

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Российский университет транспорта»
РУТ (МИИТ)

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
(технические науки)

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель
доктор технических наук,
профессор
Попов Владимир Георгиевич

Москва – 2023

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
1 ОБЗОР НАУЧНЫХ РАБОТ, ПОСВЯЩЁННЫХ ТРАНСПОРТИРОВКЕ НЕФТЕПРОДУКТОВ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫМ ТРАНСПОРТОМ.....	10
1.1 Вопросы и проблематика повышения устойчивости вагона-цистерны....	12
1.2 Обзор работ и методов компьютерного моделирования, применяющихся в решении задач устойчивости цистерн при возникновении в них вакуума	14
1.3 Постановка цели и задач исследования.....	15
1.4 Выводы по разделу 1	17
2 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ВАКУУМА НА ТОНКОСТЕННЫЙ СОСУД.....	19
2.1 Постановка проблемы и концепция её решения.....	19
2.2 Описание лабораторного стенда по моделированию вакуума в тонкостенном сосуде	23
2.3 Методика испытаний.....	28
2.4 Результаты натурных испытаний	29
2.5 Верификация экспериментальных данных.....	32
2.6 Выводы по разделу 2	33
3 ТЕПЛОВАЯ (МАТЕМАТИЧЕСКАЯ) МОДЕЛЬ КОТЛА ВАГОНА ЦИСТЕРНЫ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ПАРАМЕТРАХ ДАВЛЕНИЯ	34
3.1 Принятые допущения	37
3.2 Метод выбора технических средств защиты вагонов-цистерн для перевозки нефтепродуктов от аварийного теплового воздействия	38
3.3 Численный метод	42
3.4 Алгоритм расчета.....	43

3.5 Моделирование параметров предохранительного впускного клапана вагонов-цистерн для перевозки нефтепродуктов	49
3.5.1 Оценка давления в котле вагона-цистерны процесса очистки при неоткрывшемся впускном клапане	50
3.5.2 Выбор проходного сечения впускного предохранительного клапана нефтебензиновых цистерн	53
3.5.3 Выражение для теплового потока за счёт внешней теплоотдачи котла цистерны в окружающую среду.....	55
3.6 Моделирование процесса возникновения разряжения внутри котла вагона цистерны при транспортировке груза. Расчет степени заполнения цистерны	56
3.6.1 Расчет оптимальной температуры налива светлых нефтепродуктов	57
3.6.2 Расчет потерь светлых нефтепродуктов от испарения при наливе	60
3.6.3 Алгоритм расчета давлений внутри вагона-цистерны.....	61
3.6.4 Расчет давлений внутри вагона-цистерны	64
3.7 Проверка устойчивости обечайки	67
3.8 Выводы по разделу 3	71
4 ПРОГРАММНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ РАЗРАБОТАННОЙ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ	73
4.1 Описание интерфейса разработанной программы	74
4.2 Результаты расчетов математической модели с помощью программного комплекса	80
4.3 Выводы по разделу 4	82
5 ПРОБЛЕМАТИКА ПЕРЕВОЗОК НЕФТЕГРУЗОВ ИМЕЮЩИХ ПРЕДОХРАНИТЕЛЬНО ВПУСКНУЮ АППАРАТУРУ	84
5.1 Формирование практических рекомендаций, основанных на результатах проведенного исследования.....	84
5.2 Выводы по разделу 5	86
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	88

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ	90
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	91
ПРИЛОЖЕНИЕ А	108
ПРИЛОЖЕНИЕ Б.....	109
ПРИЛОЖЕНИЕ В	124

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. В настоящее время на железных дорогах Российской Федерации наблюдается существенный 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 [55].

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 существенных масс людей [5, 91]. Согласно Федеральному закону № 184-ФЗ «О техническом регулировании» количественная мера безопасности в чрезвычайных ситуациях — аварийный риск [73]. 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 [2, 6-9, 17, 19, 34, 35, 45, 48, 51, 54, 57, 61, 62, 65, 67, 68, 77, 80-82, 87, 88, 90].

При транспортировке в зимнее время светлых нефтепродуктов (бензин, керосин, дизельные топлива летних марок, разновидности светлых масел и др.) происходит их охлаждение, сопровождающееся ростом вязкости, а также уменьшением давления внутри цистерны. Рост вязкости, температуры, повышение давления или 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 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 [39, 42, 53]. 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. Проблемы транспортировки нефтепродуктов железнодорожным транспортом, практические вопросы конструирования и анализа влияния конструкционных особенностей предохранительных клапанов железнодорожных цистерн (ПК), теоретическими основами оценки и снижения пожаровзрывоопасности занимались многие учёными. Свой значительный вклад внесли:

С. В. Беспалько, Д. В. Ботвенко, Б. Л. Недорчук, В. М. Бубнов, И. Г. Ищук, Г. А. Позднякова, В. Г. Стручалин, В. Ю. Навценя, В. Н. Филиппов, Ю. Н. Шебеко, В. Г. Шухов и др.

В железнодорожных цистернах подвижного состава, транспортирующих газообразные и жидкие продукты под избыточным давлением, широко применяются мембранные и предохранительно-клапанные устройства,

предотвращающие цистерны от разрушения сверхнормативным избыточным давлением продукта.

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

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

Цель и задачи исследования. *Целью* работы является повышение безопасности движения грузовых поездов при транспортировке нефтепродуктов железнодорожным транспортом.

В соответствии с поставленной целью в работе необходимо решить следующие задачи:

- провести анализ методов решения задач устойчивости тонкостенных оболочек котлов вагонов-цистерн;
- разработать тепловую (математическую) модель вагона-цистерны для перевозки нефтепродуктов;
- 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;
- провести серию экспериментов по имитационному моделированию процесса создания вакуума в вагоне-цистерне при различных значениях исходных данных;
- выявить варианты возникновения критических давлений внутри котла вагона-цистерны при процессе срабатывания предохранительной арматуры;
- сформировать перечень практических рекомендаций по повышению устойчивости тонкостенных оболочек вагонов цистерн при возникновении в них вакуума;
- обосновать актуальность разработки и внедрения отдельной предохранительно-впускной арматуры.

Научная новизна. Разработана математическая модель изменения давления при срабатывании предохранительных клапанов цистерны.

Теоретическая и практическая значимость работы. Разработана программа, использование которой позволяет осуществлять имитационное моделирование изменения давления внутри цистерны при процессах открытия и закрытия предохранительного клапана с учётом истечения жидкого груза из клапана. В работе рассматривается вариант использования двух предохранительных клапанов, работающих в разных режимах. Практическая реализация этой задачи позволит снизить случаи несрабатывания предохранительного клапана цистерны и улучшить безопасность движения грузовых поездов.

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

- метода анализа – при уточнении и конкретизации проблемы при работе предохранительных клапанов цистерны в обзоре литературы (раздел 1);
- метода физического эксперимента – при проведении испытаний с запасным резервуаром (раздел 2);
- метода математического моделирования – при составлении математической (тепловой) модели и разработки расчётной компьютерной программы (разделы 3 и 4);
- метода вычислительного эксперимента – при проведении компьютерного моделирования (раздел 4);
- методов 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 модель изменения параметров внутри цистерны;
- результаты натурного 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 поездов.

Степень достоверности работы основана на большой степени схожести результатов ранее решённой задачи, полученных методом компьютерного. В работе рассмотрен вариант упрощенного описания расчета процесса охлаждения светлых нефтепродуктов при транспортировке в вагоне-цистерне, в том числе и в условиях отрицательных температур воздуха. Описываемый вариант решает вопрос построения математической модели охлаждения жидкого нефтегруза в котле вагона-цистерны с использованием полуэмпирического уравнения для изменяющегося со временем коэффициента теплоотдачи. Достоверность результатов натурного эксперимента подтверждается теоретическими зависимостями, полученными в результате исследования динамически процессов в вагоне-цистерне в условиях.

Апробация результатов. Основные результаты работы докладывались на Международной конференции (Том 247) «XIV INTERNATIONAL SCIENTIFIC CONFERENCE “INTERAGROMASH 2021”» в 2021 году [107].

1 ОБЗОР НАУЧНЫХ РАБОТ, ПОСВЯЩЁННЫХ ТРАНСПОРТИРОВКЕ НЕФТЕПРОДУКТОВ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫМ ТРАНСПОРТОМ

Необходимость в проведении данного анализа вытекает из поставленных цели и задач диссертационной работы.

Для представления об объекте исследований и обоснованного выбора расчетной схемы котла цистерны:

1 первая часть обзора - рассмотрены конструктивные особенности котлов цистерн. Рассмотрены общие подходы к анализу конструктивных особенностей вагонов-цистерн и методы повышения устойчивости тонкостенных оболочек, а также выработана методология исследований, определены задачи исследования;

2 вторая часть обзора - приведены основные работы, связанные с исследованиями поведения котлов железнодорожных цистерн при различных внешних нагрузках с точки зрения их прочности. Описана практическая часть опытов, подтверждающих расчеты, приведенные во второй части;

3 третья часть обзора содержит описание работ, рассматривающих преимущественно воздействия вакуума на котлы цистерн.

Для проведения обзора необходимо рассмотреть историю возникновения железнодорожного транспорта в России. В статье «Становление железнодорожного транспорта России 1800–1930 годы», к.т.н., доцент кафедры «Транспорта и хранения нефти и газа» ФГБОУ ВО Уфимского государственного нефтяного технического университета А. И. Иванов и др. описывают возникновение железнодорожного транспорта таким образом: «До середины XIX века все перевозки в России осуществлялись водным и гужевым транспортом. Первая рельсовая чугунная дорога была построена на Алтае в 1808–1810 годах горным мастером П. К. Фроловым (Змеиногорская дорога). Использовалась дорога для транспорта добытой руды...» [42].

Актуальность вопроса снижения себестоимости железнодорожных перевозок, а также актуальность транспортировки нефтепродуктов, по мнению

к.т.н., доцента кафедры «Вагоны» Самарского государственного университета путей сообщения обусловлена «...интенсивным развитием северных и восточных регионов Российской Федерации, где находится и большинство предприятий по добыче и переработке нефти. Для районов Сибири и Севера характерен продолжительный (свыше девяти месяцев в году) холодный осенне-зимний период с низкими температурами воздуха. Важными для перевозки в этих условиях факторами становятся отрицательная среднесуточная температура воздуха, большие расстояния и низкая разветвленность железнодорожной сети России в названных регионах, определяющие продолжительность (около 15 суток) перевозки нефтегруза...» [37-41, 54].

Основным нормативным документом при расчете и проектировании вагонов является «Нормы для расчета и проектирования вагонов железных дорог МПС колеи 1520 мм (несамоходных)» [30].

Большое значение в развитии прикладных методов расчета конструкций вагонов-цистерн имеют работы А. П. Азовского, Ю. Н. Аксенова, Б. А. Алексюткина, В. А. Атрощенко, И. В. Бруякина, Р. Ф. Канивец, Т. Г. Морзиновой, В. Г. Мышкова, В. И. Наумова, В. И. Селинова, А. В. Третьякова, Г. Ф. Чугунова, С. М. Шудрака.

Исследования по изучению нагруженности и прочности конструкций подвижного состава ведутся во ВНИИЖТе, ГосНИИВе в университетах путей сообщения городов Москвы, Санкт-Петербурга, Омска, Хабаровска, Днепропетровска, Гомеля, Екатеринбурга, Брянском техническом университете, ГУП «ПО Уралвагонзавод», ОАО «БМЗ-Вагон» и в других научных и производственных организациях [6, 8, 9, 16-18, 34, 35, 45, 49, 56].

Значительный вклад в развитие теории многослойных элементов внесли отечественные и зарубежные авторы: Э. И. Григолюк [34, 35], П. П. Чулков [35], В. В. Болотин [7].

1.1 Вопросы и проблематика повышения устойчивости вагона-цистерны

Вопросы повышения устойчивости котлов вагонов-цистерн обусловлены, в том числе и повышением потребности в транспортировке нефтеналивных грузов железнодорожным транспортом. Так к.т.н., доцент кафедры «Транспорта и хранения нефти и газа» ФГБОУ ВО Уфимского государственного нефтяного технического университета А. И. Иванов утверждает «...В 1878 году с целью удовлетворения стремительно растущего спроса на нефтепродукты был издан указ о создании железнодорожной ветки Баку – Сураханы – Сабунчи длиной 20 км. Ее строительство было закончено 20 января 1880 года. Нефть впервые стали перевозить в специальных цистернах.

Первые вагоны-цистерны в России появились в 1863 году, это были вагоны зарубежного производства. Затем в 1872 году их начали строить в дорожных мастерских Грязе-Царицынской и Московско-Нижегородской железных дорог. Их появление было связано с необходимостью транспортировки от волжских пристаней вглубь страны керосина, отгружаемого с бакинских нефтепромыслов. Первые цистерны строились двухосными с котлом диаметром 1360– 500 мм, длиной от 5 до 8 м, объемом котла от 8 до 10 м³, рисунок 1.1.



Рисунок 1.1 – 2-х осная цистерна нормально типа. Фото из книги "История грузовых железнодорожных перевозок в России XIX-XX века [42]

Окончательно предположения о нефтяном грузообороте по железным дорогам были оформлены лишь к концу 1927 году. Зависимость водных перевозок от климатических условий, как и некоторые ограничения трубопроводного транспорта, заставляли искать пути бесперебойного снабжения промышленных предприятий возникшего и развивавшегося в начале 1920-х годов, СССР нефтью и нефтетопливом [4]. В конце 1920-х годов были закончены подсчеты необходимого количества вагонов-цистерн специального подвижного состава.

Во время Первой мировой войны русские заводы строили двух, трех, и четырехосные цистерны и для других стран европейской колеи, в то же время на русских железных дорогах появились трофейные цистерны несколько отличного типа. В основном парк цистерн в России до революции состоял из обычных 750- и 1000-пудовых вагонов, которые эксплуатировались до конца 50-х годов...» [2, 42].

Один из последних эксплуатируемых нефтеналивных поездов представлен на рисунке 1.2.



**Рисунок 1.2 – Нефтеналивной поезд под паровозом серии Л следует по мосту через реку Шлинка на 27 км Бологое-Полоцкой железной дороги (участок Бологое-Великие Луки ОКТ жд).
Фото: Аркадий Ликальтер, ВОЛЖД [43]**

«...Изменения в подходе к данным перевозкам возникли в начале XX века. Тогда сильно возросшие объемы перевозок и большие потенциальные риски от факторов, учёт которых исключительно посредством эмпирических практик был невозможен, стимулировали развитие теоретического подхода к методам повышения устойчивости тонкостенных оболочек железнодорожных вагонов-цистерн...» [42].

Основы современных методов исследования подвижного состава железных дорог заложили работы отечественных ученых М. Ф. Вериги [13], С. В. Вершинского, В. М. [14], Винокурова [15], А. М. Годыцкого-Цвирко [21], В. А. Лазаряна [46], А. А. Львова [49], Л. Н. Никольского [56], И. И. Челнокова [14], Л. А. Шадура [48] и др.

1.2 Обзор работ и методов компьютерного моделирования, применяющихся в решении задач устойчивости цистерн при возникновении в них вакуума

На основании созданной математической модели возможно применение компьютерного моделирования. Создание корректной математической модели процесса возникновения внутри котла вагона является наиболее значимым этапом исследования. При формировании данного этапа необходимо корректно описать, а также изучить процессы исследуемого явления, в свою очередь для этого необходимо освоить, в том числе и связанные вопросы с исследуемой научной тематикой. Стоит отметить, что создание модели высокого уровня затруднит процесс написания алгоритма математической модели, а также непосредственно составление программной модели.

Существенный вклад в развитие методов проектирования, методов расчета, различных испытаний подвижного состава, в том числе и задач устойчивости тонкостенных оболочек, внесли С. В. Беспалько [95], М. М. Болотин [7],

Ю. П. Бороненко [8], В. М. Бубнов [9], А. И. Быков [9], Н. Н. Воронин [20], В. Н. Котуранов [48], В. В. Лукин [48], В. Н. Филиппов [60, 79, 87-89], А. А. Хохлов [48], В. Д. Хусидов [86] и др.

Обзор работ показывает, что практически все работы посвящены либо толстостенным вагонам-цистернам, либо избыточному давлению внутри вагона цистерны. Из этого следует, что вопросы устойчивости тонкостенных котлов вагонов цистерн являются актуальными.

1.3 Постановка цели и задач исследования

Среди первых публикаций по теории расчета слоистых конструкций необходимо отметить работы В. З. Власова [16-18], Н. Гопкинса [102]. Значительный вклад в развитие теории многослойных элементов внесли отечественные и зарубежные авторы: Э. И. Григолюк [34, 35], П. П. Чулков [34, 35], В. В. Болотин [7] и др. Из исследования первых публикаций следует, что на данный момент разработаны различные теории многослойных конструкций. Большее количество исследований сосредоточено на практическом применении теорий и решению определенных частных задач.

Правила перевозок жидких грузов наливом в вагонах-цистернах и вагонах бункенного типа для перевозки нефтебитума действуют на сети железных дорог с 1966 г. (Ныне - Утверждены Советом по железнодорожному транспорту государств участников Содружества, Протокол от 21-22 мая 2009 г. № 50, с изменениями на 27 ноября 2020 года) [70]. С момента действия правил перевозок вагонный парк пополнился новыми моделями вагонов-цистерн с увеличенным удельным объемом котла, существенно увеличился перечень перевозимых веществ, различных по своим физико-химическим свойствам, многие из которых представляют опасность для человека и окружающей природной среды [47, 49, 62, 77]. Для транспортировки таких грузов требуется соблюдение специальных

условий перевозок и требований, которые выдвигаются как к самим грузам, так и к подвижному составу [23-27, 30, 32, 69-73].

Безопасность перевозок наливных грузов обеспечивается при [25, 32, 69, 70]:

1 создании условий транспортирования, при которых жидкость гарантированно не имеет путей выхода за пределы котла вследствие теплового расширения или негерметичности закрытой крышки колпака котла цистерны. Внедрение научно обоснованных дифференцированных норм налива нефти и нефтепродуктов позволяет создать такие условия;

2 обеспечении конструкционной устойчивости вагонов-цистерн при возникновении вакуума внутри цистерны. Однако при заполнении котла в соответствии с дифференцированными нормами налива в отдельных случаях предусматривается недолив. Наличие свободного объема в вагоне-цистерне обуславливает получение и уменьшение давления внутри цистерны при определенных параметрах эксплуатации.

Таким образом, безопасность при перевозках наливных грузов обеспечивается научно обоснованными нормами заполнения вагонов-цистерн с учетом температурных режимов перевозки, а также с учетом влияния вакуума или избыточного давления на стенки вагонов-цистерн [19, 60, 66, 67].

Проведённый обзор литературы подчеркивает актуальность выбранного для исследования вопроса и позволяет поставить сформулировать цель работы в следующем виде:

Повышение состояния работоспособности по параметрам движения [12] грузовых поездов при транспортировке нефтепродуктов тонкостенными вагонами-цистернами путём снижения вероятности потери устойчивости вагоном-цистерной под действием недостаточного давления внутри цистерны.

Согласно цели диссертационного исследования, требуется решить определенные задачи:

- на основании существующей статистической информации сформулировать условия возникновения низкого давления внутри вагона-цистерны и повышения устойчивости тонкостенных оболочек железнодорожных цистерн;

- разработать математическую модель изменения давления внутри вагона-цистерны, учитывающую различные конструктивные параметры вагона-цистерны для транспортировки нефтепродуктов;

- на основе созданной математической модели разработать программу компьютерного моделирования процесса изменения давления внутри вагона-цистерны;

- провести экспериментальные исследования влияния вакуума на тонкостенные оболочки;

- используя созданную программу и результаты натурных испытаний провести серию опытов компьютерного моделирования режимов возникновения вакуума при эксплуатации грузовых вагонов-цистерн нескольких конфигураций при благоприятных и неблагоприятных условиях и сформулировать перечень практических рекомендаций по улучшению конструкции некоторых узлов грузового вагона-цистерны с целью предотвращения потери устойчивости вагонов-цистерн.

1.4 Выводы по разделу 1

1 Проведённый обзор литературы показал, что с момента появления первых вагонов-цистерн встает вопрос о повышении устойчивости 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 цистерн осуществляется преимущественно путём компьютерного моделирования. В качестве методики выбрано математическое и компьютерное моделирование для решения поставленных задач.

2 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 динамики железнодорожных экипажей. Были рассмотрены такие программные продукты, как программный комплекс FEMAP Siemens Product Lifecycle Management Software Inc. для операционной системы Windows MT. Также была модернизирована программа «FOBOT 1.0» на языке Delphi 7. В качестве среды разработки была выбрана среда Visual Studio C++. Переписана программа «FOBOT» в версию 2.0 на языке C++.

3 На основании проведенного обзора литературы, а также на основании обзора программных комплексов для исследования устойчивости тонкостенных оболочек котлов вагонов-цистерн, были сформулированы основная цель и задачи исследования, к которым относится проведение натурного эксперимента, составление математической и компьютерной модели изменения давления внутри котла вагона-цистерны и проведение экспериментов по моделированию многовариантных ситуаций внутри вагона-цистерны при возникновении вакуума.

2 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ВАКУУМА НА ТОНКОСТЕННЫЙ СОСУД

Основными причинами возникновения вакуума в вагоне-цистерне является отказа [28] предохранительной аппаратуры при эксплуатации или нарушение техники безопасности при промывочно-пропарочных работах.

Вагон-цистерна проектируются с учётом действия на него эквивалентных напряжений, в том числе, и в результате изменения теплофизических процессов внутри котла вагона-цистерны. Данные факторы нарушают устойчивость тонкостенных оболочек котлов вагонов-цистерн.

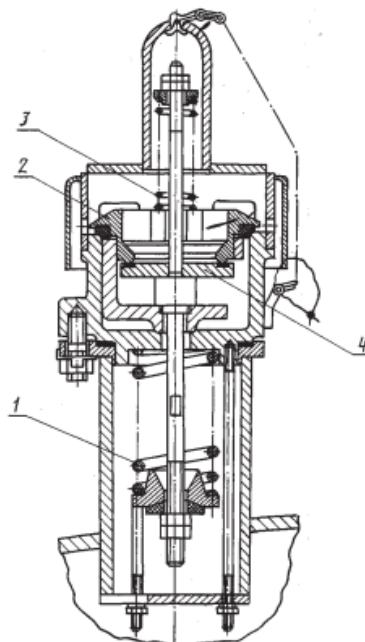
Согласно справочному пособию [78, 83] специализированные цистерны для перевозки опасных грузов «...регулировка клапанов производится на избыточное давление 0,15 МПа (1,5 кгс/см²) и на разряжение 0,01 - 0,02 МПа (0,1 - 0,2 кгс/см²). Для предотвращения нарушения регулировки на предохранительно-впускной клапан устанавливаются две пломбы. Предохранительно-впускной клапан не обеспечивает защиты котла от возникновения недопустимого вакуума после разогрева груза паром, пропарки котла или при сливе продукта при закрытых крышках люков...» [78, 83].

2.1 Постановка проблемы и концепция её решения

При транспортировке в зимнее время светлых нефтепродуктов (бензин, керосин, дизельные топлива летних марок, разновидности светлых масел и др.) происходит их охлаждение, сопровождающееся ростом вязкости, а также уменьшением давления внутри цистерны. В зимнее время года меняются как характеристики оборудования, так и характеристики перевозимого груза.

В настоящее время в России темные и светлые нефтепродукты перевозятся в одних вагонах-цистернах, что зачастую является главным фактором отказов оборудования для стабилизации давления внутри вагона-цистерны.

«...Схема предохранительного клапана, рисунок 2.1.

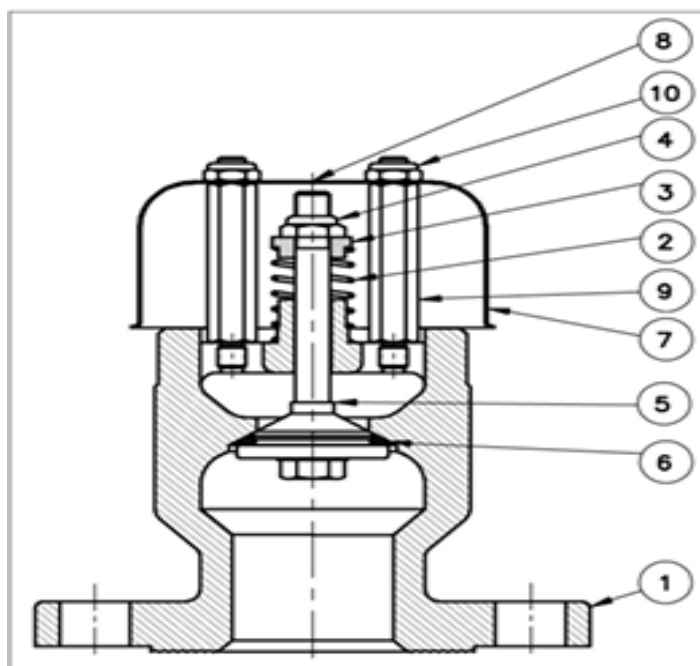


1 – пружина; 2 – клапана максимального давления; 3 – пружины; 4 – вакуумного клапана

Рисунок 2.1 – Предохранительный клапан вагона-цистерны

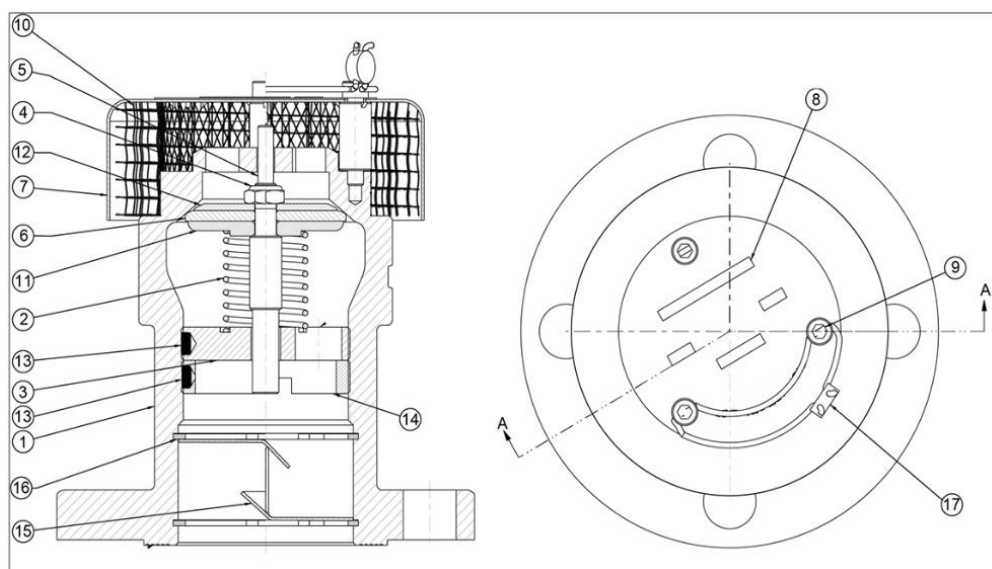
Предохранительно-впускной клапан имеет отдельную регулировку усилия затяжки пружины 1, клапана максимального давления 2 и пружины 3, вакуумного клапана 4. Основные элементы таких клапанов выполнялись из углеродистой и низколегированной стали. Использование доступных широко распространенных материалов позволяло делать изделия недорогими и получать их в нужном количестве, но из-за возникновения коррозии от воздействия окружающей среды долговечность таких клапанов была небольшой...» [60, 83].

В европейских странах и Соединенных Штатах Америки транспортировка нефтепродуктов производится в специализированных цистернах под каждый вид нефтепродуктов. Ознакомиться с конструкцией предохранительно-впускного (вакуумного) клапана и основными конструктивными элементами можно на рисунках 2.2 - 2.6 [12].



1 – корпус клапана; 2 – пружина; 3 – фланец-седло; 4 – контргайка; 5 – стержень клапана; 6 – прокладка; 7 – колпак; 8 – бирка; 9 – шпилька; 10 – контргайка

Рисунок 2.2 – Предохранительно-впускной (вакуумный) клапан А-22Х-W-NS



1 – корпус клапана; 2 – пружина; 3 – фланец-седло; 4 – контргайка; 5 – стержень клапана; 6 – прокладка; 7 – колпак; 8 – бирка; 9 – винт с заглушкой; 10 – сетчатый фильтр; 11 – шайба; 12 – стопор; 13 – пластиковая заглушка; 14 – стопорное кольцо регулировочной гайки; 15 – дефлектор; 16 – стопорное кольцо дефлектора; 17 – уплотнительная прокладка

Рисунок 2.4 – Схема предохранительного (впускной, для недопущения вакуума) клапана вагона цистерны для перевозки нефтепродуктов А-210-FR1/ А-212-FR1, США



Рисунок 2.3 – Современная вагон-цистерна для перевозки нефтепродуктов, США

Такие цистерны как правило оборудованы двумя предохранительными клапанами. Один работает на избыточное давление, другой на возникновение вакуума в вагоне-цистерне.



Рисунок 2.5 – Предохранительный (выпускной) клапан вагона цистерны для перевозки нефтепродуктов, модель А-2095, А-2097, А-2099, США

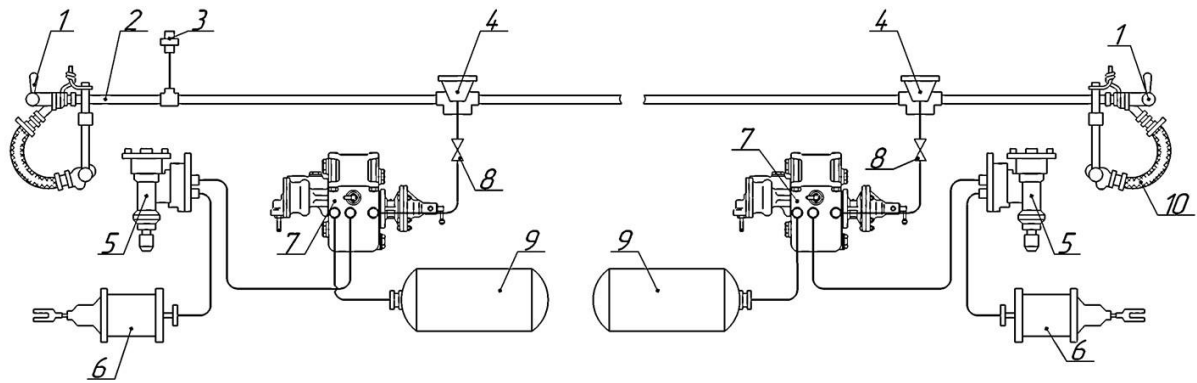


Рисунок 2.6 – Предохранительные (впускной, для недопущения вакуума) клапаны вагона цистерны для перевозки нефтепродуктов А-217, А-222, США

Данные клапаны, срабатывающие только для недопущения вакуума в котле вагона-цистерны, имеют проходные сечения 1,44 - 2,07 дюймов (36,576 – 52,578 мм). А также клапаны, срабатывающие только для недопущения избыточного давления имеют проходные сечения 4 – 7 дюймов (101,6 - 177,8 мм) [118].

2.2 Описание лабораторного стенда по моделированию вакуума в тонкостенном сосуде

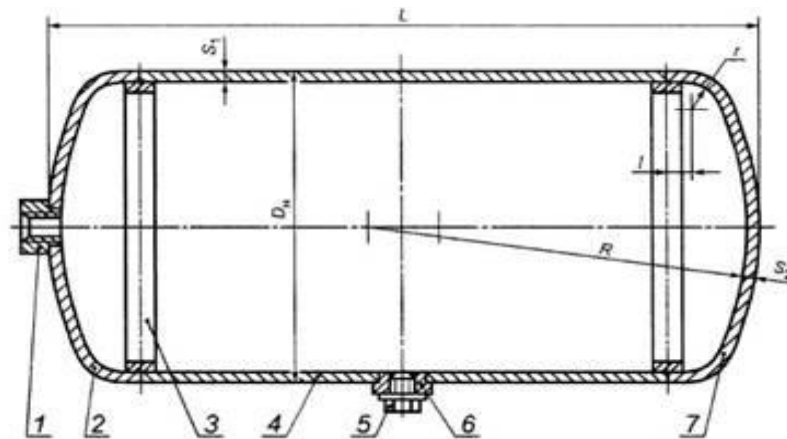
Для создания вакуума (проверки на прочность стенок резервуара) была проведена серия опытов с использованием резервуара Р7-78 - ГОСТ Р 52400-2005, применяемый в тормозной системе железнодорожных вагонов в качестве запасного резервуара [31]. На рисунке 2.7 представлена тормозная системы вагона-цистерны для транспортировки нефтепродуктов.



1 – концевой кран; 2 – тормозная магистраль; 3 – стоп-кран; 4 – тройник-пылеловка;
5 – авторежим; 6 – тормозной цилиндр; 7 – грузовой воздухораспределитель; 8 – кран
разобщительный; 9 – запасный резервуар; 10 – рукав соединительный.

Рисунок 2.7 – Схема пневматической части тормозной системы грузового вагона при установке двух воздухораспределителей на один вагон

Для имитации вакуума взят запасный резервуар тормозной системы грузового вагона. Схема и фотография тормозного резервуара показаны на рисунках 2.8, 2.9.



