

На правах
рукописи



Асманкин Евгений Геннадьевич

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ ПОВЫШЕНИЯ
УСТОЙЧИВОСТИ ТОНКОСТЕННЫХ ОБОЛОЧЕК
ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ ЦИСТЕРН
ПРИ ВОЗНИКНОВЕНИИ В НИХ ВАКУУМА**

2.9.3. Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Москва – 2025

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Российский университет транспорта» РУТ (МИИТ)

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Попов Владимир Георгиевич

Официальные оппоненты: **Моисеев Владимир Иванович**
доктор технических наук, профессор,
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Петербургский государственный университет путей
сообщения Императора Александра I», кафедра «Высшая
математика», профессор;

Антипин Дмитрий Яковлевич
кандидат технических наук, доцент,
федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования «Брянский
государственный технический университет»,
Учебно-научный институт транспорта, директор.

Ведущая организация: Акционерное общество Научная организация
«Тверской институт вагоностроения», г. Тверь

Защита состоится 19 февраля 2026 г. в 13:00 на заседании диссертационного совета 40.2.002.07 на базе федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Российский университет транспорта» по адресу: 127994, г. Москва, ул. Образцова, д. 9, стр. 9, ауд. 2505.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте РУТ (МИИТ), www.rut-miit.ru.

Автореферат разослан «____» ноября 2025 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Воронин Николай Николаевич

Актуальность темы исследования. В настоящее время на железных дорогах Российской Федерации наблюдается рост грузопотоков. Большую долю опасных грузов, перевозимых железнодорожным транспортом, составляют нефть и нефтепродукты (нефть, бензин, керосин, мазут). В данный момент доля нефти и нефтепродуктов из общего объема грузов, которые перевозятся по железной дороге, составляет приблизительно 30%. По сведениям Межведомственной комиссии по экологической безопасности РФ, примерно 40% аварий на железнодорожном транспорте связано с разливами нефти и нефтепродуктов. В 2022 году, по сведениям ОАО «РЖД», в целом по железным дорогам было транспортировано около 216 млн. тонн нефтяных грузов внутри страны и на экспорт. По сведениям Федеральной службы по надзору в сфере транспорта за 12 месяцев 2022 года количество транспортных происшествий составило 17 случаев, из них 11 - это крушения, 6 случаев - это аварии на путях общего и необщего пользования.

Транспортировка нефтеналивных грузов железнодорожным транспортом считается экологически опасной и сопряжена с риском возникновения аварий. Последствиями аварийных происшествий при перевозке нефтепродуктов железнодорожным транспортом могут являться проливы разного масштаба, а при неблагоприятном развитии событий — взрывы и пожары, которые приводят к большому материальному ущербу, загрязнению территории и поражению токсичными веществами большого количества людей. Согласно Федеральному закону № 184-ФЗ «О техническом регулировании» количественная мера безопасности в чрезвычайных ситуациях – аварийный риск. Поэтому уменьшение чрезвычайных ситуаций при движении подвижного состава с нефтью и нефтепродуктами достигается разработкой различных организационно-технических мероприятий по предупреждению и уменьшению последствий чрезвычайных ситуаций при транспортировке нефтепродуктов железнодорожным транспортом, а также с помощью изменения конструктивных особенностей подвижного состава.

При транспортировке в зимнее время светлых нефтепродуктов (бензин, керосин, дизельные топлива летних марок, разновидности светлых масел и др.) происходит их охлаждение, сопровождающееся уменьшением давления внутри цистерны. Рост вязкости, температуры, уменьшение давления внутри вагона-цистерны затрудняет и даже делает невозможным безопасную транспортировку.

Охлаждение некоторых светлых нефтепродуктов, таких как дизельные топлива летних марок, сопровождается изменением их эксплуатационных характеристик, вплоть до потери кондиции.

Актуальность вопроса снижения чрезвычайных ситуаций на железнодорожном транспорте при перевозке нефтепродуктов, относящимся к легковоспламеняющимся жидкостям (ЛВЖ) тонкостенными вагонами-цистернами при низких температурах воздуха обоснована тем, что большинство предприятий РФ, обеспечивающих добычу и переработку нефти, находятся на Севере (Северо-Востоке) страны. Для этих регионов характерны низкие среднегодовые температуры воздуха и большие расстояния до потенциальных потребителей продукции, что обуславливает длительность перевозок в 1-2 недельный срок.

Степень разработанности темы исследования. Проблемами транспортировки нефтепродуктов железнодорожным транспортом, потерями устойчивости тонкостенных котлов цистерн, практическими вопросами конструирования и влияния конструктивных особенностей предохранительных клапанов (ПК) на пожаровзрывоопасность железнодорожных цистерн занимались многие учёные. Свой значительный вклад внесли:

А.Н. Балалаев, С.В. Беспалько, Ю.П. Бороненко, Д.В. Ботвенко, А.В. Жебанов, Б.Л. Недорчук, В.М. Бубнов, И.Г. Ищук, В.С. Коссов, В.Н. Котуранов, М.Ю. Куликов, В.И. Моисеев, В.Ю. Навценя Г.И. Петров, И.В. Плотников, Г.А. Позднякова, В.Г. Попов, С.Л. Самошкин, В.Н. Филиппов, Ю.Н. Шебеко.

Цель и задачи исследования.

Целью работы является повышение устойчивости тонкостенных оболочек железнодорожных цистерн при возникновении в них вакуума.

Задачи исследования, поставленные и решённые в работе для достижения указанной цели:

1 провести экспериментальные исследования физической модели с целью определения влияния теплового режима остывания модельной жидкости на давление внутри котла цистерны в зависимости от внутренних и внешних характеристик;

2 разработать тепловую (математическую) модель параметров котла вагона-цистерны для перевозки нефтепродуктов в зависимости от характеристик окружающей среды;

3 разработать программу компьютерного моделирования процесса изменения давления, температуры и других параметров в вагоне-цистерне, позволяющую проводить исследование происходящих внутри процессов на основе созданной математической модели;

4 используя созданную программу и результаты эксперимента провести серию опытов компьютерного моделирования с параметрами изменения давления внутри котла вагона-цистерны с целью предотвращения появления избыточного или отрицательного (вакуума) давления в котле вагона-цистерны;

5 сформировать перечень практических рекомендаций по повышению устойчивости тонкостенных оболочек железнодорожных цистерн при возникновении разряжения.

Объектом исследования является процесс изменения давления внутри цистерны при транспортировке светлых нефтепродуктов.

Предметом исследования является тепловая модель вагона-цистерны для перевозки нефтепродуктов.

Научная новизна. На основе серии вычислительных экспериментов сформулированы предложения по совершенствованию конструкций

предохранительного выпускного-впускного клапана с целью повышения устойчивости тонкостенных оболочек железнодорожных цистерн при возникновении в них вакуума.

Теоретическая и практическая значимость работы:

1 Разработана программа, использование которой позволяет осуществлять имитационное моделирование изменения давления внутри котла вагона-цистерны при открытии и закрытии предохранительного клапана с учётом истечения жидкого груза из предохранительного клапана.

