

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II»

На правах рукописи

Густов Вадим Сергеевич



ОБОСНОВАНИЕ МЕТОДОВ РАСЧЕТА ПОТЕРЬ НЕФТЕПРОДУКТОВ ОТ
ИСПАРЕНИЯ ПРИ ЗАПОЛНЕНИИ РЕЗЕРВУАРОВ И ТРАНСПОРТНЫХ
ЁМКОСТЕЙ

Специальность 2.8.5. Строительство и эксплуатация нефтегазопроводов, баз и
хранилищ

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
кандидат технических наук, доцент
Пшенин В.В.

Санкт-Петербург – 2026

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
ГЛАВА 1 СОВРЕМЕННАЯ ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА СОКРАЩЕНИЯ ПОТЕРЬ НЕФТЕПРОДУКТОВ ОТ ИСПАРЕНИЯ ПРИ ЗАПОЛНЕНИИ РЕЗЕРВУАРОВ И ТРАНСПОРТНЫХ ЁМКОСТЕЙ	12
1.1 Общие масштабы транспорта, перевалки и хранения нефти и нефтепродуктов	12
1.2 Оценка общей динамики производства и потребления бензина в Российской Федерации	22
1.3 Обзор отечественных исследований в области расчёта потерь нефтепродуктов от испарения.....	34
1.4 Методы определения потерь от испарения, учитывающие переменный характер расхода газовойздушной смеси.....	41
1.5 Выводы по первой главе.....	47
ГЛАВА 2 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА ВЫТЕСНЕНИЯ ГАЗОВОЗДУШНОЙ СМЕСИ ПРИ ЗАПОЛНЕНИИ РЕЗЕРВУАРОВ И ТРАНСПОРТНЫХ ЕМКОСТЕЙ	49
2.1 Разработка математической модели вытеснения газовойздушной смеси, учитывающей реальные параметры процесса.....	49
2.2 Теоретическая оценка применимости моделей диффузии к задачам испарения нефти и нефтепродуктов при наливке в транспортные емкости	62
2.3 Выводы по второй главе	77
ГЛАВА 3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА ВЫТЕСНЕНИЯ ГАЗОВОЗДУШНОЙ СМЕСИ ИЗ НАПОЛНЯЕМОЙ ЕМКОСТИ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ УСЛОВИЯХ.....	79
3.1 Обзор аналогов и обоснование технических решений по экспериментальному стенду.....	79
3.2 Обоснование выбора технологического оборудования, контрольно-измерительных приборов и средств автоматизации.....	93
3.3 Выводы по третьей главе.....	103

ГЛАВА 4 РЕЗУЛЬТАТЫ РАЗРАБОТКИ РЕКОМЕНДАЦИЙ ПО РАЦИОНАЛЬНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ ТРУБОПРОВОДОВ ОТВОДА ГАЗОВОЙ ФАЗЫ НА ОБЪЕКТАХ НАЛИВА	105
4.1 Обоснование рациональной периодичности очистки трубопроводов отвода газовой фазы на объектах налива	105
4.2 Результаты разработки концептуальных решений по системе раннего предупреждения стравливания газовоздушной смеси	112
4.3 Выводы по четвертой главе.....	118
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	120
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ	122
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	123
ПРИЛОЖЕНИЕ А Патент на изобретение № 2842918.....	137
ПРИЛОЖЕНИЕ Б Патент на изобретение № 2831618	139
ПРИЛОЖЕНИЕ В Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2024620693	141
ПРИЛОЖЕНИЕ Г Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024612830	143
ПРИЛОЖЕНИЕ Д Акт о внедрении результатов исследования в ООО «Северная компания»	145
ПРИЛОЖЕНИЕ Е Акт о внедрении результатов исследования в ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II»	146
ПРИЛОЖЕНИЕ Ж Паспорт на автомобильное топливо для экспериментального стенда	147

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования

Одной из основных целей Энергетической стратегии до 2050 года является укрепление позиций России в мировой энергетике, что невозможно без соответствующего развития ресурсосберегающих и экологических технологий. В 2025 г. объём перевалки нефтепродуктов в морских портах Российской Федерации составил 121,1 млн тонн, среди которых наибольшую испаряемость демонстрируют бензины. Потери от испарения нефти/нефтепродуктов при заполнении танкеров могут быть значительны и достигать 0,2 кг на 1 тонну наливаемого продукта. Совокупные годовые потери от испарения при заполнении резервуаров и транспортных емкостей исчисляются сотнями тысяч тонн.

Существенная часть резервуаров не оборудована понтонами, что приводит к потерям от испарения и значительным экономическим и экологическим издержкам при хранении и при проведении операций по закачке. Потери от «больших дыханий» также значительны при выполнении товарно-транспортных операций по заполнению транспортных емкостей: танкеров, железнодорожных и автоцистерн. Несмотря на наметившийся тренд по оснащению нефтебаз и морских терминалов установками рекуперации паров, большая их доля неэффективна и не может в полной мере препятствовать потере ценного продукта [34, 38, 40].

В целях оценки и прогнозирования потерь нефтепродуктов от испарения следует разрабатывать новые и совершенствовать существующие методы их расчета при заполнении резервуаров и транспортных емкостей, что является актуальной научно-технической задачей, имеющей важное значение для ресурсосбережения и экологической безопасности. Одним из наиболее проблемных моментов при проведении расчётов потерь нефтепродуктов от испарения является неопределённость в области определения объёмного расхода вытесняемой газовой смеси, для описания которого принято использовать т.н. «коэффициент превышения». В настоящей работе для него получены расчетные зависимости, учитывающие нелинейность процесса заполнения емкости и влияние внешних факторов (применительно к заполнению транспортных

ёмкостей). Разработка таких зависимостей позволяет не только точнее прогнозировать потери от испарения, но и гармонизировать работу установок рекуперации паров с газоотводными трубопроводами и прочим технологическим оборудованием.

Исследования, проводимые в рамках настоящей диссертации, направлены на создание научно-методических основ расчетов потерь нефтепродуктов от испарения при заполнении резервуаров и транспортных емкостей, учитывающих явление превышения объема газовоздушной смеси над объемом закачки, что является актуальной задачей на текущем этапе развития нефтяной отрасли.

Степень разработанности темы исследования

Проблемами испарения нефти и нефтепродуктов в разное время занимались многие выдающиеся исследователи: Черников В.И., Константинов Н.Н., Абузова Ф.Ф., Бронштейн И.С., Земенков Ю.Д., Любин Е.А., Коршак А.А., Галеев В.Б., Гиззатов М.А., Латыпов Р.Ш., Мартяшова В.А., Молчанова Р.А., Саттарова Д.М., Хафизов Ф.М., Ривкин П.Р., Кулагин А.В. (наливом в транспортные емкости занимались только Константинов Н.Н., Коршак А.А., Галеев В.Б. и Ривкин П.Р.). Среди современных работ по прогнозированию потерь нефти и нефтепродуктов от испарения в первую очередь можно выделить работы Коршака А.А.

Несмотря на наличие большого объема исследований по данным направлениям, предложенные методы расчета потерь нефтепродуктов от испарения при заполнении резервуаров и транспортных емкостей имеют существенные допущения и нуждаются в уточнении и соответствующем пересмотре.

Объект исследования – резервуары и транспортные ёмкости в процессе их заполнения нефтепродуктом.

Предмет исследования – совокупность газодинамических явлений в объектах исследования в их взаимосвязи с технологическими параметрами.

Цель работы – повышение точности расчётных методов прогнозирования потерь нефтепродуктов от испарения при заполнении резервуаров и транспортных ёмкостей.

Идея работы – повысить точность расчётных методов определения потерь нефтепродуктов от испарения при заполнении резервуаров и транспортных ёмкостей возможно путем учета явления превышения расхода газовой фазы над расходом закачки в совокупности с учетом технологических особенностей проведения операций.

Задачи исследования:

1. Выполнить анализ современной теории и практики определения потерь нефтепродуктов от испарения при заполнении резервуаров и транспортных ёмкостей;

2. Разработать обобщенную модель вытеснения газовоздушной смеси из внутреннего пространства резервуаров и транспортных ёмкостей, учитывающую фактические технологические параметры исследуемых процессов;

3. Провести апробацию полученной модели на специально разработанном экспериментальном стенде;

4. Обосновать комплекс подходов по увеличению эффективности эксплуатации трубопроводных систем отвода газовой фазы на объектах налива.

Научная новизна работы:

1. Создана математическая модель вытеснения газовоздушной смеси из заполняемых резервуаров и транспортных ёмкостей, учитывающая явление превышения и фактические технологические параметры исследуемых процессов.

2. Получены экспериментально апробированные зависимости для коэффициента превышения объема газовоздушной смеси над объемом закачки, учитывающие влияние различных факторов на процессы массоотдачи с поверхности испаряющегося продукта.

Соответствие паспорту специальности

Полученные научные результаты соответствуют паспорту специальности 2.8.5. Строительство и эксплуатация нефтегазопроводов, баз и хранилищ по пунктам:

1. Технологические процессы и технические средства для проектирования, сооружения, эксплуатации, теоретические и практические основы взаимодействия объектов трубопроводного транспорта с окружающей средой с целью создания высокоэффективных, энерго- и ресурсосберегающих, надежных, механически и экологически безопасных сухопутных и морских систем трубопроводного транспорта для добычи, сбора, подготовки, транспортировки и хранения углеводородов, распределения, газоснабжения и нефтепродуктообеспечения, а также других газовых, жидкостных и многофазных сред, гидро- и пневмоконтейнерного транспорта.

2. Научные основы системного комплексного (мультидисциплинарного) проектирования конструкций, прочностных, гидромеханических, газодинамических и теплофизических расчетов сухопутных и морских систем трубопроводного транспорта для добычи, сбора, подготовки, транспортировки и хранения углеводородов, распределения, газоснабжения и нефтепродуктообеспечения, подземных и наземных газонефтехранилищ, терминалов, инженерной защиты и защиты от коррозии, организационно-технологических процессов их сооружения, эксплуатации, диагностики, обеспечения системной надежности, механической и экологической безопасности.

4. Методы и средства информационных технологий, моделирования, мониторинга, прогнозирования, интеллектуального инжиниринга и управления, автоматизации и роботизации, стандартизации и цифровизации технологических процессов проектирования, сооружения, эксплуатации, диагностики, ремонта сухопутных и морских систем трубопроводного транспорта для добычи, сбора, подготовки, транспортировки и хранения углеводородов, распределения, газоснабжения и нефтепродуктообеспечения, а также других газовых, жидкостных и многофазных сред, гидро- и пневмоконтейнерного транспорта с целью

повышения эффективности, надежности и безопасности использования отраслевого потенциала и ресурса трубопроводных конструкций.

Теоретическая значимость работы:

Предложен метод определения потерь нефтепродуктов от испарения при заполнении резервуаров и транспортных емкостей, учитывающий явление превышения расхода газовой фазы над расходом закачки и технологические особенности проведения операций.

Практическая значимость работы:

1. Разработана вычислительная программа для ЭВМ, предназначенная для расчета процессов в системе «трубопровод погрузки – заполняемая емкость – трубопровод отвода газовой фазы – установка рекуперации паров» (свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024612830 «Программа расчёта газодинамических процессов при операциях погрузки танкеров», Приложение Г) и собрана база данных существующих установок рекуперации паров на объектах налива жидких нефти и нефтепродуктов (свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2024620693 «База данных установок рекуперации паров, эксплуатируемых на объектах налива нефти и нефтепродуктов», Приложение В).

2. Разработанные методические рекомендации по расчету потерь нефтепродуктов от испарения при заполнении резервуаров и транспортных емкостей, а также предложения по повышению эффективности технологических процессов использованы в деятельности ООО «Северная Компания» (акт от 15.04.2026 г., Приложение Д).

3. Предложена конструкция экспериментального стенда для независимой экспертной оценки эффективности различных типов установок рекуперации паров нефтепродуктов (патент на изобретение № 2842918, Приложение А) и устройство, способствующее более эффективному отводу паров (патент на изобретение № 2831618, Приложение Б).

4. Полученный комплекс вычислительных программ расчета газодинамических процессов «трубопровод погрузки – танкер – трубопровод

отвода газовой фазы – установка рекуперации паров» и рекомендации по моделированию внедрены в учебный процесс федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II» (акт от 19.06.2026 г.) (Приложение Е).

Методология и методы исследования

Использованы методы математического моделирования процессов. Для получения удобных к применению решений и оценки их точности использовались методы прикладной математики. Для решения отдельных задач анализа экспериментальных данных использованы методы статистической обработки и оценки параметров. При постановке экспериментальных исследований применены элементы теории планирования эксперимента.

Положения, выносимые на защиту:

1. Разработанный метод расчета потерь нефтепродуктов от испарения при заполнении резервуаров и транспортных емкостей позволяет повысить точность их определения в среднем на 14,2 % за счет учета явления превышения объемного расхода вытесняемой газовой смеси над объемом закачки.

2. Коэффициент превышения объемного расхода вытесняемой из заполняемой емкости газовой смеси над объемным расходом закачки бензина следует определять по критериальному уравнению, содержащему безразмерные критерии подобия Рейнольдса, Шмидта, относительную температуру газовой смеси, и учитывающему наличие качки при помощи модифицированного числа Фруда, что в совокупности обеспечивает относительную погрешность не более 10,72 % относительно экспериментальных данных.

Степень достоверности результатов исследования, выполненных в рамках диссертации, обеспечивается научно обоснованным применением общепризнанных теоретических подходов к рассматриваемым проблемам и использованием высокоточных математических моделей. Использование современных средств прикладной математики позволило точно исследовать

процессы в трубопроводах отвода газовой фазы и наполняемых емкостях. Полученные результаты исследований в достаточной степени согласуются с экспериментальными данными, а также с аналогичными результатами отечественных и зарубежных авторов.

Апробация результатов диссертации проведена на 4 научно-практических мероприятиях с докладами, в том числе на 3 международных; за последние 3 года принято участие в 3 научно-практических мероприятиях с докладами, в том числе на 2 международных:

1. Международная конференция «Рассохинские чтения» (02-03 февраля 2023 года, г. Ухта).

2. XV Всероссийская конференция молодых ученых, специалистов и студентов «Новые технологии в газовой промышленности (газ, нефть, энергетика)» (23–27 октября 2023 года, г. Москва).

3. XII Молодежная международная научно-практическая конференция «Новые технологии в газовой отрасли: опыт и преемственность» (15–19 апреля 2024 года, г. Москва).

4. Седьмой Международный молодежный научно-практический форум «Нефтяная столица» (3-4 апреля 2024 года, г. Ханты-Мансийск).

Личный вклад автора. Автором проведен анализ отечественной и зарубежной научной литературы, рассмотрены существующие проблемы в рамках эксплуатации различных объектов налива. Разработаны математические модели исследуемых процессов, проведена их строгая математическая оценка и обоснование. Автором организованы и проведены экспериментальные исследования. В выполнении экспериментов автор принимал участие лично. Выполнено внедрение разработанных решений в производственную деятельность профильной компании.

Публикации. Основные научные результаты в достаточной степени освещены в 4 печатных работах (пункты списка литературы № 26, 27, 106, 107), в том числе в 2 статьях – в изданиях из перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций

на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук, в 2 статьях – в изданиях, входящих в международную базу данных и систему цитирования Scopus. Получено 2 патента на изобретение (пункты списка литературы № 61, 62, Приложения А, Б), 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ (пункт списка литературы № 63, Приложение Г), 1 свидетельство о государственной регистрации базы данных (пункт списка литературы № 64, Приложение В).

Структура работы. Диссертация состоит из оглавления, введения, 4 глав с выводами по каждой из них, заключения, списка литературы, включающего 109 наименований, и 7 приложений. Диссертация изложена на 148 страницах машинописного текста, содержит 37 рисунков и 28 таблиц.

Благодарности. Автор выражает глубокую благодарность и искреннюю признательность сотрудникам кафедры транспорта и хранения нефти и газа Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II за консультации при работе над диссертацией.

ГЛАВА 1 СОВРЕМЕННАЯ ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА СОКРАЩЕНИЯ ПОТЕРЬ НЕФТЕПРОДУКТОВ ОТ ИСПАРЕНИЯ ПРИ ЗАПОЛНЕНИИ РЕЗЕРВУАРОВ И ТРАНСПОРТНЫХ ЁМКОСТЕЙ

1.1 Общие масштабы транспорта, перевалки и хранения нефти и нефтепродуктов

Эффективность функционирования нефтяной отрасли России во многом определяется масштабами движения углеводородного сырья и продуктов его переработки от скважины до конечного потребителя. Ежегодные объемы добычи, переработки и экспорта формируют гигантские потоки, требующие разветвленной инфраструктуры транспорта, перевалки и хранения, в процессе которой неизбежны потери от испарения при заполнении резервуаров и транспортных емкостей. Количественная оценка данных потерь напрямую зависит от макроэкономических и отраслевых показателей, поэтому анализ динамики базовых параметров за последнее время представляет собой необходимый исходный этап для последующих исследований. Добыча нефти и газового конденсата на территории Российской Федерации выступает фундаментальным показателем, определяющим загрузку всей системы сбора, подготовки, магистрального транспорта и переработки. Динамика добычи нефти и газового конденсата на территории Российской Федерации за 2010–2024 г. представлена на рисунке 1.1 [24].

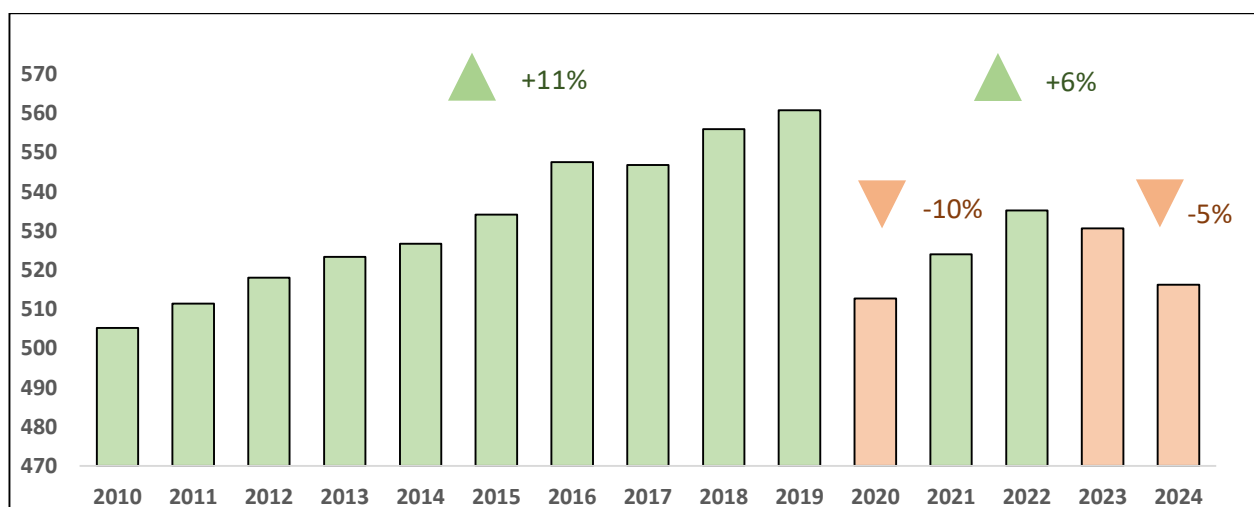


Рисунок 1.1 – Динамика добычи нефти и газового конденсата на территории Российской Федерации за 2010 – 2024 г., млн т [24]

Приведённые данные наглядно отражают траекторию развития сектора. На пике добыча составляла 560,7 млн т, чему способствовали благоприятная конъюнктура и реализация новых проектов в рамках соглашения ОПЕК+ на тот момент. В 2020 г. пандемия COVID-19 и беспрецедентное сокращение квот ОПЕК+ обрушили добычу до 512,7 млн т. Восстановительный цикл 2021–2022 гг. обозначил возврат к уровням 524,0–535,2 млн т, несмотря на усиливающееся санкционное давление. Однако в 2023 г. показатель снизился до 530,6 млн т, а по оперативным итогам 2024 г. упал до 516,2 млн т на фоне добровольных обязательств РФ по сокращению добычи, а также логистических и технологических ограничений. Таким образом, среднегодовой объем добычи за 15 лет превысил 530 млн т, что формирует исходное предложение нефти, практически полностью поступающее в систему магистральных нефтепроводов, на переработку и экспортные терминалы. Территориальное распределение уровня добычи нефти и конденсата по регионам Российской Федерации в 2023 г. представлено на рисунке 1.2. Первичная переработка нефти на российских НПЗ отражает не только внутренний спрос, но и экспортную ориентацию нефтепродуктового сектора. По сведениям Минэнерго России и ЦДУ ТЭК, в 2010 г. переработка составила около 250 млн т. В рамках масштабной модернизации НПЗ, реализованной в 2010–2020 гг., объемы перерабатываемого сырья устойчиво росли и достигли 289 млн т в 2014 г., а затем несколько снизились под влиянием налогового маневра, но удерживались в диапазоне 280–290 млн т. В 2019 г. был зафиксирован рекордный показатель 290,1 млн т. Кризис, возникший 2020 году на фоне пандемии, обусловил падение загрузки до 270 млн т, после чего в 2021 г. произошло частичное восстановление до 281 млн т. Ужесточение санкций, разрыв технологических цепочек и трудности со сбытом нефтепродуктов в 2022 г. привели к снижению до 272 млн т. [24]

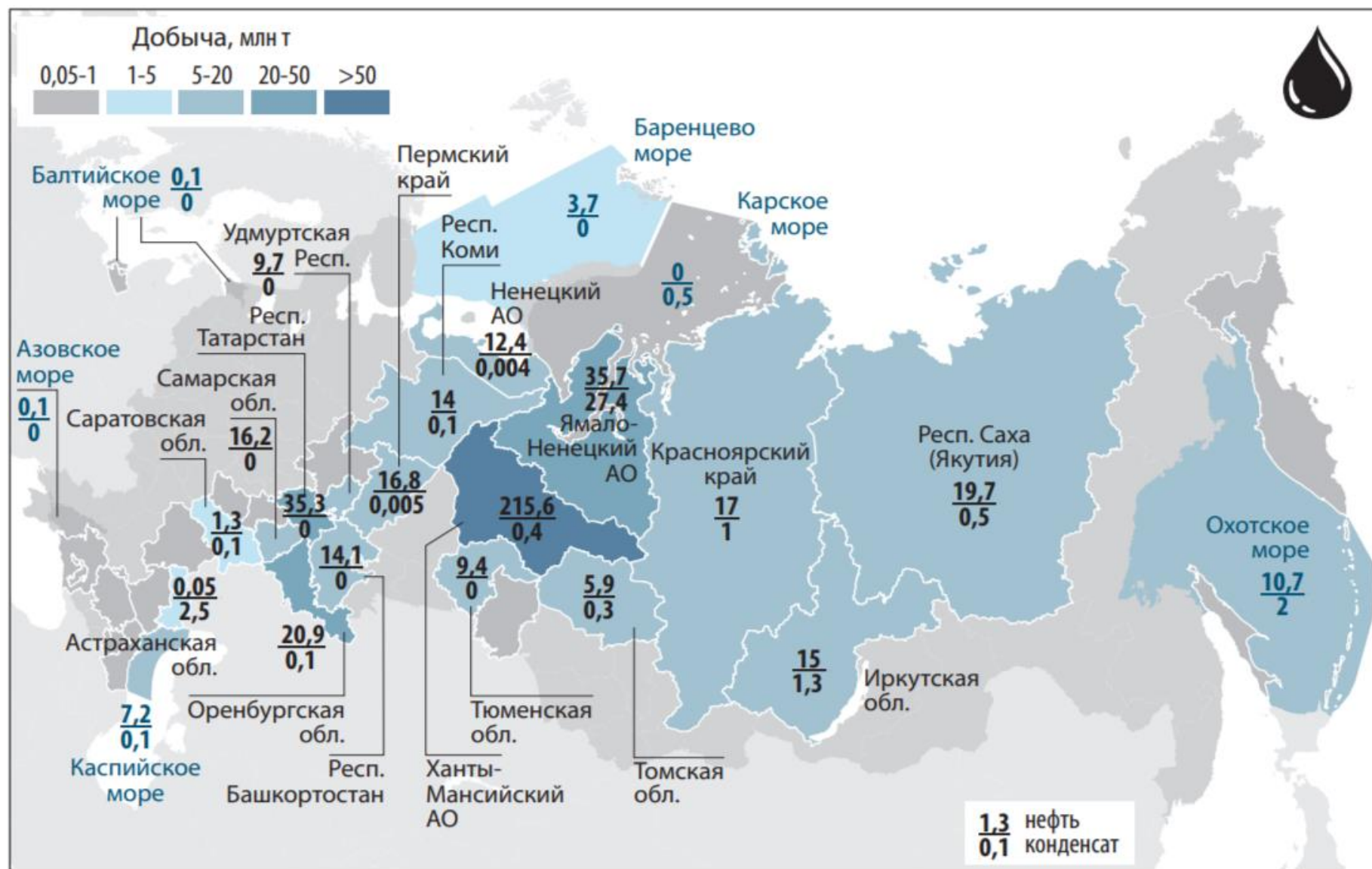


Рисунок 1.2 – Распределение добычи нефти и конденсата по регионам Российской Федерации в 2023 г.[24]

В 2023 г. объем переработки незначительно вырос до 275 млн т, однако в 2024 г. внеплановые остановки мощностей, повреждения установок, а также низкая маржинальность на фоне ценовых потолков сократили первичную переработку до 267 млн т. Несмотря на волатильность, в среднем ежегодно на российских НПЗ перерабатывалось порядка 275 млн т нефти, что сопровождалось образованием сопоставимых объемов нефтепродуктов, требующих вывоза с заводов и хранения на нефтебазах, в резервуарных парках и транспортных емкостях [24].

Экспортная составляющая является важнейшим каналом распределения российской нефти и нефтепродуктов. На рисунке 1.3 приведена структура мирового экспорта и импорта нефтепродуктов с долей участия Российской Федерации в международных поставках нефтепродуктов по данным международного аналитического обзора BP Statistics 2025 [104].