1 - штуцер днища; 2 - днище с отверстием; 3 - подкладное кольцо; 4 - обечайка; 5 - пробка;
6 - штуцер обечайки; 7 - глухое днище

Рисунок 2.8 – Схема запасного резервуара Р7-78 - ГОСТ Р 52400-2005



Рисунок 2.9 – Фотоснимок запасного резервуара Р7-78 - ГОСТ Р 52400-2005

Таблица 2.1– Характеристики резервуара Р7-78 - ГОСТ Р 52400-2005

Материал	Сталь Ст3, 09Г2С
Рабочее давление, не более, МПа	0,7
Испытательное давление, МПа	1,05
Вместимость, л	78
Масса резервуара, кг	27
Толщина стенки, днище, мм	3,0
Толщина стенки, обечайка, мм	2,5
Длина, мм	1210
Диаметр, мм	300
Номинальный размер резьбы штуцера днища, дюймы	1
Номинальный размер резьбы штуцера обечайки, дюймы	1/2



Рисунок 2.10 – Фотоснимок мановакуумметр РОСМА ТМВ-510



Рисунок 2.11 – Фотоснимок лабораторной установки



Рисунок 2.12 – Фотоснимок термометр ЭКОМЕРА ЭКОМЕРА БТ-1-80

Для измерения давления был приобретен прибор мановакуумметр РОСМА ТМВ-510. Для измерения температуры в сосуде использовался термометр ЭКОМЕРА ЭКОМЕРА БТ-1-80.

Таблица 2.2 – Характеристики термометра ЭКОМЕРА БТ-1-80

Термометр ЭКОМЕРА ЭКОМЕРА БТ-1-80	
Номинальный диаметр корпуса, мм	80
Класс точности	1,5
Чувствительный элемент	Биметаллическая спираль
Корпус	Алюминий
Стекло	Минеральное
Резьба присоединения (на гильзе)	G1/2
Материал гильзы	Медный сплав
Диапазон, °C	0...120
Длина погружной части, мм	60
Регулировка	На штоке
Номинальный диаметр корпуса, мм	80

Таким образом, имеющаяся установка позволяет проводить эксперимент по имитации вакуума с учётом заполненности резервуара. Изменяя заполненность резервуара проделываем 3 эксперимента по моделированию вакуума в резервуаре.

2.3 Методика испытаний

Испытания проводились согласно следующим основным этапам:

Предварительно необходимо было подготовить экспериментальную установку.

Разогреть воду, которая использовалась в качестве заполнения установки.

Вкрутить в отверстия днища и обечайки мановакуумметр и термометр. Номинальный размер резьбы штуцера днища – 1 дюйм (резьба), Номинальный размер резьбы штуцера обечайки - 1/2.

Далее включаем насос для перекачки воды из разогреваемой тары, заполняем главный резервуар кипятком (87-95 °C).

После этого необходимо проверить герметичность всех соединений на наличие течи, а также пара.

Далее были проведены серии опытов по следующему алгоритму:

- заполнить резервуар заданным объемом воды температурой 87-95 °C;
- включить камеру возле мановакуумметра;
- включить камеру возле термометра;
- остановить и сохранить запись эксперимента.

Всего было проведено три опыта.

Первый опыт проводился с заполнением на 39 л, второй на 60 л, третий на 74 л.

После этого проводим замеры и фиксируем результаты. В итоге получится три серии экспериментов.

Время до остывания жидкости в резервуаре засекалось.

В качестве вещества для эксперимента была использована вода, в связи с ее теплофизическими свойствами, отличающимися от свойств нефтепродуктов, а именно температуры воспламенения.

2.4 Результаты натурных испытаний

Полученные результаты проведенных испытаний представлены в таблицах 2.3, 2.4, 2.5. Данные таблицы содержат средние арифметические значения давлений и температур окружающей среды в каждой серии опытов.

Таблица 2.3 – Серия опыта с заполнением резервуара на 74 л

Номер измерения	Температура жидкости, °С	Температура воздуха, °С	Давление в резервуаре, МПа (атм)	Давление атмосферное, МПа	ΔP в резервуаре, МПа	Объем заполнения резервуара, л
	в резервуаре	окружающая				
1	90	9	0,11 (1,086)	0,1	-0,01	74
2	80	10	0,08 (0,79)	0,1	0,02	
3	70	10	0,055 (0,543)	0,1	0,045	
4	60	12	0,04 (0,395)	0,1	0,06	
5	50	12	0,03 (0,296)	0,1	0,07	
6	40	13	0,025 (0,247)	0,1	0,075	
7	30	13	0,02 (0,197)	0,1	0,08	
8	20	13	0,02 (0,197)	0,1	0,08	
9	15	14	0,015 (0,148)	0,1	0,085	

Таблица 2.4 – Серия опыта с заполнением резервуара на 60 л

Номер измерения	Температура жидкости, °С	Температура воздуха, °С	Давление в резервуаре, МПа (атм)	Давление атмосферное, МПа	ΔР в резервуаре, МПа	Объем заполнения резервуара, л
	в резервуаре	окружающая				
1	90	5	0,11 (1,086)	0,1	-0,01	60
2	80	6	0,09 (0,888)	0,1	0,01	
3	70	6	0,07 (0,79)	0,1	0,03	
4	60	6	0,06 (0,592)	0,1	0,04	
5	50	6	0,05 (0,493)	0,1	0,05	
6	40	6	0,04 (0,395)	0,1	0,06	
7	30	6	0,035 (0,345)	0,1	0,065	
8	20	7	0,03 (0,296)	0,1	0,07	
9	15	7	0,03 (0,296)	0,1	0,07	

В таблице 2.5 представлены результаты проведенного испытания по определению вакуума в резервуаре со степенью заполнения 39 л.

Таблица 2.5 – Серия опыта с заполнением резервуара на 39 л

Номер измерения	Температура жидкости, °С	Температура воздуха, °С	Давление в резервуаре, МПа (атм)	Давление атмосферное, МПа	ΔР в резервуаре, МПа	Объем заполнения резервуара, л
	в резервуаре	окружающая				
1	90	8	0,11 (1,086)	0,1	-0,01	39
2	80	9	0,09 (0,888)	0,1	0,01	
3	70	10	0,075 (0,74)	0,1	0,025	
4	60	11	0,065 (0,642)	0,1	0,035	
5	50	12	0,055 (0,543)	0,1	0,045	
6	40	13	0,045 (0,444)	0,1	0,055	
7	30	13	0,04 (0,395)	0,1	0,06	
8	20	13	0,035 (0,345)	0,1	0,065	
9	15	13	0,035 (0,345)	0,1	0,065	

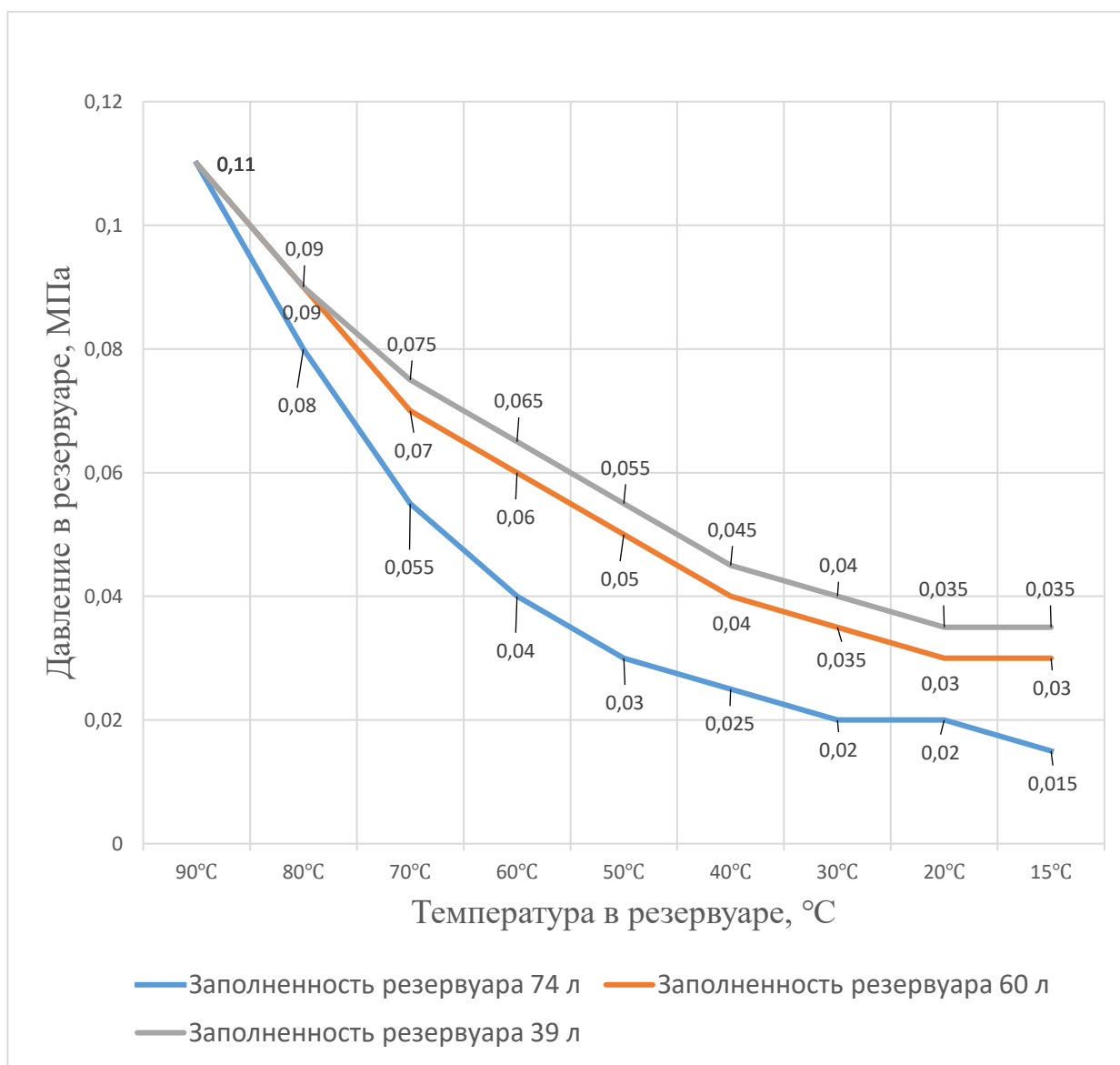


Рисунок 2.13 – Зависимость изменения давления от температуры в резервуаре с течением времени

Из результатов следует, что увеличение объема жидкости в резервуаре при испытаниях, увеличивает разреженность в резервуаре.

Для наглядности представлены полученные данные в форме диаграмм и приведены ниже (рисунок 2.13 «Зависимость изменения давления от температуры в резервуаре с течением времени», Приложение А).

2.5 Верификация экспериментальных данных

Полученные значения натурного эксперимента по определению величины вакуума. В связи с тем, что имевшиеся данные требуют подтверждения, необходим дополнительный источник, подтверждающий достоверность выводов по проведённому эксперименту. В качестве такого источника могут служить исследования, основной или дополнительной целью которых явилось изучение процессов изменения давления внутри котлов вагонов-цистерн.

Моделированием теплофизических процессов внутри котлов вагонов-цистерн занимались многие отечественные учёные [37-41, 54, 66-68, 77, 83, 83-89].

Отметим и другие источники, например, С. А. Федоров, к.т.н., заместитель исполнительного директора, директор дирекции проектирования грузовых вагонов ООО «Всесоюзный научно-исследовательский центр транспортных технологий» (ВНИЦТТ), М. В. Агинских, начальник отдела «Цистерны» ВНИЦТТ, а также А. В. Калугин, руководитель конструкторской группы ВНИЦТТ, утверждают, что «...При капитальном ремонте вагонов-цистерн зачастую требовалась 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...» [83].

2.6 Выводы по разделу 2

В рамках выполнения данной части исследования был проведён натурный эксперимент по определению величины вакуума в серии опытов в тонкостенном тормозном резервуаре.

1 Проведение натурного эксперимента подтверждает гипотезу о расхолаживающем влиянии вакуума на тонкостенные оболочки котлов железнодорожных вагонов-цистерн.

2 На основании проведенного физического эксперимента была получена закономерность: увеличение объема груза (жидкости) в вагоне цистерне дополнительно увеличивает состояние разряжения внутри котла вагона-цистерны.

3 Достоверность полученных экспериментальных результатов подтверждается ранее проведёнными исследованиями по аналогичной тематике. [37-41, 83].

4 Результаты натурного эксперимента учтены в созданной программе, следовательно, может быть оценено влияние предлагаемой величины вакуума на величину вакуума, возникающую внутри котла вагона-цистерны при возникновении в нем вакуума.

3 ТЕПЛОВАЯ (МАТЕМАТИЧЕСКАЯ) МОДЕЛЬ КОТЛА ВАГОНА ЦИСТЕРНЫ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ПАРАМЕТРАХ ДАВЛЕНИЯ

Рассмотрим вагоны-цистерны для перевозки нефтепродуктов (нефтебензиновые цистерны). Унифицированные узлы и элементы нефтебензиновых цистерн включают люк-лаз для загрузки продукта и технического обслуживания и доступа внутрь котла, сливной прибор для слива груза, предохранительный клапан для ограничения избыточного давления в котле при повышении температуры груза и предохранительно-впускной клапан для защиты котла от вакуума при охлаждении груза и конденсации его паров. В настоящее время цистерны выпускаются с предохранительно-впускным клапаном, в конструкции которого объединены предохранительный клапан избыточного давления и предохранительно-впускной (вакуумный) клапан. Нижний лист котла цистерны имеет уклон к сливному прибору для обеспечения полного слива продукта.

Восьмиосные цистерны имеют по два люка-лаза, сливных прибора и предохранительно-впускных клапана.

Люк-лаз диаметром 570 мм герметично закрывается крышкой. В новых конструкциях применяется крышка с ригельным запором, включающим ригель, откидной болт и предохранительную скобу. Эта конструкция обеспечивает надежность уплотнения, удобство и безопасность обслуживания. В горловине люка приварены сегменты 3 для контроля уровня наполнения и прикреплена внутренняя лестница для доступа обслуживающего персонала внутрь котла.

При нахождении цистерны в эксплуатации на путях ОАО «РЖД» люк-лаз всегда должен быть опломбирован. Пломбирование крышки люка производится перед каждым выходом цистерны на пути ОАО «РЖД» как в груженом, так и в порожнем состояниях.

Все цистерны данной группы оборудуются универсальным сливным прибором. Вороток, шарнирно соединенный с винтовой штангой управления сливным прибором, расположен в горловине люка-лаза [30, 32, 36, 78, 85].

Предохранительно-впускной клапан имеет отдельную регулировку усилия затяжки пружины клапана максимального давления и пружины вакуумного клапана. 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.

Для обеспечения безопасности обслуживающего персонала при эксплуатации и ремонте цистерн [60, 63, 66, 68, 74-77, 85]:

1 Доступ людей внутрь порожнего котла при осмотре или ремонте допускается только с разрешения ответственного лица, подтвердившего отсутствие вредных и взрывоопасных паров внутри котла;

2 доступ внутрь котла при наличии в нем паров перевозимого продукта должен производиться с разрешения ответственного лица с использованием шлангового противогаза и спасательного пояса под постоянным наблюдением за работающим в котле;

3 любые сварочные работы на цистерне должны производиться только после очистки, промывки и пропарки котла;

4 курить и применять открытый огонь вблизи цистерны категорически запрещается.

Ряд аварий с пожарами и взрывами, произошедшими с железнодорожными цистернами для транспортировки нефтепродуктов, свидетельствуют о высокой степени химической, пожарной и взрывоопасности процессов перевозки этих веществ [2, 4, 5, 24-27, 51, 57, 59, 61, 62, 64, 66, 68-72, 77, 79, 93, 98, 100, 114]. Необходимый уровень пожаровзрывобезопасности промышленных объектов регламентируется основополагающими стандартами [24, 26]. Для транспортировки железнодорожным транспортом вагонов-цистерн с нефтепродуктами разработаны отраслевые правила [25, 32]. Часто аварии вагонов-цистерн с нефтепродуктами

протекают по сценарию, когда котел вагона-цистерны подвергается аварийному тепловому воздействию, в результате чего возможен взрыв резервуара с последствиями, которые подчас являются катастрофическими. Для предотвращения подобных аварий предлагаются различные способы противопожарной защиты вагонов-цистерн [23, 87-89, 104-106]:

- увеличение толщины днища цистерн;
- оборудование цистерн защитными экранами, предохраняющие их от ударов;
- устройство дуг безопасности на люках цистерн;
- использование тепловой изоляции;
- нанесение огнезащитного покрытия на внешнюю поверхность цистерн;
- увеличение проходного сечения предохранительных устройств;

Эти и другие меры противопожарной защиты вагонов-цистерн с нефтепродуктами могут быть разработаны на основе экспериментального и теоретического исследования их поведения при аварийном тепловом воздействии. Проведение экспериментов на реальных вагонах-цистернах является опасным и дорогостоящим мероприятием, поэтому очень перспективным является проведение вычислительных экспериментов на математических моделях поведения вагонов-цистерн с нефтепродуктами при аварийном тепловом воздействии [6, 17, 37-41, 66, 68, 92, 95, 96, 101, 108, 110, 113, 115, 116]. Поэтому разработка математической модели поведения вагонов-цистерн с нефтепродуктами при аварийном тепловом воздействии, адекватно моделирующего процессы в цистерне, позволят с минимальными затратами производить поисковые многовариантные расчеты с целью выбора оптимального варианта защитных мероприятий.

3.1 Принятые допущения

В математической модели рассматривается металлический резервуар с нефтепродуктами, на внешней поверхности которого может находиться теплоизоляционный слой, состоящий из слоя негорючего, пористого материала (типа минеральной ваты) или внешняя поверхность цистерны может быть покрыта вспенивающейся огнезащитной краской. Возможна ситуация одновременного использования тепловой изоляции обоих типов. При наличии на стенках цистерны огнезащитного покрытия под действием теплового потока происходит его квази-мгновенное вспенивание с образованием теплоизоляционного слоя толщиной $\delta_{всп}$, зависящей от начальной толщины слоя покрытия и его свойств. Предполагается, что в момент времени $\tau=0$ температура нефтепродукта и температура слоев двухслойной стенки цистерны равны температуре окружающего воздуха T_0 , а на определенную часть внешней поверхности цистерны $F_{п}$ (теплоизоляционного слоя, если он есть) начинает воздействовать внешний поверхностный источник теплоты мощностью $q_{п}$ (очаг пожара). Допускается, что температуры стенок цистерны, а также температура и давление нефтепродукта не зависят от координат, температура окружающей среды считается постоянной. Теплофизические свойства металла стенок цистерны, теплоизоляционного слоя и слоя вспенивающегося огнезащитного покрытия принимаются постоянными [10, 11]. Учитывается конвективный и радиационный теплообмен на внешней поверхности цистерны с окружающим воздухом температурой T_0 . Пренебрегается массой паров нефтепродукта по сравнению с массой самого нефтепродукта. При открытии предохранительного клапана происходит истечение нефтепродукта в окружающее пространство.

3.2 Метод выбора технических средств защиты вагонов-цистерн для перевозки нефтепродуктов от аварийного теплового воздействия

Произведем обоснование выбора технических средств защиты вагонов-цистерн для перевозки нефтепродуктов от аварийного теплового воздействия.

«...С учетом принятых допущений система исходных уравнений для нефтепродукта будет иметь следующий вид: ...» [67].

Уравнение неразрывности

$$\frac{dM}{d\tau} = -G(\tau). \quad (3.1)$$

Начальное условие $M(0)=M_0$,

где M – масса нефтепродукта в цистерне; M_0 – начальная масса нефтепродукта в цистерне.

$$M_0 = \eta_n \rho_n V / 100, \quad (3.2)$$

η_n – начальная степень заполнения котла цистерны нефтепродуктом, %;

ρ_n – начальная плотность нефтепродукта при температуре налива $T_n, ^\circ\text{C}$,

$P_0=0,1 \text{ МПа}$ – давлении окружающей среды (начальное давление нефтепродукта в котле цистерны- принимается равное 1 атм).

V – объем котла цистерны.

G – массовый расход нефтепродукта, истекающий из предохранительного клапана проходного сечения S

$$G=0, \quad (3.3)$$

при $\Delta P \leq 0,14 \text{ МПа}$ – предохранительный клапан (выпускной) закрывается, формула (3);

$$G(\tau) = \mu_p \rho S \sqrt{2g\Delta P(\tau)}, \quad (3.4)$$

при $\Delta P \geq 0,15 \text{ МПа}$ – предохранительный клапан открыт (выпускной), формула (4).

Здесь μ_p – коэффициент расхода;

$\Delta P = P(\tau) - P_0$ – избыточное давление нефтепродукта в котле цистерны, МПа;
 P – давление нефтепродукта в котле цистерны, МПа;

$P_0 = 0,1$ МПа – давление окружающей среды (начальное давление нефтепродукта в котле цистерны – принимается равным 1 атм).

Уравнение энергии для нефтепродукта примет вид:

$$c_p \frac{d(M \cdot T)}{d\tau} = -c_p G T + k F_3 (T_0 - T) + q_{\Pi} F_{\Pi}. \quad (3.5)$$

Начальное условие $T(0) = T_0$.

Здесь T – температура нефтепродукта в котле цистерны;

$c_p = \left(\frac{\partial i}{\partial T} \right)_p$ – удельная массовая теплоемкость нефтепродукта;

$F_3 = 0,5 \cdot (F_{\text{в}} + F_{\text{н}})$ – эквивалентная площадь котла цистерны;

$F_{\text{в}}$ – площадь внутренней поверхности котла цистерны;

$F_{\text{н}}$ – площадь наружной поверхности цистерны;

q_{Π} – плотность теплового потока на внешней поверхности котла цистерны от очага пожара;

F_{Π} – площадь части внешней поверхности цистерны, на которую падает тепловой поток от очага пожара;

T_0 – начальная температура нефтепродукта в котле цистерны (температура окружающей среды);

k – коэффициент теплопередачи:

$$k(\tau) = 1 / (1/\alpha_{\text{в}} + \delta_3/\lambda_3 + \delta_{\text{ст}}/\lambda_{\text{ст}} + 1/\alpha_{\text{н}}), \quad (3.6)$$

где $\alpha_{\text{в}}$ – коэффициент теплоотдачи от внутренней поверхности цистерны к нефтепродукту;

δ_3 – толщина огнезащитной краски или теплоизоляции;

λ_3 – коэффициент теплопроводности огнезащитной краски или теплоизоляции;

$\delta_{\text{ст}}$ – толщина котла цистерны;

$\lambda_{\text{ст}}$ – коэффициент теплопроводности стали стенки котла цистерны;

α_n – суммарный коэффициент теплоотдачи с части внешней поверхности цистерны (конвекция и излучение) к окружающему воздуху.

$$\alpha_n = \alpha_{e,0} + \sigma_0 \left[\left(\frac{T + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_0 + 273}{100} \right)^4 \right] / (T - T_0), \quad (3.7)$$

$$\alpha_{e,0} = 0,105 \left[\frac{\lambda_B \rho_B^2 \beta_B c_B g (T - T_0)}{\mu_B} \right]^{(1/3)}, \quad (3.8)$$

$\alpha_{B,0}$ – коэффициент конвективной теплоотдачи от поверхности цистерны к окружающему воздуху [10, 33-37];

σ_0 – коэффициент излучения абсолютно черного тела;

β_B – коэффициент объемного расширения воздуха;

μ_B – коэффициент динамической вязкости воздуха;

Для определения α_B – коэффициента теплоотдачи от нефтепродукта к поверхности котла цистерны использовалась следующая модель теплообмена:

Коэффициент теплоотдачи α_B вычисляется для естественной конвекции в большом объеме по формулам [14]:

Критерий Нуссельта для вертикальной пластины:

$$Nu = 0,75(Gr_l \cdot Pr)^{1/4}, \quad (3.9)$$

критерий Нуссельта для горизонтальной пластины:

$$Nu = 0,135(Gr_l \cdot Pr)^{1/3}, \quad (3.10)$$

где Gr_l – критерий Грасгофа при определенном размере поверхности потока,

Pr – критерий Прандтля.

Критерий Грасгофа определяем по формуле:

$$Gr = \frac{g \beta l^3 \Delta t}{\nu^2}, \quad (3.11)$$

где g – ускорение силы тяжести;

β – коэффициент температурного расширения воздуха;

l – определяющий размер поверхности в направлении потока воздуха;

ν – коэффициент кинематической вязкости;

Δt – изменение температуры;

$$\Delta t = T_{\text{ст}} - T_{\text{ж}}; \quad (3.12)$$

$T_{\text{ст}}$ – температура стенки;

$T_{\text{ж}}$ – температура жидкости.

Критерий Прандтля определяем по формуле:

$$Pr = \frac{\nu}{a}, \quad (3.13)$$

где a – величина коэффициента конвективного теплообмена.

Давление и плотность нефтепродукта в котле цистерны будем рассчитывать следующим образом. Сначала находим степень заполнения котла цистерны в определенный момент времени:

$$\eta(\tau) = \frac{M(\tau)}{V\rho[T(\tau), \Delta P(\tau)]} 100\% \quad (3.14)$$

Если $\eta(\tau) < 100\%$, то происходит свободное увеличение объема нефтепродукта в котле цистерны при нулевом избыточном давлении при повышении температуры и плотность нефтепродукта рассчитывается по формуле из работы [15]:

$$\rho(\tau) = \rho[T(\tau), \Delta P = 0] = \rho_{15} \exp\{-\beta_{15}(T - 15)[1 + 0,8\beta_{15}(T - 15)]\}, \quad (3.15)$$

где ρ_{15} – плотность нефтепродукта при 150 °С [10];

β_{15} – коэффициент объемного расширения, рассчитывается по формуле:

$$\beta_{15} = \frac{k_0 + k_1 \rho_{15}}{\rho_{15}^2} + k_2, \quad (3.16)$$

значения коэффициентов k_0, k_1, k_2 берутся из таблицы 1 [10]:

$$\Delta P(\tau) = 0. \quad (3.17)$$

Если $\eta(\tau) \geq 100\%$, плотность нефтепродукта рассчитывается по формуле

$$\rho(\tau) = M(\tau)/V. \quad (3.18)$$

Избыточное давление нефтепродукта в котле цистерны $P(\tau)$ в зависимости от температуры $T(\tau)$ и плотности $\rho(\tau)$ определяем по формуле (11) согласно работе [10]:

$$\Delta P(\tau) = \Delta P[T(\tau), \rho(\tau)] = \frac{\rho - \rho_{15} \exp\{-\beta_{15}(T - 15)[1 + 0,8\beta_{15}(T - 15)]\}}{\rho \cdot \gamma_T}, \quad (3.19)$$

где γ_T – коэффициент сжимаемости [10].

$$\gamma_T = 10^{-3} \cdot \exp(-1,62080 + 0,21592 \cdot 10^{-3}T + \frac{0,87096 \cdot 10^6}{\rho_{15}^2} + \frac{4,2092 \cdot 10^3}{\rho_{15}^2}T). \quad (3.20)$$

Уравнение можно записать в следующем виде:

$$\frac{d(M \cdot T)}{d\tau} + A(\tau)T = B(\tau), \quad (3.21)$$

$$T(0)=T_0, \quad (3.22)$$

где

$$A(\tau) = \frac{c_p G(\tau) + k(\tau) F_3}{c_p}, \quad (3.23)$$

$$B(\tau) = \frac{q_{\Pi} F_{\Pi} + k(\tau) F_3 T_0}{c_p}. \quad (3.24)$$

Полученные уравнения будут использованы для решения их с помощью численного метода.

3.3 Численный метод

Решение системы уравнений (3.1-3.24) будем производить численным методом.

Поставим в соответствие кусочно-непрерывным функциям $M(\tau), G(\tau), \rho(\tau), \Delta P(\tau), T(\tau)$ сеточные функции. Для этого введем сеточную функцию времени:

$$\tau^n = \Delta\tau \cdot n, n=0,1,2,3,\dots,(N-1), N. \quad (3.25)$$

Где $\Delta\tau$ -временной интервал. Тогда можно записать:

$$M(\tau^n) \rightarrow M^n, \quad (3.26)$$

$$G(\tau^n) \rightarrow G^n, \quad (3.27)$$

$$\rho(\tau^n) \rightarrow \rho^n, \quad (3.28)$$

$$\Delta P(\tau^n) \rightarrow \Delta P^n, \quad (3.29)$$

$$T(\tau^n) \rightarrow T^n. \quad (3.30)$$

Для численного решения обыкновенных дифференциальных уравнений будем использовать явно-неявный конечно-разностный метод с итерациями.

Погрешность аппроксимации исходных обыкновенных дифференциальных уравнений $O(\Delta\tau)$.

Уравнение (1) и (13) запишем в следующем виде

$$M^{n+1} = M^n - 0,5 \cdot \Delta\tau \cdot (G^n + \tilde{G}^{n+1}), \quad (3.30)$$

$$T^{n+1} = \frac{[1+0,5\Delta\tau A(\tau^n)]M^n \cdot T^n + 0,5\Delta\tau [B(\tau^n) + \tilde{B}(\tau^{n+1})]}{\tilde{M}^{n+1}[1+0,5\Delta\tau \tilde{A}(\tau^{n+1})]} \quad (3.31)$$

$$n=1,2,3,\dots, N. \quad (3.32)$$

В качестве первого приближения для всех значений сеточных функций типа $\tilde{F}(\tau^{n+1})$ берется значение F^n .

Расчет продолжается до тех пор, пока не будут выполняться условия.

$$\left| \frac{F^{n+1} - \tilde{F}(\tau^{n+1})}{F^{n+1}} \right| \leq \varepsilon. \quad (3.33)$$

Для всех функций F^{n+1} .

Таким образом составлена система исходных уравнений для описания тепловой модели котла вагона цистерны при различных параметрах давления.