2 Внедрение коррозионностойкого впускного предохранительного клапана большего диаметра позволит заменить морально устаревшие предохранительно-впускные клапаны, повысив безопасность эксплуатации вагонов-цистерн.

3 Для этой же цели рассматривается вариант использования двух предохранительных клапанов, работающих в разных режимах.

Методология и методы исследования. Достижение цели исследования и решение задач осуществлялось с использованием следующих методов:

- анализа литературных источников – при уточнении и конкретизации проблемы при работе предохранительных клапанов цистерны (раздел 1);
- физического эксперимента – при проведении испытаний с модельной емкостью (раздел 2);
- математического моделирования – при составлении математической (тепловой) модели и разработки расчётной компьютерной программы (разделы 3 и 4);
- вычислительного эксперимента – при проведении компьютерного моделирования (раздел 5);
- анализа и синтеза – при обработке результатов вычислительного эксперимента и формировании перечня практических рекомендаций (раздел 5).

Положения, выносимые на защиту:

- математическая модель вагона-цистерны для перевозки нефтепродуктов, описывающая изменения параметров внутри котла вагона-цистерны;
- результаты физического эксперимента по определению влияния параметров груза на изменение давления внутри запасного резервуара;
- результаты компьютерного моделирования давления внутри цистерны различной конфигурации при различных внутренних и внешних условиях;
- перечень практических рекомендаций по улучшению безопасности движения грузовых нефтеналивных поездов.

Степень достоверности работы основана на полученных методом компьютерного моделирования результатов, подтвержденных данными физического эксперимента. В работе рассмотрен процесс охлаждения светлых нефтепродуктов при транспортировке в вагоне-цистерне в условиях, в том числе и отрицательных температур воздуха. Математическая модель охлаждения жидкого нефтепродукта в котле вагона-цистерны основана на использовании полуэмпирического уравнения для изменяющегося со временем коэффициента теплоотдачи. Достоверность результатов физического эксперимента подтверждается применением апробированных методов эмпирических исследований и методами обработки экспериментальных данных.

Апробация результатов. Основные результаты работы докладывались на Международной конференции (Том 247) «XIV INTERNATIONAL SCIENTIFIC CONFERENCE “INTERAGROMASH 2021”» в 2021 году.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В **введении** отражены актуальность и степень разработанности темы, поставлены цели и задачи, отмечены методы проведения исследований, изложены научная новизна, основные положения и практическая ценность работы, показаны достоверность результатов и степень апробации.

В **первом разделе** работы проведен анализ обзор литературы показал, что с момента появления первых вагонов-цистерн встает вопрос о повышении

устойчивости тонкостенных оболочек железнодорожных вагонов-цистерн. При этом процесс конструкционного развития железнодорожных вагонов был непрерывно связан как с экспериментальными, так и с теоретическими исследованиями. Современное решение задач устойчивости оболочки котлов вагонов-цистерн осуществляется преимущественно путём компьютерного моделирования. Поэтому в качестве методики выбрано математическое и компьютерное моделирование для решения поставленных задач.

Выбор компьютерного моделирования в качестве основной методики потребовал проведения обзора программных комплексов. В связи с этим в данном разделе был также осуществлён обзор развития программных комплексов для исследования устойчивости тонкостенных оболочек. Были рассмотрены такие программные продукты как программный комплекс FEMAP Siemens Product Lifecycle Management Software Inc. для операционной системы Windows. Программа «FOBOT 1.0» на языке Delphi 5 была модернизирована в версию «FOBOT 2.0» в Visual Studio C++ на языке C++.

Были сформулированы основная цель и задачи исследования, к которым относится проведение физического эксперимента, составление математической и компьютерной модели изменения давления внутри котла вагона-цистерны и проведение экспериментов по моделированию различных ситуаций внутри котла вагона-цистерны при возникновении разряжения.

Во **втором разделе** приведены результаты экспериментальных исследований с использованием лабораторного стенда.

Описаны основные причины возникновения вакуума в котле вагона-цистерны, а также причины отказа предохранительной аппаратуры при эксплуатации или нарушение техники безопасности при промывочно-пропарочных работах.

Согласно руководству по эксплуатации вагонов-цистерн для перевозки светлых нефтепродуктов регулировка клапанов производится на избыточное давление 0,15 МПа (1,5 кгс/см²) и на разряжение 0,01 - 0,02 МПа (0,1 - 0,2 кгс/см²). Для предотвращения нарушения регулировки на предохранительно-впускной клапан устанавливаются две пломбы.

Таким образом, имеющаяся установка позволяет проводить эксперимент по имитации вакуума с учётом заполненности резервуара. Изменяя заполненность резервуара был выполнен ряд экспериментов по моделированию разряжения в резервуаре.

На рисунке 1 представлена зависимость изменения давления от температуры в резервуаре с течением времени, полученная в результате физического эксперимента.