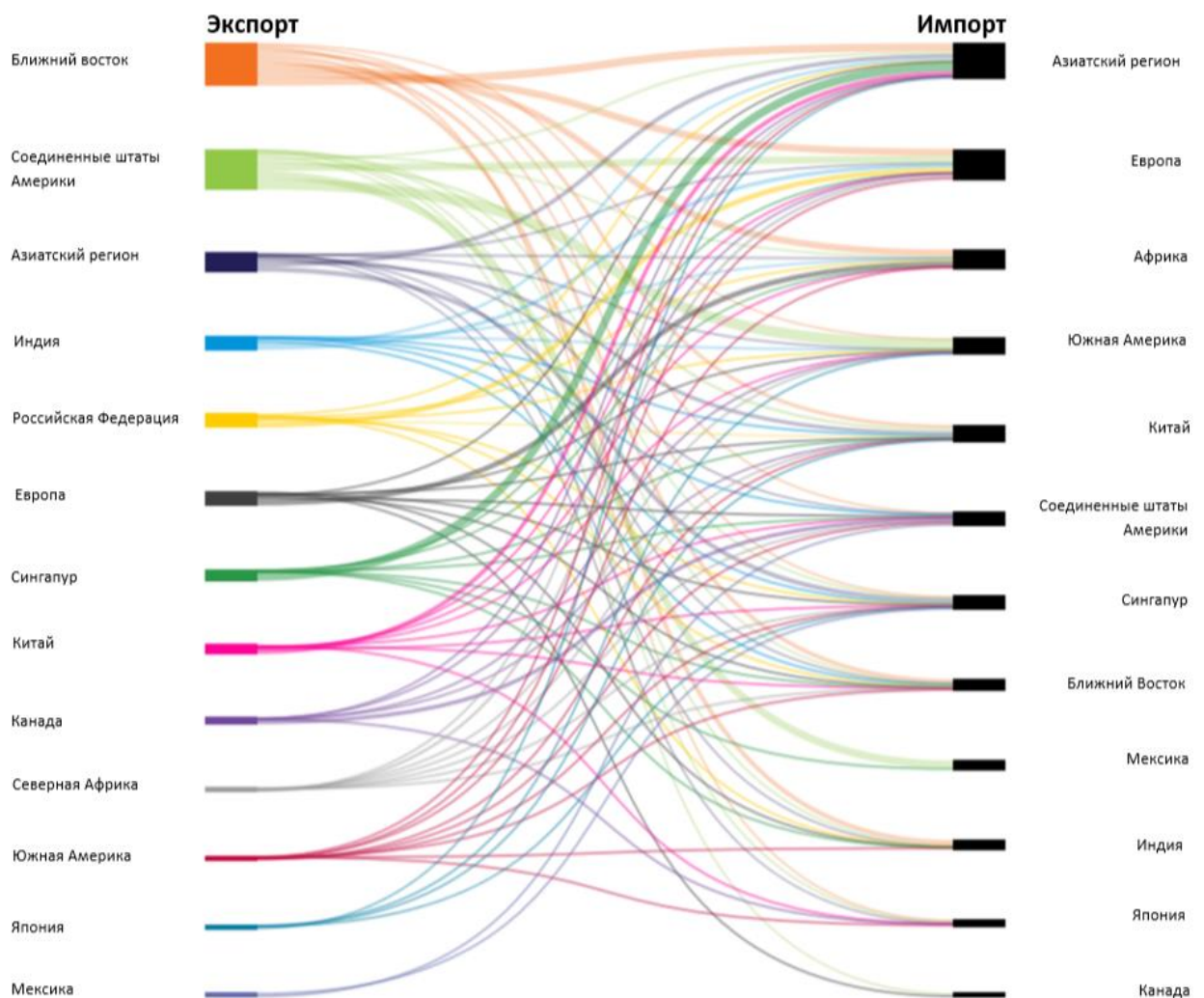


Рисунок 1.3 – Структура мирового экспорта и импорта нефтепродуктов по данным международного аналитического обзора BP Statistics 2025 [104]

Динамика вывоза сырой нефти и основных нефтепродуктов в ключевые годы анализируемого периода представлена в таблице 1.1.

Таблица 1.1 – Экспорт нефти и нефтепродуктов из Российской Федерации в отдельные годы (2010–2024 гг.), млн т (по данным автора)

Год	Экспорт нефти, млн т	Экспорт нефтепродуктов, млн т	Совокупный экспорт, млн т
2010	205,2	133,2	383,4
2011	244,0	136,0	380,0
2012	239,5	141,5	381,0
2013	236,3	148,0	384,3
2014	223,0	164,9	387,9
2015	238,0	171,5	409,5
2016	254,0	156,4	410,4
2017	257,0	148,3	405,3
2018	260,2	150,0	410,2
2019	269,3	142,0	411,3
2020	231,9	141,0	372,9
2021	230,0	144,0	374,0
2022	242,1	129,9	372,0
2023	234,3	117,0	351,3
2024	225,0	115,0	340,0

Как демонстрируют приведённые данные, вывоз сырой нефти, по сведениям Росстата и IEA, в начале периода составлял 250,2 млн т, затем последовательно сокращался до 236,3 млн т в 2013 г. в связи с ростом внутренней переработки. В 2014 г. экспорт нефти упал до 223,0 млн т, после чего началось восстановление: 238,0 млн т в 2015 г., 254,0 млн т в 2016 г. и 257,0 млн т в 2017 г. Рекордные объёмы 2018–2019 гг. (260,2 и 269,3 млн т соответственно) сменились падением до 231,9 млн т в 2020 г. на фоне пандемии. В 2021–2022 гг. поставки за рубеж удерживались в диапазоне 230–242 млн т, причем с 2022 г. началась интенсивная переориентация экспортных потоков с европейского на азиатский рынок (Индия, Китай). В 2023 г. экспорт нефти сократился до 234,3 млн т, что отражало как добровольные ограничения ОПЕК+, так и сужение круга покупателей. По оперативным итогам 2024 г. вывоз снизился до 225,0 млн т под влиянием логистических и технологических ограничений. На рисунке 1.4 приведена схема магистральных нефтепроводов на территории Российской Федерации и объекты перевалки товарной нефти для экспортных поставок в 2023 г.



Рисунок 1.4 – Схема магистральных нефтепроводов на территории Российской Федерации и объекты перевалки товарной нефти для экспортных поставок в 2023 г.[24]

Экспорт нефтепродуктов демонстрировал собственную динамику. В 2010 г. он составлял 133,2 млн т, затем устойчиво рос до 164,9 млн т в 2014 г. и достиг исторического пика 171,5 млн т в 2015 г. благодаря завершению крупных инвестиционных проектов на НПЗ и адаптации к налоговому маневру. Затем последовало снижение: 156,4 млн т в 2016 г., 148,3 млн т в 2017 г., что объяснялось насыщением рынков и корректировкой пошлин. В 2018–2019 гг. вывоз стабилизировался на уровне 150 и 142 млн т соответственно. Пандемийный 2020 г. принес небольшое падение до 141 млн т, однако 2021 г. показал 144 млн т. Введение эмбарго ЕС и потолков цен в 2022–2023 гг. обрушило экспорт нефтепродуктов до 130 млн т и 117 млн т соответственно. В 2024 г. отгрузка сократилась до 115 млн т. Как видно из таблицы 1.2, совокупный внешний отток жидких углеводородов (нефть плюс нефтепродукты) на пике 2018–2019 гг. превышал 410 млн т в год, в 2023 г. составил около 351 млн т, а в 2024 г. снизился до 340 млн т.

Рассмотренные макропоказатели прямо определяют загрузку транспортно-логистической системы. Более 90% добываемой нефти транспортируется по магистральным трубопроводам до НПЗ и экспортных терминалов. В морских портах осуществляется налив крупнотоннажных танкеров, а на железнодорожных эстакадах – заполнение цистерн, суммарный объем перевозок нефти и нефтепродуктов железнодорожным транспортом в отдельные годы превышал 250 млн т. Каждая из перечисленных операций заполнения резервуаров, танков и цистерн сопровождается вытеснением паровоздушной смеси, насыщенной углеводородами, в атмосферу. В масштабах страны, где годовой оборот жидких углеводородов с учетом многократных перевалок достигает 1,2–1,4 млрд т, потери от испарения, по различным оценкам, могут исчисляться миллионами тонн. Так, даже при средней удельной величине потерь на уровне 0,1% от оборота абсолютные значения достигают 1,0–1,4 млн т в год, что эквивалентно потере продукции целого среднего НПЗ. Приведенная статистика убедительно доказывает, что любые погрешности в методах расчета потерь от испарения имеют результатом крупный экономический ущерб и усугубляют экологическую нагрузку

на окружающую среду, подтверждая актуальность темы диссертационного исследования.

Масштабы движения нефти и продуктов ее переработки создают гигантский оборот жидких углеводородов. Однако потери от испарения при заполнении резервуаров и транспортных емкостей распределяются крайне неравномерно в зависимости от номенклатуры продукта. Определяющим фактором выступает фракционный состав и, как следствие, летучесть нефтепродуктов. Среди всей товарной корзины российских НПЗ наиболее высокими значениями давления насыщенных паров обладают светлые нефтепродукты, а внутри этой группы – автомобильные бензины. Поэтому анализ динамики выпуска бензинов, керосинов и дизельного топлива, а также распределение объемов по маркам бензинов, позволяет количественно очертить ту часть грузопотока, которая формирует основной вклад в эмиссию углеводородов при заполнении емкостей.

По данным Минэнерго России и ЦДУ ТЭК, загрузка отечественных НПЗ в последние годы обеспечивала выход светлых нефтепродуктов на уровне 58–61% от объема переработанной нефти. В абсолютных цифрах это десятки миллионов тонн в год, подлежащих транспортировке железнодорожным, трубопроводным и водным транспортом с многократными перевалками на нефтебазах. Выпуск на нефтеперерабатывающих заводах основных видов светлых нефтепродуктов, таких как автомобильный бензин, дизельное топливо и авиационный керосин в Российской Федерации в период 2019–2023 гг. представлен в таблице 1.2.

Таблица 1.2 – Производство основных светлых нефтепродуктов в Российской Федерации (2019–2023 гг.), млн т (по данным автора)

Год	Автомобильный бензин	Дизельное топливо	Керосин авиационный
2019	40,1	78,4	12,5
2020	38,5	77,2	9,8
2021	40,8	80,3	10,5
2022	42,1	85,2	11,2
2023	43,9	88,2	11

Из таблицы 1.2 видно, что дизельное топливо является доминирующим светлым продуктом по объемам выпуска (78–88 млн т в год), за ним следует автомобильный бензин (38–44 млн т) и авиационный керосин (10–12 млн т). При

этом именно бензиновый пул, несмотря на меньший тоннаж по сравнению с дизельным, представляет наибольшую опасность с точки зрения потерь от испарения, что обусловлено его высокой летучестью. Дизельное топливо и керосин имеют значительно более низкое давление насыщенных паров и в стандартных условиях заполнения емкостей испаряются на порядок меньше. Следовательно, при равных объемах перевалок именно операции с бензинами вносят определяющий вклад в суммарные потери углеводородов.

Для более детальной оценки масштаба проблемы необходимо рассмотреть структуру выпуска автомобильных бензинов по октановым числам. Данные за 2023 г. приведены в таблице 1.3.

Таблица 1.3 – Структура производства автомобильных бензинов по маркам в Российской Федерации (2023 г.) (по данным автора)

Марка бензина	Производство, млн т	Доля в выпуске, %
АИ-92	26,5	60,4
АИ-95	14,5	33
АИ-98 и выше	2,9	6,6
Итого	43,9	100

Как следует из таблицы 1.3, в отечественном бензиновом фонде доминирует АИ-92 (более 60%), тогда как на высокооктановый АИ-95 приходится около трети выпуска, а премиальный АИ-98 занимает незначительную долю. Такая структура важна, поскольку давления насыщенных паров бензинов различных марок близки и определяются прежде всего сезонным классом испаряемости, а не октановым числом. Таким образом, весь объем автомобильных бензинов (около 44 млн т в год) формирует категорию «высоколетучих» продуктов, требующих особого контроля при хранении и транспортировке.

Физико-химической основой, объясняющей доминирующую роль бензинов в потерях от испарения, является давление насыщенных паров (ДНП). Этот показатель нормируется для различных видов топлива государственными стандартами. Сравнительная характеристика ДНП светлых нефтепродуктов приведена в таблице 1.4.

Таблица 1.4 – Нормируемые значения давления насыщенных паров основных светлых нефтепродуктов (по данным автора)

Нефтепродукт	ДНП, кПа (при 37,8 °С)	Нормативный документ
Бензин автомобильный (летний)	45–60	ГОСТ 32513-2013
Бензин автомобильный (зимний)	60–100	ГОСТ 32513-2013
Керосин авиационный	1–5	ГОСТ 10227-86
Дизельное топливо	≤ 1,0	ГОСТ 305-2013

Данные, представленные в таблице 1.4, демонстрируют, что давление насыщенных паров автомобильных бензинов на 1,5–2 порядка превышает ДНП дизельного топлива и в десятки раз – ДНП керосина. Это означает, что при заполнении резервуара или транспортной емкости бензином в газовое пространство выделяется во много раз больше паров, чем при аналогичной операции с дизельным топливом. Согласно закону Дальтона, объемная доля паров в вытесняемой паровоздушной смеси для бензина может достигать 40–60%, тогда как для дизельного топлива она не превышает 1–2%. Учитывая, что годовой оборот автомобильных бензинов в системе транспорта, перевалки и хранения исчисляется десятками миллионов тонн (с учетом многократных переливов), даже доля процента от этих объемов, теряемая в виде паров, приводит к значительным абсолютным потерям.

Таким образом, именно светлые нефтепродукты, и прежде всего автомобильные бензины, формируют основной поток продукции, критически подверженной потерям от испарения. С одной стороны, ежегодное производство порядка 44 млн т бензинов различных марок и их последующее распределение через тысячи резервуаров, эстакад и наливных пунктов создает множество источников выбросов паров. С другой стороны, исключительно высокое давление насыщенных паров бензинов (45–100 кПа) предопределяет большую величину концентрации углеводородов в вытесняемой паровоздушной смеси при каждой операции заполнения. Именно поэтому обоснование методов расчета потерь от испарения должно опираться в первую очередь на физико-химические свойства бензиновой группы, с уточнением параметров летучести для конкретных марок и сезонных классов. Приведенная статистика выпуска и нормируемые значения ДНП

убедительно подтверждают, что разработка расчетных методик без учета доминирующей роли бензинов привела бы к существенному занижению фактических потерь и к ошибочным инженерным решениям в области сокращения выбросов.

1.2 Оценка общей динамики производства и потребления бензина в Российской Федерации

Для количественной оценки масштаба эмиссии паров необходимо проанализировать не только физико-химические свойства топлива, но и динамику его производства и внутреннего потребления, которые в совокупности задают объемы и направления грузопотоков. Рост производства и потребления бензина в РФ за последние десять лет привел к кратному увеличению количества операций по заполнению резервуаров и транспортных емкостей, что требует детального статистического анализа. Данные о производстве и внутреннем потреблении автомобильного бензина за период с 2014 по 2024 г. приведены в таблице 1.5 [55].

Таблица 1.5 – Производство и внутреннее потребление автомобильного бензина в Российской Федерации (2014–2024 гг.), млн т [55]

Нефтепродукт	Производство, млн т	Потребление, млн т
2014	38,3	32,8
2015	38,9	33,5
2016	39,6	34,2
2017	39,2	34,7
2018	39,1	35,1
2019	40,1	35,9
2020	38,5	33,8
2021	40,8	36,5
2022	42,1	37,9
2023	43,9	38,5
2024	41,4	38,8

Приведенная статистика демонстрирует устойчивый повышательный тренд. За десятилетие (с 2014 по 2024 г.) производство автомобильного бензина выросло с 38,3 до 41,4 млн т (в пиковом 2023 г. – до 43,9 млн т), а внутреннее потребление увеличилось с 32,8 до 38,8 млн т. Таким образом, прирост потребления составил порядка 6 млн т, или около 18%. Снижение производства в 2020 г. (38,5 млн т) и в 2024 г. (41,4 млн т) носило временный характер и было связано соответственно с

пандемийными ограничениями и внеплановыми ремонтами мощностей. Однако общий тренд свидетельствует об устойчивом расширении бензинового сектора, что коррелирует с ростом автомобильного парка страны и интенсификацией грузовых и пассажирских перевозок.

Следует отметить особенность в области реализации и поставок светлых нефтепродуктов. Каждый 4-й произведенный литр автомобильного бензина и каждый 3-й произведенный литр нефтепродуктов и сжиженных углеводородных газов на внутреннем рынке России реализуется на крупнейшей товарной бирже России – «Санкт-Петербургской Международной Товарно-сырьевой бирже» (АО Петербургская Биржа). Данная особенность позволяет стране формировать независимые ценовые индикаторы и обеспечивать внутреннюю реализацию нефтепродуктов на внутреннем рынке по справедливым ценам, формирующихся на основании заключенных поставок на организованных биржей торгах. Статистика реализации нефтепродуктов и других товаров биржи за 2024-2026 г. приведена на рисунке 1.5 [57].

ОБЪЕМ ТОРГОВ		2024 год	2025 год	5 мес. 2026	
	НЕФТЕПРОДУКТЫ, а также отдельные категории товаров, выработанных из нефти и газа	37,2	37,2	14,66	млн тонн
	НЕФТЬ	2,2	1,9	0,7	млн тонн
	ПРИРОДНЫЙ ГАЗ	9,1	15,6	5,46	млрд м³
	ЛЕС и СТРОЙМАТЕРИАЛЫ	5,3	4,6	1,55	млн м³
	МИНЕРАЛЬНОЕ СЫРЬЕ и ХИМПРОДУКЦИЯ	146,2	296,9	141,99	тыс. тонн
	УГОЛЬ	1,3	1,4	1,19	млн тонн
	САХАР	76,5	30,3	17,16	тыс. тонн
	МЕТАЛЛЫ и СПЛАВЫ	40,1	98,7	44,3	тыс. тонн

Рисунок 1.5 – Статистика реализации нефтепродуктов и др. товаров биржи за 2024-2026 г. [57]

Структура нефтепродуктов, вышедших на поставку в 2025 году по результатам торгов на Петербургской бирже, приведена на рисунке 1.6 [57].

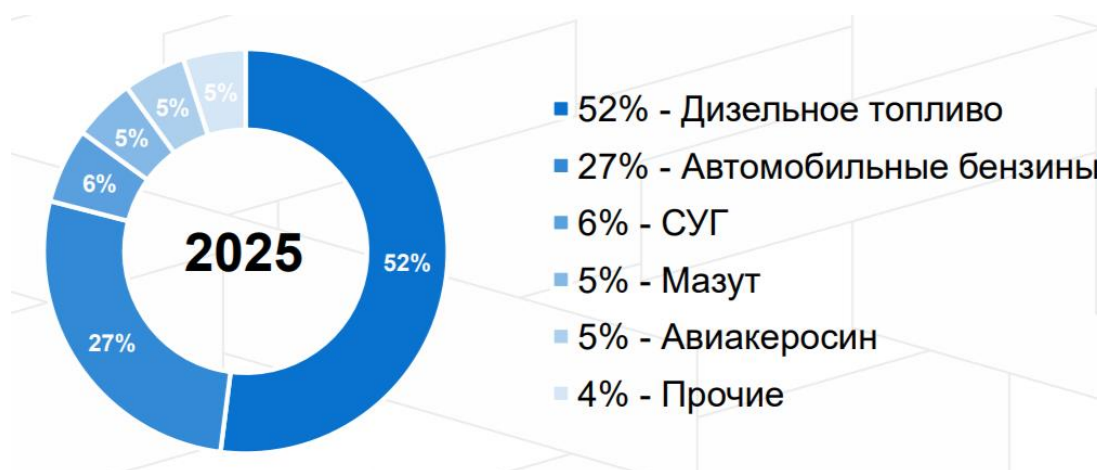


Рисунок 1.6 – Структура нефтепродуктов, вышедших на поставку в 2025 году по результатам торгов на Петербургской бирже [57]

На основе информации о поставках нефтепродуктов через Петербургскую биржу на рисунках 1.5 – 1.6, а также таблицы 1.5 с данными о производстве и потреблении бензина можно сделать вывод, что, действительно, в 2025 году более 10,5 млн. тонн автомобильного бензина реализуется с использованием производных финансовых инструментов биржи (поставочные фьючерсы) и через спотовый рынок, что составляло на момент 2024 года 25,2% от всего производства и 26,9% от всего потребления на территории Российской Федерации, что говорит о востребованности товарных поставок через оператора товарных поставок ОАО «Российский железные дороги» по результатам организованных торгов Петербургской биржи.

Исключительно важным с точки зрения темы диссертации является то обстоятельство, что объемы производства и потребления бензина, указанные в таблице 5, формируют лишь первичный тоннаж, но не отражают реальной кратности грузопотоков. Каждая тонна бензина, прежде чем попасть в бак конечного потребителя, многократно переваливается в системе транспорта и хранения: от установки компаундирования на НПЗ – в товарно-сырьевые резервуары завода, затем – в магистральный продуктопровод или железнодорожную цистерну, далее – на перевалочную нефтебазу, с нефтебазы – в автоцистерну и, наконец, в подземный резервуар автозаправочной станции. К этому добавляются экспортные отгрузки через морские терминалы, где бензин также проходит через береговые резервуарные парки и стендеры. По экспертным

оценкам, коэффициент перевалки для бензина может достигать 3–5 единиц, то есть каждая тонна продукта перекачивается из одной емкости в другую в среднем 4–5 раз на пути от производителя до потребителя.

С учетом указанного коэффициента суммарный объем операций по заполнению резервуаров и транспортных емкостей бензином в годовом исчислении составляет от 160 до 200 млн т (40 млн т первичного тоннажа, умноженные на коэффициент перевалки 4–5). Каждое такое заполнение сопровождается вытеснением паровоздушной смеси с высокой концентрацией углеводородов (на уровне 40–60 об.%). Таким образом, кратный рост номинального производства и потребления бензина в 2014–2024 гг. транслируется в еще более существенный рост реального количества операций налива, а следовательно, и в пропорциональное увеличение валовых потерь от испарения. Данное обстоятельство необходимо учитывать при построении расчетных моделей, поскольку использование только первичного тоннажа без учета кратности перевалок приведет к систематическому занижению прогнозируемых выбросов.

Таким образом, статистический анализ динамики производства и потребления бензина в РФ за 2014–2024 гг. свидетельствует о неуклонном увеличении физических объемов продукта, обращающегося в транспортно-логистической системе. С учетом многократности перевалок совокупный грузопоток бензина, подверженный испарению, исчисляется сотнями миллионов тонн в год, что превращает проблему расчета потерь от испарения при заполнении резервуаров и транспортных емкостей в задачу высокой экономической и экологической значимости.

Потери автомобильных бензинов от испарения представляют собой одновременное проявление экономического ущерба для организаций, осуществляющих транспортировку и хранение, и фактора негативного антропогенного воздействия на атмосферный воздух. Указанные обстоятельства обуславливают необходимость государственного и отраслевого нормирования эмиссии углеводородов. В Российской Федерации сформирована многоуровневая система регулирования, включающая федеральные законы, постановления

Правительства, ведомственные приказы Министерства энергетики и Министерства природных ресурсов, а также нормативно-технические документы отраслевого уровня. Вместе с тем критический анализ данной системы выявляет несоответствие действующих нормативов современным технологическим реалиям и обнаруживает потребность в их актуализации [42, 77].

Основопологающим правовым актом в сфере энергосбережения выступает Федеральный закон от 23 ноября 2009 г. № 261-ФЗ «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности, и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации». Указанный закон устанавливает для организаций, осуществляющих регулируемые виды деятельности, обязанности по разработке и реализации программ энергосбережения, а также по декларированию потребления энергетических ресурсов. Прямые количественные нормативы технологических потерь бензинов данным законодательным актом не вводятся, однако он формирует правовой фундамент для отраслевого нормирования и стимулирует минимизацию потерь углеводородов, классифицируемых как один из видов топливно-энергетических ресурсов.

Постановление Правительства РФ от 29 декабря 2007 г. № 1351 «О порядке утверждения нормативов технологических потерь углеводородного сырья при добыче, транспортировке и хранении» регламентирует преимущественно потери нефти и газового конденсата для целей исчисления налога на добычу полезных ископаемых. На продукты переработки нефти действие данного постановления напрямую не распространяется, однако заложенный в нем методологический подход – утверждение нормативов на основе проектной документации и результатов натурных измерений с учетом технологических особенностей оборудования – впоследствии был воспринят отраслевыми методиками расчета потерь.

Ключевым ведомственным документом, непосредственно устанавливающим числовые значения потерь бензинов и других нефтепродуктов, является Приказ Минэнерго России от 11 августа 2020 г. № 636 «Об утверждении нормативов естественной убыли нефтепродуктов при хранении, транспортировке и отпуске».

Данный приказ заменил ранее действовавшие нормы естественной убыли, разработанные в советский период, и ввел дифференцированные значения нормативов для различных групп нефтепродуктов, климатических зон и типов технологического оборудования. Для автомобильных бензинов нормативы потерь от испарения согласно Приказу № 636 систематизированы в таблице 1.6.

Таблица 1.6 – Нормативы естественной убыли автомобильных бензинов при хранении и транспортировке (осенне-зимний / весенне-летний периоды) для центральной части Российской Федерации, кг/т (по данным автора)

Технологическая операция и тип емкости	Осенне-зимний период (1 октября – 31 марта)	Весенне-летний период (1 апреля – 30 сентября)
Хранение в наземных стальных резервуарах без понтона	1,2	2,8
Хранение в наземных стальных резервуарах с понтоном	0,15	0,35
Налив в железнодорожные цистерны	0,4	0,9
Налив в автомобильные цистерны	0,35	0,8
Отпуск через раздаточные колонки АЗС	0,1	0,25

Приведенные в таблице 1.6 данные демонстрируют, что наибольшие потери санкционированы для хранения в резервуарах, не оснащенных техническими средствами сокращения выбросов (до 2,80 кг/т в весенне-летний период). Применение понтонов уменьшает норматив в 8–10 раз. Технологические операции налива в железнодорожные и автомобильные цистерны сопровождаются нормируемыми потерями в диапазоне от 0,35 до 0,90 кг/т в зависимости от сезона, что соответствует 0,035–0,090% от массы переваливаемого продукта.

Параллельно с нормами естественной убыли функционирует система экологических нормативов, установленная Министерством природных ресурсов и экологии РФ. Приказ Минприроды России № 871 утверждает методику расчета выбросов углеводородов от объектов хранения и перевалки. Используемые в методике эмпирические коэффициенты основаны на экспериментальных данных 1970–1980-х годов и не отражают физико-химические свойства современных высокооктановых бензинов с измененным компонентным составом.