3.4 Алгоритм расчета

Исходные данные:

V , - объем котла цистерны m^3 ;

F_ε , - площадь внутренней поверхности котла цистерны размерность m^2 ;

F_n , - площадь наружной поверхности цистерны m^2 ;

T_0 , - начальная температура нефтепродукта в котле цистерны (температура окружающей среды) $^\circ C$;

F_{II} , - площадь части внешней поверхности цистерны, на которую падает тепловой поток от очага пожара;

γ_T — коэффициент сжимаемости;

q_{II} , - плотность теплового потока на внешней поверхности котла цистерны от очага пожара kBt/m^2 ;

η_n , начальная степень заполнения котла цистерны нефтепродуктом, %;

T_n , температура налива °С;

S , проходного сечение предохранительного клапана;

μ_p , - коэффициент расхода;

c_g , - удельная массовая теплоемкость нефтепродукта;

δ_3 , – толщина огнезащитной краски или теплоизоляции;

λ_3 , – коэффициент теплопроводности огнезащитной краски или теплоизоляции;

δ_{ct} , - толщина котла цистерны;

λ_{ct} , - коэффициент теплопроводности стали стенки котла цистерны;

$\alpha_{в,0}$ – конвекция;

λ_B - Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К);

β_B коэффициент объемного расширения воздуха 1/Кельвин;

c_B - теплоемкость воздуха Дж/(кг·К);

g - 9,8 м/с² ускорение свободного падения;

α_n - излучение;

λ_g – коэффициент теплопроводности нефтегруза при определенной температуре Вт/(м·К);

ρ_g – плотность нефтегруза при 293 К, кг/м³;

R_k – радиус котла вагон цистерны, м;

g – ускорение свободного падения;

β_g – коэффициент объемного расширения нефтепродукта 1/Кельвин;

μ_g - коэффициент динамической вязкости нефтепродуктов $\frac{Н*с}{м^2} = Па*с$;

c_g – удельная теплоемкость нефтепродукта Дж/(кг·К);

β_B , – коэффициент объемного расширения воздуха;

μ_B , - коэффициент динамической вязкости воздуха;

ρ_{15} , - плотность нефтепродукта при 15 °С;

β_{15} – коэффициент объемного расширения нефти, нефтепродуктов и смазочных масел при температуре 15 °C, °C⁻¹;

k_0 , - коэффициент для расчета коэффициент объемного расширения нефти, согласно ГОСТ Р 50.2.076-2010 [29];

k_1 , - коэффициент для расчета коэффициент объемного расширения нефти, согласно ГОСТ Р 50.2.076-2010 [29];

k_2 , - коэффициент для расчета коэффициент объемного расширения нефти, согласно ГОСТ Р 50.2.076-2010 [29];

$$\tau = 0; n=0, \quad (3.34)$$

$$F_9 = 0,5 \cdot (F_B + F_H), \quad (3.35)$$

$$\beta_{15} = \frac{k_0 + k_1 \rho_{15}}{\rho_{15}^2} + k_2, \quad (3.36)$$

$$\rho = \rho_{15} \exp\{-\beta_{15}(T_H - 15)[1 + 0,8\beta_{15}(T_H - 15)]\}, \quad (3.37)$$

$$\text{Для } M^n = \eta_H \rho \quad V/100 \quad \text{принимаем } M^{n+1} = M^n, G^{n+1} = 0, G^n = G^{n+1}, \quad (3.38)$$

$$\text{Температуру при } \Delta P = 0 \text{ принимаем } T_{n+1}=T_0; Tn=T_0; \tilde{T}^{n+1} = T^{n+1}, \quad (3.39)$$

$$1. \tau = \tau + \Delta\tau; n= n+1, \quad (3.40)$$

Если $\tau \geq \tau_K$ то конец расчета.

$$2. \text{ Если } \Delta P < 0,14 \text{ и } G^n > 0, \text{ то } G^{n+1} = 0, \quad (3.41)$$

$$\text{Если } \Delta P \geq 0,15 \text{ и } G^n = 0, \quad (3.42)$$

то $G^{n+1} = 0$ при $\Delta P \geq 0,15$ МПа-предохранительный клапан открыт

$$G^{n+1} = \mu_p \rho S \sqrt{2g\Delta P}, \quad (3.43)$$

$$M^{n+1} = M^n - 0,5 \cdot \Delta\tau \cdot (G^n + G^{n+1}), \quad (3.44)$$

$$\eta = \frac{M^{n+1}}{V\rho} 100\%, \quad (3.45)$$

Если $\eta < 100$ то

$$\rho = \rho_{15} \exp\{-\beta_{15}(\tilde{T}^{n+1} - 15)[1 + 0,8\beta_{15}(\tilde{T}^{n+1} - 15)]\}, \Delta P = 0, \quad (3.46)$$

перейти 3 иначе

$$\gamma_T = 10^{-3} \cdot \exp(-1,62080 + 0,21592 \cdot 10^{-3} \tilde{T}^{n+1} + \frac{0,87096 \cdot 10^6}{\rho_{15}^2} + \frac{4,2092 \cdot 10^3}{\rho_{15}^2} \tilde{T}^{n+1}), \quad (3.47)$$

$$\rho = M^{n+1}/V, \quad (3.48)$$

$$\Delta P = \frac{\rho - \rho_{15} \exp\{-\beta_{15}(\tilde{T}^{n+1} - 15)[1 + 0,8\beta_{15}(\tilde{T}^{n+1} - 15)]\}}{\rho \cdot \gamma_T}, \quad (3.49)$$

3. Считаем $\alpha_{B,0} = 0,105 \left[\frac{\lambda_B \rho_B^2 \beta_B c_B g(\tilde{T}^{n+1} - T_0)}{\mu_B} \right]^{(1/3)}, \quad (3.50)$

$$\alpha_H = 0,184 \frac{\lambda_g}{2R_K} \left[\frac{\rho_g^2 \beta_g c_g g(\tilde{T}^{n+1} - T_0)}{\lambda_g \mu_g} \right]^{0,33}, \quad (3.51)$$

$$\lambda_g = \frac{156,6}{\rho_{293}} [1 - 0,00047 * T], \quad (3.52)$$

$$k = 1/(1/\alpha_B + \delta_3/\lambda_3 + \delta_{CT}/\lambda_{CT} + 1/\alpha_H), \quad (3.53)$$

$$A = \frac{c_p \tilde{G}^{n+1} + k F_3}{c_p}; B = \frac{q_{\Pi} F_{\Pi} + k F_3 \cdot T_0}{c_p}, \quad (3.54)$$

$$\tilde{G}^{n+1} = \mu_p \rho S \sqrt{2g \Delta P(\tau)}, \quad (3.55)$$

G^{n+1} – массовый расход нефтепродукта, истекающий из предохранительного клапана проходного сечения S в конкретный промежуток времени

G – массовый расход нефтепродукта, истекающий из предохранительного клапана проходного сечения S.

$$G=0, \quad (3.56)$$

при $\Delta P \leq 0,14$ МПа-предохранительный клапан закрывается, формула (3.56);

$$G(\tau) = \mu_p \rho S \sqrt{2g \Delta P(\tau)}, \quad (3.57)$$

при $\Delta P \geq 0,15$ МПа-предохранительный клапан открыт, формула (3.57).

Здесь μ_p – коэффициент расхода;

$\Delta P = P(\tau) - P_0$ – избыточное давление нефтепродукта в котле цистерны, МПа;

P- давление нефтепродукта в котле цистерны, МПа;

$P_0 = 0,1$ МПа – давление окружающей среды (начальное давление нефтепродукта в котле цистерны - принимается равным 1 атм).

Число Рейнольдса (Re) по формуле:

$$Re = \frac{d_0 \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot h}}{v_0} \quad (3.58)$$

Если $n = 1$, то $A_1 = A$ и $B_1 = B$, (3.59)

$$T^{n+1} = \frac{[1 + 0,5\Delta\tau A_1] M^n \cdot T^n + 0,5\Delta\tau [B_1 + B]}{M^{n+1} [1 + 0,5\Delta\tau A]}, \quad (3.60)$$

Если $\left| \frac{T^{n+1} - \tilde{T}^{n+1}}{T^{n+1}} \right| \leq \varepsilon$, (3.61)

то $M^n = M^{n+1}$, (3.62)

$$T^n = T^{n+1}, \quad (3.63)$$

$$G^n = G^{n+1}, \quad (3.64)$$

Печать τ ;

$$M^{n+1}; T^{n+1}; n=0. \quad (3.65)$$

Перейти на метку 1 в алгоритме:

$$\tilde{T}^{n+1} = T^{n+1}. \quad (3.66)$$

Перейти на метку 2 в алгоритме.

Использование технических средств защиты цистерн с нефтепродуктами в очаге пожара должно как минимум не допустить развитие аварии, приведшей к открытию предохранительного клапана за время, необходимое для разворачивания пожарного подразделения (1 час – станция; 4 часа – перегон [68, 110]), а по максимуму исключить такой сценарий. В качестве пассивных технических средств защиты цистерн с нефтепродуктами в очаге пожара можно использовать способы противопожарной защиты, которые применяются для вагонов-цистерн со сжиженными газами [66, 68, 84, 96-99, 103, 107, 109-117, 119-122].

Оборудование цистерн предохранительным клапаном.

Стандартный клапан:

Давление срабатывания 0,15 МПа, Условный диаметр проходного сечения $d_y = 3,2$ см;

Нанесение вспенивающего огнезащитного покрытия СГК-1 на внешнюю поверхность цистерн.

Теплофизические свойства СГК-1: плотность - $\rho=10 \text{ кг/м}^3$, теплоемкость - $c=1000 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{K)}$, коэффициент теплопроводности - $\lambda = 0,07 \text{ Вт/(м}\cdot\text{K)}$, коэффициент вспенивания – $k_{всп} \geq 5$ [6, 110];

Использование тепловой изоляции на внешней поверхности цистерн.

Теплофизические свойства изоляции (как для минеральной ваты): плотность - $\rho=150 \text{ кг/м}^3$, теплоемкость – $c = 1000 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{K)}$, коэффициент теплопроводности - $\lambda=0,047 \text{ Вт/(м}\cdot\text{K)}$;

«...В качестве аварийных ситуаций рассматриваются аварийные расчетные режимы для железнодорожных цистерн, предложенные НИЛ «Испытания вагонных конструкций» РУТ (МИИТ), руководимой д.т.н., проф. В. Н. Филипповым:

Авария 1 степени. Тепловое воздействие в течение 24 часов на верхнюю зону котла площадью 7 м^2 при мощности поверхностного теплового потока $q=100 \text{ кВт/м}^2$.

Авария 2 степени. Тепловое воздействие в течение 1 часа на нижнюю зону котла площадью 50 м^2 при мощности поверхностного теплового потока $q=100 \text{ кВт/м}^2$.

Авария 3 степени. Тепловое воздействие в течение 2 часов на всю поверхность котла при мощности поверхностного теплового потока $q=400 \text{ кВт/м}^2$.

Расчеты проводились при стандартной степени заполнения цистерн с нефтепродуктами $\eta_n = 85 \%$ и диапазоне расчетной температуры окружающего воздуха от $T_0 = -200 \text{ }^\circ\text{C}$ до $T_0 = +20 \text{ }^\circ\text{C}$. Расчетное время аварии 1 степени принималось равное 4 часам. Варьировались номинальные параметры работы предохранительного клапана, а также толщина слоя СГК-1 (после вспенивания) и теплоизоляции. Для вычисления исходной толщины слоя СГК-1 использовалась следующая формула:...

$$\delta_{исх} = \delta_{всп} / k_{всп} [1, 24, 33, 67, 110]. \quad (3.67)$$

Таким образом получены параметры, необходимые для использования тепловой изоляции на внешней поверхности котла вагона-цистерны.

3.5 Моделирование параметров предохранительного впускного клапана вагонов-цистерн для перевозки нефтепродуктов

Моделирование параметров предохранительного впускного клапана вагона-цистерны для нефтеналивных грузов будем производить для четырехосных и восьмиосных цистерн. Унифицированные узлы и элементы нефтебензиновых цистерн включают люк-лаз для загрузки продукта и технического обслуживания и доступа внутрь котла, сливной прибор для слива груза, предохранительный клапан для ограничения избыточного давления в котле при повышении температуры груза и предохранительно-впускной клапан для защиты котла от вакуума при охлаждении груза и конденсации его паров. В настоящее время цистерны выпускаются с предохранительно-впускным клапаном, в конструкции которого объединены предохранительный клапан избыточного давления и предохранительно-впускной (вакуумный) клапан. Нижний лист котла цистерны имеет уклон к сливному прибору для обеспечения полного слива продукта.

Условия и параметры расчетов:

1 Оценка давления внутри котла цистерны при неоткрывшемся впускном клапане;

2 Расчет необходимого эквивалентного диаметра проходного сечения впускного предохранительного клапана;

3 Выражение для теплового потока за счёт внешней теплоотдачи котла цистерны в окружающую среду;

4 Расчет оптимальной температуры налива светлых нефтепродуктов;

5 Расчет потерь светлых нефтепродуктов от испарения при наливке;

6 Создание алгоритма расчета давлений внутри котла вагона-цистерны;

7 Расчет давлений внутри вагона-цистерны на основании полученного алгоритма;

8 Составление графиков на основании полученных результатов расчетов.

9 Расчет устойчивости цилиндрической оболочки котла от действия внешнего давления (разряжение) производится на основании программного комплекса в среде FEMAP.

3.5.1 Оценка давления в котле вагона-цистерны процесса очистки при неоткрывшемся впускном клапане

Технологический процесс очистки нефтебензиновых цистерн проходит с предварительной пропаркой, промывкой и продувкой паром.

Предположим, что начальном состоянии (в момент времени $\tau=0$) котел цистерны заполнен насыщенным паром при давлении $p_{\Pi}=1$ атм и температуре $t''_{\Pi 0}=100$ °С, а стенки котла цистерны имеют температуру $\bar{t}_{cm}(0)=90$ °С. Затем цистерна попадает в окружающую среду с температурой воздуха $t_0=-30$ °С.

Запишем уравнение теплового баланса для средней температуры стенки котла цистерны:

$$C \frac{d\bar{t}_{cm}}{d\tau} = k_1 F_1 (t''_{\Pi} - \bar{t}_{cm}) + k_2 F_2 (t_0 - \bar{t}_{cm}), \quad (3.68)$$

при начальном условии

$$\bar{t}_{cm}(0) = t_{cm0}, \quad (3.69)$$

где теплоемкость котла цистерны – C ,

$$C = M_{cm} C_{cm}, \quad (3.70)$$

$$F_1 = \pi L d_g + 2 \cdot \frac{\pi}{4} d_g^2, \quad (3.71)$$

$$F_2 = \pi L d_n + 2 \cdot \frac{\pi}{4} d_n^2, \quad (3.72)$$

$$k_1 = 1 / (1 / \alpha_1 + \delta_{cm} / 2 \lambda_{cm}), \quad (3.73)$$

$$k_2 = 1 / (1 / \alpha_2 + \delta_{cm} / 2 \lambda_{cm}) \quad M_{cm} = \rho_{cm} F_2 \delta_{cm}, \quad (3.74)$$

F_1 - площадь внутренней поверхности котла цистерны;

F_2 - площадь наружной поверхности котла цистерны;

k_1 - коэффициент теплопередачи от стенки котла к пару;

k_2 - коэффициент теплопередачи от стенки котла к наружному воздуху;

c_{cm} - удельная теплоемкость материала стенки;

λ_{cm} - коэффициент теплопроводности материала стенки;

α_1, α_2 - коэффициенты теплоотдачи от пара к стенке котла и от стенки котла к окружающему воздуху;

t_0 - температура окружающего воздуха;

t''_{II} - температура насыщенного пара при давлении пара в котле цистерны.

Таблица 3.1 - Исходные данные для расчета (тип цистерн 15-1443, 15-1427, 15-1428 [8, 10, 11, 85, 110])

№	Физическая величина	Размерность	Величина
1	Материал стенок котла (сталь 09ГС 2)		
2	Плотность стали	кг/м ³	7800
3	Удельная теплоемкость стали	Дж/(кг·К)	480
4	Коэффициент теплопроводности стали	Вт/(м·К)	58
5	Объем цистерны	м ³	73,1
6	Внутренняя поверхность котла	м ²	108,9
7	Наружная поверхность котла.	м ²	110,1
8	Плотность насыщенного пара	кг/м ³	0,598
10	Коэффициент теплопроводности насыщенного пара	Вт/(м·К)	0,0237
11	Удельная теплоемкость насыщенного пара	Дж/(кг·К)	2,135
12	Коэффициент теплоотдачи на внутренней поверхности котла цистерны (капельная конденсация пара [3])	Вт/(м ² ·К)	362,3
13	Коэффициент теплоотдачи на наружной поверхности котла цистерны (естественная конвекция воздуха [3])	Вт/(м ² ·К)	17,6

Запишем уравнение теплового баланса для температуры насыщенного пара в котле цистерны при допущении постоянства теплоемкости пара.

$$C_{II} \frac{dt''_{II}}{d\tau} = k_1 F_1 (\bar{t}_{cm} - t''_{II}) , \quad (3.75)$$

при начальном условии

$$t''_{II}(0) = t''_{II0} . \quad (3.76)$$

Где

$$C_{II} = V_{\rho} , \quad (3.77)$$

C_{II} - теплоемкость насыщенного пара в котле цистерны.

Оценка показывает, что $C \gg C_{II}$. В этом случае темп расхолаживания цистерны будет в основном определяться температурным уровнем стенок котла цистерны. Можно предположить,

$$\frac{dt''_{II}}{d\tau} \approx \frac{d\bar{t}_{cm}}{d\tau} . \quad (3.78)$$

Сложим уравнения (3.68) и (3.75), получим

$$(C + C_{II}) \frac{d\bar{t}_{cm}}{d\tau} = k_2 F_2 (t_0 - \bar{t}_{cm}) , \quad (3.79)$$

Решение уравнения (3.79) с начальным условием $\bar{t}_{cm}(0) = t_0$

имеет вид:

$$\bar{t}_{cm} = t_0 + (t_{cm0} - t_0) \exp(-\tau / \tau_P) , \quad (3.80)$$

где

$$\tau_P = \frac{C + C_{II}}{k_2 F_2} . \quad (3.81)$$

Подставим зависимость (3.80) в уравнение (3.75). Решив его, можно получить зависимость изменения температуры насыщенного пара в котле цистерны

$$t''_{II}(\tau) = t_0 + \frac{\tau_P}{\tau_{II}} (t_{cm0} - t_0) \exp(-\tau / \tau_{II}) + \left[t''_{II0} - t_0 - \frac{\tau_P}{\tau_{II}} (t_{cm0} - t_0) \right] \exp(-\tau / \tau_{II}) , \quad (3.82)$$

где

$$\tau_{\Pi} = \frac{C_{\Pi}}{k_1 F_1}; \quad (3.83)$$

$$\tau_{\Pi\Pi} = \frac{\tau_{\Pi}\tau_P}{\tau_P - \tau_{\Pi}}; \quad (3.84)$$

$$\tau_{\Pi\Pi} = \frac{\tau_{\Pi}\tau_{\Pi\Pi}}{\tau_{\Pi\Pi} - \tau_{\Pi}}. \quad (3.85)$$

Для определения изменения давления насыщенного пара в котле цистерны воспользуемся зависимостью $P''_{\Pi} = f(t''_{\Pi})$, представленной в [2]. Результаты расчета приведены в таблице 3.2.

Таблица 3.2 - Изменение во времени температуры и давления насыщенного пара в котле цистерны при расхолаживании

$\tau, \text{мин}$	0	1	3	5	10	15	20
$t''_{\Pi}, ^\circ\text{C}$	100	90,6	82,8	77,0	63,7	52,0	41,8
$P''_{\Pi}, \text{атм}$	1	0,71	0,53	0,42	0,22	0,14	0,08

Таким образом, на основании расчетов получена зависимость изменения давления и температуры с течением времени.

3.5.2 Выбор проходного сечения впускного предохранительного клапана нефтебензиновых цистерн

При некоторых технологических операциях, таких как слив нефтепродукта или очистка котла цистерны от их остатков, возможно образование вакуума в котле цистерны. Это явление возникает из - за того, что при этих технологических операциях котел цистерны разогревается до 80 - 90 °С, а затем в закрытом состоянии может попасть в среду с более низкой температурой. При понижении

давления в котле цистерны котёл цистерны может терять устойчивость, приводящую к значительным деформациям стенок котла.

Для предотвращения этого явления котлы нефтебензиновых цистерн оборудуют впускным предохранительным клапаном.

Для оценки проходного сечения впускного предохранительного клапана будем исходить из предположения, что поток теплоты, вносимый воздухом через предохранительный клапан, должен компенсировать тепловой поток за счёт внешней теплоотдачи котла цистерны в окружающую среду.

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

$$Q_B = c_{PB} \cdot G \cdot \chi \cdot (t_T - t_O) \quad (3.86)$$

где c_{PB} - удельная изобарная теплоёмкость воздуха;

t_T - температура технологического процесса;

t_O - температура окружающей среды;

$\chi = 0,1 \div 1$ - коэффициент, характеризующий степень нагрева поступающего воздуха;

G - массовый расход воздуха через впускной предохранительный клапан;

$$G = \mu \cdot S \sqrt{2\rho_B \cdot \Delta P}, \quad (3.87)$$

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.

3.5.3 Выражение для теплового потока за счёт внешней теплоотдачи котла цистерны в окружающую среду

Для расчета теплового потока используем формулу:

$$Q_{CP} = k \cdot F \cdot (t_T - t_o), \quad (3.89)$$

здесь k - коэффициент теплопередачи:

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta_{CT}}{\lambda_{CT}} + \frac{1}{\alpha_2}} \quad (3.90)$$

α_1 - коэффициент теплоотдачи от внутренней поверхности котла цистерны;

α_2 - коэффициент теплоотдачи от внешней поверхности котла цистерны;

$\lambda_{CT}, \delta_{CT}$ - 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.

$$Q_B = Q_{CP} \quad (3.91)$$

Из уравнений (3.86 – 3.91) получим формулу для оценки эквивалентного диаметра D проходного сечения впускного предохранительного клапана:

$$D = \sqrt{\frac{4k \cdot F}{\pi c_{PB} \cdot \chi \cdot \mu \cdot \sqrt{2\rho_B \cdot \Delta P}}} \quad (3.92)$$

Расчет произведем для цистерн моделей 15-1443, 15-1427, 15-1422, для следующих характеристик предохранительного клапана: $\Delta P = 0,2 \cdot 10^5 \text{ Па}$, $\mu = 0,7$ и температуры окружающей среды $t_o = -30^\circ\text{C}$.

Для определения коэффициентов теплоотдачи воспользуемся критериальными уравнениями для естественной конвекции.

Результаты расчета представлены в таблице 3.3:

Таблица 3.3 Расчета эквивалентного диаметра проходного сечения впускного предохранительного клапана представлены в таблице:

χ $D, м$	Степень нагрева воздуха
0,269	0,1
0,120	0,5
0,085	1,0

Для получения уточненной количественной оценки D необходимо проведение специальных экспериментальных исследований, либо построение нестационарных математических моделей более высокого уровня, с целью уточнения χ - коэффициента, характеризующего степень нагрева воздуха, поступающего в цистерну через клапан [3, 19, 63, 110].

3.6 Моделирование процесса возникновения разряжения внутри котла вагона цистерны при транспортировке груза.

Расчет степени заполнения цистерны

Транспортировка нефтепродуктов производится специализированными вагонами-цистернами. На данный момент существует большое разнообразие специализированных цистерн для данного вида транспортировок. Перед началом транспортировки нефтепродуктов железнодорожной цистерной, необходимо провести мероприятия по наливу цистерны. Прежде всего необходимо рассчитать степень заполнения цистерны. Степень заполнения котла вагона-цистерны указывается в руководство по эксплуатации вагона цистерны.

Согласно приказу Минтранса России от 29 июля 2019 года № 245 утверждены правила перевозок железнодорожным транспортом грузов наливом в вагонах цистернах [70].

Согласно приказу Минтранса России от 29 июля 2019 года № 245 п. 16.1. определяется коэффициент объемного расширения жидкости в интервале температур от t_n до t_m [70]

$$\alpha = \frac{\rho_{15} - \rho_{50}}{35 \cdot \rho_{50}}, \quad (3.93)$$

t_m - максимальная температура жидкости при транспортировке, °С;

t_n - температура жидкости при наливе, °С;

П. 16.2. Приказ Минтранса России от 29 июля 2019 года № 245 для ядовитых или коррозионных веществ (воспламеняющихся или невоспламеняющихся), перевозимых в вагонах-цистернах с вентиляционной системой или предохранительными клапанами (в том числе, если перед ними установлена разрывная мембрана),

$$\eta = \frac{98}{1 + \alpha(t_m - t_n), \%}. \quad (3.94)$$

Произведем расчет степень заполнения нефтебензиновой цистерны 15-9993 с заполнением грузом - Бензин АИ-92.

$$\eta = \frac{98}{1 + \alpha(t_m - t_n), \%} = 94,82 \%. \quad (3.95)$$

Согласно п.6.3 ГОСТа 1510—2022, степень заполнения тары для нефти и жидких нефтепродуктов должна быть не более 95 % [25].

3.6.1 Расчет оптимальной температуры налива светлых нефтепродуктов

Нефтепродукты имеют различные теплофизические свойства, такие как плотность, температуру самовоспламенения и др. Исходя из этого в расчетах необходимо учитывать и такой параметр, как оптимальная температура налива светлых нефтепродуктов.

«...Для обеспечения рационального использования грузоподъемности и вместимости цистерны при перевозке ряда светлых нефтепродуктов и особенно автомобильных бензинов и авиационных керосинов, а также для предотвращения аварийных ситуаций необходимо правильно выбирать оптимальную температуру налива.

При расчете оптимальной температуры налива необходимо учитывать:

- свойства нефтепродуктов (плотность, температурное расширение, испарение, взрывоопасность);
- температуру воздуха в пункте налива, в пути следования и в пункте слива;
- характеристику цистерны (наличие предохранительного клапана и удельной объем котла, м³/т, (особенно если он больше единицы)).

Температура груза в момент налива в цистерну в пункте отправления достаточно часто превышает 70-90 °С (максимально допустимая 100 °С), что часто связано с коротким периодом хранения нефтепродуктов после завершения технологических процессов производства.

В процессе перевозки температура груза в цистерне изменяется в зависимости от температуры окружающего воздуха и ее суточных колебаний, а также под воздействием таких климатических факторов как солнечная радиация, сильный ветер, атмосферные осадки. При этом необходимо отметить, что верхняя зона нефтепродуктов в цистерне (около 10% общего объема) нагревается выше максимальной температуры окружающего воздуха на 8-10 °С вследствие солнечной радиации. Нижняя зона (20 % от объема) подвержена менее сильным температурным колебаниям, так как на нее оказывает воздействие только наружный воздух. В центральной части (70 % от объема) температура меняется незначительно и может быть принята в качестве температурного режима всей массы груза ...» [47, 50].

Максимальную температуру центральной части нефтепродукта определяют по эмпирической формуле:

$$t_{MAX} = 0,87 \cdot t_{MAX}^B, \quad (3.96)$$

где t_{MAX} - максимальная температура окружающего воздуха, °С;

0,87 – коэффициент, учитывающий климатические условия и дальность перевозки.

Массу груза, налитого в цистерну при начальной температуре t_{OT} и при максимальной температуре t_{MAX} в пути следования можно определить по формуле

$$Q_{OT(MAX)} = V_{MAX}[\rho_{20} - (t_{OT(MAX)} - 20) \cdot \alpha], \quad (3.97)$$

где V_{MAX} - максимально допустимый объем груза в цистерне, зависит от типа цистерны и свойств груза, м³;

ρ_{20} - плотность нефтепродукта при температуре 20 °С, т/м³;

$t_{OT(MAX)}$ - соответственно температура налива груза, предложенная отправителем и максимальная температура в пути следования, °С;

α - температурная поправка плотности, т/(м³·°С).

Произведем расчет максимальной температуры центральной части нефтепродукта, а также массу груза, налитого в цистерну при начальной и максимальной температурах в пути следования. Расчеты представлены в таблице 3.4.

Таблица 3.4 Расчета максимальной температуры центральной части нефтепродукта, а также массу груза, налитого в цистерну при начальной и максимальной температурах в пути следования:

Модель вагона-цистерны для транспортировки светлых нефтепродуктов	15-9993	15-9543
$t_{MAX}, ^\circ\text{C}$	43,5	43,5
$Q_{OT}, \text{кг}$	62 352,5	60 652
$Q_{MAX}, \text{кг}$	62 357	60 655,1

Таким образом получены данные по максимальным температурам нефтегруза при наливе в котлы вагонов-цистерн моделей 15-9993 и 15-9543.

3.6.2 Расчет потерь светлых нефтепродуктов от испарения при налив

Налив цистерн может производиться следующими способами: открытой струей (патрубок опущен на некоторую часть диаметра котла цистерны), закрытой струей (конец патрубка находится на расстоянии 0,1 м от нижней образующей котла).

Потери от испарения в процессе налива рассчитываются по формуле:

$$\Pi = K \cdot V_{\text{ц}} \cdot \rho_{\text{п}} \cdot P_s / P_r, \quad (3.98)$$

где $V_{\text{ц}}$ – объем налитого продукта, м³;

P_s – давление насыщенных паров нефтепродукта, зависящее от температуры, Па;

P_r – давление в газовом пространстве (атмосферное давление), Па;

$\rho_{\text{п}}$ – плотность паров нефтепродукта, кг/м³;

K – коэффициент, учитывающий условия налива цистерны.

Коэффициент, учитывающий условия налива, определяется при налив:

открытой струей:

$$K_{\text{от}} = (0,7 + \tau_{\text{н}}^{0,33})^{-1}, \quad (3.99)$$

закрытой струей:

$$K_{\text{зак}} = 0,85 \cdot \sqrt{\tau_{\text{н}}} / D_{\text{ц}}, \quad (3.100)$$

где $\tau_{\text{н}}$ – время налива, ч.

$D_{\text{ц}}$ – диаметр котла цистерны, м.

Давление насыщенных паров нефтепродуктов при температуре налива $t_{\text{н}}$ и паспортном давлении насыщенных паров P_{38} (при $t = 38$ °С) рассчитывается из выражения:

$$P_s = 0,98 \left(\frac{\tau_{\text{н}}}{38} \right)^{0,68} \cdot P_{38}. \quad (3.101)$$

Плотность паров нефтепродуктов составляет

$$\rho_{\text{п}} = M_{\text{в}} P_r / (R \cdot T_{\text{Г}}), \quad (3.102)$$

где $M_{\text{в}}$ – молекулярная масса нефтепродуктов, кг/моль;

R – универсальная газовая постоянная, Дж/(кмоль·К);

$T_{\text{г}}$ – абсолютная температура газового пространства, К.

Далее определяются потери при наливе открытой и закрытой струей и делаются выводы. С рассчитанными значениями потерь можно ознакомиться в таблице 3.5.

Таблица 3.5 Расчета потерь светлых нефтепродуктов от испарения при наливе

Модель вагона-цистерны для транспортировки светлых нефтепродуктов	15-9993	15-9543
Потери от испарения в процессе налива при наливе открытой струей, кг	195,8	190,4
Потери от испарения в процессе налива при наливе закрытой струей, кг	149	145,6

В результате расчета получены значения потерь светлых нефтепродуктов от испарения при наливе для цистерн моделей 15-9993 и моделей 15-9543.

3.6.3 Алгоритм расчета давлений внутри вагона-цистерны

Для некоторых переменных, представленных в расчетах используем справочники [10, 11].

η – степень заполнения цистерны нефтепродуктом 95 %;

$\rho_{\text{нп},0}$, - плотность нефтепродукта при 200 °С и давлении P_0 ;

V – объем цистерны, м³;

$\tau_0 = 20$, T_0 –температура налива нефтепродукта в цистерну, °С, К;

$M_{\text{в}}$ – молярная масса воздуха, кг/моль;

$M_{\text{нп}}$ – молярная масса нефтепродукта, кг/моль;

$m_{\text{в}}$ – масса воздуха при заполнении цистерны нефтепродуктом, кг;

$m_{\text{нп}}$ – масса нефтепродукта при заполнении цистерны, кг;

$V_{\text{нп},0}$ – начальный объем нефтепродукта при заполнении цистерны, м³;

$V_{\text{пв},0}$ – объем паровоздушной смеси при заполнении цистерны нефтепродуктом, м³;

$P_0 = 101325$ – атмосферное давление, Па;

$R=8,314$ Дж/(кмоль·К)– универсальная газовая постоянная;

$M_{\text{в}} = 0,02898$ кг/моль;

$$V_{\text{нп},0}=V \cdot \eta / 100, \quad (3.103)$$

$$V_{\text{пв},0} = V - V_{\text{нп},0}, \quad (3.104)$$

$\rho_{\text{нп},0}$ – плотность нефтепродукта рассчитывается по заданной формуле при P_0 и τ_0 ;

$$m_{\text{нп}} = V_{\text{нп},0} \cdot \rho_{\text{нп},0}, \quad (3.105)$$

$P_{\text{п.нп},0}$ – парциальное давление нефтепродукта рассчитывается по формуле Антуана при P_0 и τ_0 после заполнения цистерны (или берется из графика).

$P_{\text{п.в},0}$ – начальное парциальное давление воздуха при температуре τ_0 после заполнения цистерны нефтепродуктом

$$P_{\text{п.в},0} = P_0 - P_{\text{п.нп},0}, \quad (3.106)$$

$$m_{\text{в}} = \frac{P_{\text{п.в},0} \cdot M_{\text{в}} \cdot V_{\text{пв},0}}{R \cdot T} \quad (3.107)$$

Расчет давления в котле цистерны ведется от температуры в котле цистерны τ_0 и давления P_0 для температур $\tau_n = +30, +40$ градусов °С в сторону повышения температуры ($n=0,1,2$) и для температур $\tau_n = +10, 0, -10, -20, -30, -40$ градусов °С в сторону понижения температуры ($n=0, 1, 2, 3, 4, 5, 6$).

Стоит отметить, что расчет плотности нефтепродукта производится согласно ГОСТ Р 50.2.076—2010 [29].

$$\rho[20\text{ }^{\circ}\text{C}, 0] = \frac{\rho_{15} \exp\{-\beta_{15} (t-15)[1+0,8\beta_{15}(t-15)]\}}{1-\gamma_T \Delta P}, \quad (3.108)$$

$$\beta_{15} = \frac{k_0 + k_1 \rho_{15}}{\rho_{15}^2} + k_2, \quad (3.109)$$

Плотности по ГОСТ 8.599 —2010 [22]:

$$\rho_{TP} = \frac{k_0 + k_1 \rho_{15} \exp\{-\beta_{15} (T_H-15)[1+0,8\beta_{15} (T_H-15)]\}}{1-\gamma_T P}, \quad (3.110)$$

$$\gamma_T = 10^{-3} \cdot \exp(-1,62080 + 0,21592 \cdot 10^{-3} \tilde{T}^{n+1} + \frac{0,87096 \cdot 10^6}{\rho_{15}^2} + \frac{4,2092 \cdot 10^3}{\rho_{15}^2} \tilde{T}^{n+1}), \quad (3.111)$$

t — температура нефти, нефтепродуктов и смазочных масел, $^{\circ}\text{C}$;

P — избыточное давление нефти, нефтепродуктов или смазочных масел, МПа;

ρ_{TP} — плотность при температуре / и избыточном давлении P , кг/м^3 ;

ρ_{15} — плотность при температуре $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ и избыточном давлении равном нулю, кг/м^3 ;

ρ_{20} — плотность при температуре $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ и избыточном давлении равном нулю, кг/м^3 ;

ρ_{15} — коэффициент объемного расширения нефти, нефтепродуктов и смазочных масел при температуре $15\text{ }^{\circ}\text{C}$;

β_t — коэффициент объемного расширения при температуре, $^{\circ}\text{C}^{-1}$;

γ_t — коэффициент сжимаемости при температуре, МПа^{-1} ;

ρ_t — плотность при температуре t и избыточном давлении равном нулю, кг/м^3 ;

$\rho_{t, \text{ap}}$ — плотность при температуре t , измеренная ареометром, кг/м^3 ;

K — поправочный коэффициент на температурное расширение стекла, из которого изготовлен ареометр;

α — температурная поправка к плотности, приходящаяся на $1,0\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Алгоритм расчета для всех точек начиная с $n+1$ при:

$n=0$, температура;

$\tau_0 = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ (T_0, K),

давление $P_0 = 101325, \text{Па}$.