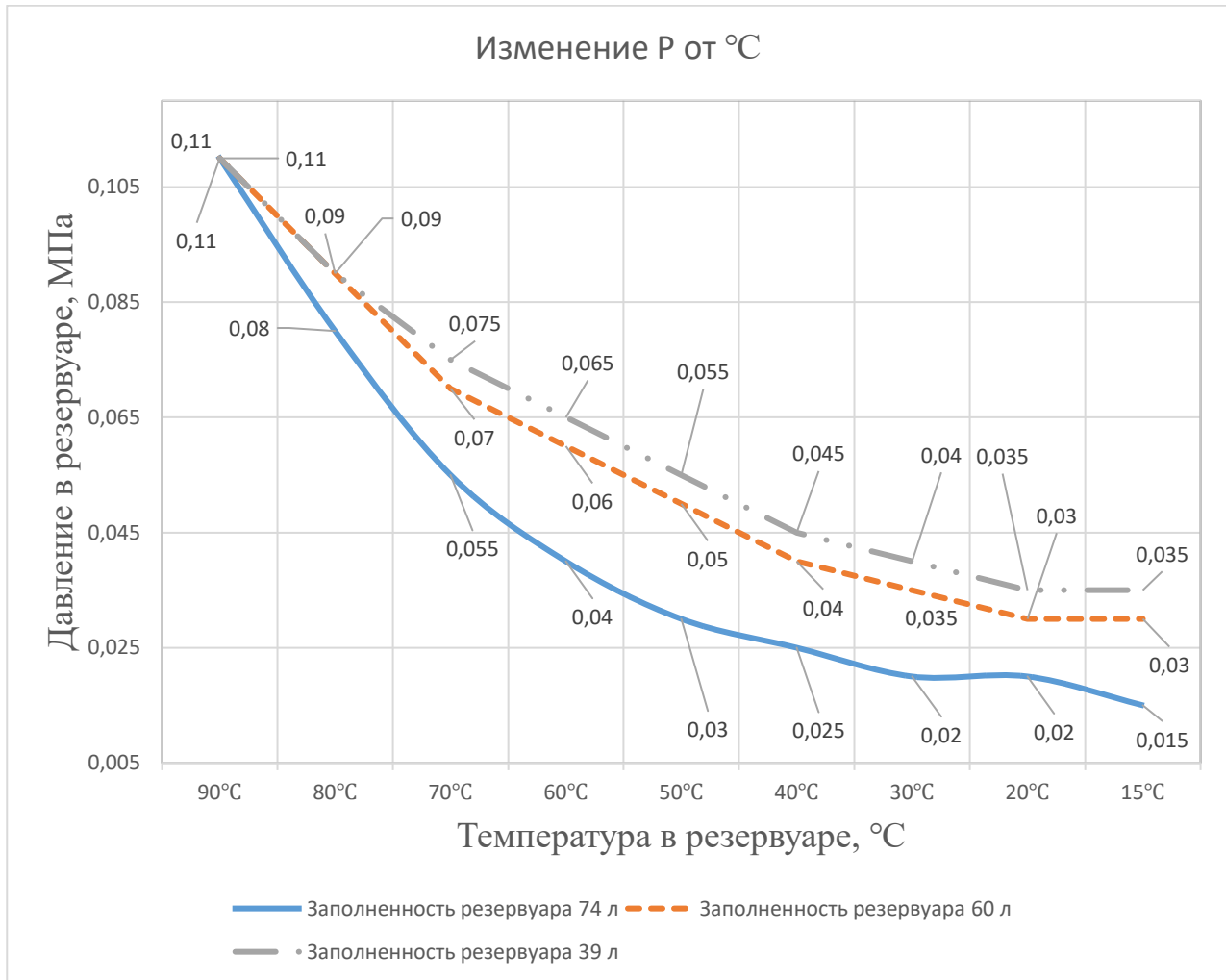


Рисунок 1 – Зависимость изменения давления от температуры в резервуаре с течением времени

Во **третьем разделе** выполнено формирование математической модели изменения теплофизических процессов внутри котла вагона-цистерны. Составлена система дифференциальных уравнений, описывающая исследуемый процесс, конкретизированы функции внутренних и внешних воздействий на систему. Задачи решались в компьютерных средствах моделирования FEMAP с построением конечно-элементных расчетных схем и программой «FOBOT 2.0» с построением графика изменения температуры внутри котла вагона-цистерны.

Для достижения поставленной цели принято решение об использовании метода конечных элементов, реализованного в программных комплексах FEMAP.

Расчет устойчивости цилиндрической оболочки котла от действия внешнего давления /разряжения производится на основании программного комплекса в среде FEMAP. Устойчивость выполняется при выполнении условия для расчетного коэффициента запаса устойчивости:

$$n_y = \frac{P_{кр}}{P_p} \geq [n_y], \quad (1)$$

n_y - допускаемый коэффициент запаса устойчивости,

$$[n_y] = 1,1, \quad (2)$$

Расчетная величина внешнего давления P_p и расчетный коэффициент запаса устойчивости, вводятся согласно п.2.5.2. «Норм для расчета и проектирования вагонов железных дорог МПС колеи 1520 мм (несамоходных).»

$P_p = 0,14$ МПа;

$P_{кр}$ - критическое внешнее давление по устойчивости оболочки, МПа;

$$P_{кр} = 0,6 \cdot k \cdot E \cdot \frac{R}{L} \left(\frac{\delta}{R} \right)^{\frac{5}{2}}, \quad (3)$$

где E - модуль упругости материала обечайки котла, МПа;

δ - наименьшая (расчетная) толщина оболочки котла, с учетом 50% минусового допуска на толщину листа и 50% расчетного коррозионного износа ее за срок службы котла;

R - внутренний радиус цилиндрической оболочки, м;

L - длина цилиндрической оболочки, м;

k - коэффициент, определяемый по формуле:

$$k = \frac{(1-\alpha+\alpha \cdot t^2)^{1/4}}{1-\alpha+\alpha \cdot t^3}, \quad (4)$$

где α - отношение ширины нижнего листа к длине внутренней окружности поперечного сечения оболочки;

t - отношение наименьшей толщины цилиндрической оболочки котла к толщине нижнего листа.

Результаты расчета коэффициента запаса устойчивости котла цистерны с грузом при диаметре котла $D = 3200$ мм, показаны в табл.1 и табл.2. Выделены значения , при которых цистерна теряет устойчивость.

Таблица 1 – расчета коэффициента запаса устойчивости котла цистерны

Разряжение (давление в котле), атм	Кус, $V_{yz}=1.25 \text{ м}^3/\text{т}$ Керосин		
	9/11 мм	8/10 мм	7,5/9 мм
0.3 (0.7)	3,35718	2,489941	2,111371
0.4 (0.6)	2,470655	1,83171	1,552798
0.5 (0.5)	1,951302	1,446279	1,225815
0.6 (0.4)	1,611145	1,193918	<u>1,011771</u>
0.7 (0.3)	1,371437	<u>1,016126</u>	<u>0,861003</u>
0.8 (0.2)	1,19355	<u>0,884216</u>	<u>0,74916</u>
0.9 (0.1)	<u>1,056368</u>	<u>0,782507</u>	<u>0,662936</u>
1.0 (0.0)	<u>0,947385</u>	<u>0,701719</u>	<u>0,594456</u>

Таблица 2 – расчета коэффициента запаса устойчивости котла цистерны

Разряжение (давление в котле), атм	Кус, $V_{yz}=1.17 \text{ м}^3/\text{т}$ Дизельное топливо		
	9/11 мм	8/10 мм	7,5/9 мм
0.3 (0.7)	3,37292	2,50188	2,121631
0.4 (0.6)	2,480875	1,839442	1,559447
0.5 (0.5)	1,958397	1,45165	1,230437
0.6 (0.4)	1,616337	1,197851	<u>1,015158</u>
0.7 (0.3)	1,375393	<u>1,019124</u>	<u>0,863586</u>
0.8 (0.2)	1,196661	<u>0,886574</u>	<u>0,751193</u>
0.9 (0.1)	<u>1,058876</u>	<u>0,784409</u>	<u>0,664576</u>
1.0 (0.0)	<u>0,94945</u>	<u>0,703285</u>	<u>0,595806</u>

Полученные данные позволяют определить критические давления (разряжение), при которых котел вагона-цистерны потеряет устойчивость.

Условия для моделирования:

- 1) уровень жидкого груза (степень заполнения) = 95%;
- 2) диаметр вагона цистерны: 3200 мм;
- 3) толщина оболочки в боковых и верхней части: 9; 8,5 мм (при толщине броневых листов 11 мм) и др;
- 4) количество деревянных лежней в опорах котла: 3, 4;
- 5) наличие или отсутствие броневых листов под опорами;
- 6) Вид перевозимого груза – керосин авиационный, дизельное топливо
- 7) Наличие или отсутствие поперечных промежуточных балок в раме вагона.

Допускаемый коэффициент устойчивости n_y котла в рассмотренных случаях принимается не менее 1,1.

Моделирование устойчивости оболочки котла вагона-цистерны реализовано с помощью программного комплекса FEMAP.