Критический анализ действующей системы нормирования позволяет выделить ряд принципиальных недостатков. Во-первых, нормативы Приказа № 636 установлены в удельных величинах на 1 тонну хранимого или переваливаемого продукта без учета оборачиваемости резервуаров и частоты операций налива. При интенсивной эксплуатации резервуарного парка с коэффициентом оборачиваемости, превышающим 10 циклов в месяц, фактические потери способны многократно превосходить нормативные значения, поскольку норматив не предусматривает масштабирования пропорционально числу циклов заполнения-опорожнения. Во-вторых, нормы налива в железнодорожные цистерны не дифференцированы в зависимости от способа налива (открытая струя, закрытый налив с отводом паров, герметичный налив с рекуперацией паров). В-третьих, климатическое деление на два полугодия (осенне-зимний и весенне-летний периоды) является чрезмерно упрощенным и игнорирует фактическую дифференциацию температурных режимов по географическим регионам страны. В-четвертых, экологические методики Минприроды, базирующиеся на формулах расчета выбросов через дыхательные клапаны и неплотности, используют устаревшие значения давления насыщенных паров для бензинов, характерные для топлив 40–50-летней давности. Современные бензины с пониженным содержанием бензола и ароматических углеводородов, но с увеличенной долей легких изопарафиновых фракций, обладают иными параметрами летучести, что делает целесообразной корректировку эмпирических коэффициентов методики. Таким образом, действующая система государственного и отраслевого регулирования потерь бензинов от испарения характеризуется определенной противоречивостью и фрагментарностью. С одной стороны, Приказ Минэнерго № 636 формально актуализировал нормы естественной убыли, приблизив их к реалиям 2020-х годов. С другой стороны, заложенные в данные нормы предпосылки не учитывают интенсификацию процессов налива, увеличение оборачиваемости резервуаров и трансформацию физико-химических свойств товарных бензинов. Указанное положение диктует необходимость совершенствования расчетных методов, способных с большей точностью прогнозировать потери в условиях реальной

эксплуатации объектов транспорта и хранения нефтепродуктов. В рамках реализации «Энергетической стратегии России на период до 2035 года» поставки нефти в государства Азиатско-Тихоокеанского региона (АТР) возросли более чем втрое относительно уровня 2008 года. Согласно указанному стратегическому документу, через терминал Козьмино в 2021 году было экспортировано 35,1 млн тонн нефти, что на 6,7% превысило показатель годом ранее. В связи с этим ключевыми приоритетами при организации трубопроводных поставок углеводородов по данному маршруту становятся задачи ресурсосбережения и следования экологическим стандартам. Наибольшая интенсификация в технологических процессах работы морских нефтеналивных терминалов наблюдается в рамках Дальневосточного бассейна, что обусловлено в том числе геополитическими аспектами и технологической спецификой. Для многих морских терминалов характерны сложные гидрогазодинамические процессы, обуславливающие параметры безопасности технологии отгрузки [7, 8]. В таблице 1.7 приведены сведения по морским терминалам Дальневосточного бассейна.

Из таблицы 1.7 видно, что далеко не все терминалы оснащены установками рекуперации паров. Соответственно, в рамках товарно-транспортных операций по погрузке танкеров имеется значительная эмиссия углеводородов в атмосферу, что не только влечёт экологические риски, но и приводит к потере ценного сырья [10, 53, 83]. Одним из наиболее представительных примеров терминалов пирсового типа является ООО «Транснефть – Порт Козьмино». В настоящее время данный морской терминал приобрел особое значение: в силу геополитической напряженности произошла переориентация грузовых потоков на страны АТР. С этого момента объемы отгруженной нефти, поставляемой по нефтепроводу «Восточная Сибирь - Тихий океан» (ВСТО), неуклонно растут. Увеличение объемных расходов, интенсификация товарно-транспортных операций обуславливает повышенную нагрузку на технологическое оборудование и инфраструктуру терминалов [45, 72, 80].

Таблица 1.7 – Морские терминалы Дальневосточного бассейна (по данным автора)

Бассейн	Морской терминал	Пропускная способность грузовых терминалов наливные, млн тонн/год	Максимальное водоизмещение (дедвейт) принимаемого судна, тыс. тонн	Конструкция причала	Объем парка, тыс. м³	Способ поступления наливного груза на терминал	Оснащенность УРП
Дальневосточный	Терминал по перевалке нефтепродуктов АО "ННК-Приморнефтепродукт"	2,5	30	Пирсовый	129	ж/д	нет
	Специализированный морской нефтеналивной порт Козьмино	30	150	Пирсовый	600	трубопровод, ж/д	да
	Терминал по перевалке нефтепродуктов ООО «РН-Морской терминал Находка»	7,5	83	Пирсовый	460	ж/д	да
	Терминал отгрузки нефти (ТОН) производственного комплекса "Пригородное"	10	150	Выносной терминал башенного типа	190	трубопровод	нет
	Нефтяной терминал ООО "Трансбункер-Ванино"	3,84	70	Пирсовый	211	ж/д	да
	Выносной точечный причал "Сокол"	12	110	Выносной терминал башенного типа	100	трубопровод	нет

На рисунке 1.7 приведены сведения о количестве отгруженной нефти через морской нефтеналивной терминал ООО «Транснефть – Порт Козьмино» за последние годы.

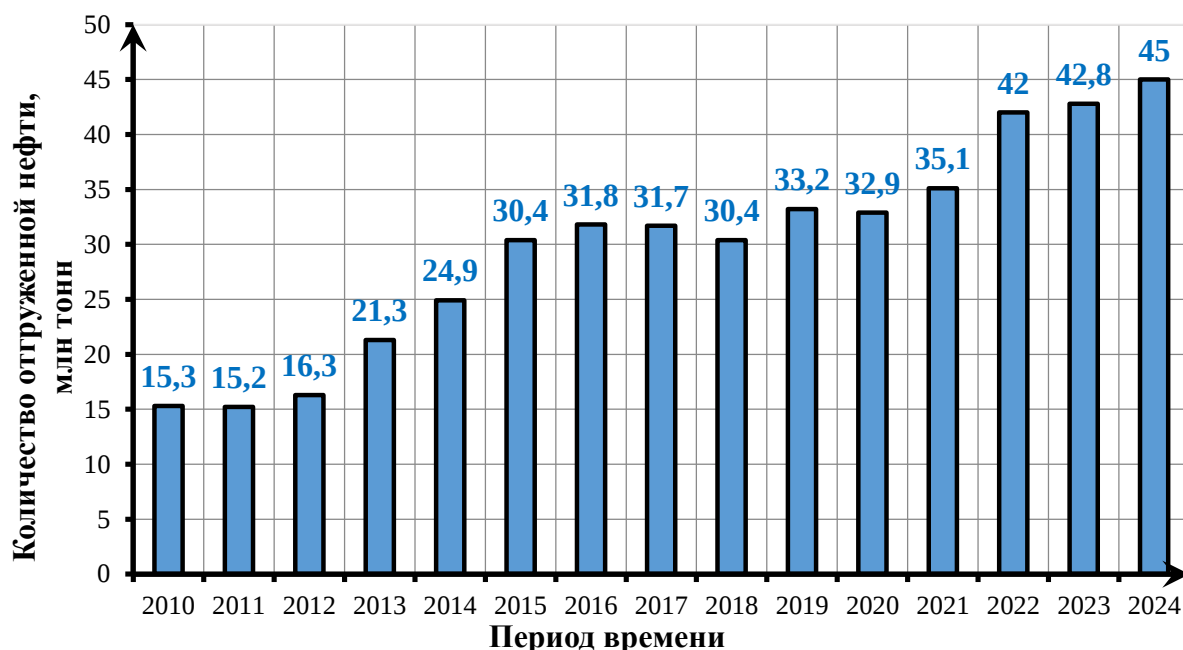


Рисунок 1.7 – Количество отгруженной нефти через морской нефтеналивной терминал ООО «Транснефть – Порт Козьмино» (составлено автором)

Из рисунка 1.7 видно, что объемы отгруженной нефти уже значительно превышают проектные мощности порта. В такой ситуации остро встают вопросы безопасного, экологически обоснованного, ресурсосберегающего режима работы технологического оборудования и систем. Наибольшую проблему при выполнении товарно-транспортных операций с легкоиспаряющимися наливными грузами представляет организация рационального отвода и улавливания паров [31, 68].

Современная мировая практика регулирования выбросов паров нефтепродуктов базируется на принципе технологического нормирования, предполагающего обязательное оснащение источников эмиссии инженерными системами улавливания и рекуперации паров. Наиболее развитые системы такого нормирования действуют в Соединённых Штатах Америки и Европейском союзе. Их сопоставление с российской нормативной базой позволяет выявить концептуальные различия в подходах и обосновать необходимость пересмотра отечественных требований [54].

В США основным регулятором выбросов летучих органических соединений от объектов хранения и транспортировки нефтепродуктов выступает Агентство по охране окружающей среды (EPA). Стандарты для резервуаров хранения летучих органических жидкостей установлены в 40 CFR Part 60 Subpart Kb. Документ требует оснащения резервуаров с давлением насыщенных паров хранимого продукта выше определённого порога системами сокращения выбросов с эффективностью не менее 95%. Для операций налива в транспортные цистерны стандарт 40 CFR Part 63 Subpart R регламентирует применение герметичного налива с отводом паров на рекуперационную установку. Аналогичные требования распространены на бензозаправочные станции, где эффективность улавливания паров при заправке автотранспорта нормируется на уровне не ниже 95%.

Европейский союз реализовал подход технологического нормирования через Директиву 94/63/ЕС от 20 декабря 1994 г. «О контроле выбросов летучих органических соединений (ЛОС) при хранении бензина и его распределении со складов на автозаправочные станции». Директива устанавливает обязательность оснащения терминалов системами рекуперации паров с эффективностью не менее 95%, а АЗС – системами улавливания паров при заправке автомобилей с эффективностью не менее 85%, которая впоследствии была повышена до 98% последующими поправками. Ключевым отличием европейского регулирования является нормирование не массы потерь в расчёте на тонну продукта, а концентрации углеводородов в отходящих газах и минимальной степени улавливания паров. Это стимулирует внедрение наилучших доступных технологий, а не простую фиксацию потерь в пределах установленных лимитов [84].

Сравнительная характеристика российских и международных требований к ограничению выбросов паров бензинов систематизирована в таблице 1.8.

Приведённое сопоставление демонстрирует принципиальное различие методологических подходов. Российские нормативы, установленные Приказом Минэнерго № 636, по существу легализуют определённый уровень безвозвратных потерь и не содержат предписаний по обязательному применению технических

средств сокращения выбросов, за исключением косвенного стимулирования через пониженные нормативы для резервуаров с понтонами. В отличие от этого, американские и европейские нормы императивно требуют достижения заданной эффективности улавливания паров (95–98%), что фактически исключает возможность эксплуатации открытых систем налива и неоснащённых резервуаров на терминалах и АЗС.

Таблица 1.8 – Сопоставление требований к ограничению выбросов паров нефтепродуктов в РФ, США и ЕС (по данным автора)

Параметр	Российская Федерация	США	Европейский союз
Тип нормирования	Удельные нормативы потерь (кг/т)	Технологический норматив (% улавливания)	Технологический норматив (% улавливания)
Резервуары без понтона	Потери до 2,80 кг/т (0,28%)	Требуется ГУС паров, эффективность $\geq 95\%$	Требуется ГУС паров, эффективность $\geq 95\%$
Налив в ж/д цистерны	Потери 0,40–0,90 кг/т (0,09%)	Закрытый налив с рекуперацией	Закрытый налив с рекуперацией
Налив в автоцистерны	Потери 0,35–0,80 кг/т (0,08%)	Закрытый налив с рекуперацией	Закрытый налив с рекуперацией
АЗС (Stage II)	Потери 0,10–0,25 кг/т (0,025%)	Улавливание $\geq 95\%$	Улавливание $\geq 98\%$ (последние поправки)
Требования к рекуперации	Отсутствуют	Обязательны	Обязательны

Таким образом, российская система регулирования потерь бензинов от испарения, ориентированная на инвентаризацию убыли, а не на её предотвращение, является менее жёсткой по сравнению с международными аналогами. Отсутствие законодательно закреплённых требований к обязательной рекуперации паров на всех этапах транспорта и хранения приводит к сохранению значительных объёмов эмиссии углеводородов. Данное обстоятельство актуализирует задачу совершенствования отечественных норм в направлении перехода от принципа нормирования потерь к принципу технологического нормирования выбросов с обязательным применением систем герметизации и улавливания паров.

1.3 Обзор отечественных исследований в области расчёта потерь нефтепродуктов от испарения

Проблема количественной оценки потерь нефтепродуктов от испарения на объектах транспорта, перевалки и хранения имеет в отечественной науке многолетнюю историю. Начиная с середины XX века, усилиями ряда выдающихся учёных были заложены теоретические основы процессов испарения углеводородов, разработаны инженерные методики расчёта и предложены технические решения по сокращению выбросов. Систематизация накопленных знаний представляет собой необходимый этап для выявления нерешённых вопросов и обоснования направления дальнейших исследований. Обобщённые сведения о вкладе ключевых отечественных исследователей приведены в таблице 1.9.

Приведённый обзор показывает, что подавляющее большинство исследователей концентрировало внимание на процессах, протекающих в стационарных резервуарах хранения (большие и малые дыхания, насыщение газового пространства, работа дыхательной арматуры). Значительно менее изученной областью являются потери от испарения при заполнении транспортных ёмкостей – железнодорожных и автомобильных цистерн, танкеров. Из перечисленных учёных систематические исследования применительно к транспортным ёмкостям проводили только Н.Н. Константинов, В.Б. Галеев, П.Р. Ривкин и А.А. Коршак. Именно их труды составляют методическую основу для расчёта эмиссии паров при наливных операциях, однако степень проработанности данного направления остаётся существенно ниже по сравнению с резервуарной тематикой.

Наиболее полное и методологически завершённое освещение проблема потерь при заполнении транспортных ёмкостей получила в трудах профессора А.А. Коршака. В монографии «Прогнозирование потерь нефти и нефтепродуктов от испарения» им предложена обобщённая математическая модель, описывающая динамику концентрации паров в газовом пространстве резервуара или цистерны в процессе заполнения.

Таблица 1.9 – Основные отечественные исследователи в области потерь нефтепродуктов от испарения при их наливе в резервуары и транспортные емкости (по данным автора)

Исследователь	Название основной исследовательской работы, год
Черников В.И. [2]	Потери светлых нефтепродуктов от испарения из подземных емкостей, 1961
Константинов Н.Н. [37]	Борьба с потерями от испарения нефти и нефтепродуктов, 1961
Абузова Ф.Ф. [1]	Исследование потерь от испарения нефтей и нефтепродуктов и эффективности средств сокращения их в резервуарах, 1975
Бронштейн И.С. [16]	Оценка погрешности определения потерь индивидуальных углеводородов нефти от испарения хроматографическим методом, 1978
Земенков Ю.Д. [33]	Методологическое обеспечение экспертных расчетов утечек и выбросов при трубопроводном транспорте жидких углеводородов, 1999
Любин Е.А. [49]	Обоснование технологии улавливания паров нефти из резервуаров типа РВС с использованием насосно-эжекторной установки, 2010
Коршак А.А. [39]	Прогнозирование потерь нефти и нефтепродуктов от испарения, 2022
Галеев В.Б. [21]	Исследование потерь нефтепродуктов от испарения, 1967
Гиззатов М.А. [23]	Сокращение потерь бензинов от испарения на автозаправочных станциях нефтебаз, 1987
Латыпов Р.Ш.[47]	Внешняя теплоотдача наземных резервуаров с нефтепродуктами, 1991
Мартяшова В.А. [50]	Исследование испарения нефтей и нефтепродуктов из резервуаров в условиях интенсификации технологических процессов, 1978
Молчанова Р.А. [52]	Исследования по выбору типов резервуаров для хранения легкоиспаряющихся нефтепродуктов, 1981
Саттарова Д.М.[73]	Потери от испарения из резервуаров и параметры работы газоуравнительных систем при операциях с нестабильными бензинами, 1982
Хафизов Ф.М. [79]	Сокращение потерь от испарения бензинов из резервуаров уменьшением взаимодействия воздуха с испаряющейся поверхностью, 1988
Ривкин П.Р. [70]	Исследование потерь нефти и нефтепродуктов от испарения при наливе в транспортные емкости, 1975
Кулагин А.В. [44]	Прогнозирование и сокращение потерь бензинов от испарения из горизонтальных подземных резервуаров АЗС, 2003

Модель учитывает нестационарный характер массообмена, влияние начальной концентрации паров, температуры и давления, а также тип налива (открытый, закрытый). В более поздних публикациях А.А. Коршак и его ученики распространили данную модель на случай герметичного налива с рекуперацией паров и предложили алгоритмы расчёта оптимальных режимов заполнения. Несомненным достоинством работ А.А. Коршака является стремление к созданию универсального расчётного аппарата, пригодного как для резервуаров, так и для транспортных ёмкостей.

Для большинства моделей характерен широкий ряд допущений. В частности, предполагается изотермичность процесса заполнения, что не выполняется при значительных перепадах температур между закачиваемым продуктом и стенками ёмкости. Коэффициенты диффузии и давления насыщенных паров принимаются постоянными в течение всего цикла налива, тогда как в реальности фракционный состав паровой фазы непрерывно меняется. Не учитывается в полной мере влияние турбулентного перемешивания паровоздушной смеси при высоких скоростях налива. Кроме того, эмпирические константы, использованные при верификации модели, получены на основе экспериментов 1980–1990-х годов и могут не соответствовать свойствам современных высокооктановых бензинов с изменённым содержанием легкокипящих компонентов.

Таким образом, проведённый обзор свидетельствует, что отечественной наукой накоплен значительный объём теоретических и экспериментальных знаний о процессах испарения нефтепродуктов. Однако существующие методики расчёта потерь, особенно применительно к транспортным ёмкостям, либо имеют эмпирический характер и ограниченную область применения, либо базируются на упрощённых физических представлениях, не отражающих всей сложности реальных процессов. Данное обстоятельство делает актуальной задачу детального критического анализа существующих подходов и выявления конкретных источников погрешностей.

В основе любой методики расчёта потерь от испарения при наливе лежит баланс массы вытесняемой газовой смеси (ГВС). Объём вытесняемой ГВС

принимается равным объёму закачанного продукта, а потери определяются как произведение этого объёма на среднюю концентрацию углеводородных паров в отходящем потоке. При этом сопротивление движению ГВС по газоотводящему трубопроводу в классических моделях либо вовсе не учитывается, либо коэффициент гидравлического сопротивления λ принимается постоянной величиной, не зависящей от режима течения.

Фактически же перепад давления между газовым пространством ёмкости и окружающей средой (или приёмным коллектором системы улавливания паров) подчиняется закону Дарси–Вейсбаха для участка трубопровода круглого сечения (1.1):

$$\Delta P = \lambda \cdot \frac{L}{d} \cdot \frac{\rho_{\Gamma} \cdot v^2}{2}, \quad (1.1)$$

где ΔP – перепад давления, Па; λ – коэффициент гидравлического сопротивления, безразмерный; L – длина трубопровода отвода газовой фазы, м; d – внутренний диаметр трубопровода, м; ρ_{Γ} – плотность газовоздушной смеси при данных температуре и давлении, кг/м³; v – средняя по сечению скорость потока ГВС, м/с.

Ключевым параметром в данном выражении является коэффициент λ , который в общем случае зависит от числа Рейнольдса (Re) и относительной шероховатости стенок трубы. В классических методиках величина λ либо не фигурирует вовсе, либо принимается условно-постоянной. Это означает неявное допущение о том, что поток ГВС всегда находится в турбулентном автомодельном режиме. Однако элементарная проверка показывает, что в процессе налива число Рейнольдса для газовой фазы меняется в широких пределах. Для типичных условий налива железнодорожной цистерны скорость ГВС в стандартном дыхательном патрубке диаметром 150 мм в начале операции близка к нулю, а к концу может достигать 25 м/с. При этом число Re проходит последовательно через ламинарную, переходную и турбулентную области. Именно в переходной области ($Re \sim 2300$ – 10000) зависимость λ от Re выражена наиболее резко, а значения λ могут отличаться от автомодельных величин на 30–50%. Пренебрежение этой зависимостью приводит к ошибке в определении избыточного давления в газовом пространстве, а следовательно – и в расчёте движущей силы утечек паров.

Классические методики исходят из предположения, что весь объём вытесняемой ГВС организованно покидает ёмкость через штатные дыхательные устройства. Возможность неорганизованных утечек через неплотности соединений, фланцы, прокладки и клапаны не учитывается. В действительности на объектах, эксплуатирующихся в реальных условиях, микронеплотности неизбежны, особенно на эстакадах с длительным сроком службы. Величина утечек зависит от перепада давления, который, сам является функцией гидравлического сопротивления тракта. Игнорирование неорганизованных утечек ведёт к систематическому занижению валовых потерь, поскольку часть вытесняемой ГВС эмитирует в атмосферу, минуя штатные дыхательные каналы.

Как уже отмечалось, в ходе заполнения транспортной ёмкости скорость налива может изменяться. На современных эстакадах тактограмма налива часто предусматривает плавный выход на номинальную производительность: в первые минуты расход линейно нарастает от нуля до максимального значения, затем стабилизируется, а перед окончанием налива – плавно снижается для исключения гидроударов. В классических моделях динамика расхода не учитывается – потери рассчитываются по среднеинтегральной скорости либо по номинальному значению производительности. Такой статический подход не отражает реальной картины, поскольку интенсивность испарения и концентрация паров в отходящем потоке нелинейно зависят от мгновенного расхода. В начальной фазе налива при малых скоростях турбулизация потока минимальна, что замедляет массообмен между жидкой и паровой фазами, но одновременно увеличивает время пребывания ГВС в газовом пространстве. Упрощённое усреднение завышает или занижает расчётные потери в зависимости от соотношения длительностей фаз, и погрешность может достигать 15–20%.

При наливе бензина, температура которого, как правило, отличается от температуры стенок ёмкости и окружающего воздуха, в газовом пространстве формируется вертикальный градиент температур. Классические модели предполагают изотермичность процесса, что не позволяет корректно описать

конвективный перенос паров и может вести к ошибкам при определении средней концентрации углеводородов в отходящем потоке.

Подводя итог критическому разбору, следует констатировать, что классические методики, опирающиеся на допущения о постоянстве коэффициента гидравлического сопротивления, идеальной герметичности газоотвода, статическом режиме налива и изотермичности, не могут обеспечить точности расчёта, требуемой в условиях современных технологических режимов транспортировки и хранения. Изложенные обстоятельства подтверждают необходимость разработки уточнённой математической модели, свободной от перечисленных недостатков и учитывающей реальную гидродинамику газовой фазы, переменный режим налива и влияние нестационарных факторов.

Работы Н.Н. Константинова, П.Р. Ривкина, В.Б. Галеева и А.А. Коршака составляют методический фундамент для оценки потерь бензинов при заполнении железнодорожных и автомобильных цистерн. Однако критический анализ этих трудов выявляет ряд принципиальных упрощений, ограничивающих их применимость в современных условиях эксплуатации.

Первое существенное упрощение касается коэффициента превышения K , характеризующего отношение фактического объёма вытесненной ГВС к объёму закачанного продукта. В существующих методиках предлагаются эмпирические зависимости K от расхода налива и температуры продукта. Однако эти зависимости не содержат в явном виде коэффициент гидравлического сопротивления λ газоотводящего трубопровода. Величина K определяется исключительно теплофизическими параметрами и не связывается с режимом течения ГВС в дыхательной магистрали. Как было показано ранее, именно λ , варьирующийся в зависимости от числа Рейнольдса, определяет избыточное давление в газовом пространстве цистерны и, следовательно, фактический расход вытесняемой ГВС. Отсутствие этой связи делает эмпирические формулы для K нечувствительными к конструктивным особенностям газоотводящего трубопровода (длина, диаметр, местные сопротивления), что вносит неопределённость в расчёт.

Вторым недостатком является полное отсутствие учёта эффекта слошинга (волнообразования на поверхности продукта) применительно к морским танкерам. Ни один из перечисленных авторов не рассматривал специфику налива в условиях качки и волнения, когда свободная поверхность жидкости совершает вынужденные колебания. Слошинг интенсифицирует массообмен между жидкой и газовой фазами, увеличивает поверхность испарения и способствует дроблению капель, что ведёт к росту концентрации паров в ПВС. Для экспортных операций, осуществляемых через морские терминалы, игнорирование данного фактора означает потенциально значимую недооценку потерь [20, 28, 46].

Третий недостаток – отсутствие методических решений для негерметичных систем. Работы предполагают, что вытеснение ГВС происходит исключительно через штатные дыхательные устройства или газоуравнительную обвязку. Между тем значительная часть транспортных емкостей, особенно эксплуатирующихся длительное время, характеризуется износом уплотнительных элементов. Для таких объектов часть ГВС эмитирует в атмосферу неорганизованно, минуя систему улавливания паров. Количественная оценка этих утечек в существующих моделях не предусмотрена, что сужает область их применения парком технически исправных, герметичных ёмкостей.

Четвёртое ограничение относится к учёту нестационарности расхода налива. В работах А.А. Коршака и соавторов зависимость K_{Π} от расхода исследована только для установившихся режимов, когда производительность налива постоянна на протяжении всего цикла заполнения. Реальная тактограмма налива включает переходный период плавного нарастания расхода от нуля до номинала. В этот период гидродинамическая картина в газовом пространстве принципиально нестационарна, а допущение о постоянстве K_{Π} или его однозначной связи с мгновенным расходом не имеет экспериментального подтверждения.

Таким образом, существующие методики расчёта потерь для транспортных ёмкостей не отражают сложный, многофакторный характер зависимости K_{Π} от режима течения ПВС в газоотводящем трубопроводе, не учитывают специфику морских перевозок и негерметичность оборудования. Особенности реальных

технологических операций – переменный расход налива, наличие неплотностей, воздействие внешних динамических нагрузок – придают процессу вытеснения ПВС специфику, которая не совпадает с предпосылками идеализированных моделей. Перечисленные обстоятельства указывают на необходимость разработки уточнённых расчётных методов, лишённых указанных ограничений.

1.4 Методы определения потерь от испарения, учитывающие переменный характер расхода газовоздушной смеси

При исследованиях в области определения потерь от испарения нефтепродуктов при заполнении резервуаров и транспортных емкостей, следует обратиться в первую очередь к фундаментальным исследованиям в данном направлении. В настоящее время одним из основных исследований в этом направлении является работа [39], в которой сосредоточены результаты многолетнего труда профессора Коршака Алексея Анатольевича. В настоящее время большинство расчетных методик оперируют усредненными величинами и игнорируют сложный переменный характер расхода вытесняемой при заполнении резервуара или емкости газовоздушной смеси.