1. $n = n+1$

Вычисляем температуру T_{n+1} и давление $P_{n+1} = P_n$; $i=0$

2. $i=i+1$

Вычисляем $\rho_{\text{нп},n+1} (T_{n+1}, P_{n+1})$

$$V_{\text{нп},n+1} = \frac{m_{\text{нп}}}{\rho_{\text{нп},n+1} (T_{n+1}, P_{n+1})}, \quad (3.112)$$

$$V_{\text{пв},n+1} = V - V_{\text{нп},n+1}, \quad (3.113)$$

$$P_{\text{пв},n+1} = \frac{m_{\text{в}} \cdot R \cdot T_{n+1}}{M_{\text{в}} \cdot V_{\text{пв},n+1}}, \quad (3.114)$$

По формуле Антуана (или берется из графика) рассчитать $P_{\text{п.нп},n+1}$ – парциальное давление нефтепродукта для температуры T_{n+1}

Рассчитывается давление в котле цистерны

$$P_{n+1} = P_{\text{пв},n+1} + P_{\text{п.нп},n+1}, \quad (3.115)$$

тогда $i=i+1$

Если $i=2$ то перейти на метку 2

$$\Delta P_{n+1} = P_{n+1} - P_n. \quad (3.116)$$

Печать $\Delta P_{n+1}, P_{n+1}$,

Если для одного случая $n=2$, а для другого $n=6$, то «Конец»,
иначе перейти на метку 1.

3.6.4 Расчет давлений внутри вагона-цистерны

Для получения результатов, а также проверки адекватности математической модели произведен расчет по алгоритму п. 2.6.1. с помощью Microsoft Excel (классическое приложение).

Расчет произведен разных видов цистерн (15-9993), (15-9543), (15-625), с разными видами нефтепродуктов. Температурный диапазон расчетов обусловлен техническими характеристиками, предохранительной аппаратурой, установленной на вагонах цистернах.

Степень заполнения вагонов-цистерн выбрана 95%.

Вид перевозимого груза – бензин АИ-92, дизельное топливо

Расчет произведен разных видов цистерн (15-9993), (15-9543), (15-625), с разными видами нефтепродуктов.

Температурный диапазон расчетов обусловлен техническими характеристиками, предохранительной аппаратурой, установленной на вагонах цистернах.

Степень заполнения вагонов-цистерн выбрана 95%.

Вид перевозимого груза – бензин АИ-92, дизельное топливо.

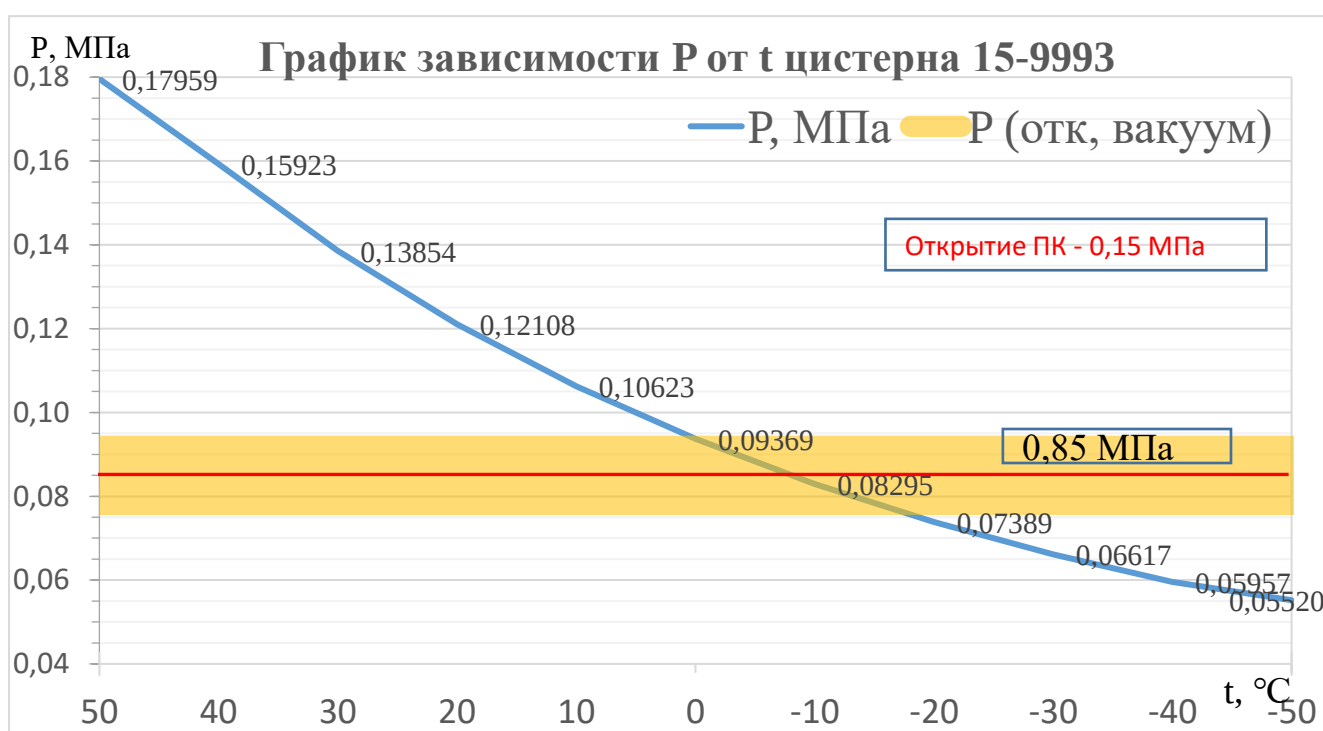


Рисунок 3.1 – График зависимости P от t цистерна 15-9993, бензин АИ-92

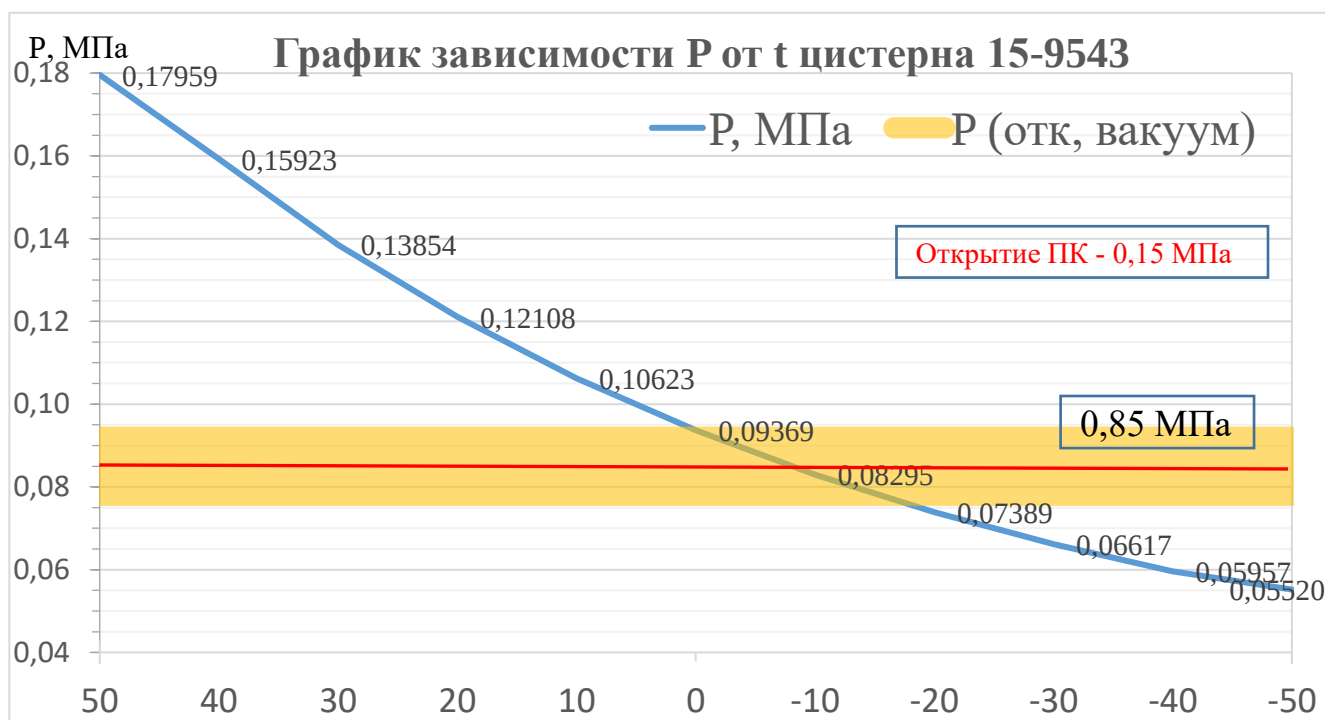


Рисунок 3.2 – График зависимости Р от t цистерна 15-289-04, бензин АИ-92

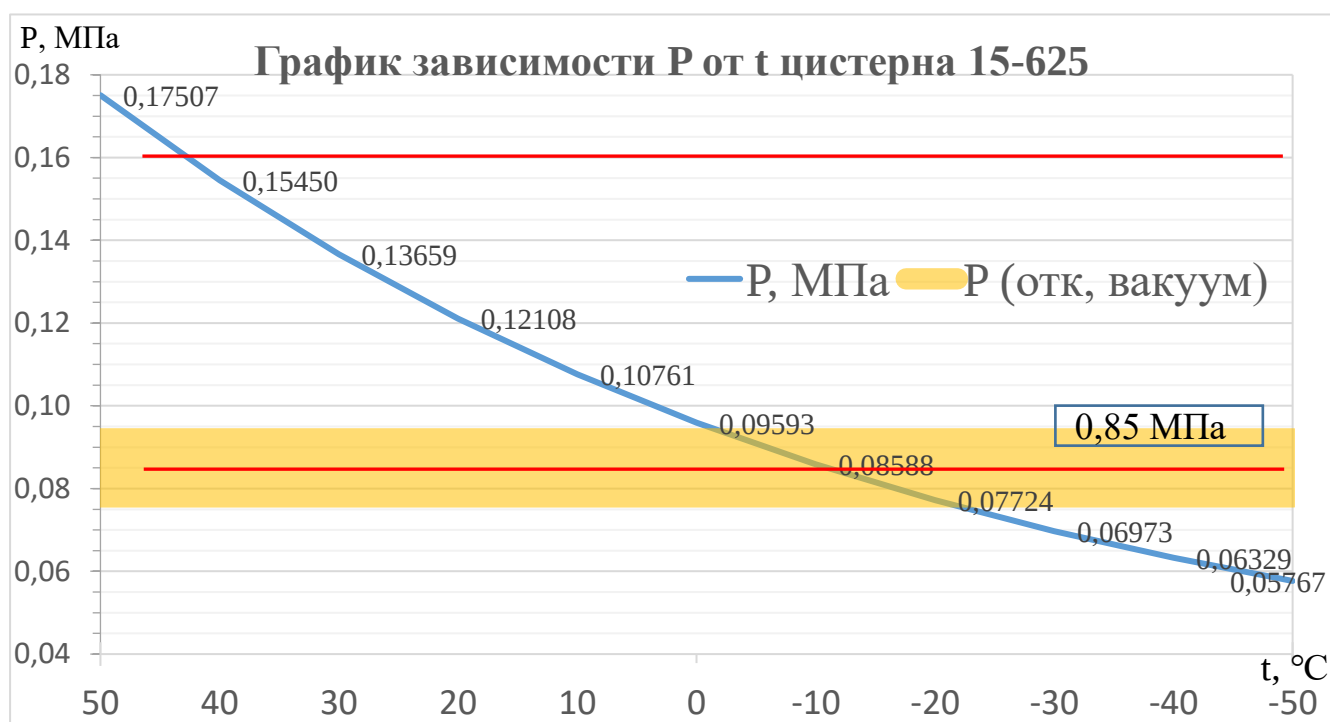


Рисунок 3.3 – График зависимости Р от t цистерна 15-625,

Дизельное топливо

Полученные графики позволяют определить параметры при которых открывается предохранительно-впускной клапан на избыточное давление и момент разряжения в котле вагона-цистерны.

3.7 Проверка устойчивости обечайки

Благодаря типизируемым алгоритмам МКЭ широко распространен в САЕ системах, таких как NASTRAN, ANSYS и другие. Они являются компьютерными программами, реализующие МКЭ, но имеющие отличающиеся алгоритмы [108].

Расчет устойчивости цилиндрической оболочки котла от действия внешнего давления (разряжение) производится на основании программного комплекса в среде FEMAP, согласно п.3.3.7. «Норм для расчета и проектирования...» [58].

Устойчивость выполняется при выполнении условия:

$$n_y = \frac{P_{кр}}{P_p} \geq [n_y], \quad (3.117)$$

где n_y - расчетный коэффициент запаса устойчивости;

$[n_y]$ - допускаемый коэффициент запаса устойчивости,

$$[n_y] = 1,1, \quad (3.118)$$

P_p - расчетная величина внешнего давления, согласно п.2.5.2. «Норм для расчета и проектирования...»

$P_p = 0,14$ МПа;

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

$$P_{кр} = 0,6 \cdot k \cdot E \cdot \frac{R}{L} \left(\frac{\delta}{R} \right)^{\frac{5}{2}}, \quad (3.119)$$

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:

$$k = \frac{(1 - \alpha + \alpha \cdot t^2)^{\frac{1}{4}}}{1 - \alpha + \alpha \cdot t^3}, \quad (3.120)$$

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 ($D = 3.2$ м).

В таблицах 3.6, 3.7 выделены значения коэффициентов запаса устойчивости, не обеспечивающий устойчивость котла вагона цистерны.

Таблица 3.6 – расчета коэффициента запаса устойчивости котла цистерны

Вакуум (давление в котле), атм	Пус, $V_{yz}=1,25 \text{ м}^3/\text{м}$		
	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 3.7 – расчета коэффициента запаса устойчивости котла цистерны

Вакуум (давление в котле), атм	Пус, $V_{yz}=1,17 \text{ м}^3/\text{м}$		
	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>

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

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 [70];
- 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.

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

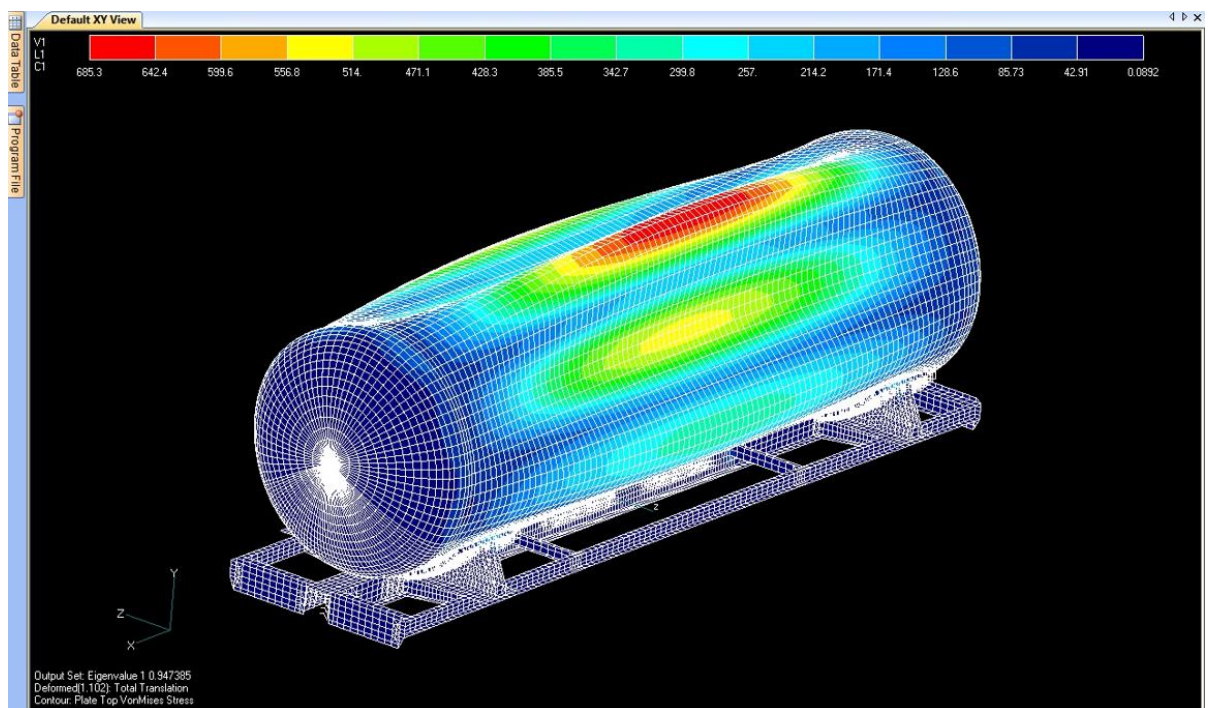


Рисунок 3.4 – Эпюра распределения эквивалентных напряжений по конструкции котла вагона-цистерны 15-1547 от действия расчетного давления

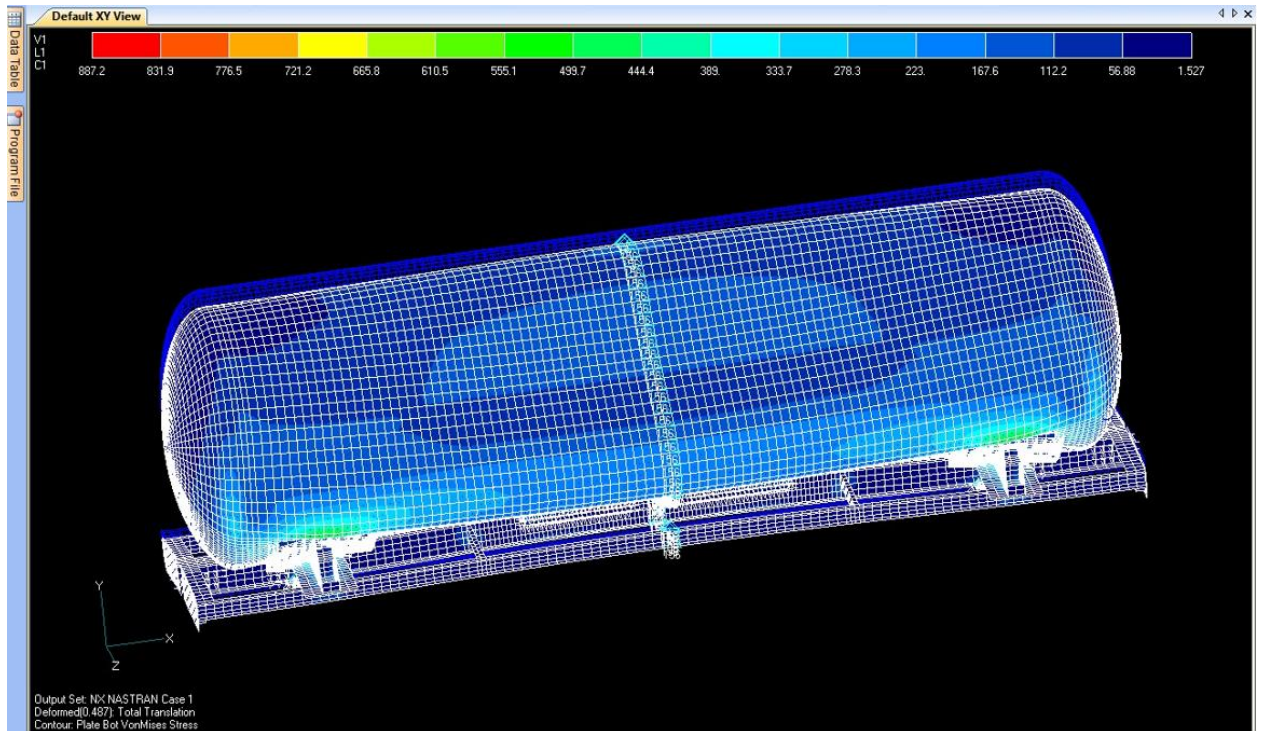


Рисунок 3.5 – Эпюра распределения эквивалентных напряжений по конструкции котла вагона-цистерны 15-1547 от действия расчетного давления, вид со стороны обечайки котла

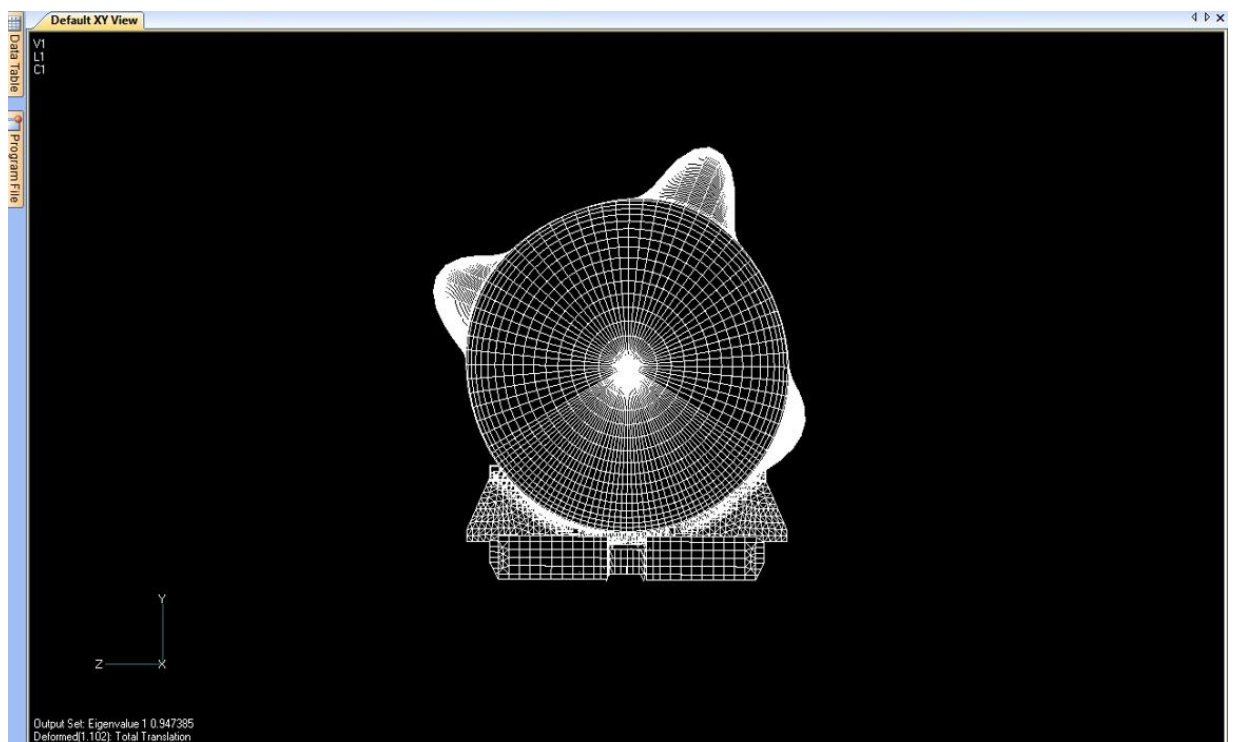


Рисунок 3.6 – Эпюра распределения эквивалентных напряжений по конструкции котла вагона-цистерны 15-1547 от действия расчетного давления, вид со стороны днища котла

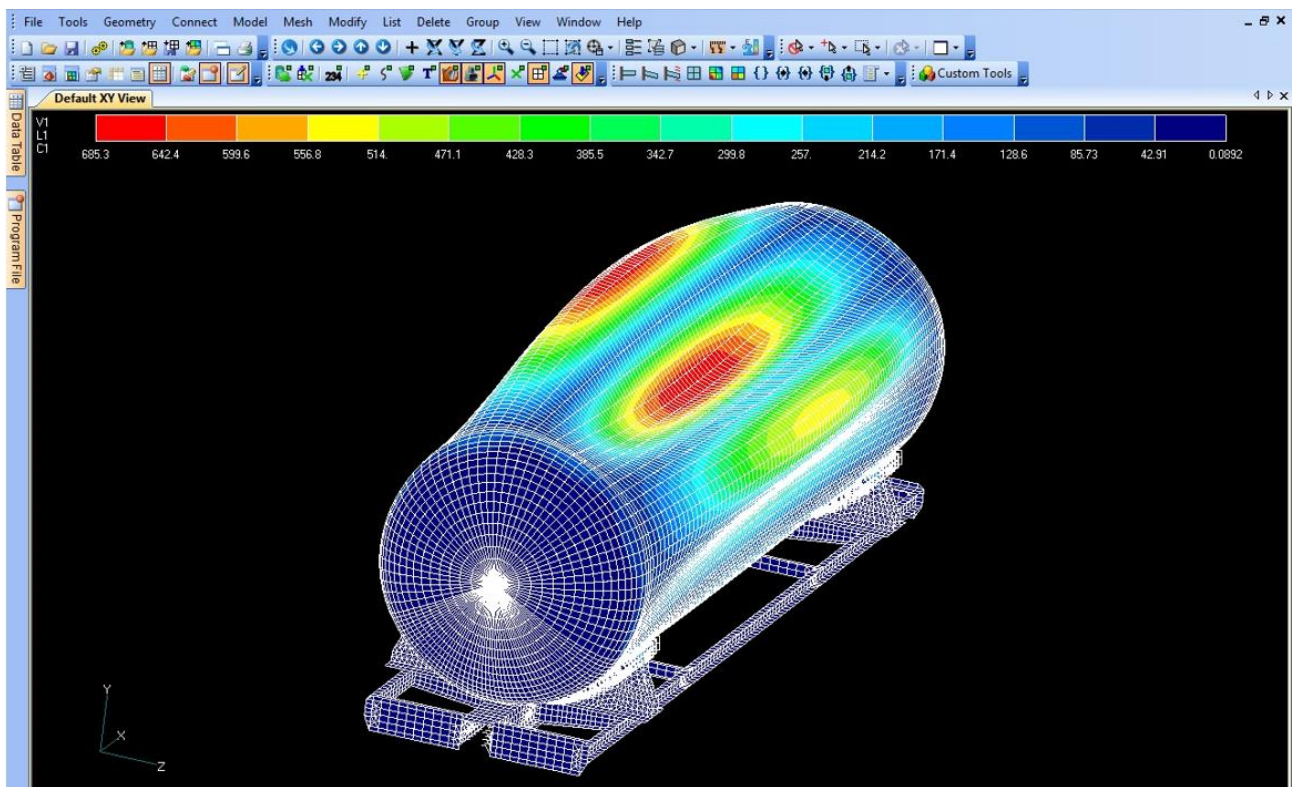


Рисунок 3.7 – Эпюра распределения эквивалентных напряжений по конструкции котла вагона-цистерны 15-1547 от действия расчетного давления, вид со стороны обечайки котла

Моделирование контактного взаимодействия реализовано с помощью контактных КЭ аппарата Connect программного комплекса FEMAP.

3.8 Выводы по разделу 3

По итогам написания данного раздела можно сделать следующие выводы:

1 Создана математическая модель котла вагона цистерны при возникновении избыточного давления в котле вагона-цистерны. Модель учитывает параметры срабатывания предохранительно-впускного клапана.

2 На основе созданной математической модели, учитывающей различные теплофизические параметры продукта внутри вагона-цистерны сформулирован

метод выбора технических средств защиты вагонов-цистерн для перевозки нефтепродуктов от аварийного теплового воздействия.

3 Создана математическая модель падения давления после процесса очистки с предварительной пропаркой, промывкой и продувкой паром в котле цистерны.

4 На основании физического эксперимента дана оценка расхолаживания цистерны, показывающая закономерность: темп расхолаживания цистерны будет в основном определяться температурным уровнем стенок котла цистерны.

5 Произведен расчёт эквивалентного диаметра проходного сечения предохранительного клапана. На основании расчета даны рекомендации с необходимыми диаметрами предохранительных клапанов для котлов вагонов-цистерн.

6 Для численного решения обыкновенных дифференциальных уравнений использовался явно-неявный конечно-разностный метод с итерациями с погрешностью аппроксимацией исходных обыкновенных дифференциальных уравнений.

4 ПРОГРАММНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ РАЗРАБОТАННОЙ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

Математические модели тепловых процессов внутри вагонов-цистерн нуждаются в программной реализации. На данный момент существует большое количество специализированного программно-вычислительного софта, для реализации вычислительных операций [37, 40, 92, 94, 95, 110-112]. Для реализации поставленных задач будет использован текстовый редактор для набора кода (компилятор) Visual Studio C++. Для реализации задач использован алгоритм программы и вычисления термодинамических параметров внутри котла вагона-цистерны, учитывающий работу предохранительного клапана. Одной из сложных задач является разработка качественной программной оболочки для пользователя.

Разработанный комплекс позволяет выбрать пользователю объем вагона-цистерны, а также параметров различных грузов, технических средств защиты, различных переменных, связанных между собой при помощи организации расчёта в алгоритме программы. Выбираем параметры котла вагона-цистерны для перевозки нефтепродукта, объем груза, переменные для расчета, далее программный комплекс вычисляет термодинамические параметры внутри котла вагона-цистерны. После произведения расчетов параметров внутри цистерны, строятся графики, на которых отображаются расчетные значения потери устойчивости котла, а также указываются температуры и давления при которых открывается предохранительная арматура котла.

4.1 Описание интерфейса разработанной программы

Представленный алгоритм и математическая модель нуждаются в программной реализации. В качестве среды разработки, как было отмечено в первом разделе этой работы, будет использована среды разработки была выбрана среда Visual Studio C++, а именно программа «FOBOT 2.0», являющаяся обновлённой версией программы «FOBOT 1.0» программы, написанной на языке Delphi 7. С окнами программы можно ознакомиться на рисунках 4.1 – 4.9.

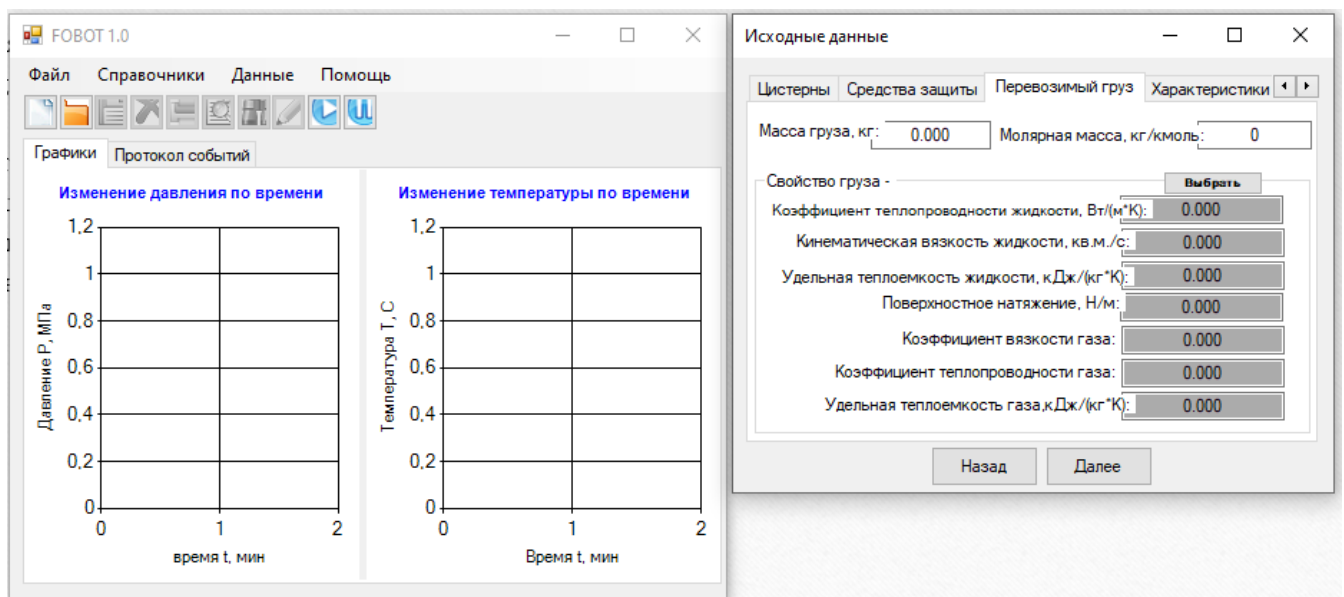


Рисунок 4.1 – Главная форма созданной программы

Основная форма программы состоит из нескольких окон и полей вывода данных, а также из меню кнопок, реализованного в виде библиотечного объекта Главное Меню. Меню состоит из нескольких кнопок. Нажатие на кнопку «Расчет» запускает процесс моделирования процесса изменения параметров процесса. Нажатие на пункт меню «Данные» открывает вторую форму окна программы («Исходные данные»), предназначенную для ввода исходных данных. Нажатие на кнопку «выход» закрывает программу.

Исходные данные

Цистерны Средства защиты Перевозимый груз **Характеристики**

Расчетная температура воздуха, °C: 0.000

Угол наклона цистерны, °: 0.000

Давление разрыва цистерны, МПа: 0.000

Вид аварийного режима
3 степени

Площадь огневого воздействия, кв.м.: Вся поверхность

Плотность теплового потока, КВт/кв.м.: 400

Время процесса, час.: 2

Назад Готово

Рисунок 4.2 – Вкладка «Исходные данные» созданной программы

На основной форме окна располагаются 4 вкладки:

- «Цистерны» для выбора цистерны;
- «Средства защиты»;
- «Перевозимый груз»;
- «Характеристики процесса».