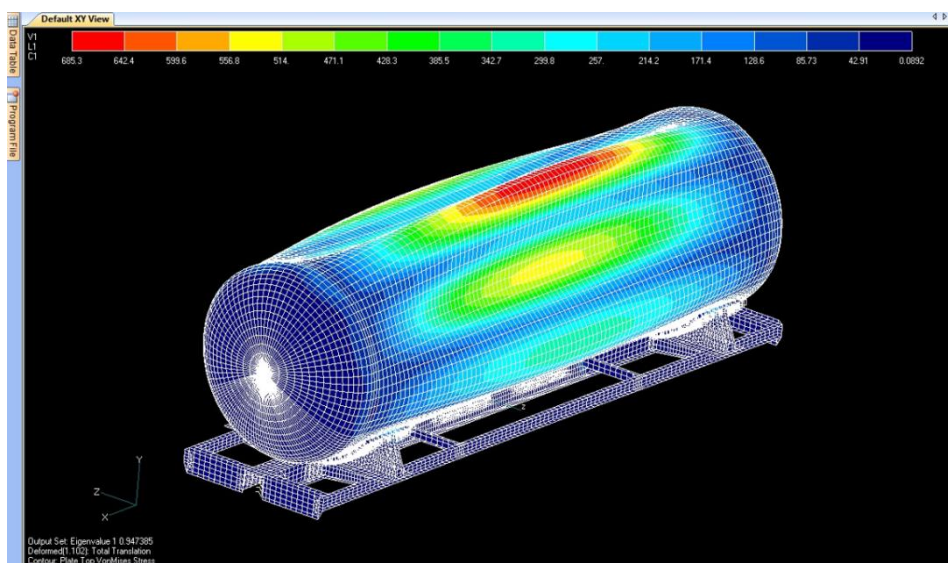


Рисунок 2 – Эпюра распределения эквивалентных напряжений по конструкции котла вагона-цистерны 15-1547 от действия расчетного давления

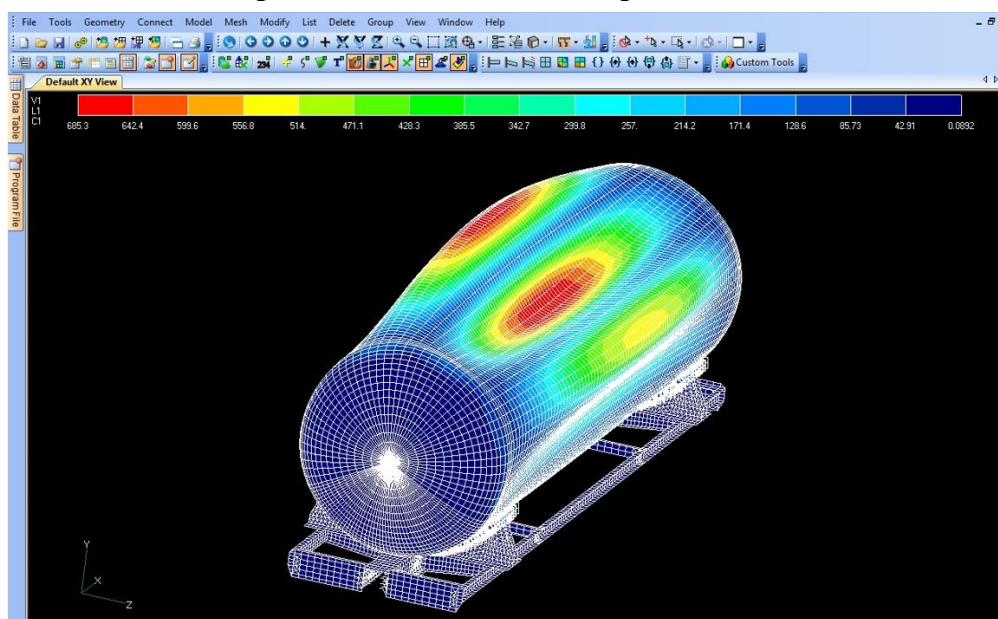


Рисунок 3 – Эпюра распределения эквивалентных напряжений по конструкции котла вагона-цистерны 15-1547 от действия расчетного давления, вид со стороны днища котла

Программный комплекс FEMAP with NX Nastran позволил определить допустимый коэффициент устойчивости n_y котла вагона-цистерны при определенных значениях давления. Полученные данные использованы при построении математической модели для определения критических изменений параметров внутри котлов вагонов-цистерн.

Моделирование процесса возникновения разряжения внутри котла вагона-цистерны при транспортировке груза:

Для получения математической модели будут использоваться параметры тонкостенного котла вагона-цистерны 15-9993 для перевозки нефтепродуктов. Выбор цистерны обусловлен предметом исследования.

Согласно приказу Минтранса России от 29 июля 2019 года №245 утверждены правила перевозок железнодорожным транспортом грузов наливом в вагонах цистернах определяется коэффициент объемного расширения жидкости в интервале температур от t_n до t_m :

$$\alpha = \frac{\rho_{15} - \rho_{50}}{35 \cdot \rho_{50}}, \quad (5)$$

где, t_m - максимальная температура жидкости при транспортировке;
 t_n - температура жидкости при наливе.

Производим расчет максимальной степени заполнения котла вагона-цистерны исходя из выбранной модели вагона-цистерны, имеющую определённый перечень грузов, разрешенных к перевозке:

$$\eta = \frac{98}{1 + \alpha(t_m - t_n), \%}. \quad (6)$$

Рассчитываем начальный объем нефтепродукта при заполнении цистерны:

$$V_{нп,0} = V \cdot \eta / 100, \quad (7)$$

где V – объем цистерны.

Далее рассчитываем объем паровоздушной смеси при заполнении цистерны нефтепродуктом:

$$V_{пв,0} = V - V_{нп,0}. \quad (8)$$

Производим расчет массы нефтепродукта при заполнении цистерны:

$$m_{нп} = V_{нп,0} \cdot \rho_{нп,0}, \quad (9)$$

где $\rho_{нп,0}$ – плотность нефтепродукта при заполнении цистерны.

Давление насыщенных паров нефтепродукта при фактической температуре определяются по уравнениям Антуана:

$$P_{п.нп} = 10^{(A - \frac{B}{t_{ж} + C})}, \quad (10)$$

где A, B, C - константы, зависящие от природы вещества;

$t_{ж}$ – фактическая температура жидкости.

Далее рассчитываем начальное парциальное давление воздуха при температуре налива нефтепродукта, после заполнения цистерны нефтепродуктом:

$$P_{п.в,0} = P_0 - P_{п.нп,0}, \quad (11)$$

где P_0 - атмосферное давление;

$P_{п.нп,0}$ - давление насыщенных паров нефтепродукта при температуре налива.

Вычисляем массу воздуха при заполнении цистерны нефтепродуктом:

$$m_B = \frac{P_{п.в,0} \cdot M_B \cdot V_{пв,0}}{R \cdot T_0}, \quad (12)$$

где P_0 - атмосферное давление;

M_B – молярная масса воздуха;

R – универсальная газовая постоянная;

T_0 – температура налива нефтепродукта в цистерну.

