в транспортной системе страны»**

Результаты диссертационной работы заведующего кафедрой «Вагоны и вагонное хозяйство» ФГБОУ ВО РГУПС Ворона Олега Андреевича были рассмотрены на «Армавирском машиностроительном заводе» филиале Открытого акционерного общества «Новозыбковский машиностроительный завод в г. Армавир при разработке следующих проектов изотермических вагонов.

1. Вагон-термос изотермический модель 16-6962:

Является опытным сертифицированным изделием, защищенным патентами по основным конструктивным техническим параметрам и характеристикам.

В диссертационной работе соискатель (автор) предоставил инновационные технические решения для ограждающих конструкций пола и для дренажных отверстий грузового помещения, которые были рассмотрены разработчиком и учитываются с целью улучшения герметичности напольного покрытия и предотвращения попадания промывочных вод с моющими растворами в подпольное пространство.

Также, при проектировании рассмотрены предложения по совершенствованию конструкции внутренней обшивки грузового помещения. В частности, толщину (0,75 мм) обшивки боковой стены грузового помещения можно использовать на высоте более 1м, т.к. в зоне работы погрузчика в междверном пространстве возможно ее повреждение вилами погрузчика. Рекомендовано ее увеличение до 1,5 мм.

Кроме этого, предложен вариант исполнения узла герметизации дверного проема грузового помещения с учетом оснащения вагона устройством для захлаживания замороженных грузов внутри грузового помещения. При этом даны рекомендации по допустимым часовым расходам жидкого азота, с моделированием напряженно-деформируемого состояния металлоконструкции кузова от воздействия избыточного давления азотно-воздушной газовой смеси при впрыске жидкого азота в грузовое помещение вагона.

2. Вагон изотермический автономный модель 16-6973:

Данное изделие находится в разработке.

Отрабатываются технологические приемы в отдельных опытных узлах в производстве. При сравнении технических характеристик изделия с материалами диссертационной работы, выявлены направления, определенные стратегией развития железнодорожного транспорта Российской Федерации до 2030 года:

- создание подвижного состава нового поколения;

- увеличение нагрузки на ось;
- снижение веса тары грузового вагона.

Решение вышеуказанных задач невозможно без применения в конструкциях железнодорожного транспорта композиционных материалов, вытесняющих или заменяющих традиционных материалов: металлов, древесины. Это полимерные композиционные материалы угле, стекло и органические пластики, имеющие высокую прочность и эластичность, способные выдерживать большие напряжения не разрушаясь.

Основными достоинствами композиционных материалов в изотермических вагонах являются:

- стойкость против гниения, нагрева и коррозии;
- высокая удельная прочность и жесткость;
- ремонтпригодность;
- значительное снижение металлоемкости.

Заслуживает внимания предложение по развитию серийного отечественного производства автономных холодильно-обогревающих установок с использованием сжиженного природного газа в качестве моторного топлива и с подвагонным генератором.

Комплекс предложенных технических решений позволяет на базе унифицированной силовой конструкции кузова создавать различные типы изотермического подвижного состава и реализовывать различные компоновочные решения энергохолодильного оборудования, в полной мере отвечающие потребностям заказчика. Такая унификация сокращает перечень технологической оснастки, необходимой при производстве различных типов изотермических вагонов.

Главный инженер



А.П. Пилипенко