В свою очередь вкладка «Цистерны» дает выборку непосредственно цистерн;

Исходные данные

Цистерны Средства защиты Перевозимый груз Характеристики

Тип цистерны: ☐

Свойства цистерны

Внутренний Диаметр, м.: 0.000

Полная вместимость, куб. м.: 0.000

Материал стенки:

Толщина стенки, мм: 0.000

Плотность стали, кг/куб.м.: 0

Удельная теплоемкость стали, кДж/(кг*К): 0

Коэффициент теплопроводности, Вт/(м*К): 0

Назад Далее

Рисунок 4.3 – Вкладка «Исходные данные» созданной программы

Вкладка «Средства защиты» дает выборку теплоизоляции, огнезащитного покрытия, а также выборка предохранительно (впускно-выпускного) клапана цистерны;

Рисунок 4.4 – Вкладка «Исходные данные» созданной программы

Вкладка «Перевозимый груз» дает выбрать перевозимый груз и его характеристики;

Рисунок 4.5 – Вкладка «Исходные данные» созданной программы

Вкладка «Характеристики процесса» дает выбрать перевозимый груз и его характеристики;

Вкладка «Характеристики процесса» дает выбрать расчетные температуры воздуха, угол наклона цистерны, давление разрыва цистерны, а также вид аварийного режима;

The screenshot shows a software window titled 'Исходные данные' (Initial Data) with standard Windows window controls (minimize, maximize, close). Inside the window, there are three tabs: 'Средства защиты' (Protection Means), 'Перевозимый груз' (Transported Cargo), and 'Характеристики процесса' (Process Characteristics). The 'Характеристики процесса' tab is active. It contains the following fields and controls:

- 'Расчетная температура воздуха, °C:' (Calculated air temperature, °C): Input field with value '0.000'.
- 'Угол наклона цистерны, °:' (Tank tilt angle, °): Input field with value '0.000'.
- 'Давление разрыва цистерны, МПа:' (Tank rupture pressure, MPa): Input field with value '0.000'.
- 'Вид аварийного режима' (Emergency mode type): A dropdown menu currently showing '3 степени' (3 degrees).
- 'Площадь огневого воздействия, кв.м.:' (Fire impact area, sq.m.): A button labeled 'Вся поверхность' (Entire surface).
- 'Плотность теплового потока, КВт/кв.м.:' (Heat flux density, Kw/sq.m.): Input field with value '400'.
- 'Время процесса, час.:' (Process time, hr.): Input field with value '2'.

At the bottom of the window, there are two buttons: 'Назад' (Back) and 'Готово' (Ready).

Рисунок 4.6 – Вкладка «Исходные данные» созданной программы

Для получения справочной информации можно перейти на вкладку «Справочники» в главном меню программы.

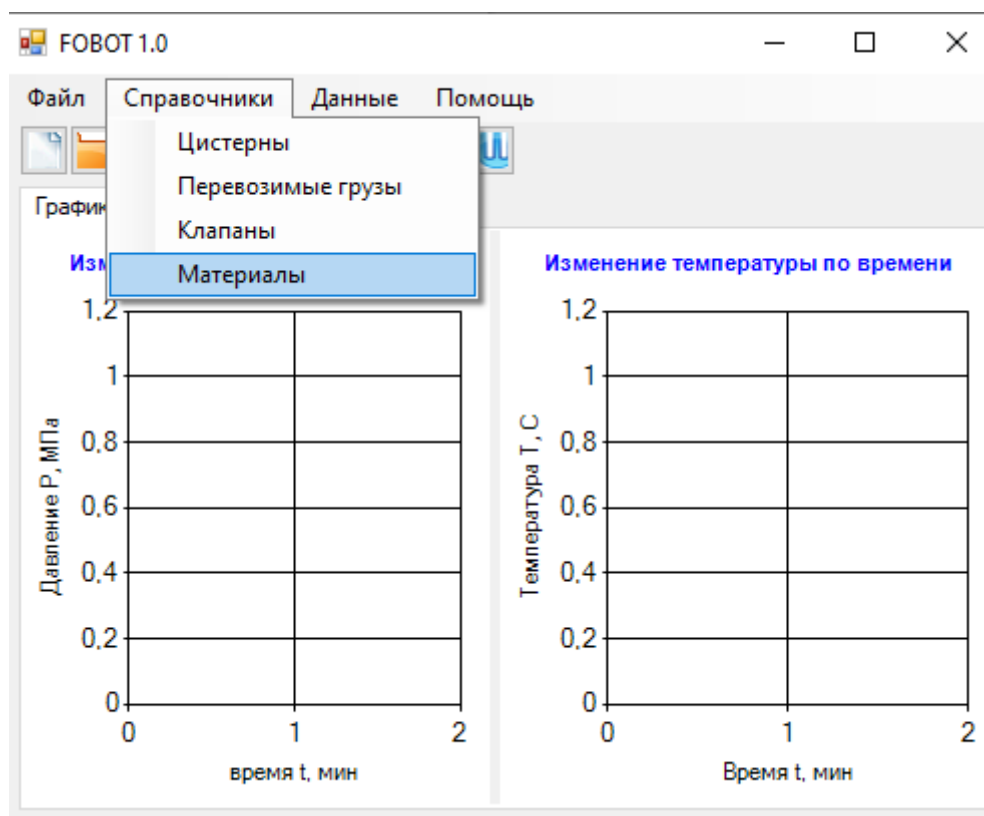


Рисунок 4.7 – Вкладка «Справочники» созданной программы

Программа «FOBOT 2.0» имеет форму для расчета не только избыточного давления, но и состояний разряжения внутри котла вагона-цистерны. Для расчета необходимо ввести данные и нажать в окне «Расчет давления в цистерне» кнопку «Построить график».

Перейдём к описанию формы ввода исходных данных и получения результата расчетов. После введения исходных данных на рисунке 4.8, 4.9 представлены окно «Расчет давления в цистерне» программы и расчет происходящего теплофизического процесса в окне «График».

Расчет давления в цистерне

Объем цистерны V , м³ 85,50

Степень заполнения цистерны η , % 95

Температура налива нефтепродукта в цистерну T_0 , °C 20

Таблица плотности нефтепродукта 750

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

Температура открытия выпускного клапана, °C

Температура схлопывания цистерны, °C

Построить график

Рисунок 4.8 – Окно «Расчет результатов» созданной программы

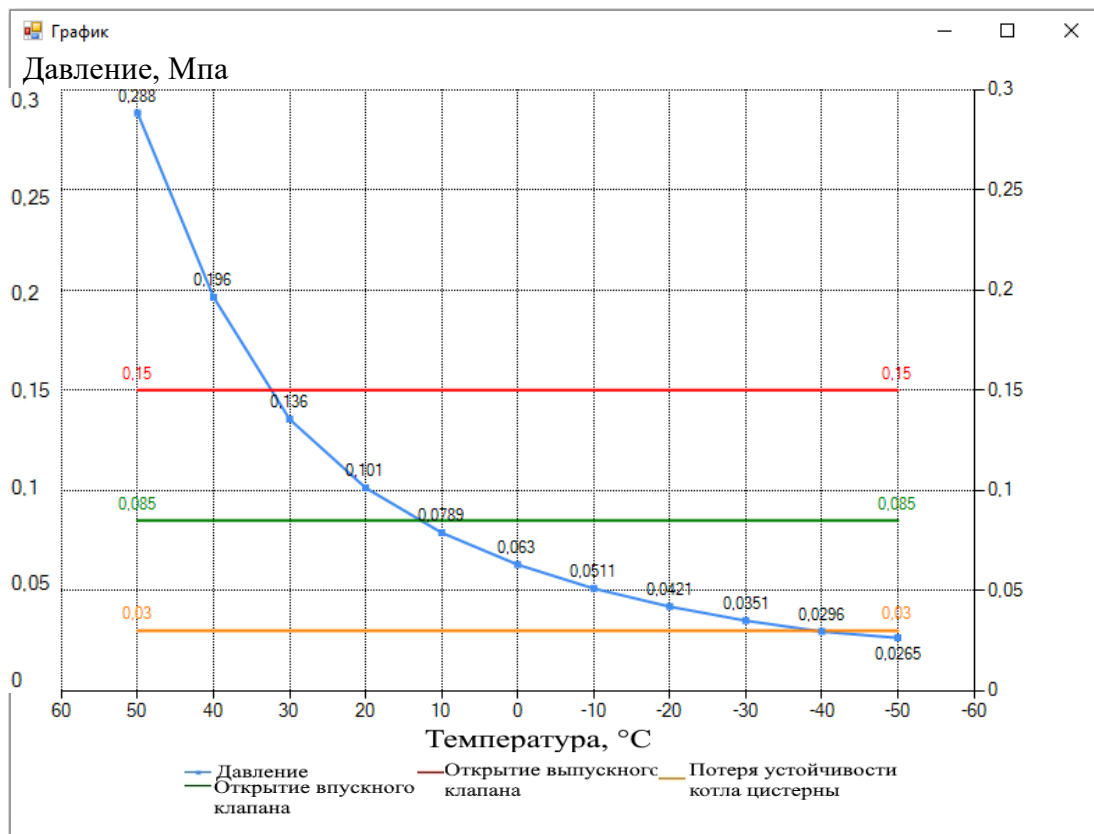


Рисунок 4.9 – Окно «Расчет результатов» созданной программы

Созданная программа позволяет проводить исследования при изменениях теплофизических процессов внутри вагонов-цистерн при возникновении в них как вакуума, так и избыточного давления. Разработанный программный комплекс позволяет проводить серии испытаний:

- 1 Для определения параметров внутри котлов вагонов-цистерн в условиях транспортировки грузов из тёплых регионов России в холодные;
- 2 Для определения оптимальных параметров нефтеналивных грузов при транспортировке грузов железнодорожным транспортом;
- 3 Для случаев отказов предохранительной арматуры во время эксплуатации нефтегруза.

Результаты различных вариантов расчетов представлены в Приложении Б.

4.2 Результаты расчетов математической модели с помощью программного комплекса

Созданная программа, написанная на языке C++, с использованием библиотек C#, позволяет проводить исследование режимов изменения теплофизических процессов внутри вагонов-цистерн при возникновении в них как вакуума, так и избыточного давления. 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.

На рисунках 4.10, 4.11, 4.12 – представлены результаты расчетов изменения давления внутри резервуара в зависимости от температуры, с течением времени, а также на график нанесены точки, полученные в результате физического эксперимента.

Для оценки полученных расчетных и экспериментальных данных, на расчетном графике прямой указан диапазон абсолютной ошибки.

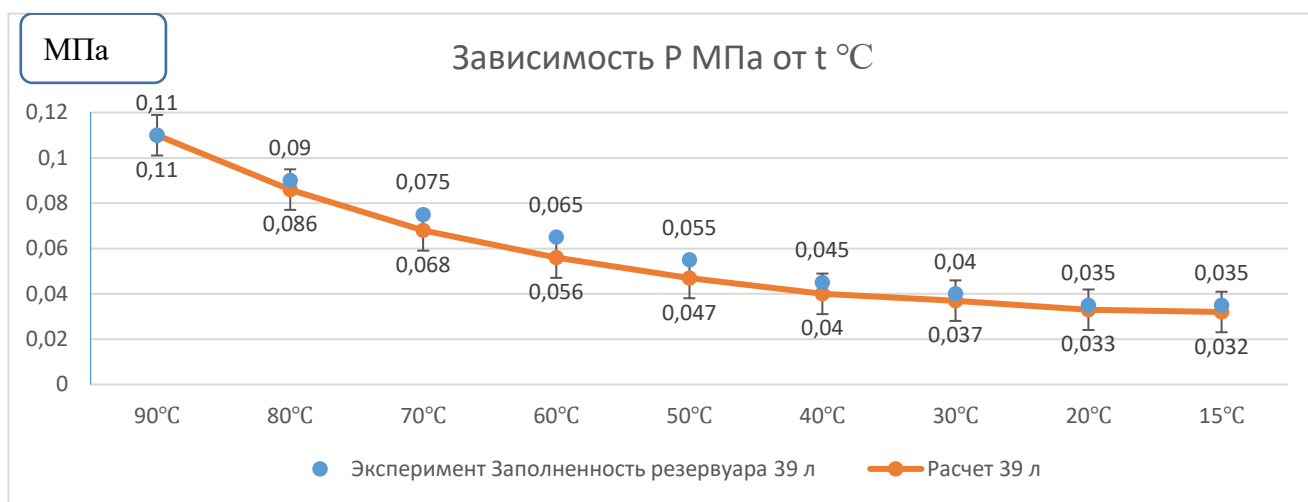


Рисунок 4.10 – Зависимость изменения давления от температуры в резервуаре с течением времени в тормозном резервуаре с заполнением 39 л

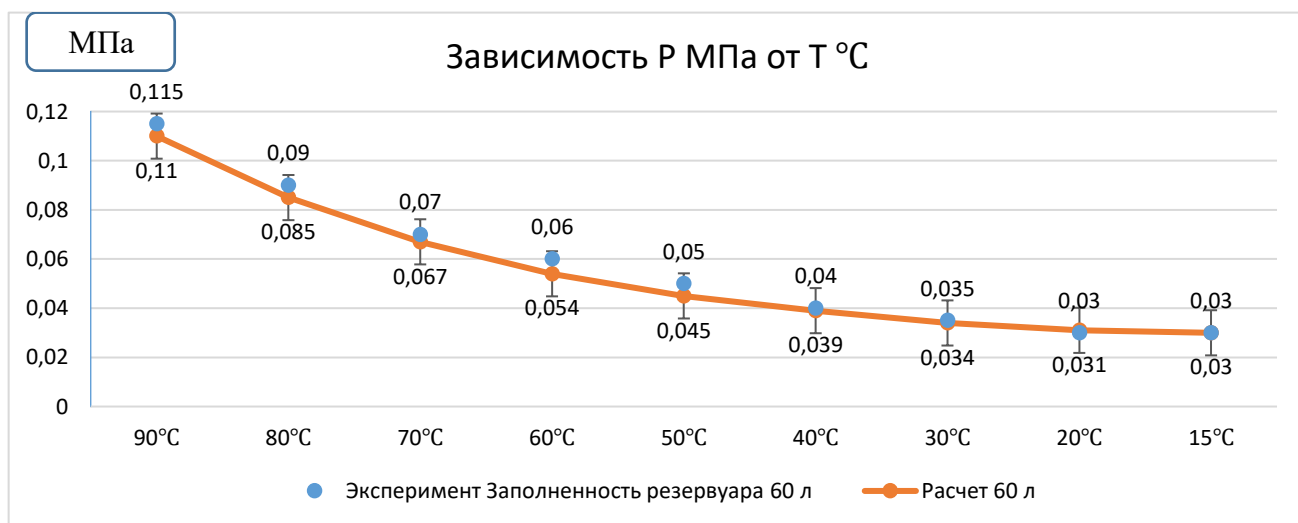


Рисунок 4.11 – Зависимость изменения давления от температуры в резервуаре с течением времени в тормозном резервуаре с заполнением 60 л

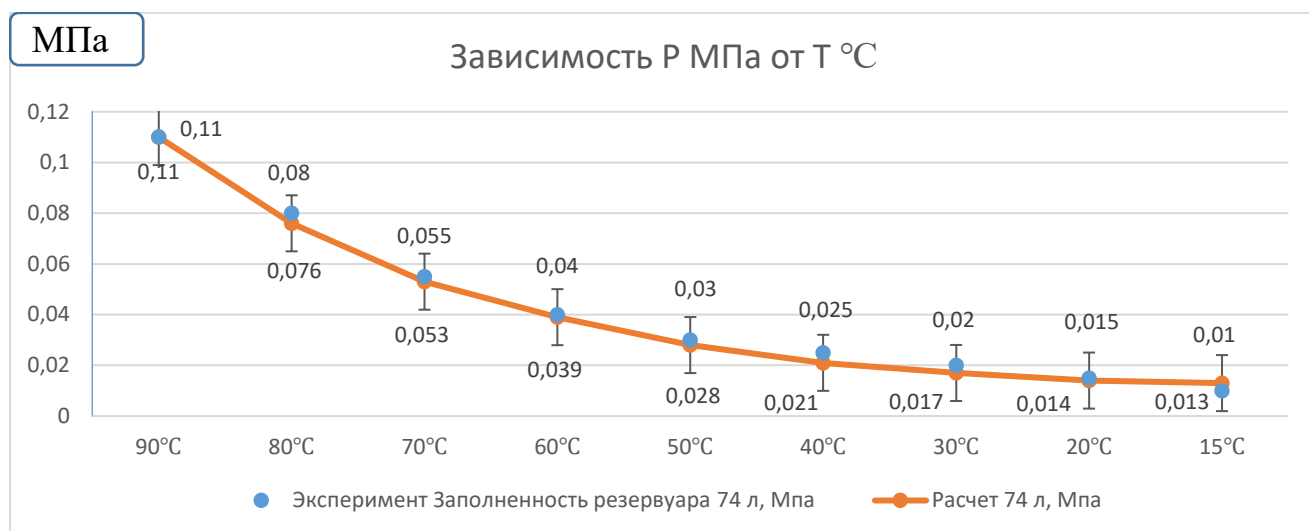


Рисунок 4.12 – Зависимость изменения давления от температуры в резервуаре с течением времени в тормозном резервуаре с заполнением 74 л

Результаты физического эксперимента представлены в приложении В.

Результаты проведенных многовариантных расчетов изменения теплофизических параметров внутри котла вагона-цистерны представлены в приложении А. Результаты содержат данные теплофизических параметров, при которых происходит потеря устойчивости определенного котла вагона-цистерны.

4.3 Выводы по разделу 4

По результатам проделанной работы по формированию компьютерной модели можно сделать следующие выводы:

На основании созданной математической модели, а также созданного программного комплекса были выполнены расчеты критических термодинамических параметров внутри котла вагона-цистерны. Можно сделать определенные выводы:

1 Основываясь на данной математической модели была написана компьютерная программа с использованием среды Visual Studio C++, с использованием библиотек C#. Данный комплекс позволяет проводить

исследование режимов изменения теплофизических процессов внутри вагонов-цистерн при возникновении в них как вакуума, так и избыточного давления

2 Для основных расчётных функций программы были составлены алгоритмы, которые могут быть использованы для проектирования аналогичных моделей в смежных областях.

3 В дополнении к главным расчётным функциям программы была добавлена дополнительная функциональность, покрываемая как библиотечными функциями выбранной среды программирования, так и широко используемыми и эффективными алгоритмах.

4 Созданная программа может быть использована на системах ОС Windows с разрядностью x64, x86 неограниченным числом пользователей для оценки происходящих теплофизических процессов внутри вагона-цистерны, а также определения состояний для прочностных характеристик вагонов-цистерн.

5 ПРОБЛЕМАТИКА ПЕРЕВОЗОК НЕФТЕГРУЗОВ ИМЕЮЩИХ ПРЕДОХРАНИТЕЛЬНО ВПУСКНУЮ АППАРАТУРУ

Конструкционные особенности предохранительной арматуры котлов вагонов-цистерн имеют определенную конструкционную особенность: «...В предохранительно-впускном клапане фактически совмещены два устройства разного назначения. Первое — предохранительный клапан, предназначенный для защиты оборудования при неконтролируемом повышении давления в котле. Второе — впускной, предназначенный для защиты котла в пути следования и на стоянке от возникновения недопустимого вакуума после разогрева груза паром, пропарки котла или при сливе продукта при закрытых крышках люков...» [83].

Данные устройства монтируются на котлы вагонов-цистерн в Российской Федерации. В европейских странах и США монтируются два клапана разного назначения. Диаметр проходного сечения иностранной предохранительной аппаратуры варьируется около 5 дюймов (12,7 см) [12, 118]. В России вагоны-цистерны оснащены одним предохранительным (впускно-выпускным) клапаном диаметром 3,2 см.

5.1 Формирование практических рекомендаций, основанных на результатах проведённого исследования

С учетом изменения объёмов перевозимых грузов и сроков капитальных ремонтов вагонного оборудования необходимо устанавливать предохранительный впускной и выпускной клапаны отдельно друг от друга.

В данном исследовании рассчитаны наиболее оптимальные диаметры сечения предохранительного клапана для цистерн моделей 15-1443, 15-1427,

15-1422, для следующих характеристик предохранительного клапана: $\Delta P = 0,2 \cdot 10^5 \text{ Па}$, $\mu = 0,7$ и температуры окружающей среды $t_0 = -30 \text{ }^\circ\text{C}$.

Таблица 5.1 Расчета эквивалентного диаметра проходного сечения впускного предохранительного клапана представлены в таблице:

χ $D, \text{ м}$	Степень нагрева воздуха
0,269	0,1
0,120	0,5
0,085	1,0

Подведём итоги проведённому исследованию, сформировав перечень практических рекомендаций. Основной вывод, который можно сделать, произведя анализ результатов исследования, заключается в актуальности усовершенствования конструкционных особенностей котлов вагонов-цистерн. Решение этой проблемы является отдельной технической задачей, подробно не затрагиваемой в данной работе. Однако доказательство возможности такого улучшения стоит привести.

Основной причиной потери устойчивости конструкции котла вагоно-цистерны является возникновение вакуума при транспортировке нефтепродуктов, а также после промывочно-пропарочных работ, в связи с нарушением рекомендаций к эксплуатации и техники безопасности обслуживающим персоналом. Нередко данная ситуация возникает и из-за отказа и морального устаревания предохранительно-впускной аппаратуры. Указанное было доказано «...путём натурного эксперимента, результаты которого приведены в разделе 2. Был представлен краткий обзор исследований, посвящённых моделированию теплофизических процессов внутри котлов вагонов-цистерн.

В итоге можно выделить несколько направлений поиска технического решения задачи повышения устойчивости тонкостенных котлов вагонов-цистерн:...» [37-41, 66, 68, 95].

1 Предохранительно-впускная аппаратура котлов вагонов-цистерн должна предусматривать установку двух предохранительных устройств (впускных и выпускных) на вагон, обладающих большим диаметром (таблица 5.1).

2 Необходимо провести модернизацию грузового парка, а именно вагонов-цистерн. К числу возможных технических решений, направленных на повышение устойчивости, относятся несколько опций.

3 Из анализа аварийных ситуаций на железной дороге, выполненного РУТ (МИИТ): «...Имеются неоднократные случаи деформирования цистерн и даже сплющивания их в «гармошку», особенно после промывки-пропарки цистерн паром (100 - 120) °С, в холодное время года или в дождливую погоду из-за недостаточной пропускной способности клапана впускного. По расчетам РУТ (МИИТ) пропускная способность впускного клапана должна быть не менее 2000 м³/час по воздуху при перепаде давления 0,2 кгс/см². Вышеупомянутые конструкции имеют по расчетам пропускную способность не более 300 м³/ч...» [60].

4 Увеличение диаметра и качества предохранительно-впускных клапанов повысит уровень безопасности при транспортировке нефтепродуктов грузовым железнодорожным транспортом. В связи с наработкой предохранительных и впускных клапанов наблюдается непрерывное постепенное расхолаживание котла вагона-цистерны.

Указанные концепции нуждаются в конкретных технических предложениях.

5.2 Выводы по разделу 5

Проведённая серия опытов по исследованию возникновения вакуума, с учётом заполненности резервуара, позволяет сделать вывод об актуальности применения на вагонах-цистернах выпускные и выпускные предохранительные клапаны, обеспечивающие высокую безопасность перевозочного процесса.

Рассмотрены различные температурные режимы использования предохранительных клапанов. Проведенные многовариантные расчёты по выбору характеристик предохранительно-впускного клапана на основании которых, мною может быть рекомендован клапан с проходным сечением 120 мм. Отметим следующее:

1 Для установки 2-х предохранительных клапанов большого сечения на выпуск и на впуск, необходимо разработать, как конструкцию, так и место установки, и способы защиты от злоумышленников.

2 Существующая схема установки предохранительного выпускного клапана на нефтебензиновых цистернах не может обеспечить защиту от несанкционированного проникновения сливных шлангов с целью хищения продукта.

3 Проведенные исследования показали, что темп расхолаживания цистерны будет в основном определяться температурным уровнем стенок котла цистерны.

4 Применение двух предохранительных клапанов на грузовом подвижном составе позволит значительно снизить значение возникающего вакуума в вагон-цистерне. Техническая реализация такого типа предохранительного-впускного оборудования является актуальной задачей.

5 В настоящее время, в связи с тем, что существует закон о техническом регулировании, где предусмотрены виды безопасности, включая механическую, пожарную и др., целесообразно возобновление этих работ с изготовлением опытных образцов предохранительных клапанов с большим сечением и проведением всесторонних испытаний [60, 87-90].

Исследования в этом направлении ведутся отечественными учеными [83].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам диссертационного исследования получились следующие итоги, рекомендации и перспективы дальнейшей разработки темы.

1 Проведён анализ методов решения задач устойчивости тонкостенных оболочек котлов вагонов-цистерн 15-9993, 15-9543, 15-625, который показал необходимость в качестве основного метода исследования принять и успешно применить конечно-разностный метод и метод компьютерного моделирования. Предложена математическая полуэмпирическая модель изменения давления в цистерне, а также расчеты прочности котла цистерны. Применение компьютерного моделирования с помощью среды программирования Delphi 5 и доработанная версия в Visual Studio C++ на основе математической модели создана компьютерная программа, которая может быть использована для исследования теплофизических процессов, а также устойчивости стенок вагонов-цистерн.

2 Проведён физический эксперимент по оценке влияния температурных режимов на создание вакуума в вагоне-цистерне, а также выполнена успешная верификация его результатов, что доказывает эффективность предложенного варианта расположения двух предохранительных (впускных и выпускных) клапанов на обечайке вагона-цистерны, что позволит предотвратить создание критического внутреннего давления в вагоне-цистерне.

3 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.

4 Выявлены и обоснованы варианты возникновения критических давлений внутри котла вагона-цистерны при процессе срабатывания предохранительного клапана вагона-цистерны, а также описан механизм его срабатывания.

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

6 Выполнено научное обоснование актуальности разработки и внедрения конструктивной особенности расположения двух предохранительных (впускных и выпускных) клапанов на вагонах-цистернах.

7 На основании результатов проведенного исследования по оценке влияния температурных режимов на создание вакуума в котле вагона-цистерны даны рекомендации по применению двух предохранительных (впускных и выпускных) клапанов на вагонах-цистернах, обоснованные условиями использования разных нефтеналивных грузов в одних типах вагонов-цистерн. На основании проведенных расчетов рекомендуется применение впускного клапана диаметром не менее 0,039 м и выпускного клапана не менее 0,12 м.

8 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 СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

ВНИИЖТ – Акционерное общество «Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта».

ВНИКТИ – Акционерное общество «Научно-исследовательский и конструкторско-технологический институт подвижного состава».

ВНИЦТТ - Всесоюзный «Научно-исследовательский центр транспортных технологий».

ПГУПС – Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I».

БГТУ – Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Брянский государственный технический университет».

МКЭ - Метод конечных элементов

ПК - Предохранительный клапан железнодорожных цистерн

ЗР – Запасный резервуар.

ТЦ – Тормозной цилиндр.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1 **Аксенов, В. А.** Перспективные экологически безопасные шумо-, виброзащитные материалы для пассажирских вагонов локомотивной тяги / В. А. Аксенов, О. С. Юдаева, О. Г. Егорова, А. С. Гладаренко // Изв. Транссиба. – Омск: Омск. гос. ун-т путей сообщения, 2014. – № 2 (18). – С. 95–100. - Текст : непосредственный.

2 **Анненков, А.В.** Оптимизация перевозок нефтеналивных грузов на железнодорожном транспорте. Москва. : ВИНТИ РАН, 1999. 154 с. - Текст : непосредственный.

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

4 **Бевзюк, Е. А.** Проблемы устойчивого развития транспорта / Е. А. Бевзюк // Право и государство : теория и практика. – 2006. – № 3. – С. 99– 104. – Текст: непосредственный.

5 Безопасность жизнедеятельности / Под общ. ред. С. В. Белова. — М.: Высшая школа, 2007. ISBN 978-5-06-004171-2. – Текст: непосредственный.

6 **Бойко, А.** Расчет прочности котла вагона-цистерны при циклическом нагружении / А. Бойко, О. Кононова // XIII International Colloquium "MECHANICAL FATIGUE OF METALS" – 2006 – С.484-490. – Текст: непосредственный.

7 **Болотин, В. В.** Неконсервативные задачи теории упругой устойчивости : учебное пособие ; В. В. Болотин – М.: Книга по Требованию, 2013. – 339 с. - ISBN 978-5-458-30862-5. - Текст : непосредственный.

8 **Бороненко, Ю. П.** Использование высокопрочных сталей в вагоностроении/ Ю. П. Бороненко, И. О. Филиппова. // ТРАНСПОРТ

РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ. ЖУРНАЛ О НАУКЕ, ПРАКТИКЕ, ЭКОНОМИКЕ – 2015 – №.3 – С.16-19. – Текст: непосредственный.

9 Бубнов, В. М. К вопросу о выборе расчетной схемы для котлов железнодорожных цистерн с перекрестным подкреплением / В. М. Бубнов, , А. И. Быков // Тр. Московского института инженеров железнодорожного транспорта. — 1980. — Вып. 677. — С. 18-28. — Текст: непосредственный.

10 Варгафтик, Н. Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей / Н. Б. Варгафтик. — Москва.: Наука, 1972. — 720 с. — Текст: непосредственный.

11 Варгафтик, Н. Б. Теплофизические свойства веществ : справ. / Под ред.Н.Б.Варгафтика. - Москва. : Госэнергоиздат, 1956. - 367 с. : ил. - Б. ц. — Текст: непосредственный.

12 Вебсайт производителя оборудования для вагонов-цистерн Midland <https://www.opwglobal.com/products/us/transportation-products/railcar-products/general-purpose-car-products/vacuum-relief-valve-vrvs/-vacuum-relief-valve-vrvs>

13 Вериго, М. Ф. Новые методы в установлении норм устройства и содержания бесстыкового пути / М. Ф. Вериго. - Москва : Интекст, 2000. - 184 с. : ил., табл.; 21 см. - (Труды Всероссийского ордена Трудового Красного Знамени научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (ВНИИЖТ) / М-во путей сообщ. Рос. Федерации).; ISBN 5-89277-024-9. - Текст : непосредственный.

14 Вершинский, С. В. Динамика вагона [Текст] : [Учебник для вузов ж.-д. трансп.] / С. В. Вершинский, В. Н. Данилов, И. И. Челноков. - 2-е изд., перераб. и доп. - Москва : Транспорт, 1978. - 352 с. : ил.; 22 см. - Текст : непосредственный.

15 Винокуров, М. В. Вагоны / М. В. Винокуров. Под ред. д-ра техн. наук проф. М. В. Винокурова. - 2-е изд., испр. и доп. - Москва : Трансжелдориздат, 1953. - 704 с. : ил.; 27 см. . — Текст : непосредственный.

16 **Власов, В. З.** Балки, плиты и оболочки на упругом основании. / В. З. Власов, Н. Н. Леонтьев. – Москва : Гос. изд-во физико-математической литературы, 1960. – 491 с. – Текст : непосредственный.

17 **Власов, В. З.** Общая теория оболочек и ее приложения в технике / В. З. Власов. – Москва : Гостехиздат, 1979. – 784 с. – Текст : непосредственный.

18 **Власов, В. З.** Строительная механика тонкостенных пространственных систем / В. З. Власов. – Москва : Стройиздат, 1949. – 435 с. – Текст : непосредственный.

19 **Возникновение вакуума в вагоне-цистерне 15-1219 при перевозке нефтепродуктов/** Е. Г. Асманкин, Б. А. Кохан, Н.В. Чичерин, [и др.]. // Транспортное дело России – 2023 – №3 – С.279-282. - Текст : непосредственный.

20 **Воронин, Н. Н.** Анализ повреждаемости и оценка работоспособности несущих сварных конструкций грузовых вагонов : специальность 05.22.07 «Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация» : диссертация на соискание ученой степени доктор технических наук / Воронин Николай Николаевич ; Московский государственный университет путей сообщения (МИИТ). – Москва, 1994. – 348 с. – Текст : непосредственный.

21 **Годыцкий-Цвирко, А. М.** Взаимодействие пути и подвижного состава железных дорог / А. М. Годыцкий-Цвирко - Москва: Гострансиздат, 1931. 214 с. - Текст : непосредственный.

22 **ГОСТ 8.599—2010** Плотность светлых нефтепродуктов. Таблицы пересчета плотности к 15 °С и 20 °С и к условиям измерения объема = Density of light petroleum products. The tables for recalculation of density to 15 °C and 20 °C and to conditions of volume's measurement : Density of light petroleum products. The tables for recalculation of density to 15 °C and 20 °C and to conditions of volume's measurement : межгосударственный стандарт : ГОСТ 8.599-2010 : введен впервые : введен 2013-01-01 / разраб. Всероссийский науч.-исследовательский ин-т расходомерии. - Москва : Стандартинформ, 2012. - III, 129 с. - (Государственная система обеспечения единства измерений = State system for ensuring the uniformity of measurements). - Текст : непосредственный.

23 ГОСТ 12.1.004-91. Система стандартов безопасности труда. Пожарная безопасность. Общие требования = Occupational safety standards system. Fire safety. General requirements : Occupational safety standards system. Fire safety. General requirements : государственный стандарт Союза ССР ГОСТ 12.1.004-91 : взамен ГОСТ 12.1.004-85 : введен 01-07-92. - Москва : ИПК Изд-во стандартов, 1996. - 88 с. + [3 вкл. отд. л.]. – Текст : непосредственный.