Производим расчет плотности нефтепродукта по ГОСТ Р 50.2.076— 2010:

$$\rho_{тР} = \frac{\rho_{15} \exp\{-\beta_{15} (t-15)[1+0,8\beta_{15}(t-15)]\}}{1-\gamma_t \Delta P}, \quad (13)$$

где t – температура нефти, нефтепродуктов и смазочных масел;

P – избыточное давление нефти, нефтепродуктов или смазочных масел;

β_{15} – коэффициент объемного расширения нефти, нефтепродуктов и смазочных масел при температуре 15 °С;

γ_t – коэффициент сжимаемости при температуре.

Расчёт коэффициента объемного расширения нефти, нефтепродуктов и смазочных масел при температуре 15 °С:

$$\beta_{15} = \frac{k_0 + k_1 \rho_{15}}{\rho_{15}^2} + k_2, \quad (14)$$

где ρ_{15} – плотность при температуре 15 °С и избыточном давлении равном нулю;

k_0, k_1, k_2 – поправочные коэффициент.

Для уточнения расчета плотности нефтепродуктов необходимо рассчитать коэффициент сжимаемости при температуре:

$$\gamma_T = 10^{-3} \cdot \exp(-1,62080 + 0,21592 \cdot 10^{-3} \cdot t + \frac{0,87096 \cdot 10^6}{\rho_{15}^2} + \frac{4,2092 \cdot 10^3 \cdot t}{\rho_{15}^2}). \quad (15)$$

Получаем значение давления в котле цистерны:

$$P = P_{пв,n} + P_{п.нп}. \quad (16)$$

Расчет давления в котле цистерны производится от температуры и давления при заполнении котла вагона-цистерны до температуры +50 градусов °С, а также температуры минус 50 градусов °С, с шагом 10 градусов °С, согласно ГОСТ 15150-69.

В четвертом разделе представлено описание программы «FOBOT 2.0», позволяющей рассчитать зависимость давления нефтепродукта внутри котла вагона-цистерны в зависимости от температуры окружающей среды. Для получения результатов, а также проверки адекватности математической модели произведен расчет по алгоритму с помощью написанной программы.

Представлены результаты расчета разных видов цистерн (15-9993), (15-289-04), (15-625), с заполнением их разными видами нефтепродуктов. Выбор котлов вагонов-цистерн обусловлен перечнем грузов, разрешенных к перевозке, а именно, как светлых, так темных нефтепродуктов. Температурный диапазон расчетов обусловлен техническими характеристиками, предохранительной аппаратурой, установленной на котлах вагонов-цистерн. Степень заполнения вагонов-цистерн выбрана максимально возможная - 95%. Вид перевозимого груза – бензин АИ-92, и дизельные топлива зимних марок типа 3-0.2-40 минус 35, 3-05 минус 45 и др. (В согласии с ГОСТ и ТУ всего 40 наименований).

Перейдем к описанию формы ввода исходных данных и получения результата расчетов. После введения исходных данных в окно «Расчет давления в цистерне» программы, представлен расчет происходящего теплофизического процесса в окне «График». на рисунках 5,6,7.

На рисунках 4, 5, 6, 7 представлены результаты расчета зависимости давления от температуры внутри котла вагона-цистерны 15-9993, 15-289-04 с заполнением их на 95% бензином, а также котла вагона-цистерны 15-625, заполненного на 95% дизельным топливом. Дополнительной функцией программы «FOBOT 2.0» является возможность добавления графиков открытия предохранительного клапана на выпуск (красным цветом) и впуск (зеленым цветом), вывод на экран значений температур их открытия, а также температуры потери устойчивости котла цистерны.

Расчет давления в цистерне

Объем цистерны V , м³

85,60

Степень заполнения цистерны η , %

95

Температура налива нефтепродукта в цистерну T_0 , °C

20

Таблица плотностей нефтепродукта

750

Расчет с учетом давления насыщенных паров нефтепродукта при наливе

☐

Отображать метки на графике

☒

Толщина стенок цистерны

8/10 мм

Вид нефтепродукта

Бензин АИ-93 (зимний)

Константы уравнения Антуана

A= 4,265

B= 695,019

C= 223,220

Ручной ввод A, B, C

☐

Результаты расчетов

Температура открытия впускного клапана, °C

12,7

Температура открытия выпускного клапана, °C

32,4

Температура потери устойчивости котла цистерны, °C

-39,3

Построить график

Рисунок 4 – Окно программы «Расчет зависимости давления от температуры внутри котла вагона-цистерны 15-9543, бензин» созданной программы

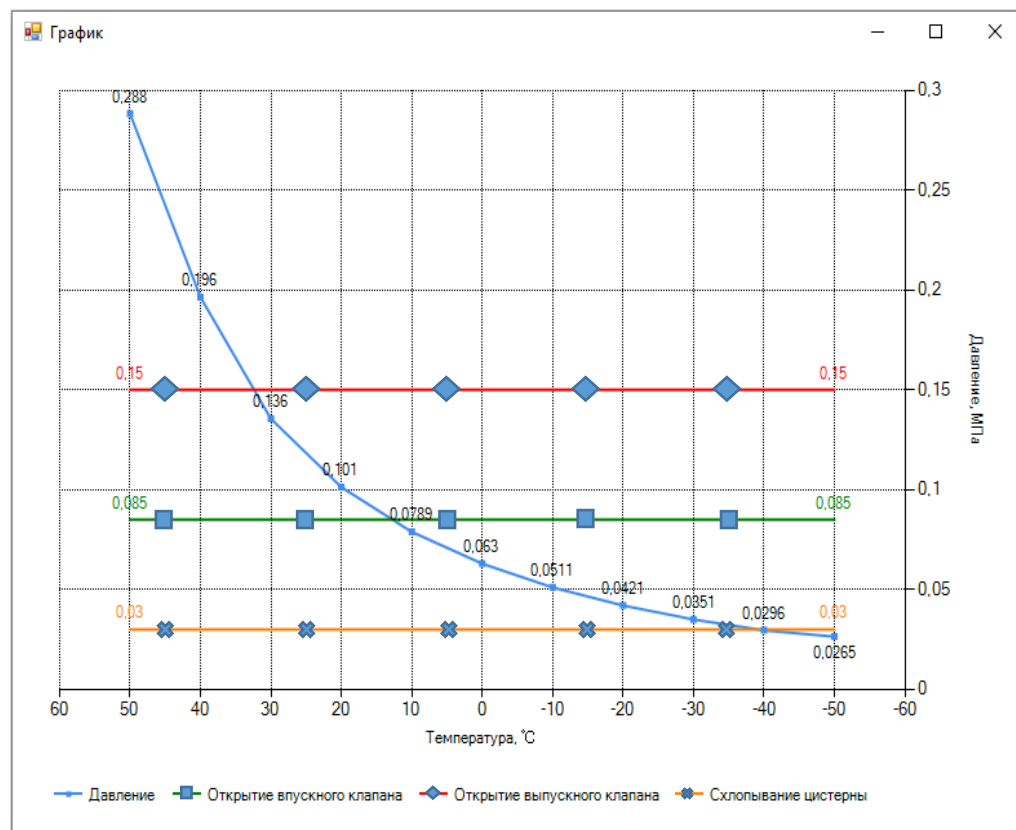


Рисунок 5 – Окно графика «Результат расчета зависимости давления от температуры внутри котла вагона-цистерны 15-9543, бензин» созданной программы