Относительно долгое время считалось, что выдерживается баланс между объемом продукта, поступающего в резервуар, и объемом вытесняемой паровоздушной смеси (ПВС). В результате опровержения данной гипотезы, после 1930-х стал использоваться специальный термин «коэффициент превышения» K_p , описывающий превышение расхода ПВС над расходом закачиваемой жидкости. Впервые это заметили за рубежом. Отечественные эксперименты в данной области были проведены в 1960 г. Эксперименты поставлены на пункте сбора и подготовки нефти с электрообессоливающей установкой. Суть эксперимента заключалось в замере расхода вытесняемой ПВС из заполняющегося нефтью резервуара с температурой нефти ниже температуры её разгонки. Результатом наблюдений стало фиксирование следующих значений коэффициента превышения, приведенных в соответствующей таблице 1.10 [39].

Таблица 1.10 – Значения коэффициента превышения [39]

Экспериментальное значение K_{Π}	Значение температуры, °С
от 3,0 до 3,6	19
от 2,7 до 4,5	39

Следующими объектами для проведения натурных экспериментов по оценке коэффициента превышения стали головные сооружения нефтепровода «Альметьевск – Пермь» (для нефти) и Ново-Горьковский НПЗ (для бензинов). Результаты наблюдений приведены в таблице 1.11 [39].

Таблица 1.11 – Значения коэффициента превышения [39]

Объект	Экспериментальное значение K_{Π}
Головные сооружения нефтепровода Альметьевск – Пермь	1,83
Ново-Горьковский НПЗ	от 4 до 6

Результаты наблюдений коэффициента превышения наводят на вывод о необходимости его учёта в расчетах. Одновременно с этим следует понять, как определять данный коэффициент для большинства объектов транспорта нефти и нефтепродуктов, поскольку описанные выше эксперименты не позволяют адекватно перенести значения на другие объекты слива/налива.

Параллельно с бензинами эмпирическое завершилось определение зависимости для коэффициента превышения проводилось на азнакаевской нефти и их смеси с нефтью магистрального трубопровода Нижневартовск-Курган-Куйбышев близких к исходной нефти по реологическим и реофизическим свойствам, поскольку зависимость была получена практически линейная и формула практически не масштабируема для других сортов нефти (1.2) [39]:

$$K_{\Pi} = 2,105 \cdot \left(\frac{T}{T_{\text{нр}}}\right)^{1,065}, \quad (1.2)$$

где $T_{\text{нр}}$ – температура разгонки нефти, °С.

Результатом исследований [39] стало получение аналитического выражения для определения коэффициента превышения для резервуаров с учётом интенсивности испарения с учётом того, что температура газового пространства за время закачки не меняется, то есть $\frac{dT_{\Gamma}}{d\tau} = 0$ (1.3):

$$K_{\Pi} = \frac{Q_{\text{пвс}}}{Q_3} = 1 + \frac{J_3 \cdot F_p}{Q_3 \cdot \rho_{\text{пвс}}}, \quad (1.3)$$

где $Q_{\text{пвс}}$ – объемный расход вытесняемой паровоздушной смеси, м³/ч; Q_3 – условный объемный расход закачиваемой жидкости в резервуар, м³/ч; J_3 – удельный поток массы испаряющегося продукта с поверхности жидкости в резервуаре, кг/(м²·с); F_p – площадь зеркала (поверхности) жидкости в резервуаре, м²; $\rho_{\text{пвс}}$ – плотность вытесняемой паровоздушной смеси, кг/м³.

В формуле (1.3) можно заметить, если удельный поток массы испаряющегося продукта с поверхности жидкости в резервуаре превышает 0, соответственно коэффициент превышения будет больше 1, поскольку остальные множители в числителе и знаменателе больше 0. Однако, данная зависимость характерна только для легко испаряющихся углеводородов. Также, данное наблюдение возможно только в том случае, когда концентрация углеводородов в газовой смеси меньше концентрации насыщенных паров [39].

Рассмотрим также альтернативную методику, позволяющую обрабатывать результаты промышленных экспериментов [39] (1.4):

$$m_y(\tau) = m_0 + a_m \cdot \tau^{b_m}, \quad (1.4)$$

где m_0 , a_m , b_m – постоянные эмпирические коэффициенты; τ — текущий момент времени, отсчитываемого с момента начала заполнения резервуара, с.

На основе формулы (1.4), выражение для коэффициента превышения запишется в виде (1.5) [39]:

$$K_{\Pi} = 1 + \frac{b_m \cdot [m_y(\tau)]}{\rho_{\text{пвс}}} \cdot \left[\frac{V_0}{V_3(\tau)} - 1 \right], \quad (1.5)$$

где V_0 – первоначальный (до начала заполнения резервуара) объем его ГП, м³; $V_3(\tau)$ – объем нефти (бензина), закачанной в резервуар за время τ , м³.

Данная методика определения потерь хорошо себя зарекомендовала. Тем более, что еще в работе [36] было установлено, что наиболее точным методом измерения потерь нефти и нефтепродуктов от испарения является метод измерения объёмов газовой смеси, выходящей из резервуара, газовыми счётчиками или расходомерами. Метод применим в случае герметичных резервуаров. Относительная ошибка определения потерь углеводородов не превышает 12%.

Общей закономерностью изменения величины K_{Π} , является ее уменьшение в процессе заполнения резервуара. Объясняется это тем, что по мере увеличения уровня продукта в резервуаре и происходящего одновременно роста концентрации углеводородов в ГП интенсивность испарения нефти/бензина снижается. Соответственно, величина K_{Π} уменьшается. К окончанию процесса закачки он становится близким к единице. Данная закономерность наблюдается всегда. Разница заключается только в начальной величине K_{Π} и времени, в течение которого коэффициент превышения станет равным единице. Из формулы (1.7) видно, что величина K_{Π} прямо пропорциональна интенсивности насыщения ГП резервуара парами нефти/бензина и его объему в начале заполнения, а также обратно пропорциональна расходу закачки [39].

В переводе на язык практики применительно к бензинам это означает, что превышение расхода ПВС над расходом закачки максимально, когда в пустой резервуар большой вместимости, вводимый в эксплуатацию после ремонта, закачивают горячий продукт с температурой, превышающей температуру начала его кипения. Применительно к нефти дополнительным фактором, ведущим к увеличению K_{Π} , является наличие в ней растворенного газа. При прочих равных условиях величины K_{Π} при закачке бензина вследствие его более высокой испаряемости выше, чем при закачке нефти [39].

В работе [17] И.С. Бронштейн одним из первых предложил исследовать влияние различных факторов на коэффициент превышения. В рамках этой работы, предполагалось, что объём выходящей из резервуара паровоздушной смеси можно выразить как функцию (1.6):

$$V_{\Pi} = f(V_3, \rho_n, t_n, t_{oc}, t_{нк}, H_1, H_2, D, W, P_r, P_s, \nu), \quad (1.6)$$

где V_3 – объём закачанной в резервуар нефти (нефтепродукта), м³; ρ_n – плотность нефти, кг/ м³; t_n – температуры нефти (нефтепродукта), °С; t_{oc} – температура окружающей среды, °С; $t_{нк}$ – температура начала кипения нефти (нефтепродукта), °С; H_1 – высота газового пространства до начала заполнения, м; H_2 – высота газового пространства после заполнения, м; D – диаметр резервуара, м; W – скорость заполнения резервуара, м³/ч; P_r – давление в газовом пространстве

резервуара, Па; P_s – давление насыщенных паров по Рейду, Па; ν – кинематическая вязкость продукта, $\text{м}^2/\text{с}$.

Применив метод анализа размерностей, Бронштейн И.С. привел уравнение (1.6) в следующий вид (1.7):

$$\frac{V_{\Pi}}{V_3} = f\left(\frac{H_2}{H_1}; \frac{P_s}{P_r}; \frac{W \cdot D}{\nu}; \frac{t_{\text{н}}}{t_{\text{нк}}}; \frac{t_{\text{ос}}}{t_{\text{н}}}\right). \quad (1.7)$$

В выражении (1.7) отношение $\frac{W \cdot D}{\nu}$ есть число Рейнольдса, а отношение $\frac{V_{\Pi}}{V_3}$ и есть искомый коэффициент превышения (K_n).

Путем обработки данных промышленных экспериментов, проведенных ВНИИСПТнефть в 1980-1984 годах на вертикальных стальных резервуарах емкостью 5000 м^3 и 20000 м^3 , ряда нефтеперекачивающих станций нефтепроводов Нижневартовск – Курган – Куйбышев и Усть-Балык – Курган – Уфа – Альметьевск, были рассчитаны величины коэффициентов превышения объёма выходящей из резервуаров паровоздушной смеси над объёмами закачанной нефти для газосодержащих западносибирских нефтей с температурой ниже температуры начала кипения по Энглеру. Поскольку условия проведения экспериментов существенно зависят от режимы работы резервуара («приём-отпуск» или «подключенные»), данные экспериментов, полученные при различных режимах работы резервуаров, обрабатывались отдельно.

В качестве исходной функции для обработки экспериментальных данных методом группового учёта аргументов был выбран следующий полином (1.8):

$$y_{i,j} = a_0 + a_1 \cdot x_i + a_2 \cdot x_j + a_3 \cdot x_i \cdot x_j + a_4 \cdot x_i^2 + a_5 \cdot x_j^2, \quad (1.8)$$

где a_i – весовой коэффициент; $x_{i(j)}$ – переменный коэффициент полиномиального уравнения.

Величины исходных безразмерных параметров в уравнении (1.7) для резервуаров, работающих в режиме «приём-отпуск», изменялись в следующих пределах (1.9):

$$\left\{ \begin{array}{l} 0,226 \leq \frac{H_2}{H_1} \leq 0,831 \\ 240 \leq Re \cdot \rho \leq 8030 \\ -6,86 \leq \frac{t_{oc}}{t_H} \leq 0,867 \\ 0,428 \leq \frac{P_s}{P_r} \leq 0,702 \\ 0,077 \leq \frac{t_H}{t_{HK}} \leq 0,911 \\ 1,0 \leq K_{\Pi} \leq 1,81 \end{array} \right. , \quad (1.9)$$

Уравнения регрессии для резервуаров, работающих в режиме «приём-отпуск», предназначенные для определения расчетных коэффициентов превышения имеют следующий вид (1.10 – 1.21):

$$K_{\Pi} = 0,7644 - 0,1627 \cdot t_4 + 0,4253 \cdot t_4 \cdot t_3, \quad (1.10)$$

$$t_4 = -0,0399 + 0,2516 \cdot z_4 + 0,7801 \cdot z_1, \quad (1.11)$$

$$t_3 = -0,5863 + 0,9127 \cdot z_3 + 0,9341 \cdot z_5 - 0,2972 \cdot z_5^2, \quad (1.12)$$

$$z_1 = 0,0321 - 0,0015 \cdot x_1 + 0,9428 \cdot x_3 + 0,0255 \cdot x_1^2, \quad (1.13)$$

$$z_3 = 0,2028 + 1,1110 \cdot x_3 - 0,2721 \cdot x_5, \quad (1.14)$$

$$z_4 = 0,2204 + 1,1488 \cdot x_4 - 0,3239 \cdot x_5, \quad (1.15)$$

$$z_5 = 0,1666 - 0,2542 \cdot x_5 + 1,1219 \cdot x_2, \quad (1.16)$$

$$x_1 = 0,3917 + 1,2631 \cdot \left(\frac{H_2}{H_1} \right) + 0,0039 \cdot \left(\frac{Re \cdot \rho}{10} \right) - 0,0041 \cdot$$

$$\cdot \left(\frac{H_2}{H_1} \right) \cdot \left(\frac{Re \cdot \rho}{10} \right) - 0,4895 \cdot \left(\frac{H_2}{H_1} \right) - 0,1485 \cdot 10^{-5} \cdot \left(\frac{Re \cdot \rho}{10} \right)^2,$$

$$x_2 = 0,8181 + 0,2147 \cdot \left(\frac{P_s}{P_r} \right) + 0,0032 \cdot \left(\frac{Re \cdot \rho}{10} \right) - 0,0031 \cdot \left(\frac{P_s}{P_r} \right) \cdot$$

$$\cdot \left(\frac{Re \cdot \rho}{10} \right) - 0,8250 \cdot 10^{-6} \cdot \left(\frac{Re \cdot \rho}{10} \right)^2,$$

$$x_3 = 1,1420 - 0,0025 \cdot \left(\frac{Re \cdot \rho}{10} \right) - 0,0031 \cdot \left(\frac{t_H}{t_{HK}} \right) + 0,0059 \cdot \left(\frac{Re \cdot \rho}{10} \right) \cdot$$

$$\cdot \left(\frac{t_H}{t_{HK}} \right) - 0,2102 \cdot 10^{-5} \cdot \left(\frac{Re \cdot \rho}{10} \right) - 0,4235 \cdot \left(\frac{t_H}{t_{HK}} \right)^2,$$

$$x_4 = 0,6773 - 0,0163 \cdot \left(\frac{t_H}{t_{HK}} \right) + 0,9866 \cdot \left(\frac{P_s}{P_r} \right) - 2,4299 \cdot \left(\frac{t_H}{t_{HK}} \right) \cdot$$

$$\cdot \left(\frac{P_s}{P_r} \right) + 1,7953 \cdot \left(\frac{t_H}{t_{HK}} \right)^2,$$

$$x_5 = 1,1090 + 0,5432 \cdot \left(\frac{t_{oc}}{t_n}\right) + 0,4725 \cdot \left(\frac{H_2}{H_1}\right) - 0,6546 \cdot \left(\frac{t_{oc}}{t_n}\right) \cdot \left(\frac{H_2}{H_1}\right) + 0,0239 \cdot \left(\frac{t_{oc}}{t_n}\right)^2 - 0,6009 \cdot \left(\frac{H_2}{H_1}\right)^2. \quad (1.21)$$

Исходя из рассмотренных формул (1.10) ... (1.21) можно сделать вывод о том, что они являются громоздкими и работают только в узком диапазоне параметров (1.9). Таким образом, рекомендовать их к использованию в современной практике не представляется возможным. К тому же, очевидно, что коэффициенты регрессии определены применительно к тем условиям, в которых проводились эксперименты. Существующие условия закачки в резервуары и транспортные емкости по многим аспектам существенно от них отличаются.

В работе [39] установлено, что применяемая в настоящее время формула для расчета массовых потерь от «большого дыхания» занижает потери от испарения ровно на величину коэффициента превышения. Однако, унифицированные рекомендации по его определению для различных случаев и условий налива по сей день отсутствуют. В этой связи обоснование методов расчета потерь нефтепродуктов от испарения при заполнении резервуаров и транспортных емкостей, учитывающих явление превышения объема ГВС над объемом закачки, является важной задачей.

1.5 Выводы по первой главе

Проведенный в первой главе анализ современной теории и практики сокращения потерь нефти и нефтепродуктов от испарения при заполнении резервуаров и транспортных емкостей, а также соответствующих методов расчета этих потерь, позволил сделать следующие основные выводы:

1. Сокращение потерь от испарения при заполнении транспортных емкостей призвано не только снизить негативное влияние на атмосферу (экологические последствия), но прежде всего повысить экономию ценного ресурса. Таким образом, следует не только директивно назначать требования по выполнению нормативных параметров выбросов, но и рационально подходить к выбору соответствующего технического оснащения объектов налива и формированию

требований по ведению технологического процесса. Внедрение УРП и конструктивная проработка сопутствующих систем должны сопровождаться соответствующим научным обоснованием.

2. Существующие методы расчета потерь, как правило, оперируют средними за процесс погрузки величинами. Технологические особенности процесса не учитываются, что делает существующие модели оторванными от реальности. Одним из наиболее сложных вопросов в этом отношении является так называемое явление превышения объема образовавшихся паров над объемом закачки. Долгое время это явление игнорировалось (несмотря на его очевидность) в расчетных методиках по определению потерь от испарения.

3. Совершенствование расчетных методик возможно путем более детального учета влияющих факторов. В целях более глубокого исследования явления превышения объема вытесняемой ГВС над объемом закачки, следует разработать конструкцию экспериментального стенда и на основе результатов проведенных с его использованием экспериментов получить критериальные уравнения, которые позволят прогнозировать значения коэффициента превышения для различных условий эксплуатации и различных объектов налива.

ГЛАВА 2 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА ВЫТЕСНЕНИЯ ГАЗОВОЗДУШНОЙ СМЕСИ ПРИ ЗАПОЛНЕНИИ РЕЗЕРВУАРОВ И ТРАНСПОРТНЫХ ЕМКОСТЕЙ

2.1 Разработка математической модели вытеснения газовой смеси, учитывающей реальные параметры процесса

При заполнении резервуаров и транспортных емкостей в процессе проведения соответствующих операций наблюдается интенсивное испарение продукта [70]. Избыточный объем образовавшейся в результате так называемых «больших дыханий» газовой смеси стравливается через дыхательную арматуру (в случае резервуаров) или отводится по специальным трубопроводам отвода газовой фазы/паров (в случае транспортных емкостей). На рисунке 2.1 приведена упрощенная схема рассматриваемого процесса.

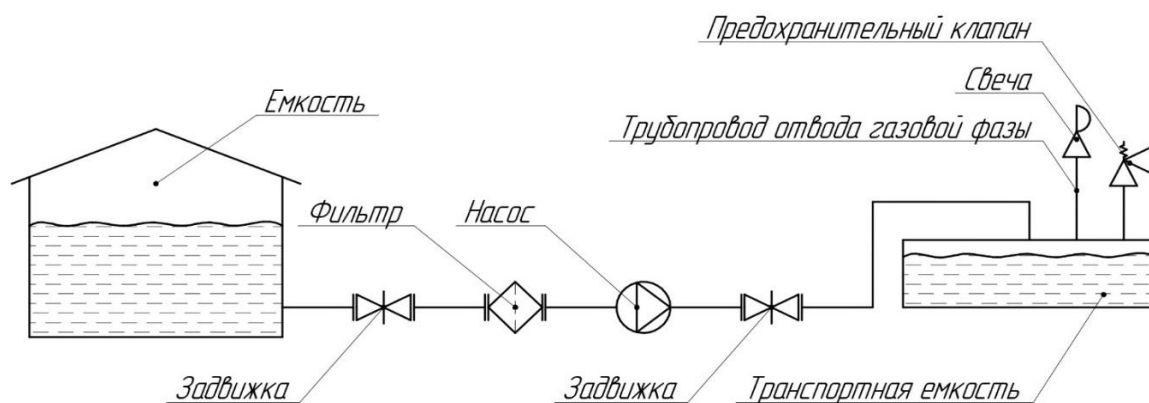


Рисунок 2.1 – Упрощенная схема заполнения резервуаров и транспортных емкостей, обратный клапан и узлы присоединения условно не показаны (составлено автором)

Номенклатура дыхательных клапанов хорошо известна, промышленностью серийно выпускаются проверенные и хорошо зарекомендовавшие себя на практике изделия [30, 48]. В свою очередь трубопроводы отвода газовой фазы могут сильно различаться по конструктивному исполнению, диаметрам и длинам в зависимости от типа объекта налива [60]. Так, например, для АЗС и малых станций автоналива диаметр газоотводных трубопроводов порядка DN50 [11, 22, 56], длина исчисляется метрами. Напротив, для морских терминалов диаметры могут достигать до DN800, а длины составлять километр и более [67].

На рисунке 2.2 представлен характерный вид зависимости расхода закачки от времени при выполнении операций заполнения резервуаров и транспортных емкостей.



Рисунок 2.2 – Характерный вид зависимости расхода закачки от времени при выполнении операций заполнения резервуаров и транспортных емкостей
(составлено автором)

Как правило, начальный и конечный этапы игнорируются в силу их малой продолжительности по времени. В расчетах фигурирует среднее значение расхода закачки [2, 4, 16]. Однако, именно на начальном этапе линейного роста происходит наиболее интенсивное испарение. В этой связи при расчетах параметров вытеснения газовой смеси следует особенно учитывать этот участок, поскольку именно он в значительной мере сопричастен к залповому испарению нефти и нефтепродуктов на начальном этапе [32]. Для операций погрузки танкеров изменение расхода может еще более сложным образом зависеть от времени, что обусловлено необходимостью снизить потери от испарения, снизить опасность статического электричества и обеспечить устойчивое положение судна путем правильной раскладки нефтегруза по отсекам. На рисунке 2.3 представлена динамика изменения объемного расхода продукта в процессе загрузки танкера по времени.

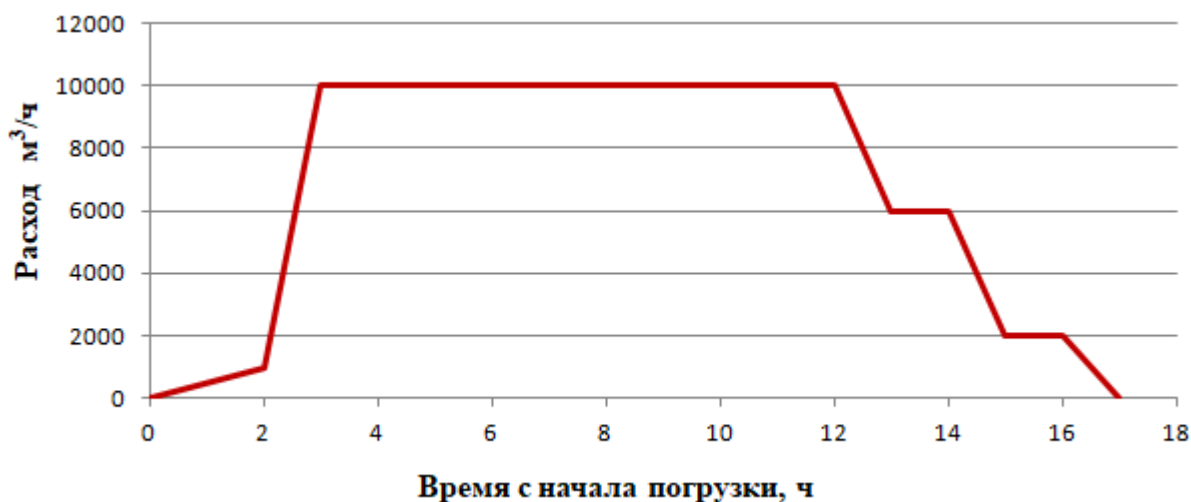


Рисунок 2.3 – Динамика изменения объемного расхода продукта в процессе загрузки танкера во времени (составлено автором)

Вне зависимости от типа заполняемого сосуда (резервуар/транспортная емкость) для газовоздушной смеси внутри газового пространства можно использовать хорошо известное уравнение состояния (УРС) Менделеева-Клапейрона. Это обусловлено тем, что давление внутри заполняемых сосудов весьма низкое и близко к атмосферному [71]. В целом, термобарические условия не требуют внесения поправок на сжимаемость и другие факторы [2, 6, 15]. В рамках обозначенной выше проблематики, рассмотрим именно начальный участок линейного роста расхода, как сопричастный наибольшему испарению.

Запишем классическое уравнение [39] состояния ГВС внутри заполняемой ёмкости в дифференциальной форме (2.1):

$$\frac{dP}{dt} \cdot V + \frac{dV}{dt} \cdot P = \frac{dG}{dt} \cdot R \cdot T, \quad (2.1)$$

где P – давление, создаваемое газовоздушной смесью внутри ёмкости, Па; t – текущее время, с; V – текущий объем, занимаемый газовоздушной смесью в ёмкости, м³; G – масса газовоздушной смеси в ёмкости, м³; R – удельная газовая постоянная для газовоздушной смеси, Дж/(кг·К); T – абсолютная температура газовоздушной смеси, К.

Прежде всего, необходимо выразить текущий объем V как функцию времени. На рисунке 2.4 приведена примитивная схема определения объема закачки на линейном участке роста расхода закачки.



Рисунок 2.4 – Примитивная схема определения объема закачки на линейном участке роста расхода закачки (составлено автором)

Очевидно, что $V = \Delta S$, а площадь треугольника составит $\Delta S = \frac{1}{2} Q t$. Этот результат можно получить и в результате элементарного интегрирования.

С другой стороны, исходя из подобия, можно заметить (2.2):

$$\frac{Q}{Q_1} = \frac{t}{t_1}. \quad (2.2)$$

Тогда текущий расход на начальном участке выражается как (2.3):

$$Q = \frac{Q_1}{t_1} \cdot t. \quad (2.3)$$

С учетом (2.3) текущий объем на начальном участке можно записать в следующем виде (2.4):

$$V = V_{\text{нач}} - \frac{1}{2} \cdot \frac{Q_1}{t_1} \cdot t^2. \quad (2.4)$$

Тогда уравнение (2.1) примет вид (2.5):

$$\frac{dP}{dt} \cdot \left(\frac{V_{\text{нач}} - \frac{1}{2} \cdot \frac{Q_1}{t_1} \cdot t^2}{R \cdot T} \right) - \frac{t \cdot \frac{Q_1}{t_1}}{R \cdot T} \cdot P = \frac{dG}{t_H d\tau}. \quad (2.5)$$

Введем относительное время операции $\tau = \frac{t}{t_H}$, тогда уравнение примет следующий вид (2.6):

$$\frac{dP}{d\tau} \cdot \left(\frac{Q_3 - \frac{1}{2} Q_1 \cdot \frac{t_H}{t_1} \cdot \tau^2}{R \cdot T} \right) - \frac{\tau \cdot \frac{t_H}{t_1} \cdot Q_1 \cdot P}{R \cdot T} = \frac{dG}{t_H d\tau}. \quad (2.6)$$

Рассмотрим отдельно чему равно $\frac{dG}{dt}$ (2.7):

$$\frac{dG}{dt} = J \cdot F - \frac{S \sqrt{P^2 - P_K^2}}{\sqrt{RT} \cdot \sqrt{2 \ln\left(\frac{P}{P_K}\right) + \lambda \frac{L}{D}}}. \quad (2.7)$$

Величиной $2 \ln \frac{P}{P_K}$, как правило, пренебрегают, хотя для коротких трубопроводов она может играть определенную роль (2.8):

$$\frac{dG}{dt} = \frac{dG}{t_H d\tau} = J \cdot F - \frac{S \cdot \sqrt{P^2 - P_K^2}}{\sqrt{R \cdot T} \cdot \sqrt{\lambda \frac{L}{D}}}. \quad (2.8)$$

Если истечение происходит через дыхательный клапан, а не через трубопровод отвода газовой фазы, то вместо $\lambda \frac{L}{D}$ следует использовать коэффициент местного сопротивления ζ . Для дыхательных клапанов резервуаров также определенную сложность составляет корректный учет степени их открытия [65].