24 ГОСТ 12.1.010-76. Взрывобезопасность. Общие требования = Explosion safety. General requirements : Explosion safety. General requirements : государственный стандарт Союза ССР : издание официальное : Постановлением Государственного комитета стандартов Совета Министров СССР 28.06.76 № 1581 срок действия установлен с 01.01.78 до 01.01.83 / Государственный комитет СССР по стандартам. - Переизд. Январь 1980 г. - Москва : Изд-во стандартов, 1980. : дата актуализации 06.04.2015. - 7 с.; 21 см. - (Система стандартов безопасности труда = Occupational safety standards system). – Текст : непосредственный.

25 ГОСТ 1510-2022. Нефть и нефтепродукты. Маркировка, упаковка, транспортирование и хранение. - Москва : Стандартинформ, 2022 – Текст : непосредственный.

26 ГОСТ Р 22.0.01-2016. Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Основные положения = Safety in emergencies. Basic principles [Текст] = Safety in emergencies. Basic principles : национальный стандарт Российской Федерации : издание официальное : утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 29 июня 2016 г. № 725-ст : взамен ГОСТ Р 22.0.01-94 : дата введения 2017-06-01 / разраб. ""Всероссийский науч.-исследовательский ин-т по проблемам гражданской обороны и чрезвычайных ситуаций МЧС России"". - Москва : Стандартинформ, 2016. - III, 7, [1] с.; 29 см. – Текст : непосредственный.

27 ГОСТ Р 22.2.08-96. Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Безопасность движения поездов. Термины и определения = Safety in emergencies. Safety of railway transport movement. Terms and definitions : Safety in emergencies. Safety of railway transport movement. Terms and definitions : государственный

стандарт Российской Федерации ГОСТ Р 22.2.08-96 : введён впервые : введён 1997-07-01 / Госстандарт России. - Москва : ИПК Изд-во стандартов, 1997 г. - IV, 7 с – Текст : непосредственный.

28 ГОСТ Р 50462-92. Базовые принципы и принципы безопасности для интерфейса "человек-машина", выполнение и идентификация. Идентификация проводников посредством цветов и буквенно-цифровых обозначений = Идентификация проводников посредством цветов и буквенно-цифровых обозначений : национальный стандарт Российской Федерации ГОСТ Р 50462 - 2009(МЭК 60446:2007) : взамен ГОСТ Р 50462-92 (МЭК 446-89) : введен 2011-01-01 : издание официальное / Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии ; [ред. Р. Г. Говердовская]. - Москва : Стандартинформ, 2010. - IV, 7, [1] с. : ил., табл.; 29 см. - Текст : непосредственный.

29 ГОСТ Р 50.2.076-2010 Государственная система обеспечения единства измерений. Плотность нефти и нефтепродуктов. Методы расчета. Программа и таблицы приведения = State system for ensuring the uniformity of measurements. Density of petroleum and petroleum products. Methods of calculation. Programma and tables of calculation : State system for ensuring the uniformity of measurements. Density of petroleum and petroleum products. Methods of calculation. Programma and tables of calculation : рекомендации по метрологии Р 50.2.076-2010 : введены впервые : введены 2011-07-01 / Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии. - Москва : Стандартинформ, 2011. - III, 137 - Текст : непосредственный.

30 ГОСТ Р 51659-2000. Вагоны-цистерны магистральных железных дорог колеи 1520 мм. Общие технические условия = Tank cars of 1520 mm gauge main line railways. General specifications [Текст] = Tank cars of 1520 mm gauge main line railways. General specifications : государственный стандарт Российской Федерации : издание официальное : принят и введен в действие Постановлением Госстандарта России от 31 октября 2000 г. № 282-ст : введен впервые : дата введения 2001-07-01 / разработан Государственным техническим комитетом по стандартизации ТК 243

"Вагоны". - Москва : Изд-во стандартов, 2000. - II, 9, [1] с.; 29 см— Текст: непосредственный.

31 ГОСТ Р 52400-2005 Резервуары воздушные для тормозов вагонов железных дорог. Общие технические условия = Air reservoirs for railway brakes. General specifications : Air reservoirs for railway brakes. General specifications: Нац. стандарт Рос. Федерации ГОСТ Р 52400-2005 / Федер. агентство по техн. регулированию и метрологии. - Москва : Стандартинформ, 2006. - II, 9 с. — Текст: непосредственный.

32 ГОСТ Р 59033-2020. Национальный стандарт Российской Федерации. Услуги на железнодорожном транспорте. Требования к качеству услуг по перевозке нефти и нефтепродуктов в вагонах-цистернах: утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 15 сентября 2020 г. No 650-ст: введен 15.09.2020 [Текст]. – Москва.: Стандартинформ. – 12 с. – Текст : непосредственный.

33 Гребер, Г. Основы учения о теплообмене. / Г. Гребер, С. Эрк, У. Григуль —Москва : Изд-во иностр. лит. 1958.-566 с. — Текст : непосредственный.

34 Григолюк, Э. И. Критические нагрузки трехслойных цилиндрических и конических оболочек : учебное пособие / Э. И. Григолюк, П. П. Чулков ; Издательство «Западно-Сибирское книжное издательство». – Новосибирск : 1966 - 222 с. - Текст : непосредственный.

35 Григолюк, Э. И. Устойчивость и колебания трехслойных оболочек : учебное пособие / Э. И. Григолюк, П. П. Чулков ; Издательство «Машиностроение». - Москва : 1973 - 172 с. - Текст : непосредственный.

36 Гуд, Г. Х. Системотехника. Введение в проектирование больших систем / Г. Х. Гуд, Р. Э. Макол ; пер. с англ. К. Н. Трофимова; под ред. Г. Н. Поварова. – Москва. : Сов. радио, 1962. – 383 с. – Текст : непосредственный.

37 Жебанов, А. В. Исследование и основные критерии выбора теплоизоляционного материала в применении для подвижного состава железных дорог / А. В. Жебанов // Материалы региональной науч.-практ. конф. «Образование, наука, транспорт в XXI в.: опыт, перспективы, инновации» /

Оренбургский гос. ин-т путей сообщения. – Оренбург, 2010. – С. 17, 18. – Текст : непосредственный.

38 Жебанов, А. В. Полный цикл работы цистерны с теплоизоляцией: от нанесения покрытия, эксплуатации, ремонта до утилизации / А. В. Жебанов // Транспорт Урала / Уральский гос. ун-т путей сообщения. – Екатеринбург. – 2012. – № 1. – С. 51 – 54. – Текст : непосредственный.

39 Жебанов, А. В. Пути снижения тепловпотерь вязких нефтегрузов при транспортировке железнодорожным транспортом / А. В. Жебанов // Известия Транссиба. – 2016. – № 3. – С. 31 – 38. . – Текст : непосредственный.

40 Жебанов, А. В. Сохранение теплофизических свойств перевозимых в вагонахцистернах нефтепродуктов при переводе их в стратифицированное состояние / А. В. Жебанов, В. И. Моисеев. // Наука и образование транспорту. – 2017. – № 1. – С. 27 – 29. – Текст : непосредственный.

41 Жебанов, А. В. Управление теплофизическими процессами в нефтепродуктах при их перевозках в теплоизолированном вагоне: специальность 05.22.07 "Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация"/ Жебанов Александр Владимирович. – Санкт-Петербург, 2017. – 129 с. – Текст : непосредственный.

42 Иванов, А. И. Становление железнодорожного транспорта России 1800–1930 годы / А. И. Иванов, Р. М. Хусаинов, А. Р. Бахтизина // Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья. – 2016. – №4. – С. 70-72. – Текст : непосредственный.

43 Когда впервые появились цистерны на железных дорогах и почему они менее экономически эффективны чем другие типы вагонов? / dzen.ru : [сайт]. – URL: <https://dzen.ru/a/YKKQGxm-fiF0APhp> / (дата обращения: 01.02.2023). – Текст : электронный.

44 Козловский, В. А. Гигиеническое нормирование некоторых продуктов химической трансформации несимметричного диметилгидразина в почве / В. А. Козловский, Г. К. Эилрбеков, А. П. Позднякова и др. // Наука о жизни и здоровье. — 2014. — 79 с. – Текст : непосредственный.

45 **Красковский, А. Е.** Комплексная оценка рисков для безопасности движения / А. Е. Красковский, Д. И. Рогоза, П. А. Плеханов // Изв. Петерб. ун-та путей сообщения. – Санк-Петербург. : ПГУПС 2011. – Вып. 1. – С. 54 –65. – Текст: непосредственный.

46 **Лазарян, В. А.** Динамика транспортных средств : Избр. тр. / В. А. Лазарян; [Вступ. ст. С. И. Конашенко]. - Киев : Наук. думка, 1985. - 526 с. : ил., 1 л. портр.; 25 см. - Текст : непосредственный.

47 **Ломакин, А. И.** Токсическое воздействие несимметричного диметилгидразина (гептила) на организм человека / А. И. Ломакин, О. П. Трикман, Л. Э. Скрипкина и др. // Вестник Клинической больницы. — 2012. — № 51. — 105 с. – Текст: непосредственный.

48 **Лукин, В. В.** Конструирование и расчет вагонов / В. В. Лукин, Л. А. Шадур, В. Н. Котуранов, А. А. Хохлов, П. С. Анисимов; под ред. В. В. Лукина. М.: УМК МПС России, 2000. - 731 е., ил.

49 **Львов, А. А.** Контейнеры : (Конструкции, теория, расчет). Учеб. пособие / А. А. Львов. - Москва : МИИТ, 1982. - 119 с. : ил.; 20 см. - Текст : непосредственный.

50 **Маршалл, В.** Основные опасности химических производств.-Москва.: Мир. 1989. ISBN: 5-03-000990-6. – Текст: непосредственный.

51 **Машин, В. А.** Культура безопасности: анализ коренных причин / В. А. Машин // Электрические станции. – 2018. – № 11. – С. 2–14. – Текст: непосредственный.

52 **Мерков, А. М.** Санитарная статистика / А. М. Мерков, Л. Е. Поляков. — Л.: Медицина, 1974. — С. 384. – Текст: непосредственный.

53 **Мокршицкий, Е. И.** История вагонного парка железных дорог СССР. — Москва.: Государственное транспортное железнодорожное издательство, 1946. С. 63. 205 с. ISBN. 978-5-458-53981-4. – Текст: непосредственный.

54 **Недорчук, Б. Л.** Методы оценки эффективности технических средств защиты котлов цистерн для опасных грузов при аварийных ситуациях: специальность 05.22.07 "Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и

электрификация"/ Недорчук Борис Лаврентьевич. – Москва., 2000. – 196 с. – Текст : непосредственный.

55 Нефтеперевозки на РЖД ушли вниз / rzd-partner.ru : [сайт]. – URL: <https://www.rzd-partner.ru/zhd-transport/comments/nefteperevozki-na-rzhd-ushli-vniz/> (дата обращения: 01.02.2023). – Текст : электронный.

56 **Никольский, Е. Н.** Расчет несущих конструкций вагонов по методу конечных элементов / Е. Н. Никольский. - Брянск : БИТМ, 1982. - 98 с. : ил.; 20 см. - Текст : непосредственный.

57 Нормативный документ «Порядок определения размеров ущерба от загрязнения земель химическими веществами» // Министерство охраны окружающей среды и природных ресурсов Российской Федерации от 27.12.1993 № 04-25. – Текст : непосредственный.

58 Нормы для расчета и проектирования вагонов железных дорог МПС колеи 1520 мм (несамоходных). – Москва.: Изд-во ИПК Издательство стандартов, 2000. – 8 с. – Текст: непосредственный.

59 **Панин, Л. Е.** Медико-социальные и экологические проблемы использования ракет на жидком топливе (гептил) / Л. Е. Панин, А. Ю. Перова. // Сибирский научный медицинский журнал. — Новосибирск, 2006. — 152 с. – Текст : непосредственный.

60 **Патент РФ № 2004114170/22, 13.05.2004. КЛАПАН**// Патент России № RU 40 777 U1. 2000. / Антонов В. А., Архипов Л. Н., Иванов Н. В., Петров В. Д., Никитина Л. Г., Недорчук Б. Л., Филиппов В. Н., Попов В. Г. – Текст : непосредственный.

61 **Петров, С. В.** Совершенствование методов оценки и управления аварийным риском в чрезвычайных ситуациях при перевозке нефтепродуктов на железнодорожном транспорте : специальность 05.26.02 «Безопасность в чрезвычайных ситуациях (по отраслям)» : диссертация на соискание степени кандидата технических наук / Петров Сергей Викторович. ; Московский государственный университет путей сообщения МГУПС (МИИТ). – Москва, 2009. – 142 с. – Текст : непосредственный.

62 Петров, С. В. Совершенствование методов оценки и управления аварийным риском в чрезвычайных ситуациях при перевозке нефтепродуктов на железнодорожном транспорте: специальность 05.26.02 «Безопасность в чрезвычайных ситуациях (транспорт)»: автореферат диссертации на соискание степени кандидата технических наук / Петров Сергей Викторович. ; Московский государственный университет путей сообщения МГУПС (МИИТ). – Москва, 2009. – 24 с. – Текст : непосредственный.

63 Подготовка к эксплуатации вагонов-цистерн для перевозки нефтепродуктов/ Е. Г. Асманкин, Е. Н. Алёхин, Д. Ю. Ившин, [и др.]. // Транспортное дело России – 2023 – №3 – С. 264-269. – Текст : непосредственный.

64 Положение о классификации чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера // Утверждено Постановлением Правительства РФ № 1094 от 13.9.1996 г. – Текст : непосредственный.

65 Попов, В. Г. Выбор стратегии энерго- и ресурсосбережения в рамках экологической политики организации / В. Г. Попов, Ф. И. Сухов, Ю. А. Чамова // Безопасность жизнедеятельности. – 2016. – № 2 (182). – С. 31–35. – Текст : непосредственный.

66 Попов, В. Г. Оценка риска от аварийных происшествий / В. Г. Попов, Ф. И. Сухов, С. В. Петров // Мир транспорта. Москва – 2012. – № 6 (44). – С. 150 –155. – Текст : непосредственный.

67 Попов, В. Г. Совершенствование методов анализа термодинамической эффективности объектов и систем обслуживания подвижного состава: специальность 05.22.07 "Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация": диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Попов Владимир Георгиевич. – Москва, 2000. – 350 с. – Текст : непосредственный.

68 Попов, В. Г. Модель поведения железнодорожных цистерн со сжиженным газом в очаге пожара. - В кн. II: Безопасность движения поездов/ В. Г. Попов, В. Ю. Навценя //Труды II Научно-практической конференции. Москва.: МИИТ. 2000. -С. V-10 V-11. – Текст : непосредственный.

69 Правила перевозки опасных грузов. - Москва.: Транспорт. 1987. - 102 с. – Текст : непосредственный.

70 Правила перевозок железнодорожным транспортом грузов наливом в вагонах-цистернах и вагонах бункерного типа для перевозки нефтебитума: утверждены Приказом Министерства транспорта Российской Федерации от 29.07.2019 № 245: введены в действие 07.02.2020. – Текст : непосредственный.

71 **Российская Федерация. Законы.** Транспортный устав железных дорог Российской Федерации : Принят Гос. Думой 19 дек. 1997 г. - Москва : Транспорт, 1998. - 94 с.; 17 см.; ISBN 5-277-02093-4. – Текст : непосредственный.

72 **Российская Федерация. Законы.** Федеральный закон "О безопасности" : от 28.12.2010 N 390-ФЗ : действует с 29.12.2010. - Москва : КноРус, 2011. - 12, [1] с.; 20 см.; ISBN 978-5-406-01630-5. – Текст : непосредственный.

73 **Российская Федерация. Законы.** Федеральный закон Российской Федерации 184-ФЗ: текст с изменениями и дополнениями на 21 ноября 2022 года : [принят Государственной думой 15 декабря 2002 года : одобрен Советом Федерации 18 декабря 2002 года]. – Москва : АО "Кодекс", 2002. – 80 с. ;– (Актуальное законодательство). – ISBN 978-5-900080-47-5. – Текст : непосредственный.

74 Руководство по эксплуатации 1219М.00.00.000 РЭ вагона-цистерны для нефтепродуктов модели // 15-1219 "Рузаевский завод химического машиностроения". – Текст : непосредственный.

75 Руководство по эксплуатации ВАГОН-ЦИСТЕРНА ДЛЯ ПЕРЕВОЗКИ НЕФТЕПРОДУКТОВ. МОДЕЛЬ 15-9993 // ООО «ВНИЦТТ» – Текст : непосредственный.

76 Руководство по эксплуатации ЦДЛР.0121.00.00.000 РЭ «Вагон-цистерна для химических грузов модель 15-9993-03» // Согласовано Заместителем начальника Департамента технической политики ОАО «РЖД» 29.09.2021. – Текст : непосредственный.

77 Соколов, Ю. И. Вопросы безопасности транспортировки опасных грузов / Ю. И. Соколов // Проблемы анализа риска. — 2009. — Т. 6. — № 1. — Текст : непосредственный.

78 Специализированные цистерны для перевозки опасных грузов. Справочное пособие. — Москва.: Министерство путей сообщения РФ, 1993. — 251 с. ISBN: 979-5-904080-17-3. — Текст : непосредственный.

79 Сухов, Ф. И. Управление безопасностью движения поездов на основе интегральной оценки уровня безопасности / Ф. И. Сухов, В. Г. Попов, В. Н. Филиппов. // Интеллектуальная энергетика на транспорте и в промышленности: Материалы всероссийской молодежной научно-практической конференции с международным участием, Омск, 04–05 октября 2018 года. — Омск: Омский государственный университет путей сообщения, 2018. — С. 316-322. — Текст : непосредственный.

80 Урсул, А. Д. Перспективы безопасного будущего цивилизации / А. Д. Урсул, А. Л. Романович // Вестник РАЕН. — 2002. — № 4. — С. 27–33. — Текст : непосредственный.

81 Устойчивое развитие транспорта в городах России: Опыт и актуальные задачи / Ю. М. Гришаева, О. Ю. Матанцева, И. В. Спирин [и др.]. // Юг России: экология, развитие. — 2018. — Т. 13, № 4. — С. 24–48. — Текст : непосредственный.

82 Ушакова, В. Г. Особенности химических превращений НДМГ и его поведение в объектах окружающей среды / В. Г. Ушакова, О. Н. Шпигун, О. И. Старыгин. // Ползуновский вестник. — 2004. — Текст : непосредственный.

83 Федоров, С. А., Новая арматура для нефтебензиновых вагонов-цистерн / С. А. Федоров, М. В. Агинских, А. В. Калугин. // Транспорт Российской Федерации. — 2021. — № 5-6. — С. 82 – 86. — Текст : непосредственный.

84 Фисенко, В. В. Критические двухфазные потоки. - Москва.: Атомиздат. 1978, 159 с. ISBN 5-85900-059-6. - Текст : непосредственный.

85 Цистерны. (Устройство, эксплуатация, ремонт). Справочное пособие. - Москва.: 1990.-154 с. - Текст : непосредственный.

86 Черемных, О. Я. Создание, совершенствование конструкции, перспектива развития транспортных средств для жидкого водорода / О. Я. Черемных, В. Д. Хусидов. // Инженерный журнал: наука и инновации выпуск №3 - 2017. – С. 1-19. - Текст : непосредственный.

87 Шебеко, Ю. Н. Исследование влияния вспучивающегося огнезащитного покрытия на поведение резервуаров со сжиженными углеводородными газами в очаге пожара. / Ю. Н. Шебеко, В. Н. Филиппов и др. – Текст : непосредственный // Пожаровзрывобезопасность. 1998. т. 7. №1. - С. 24-32. - Текст : непосредственный.

88 Шебеко, Ю. Н. Пожаровзрывобезопасность перевозок сжиженных углеводородных газов железнодорожным транспортом. Постановка задачи и рассмотрение типовых сценариев аварий. / Ю. Н. Шебеко, А. П. Шевчук, И. М. Смолин, В. Н. Филиппов и др. ; Пожаровзрывобезопасность. 1992. №4. - С. 46-51. – Текст : непосредственный.

89 Шебеко, Ю. Н. Способы противопожарной защиты резервуаров со сжиженными углеводородными газами. / Ю. Н. Шебеко, В. Н. Филиппов ; Пожаровзрывобезопасность. 1999. №4. – С. 33 - 42. – Текст : непосредственный.

90 Шубинский, И. Б. Методы обеспечения функциональной безопасности движения поездов с учетом использования гармонизированных стандартов / И. Б. Шубинский. - Лондон, 2008. – 40 с. - Текст : непосредственный.

91 Экологические проблемы и риски воздействий ракетно-космической техники на окружающую природную среду / Под общ. ред. В. В. Адушкина, С. И. Козлова, А. В. Петрова. — Москва.: Анкил, 2000. — С. 640. – Текст : непосредственный.

92 Abashev, A. Programming Tools for Messenger-Based Chatbot System Organization: Implication for Outpatient and Translational Medicines / A. Abashev, R. Grigoryev, K. Grigorian, V. Boyko, BioNanoScience.// BioNanoScience №7, 403 (2017) DOI: 10.1007/s12668-016-0376-9. - Текст : непосредственный.

93 Akhtyamov, R. G. Assessment of damage in accidents and development of technical solutions to ensure safety on the railroad transport/ T. S. Titova¹ , R. G. Akhtyamov¹ , N. N. Ionova¹ , and N. A. Mescheriakova¹// E3S Web of Conferences

383, 01002 (2023) <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202338301002>. - Текст : непосредственный.

94 **Asmankin, E. G.** Environmental and digital competencies in the education of engineering specialists/ Vladimir Popov, Natalya Klycheva, Julia Bolandova, Eugene Asmankin, and Philipp Sukhov// 1st International Conference on Environmental Sustainability Management and Green Technologies, 2021. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202129608019>. - Текст : непосредственный.

95 **Bespalko, S.** A technique for evaluation of tank boiler stability by the variational method/ Sergey Bespalko; Akrom Akhmedov; Pavel Grigorev; Sherzod Ibodulloev// AIP Conf. Proc. 2637, 050006. (2022) <https://doi.org/10.1063/5.0118303>. - Текст : непосредственный.

96 **Brambilla, S.** The Viareggio LPG railway accident: event reconstruction and modeling/ Sara Brambilla, Davide Manca//Journal of Hazardous Materials 182, – p. 346-357 (2010) doi: 10.1016/j.jhazmat.2010.06.039. - Текст : непосредственный.

97 **Davenport, J.A.** Hazards and protection of pressure storage and transport of LP-gas//Journal of Hazardous Materials. 1988. v. 20. № 1-3. – p. 3-19. - Текст : непосредственный.

98 **Hans, P.** Risk Analysis and Control for Industrial Processes - Gas, Oil and Chemicals, 1-31 (2015) doi: 10.1016/j.matpr.2020.08.524. - Текст : непосредственный.

99 **Hemmatian, B.** Comparative analysis of BLEVE mechanical energy and overpressure modelling// Behrouz Hemmatian, Eulàlia Planas// Joaquim Casal Process Safety and Environmental Protection 106, 138-149 (2017) doi: 10.1016/j.psep.2017.01.007. - Текст : непосредственный.

100 **Hemmatian, B.** Fire as a primary event of accident domino sequences: The case of BLEVE / B.Hemmatian, E.Planas, J.Casal// Journal of Loss Prevention in the Process Industries 40, 81 (2016) doi: 10.1016/j.jlp.2015.12.001. - Текст : непосредственный.

101 **Hofbauer, F.** Crises and their effects on freight transport modes: A literature review and research framework/ Bianca Borca, Lisa Maria Putz, Florian Hofbauer//

Sustainability, 13(10), 1 (2021) <https://doi.org/10.3390/su13105740>. - Текст : непосредственный.

102 **Hopkinson, J.** On the rupture of iron wire by a blow / J. Hopkinson. // Proc. Manchester Literary and Philos. Soc. – V. 10, № 6. – 1872. – P. 11 – 40. – Текст : непосредственный;

103 **Jingde, Li.** Numerical simulation of medium to large scale BLEVE and the prediction of BLEVE's blast wave in obstructed environment / Jingde Li, Hong Hao// Process Safety and Environmental Protection 145, 94-109 (2021) doi: 10.1016/j.psep.2020.07.038. - Текст : непосредственный.

104 **Jingde, Li.** Numerical study of medium to large scale BLEVE for blast wave prediction/ Jingde Li, Hong Hao // Journal of Loss Prevention in the Process Industries 65, (2020) doi: 10.1016/j.jlp.2020.104107. - Текст : непосредственный.

105 **Jun-cheng, Jiang,** The BLEVE Research of Reaction Runaway Based on the Aspen Plus-Fluent/ 90.Long-fei Liu, LeiNi, Jun-chengJiang, //Wen-xingZhang Procedia Engineering 211, 479-487 (2018) doi: 10.1016/j.proeng.2017.12.039. - Текст : непосредственный.

106 **Mingzhi, Li.** A small-scale experimental study on the initial burst and the heterogeneous evolution process before CO₂ BLEVE / Mingzhi Li, Zhenyi Liu, Yi Zhou, Yao Zhao, Xuan Li //Deping Zhang, Journal of Hazardous Materials 342, 634-642 (2018), doi: 10.1016/j.jhazmat.2017.09.002. - Текст : непосредственный.

107 **Mishra, Kirti Bhushan** Multiple BLEVE's and fireballs of gas bottles: Case of a Russian road carrier accident//Journal of Loss Prevention in the Process Industries 41, 60-67 (2016) doi: 10.1016/j.jlp.2016.03.003. - Текст : непосредственный.

108 **Muhammad, K.** Failure analysis of an exploded large-capacity liquid storage tank using finite element analysis / Mahmoud Abo-Elkhier, Kamel Muhammad //Engineering Failure Analysis 110, (2020) doi: 10.1016/j.engfailanal.2020.104401. - Текст : непосредственный.

109 **Popov, V.** Safe Train Route Options / P. Sukhov, J. Bolandova //TransSiberia 2019: VIII International Scientific Siberian Transport Forum, 899 (2019). pp 899–908. DOI: 10.1007/978-3-030-37919-3_89. - Текст : непосредственный.

110 **Popov, V.** Technical Rationale for Protective Equipment Propane Tanks in a Model Fire/ Vladimir Popov, Eugene Asmankin, Philipp Sukhov, Julia Bolandova // XIV International Scientific Conference “INTERAGROMASH 2021” pp 169–177, https://doi.org/10.1007/978-3-030-80946-1_17. - Текст : непосредственный.

111 **Ramskill, P. K.** A description of the “ENGULF” computer codes – codes to model the thermal response of an LPG tank either fully or partially engulfed by fire.//Journal of Hazardous Materials. 1988. v. 20. № 1-3. –P. 177-196. - Текст : непосредственный.

112 **Sallet, D. W.** Critical two-phase mass flow rates of liquefied gases.//Journal of Loss Prevention in the Process Industries. 1990. v. 3. № 1. –P. 38-42. - Текст : непосредственный.

113 **Sellami, I.** BLEVE fireball modeling using Fire Dynamics Simulator (FDS) in an Algerian gas industry/ Ilyas Sellami BradManescau KhaledChetehouna Charlesde Izarra Rachid Nait-Said Fatiha Zidan // Journal of Loss Prevention in the Process Industries 54, 69-84 (2018) doi: 10.1016/j.jlp.2018.02.010. - Текст : непосредственный.

114 **Shebeko, Yu. N.** BLEVE prevention using vent devices./ Yu. N. Shebeko, A. P. Shevchuck, I. M. Smolin // Journal of Hazardous Materials. 1996. v. 50.–p. 227-238. - Текст : непосредственный.

115 **Tepic, G.** Simulation Model of Fragmentation Risk/ Mirko Djelosevic and Goran Tepic // Simulation Modeling, 1-19 p. DOI:10.5772/intechopen.98955. - Текст : непосредственный.

116 **TODD, W.** Protect Tanks from Overpressure and Vacuum./ W. TODD, P. E. DRENNEN, // American Institute of Chemical Engineers (AIChE). 2019. <https://www.aiche.org/resources/publications/cep/2019/december/protect-tanks-overpressure-and-vacuum> (Дата обращения: 13.06.2023).

117 **Vakulenko, S. P.,** Graphs for the Replicator Equations and the “Tragedy of the Exhaustion of the Common Resource”/ 94. N. K. Volosova, A. K. Volosova, K. A. Volosov, S. P. Vakulenko //Mathematical Models and Computer Simulations, 12, 246 (2020). Doi: 10.3934/mbe.2011.8.659. - Текст : непосредственный.

118 **Venting Atmospheric and Low-Pressure Storage Tanks.** API Standard 2000. // American Petroleum Institute. - Текст : непосредственный.

119 **Yao, Zhao** Numerical Simulation on BLEVE Mechanism of Supercritical Carbon Dioxide / Yao Zhao, Zhenyi Liu, Xiaohui Shi, Xinming Qian, Yi Zhou, Deping Zhang, Qing Li //Energy Procedia 75, 880- 885 (2015) doi: 10.1016/j.egypro.2015.07.204. - Текст : непосредственный.

120 **Ying, Zhen Li** Overview of research on fire safety in underground road and railway tunnels/Ying Zhen Li, Haukur Ingason Tunnelling and Underground Space Technology 81, 568-589 (2018) <https://doi.org/10.1016/j.tust.2018.08.013>. - Текст : непосредственный.

121 **Yuanyuan Wang** Hazard analysis on LPG fireball of road tanker BLEVE based on CFD simulation / Yuanyuan Wang, Xiaochen, Gu Li Xia, Yong Pan Yuqing, Ni Supan Wang Wei Zhou Journal of Loss Prevention in the Process Industries 68, (2020) <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2020.104319>. - Текст : непосредственный.

122 **Zhang Hai-qian** CeO₂ Nanowires Aqueous -Radiation Dosimeter for Low Dose Sensitively Detecting/ LI Ying-ying, DONG Xiang , ZHANG Hai-qian// Liang Dong Procedia Engineering 52, 602-606 (2013) doi: 10.1016/j.proeng.2013.02.127. - Текст : непосредственный.