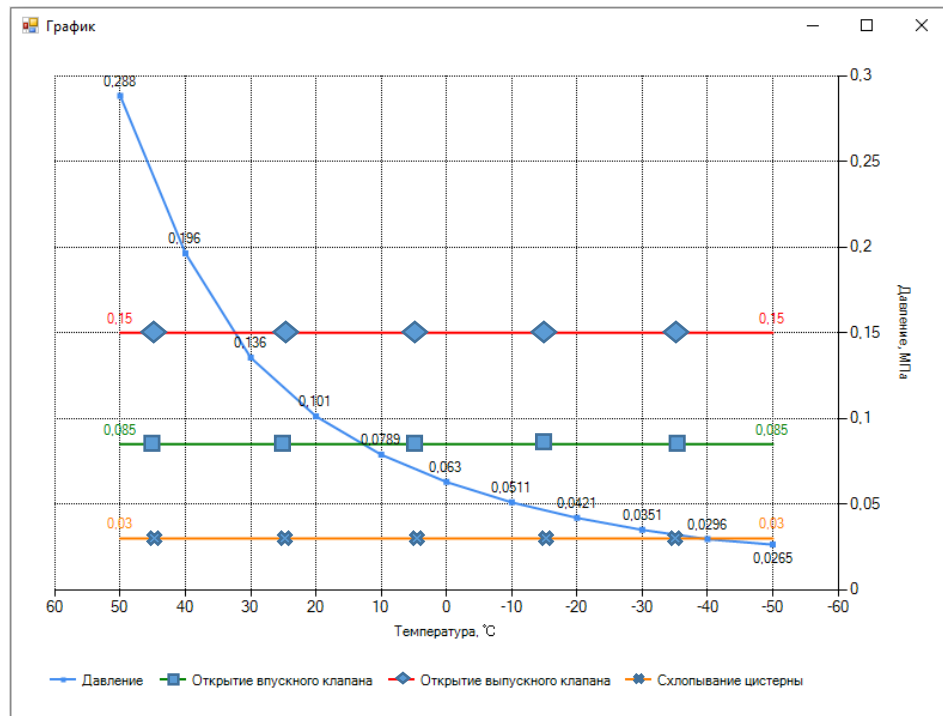


Рисунок 6 – Окно графика «Результат расчета зависимости давления от температуры внутри котла вагона-цистерны 15-9993, бензин» созданной программы

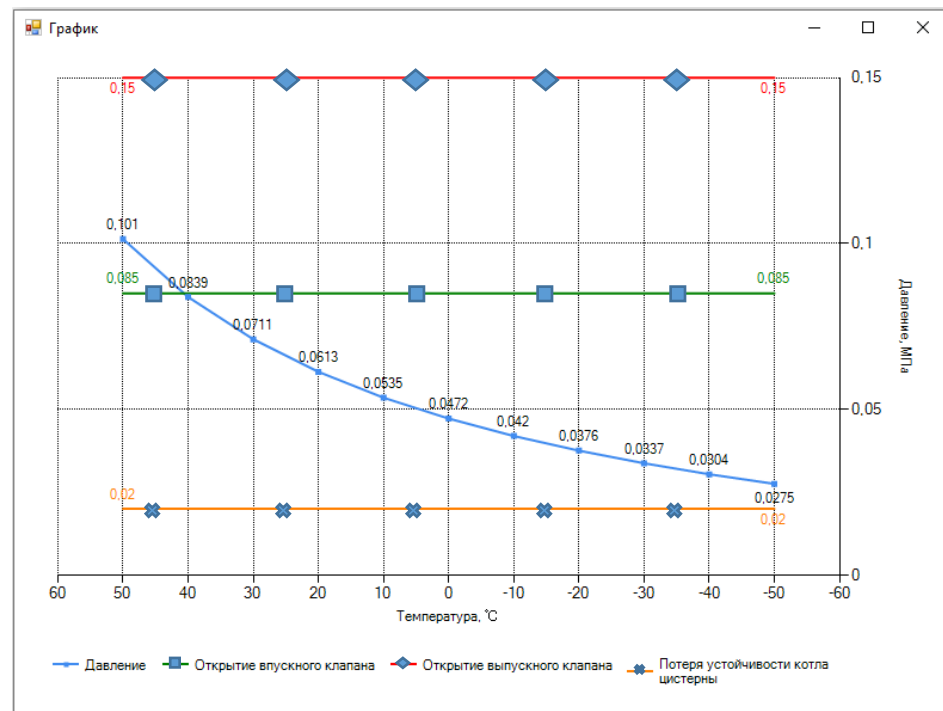


Рисунок 7 – Окно графика «Результат расчета зависимости давления от температуры внутри котла вагона-цистерны 15-625, дизельное топливо» созданной программы

Созданная программа, написанная на языке C++, с использованием библиотек C# позволяет проводить исследование режимов изменения теплофизических процессов внутри вагонов-цистерн при возникновении в них

разряжения (открытие впускного клапана), избыточного давления (открытие выпускного клапана), а также параметров потери устойчивости котла цистерны.

С использованием программы возможно проведение широкого спектра испытаний, например, для исследования поведения вагонов-цистерн в условиях транспортировки грузов из тёплых регионов России в холодные, а также случаев отказов предохранительных клапанов во время эксплуатации нефтегруза.

Таким образом, с помощью имеющейся лабораторной установки, а также созданной программы строим графики зависимостей давления от температуры внутри резервуара.

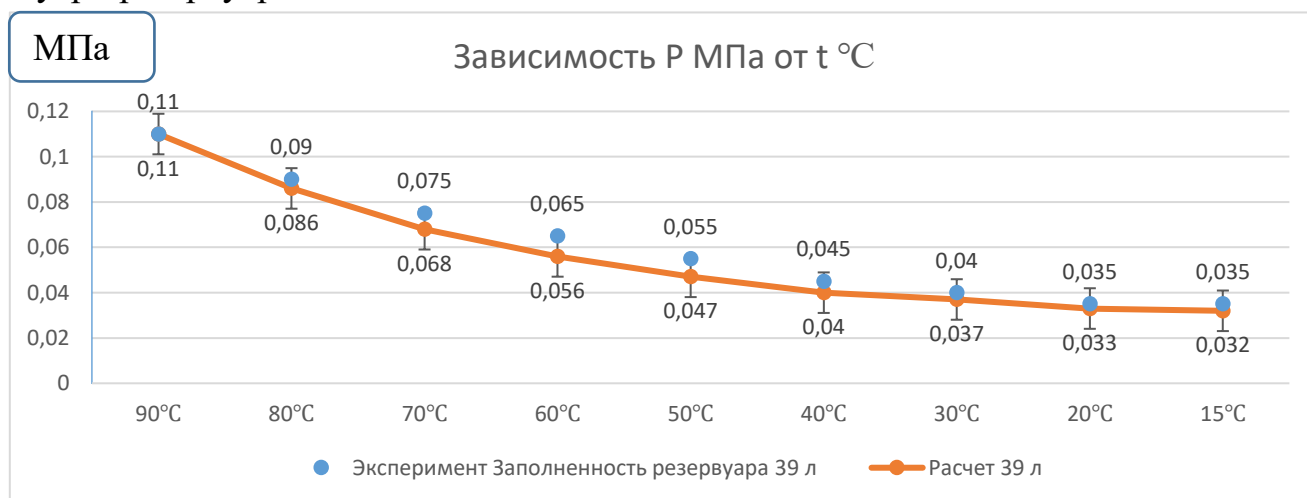


Рисунок 8 – Зависимость изменения давления Р от температуры Т в резервуаре с наполнением 39 л