В результате выполненных преобразований получим (2.9):

$$\frac{dP}{d\tau} \cdot \left(\frac{Q_3 - \frac{1}{2} Q_1 \cdot \frac{t_H}{t_1} \cdot \tau^2}{R \cdot T} \right) - \frac{\tau \cdot \frac{t_H}{t_1} \cdot Q_1 \cdot P}{R \cdot T} = J \cdot F - \frac{S \sqrt{P^2 - P_K^2}}{\sqrt{R \cdot T} \cdot \sqrt{\lambda \frac{L}{D}}}. \quad (2.9)$$

Умножим обе части уравнения (2.9) на величину $\frac{R \cdot T}{Q_3 \cdot P_K}$ (2.10):

$$\frac{d \frac{P}{P_K}}{d\tau} \cdot \left(1 - \frac{1}{2} \cdot \frac{Q_1}{Q_3} \cdot \frac{t_H}{t_1} \cdot \tau^2 \right) - \tau \cdot \frac{P}{P_K} \cdot \frac{t_H}{t_1} \cdot \frac{Q_1}{Q_3} = \frac{J \cdot F \cdot R \cdot T}{Q_3 \cdot P_K} - \frac{S \sqrt{R \cdot T} \cdot \sqrt{\left(\frac{P}{P_K}\right)^2 - 1}}{Q_3 \cdot \sqrt{\lambda \frac{L}{D}}}. \quad (2.10)$$

Далее введем безразмерные величины:

$\frac{P}{P_K} = y$ – относительное давление;

$\frac{Q_1}{Q_3} \cdot \frac{t_H}{t_1} = \gamma$ – безразмерный коэффициент.

В результате получается следующее уравнение (2.11):

$$\frac{dy}{d\tau} \cdot \left(1 - \frac{1}{2} \cdot \gamma \cdot \tau^2 \right) - \tau \cdot y \cdot \gamma = \frac{J \cdot F \cdot R \cdot T}{Q_3 \cdot P_K} - \frac{\sqrt{y^2 - 1}}{\frac{Q_3 \sqrt{\lambda \frac{L}{D}}}{S \sqrt{RT}}}. \quad (2.11)$$

Из работ Пшенина В.В. известно [41], что (2.12):

$$\Psi = \frac{J \cdot F \cdot R \cdot T}{Q_3 \cdot P_K}, \quad (2.12)$$

где Ψ – безразмерный комплекс, отвечающий за вклад испарения в рост давления, (2.13):

$$\theta = \frac{Q_3 \sqrt{\lambda \frac{L}{D}}}{S \sqrt{R \cdot T}}, \quad (2.13)$$

где θ – безразмерный комплекс, отвечающий за вклад гидравлических сопротивлений в рост давления.

Таким образом, окончательно получено уравнение (2.14):

$$\frac{dy}{d\tau} \cdot \left(1 - \frac{1}{2} \gamma \cdot \tau^2\right) - \gamma \cdot \tau \cdot y = \Psi - \frac{\sqrt{y^2 - 1}}{\theta}. \quad (2.14)$$

Заметим, что $\Psi = \Psi(\tau)$ имеет сложный вид.

Для танкеров В.В. Пшениным было обосновано [41], что эта функция имеет следующий вид (2.15):

$$\Psi(\tau) = \Psi \cdot (1 - (1 - \zeta) \cdot \tau^2). \quad (2.15)$$

Важно отметить, что данная зависимость неприменима к резервуарам, а также к другим транспортным ёмкостям [66]. Вопрос о ее виде остается открытым до формирования большого банка опытных данных по испарению продуктов в процессе выполнения товарно-транспортных операций. В настоящее время этот вопрос является открытым.

Однако, если учесть, что t_1 весьма мало по сравнению с t_H , то вместо $\Psi(\tau)$ можно подставить ее начальное значение (2.16 - 2.17):

$$\Psi_H = \frac{J_H \cdot F \cdot R \cdot T}{Q_3 \cdot P_K}; \quad (2.16)$$

$$\frac{dy}{d\tau} \cdot \left(1 - \frac{1}{2} \gamma \cdot \tau^2\right) - \gamma \cdot \tau \cdot y = \Psi - \frac{\sqrt{y^2 - 1}}{\theta}. \quad (2.17)$$

Необходимо уточнить, каким может быть значение $\gamma = \frac{Q_1}{Q_H} \cdot \frac{t_H}{t_1}$. Для танкеров γ , например, может принимать значение (2.18):

$$\gamma = \frac{2000}{10000} \cdot \frac{14}{1} = 2,8. \quad (2.18)$$

Тогда как для резервуаров и иных транспортных ёмкостей (2.19 - 2.21):

$$Q_1 = Q_H; \quad (2.19)$$

$$t_1 \ll t_H; \quad (2.20)$$

$$\gamma > 10. \quad (2.21)$$

В целях дальнейшего анализа произведем замену (2.22):

$$y = \frac{P}{P_{\text{атм}}} = \frac{P_{\text{изб}} + P_{\text{атм}}}{P_{\text{атм}}} = 1 + \frac{P_{\text{изб}}}{P_{\text{атм}}}. \quad (2.22)$$

Тогда пусть (2.23):

$$\frac{P_{\text{изб}}}{P_{\text{атм}}} = Z. \quad (2.23)$$

Очевидно, что Z – очень малая величина. Так, например, для резервуаров вертикальных стальных рабочее давление дыхательного клапана составляет порядка 2000 Па. Таким образом, величина Z составляет всего несколько процентов.

Очевидно, что (2.24):

$$\frac{dy}{d\tau} = \frac{dZ}{d\tau}; \quad y = 1 + Z. \quad (2.24)$$

В целях упрощения выражения $\sqrt{y^2 - 1}$ рассмотрим (2.25):

$$\left(1 + \frac{P_{\text{изб}}}{P_{\text{атм}}}\right)^2 - 1 = 1 + 2 \cdot \frac{P_{\text{изб}}}{P_{\text{атм}}} + \frac{P_{\text{изб}}^2}{P_{\text{атм}}^2} - 1 = 2 \cdot \frac{P_{\text{изб}}}{P_{\text{атм}}} = 2 \cdot Z. \quad (2.25)$$

Величиной $\frac{P_{\text{изб}}^2}{P_{\text{атм}}^2}$ можно пренебречь, потому что она очень мала в силу обозначенных выше причин.

Следовательно, исследуемое уравнение примет вид (2.26):

$$\frac{dZ}{d\tau} \cdot \left(1 - \frac{1}{2} \cdot \gamma \cdot \tau^2\right) = \gamma \cdot \tau \cdot (1 + Z) + \Psi - \frac{\sqrt{2 \cdot Z}}{\theta}. \quad (2.26)$$

Данный вид можно считать близким к окончательному, однако остается существенная проблема $\theta = f(\lambda)$, а λ зависит от $Q_{\text{ГВС}}$. Таким образом, значение θ можно считать постоянным только при квадратичном режиме истечения.

Рассмотрим вопрос зависимости θ от $Q_{\text{ГВС}}$ отдельно. Как было показано ранее, коэффициент превышения (2.27):

$$K_{\text{п}} = \frac{\sqrt{y^2 - 1}}{\theta} = \frac{Q_{\text{ГВС}}}{Q_3}. \quad (2.27)$$

Воспользуемся приближением Лейбензона для расчета коэффициента гидравлического сопротивления $\lambda = \frac{A}{Re^m}$.

С учетом этого приближения формула для него примет вид [65] (2.28):

$$\lambda = \frac{A}{\frac{v_{\text{ГВС}}^m \cdot D^m}{v_{\text{ГВС}}^m}} = \frac{A \cdot v_{\text{ГВС}}^m}{v_{\text{ГВС}}^m \cdot D^m}. \quad (2.28)$$

Площадь сечения трубопровода отвода газовой фазы составит (2.29):

$$S = \frac{\pi \cdot D^2}{4}. \quad (2.29)$$

Тогда коэффициент превышения будет равен (2.30):

$$\frac{Q_{\text{ГВС}}}{Q_3} = \frac{S \sqrt{RT} \cdot \sqrt{y^2 - 1}}{Q_3 \cdot \sqrt{\frac{A \cdot v_{\text{ГВС}}^m}{v_{\text{ГВС}}^m \cdot D^m} \cdot \frac{L}{D}}}. \quad (2.30)$$

Объемный расход газовой смеси по определению (2.31):

$$Q_{\text{ГВС}} = S \cdot V_{\text{ГВС}}. \quad (2.31)$$

Следовательно, выражая скорость газовой смеси получаем (2.32):

$$V_{\text{ГВС}} = \sqrt{\frac{(y^2 - 1) \cdot R \cdot T}{\frac{A \cdot L \cdot v_{\text{ГВС}}^m}{v_{\text{ГВС}}^m \cdot D^{m+1}}}} = \sqrt{V_{\text{ГВС}}^m \cdot D^{m+1} \cdot \frac{(y^2 - 1) \cdot R \cdot T}{A \cdot L \cdot v_{\text{ГВС}}^m}}. \quad (2.32)$$

После алгебраических преобразований получаем (2.33):

$$V_{\text{ГВС}} = V_{\text{ГВС}}^{\frac{1}{2}m} \cdot D^{\frac{m+1}{2}} \cdot \sqrt{\frac{(y^2 - 1) \cdot R \cdot T}{A \cdot L \cdot v_{\text{ГВС}}^m}}. \quad (2.33)$$

Выразим скорость ГВС и перенесем ее в левую часть (2.34):

$$V_{\text{ГВС}}^{1 - \frac{1}{2}m} = D^{\frac{m+1}{2}} \cdot \sqrt{\frac{(y^2 - 1) \cdot R \cdot T}{A \cdot L \cdot v_{\text{ГВС}}^m}}. \quad (2.34)$$

В результате преобразований степени при скорости ГВС (2.35):

$$1 - \frac{1}{2}m = \frac{2-m}{2}. \quad (2.35)$$

Тогда после возведения в квадрат обеих частей получаем (2.36):

$$V_{\text{ГВС}}^{2-m} = D^{m+1} \cdot \left(\frac{(y^2 - 1) \cdot R \cdot T}{A \cdot L \cdot v_{\text{ГВС}}^m} \right). \quad (2.36)$$

Извлечем из обеих частей уравнения корень степени $2-m$ (2.37):

$$V_{\text{ГВС}} = D^{\frac{m+1}{2-m}} \cdot \sqrt[2-m]{\frac{(y^2 - 1) \cdot R \cdot T}{A \cdot L \cdot v_{\text{ГВС}}^m}}. \quad (2.37)$$

Таким образом, уравнение (2.37) позволяет определить значение скорости без проведения итерационных процедур. Располагая выражением для определения скорости газовой смеси, выражение для расхода получается из (2.31) (2.38):

$$Q_{\text{ГВС}} = V_{\text{ГВС}} \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4} = \frac{\pi}{4} \cdot D^2 \cdot D^{\frac{m+1}{2-m}} \cdot \sqrt[2-m]{\frac{(y^2 - 1) \cdot R \cdot T}{A \cdot L \cdot v_{\text{ГВС}}^m}}. \quad (2.38)$$

Отдельно вычислим степени для диаметра (2.39):

$$2 + \frac{m+1}{2-m} = \frac{4-2m+m+1}{2-m} = \frac{5-m}{2-m}. \quad (2.39)$$

Получаем окончательное выражение для определения расхода газовой смеси, которое можно использовать для всех режимов течения, не опасаясь того факта, что коэффициент гидравлического сопротивления сам зависит от скорости потока [26] (2.40):

$$Q_{\text{ГВС}} = \frac{\pi}{4} \cdot D^{\frac{5-m}{2-m}} \cdot \sqrt{\frac{(y^2-1) \cdot R \cdot T}{A \cdot L \cdot v_{\text{ГВС}}^m}}. \quad (2.40)$$

Для коэффициента превышения получаем следующее выражение (2.41):

$$K_{\text{п}} = \frac{\frac{\pi}{4} \cdot D^{\frac{5-m}{2-m}} \cdot \sqrt{\frac{(y^2-1) \cdot R \cdot T}{A \cdot L \cdot v_{\text{ГВС}}^m}}}{Q_3}. \quad (2.41)$$

В итоге получили формулу для определения коэффициента превышения, в которой впервые получилось уйти от неопределенности в части влияния коэффициента гидравлического сопротивления. Несмотря на это, пользоваться этой формулой все равно весьма затруднительно, поскольку сведения об изменении относительного давления не всегда можно получать оперативно [17, 58, 59]. При помощи определения фактического значения K можно также делать выводы о степени герметичности систем [74].

Аналогичные преобразования можно проделать и для коэффициента местных сопротивлений ζ , для случая дыхательной арматуры резервуаров, приняв при этом зависимость вида (2.42):

$$\zeta = C_1 + \frac{C_2}{Re^m}. \quad (2.42)$$

С учётом полученного выражения окончательный вид уравнения (2.1) для начального этапа операции закачки выглядит следующим образом (2.43):

$$\frac{dZ}{d\tau} \cdot \left(1 - \frac{1}{2} \gamma \cdot \tau^2\right) = \gamma \cdot \tau \cdot (1 + Z) + \Psi - (2 \cdot Z)^{\frac{1}{2-m}} \cdot B \quad (2.43)$$

где вспомогательная величина B записывается в виде (2.44):

$$B = \frac{\frac{\pi}{4} \cdot D^{\frac{5-m}{2-m}} \cdot \sqrt{\frac{R \cdot T}{A \cdot L \cdot v_{\text{ГВС}}^m}}}{Q_3}. \quad (2.44)$$

Для того, чтобы иметь более точное представление о порядке значений коэффициентов в уравнении, оценим, чему может быть равен коэффициент B .

Для выполнения первичной оценки используем значения параметров, представленные в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Значения параметров при проведении оценочного расчета (по данным автора)

Параметр	Значение	Единица измерения
D	0,8	м
R	186	$\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$
T	293	К
ν	$18 \cdot 10^{-6}$	$\frac{\text{м}^2}{\text{с}}$
L	1500	м
Q_3	10000	$\frac{\text{м}^3}{\text{ч}}$
m	0	-
A	0,017	-

Найдем значение коэффициента В при заданных параметрах (2.45):

$$B = \frac{\frac{\pi}{4} \cdot 0,8^2 \cdot \sqrt{\frac{186 \cdot 293}{0,017 \cdot 1500}}}{10000 \cdot \frac{\text{м}^3}{3600 \text{с}}} \approx 7,5. \quad (2.45)$$

Допускается использование уточненных значений для отдельных частных случаев, однако, как правило в этом не возникает необходимости. При выполнении гидравлических расчетов в рамках разработанной модели допустимо использовать хорошо известные значения коэффициентов, полученные в рамках приближения Лейбензона для коэффициента гидравлического сопротивления, представленные в таблице 2.2.

Таблица 2.2 – Значения коэффициентов для различных режимов (по данным автора)

Режим течения	Формула для определения λ	A	m
Ламинарный	$\lambda = \frac{64}{Re}$	64	1
Турбулентный (гидравлически гладкие трубы)	$\lambda = \frac{0,3164}{Re^{0,25}}$	0,3164	0,25
Турбулентный (квадратичное трение)	$\lambda = 0,11 \left(\frac{\Delta}{D} \right)^{0,25}$	$0,11 \left(\frac{\Delta}{D} \right)^{0,25}$	0

Полученное уравнение (2.43) представляет интерес для последующего анализа (2.46):

$$\frac{dZ}{d\tau} \cdot \left(1 - \frac{1}{2} \cdot \gamma \cdot \tau^2\right) = \gamma \cdot \tau \cdot (1 + Z) + \Psi - B \cdot (2 \cdot Z)^{\frac{1}{2-m}}. \quad (2.46)$$

Для упрощения примем $m = 0$. Этот режим работы системы характерен для крупных морских терминалов, где объемные расходы образующейся газовоздушной смеси велики.

В таком случае уравнение (2.46) примет вид (2.47):

$$\frac{dZ}{d\tau} \cdot \left(1 - \frac{1}{2} \cdot \gamma \cdot \tau^2\right) = \gamma \cdot \tau \cdot (1 + Z) + \Psi - B \cdot (2 \cdot Z)^{\frac{1}{2}}. \quad (2.47)$$

Начальное условие запишем в виде (2.48):

$$Z(0) = \delta. \quad (2.48)$$

Необходимо учитывать, что $\delta \approx 0$, но, собственно, никогда не равно 0.

Приведем здесь решение уравнения (2.47) путем разложения в ряды. При этом ограничимся членами вплоть до квадрата, чтобы учесть имеющуюся в системе нелинейность. Рассмотрение членов более высокого порядка лишено практического смысла: они очень громоздки и не дают существенной прибавки к точности дальнейших оценок.

Решим уравнение (2.47) в рядах (2.49):

$$Z(\tau) = \delta + (\Psi - B \cdot \sqrt{2} \cdot \sqrt{\delta}) \cdot \tau + \frac{1}{4} \cdot \frac{2B^2\sqrt{\delta} - B\sqrt{2}\Psi + 2\gamma\delta^{\frac{3}{2}} + 2\gamma\sqrt{\delta}}{\sqrt{\delta}} \tau^2 + 0(\tau^3). \quad (2.49)$$

Формула для максимума параболы, в которой достигается наибольшее значение $Z(\tau)$ (2.50):

$$\tau_{max} = -\frac{b}{2a} \quad (2.50)$$

Тогда используя выражение (2.50) с учетом полученного решения (2.49) имеем следующее (2.51):

$$\tau_{max} = \frac{B\sqrt{2}\delta - \Psi\sqrt{\delta}}{B^2\sqrt{\delta} - \frac{B\sqrt{2}}{2}\Psi + \gamma\delta^{\frac{3}{2}} + \gamma\sqrt{\delta}}. \quad (2.51)$$

Умножим на $\sqrt{\delta}$ и с учетом предыдущих оценок можно получить следующую оценку для времени достижения максимального давления при наполнении танкера (2.52):

$$\tau_{max} = \frac{B\sqrt{2} \cdot \sqrt{\delta} - \Psi}{B^2 - \frac{B\sqrt{2}}{2}\Psi + \gamma\delta + \gamma} = \frac{-\Psi\sqrt{\delta}}{-\frac{B\sqrt{2}}{2}\Psi} = \frac{\sqrt{2}\delta}{B}. \quad (2.52)$$

Таким образом, грубая приблизительная оценка τ_{max} дает следующую величину (2.53):

$$\tau_{max} = \frac{\sqrt{2\delta}}{B}. \quad (2.53)$$

Так, например, для $\delta = 1000 \dots 2000/10325$ и $B \approx 7,5$ имеет $\tau_{max} = 0,018 \dots 0,025$ при $t_n = 14$ ч. Иными словами, $\tau_{max} = 15 \dots 20$ мин. Полученная оценка хорошо согласуется с данными реальной практики, когда пиковые значения давления достигаются на начальном этапе погрузки танкеров и практически сразу срабатывает предохранительная дыхательная арматура или открывается мастрайзер.

Таким образом, совокупные потери при наполнении резервуара или транспортной емкости могут быть найдены по следующей формуле (2.54):

$$M = \int_0^{t_n} \frac{\pi}{4} \cdot D^{\frac{5-m}{2-m}} \cdot \sqrt{\frac{(y^2-1) \cdot R \cdot T}{A \cdot L \cdot v_{ГВС}^m}} \cdot m_y(t) dt, \quad (2.54)$$

где $m_y(t)$ – текущее значение массового содержания углеводородов в вытесняемой ГВС, кг/м³.

В настоящее время при практических расчетах потерь нефти и нефтепродуктов от испарения при «больших дыханиях» по формуле В.И. Черникина, то есть при потерях, возникающих при заполнении резервуаров и транспортных емкостей, **коэффициент превышения не учитывается**. Профессор Коршак А.А. в работе [39] показал, что отсутствие учета коэффициента превышения приводит к занижению потерь от испарения в число раз равное самому коэффициенту превышения. За рубежом, а также в ряде отечественных нормативных документов и отчетов компаний, средний коэффициент превышения принимают равным 1,25 для практических расчетов, чтобы хоть как-то учесть возникающую неопределенность.

Проведем вычислительный эксперимент для оценки вклада коэффициента превышения в погрешность расчета массовых потерь от испарения. Для проведения эксперимента будем использовать формулу (2.41). Параметры вычислительного эксперимента представлены в таблице 2.3. Для выполнения

расчетов была написана программа в пакете прикладного математического программного обеспечения Maple 17.

Таблица 2.3 – Параметры вычислительного эксперимента (по данным автора)

Наименование параметра	Параметр	Диапазон значений	Единица измерения
Внутренний диаметр	D	50...800	мм
Газовая постоянная ГВС	R	150...220	$\frac{Дж}{кг \cdot К}$
Температура ГВС	T	283...303	К
Вязкость ГВС	ν	$5...20 \cdot 10^{-6}$	$\frac{м^2}{с}$
Длина трубопровода	L	15...1500	м
Расход закачки	Q_3	50...10000	$\frac{м^3}{ч}$
Параметр, зависящий от режима течения	m	0,0,25,1	-
Параметр, зависящий от режима течения	A	$0,11 \left(\frac{\Delta}{D}\right)^{0,25}, 0,3164,64$	-
Примечание: Величина абсолютной шероховатости внутренней поверхности трубопровода принята равной $\Delta = 0,3$ мм как для труб бывших в эксплуатации			

Всего было проведено 625 расчетов. При этом при генерации вариантов из общего перечня вручную были исключены неправдоподобные случаи, которые не могут быть реализованы на практике (например, высокие расходы закачки, но малые диаметры трубопровода отвода газовой фазы; высокая длина трубопровода отвода газовой фазы и малый диаметр).

Выбор диапазонов параметров обоснован следующим образом: малые значения диаметров и длин характерны для станций автоналива (DN50, длина 10...15 м), умеренные значения – для железнодорожных эстакад, большие значения диаметры и длины трубопровода отвода газовой фазы – для морских нефтеналивных терминалов (диаметр до DN800, длина до 1500 м).

В результате вычислительного эксперимента по формуле (2.41) был получен массив данных по возможным значениям коэффициента превышения. Результаты его статистической обработки приведены в таблице 2.4.

Таблица 2.4 – Результаты статистической обработки массива данных (по данным автора)

Статистический показатель	Коэффициент превышения
Среднее	1,392
Стандартная ошибка	0,0084
Медиана	1,396
Стандартное отклонение	0,210
Дисперсия выборки*	0,044
Коэффициент эксцесса**	-0,31
Коэффициент асимметрии***	0,234
Интервал	1,1
Минимум	1
Максимум	2,1
Количество	625
Примечание: * – размерность дисперсии равна размерности исходной величины в квадрате; ** – безразмерный коэффициент; *** – безразмерный коэффициент.	

Исходя из таблицы 2.4 можно сделать вывод о том, что расчет по предлагаемой автором методике повышает точность расчета потерь от испарения в среднем на 14,2% (среднее значение коэффициента превышения 1,392 см. таблицу 2.4, а стандартное значение 1,25) в рамках диапазонов параметров, представленных в таблице 2.3 применительно к трубопроводам отвода газовой фазы. Если коэффициент превышения не учитывается вовсе, то повышение точности составляет 39,2 %. Указанное значение хорошо согласуется с полученным профессором Коршаком в монографии [39] диапазоном для коэффициента превышения: от 1,029 до 1,678 для бензинов. Однако, есть и отличия: так, например, для бензинов при расчетах по формуле (2.41) можно наблюдать значения, превышающие 2, что свидетельствует о значительном риске недооценить объемы испаряющегося продукта.

2.2 Теоретическая оценка применимости моделей диффузии к задачам испарения нефти и нефтепродуктов при наливе в транспортные емкости

Моделирование испарения ЛОС, в частности, бензина, является комплексной задачей, находящей свое отражение во многих технологических процессах нефтегазовой отрасли [93, 95, 96, 102, 103]. Так, например, в ряде исследований были рассмотрены закономерности испарения бензинов различного состава при их утечках из емкостей для прогнозирования образований взрывоопасных

паровоздушных скоплений, угрожающих безопасной эксплуатации технологических объектов. Другая достаточно значимая задача – определение потерь легких углеводородов при их закачке в емкости и хранении в них. Сложность задачи моделирования подобных процессов заключается в необходимости учета совокупности физических явлений термо- и массопереноса, многокомпонентности состава исследуемой смеси углеводородов, а также внешних факторов, зависящих от конкретных условий эксплуатации технологических объектов (скорость ветра, интенсивность солнечной радиации и др.). По этой причине совокупность уравнений, комплексно описывающих процесс испарения легких органических соединений при их хранении и закачке в емкости, варьируется у многих авторов. К примеру, в статье, посвященной методу расчёта для моделирования и оценки диффузии паров нефти и потерь от «дыхания» в резервуаре с купольной крышей при воздействии солнечного излучения взята модель испарения н-гексана из резервуара с купольной крышей с учетом влияния солнечного излучения на процесс тепло- и массопереноса паровоздушной смеси в емкости. Н-гексан является однокомпонентным веществом, поэтому рассмотрение его для модели в качестве представителя легких углеводородов существенно упрощает расчеты [85, 88, 109]. Результаты CFD моделирования с использованием UDF функций получили экспериментальную верификацию с незначительным отклонением эмпирических данных от результатов моделирования [81]. Была предложена методология численного расчёта испарения различных однокомпонентных легких углеводородов из отверстий между понтоном и внутренней поверхностью резервуара IFRT [90]. Для описания массопереноса на границе раздела фаз «газ-жидкость» использована модель однослойной пленки, а скорость испарения углеводородов с поверхности рассчитывалась при помощи Fluent UDF. Наибольшее расхождение результатов численного моделирования с экспериментальными данными, полученными для прототипов резервуара IFRT относительно небольших размеров с различным расположением вентиляционных патрубков, составило 8,12%. Представлено схожее исследование для неустановившегося режима

эксплуатации резервуара IFRT, в котором уравнения массоотдачи с поверхности содержат безразмерные числа подобия [91].

В исследованиях по оценке испарения бензина при наливе в резервуар с разбрызгиванием с использованием методов вычислительной гидродинамики для описания процесса разбрызгивания бензина и его последующего испарения при закачке в топливный бак использован метод отслеживания границы раздела на основе volume-of-fluid (VOF) в сочетании с моделью массопереноса. В качестве уравнения массопереноса было взято дифференциальное уравнение массопереноса с турбулентным коэффициентом диффузии. Полученная аналитическая модель была проверена CFD-моделированием трубки Стефана для испарения н-гексана. В проекте VocSim, реализуемом Норвежским институтом морских технологий, представлена программа для моделирования испарения легких органических соединений при их погрузке в грузовые танки нефтяных танкеров. В основу математической модели легло дифференциальное уравнение массопереноса с турбулентным коэффициентом диффузии, который, в свою очередь, учитывает турбулентное перемешивание жидкости и парогазовой фазы, вызванное образующимися в жидкости волнами при движении судна, конвективным тепломассопереносом и импульсным характером заполнения емкости [3, 5, 12]. Подобный подход сведения множества факторов, влияющих на процесс массопереноса, к одному коэффициенту предполагает эмпирический характер его определения для конкретных условий операции налива топлива в танкер. Ввиду этого полученная модель имеет ограниченное применение в отсутствии экспериментальных данных.