**ДИАГРАММА ЗАВИСИМОСТИ ДАВЛЕНИЯ ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ,
ПОЛУЧЕННЫХ В РЕЗУЛЬТАТЕ ФИЗИЧЕСКОГО ЭКСПЕРИМЕНТА
ПО ОЦЕНКЕ ВЛИЯНИЯ ТЕМПЕРАТУРНЫХ РЕЖИМОВ**

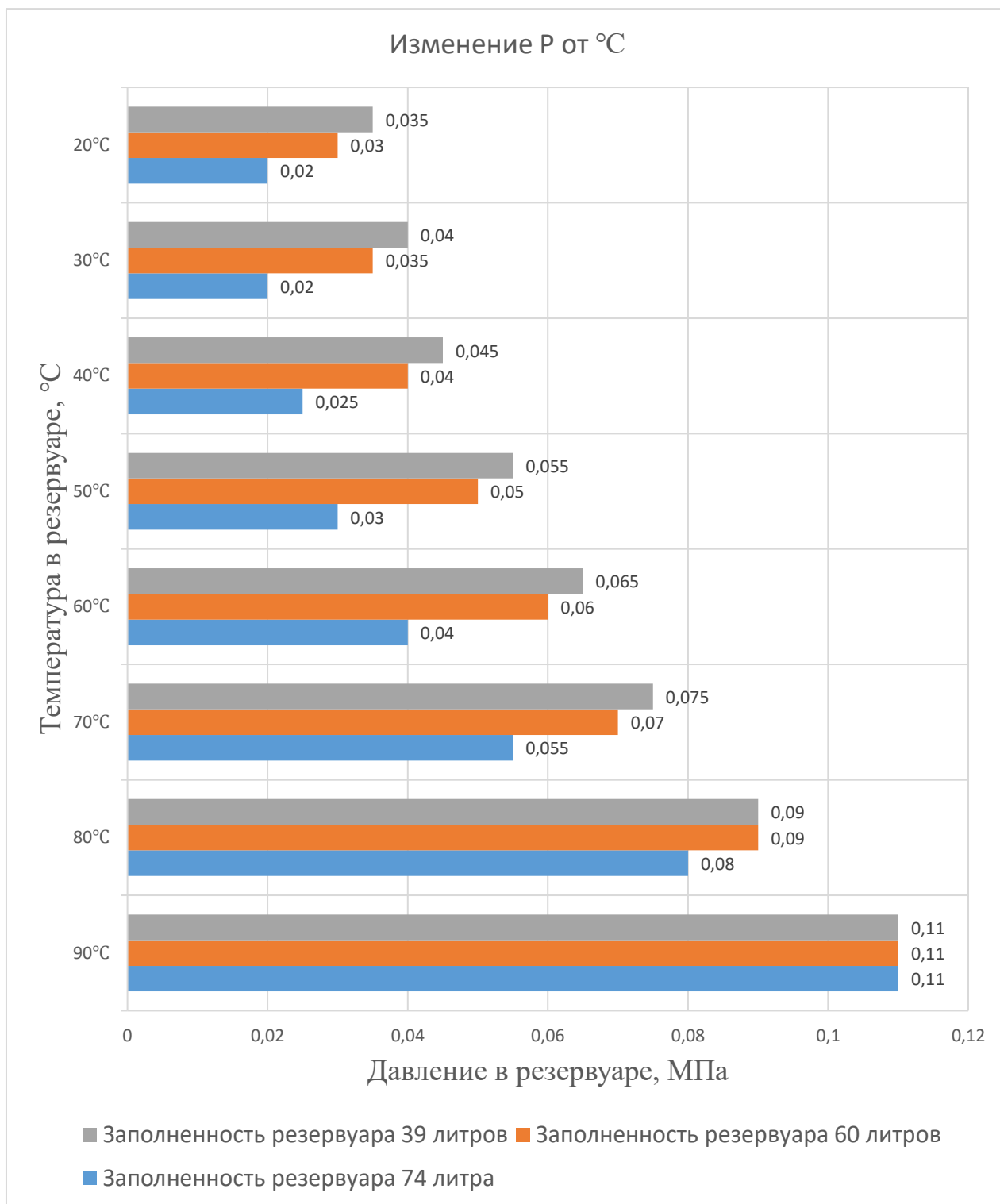


Рисунок А.1 – диаграмма зависимости давления от температуры, полученных в результате физического эксперимента по оценке влияния температурных режимов

ПОДРОБНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ИЗМЕНЕНИЯ ДАВЛЕНИЯ Р ВНУТРИ КОТЛА ВАГОНА ЦИСТЕРНЫ

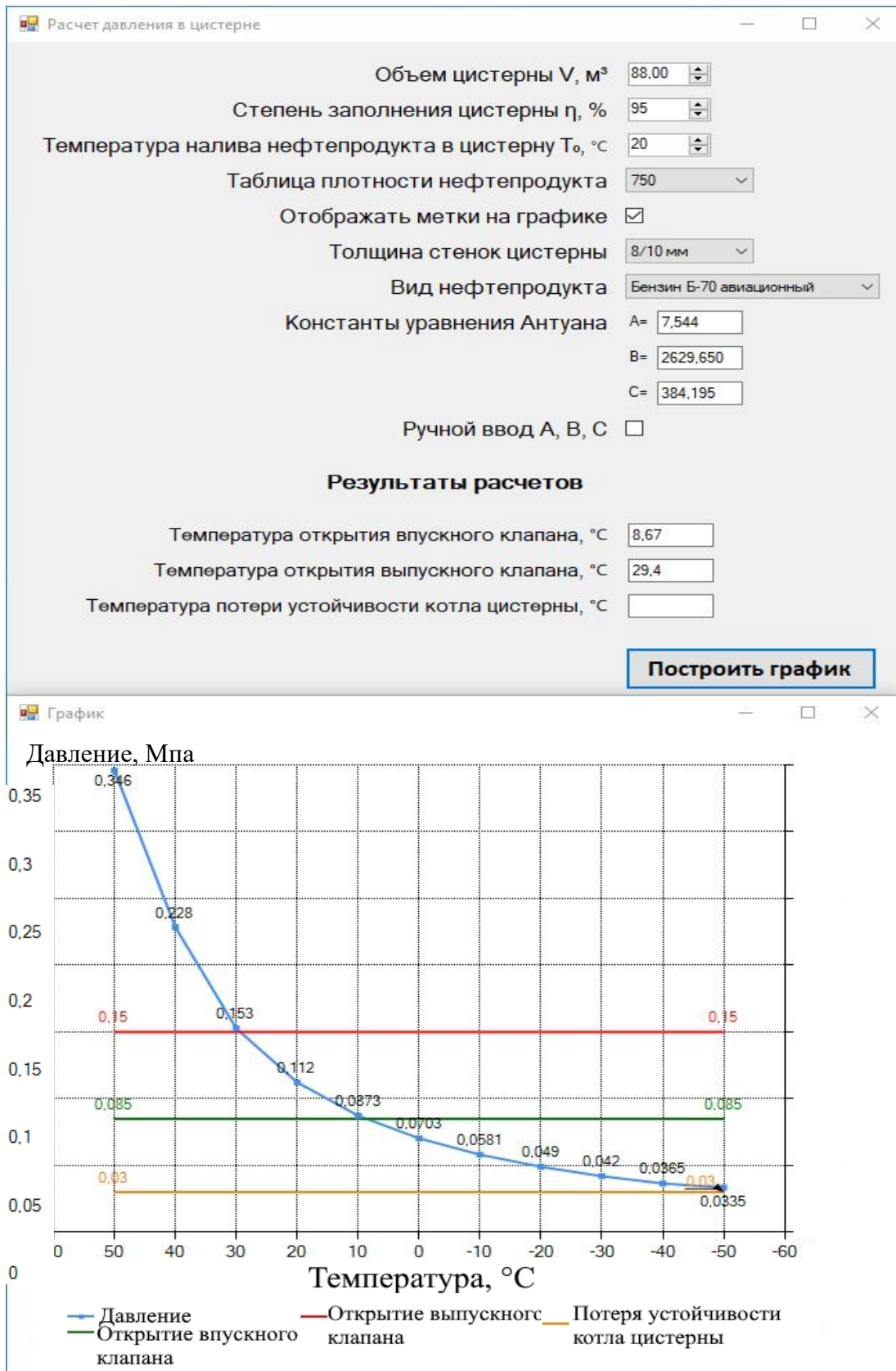


Рисунок Б.1 – результаты компьютерного моделирования внутри цистерны 15-9993

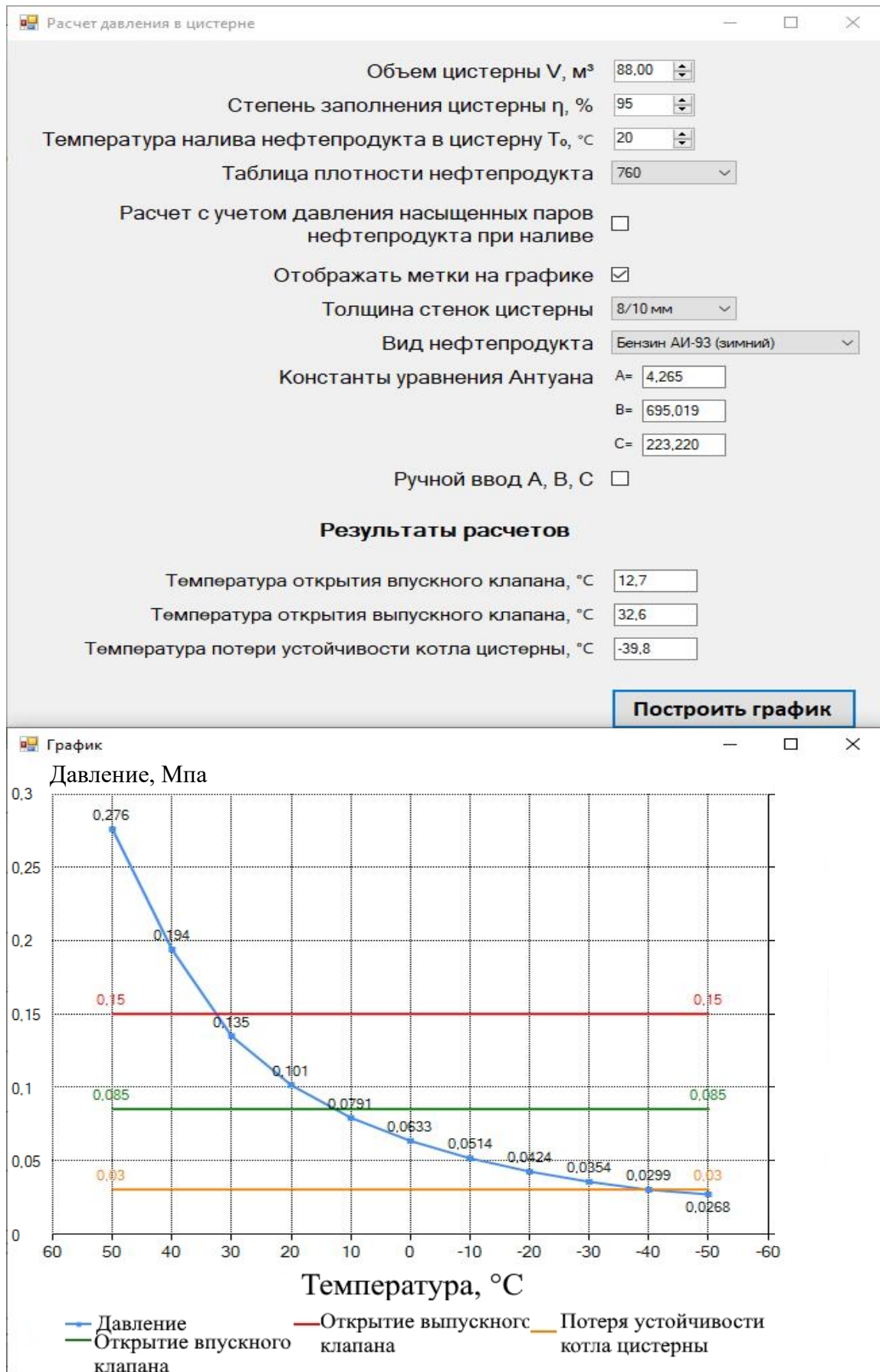


Рисунок Б.2 – результаты компьютерного моделирования внутри цистерны 15-9993

Расчет давления в цистерне

Объем цистерны V , м³ 80,00

Степень заполнения цистерны η , % 95

Температура налива нефтепродукта в цистерну T_0 , °C 50

Таблица плотности нефтепродукта 840 Дизельнск

Расчет с учетом давления насыщенных паров нефтепродукта при наливе ☐

Отображать метки на графике ☒

Толщина стенок цистерны 8/10 мм

Вид нефтепродукта Дизельное топливо "Пет"