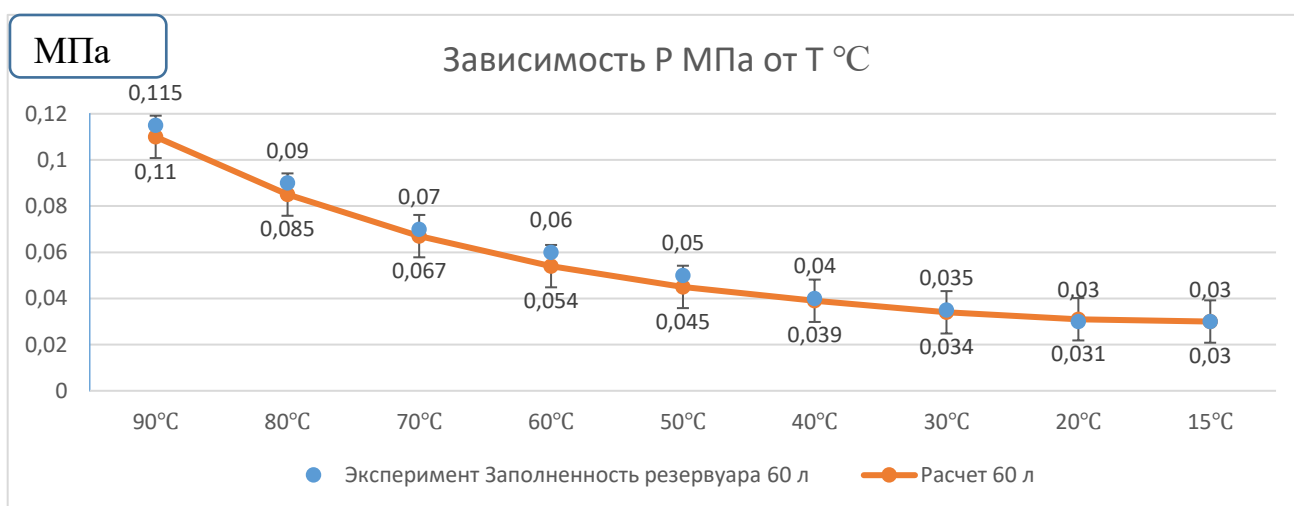


Рисунок 9 – Зависимость изменения давления Р от температуры в Т резервуаре с наполнением 60 л

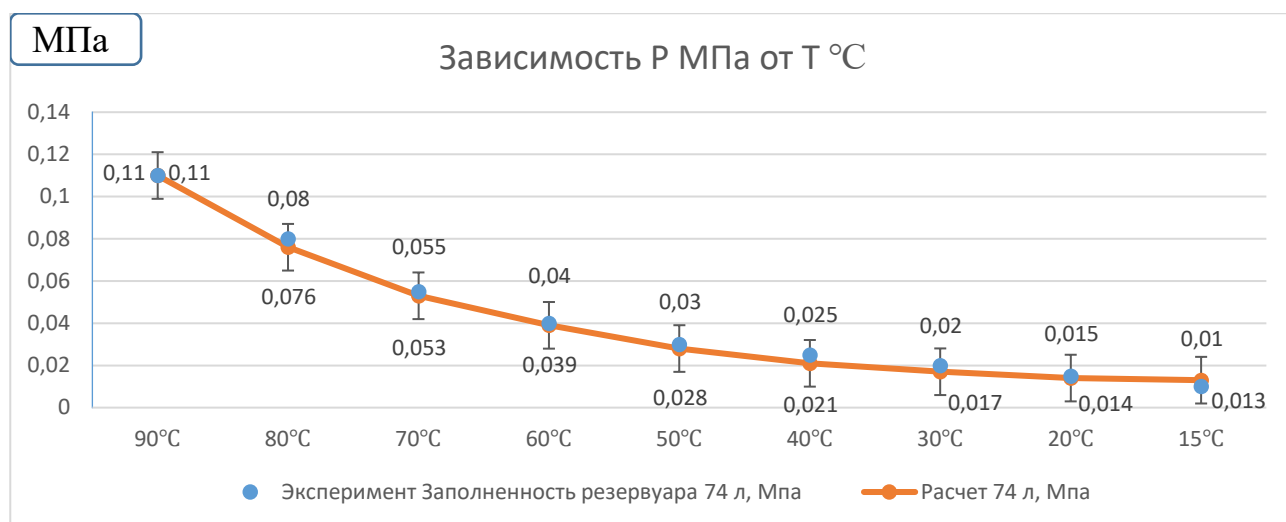


Рисунок 10 – Зависимость изменения давления Р от температуры Т в резервуаре с заполнением 74 л

На рисунках 8,9,10 – представлены результаты расчетов изменения давления внутри резервуара в зависимости от температуры. Для оценки полученных расчетных и экспериментальных данных, на расчетном графике прямой указан диапазон абсолютной ошибки.

В пятом разделе описывается проблематика перевозок нефтегрузов, имеющих предохранительно-впускную аппаратуру, а также сформированы практические рекомендации, основанные на результатах проведенного исследования.

Для формирования практических рекомендаций произведен расчет эквивалентного диаметра проходного сечения впускного предохранительного клапана.

Выражение для теплового потока воздуха, вносимого в цистерну через предохранительный клапан:

$$Q_v = C_{pv} \cdot G \cdot X \cdot (t_T - t_0), \quad (17)$$

где C_{pv} - удельная изобарная теплоёмкость воздуха;

t_T - температура технологического процесса;

t_0 - температура окружающей среды;

$X = 0,1 - 1$ – коэффициент, характеризующий степень нагрева поступающего воздуха;

G - массовый расход воздуха через впускной предохранительный клапан:

$$G = \mu \cdot S \sqrt{2\rho_B \cdot \Delta P}, \quad (18)$$

где μ - коэффициент расхода;

S - эквивалентная площадь проходного сечения впускного предохранительного клапана;

ρ_B - плотность воздуха;

ΔP - перепад давления, при котором срабатывает впускной предохранительный клапан.