В таблице 2.5 [109] приведены классические модели диффузионного испарения, сформированные в статье. Каждая из приведенных в таблице моделей имеет свой диапазон применимости. Так, например, модель распределения Гаусса способна эффективно описывать крупномасштабную диффузию легких углеводородов из резервуаров, в то время как модель FEM3 широко используется при численном моделировании локальной диффузии углеводородов [87, 92, 98, 101].

Таблица 2.5 – Классические модели диффузионного испарения вещества [109]

Классические модели	Фундаментальные уравнения	Применение и ограничения
Gaussian	$c(x, y, z) = \frac{Q}{\pi \sigma_y \sigma_z u_a} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{y^2}{\sigma_y^2} \right) \right] \cdot \left\{ \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{z+H}{\sigma_z} \right)^2 \right] \right\}$	Используется для расчетов крупномасштабной диффузии из резервуаров
FEM3	$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \rho u &= \nabla(\rho \mu^m \nabla u) + (\rho - \rho_a)g \\ \frac{\partial T}{\partial t} + u \nabla T &= \frac{1}{\rho C_p} \nabla(\rho C_p \mu^T \nabla T) + \frac{C_{pa} - C_{pa}}{C_p} (\mu^T \nabla T) \nabla T \\ a \frac{\omega}{t} + u \nabla \omega &= \frac{1}{\rho} (\rho \mu^\omega \nabla \omega) \\ \rho &= \frac{pM}{RT} = \frac{P}{RT \left(\frac{M_a}{M_a} + \frac{M_r}{M_r} \right)} \end{aligned}$	Используется для численного моделирования локальной диффузии легких углеводородов из резервуаров
BM	$\begin{aligned} \frac{dR}{dt} &= u_f = c_1 \left[\frac{g(\rho_c - \rho_a)H}{\rho} \right]^{\frac{1}{2}} \\ M \frac{dh_c}{dt} &= \frac{dM_a}{dt} (h_\omega - h_c) + E_f (\pi R^2) \frac{dM_a}{dt} = \\ &= \rho_a (\pi R^2) u_t + \rho_a (2\pi R H) u_e \end{aligned}$	Используется для моделирования крупномасштабной диффузии без учета пространственных деталей
Slab	$\begin{aligned} c(x, y, z) &= 2Bhc(x)c_1(y, b, \beta)c_2(z, Z_e, \sigma) \\ c(x, y, z, t) &= 4B_x B_y hc(t) \\ c_1(x - X_c, b_x, \beta_x)c_1(y, b_y, \beta_y)c_2(z, Z_e, \sigma) \end{aligned}$	Используется применительно к диффузии тяжелых газов из резервуаров без учета пространственных деталей (зданий, рельефа)
Sutton	$c(x, y, z) = \frac{G \cdot \exp \left(-\frac{y^2}{\sigma_y^2 \cdot x^{2-n}} \right)}{\pi \cdot \sigma_y \cdot \sigma_z \cdot u_w} \cdot \left[\exp \left(-\frac{(z-H)^2}{\sigma_z^2 \cdot x^{2-n}} \right) + \exp \left(-\frac{(z+H)^2}{\sigma_z^2 \cdot x^{2-n}} \right) \right]$	Применима для расчета диффузии нейтральных (негорючих) газов

Для исследования процесса диффузионного испарения наливного груза при его налив в емкость постоянного сечения в первом приближении достаточно ограничиться дифференциальным уравнением массопереноса [89, 94, 105]. Стефановское течение возникает в парогазовой фазе за счет разницы концентраций и, в отличие от диффузионного потока, представляет собой конвективный массоперенос вещества [29]. На рисунке 2.5 представлены график распределения концентрации н-гексана в трубке Стефана при ее CFD-моделировании без учета поправки на поток Стефана, а также график распределения концентрации произв. газа в безразмерных координатах с заданным коэффициентом диффузии и учетом поправки на поток Стефана [100].

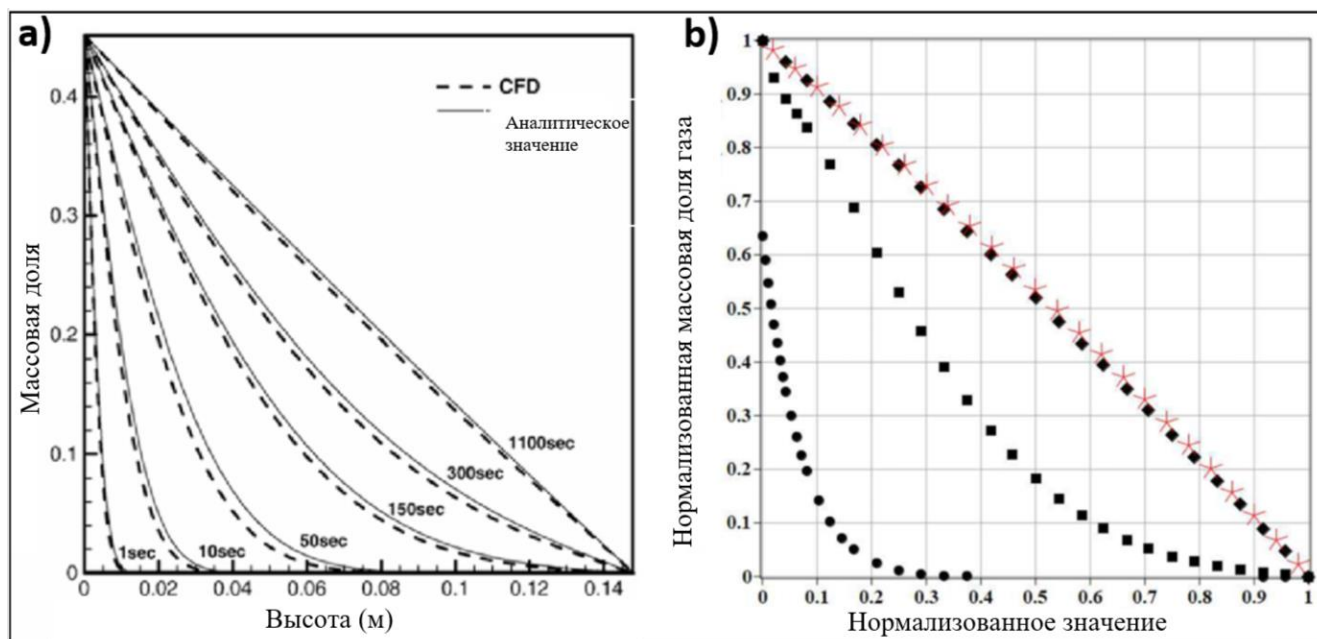


Рисунок 2.5 – Сравнение результатов аналитического решения дифференциального уравнения массопереноса для трубки Стефана при установившемся состоянии [100]:

а) без учета на поток Стефана; б) с учетом на поток Стефана

Заметим, что поправка на поток Стефана влияет на характер вогнутости/выпуклости графика распределения концентраций по высоте трубки Стефана при достижении равновесного состояния. Авторами [97] исследован процесс массопереноса паров жидкости в трубке Стефана с учетом изменения ее уровня вследствие испарения. В при аналитическом решении задачи Стефана получена зависимость распределения паров н-гексана в трубке, имеющая выпуклый характер. Применимость поправочного коэффициента на поток Стефана в дифференциальном уравнении массопереноса имеет экспериментальное обоснование, представленное на рисунке 2.6 [108]. В работе рассмотрены различные модели диффузионного испарения н-гексана, как основного компонента легких бензинов. Для проверки применимости рассматриваемых моделей произведена валидация результатов аналитического решения с экспериментальными данными, полученными для трубки Стефана. Произведены расчеты по нахождению массопотерь н-гексана при его закачке в емкость постоянного сечения, и определены зависимости массоотдачи продукта от скорости заполнения емкости.

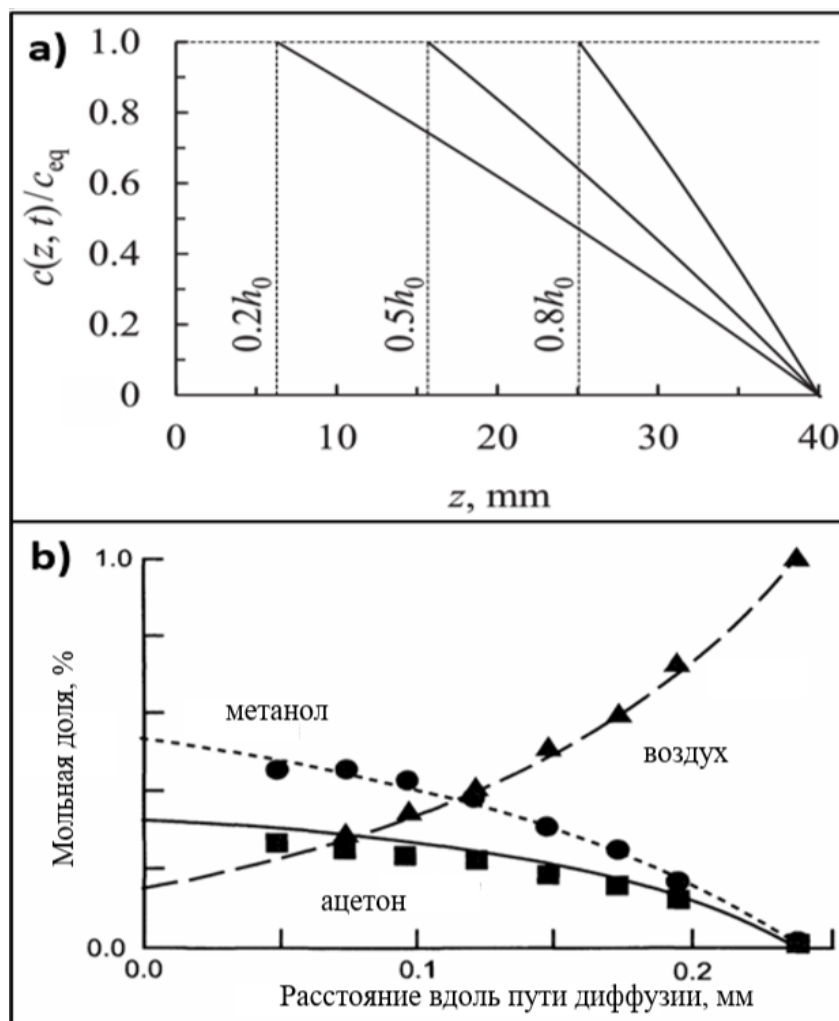


Рисунок 2.6 – Графики изменения концентрации (приведенной концентрации) паров углеводородов по высоте трубки Стефана для установившегося состояния [108]: а) изменение приведенной концентрации н-гексана для различных начальных высот налива в трубку; б) изменение мольной доли паров ацетона и метанола (точками отмечены экспериментальные данные, кривыми – результаты аналитического решения)

Рассматриваемая модель испарения бензина имеет следующий ряд допущений [106]:

1. Модель испарения бензина основана на диффузионном массопереносе вещества для бинарной смеси газов (пара и воздуха), вместо бензина для упрощения вычислений взят один из его летучих компонентов – н-гексан;

2. Модель исключает естественные конвективные токи массы, вызванные градиентом температуры слоев парогазовой смеси. Не приведена зависимость массопотери вещества от его температуры, поскольку изменение температуры в

большей степени влияет на конвективную составляющую массопереноса. Рабочий режим является изотермическим при постоянном давлении, равном атмосферному.

3. Газы являются инертными, а их смеси – идеальными;
4. Диффузионная способность газов не меняется с течением времени;
5. В модели не рассмотрены уравнения газогидродинамики, в том числе уравнения турбулентного перемешивания вещества при его закачке в емкость;
6. Для аналитического решения задачи Стефана сделано допущение о неподвижности плоской границы раздела фаз «жидкость-газ».

Уравнения модели массопереноса

В качестве уравнения массопереноса рассмотрено дифференциальное уравнение массопереноса в частных производных для бинарной идеальной смеси газов [106] (2.55):

$$\frac{\partial c_m}{\partial \tau} + w \nabla c_m = D_{eff} \nabla^2 c_m + g^*. \quad (2.55)$$

Для одномерной задачи при отсутствии внутренних источников массы уравнение (2.55) преобразуется в следующее выражение (2.56):

$$\frac{\partial c}{\partial \tau} + w_z \frac{\partial c}{\partial z} = D_{eff} \frac{\partial^2 c}{\partial z^2}. \quad (2.56)$$

С учетом поправки на поток Стефана [100] выражение (2.56) примет следующий вид (2.57):

$$\frac{\partial c}{\partial \tau} + w_z \frac{\partial c}{\partial z} = D_{eff} \frac{\partial}{\partial z} \left[\frac{1}{1-c} \cdot \frac{\partial c}{\partial z} \right]. \quad (2.57)$$

Скорость испарения вещества v_{evp} для одномерной задачи представлена формулой (2.58):

$$v_{evp} = -S \rho_{см} D_{eff} \frac{1}{1-c} \frac{\partial c}{\partial z}. \quad (2.58)$$

Плотность смеси газов определяется в соответствии с уравнением аддитивности для заданной рабочей температуры (2.59):

$$\rho_{см} = \sum \rho_i \cdot \chi_i = \sum \rho_i \cdot \frac{\frac{c_i}{\mu_i}}{\sum \frac{c_i}{\mu_i}}. \quad (2.59)$$

Для расчета скорости испарения с движущейся границы «жидкость-газ» необходимо ввести замену переменной (2.60):

$$Z = \frac{z - w_z t}{h - w_z t}, \quad (2.60)$$

$$c(z, t) \rightarrow c(Z, t).$$

Суммарные потери вещества при его диффузионном испарении за время t рассчитываются по формуле (2.61):

$$M_{evp} = \int_0^t v_{evp} d\tau, \quad (2.61)$$

где t – суммарное время заполнения емкости, с.

Суммарное время заполнения емкости определяется формулой (2.62):

$$t = \frac{h}{w_z}. \quad (2.62)$$

Произведем сравнение результатов решения уравнений (2.56) и (2.57) применительно к задаче Стефана с экспериментальными данными для испарения метанола в лабораторных условиях. Эмпирические данные по диффузионному испарению метанола в трубке Стефана взяты из [86] и приведены в таблице 2.6. Для удобства нанесения экспериментальных точек на график мольная доля метанола была пересчитана в его массовую долю.

Таблица 2.6 – Экспериментальные данные опыта Carty and Schrodtt (1975) для метанола [86]

Мольная доля метанола χ , моль/моль	0,528	0,457	0,46	0,421	0,379	0,307	0,243	0,168	0
Расстояние по высоте z , см	0	4,45	7	9,45	11,9	14,4	17	19,4	23,8
Массовая доля метанола c , кг/кг	0,552	0,482	0,485	0,445	0,402	0,328	0,262	0,182	0

Для задачи Стефана принимаем следующие начальные и граничные условия (2.63):

$$\begin{cases} c(z, 0) = 0 \\ c(0, t) = c_s. \\ c(h_c, t) = 0 \end{cases} \quad (2.63)$$

На рисунке 2.7 представлен график распределения концентрации метанола в трубке Стефана, построенный по экспериментальным и аналитическим данным. Для построения кривых распределения концентрации метанола по уравнениям (2.56) и (2.57) из справочных данных был взят коэффициент молекулярной

диффузии метанола, равный $D_{eff} = 19,91 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$. Высота трубки Стефана равна $h_c = 23,8 \text{ см}$. Кривые построены для установившегося процесса массопереноса при $t = 1500 \text{ с}$. Из рисунка 2.7 видим, что синяя кривая, иллюстрирующая решение уравнения без поправки на Стефановский поток, не проходит через точки, полученные опытным путем, и, более того, в условиях равновесного состояния массообмена, кривая принимает вид линейной функции, в то время как аппроксимационная кривая эмпирических значений является полиномиальной функцией большего порядка и обладает характерной выпуклостью.

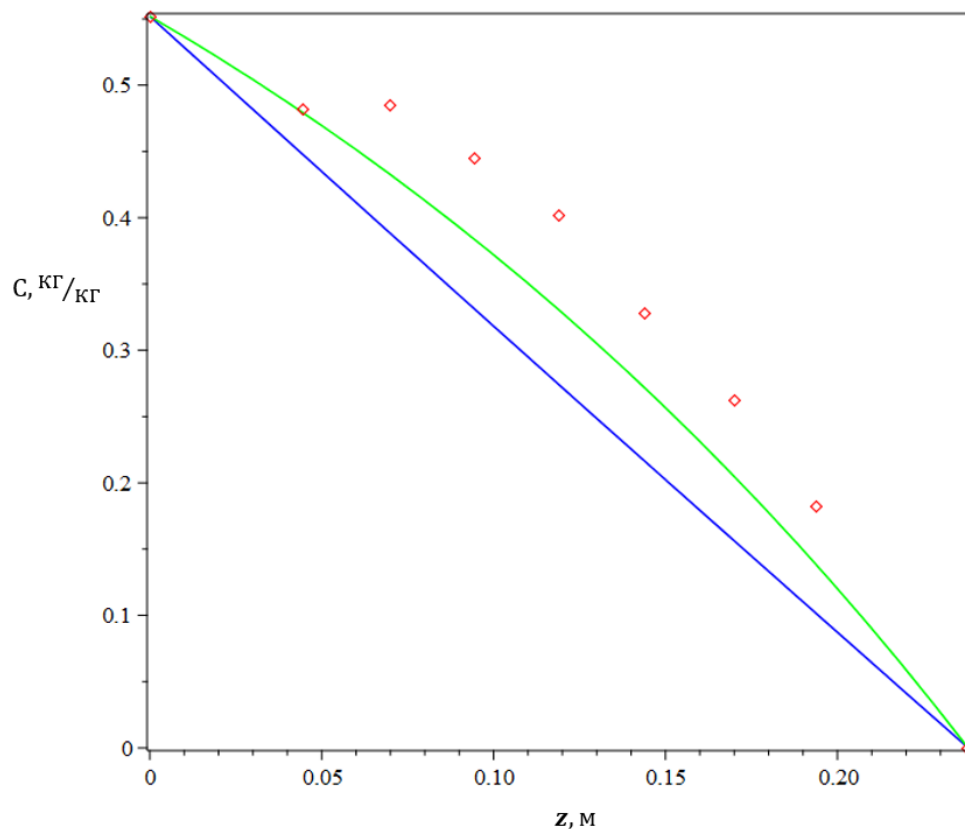


Рисунок 2.7 – Кривые распределения массовой доли метанола в трубке Стефана

[106]: красным цветом отмечены экспериментально полученные значения; синяя кривая – результат решения уравнения (2) без поправки на поток Стефана; зеленая кривая – результат решения уравнения (3) с поправкой на поток Стефана

Расхождение результатов решения уравнения, учитывающего поправочный коэффициент, с экспериментальными значениями можно объяснить тем, что опыт проводился для бинарной смеси метанола и ацетона, где последний

непосредственно влияет на диффузионную способность первого. Однако, зеленая кривая повторяет характер распределения концентрации пара вдоль трубки Стефана для экспериментальных значений, что свидетельствует о правильности учета поправочного коэффициента для модели диффузионного испарения летучих жидкостей [86].

Исследуемые уравнения диффузионного испарения летучих жидкостей будут использованы для определения массопотерь продукта, закачиваемого в нефтяной танкер с учетом вышеупомянутых допущений модели [106]. В качестве модели нефтяного танкера будет рассмотрена емкость с прямоугольным поперечным сечением и габаритными размерами 200x50x12 м. Коэффициент заполнения емкости составляет $k = 0,95$. В качестве исходного вещества взят один из основных компонентов легких бензинов – н-гексан. Режим закачки – изотермический, рабочая температура составляет $T = 27\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($T = 300,15\text{ K}$). Из справочных данных получен коэффициент молекулярной диффузии н-гексана в воздухе при рабочей температуре $D_{eff} = 7,67 \cdot 10^{-6}\text{ м}^2/\text{с}$. Скорость заполнения емкости постоянна, заполнение емкости веществом производится равномерно без турбулентного перемешивания. Искомая модель имитирует процесс одновременного заполнения всех танков-контейнеров нефтяного танкера продуктом, и его последующего диффузионного испарения [94].

В качестве начальных и граничных условий задачи были приняты следующие условия (2.64):

$$\begin{cases} c(z, 0) = 0 \\ c(w_z t, t) = c_s. \\ \frac{\partial c(h, t)}{\partial z} = 0 \end{cases} \quad (2.64)$$

Для решения задачи с движущейся границей «жидкость-газ» в соответствии с методом Лагранжа была произведена замена переменных (2.65):

$$Z = \frac{z - w_z t}{h - w_z t}. \quad (2.65)$$

Таким образом, граничные условия следует записать в следующем виде (2.66):

$$\begin{cases} c(Z, 0) = 0 \\ c(0, t) = c_s \\ \frac{\partial c(1, t)}{\partial z} = 0 \end{cases} \quad (2.66)$$

Решение поставленной задачи производилось численным методом при помощи программного обеспечения Maple. На рисунке 2.8 представлен трехмерный график распределения массовой доли паров н-гексана в емкости при ее заполнении со скоростью $w_z = 1 \cdot 10^{-4} \text{ М/с}$, полученный для уравнения (2.56).

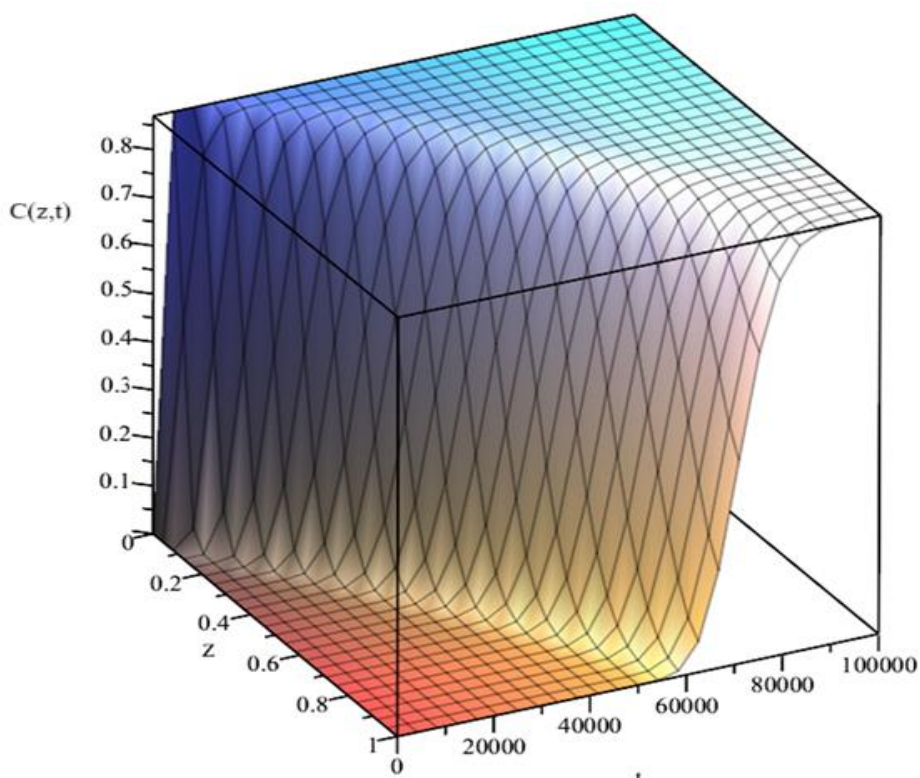


Рисунок 2.8 – График поверхности изменения массовой доли н-гексана в его паровоздушной смеси с воздухом при закачке в емкость со скоростью $w_z = 1 \cdot 10^{-4} \text{ М/с}$ [106]

На рисунке 2.9 приведены графики изменения массовой доли паров н-гексана с течением времени для слоя высотой $h = 11,4 \text{ м}$. Зависимости построены для различных скоростей загрузки емкости и двух уравнений массопереноса. Графики изменения массовой доли паров н-гексана по времени показывают, что увеличение скорости загрузки продукта в емкость нелинейно влияет на процесс насыщения емкости парами продукта. Так, при изменении скорости заполнения н-гексаном емкости с $w_z = 1 \cdot 10^{-4} \text{ М/с}$ до $w_z = 4 \cdot 10^{-4} \text{ М/с}$, время насыщения пограничного слоя уменьшается практически в 9 раз. Подобный нелинейный характер влияния

скорости закачки на скорость насыщения емкости парами продукта можно объяснить медлительностью процесса диффузионного испарения по сравнению с конвективной составляющей массопереноса. На рисунке 2.9 также представлен график изменения массовой доли паров н-гексана, полученный для решения уравнения с поправкой на поток Стефана. Для скорости закачки $w_z = 1 \cdot 10^{-4} \text{ М/с}$ видим, что время, необходимое для насыщения последнего слоя составляет $\Delta t_1 = 16,4 \text{ ч}$. Для уравнения, не учитывающего поправку, то же время составляет $\Delta t_2 = 12 \text{ ч}$, что соответствует относительной разности между полученными значениями в 27 %. С увеличением скорости закачки относительная разность между значениями времени насыщения нелинейно уменьшается. Следовательно, поток Стефана в большей степени влияет на процесс диффузионного испарения продукта для малых скоростей заполнения емкости.

На рисунке 2.10 представлен график массоотдачи с поверхности зеркала продукта для различных скоростей наполнения емкости. Сплошными линиями обозначены кривые, полученные для уравнения (2.56), пунктирными – для уравнения (2.57).

Приведенные кривые имеют характерный экстремум, величина которого возрастает с увеличением скорости нагнетания продукта в емкость. Зависимости, полученные для уравнения, учитывающего поправку на поток Стефана, имеют больший экстремум для каждой из скоростей заполнения емкости. По графикам видно, что поправка на Стефановский поток увеличивает время массоотдачи для каждой из скоростей нагнетания и с малым расхождением соответствует времени насыщения емкости продуктом (рисунок 2.9).

Рисунок 2.11 демонстрирует изменение массы паров н-гексана в парогазовом пространстве емкости со временем. Сплошные кривые получены для уравнения (2.56), пунктирные кривые – для уравнения (2.57). Сплошные кривые монотонно возрастают до значения суммарной массы испарившегося продукта $M \approx 96 \text{ тонн}$ за время его закачки в емкость с незначительным расхождением (менее 2%). Видим, что пунктирные кривые имеют отличные от сплошных кривых значения массы испарившегося продукта для каждой из скоростей нагнетания.