Константы уравнения Антуана A= 5,001
B= 1314,040
C= 152,473

Ручной ввод A, B, C ☐

Результаты расчетов

Температура открытия впускного клапана, °C 40,5

Температура открытия выпускного клапана, °C

Температура потери устойчивости котла цистерны, °C -42,9

Построить график

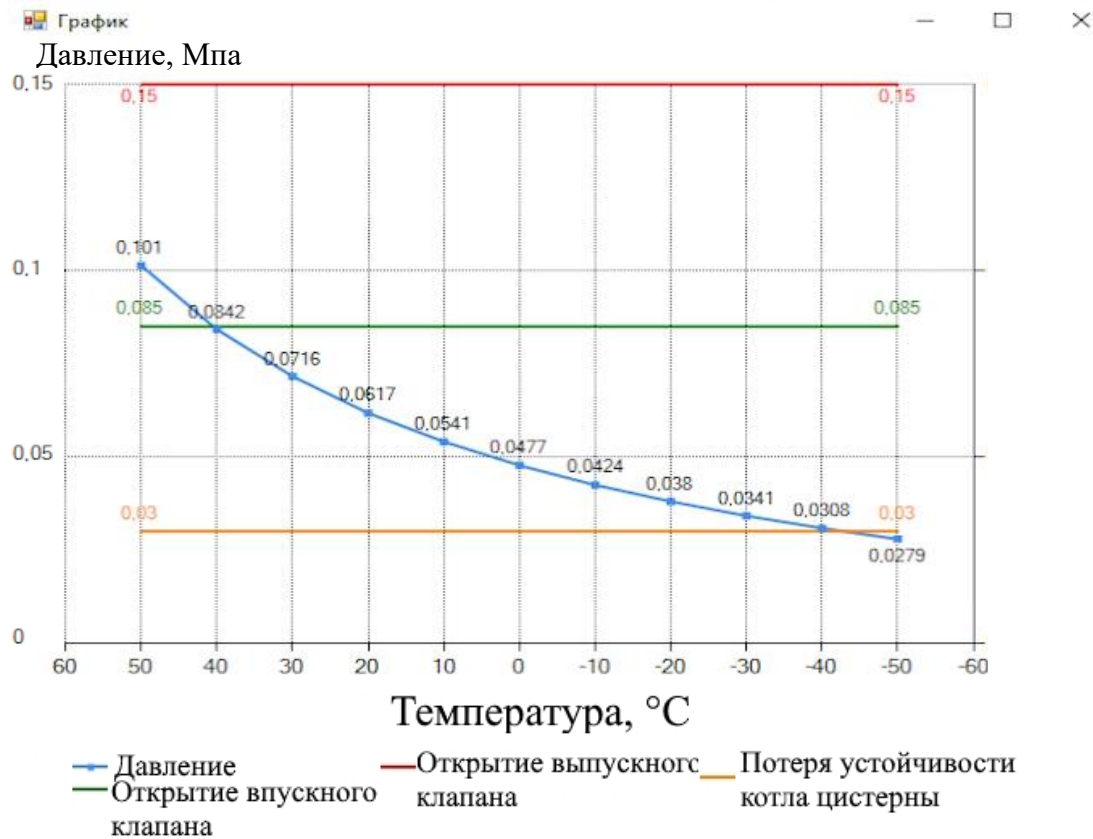


Рисунок Б.3 – результаты компьютерного моделирования внутри цистерны 15-629

Расчет давления в цистерне

Объем цистерны V , м³

Степень заполнения цистерны η , %

Температура налива нефтепродукта в цистерну T_0 , °C

Таблица плотности нефтепродукта

Расчет с учетом давления насыщенных паров нефтепродукта при наливе ☐

Отображать метки на графике ☒

Толщина стенок цистерны

Вид нефтепродукта

Константы уравнения Антуана

A=

B=

C=

Ручной ввод A, B, C ☐

Результаты расчетов

Температура открытия впускного клапана, °C

Температура открытия выпускного клапана, °C

Температура потери устойчивости котла цистерны, °C

Построить график

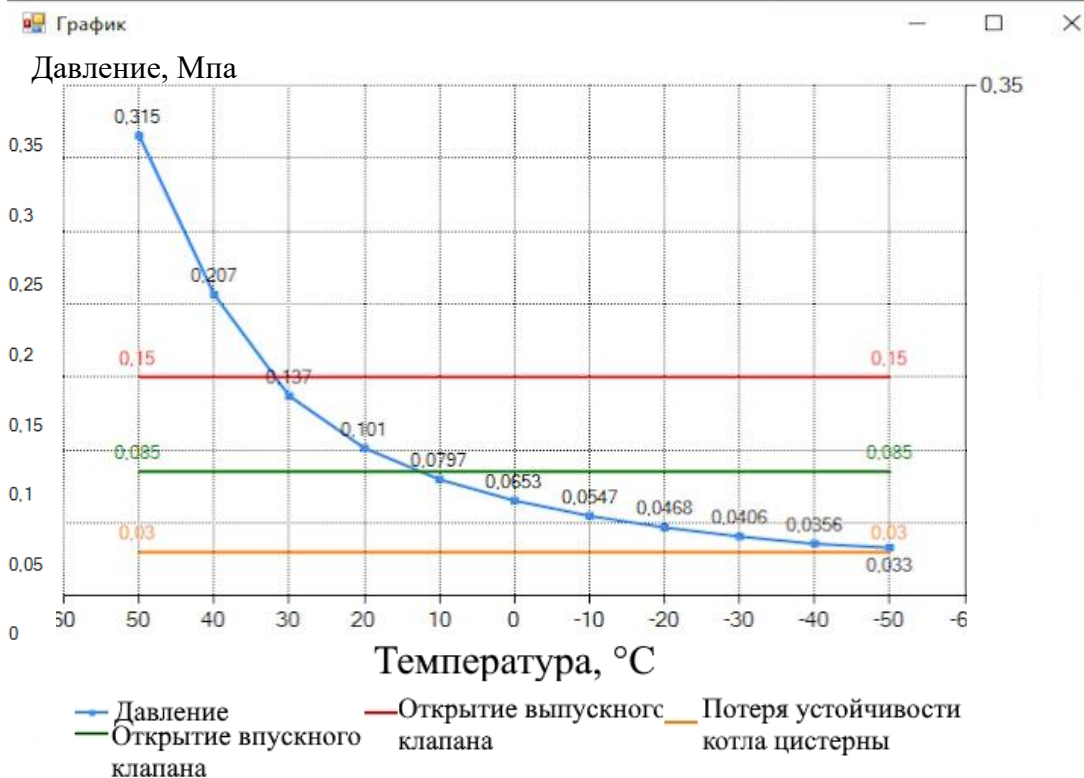


Рисунок Б.4 – результаты компьютерного моделирования внутри цистерны 15-629

ПРОДОЛЖЕНИЕ ПРИЛОЖЕНИЯ Б

Расчет давления в цистерне

Объем цистерны V , m^3 80,00

Степень заполнения цистерны η , % 95

Температура налива нефтепродукта в цистерну T_0 , $^{\circ}C$ 20

Таблица плотности нефтепродукта 790

Расчет с учетом давления насыщенных паров нефтепродукта при наливе ☐

Отображать метки на графике ☒

Толщина стенок цистерны 8/10 мм

Вид нефтепродукта Уайт-спирт

Константы уравнения Антуана $A=$ 7,136
 $B=$ 2218,300
 $C=$ 373,150

Ручной ввод A , B , C ☐

Результаты расчетов

Температура открытия впускного клапана, $^{\circ}C$ 12,5

Температура открытия выпускного клапана, $^{\circ}C$ 34

Температура потери устойчивости котла цистерны, $^{\circ}C$ -41,5

Построить график

График

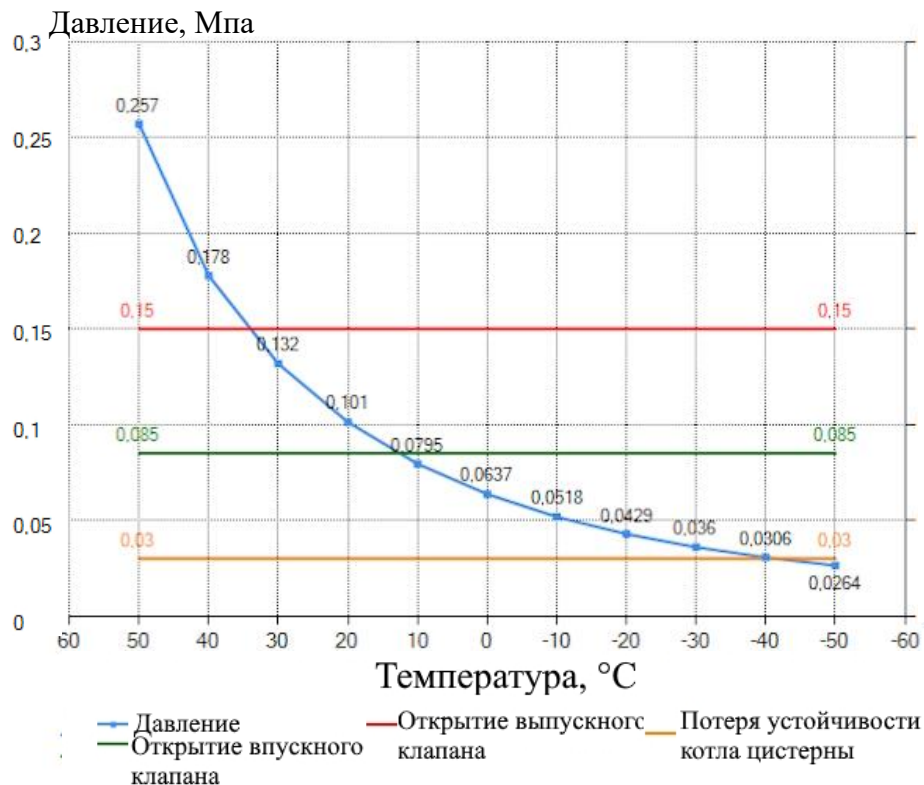


Рисунок Б.5 – результаты компьютерного моделирования внутри цистерны 15-629

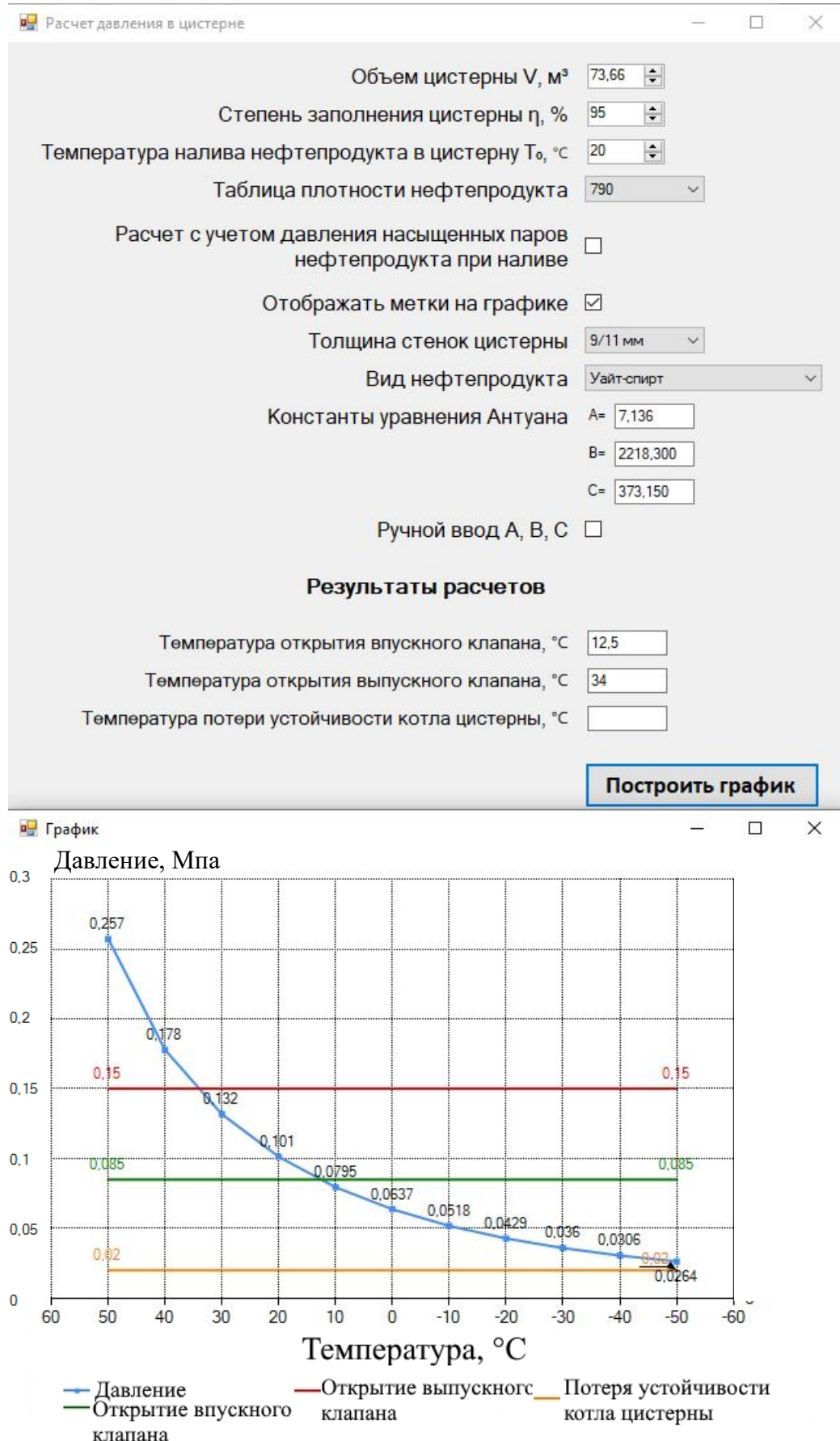


Рисунок Б.6 – результаты компьютерного моделирования внутри цистерны 15-9735

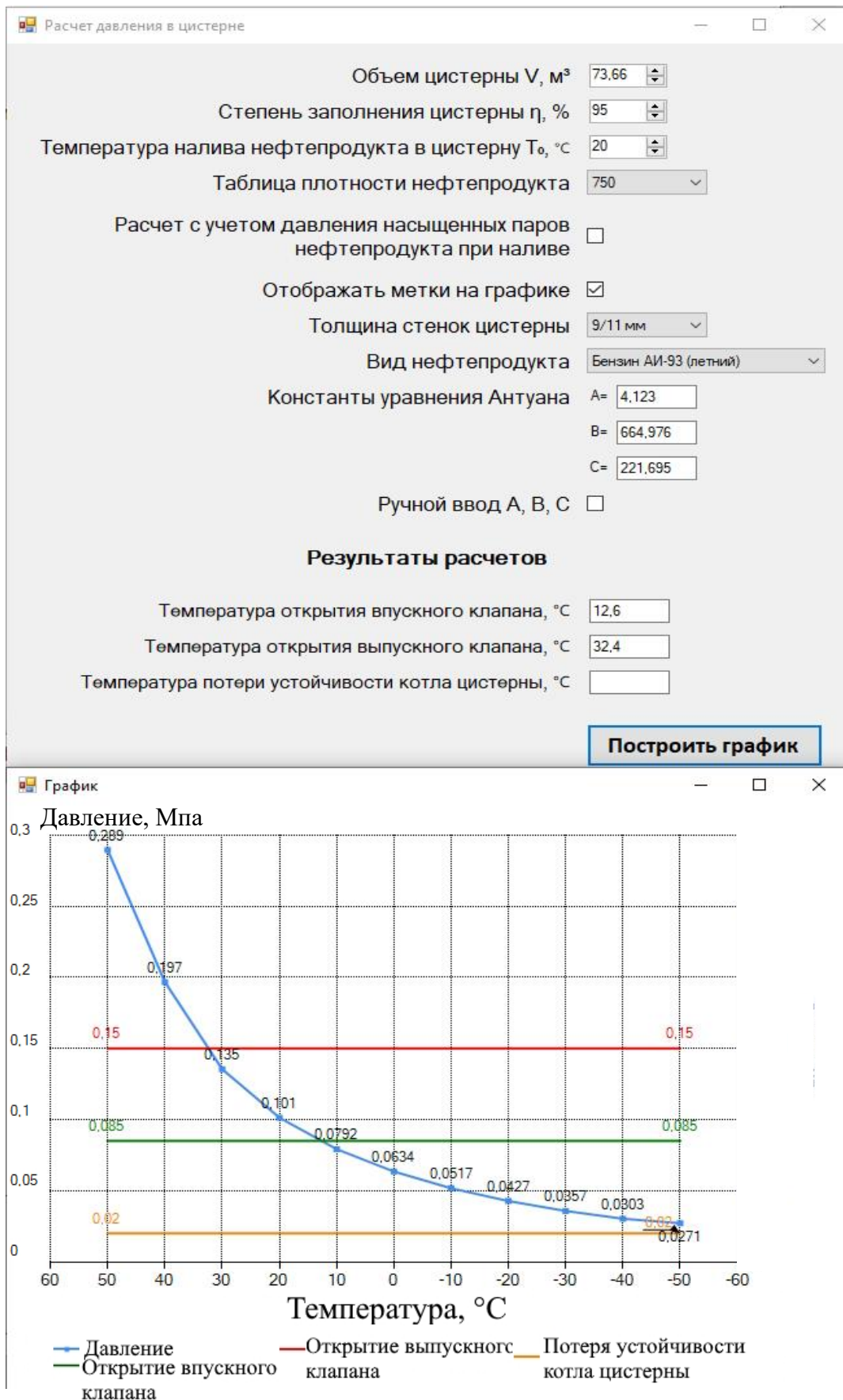


Рисунок Б.7 – результаты компьютерного моделирования внутри цистерны 15-9735

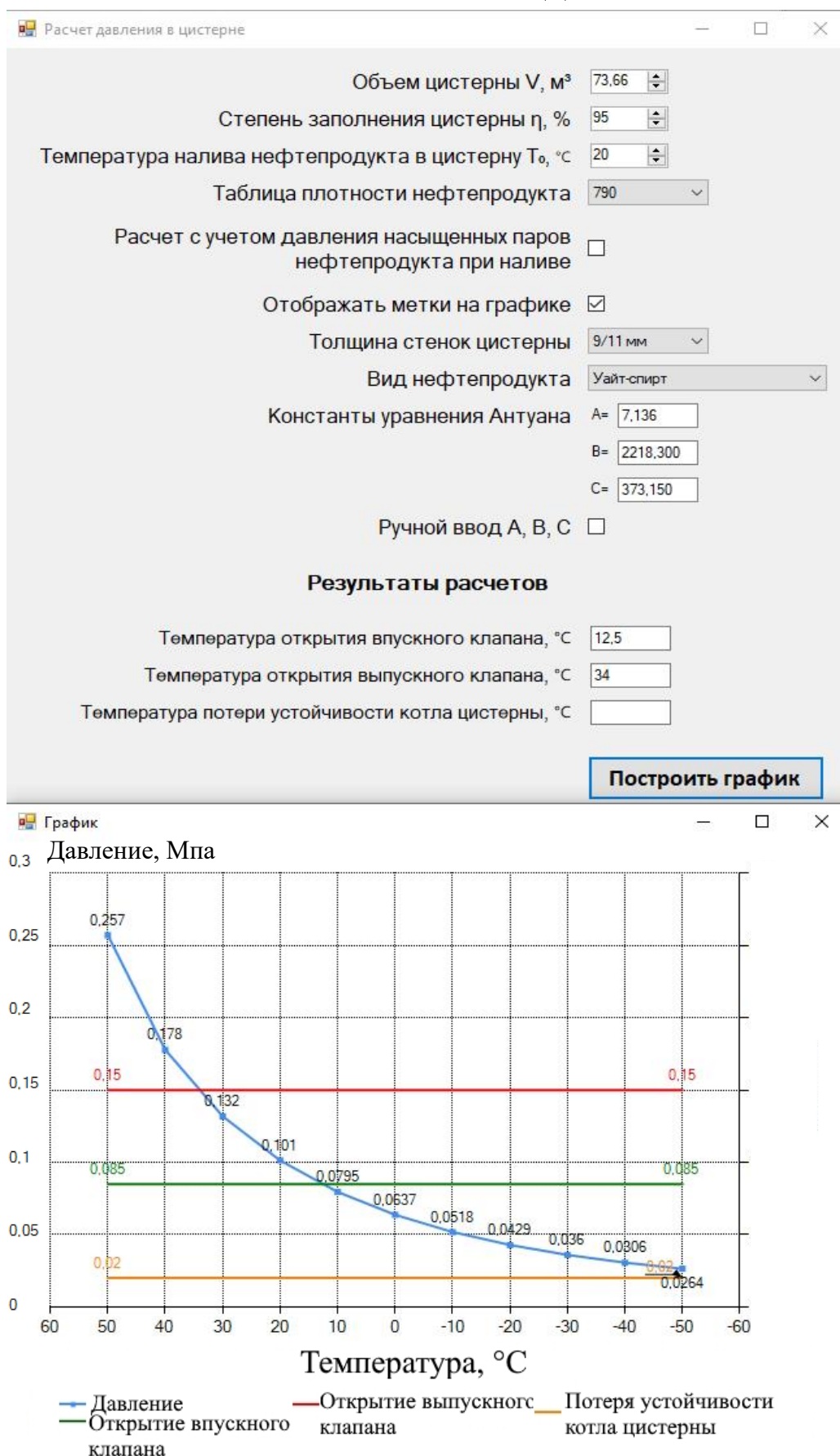


Рисунок Б.8 – результаты компьютерного моделирования внутри цистерны 15-9735

ПРОДОЛЖЕНИЕ ПРИЛОЖЕНИЯ Б

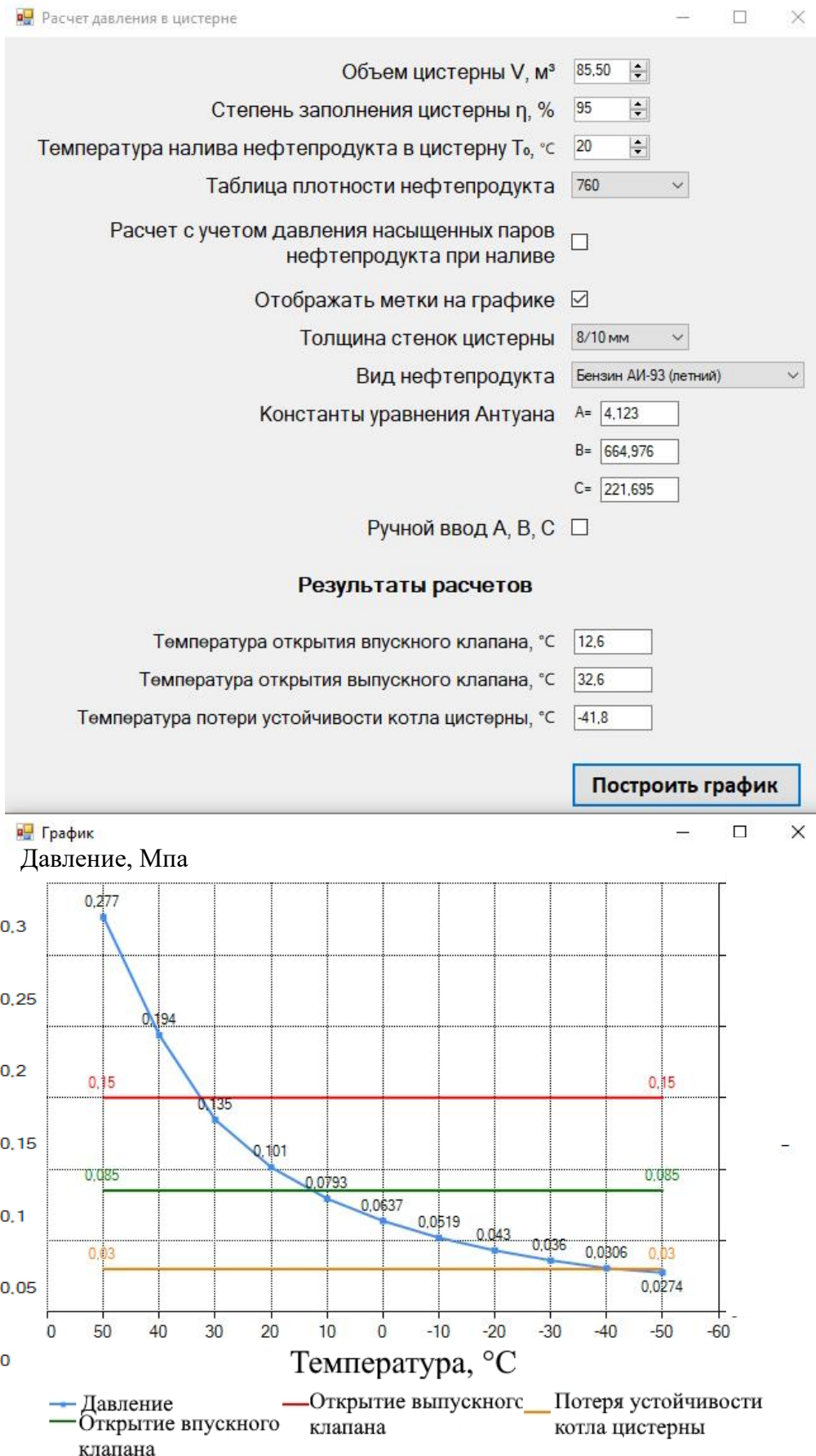


Рисунок Б.9 – результаты компьютерного моделирования внутри цистерны 15-1219

ПРОДОЛЖЕНИЕ ПРИЛОЖЕНИЯ Б

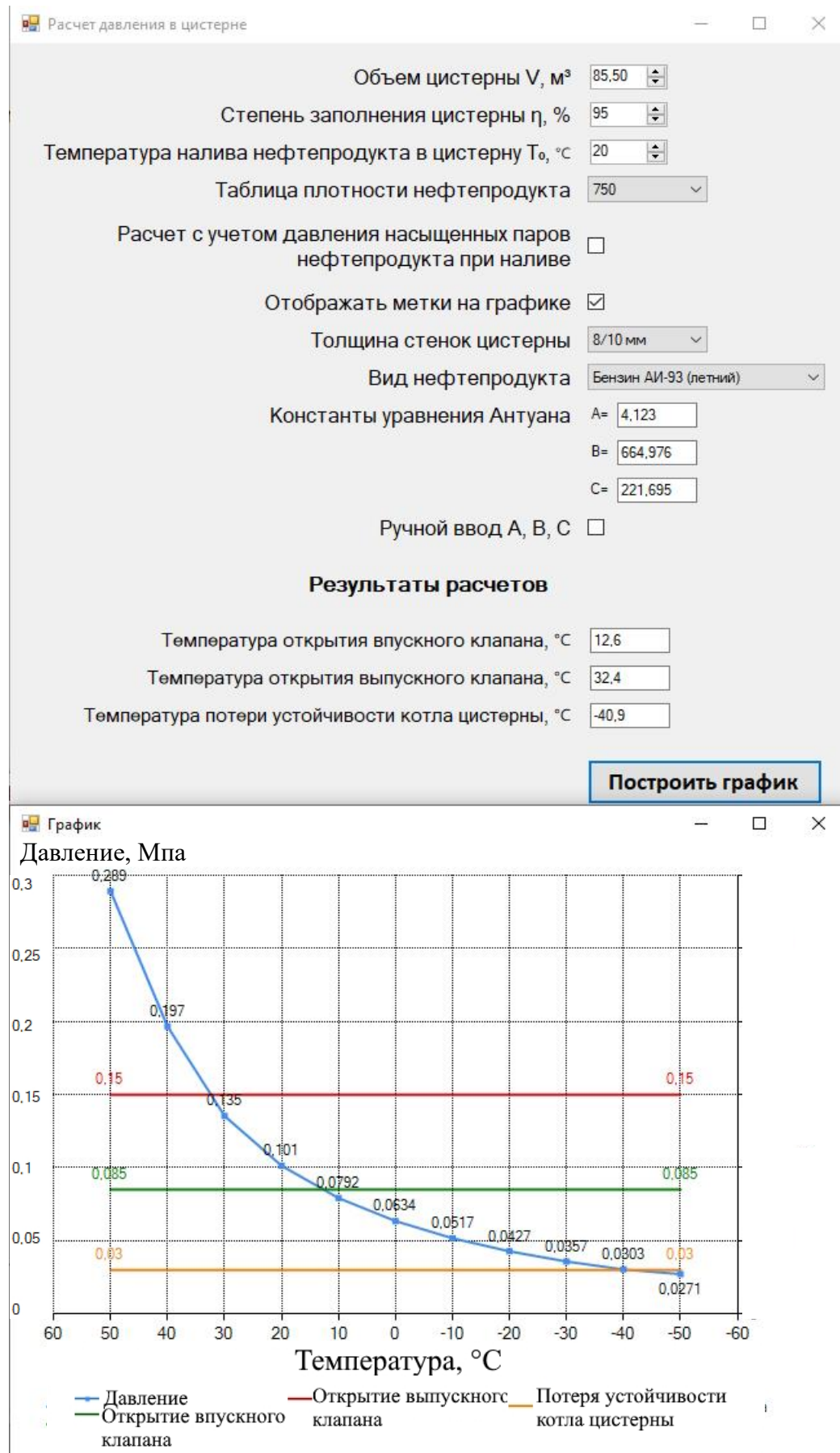


Рисунок Б.10 – результаты компьютерного моделирования внутри цистерны 15-1219

ПРОДОЛЖЕНИЕ ПРИЛОЖЕНИЯ Б

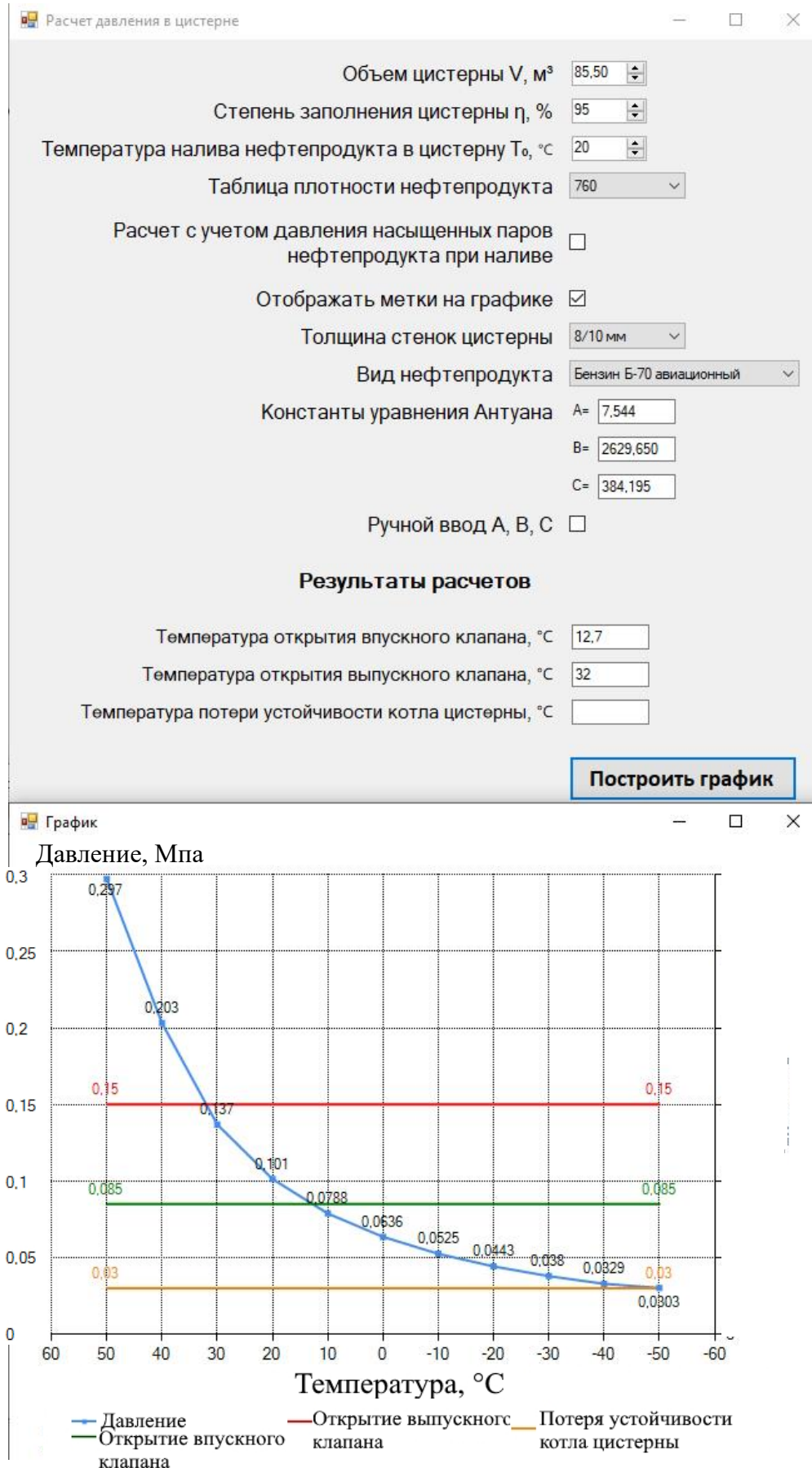


Рисунок Б.11 – результаты компьютерного моделирования внутри цистерны 15-1219

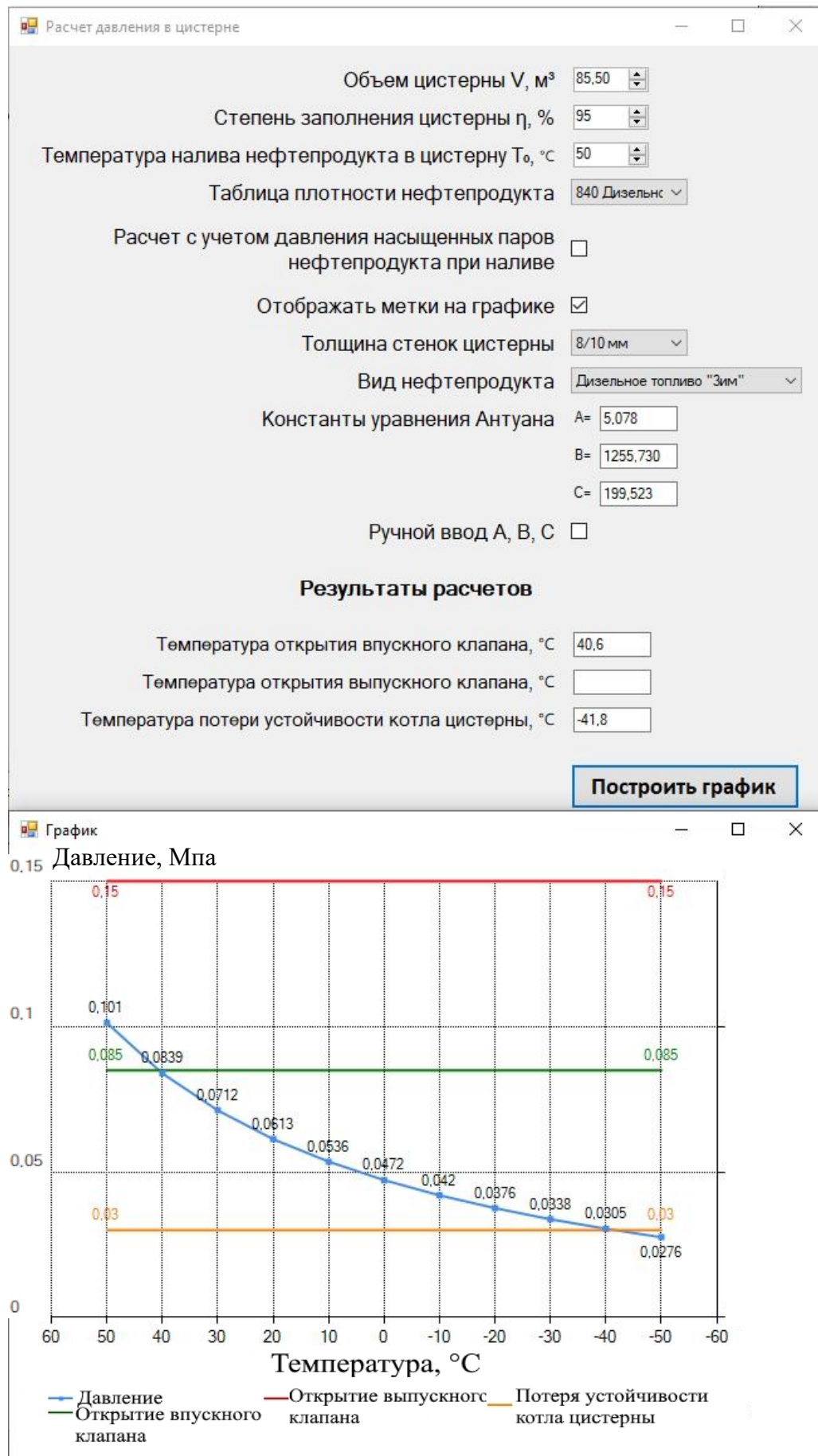


Рисунок Б.12 – результаты компьютерного моделирования внутри цистерны 15-1219

ПРОДОЛЖЕНИЕ ПРИЛОЖЕНИЯ Б

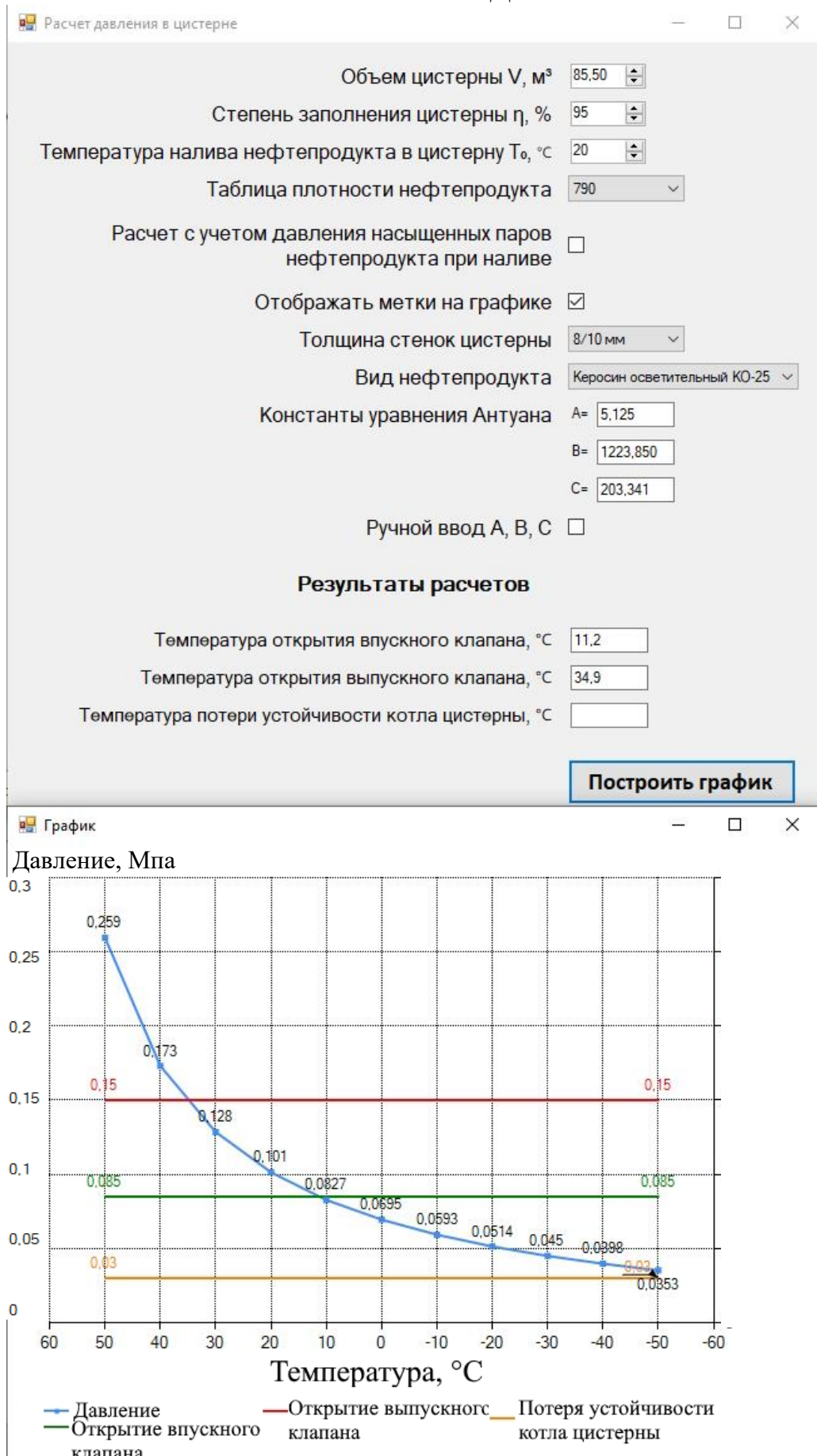


Рисунок Б.13 – результаты компьютерного моделирования внутри цистерны 15-1219

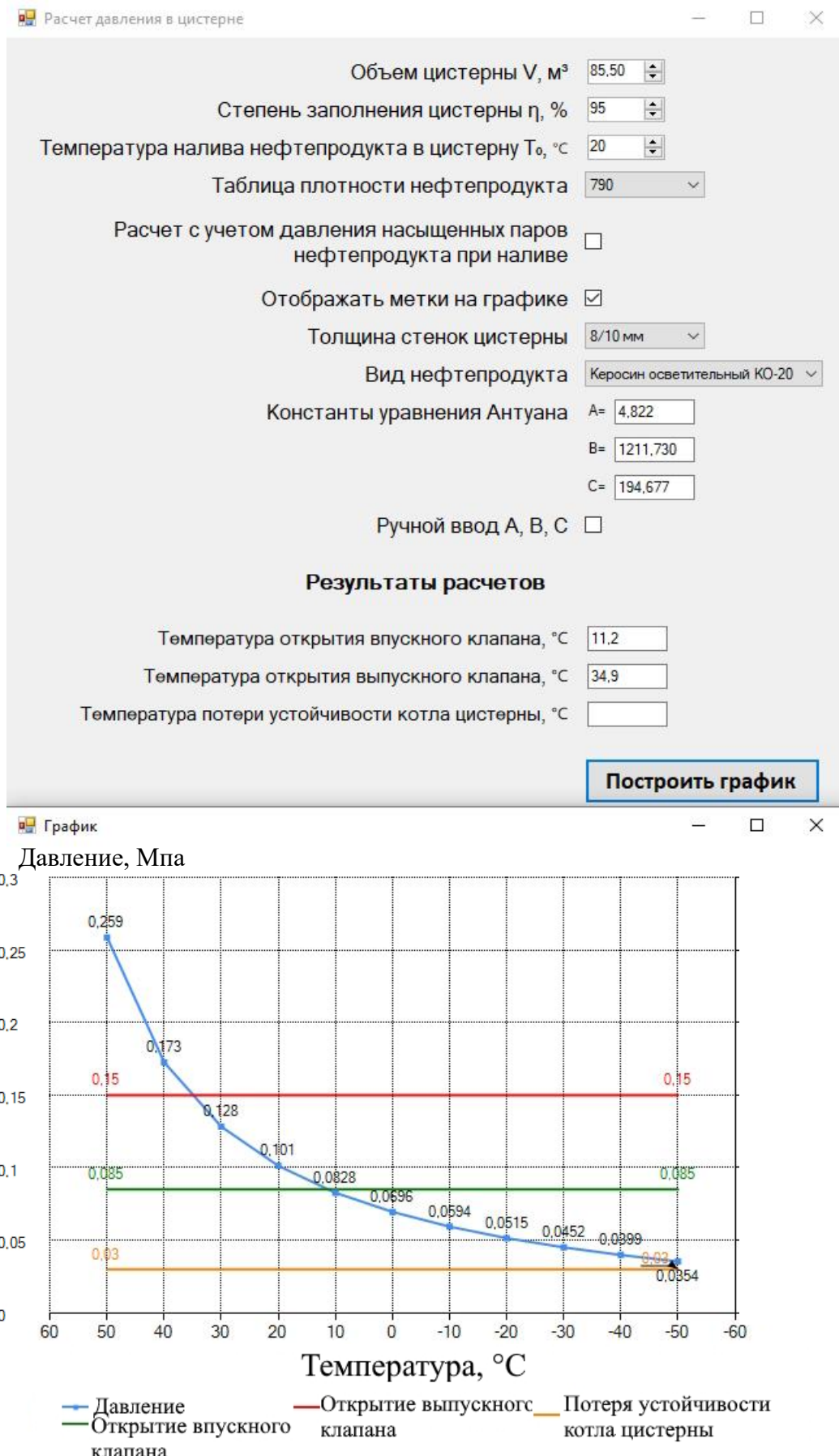


Рисунок Б.14 – результаты компьютерного моделирования внутри цистерны 15-1219

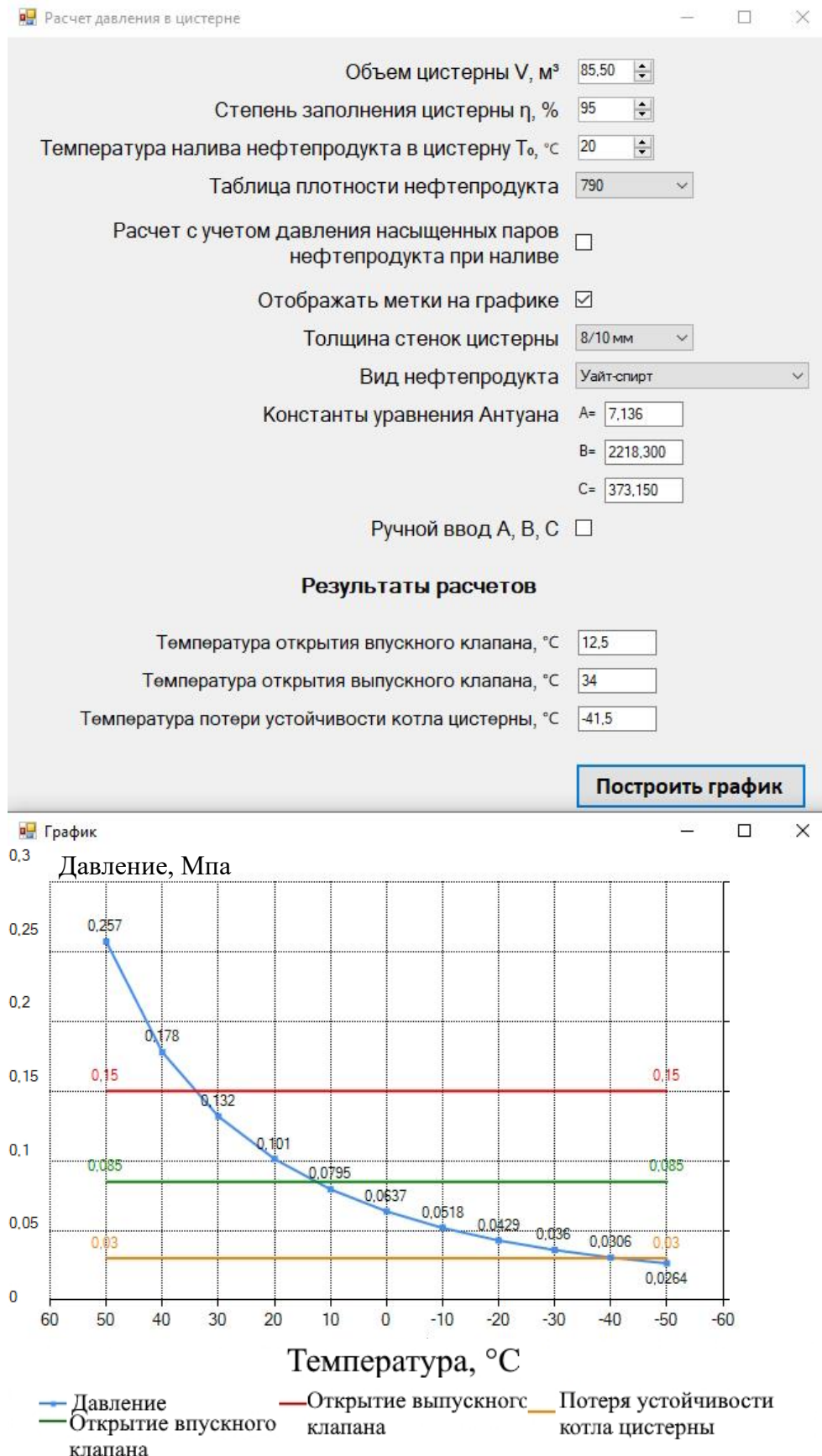


Рисунок Б.15 – результаты компьютерного моделирования внутри цистерны 15-1219

ПРИЛОЖЕНИЕ В

РЕЗУЛЬТАТЫ ФИЗИЧЕСКОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

Таблица В.1 – Серия 1 опыта с заполнением резервуара на 74 л

Номер измерения	Температура жидкости, °С	Температура воздуха, °С	Давление в резервуаре, МПа (атм)	Давление атмосферное, МПа	ΔP в резервуаре, МПа	Объем заполнения резервуара, л
	в резервуаре	окружающая				
1	90	9	0,11 (1,086)	0,1	-0,01	74
2	80	10	0,085 (0,84)	0,1	0,015	
3	70	10	0,065 (0,642)	0,1	0,035	
4	60	12	0,045 (0,444)	0,1	0,055	
5	50	12	0,03 (0,296)	0,1	0,07	
6	40	13	0,03 (0,296)	0,1	0,07	
7	30	13	0,02 (0,197)	0,1	0,08	
8	20	13	0,02 (0,197)	0,1	0,08	
9	15	14	0,02 (0,197)	0,1	0,08	

Таблица В.2 – Серия 2 опыта с заполнением резервуара на 74 л

Номер измерения	Температура жидкости, °С	Температура воздуха, °С	Давление в резервуаре, МПа (атм)	Давление атмосферное, МПа	ΔP в резервуаре, МПа	Объем заполнения резервуара, л
	в резервуаре	окружающая				
1	90	11	0,11 (1,086)	0,1	-0,01	74
2	80	12	0,075 (0,74)	0,1	0,025	
3	70	10	0,045 (0,444)	0,1	0,055	
4	60	12	0,035 (0,345)	0,1	0,065	
5	50	12	0,03 (0,296)	0,1	0,07	
6	40	13	0,02 (0,197)	0,1	0,08	
7	30	13	0,02 (0,197)	0,1	0,08	
8	20	13	0,02 (0,197)	0,1	0,08	
9	15	14	0,015 (0,148)	0,1	0,085	

ПРОДОЛЖЕНИЕ ПРИЛОЖЕНИЯ В

Таблица В.3 – Серия опыта 3 с заполнением резервуара на 74 л

Номер измерения	Температура жидкости, °C	Температура воздуха, °C	Давление в резервуаре, МПа (атм)	Давление атмосферное, МПа	ΔP в резервуаре, МПа	Объем заполнения резервуара, л
	в резервуаре	окружающая				
1	90	8	0,11 (1,086)	0,1	-0,01	74
2	80	9	0,08 (0,79)	0,1	0,02	
3	70	10	0,055 (0,543)	0,1	0,045	
4	60	12	0,04 (0,395)	0,1	0,06	
5	50	12	0,03 (0,296)	0,1	0,07	
6	40	13	0,025 (0,247)	0,1	0,075	
7	30	13	0,02 (0,197)	0,1	0,08	
8	20	13	0,02 (0,197)	0,1	0,08	
9	15	14	0,015 (0,148)	0,1	0,085	

Таблица В.4 – Серия опыта 4 с заполнением резервуара на 60 л

Номер измерения	Температура жидкости, °C	Температура воздуха, °C	Давление в резервуаре, МПа (атм)	Давление атмосферное, МПа	ΔP в резервуаре, МПа	Объем заполнения резервуара, л
	в резервуаре	окружающая				
1	90	5	0,11 (1,086)	0,1	-0,01	60
2	80	6	0,09 (0,888)	0,1	0,01	
3	70	6	0,07 (0,69)	0,1	0,03	
4	60	6	0,06 (0,592)	0,1	0,04	
5	50	6	0,05 (0,493)	0,1	0,05	
6	40	6	0,04 (0,395)	0,1	0,06	
7	30	6	0,035 (0,345)	0,1	0,065	
8	20	7	0,03 (0,296)	0,1	0,07	
9	15	7	0,03 (0,296)	0,1	0,07	

ПРОДОЛЖЕНИЕ ПРИЛОЖЕНИЯ В

Таблица В.5 – Серия опыта 5 с заполнением резервуара на 60 л

Номер измерения	Температура жидкости, °С	Температура воздуха, °С	Давление в резервуаре, МПа (атм)	Давление атмосферное, МПа	ΔР в резервуаре, МПа	Объем заполнения резервуара, л
	в резервуаре	окружающая				
1	90	7	0,11 (1,086)	0,1	-0,01	60
2	80	7	0,09 (0,888)	0,1	0,01	
3	70	7	0,075 (0,74)	0,1	0,025	
4	60	8	0,065 (0,592)	0,1	0,035	
5	50	8	0,055 (0,493)	0,1	0,045	
6	40	8	0,04 (0,395)	0,1	0,06	
7	30	8	0,035 (0,345)	0,1	0,065	
8	20	8	0,03 (0,296)	0,1	0,07	
9	15	10	0,03 (0,296)	0,1	0,07	

Таблица В.6 – Серия опыта 6 с заполнением резервуара на 60 л

Номер измерения	Температура жидкости, °С	Температура воздуха, °С	Давление в резервуаре, МПа (атм)	Давление атмосферное, МПа	ΔР в резервуаре, МПа	Объем заполнения резервуара, л
	в резервуаре	окружающая				
1	90	5	0,11 (1,086)	0,1	-0,01	60
2	80	6	0,09 (0,888)	0,1	0,01	
3	70	6	0,065 (0,642)	0,1	0,035	
4	60	6	0,05 (0,592)	0,1	0,05	
5	50	6	0,045 (0,493)	0,1	0,055	
6	40	6	0,04 (0,395)	0,1	0,06	
7	30	6	0,035 (0,345)	0,1	0,065	
8	20	7	0,03 (0,296)	0,1	0,07	
9	15	7	0,03 (0,296)	0,1	0,07	

ПРОДОЛЖЕНИЕ ПРИЛОЖЕНИЯ В

Таблица В.7 – Серия опыта 7 с заполнением резервуара на 39 л

Номер измерения	Температура жидкости, °C	Температура воздуха, °C	Давление в резервуаре, МПа (атм)	Давление атмосферное, МПа	ΔP в резервуаре, МПа	Объем заполнения резервуара, л
	в резервуаре	окружающая				
1	90	6	0,11 (1,086)	0,1	-0,01	39
2	80	8	0,085 (0,84)	0,1	0,015	
3	70	9	0,075 (0,74)	0,1	0,025	
4	60	11	0,060 (0,592)	0,1	0,04	
5	50	12	0,055 (0,543)	0,1	0,045	
6	40	13	0,045 (0,444)	0,1	0,055	
7	30	13	0,04 (0,395)	0,1	0,06	
8	20	13	0,035 (0,345)	0,1	0,065	
9	15	14	0,035 (0,345)	0,1	0,065	

Таблица В.8 – Серия опыта 8 с заполнением резервуара на 39 л

Номер измерения	Температура жидкости, °C	Температура воздуха, °C	Давление в резервуаре, МПа (атм)	Давление атмосферное, МПа	ΔP в резервуаре, МПа	Объем заполнения резервуара, л
	в резервуаре	окружающая				
1	90	8	0,11 (1,086)	0,1	-0,01	39
2	80	9	0,095 (0,937)	0,1	0,005	
3	70	10	0,075 (0,74)	0,1	0,025	
4	60	11	0,07 (0,69)	0,1	0,03	
5	50	12	0,055 (0,543)	0,1	0,045	
6	40	13	0,045 (0,444)	0,1	0,055	
7	30	13	0,04 (0,395)	0,1	0,06	
8	20	13	0,035 (0,345)	0,1	0,065	
9	15	13	0,035 (0,345)	0,1	0,065	

ПРОДОЛЖЕНИЕ ПРИЛОЖЕНИЯ В

Таблица В.9 – Серия опыта 9 с заполнением резервуара на 39 л

Номер измерения	Температура жидкости, °С	Температура воздуха, °С	Давление в резервуаре, МПа (атм)	Давление атмосферное, МПа	ΔР в резервуаре, МПа	Объем заполнения резервуара, л
	в резервуаре	окружающая				
1	90	10	0,11 (1,086)	0,1	-0,01	39
2	80	10	0,09 (0,888)	0,1	0,01	
3	70	11	0,075 (0,74)	0,1	0,025	
4	60	11	0,065 (0,642)	0,1	0,035	
5	50	12	0,055 (0,543)	0,1	0,045	
6	40	13	0,045 (0,444)	0,1	0,055	
7	30	13	0,04 (0,395)	0,1	0,06	
8	20	13	0,035 (0,345)	0,1	0,065	
9	15	12	0,035 (0,345)	0,1	0,065	