Выражение для теплового потока за счет внешней теплоотдачи котла цистерны в окружающую среду:

$$Q_{cp} = k \cdot F(t_T - t_0), \quad (19)$$

где k - коэффициент теплопередачи:

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta_{ст}}{\lambda_{ст}} + \frac{1}{\alpha_2}}, \quad (20)$$

α_1 - коэффициент теплоотдачи от внутренней поверхности котла цистерны;

α_2 - коэффициент теплоотдачи от внешней поверхности котла цистерны;

$\lambda_{ст}$, $\delta_{ст}$ - коэффициент теплопроводности материала стенки котла и толщины стенки котла;

F - внешняя поверхность котла цистерны.

Для недопущения снижения давления в котле цистерны после открытия впускного предохранительного клапана необходимо выполнение условия.

$$Q_B = Q_{cp} \quad . \quad (21)$$

Оценка эквивалентного диаметра D проходного сечения впускного предохранительного клапана:

$$D = \sqrt{\frac{4k \cdot F}{\pi \cdot C_{pB} \cdot X \cdot \mu \cdot \sqrt{2\rho_B \Delta P}}} \quad . \quad (22)$$

В данном исследовании рассчитаны наиболее оптимальные диаметры сечения впускного клапана для цистерны модели 15-625, для следующих характеристик предохранительного клапана: $\Delta P = 0,2 \cdot 10^5$ Па, $X = 0,5$ и температуры окружающей среды, $t_0 = -20$ °С.

Результат расчета эквивалентного диаметра проходного сечения впускного предохранительного клапана представлены в таблице:

Таблица 3. Расчет эквивалентного диаметра проходного сечения впускного выпускного предохранительного клапана

D, м	0,039
------	-------

Эксплуатационные параметры предохранительно-впускного клапана вагона-цистерны 15-625 предусматривают оснащение котла вагона-цистерны диаметром проходного сечения 0,032 м. Согласно расчетам эквивалентного диаметра проходного сечения впускного предохранительного клапана для недопущения низкого давления внутри котла вагона-цистерны необходимо оснащение вагон-цистерну впускным клапаном не менее 0,039 м.

При капитальном ремонте вагонов-цистерн зачастую требуется замена клапанов на новые, так как восстановление было практически невозможно. Также известны случаи, когда из-за заклинивания впускного клапана котел цистерны терял устойчивость и восстановлению не подлежал. Таким образом, применяемые предохранительно-впускные клапаны морально устарели и уже не соответствуют требованиям сегодняшнего времени. Постоянно растет номенклатура перевозимых в вагонах-цистернах грузов, увеличиваются межремонтные сроки и сервисные интервалы.

Рекомендуется применение двух предохранительных (впускных и выпускных) клапанов на вагонах-цистернах, обладающих большим диаметром. Данные требования обоснованы ГОСТом 15150-69 для обеспечения эксплуатационной надежности в широком диапазоне температур от минус 60 °С до плюс 50 °С, а также условиями использования разных нефтеналивных грузов в одних типах вагонов-цистерн.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1 Проведён физический эксперимент по оценке влияния температурных режимов на создание разряжения в котле вагона-цистерны, а также выполнена успешная верификация его результатов.

2 Предложена математическая полуэмпирическая модель изменения давления в цистерне, а также расчеты прочности котла цистерны.

3 На основе математической модели с помощью среды программирования в Visual Studio C++ создана компьютерная программа, которая может быть использована для исследования теплофизических процессов, а также устойчивости стенок вагонов-цистерн. Проведён анализ методов решения задач устойчивости тонкостенных оболочек котлов вагонов-цистерн 15-9993, 15-9543, 15-625. По результатам анализа в качестве основного метода исследования был принят и успешно применён конечно-разностный метод и метод компьютерного моделирования.

4 Проведена серия экспериментов по имитационному моделированию процесса создания вакуума в вагоне-цистерне при различных значениях исходных данных, соответствующих благоприятным и неблагоприятным условиям эксплуатации вагона-цистерны. По результатам серии экспериментов, получены данные, свидетельствующие о существенном снижении давления при транспортировке вагона-цистерны из условий плюсовых температур в условия отрицательных температур или близких к нулю.

5 Сформирован перечень практических рекомендаций по повышению устойчивости тонкостенных оболочек железнодорожных цистерн при возникновении вакуума (разряжения). Перечень сформирован на основании проведенного физического эксперимента по оценке влияния температурных режимов на создание вакуума в вагоне-цистерне, а также применения математической полуэмпирической модели изменения давления в цистерне.

6 На основании проведенных расчетов рекомендуется применение впускного клапана диаметром не менее 0,039 м, а также рекомендуется внедрение

конструктивной особенности расположения двух предохранительных (впускных и выпускных) клапанов на вагонах-цистернах.

7 Перспективами дальнейшей разработки темы является построение нестационарных математических моделей более высокого уровня, с целью уточнения определения коэффициента, характеризующего степень нагрева воздуха, поступающего в цистерну через клапан, а также добавление в расчётную программу большего количества типовых конструктивных особенностей вагонов-цистерн, а также проведение специальных экспериментальных исследований с использованием современных вагонов-цистерн.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

а) в рецензируемых научных изданиях:

1. **Асманкин, Е.Г.** Подготовка к эксплуатации вагонов-цистерн для перевозки нефтепродуктов / Е.Г. Асманкин, Е.Н. Алёхин, Д.Ю. Ившин, А.А. Скоков, Г.А. Туху // Транспортное дело России. – 2023. – № 3 – С. 264- 269.

2. **Асманкин, Е.Г.** Совершенствование методов подготовки вагонов-цистерн для перевозки светлых и темных нефтепродуктов к эксплуатации / Е.Г. Асманкин, М.И. Таранов, К.И. Белокурченко, Д.Ф. Сулейманов, Я.Н. Оттев // Транспортное дело России. – 2023. – № 3 – С. 272- 274.

3. **Асманкин, Е.Г.** Возникновение вакуума в вагоне-цистерне 15-1219 при перевозке нефтепродуктов / Е.Г. Асманкин, Б.А. Кохан, Н.В. Чичерин, А.С. Мещерякова, А.А. Антонов // Транспортное дело России. – 2023. – № 3 – С. 279- 282.

б) в изданиях, входящих в международную систему цитирования Scopus:

4. **Asmankin, E.** Technical Rationale for Protective Equipment Propane Tanks in a Model Fire / Popov V., Asmankin E., Sukhov P., Bolandova J. – Текст : непосредственный // Lecture Notes in Networks and Systems – 2022. – Vol. 296 – P. 169–177.

Асманкин Евгений Геннадьевич

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ ПОВЫШЕНИЯ
УСТОЙЧИВОСТИ ТОНКОСТЕННЫХ ОБОЛОЧЕК
ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ ЦИСТЕРН
ПРИ ВОЗНИКНОВЕНИИ В НИХ ВАКУУМА**

2.9.3. Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано в печать 23.10.2025 г.

Формат бумаги

60×90¹/₁₆

Объем усл.п.л – 1,5

Тираж 80 экз.

Заказ № 793 от 23.10.2025

127994, Россия, г. Москва, ул. Образцова, дом 9, стр. 9