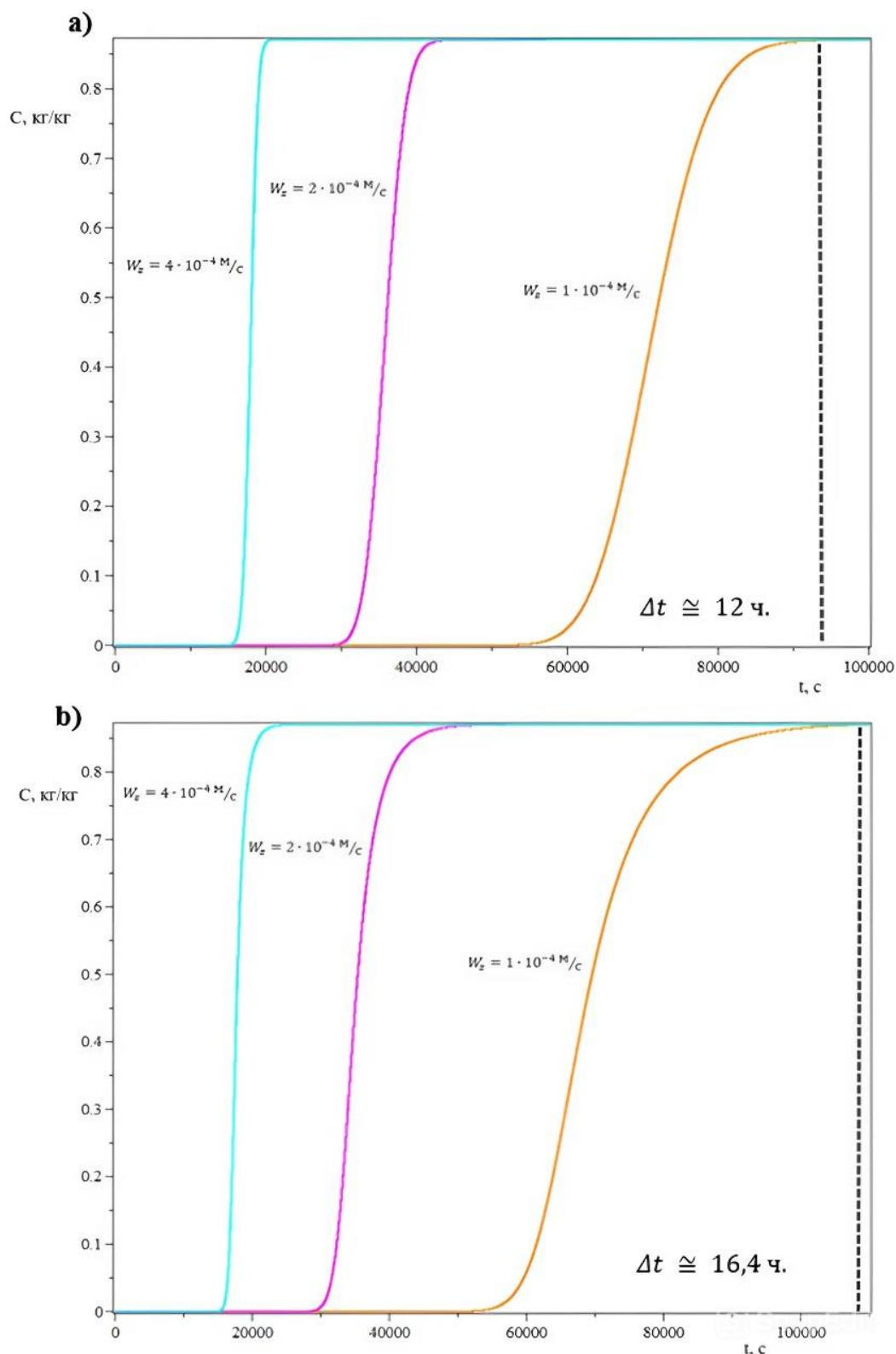


Рисунок 2.9 – Графики изменения массовой доли паров н-гексана по времени для слоя высотой $h = 11,4 \text{ м}$ [106]: а) на основе численного решения уравнения (2) без поправки на поток Стефана; б) на основе численного решения уравнения (3) с учетом поправки на поток Стефана;

для скоростей $W_z = 4 \cdot 10^{-4} \text{ М/с}$ – голубая кривая;

$W_z = 2 \cdot 10^{-4} \text{ М/с}$ – фиолетовая кривая; $W_z = 1 \cdot 10^{-4} \text{ М/с}$ – оранжевая кривая

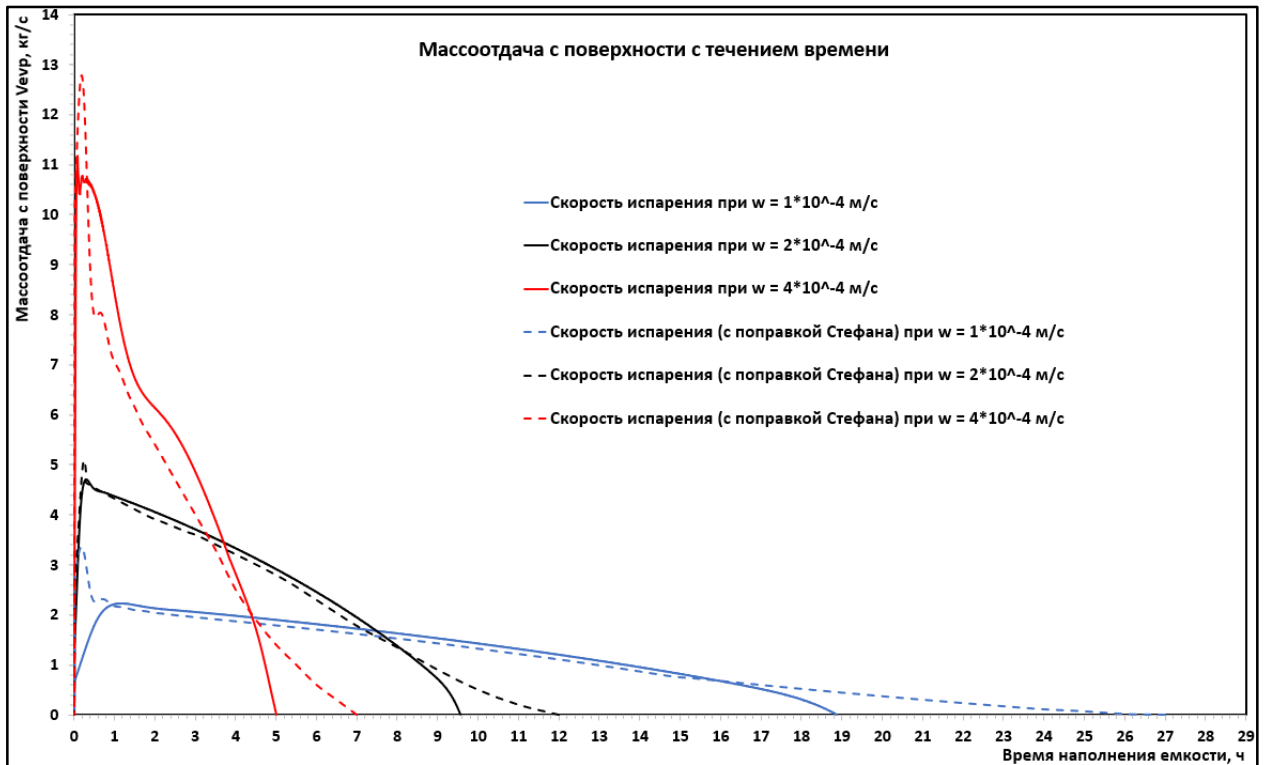


Рисунок 2.10 – Изменение массоотдачи с поверхности зеркала н-гексана со временем заполнения емкости [106]

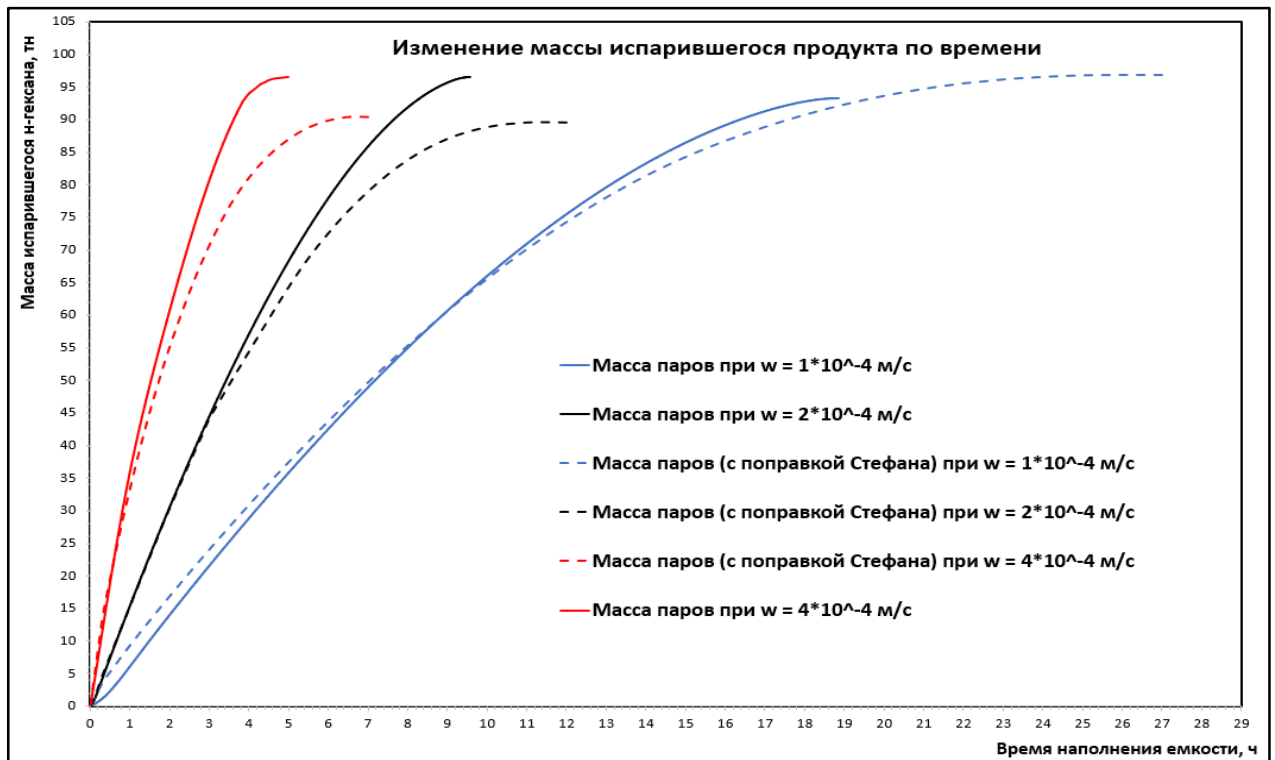


Рисунок 2.11 – Изменение массы паров н-гексана со временем заполнения емкости [106]

Характер влияния скорости закачки продукта в емкость на изменение массы его паров со временем для уравнения (2.57) неоднозначен – для малых скоростей

нагнетания суммарная масса паров в емкости увеличивается при использовании в решении поправочного коэффициента на поток Стефана, для больших скоростей – уменьшается.

Расхождение можно объяснить погрешностями, возникающими в ходе численного моделирования. Среднее отклонение суммарной массы паров н-гексана, соответствующей времени полного заполнения емкости, для уравнение (2.56) и (2.57) составляет 5,8%.

В статье были рассмотрены различные модели диффузионного испарения наливных грузов, и на основе изученной литературы были подобраны наиболее подходящие модели для описания диффузионного испарения продукта при его закачке в емкость постоянного сечения. В качестве представителя наливных грузов рассмотрен н-гексан – основной компонент легких бензинов.

Обоснование рациональности использования модели, учитывающей поправку на Стефановский поток, было дано при ее экспериментальной валидации для испарения метанола в трубке Стефана. На основании произведенного численного моделирования были построены поверхностные графики концентрации паров продукта в парогазовой смеси для различных скоростей заполнения емкости. Результаты моделирования показали, что Стефановский поток замедляет процесс диффузионного испарения вещества – для относительно малой скорости заполнения учет поправочного коэффициента увеличивает время полного наполнения емкости продуктом на 27%.

Также были построены графики зависимости массоотдачи продукта с поверхности от времени заполнения емкости. Построенные кривые обладают характерным экстремумом, величина которого растет при увеличении скорости нагнетания продукта в емкость. Поправка на поток Стефана уменьшает среднюю массоотдачу с поверхности, однако увеличивает время заполнения емкости продуктом. Для оценки суммарного испарения наливного груза за время заполнения емкости были построены графики зависимости массы его паров от времени. Было установлено, что поправка на поток Стефана неоднозначно влияет на характер изменения массы продукта в парогазовом пространстве. Среднее

значение отклонения массы паров н-гексана, полученной за время полного заполнения емкости продуктом, при учете поправочного коэффициента для различных скоростей составило 5,8%.

Таким образом, отклонения значений массопотерь, вызванные использованием в уравнении диффузии поправочного коэффициента, являются значимыми в абсолютном значении и могут достигать десятков тонн испаренного вещества в зависимости от скорости заполнения емкости и ее геометрических параметров. Более того, учет Стефановского потока в модели диффузионного испарения существенно влияет на скорость насыщения емкости парами летучих веществ, а разница во времени насыщения в зависимости от скорости заполнения емкости может достигать до нескольких часов.

2.3 Выводы по второй главе

В ходе теоретических исследований процесса вытеснения газовой смеси при заполнении резервуаров и транспортных емкостей, в рамках второй главы диссертации, были достигнуты следующие результаты:

1. Разработана математическая модель, описывающая параметры вытеснения газовой смеси при наполнении резервуаров и транспортных емкостей на начальном (линейном) участке операции закачки. Особенностью данной модели является то, что впервые была учтена зависимость коэффициента гидравлического сопротивления от скорости ГВС в явном виде. Полученная модель ближе к реальным процессам, поскольку учитывает начальный участок операции закачки, а именно к нему приурочены наибольшие потери от испарения и пиковый рост давления.

2. Был выполнен анализ полученной модели. Полученное дифференциальное уравнение было решено с использованием разложения в ряды. Упрощенное решение (содержащее члены вплоть до квадрата) позволило грубо уловить имеющуюся в системе нелинейность. За счет этого впервые были даны оценки времени достижения максимальных значений давления в наполняемой емкости, которые хорошо совпадают с наблюдаемыми на практике значениями.

3. Была дана теоретическая оценка применимости моделей диффузии к задачам испарения нефти и нефтепродуктов при наливе в транспортные емкости. Проанализированы известные решения уравнения диффузии с движущейся границей, а также предложенные автором поправки. Сделан вывод о том, что на сегодняшний день модели диффузии, несмотря на их высокую математизацию и глубокую проработанность, не могут дать корректных оценок для крупномасштабных процессов, в том числе для процессов испарения при погрузке танкеров.

ГЛАВА 3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА ВЫТЕСНЕНИЯ ГАЗОВОЗДУШНОЙ СМЕСИ ИЗ НАПОЛНЯЕМОЙ ЕМКОСТИ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ УСЛОВИЯХ

3.1 Обзор аналогов и обоснование технических решений по экспериментальному стенду

Исходя из проведенного в главе 1 теоретического обзора, был сделан вывод о том, что явления и процессы, связанные с испарением многокомпонентных углеводородных сред, следует изучать экспериментально. В рамках первого шага по разработке эскизного проекта экспериментального стенда был проведен патентный обзор наиболее близких по теме исследования установок улавливания и рекуперации паров нефти и нефтепродуктов, реализующих функцию абсорбционно-адсорбционного поглощения и учёта паров испаряющихся жидких углеводородов – потенциальных потерь продуктов перекачки, методы расчёта которых лежат в основе данного исследования. Результаты обзора позволяют перенять успешный опыт проектирования и эксплуатации при создании собственного стенда по изучению потерь, помогут при подборе и обосновании выбора измерительного и технологического оборудования стенда.

Отдельный научный интерес составляет возможность экспертной оценки конкурирующих технологий на специализированном экспериментальном стенде и возможность точного определения зон их рационального применения для условий различных терминалов. Так, например, установки конденсационного типа для большого количества терминалов являются неэффективными из-за высоких температур окружающей среды [19, 35, 43, 51]. Однако подобное масштабное исследование выходит за рамки работы.

Результаты обзора наиболее релевантных теме исследования патентов установок рекуперации и улавливания паров нефти и нефтепродуктов при сливноналивных операциях приведены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Результаты обзора наиболее релевантных теме исследования патентов установок рекуперации и улавливания паров нефти и нефтепродуктов при сливноналивных операциях [62]

Установка/ экспериментальный стенд	Описание состава и технологии установки/экспериментального стенда	Технологические и конструкционные недостатки установки/экспериментального стенда
1. Установка улавливания и утилизации паров углеводородов из резервуаров нефтепродуктов (патент РФ № 39928, опубл. 20.08.2004)	Установка содержит соединённые между собой системой трубопроводов резервуар в виде ёмкости для хранения нефтепродукта, включающей полость с жидким нефтепродуктом и газовую полость с паровоздушной смесью, компрессор низкого давления для обеспечения отбора паровоздушной смеси из ёмкости, движения паровоздушной смеси по испарителю-теплообменнику и подачи конденсата в ёмкость, ресивер-пароотделитель для частичной конденсации паров паровоздушной смеси сразу после отбора её из ёмкости, холодильную машину для охлаждения паровоздушной смеси в испарителе-теплообменнике, в который оставшаяся паровоздушная смесь поступает из ресивера-пароотделителя, дроссель, через который по теплоизолированному трубопроводу охлаждённая паровоздушная смесь из испарителя-теплообменника подаётся обратно в ёмкость, а также дроссель, через который сконденсировавшийся в испарителе-теплообменнике и ресивере нефтепродукт также поступает обратно в ёмкость.	Недостатком является замкнутость контура, включающего испаритель-теплообменник и газовое пространство резервуара с нефтепродуктом, то есть движение потоков сконденсировавшихся паров и очищенной газовой смеси (далее также - ГВС) по одному трубопроводу и отсутствие сброса давления путём вывода очищенной газовой смеси в атмосферу.

Продолжение таблицы 3.1

Установка/ экспериментальный стенд	Описание состава и технологии установки/экспериментального стенда	Технологические и конструкционные недостатки установки/экспериментального стенда
2. Установка улавливания паров нефтепродуктов (патент РФ № 2106903, опубл. 20.03.1998)	Резервуар с приёмным трубопроводом, холодильный блок, абсорберы первой и второй ступеней абсорбции с орошающими трубопроводами, соединяющими верхние части абсорберов с холодильным блоком, приёмный газопровод, соединяющий паровую зону резервуара с нижней частью абсорбера первой ступени, насос, установленный на линии между нижней зоной резервуара и холодильным блоком, и адсорбер, отличающаяся тем, что она дополнительно снабжена установленным после насоса стабилизатором абсорбента, патрубок отвода лёгких фракций которого соединён с нижней частью абсорбера первой ступени, а патрубок отвода жидкости – с холодильным блоком, и трубной перемычкой, соединяющей трубопровод абсорбера первой ступени с приёмным газопроводом, причём соотношение диаметров трубной перемычки и орошающего трубопровода абсорбера первой ступени берут равным 1:3.	Недостатком является совмещение ёмкости для хранения абсорбента и резервуара с нефтепродуктом, что исключает возможность использования в качестве абсорбента какой-либо другой жидкости. Адсорбционный блок включает в себя единственный адсорбер, что исключает возможность непрерывной работы установки ввиду необходимости вывода адсорбера в режим десорбции. В рассматриваемой установке реализована схема, предусматривающая использование холодильного блока, абсорберов и адсорбера в единственной последовательности и без возможности исключения какого-либо блока из работы. Кроме того, недостатком является непосредственное соединение верхней части абсорбера второй ступени и адсорбера, следствием чего может быть повышенная скорость деградации адсорбента и снижения адсорбционной ёмкости ввиду поступления в адсорбер газовоздушной смеси с высоким содержанием капель нефтепродукта после адсорбционной очистки.

Продолжение таблицы 3.1

Установка/ экспериментальный стенд	Описание состава и технологии установки/экспериментального стенда	Технологические и конструкционные недостатки установки/экспериментального стенда
3. Установка улавливания углеводородных паров (патент РФ № 2157717, Стр.: 5 RU 2 842 918 C1 5 10 15 20 25 30 35 40 45 опубл. 20.10.2000)	Группа технологических и группа товарных резервуаров, газоуравнительная система, подводящий газопровод, компрессорная установка, скруббер, система КИПиА, газопровод подпиточного газа, запорная арматура, входные и выходные патрубки, счётчики уловленного газа и конденсата, обвязочные трубопроводы, отличающаяся тем, что она снабжена манифольдом и блоком параллельно подключённых к нему, имеющих общую автоматику компрессоров, максимальная производительность каждого из которых равна минимальному расчётному объёму паров, поступающих на установку из резервуаров, а суммарная производительность - максимальному их значению и определяется как частное от деления суммарной на минимальную расчётную производительность, при этом каждый из компрессоров снабжён системой плавного изменения их производительности от нуля до предельного её верхнего значения, а на подводящем газопроводе установлен датчик-анализатор содержания газообразных углеводородов в смеси, соединённый с исполнительным механизмом, расположенным на газопроводе подпиточного газа, который связан с паровыми пространствами товарных резервуаров автономными газопроводами подпитки, на которых установлены регулирующие клапаны, соединённые с датчиками положения уровня жидкости, расположенными в товарных резервуарах	Недостатком является низкая эффективность улавливания паров ввиду использования только лишь скруббера в качестве устройства для очистки газовой смеси.

Продолжение таблицы 3.1

Установка/ экспериментальный стенд	Описание состава и технологии установки/экспериментального стенда	Технологические и конструкционные недостатки установки/экспериментального стенда
4. Одноступенчатая установка рекуперации паров компании KAPPA GI с применением технологий адсорбции и абсорбции (https://www.kappagi.net/on-e-stage-unitadsorption-absorption/)	Установка включает адсорбционный и абсорбционный блоки. Адсорбционный блок включает два адсорбера с активированным углём. В состав абсорбционного блока входят абсорбер и резервуар хранения абсорбента, соединённые двумя трубопроводами. Адсорбционный блок соединён с нижней частью абсорбера вакуумной линией с установленным на ней вакуумным насосом. В нижней части абсорбера также установлен патрубок для вывода абсорбента из абсорбционной колонны и его возвращения в резервуар хранения абсорбента по трубопроводу с установленным насосом. Резервуар хранения абсорбента соединён трубопроводом с верхней частью абсорбционной колонны, где он подключён к распылителю, при этом для подачи абсорбента в колонну на трубопроводе установлен насос. Также в верхней части колонны установлен патрубок для вывода очищенной газовой смеси, соединённый с трубопроводом для её подачи в адсорбционный блок. Для вывода очищенной газовой смеси из установки рекуперации паров в атмосферу в верхней части каждого из адсорберов установлен трубопровод.	Недостатком является непосредственное соединение абсорбционной колонны и адсорбционного блока, следствием чего может являться повышенная скорость деградации абсорбента и снижения адсорбционной ёмкости ввиду поступления в адсорбционный блок газовой смеси с высоким содержанием влаги и капель нефтепродукта

Продолжение таблицы 3.1

Установка/ экспериментальный стенд	Описание состава и технологии установки/экспериментального стенда	Технологические и конструкционные недостатки установки/экспериментального стенда
5. Установка улавливания и рекуперации углеводородных паров (патент РФ № 2645540, опубл. 21.02.2018) Принята за прототип	Установка содержит резервуар с приёмным трубопроводом, холодильный блок, абсорберы первой и второй ступеней абсорбции с орошающими трубопроводами, соединяющими верхние части абсорберов с соответствующими патрубками из холодильного блока. Газовое пространство резервуара соединено с нижней частью абсорбера первой ступени приёмным газопроводом, на котором установлена газодувка и дополнительный теплообменник с патрубком отвода конденсата воды. Также установка содержит ёмкость охлаждённого абсорбента, соединённую с холодильным блоком трубопроводом с установленным на нём насосом, и выходной адсорбер, выполненный двухступенчатым с возможностью поочерёдной работы и сообщённый с дополнительным теплообменником посредством трубопровода с вакуумным насосом. Абсорбер представляет собой один корпус, в котором друг над другом установлены первая и вторая ступени абсорбции, причём нижняя часть корпуса соединена с ёмкостью охлаждённого абсорбента.	Недостатком является реализация технологической схемы, предусматривающей использование холодильного блока, абсорберов и адсорберов в единственной последовательности и без возможности исключения какого-либо блока из работы. Кроме того, недостатком является непосредственное соединение абсорбера и выходного адсорбера, следствием чего может являться повышенная скорость деградации адсорбента и снижения адсорбционной ёмкости ввиду поступления в выходной адсорбер газовоздушной смеси с высоким содержанием капель нефтепродукта после абсорбционной очистки.

В вопросах испарения при погрузке нефти и нефтепродукты в танкеры большую роль играет качка судна [10, 25, 78]. Различают следующие виды качки судна на волнах:

- 1) вертикальная (поступательные колебания судна в вертикальном направлении, переменное всплытие и погружение);
- 2) бортовая (вращательные колебания судна около продольной горизонтальной оси);
- 3) килевая (вращательные колебания судна около поперечной горизонтальной оси).

Ранее в отечественной науке влияние качки на нефтегрузы рассмотрено только в работах А.З. Щербакова и его учеников [9, 75, 82]. На рисунке 3.1 представлена конструкция экспериментального стенда, разработанного Щербаковым А.З. (габаритные размеры 1,5х1,0х0,5 м).

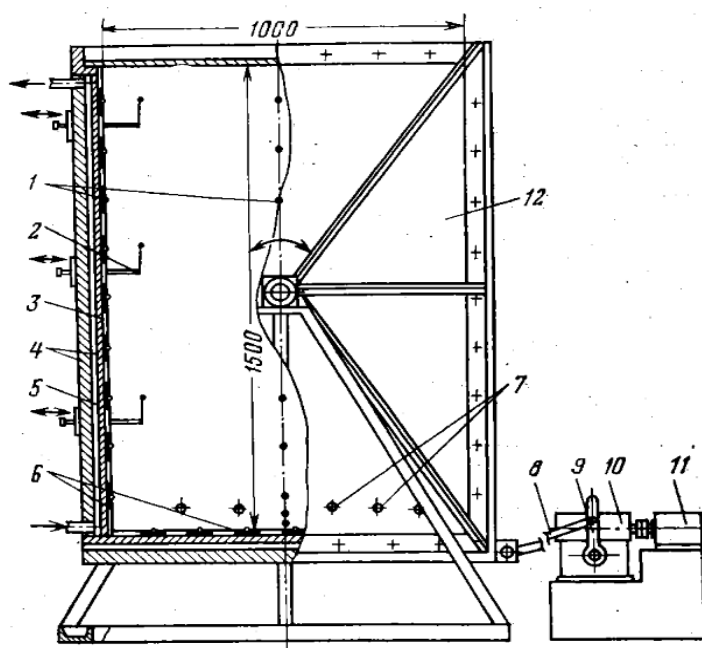


Рисунок 3.1 – Экспериментальный стенд А.З. Щербакова по изучению теплообмена в условиях качки [82]: 1 – термопары; 2 – термозонд; 3 – лист из оргстекла; 4 – металлические листы; 5 – охлаждающая полость; 6 – тепломеры; 7 – подогреватели; 8 – тяга; 9 – кривошип; 10 – редуктор; 11 – электродвигатель; 12 – оргстекло

Причем это рассмотрение было ограничено тепловыми задачами, поскольку основную цель исследований составляло снижение осложнений при застывании высоковязких грузов при их перевозке танкерами и баржами в условиях интенсивного теплообмена с окружающей средой. На данном стенде изучалась прежде всего бортовая качка, как наиболее существенная для вопросов теплообмена. Однако рассмотрение конструкции данного стенда было полезно в том смысле, что позволила учесть некоторые технические решения, которые затем были использованы при разработке собственной конструкции. Период качки в экспериментах был выбран в диапазоне до 5,3 с (условия соответствуют рейсу, а не погрузке). В вопросах испарения бортовая качка также играет ведущую роль. Несмотря на то, что причалы, как правило, проектируются таким образом, чтобы снизить интенсивность бортовой качки при погрузке, можно отметить, что исключить ее полностью невозможно, и она все равно оказывает влияние на объем испарившегося груза. Системных исследований по изучению влияния бортовой качки на объем испарений в отечественной науке не проводилось. В этой связи, проводимые автором работы по разработке экспериментального стенда являются в каком-то смысле первопроходческими. Техническим результатом проектирования экспериментального стенда является комплект конструкторской документации на стенд, а научным результатом – расширение функциональных возможностей оборудования для изучения процессов испарения нефтепродуктов и средств их сокращения [13, 14, 18]. Технический результат достигается тем, что рабочая ёмкость жёстко закреплена на подвижной платформе, которая соединена с шаговыми двигателями, каждый из которых содержит вращательную пару, при этом в верхней боковой части рабочей ёмкости выполнено отверстие, в которое установлен инфракрасный газоанализатор, на коллекторе отвода паров последовательно установлены запорная арматура с электроприводом, огнепреградитель, фильтр, расходомер газа, тройник с ответвлением на потоковый хроматограф, тройник с ответвлением на обводную линию, запорная арматура с электроприводом и огнепреградитель, при этом конец коллектора отвода паров соединён с входным патрубком каплеотбойника, потоковый хроматограф соединён с коллектором отвода

паров и линией отвода очищенной ГВС соединительными трубопроводами, на каждом из которых установлена запорная арматура с электроприводом, линия отвода очищенной ГВС выполнена в форме разветвлённого трубопровода, две ветви которого подключены к кранам трёхходовым L-образным и соединены с тройником, после которого последовательно установлены компрессор, запорная арматура с электроприводом, тройник с ответвлением на обводную линию, расходомер газа, тройник с ответвлением на потоковый хроматограф, огнепреградитель и свеча рассеивания, каплеотбойник выполнен в форме полого цилиндра, в котором выполнены отверстия, в которые установлены патрубки для ввода и вывода газовой смеси и патрубков для слива уловленной жидкости, при этом патрубок каплеотбойника для вывода газовой смеси соединён с коллектором отвода газовой смеси от каплеотбойника, на котором установлены тройники, выводы которых соединены с ветвями вводного трубопровода адсорбера, всасывающий коллектор вакуумных насосов соединён с вводным трубопроводом адсорбера вакуумными линиями, на которых по направлению потока последовательно установлены запорная арматура с электроприводом, обратный клапан, вакуумный насос и запорная арматура с электроприводом, в нижней боковой части конденсатора установлен патрубок для вывода газовой смеси, соединённый с трубопроводом, на котором установлен кран трёхходовой L-образный, два других патрубка которого соединены с линией отвода очищенной ГВС и вводным трубопроводом адсорбера, в верхней боковой части корпуса адсорбера выполнено отверстие, в которое установлен патрубок для вывода очищенной газовой смеси, соединённый с выходным трубопроводом адсорбера, на котором установлена запорная арматура с электроприводом, при этом на конце выходного трубопровода адсорбера установлен кран трёхходовой L-образный, второй патрубок которого соединён с линией отвода очищенной ГВС, а третий - с трубопроводом, соединённым с входным патрубком каплеотбойника. Технологическая схема и условная технологическая схема проекта экспериментального стенда представлена на рисунке 3.2 и на рисунке 3.3 соответственно.

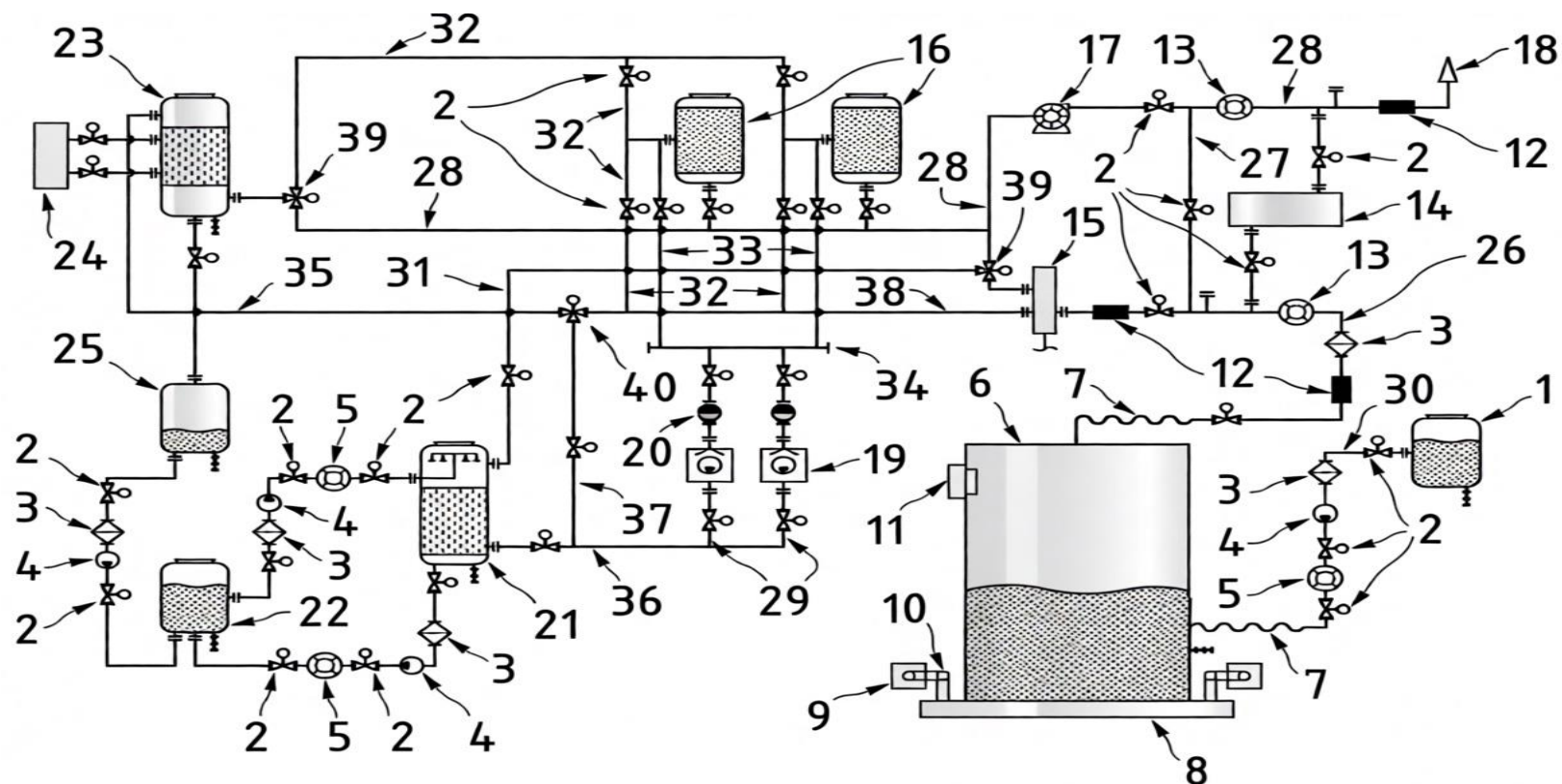


Рисунок 3.2 – Технологическая схема проекта экспериментального стенда [62],

где 1 – расходный бак, 2 – запорная арматура, 3 – фильтр, 4 – насос, 5 – расходомер жидкостный, 6 – емкость, 7 – шланг, 8 – платформа, 9 – шаговый двигатель, 10 – вращательная пара, 11 – инфракрасный газоанализатор, 12 – огнепреградитель, 13 – расходомер газа, 14 – потоковый хроматограф, 15 – каплеотбойник, 16 – адсорбер, 17 – компрессор, 18 – свеча рассеивания, 19 – вакуумный насос, 20 – обратный клапан, 21 – абсорбер, 22 – резервуар с абсорбентом, 23 – конденсатор, 24 – ресивер хладагента, 25 – конденсатосборник, 26 – коллектор отвода паров, 27 – обводная линия, 28 – линия отвода очищенной ГВС, 29 – вакуумная линия, 30 – линия подвода рабочей жидкости, 31 – выходной трубопровод абсорбера, 32 – вводной трубопровод адсорбера, 33 – линия отвода десорбата, 34 – всасывающий коллектор вакуумных насосов, 35 – вводной трубопровод конденсатора, 36 – вводной трубопровод абсорбера, 37 – переключатель, 38 – коллектор отвода ГВС от каплеотбойника, 39, 40 – кран трёхходовой

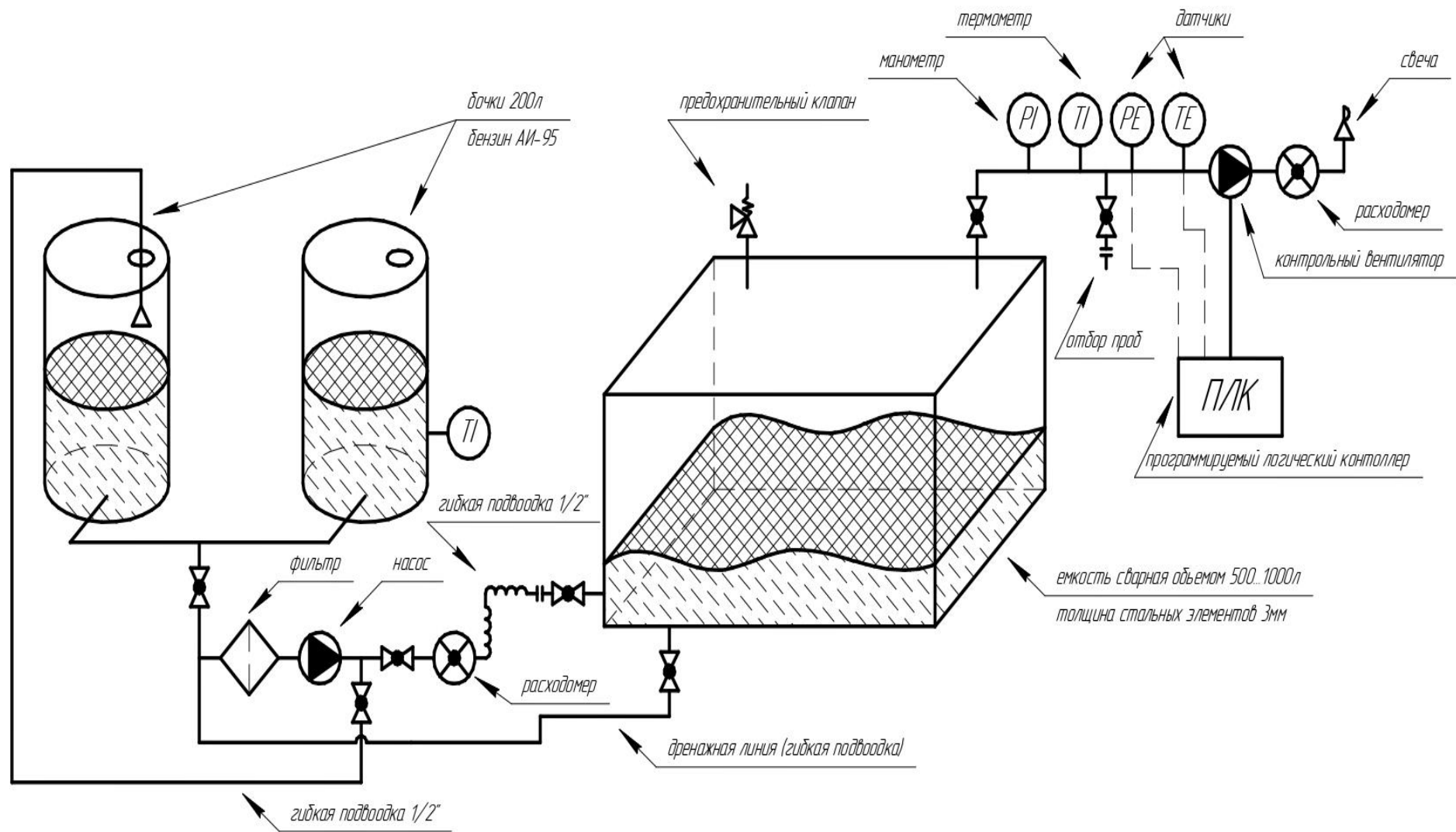


Рисунок 3.3 – Условная схема экспериментального стенда [62]

Технологическая схема экспериментального стенда предполагает выполнение следующих функций:

1. Слив/налив продукта перекачки в емкость для хранения;
2. Получение информации о давлении ГВС, температуре ГВС, расходе ГВС, расходе перекачиваемой жидкости;
3. Обеспечение раскачивания емкости для имитации движение транспорта или раскачивание на волнах.

В первую очередь на этапе сборке и монтажа экспериментального стенда следует определить основные параметры, включающие массогабаритные показатели, эксплуатационные характеристики стенда и его элементов, материальное исполнение элементов стенда. В таблице 3.2 приведены технические параметры экспериментального стенда.

Таблица 3.2 – Параметры экспериментального стенда (по данным автора)

Характеристика	Единицы измерения	Значение
Ширина	мм	3000
Длина	мм	2500
Высота	мм	1800
Масса (без продукта)	кг	350
Потребляемая мощность оборудования стенда	кВт	45
Материальное исполнения трубопроводов	-	сталь
Наружный диаметр трубопроводов	мм	57
Толщина стенки трубопровода	мм	3,5
Материальное исполнения опорных конструкций	-	Сталь Ст3
Технологическое оборудование		
Насос Piusi EX50 12B DC ATEX		
Мощность	Вт	250
Производительность	м ³ /ч	3
Давление	МПа	0,11
Перепад давления/напор	м	10
Расходомер TUF-2000 B		
Мощность	Вт	1,5
Диапазон скоростей	м/с	0-10
Точность/Относительная погрешность	%	±1
Емкостное оборудование	-	
Количество	-	2
Материальное исполнение	-	Полиэтилен низкого давления (ПНД)
Объем (2 бочки)	л	400
Трубопроводная обвязка		
Протяженность трубопроводной обвязки	м	9
Диаметр трубопроводной обвязки	мм	16

Продолжение таблицы 3.2

Характеристика	Единицы измерения	Значение
Материал трубопроводной обвязки	-	Поливинилхлорид (ПВХ)

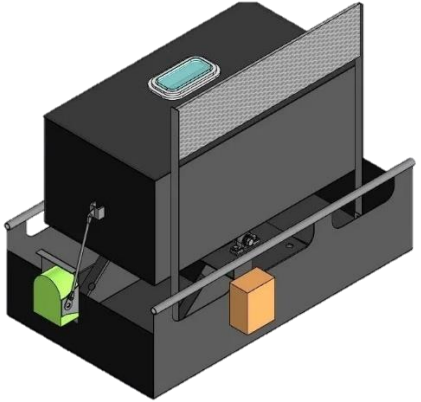
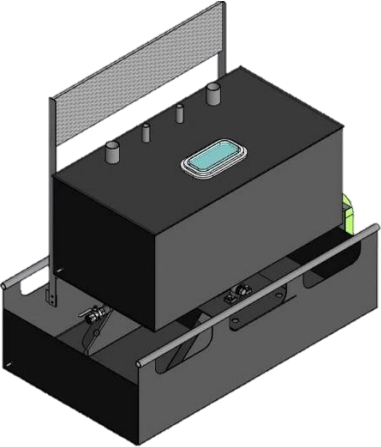
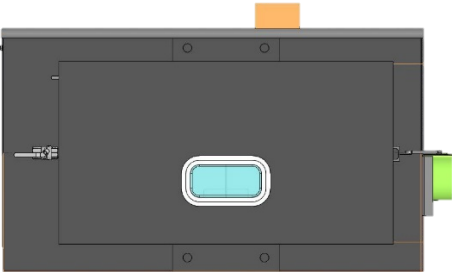
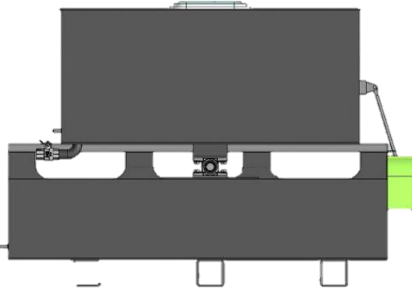
По результатам конструкторской проработки была собрана спецификация основных деталей, прочих изделий и материалов, формирующих комплектацию установки. Спецификация экспериментального стенда представлена в таблице 3.3.

Таблица 3.3 – Спецификация экспериментального стенда (по данным автора)

Номенклатура	Единицы измерения	Значение
Лист стальной г/к 3,0х1500х3000 ГОСТ 19903-74/2015 ст3пс/сп5	тонны	0,16
Лист стальной г/к 6,0х1500х3000 ГОСТ 19903-74 ст3пс/сп5	тонны	0,02
Труба профильная 100х100х5 ГОСТ 8639	м	0,7
Швеллер 10П ГОСТ 8240-97 ст3пс/сп5	м	0,4
Труба бесшовная 32х3,0 ГОСТ 8734-75 холоднодеформированная	м	3,5
Труба электросварная 57х3,5 ГОСТ 10704-91 ст1-3сп	м	0,2
Отвод сталь 90гр 33,7х3,2 (25) ГОСТ 17375-2001 ст.20	шт.	1
Резьба G1", L = 50 мм	шт.	1
Кран шаровый газовый лат. вн.-вн. бабочка 11Б27П Ду20 Ру16	шт.	1
Подшипниковый узел FKD UCP204 UCP204FKD	шт.	6
Лист ПВЛ 406 ТУ	тонны	0,01
Шарнирный наконечник ISKRA TSFL16х1.5	шт.	2
Штанга M16х2000 оцинкованная DIN 975	м	1,5
Болт M10-6gx30.019 ГОСТ 7798-70	шт.	2
Гайка M20-6H.019 ГОСТ 5915-70	тонны	4
Шайба A.20.019 ГОСТ 11371-78	шт.	4
Болт M20-6gx170.019 ГОСТ 7798-70	м	2
Гайка M12-6H.019 ГОСТ 5915-70	шт.	12
Шайба A.12.019 ГОСТ 11371-78	шт.	12
Болт M12-6gx45.019 ГОСТ 7798-70	шт.	12
Электрический щит 0,4 кВ	шт.	1
Мотор-редуктор	шт.	1
Смотровой люк	шт.	1

Однако, в силу технической сложности натурного воплощения и технологического ограничения регулируемых параметров было принято решение оптимизировать конструкцию стенда, сохранив при этом основные функции и обеспечить достаточный уровень экологической и производственной безопасности при эксплуатации установки для оценки потерь от испарений при сливноналивных операциях. Компьютерная модель и материальное воплощение спроектированного экспериментального стенда приведены в таблице 3.4.

Таблица 3.4 – Компьютерная модель и материальное воплощение экспериментального стенда (по данным автора)

			
Изометрическое изображение экспериментального стенда	Изометрическое изображение экспериментального стенда	Корпус экспериментального стенда в сборе	Корпус экспериментального стенда в сборе
			
Вид сверху экспериментального стенда	Вид сбоку экспериментального стенда	Вид сбоку экспериментального стенда в сборе	Вид сбоку экспериментального стенда в сборе

3.2 Обоснование выбора технологического оборудования, контрольно-измерительных приборов и средств автоматизации

При выборе измерительных приборов основное внимание уделялось средствам измерения расхода жидкой и газовой фазы, способным удовлетворять требованиям к точности измерений значений расхода. Был выбран расходомер TUF-2000. Для данного расходомера есть 2 схемы установки ультразвуковых датчиков – «Z-метод» и «V-метод». «Z-метод» применяется для установки датчика-приемника и датчика-излучателя ультразвукового расходомера на трубопроводах DN25 – DN200 на диаметрально противоположных верхней и нижней образующей трубопровода, а также на определенном расстоянии между датчиками, в то время как V-метод применяется для установки датчика-приемника и датчика-излучателя ультразвукового расходомера на трубопроводах DN200 – DN6000 на одной и той же образующей трубопровода, а также на определенном расстоянии между датчиками. Для проведения экспериментов был выбран «Z-метод» ввиду того, что в экспериментальной установке использованы трубопроводы DN50. Схемы установки датчиков для каждого из вышеописанных методов (главный вид и вид сбоку) приведены на рисунках 3.4, 3.5.

Для выбранного расходомера и метода установки датчиков предусмотрена линейка датчиков для определения расхода и скорости перекачиваемой жидкости. Датчики предназначены для определения скоростных характеристик для различных температурных условий, а также для различного сортамента трубной продукции, из которой смонтирован трубопровод. Перечень моделей датчиков для ультразвукового расходомера TUF-2000 с подходящими для каждой модели диапазоном диаметров труб и диапазоном температур перекачиваемой среды приведены в таблице 3.5.

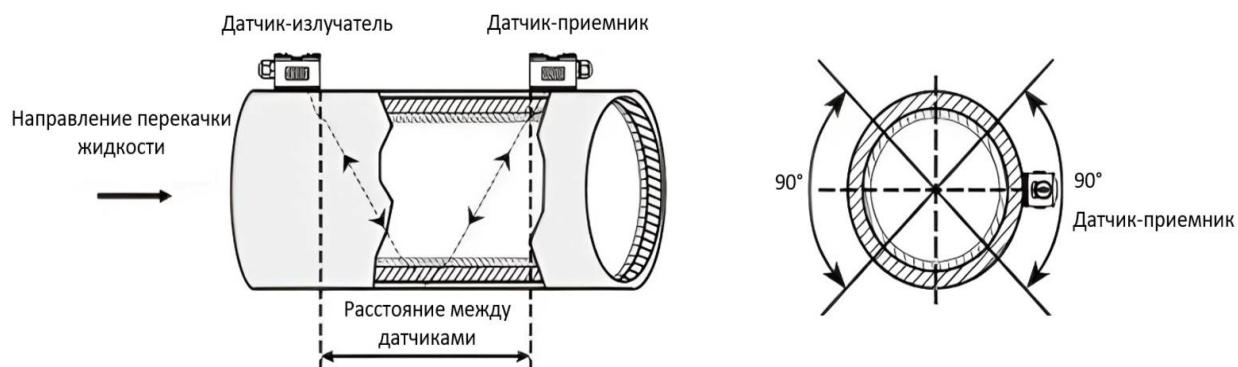


Рисунок 3.4 – Схема установки датчиков ультразвукового расходомера на трубопроводе «V-метод» (слева – главный вид, справа – вид сбоку)
(составлено автором)

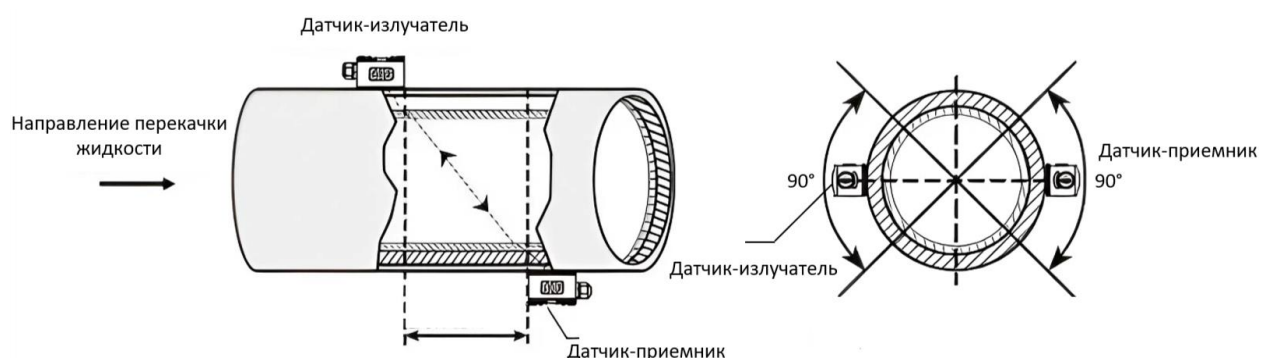


Рисунок 3.5 – Схема установки датчиков ультразвукового расходомера на трубопроводе «Z-метод» (слева – главный вид, справа – вид сбоку)
(составлено автором)

Таблица 3.5 – Перечень датчиков ультразвукового расходомера TUF-2000 (по данным автора)

Изображение датчика	Модель	Диаметр труб, на который устанавливается расходомер	Температура измеряемой среды
	TS-2	DN25-100	-30...+90°C
	TM-1	DN50-700	
	TL-1	DN300-6000	
	TS-2-HT	DN25-100	-30...+160°C
	TM-1-HT	DN50-700	
	TL-1-HT	DN300-6000	
	TC-1	DN50-6000	-30...+160°C
	TC-2		
	TP-1	DN80-6000	
	Без обозначения	DN15-1000	-30...+160°C

В качестве датчика давления насыщенных паров был выбран датчик низкого давления для неагрессивных газов ПД100И модели 8х1-Ехi в исполнении EXI. Вид сбоку, 3-D модель и внешний вид датчика ПД100И приведен на рисунке 3.6.

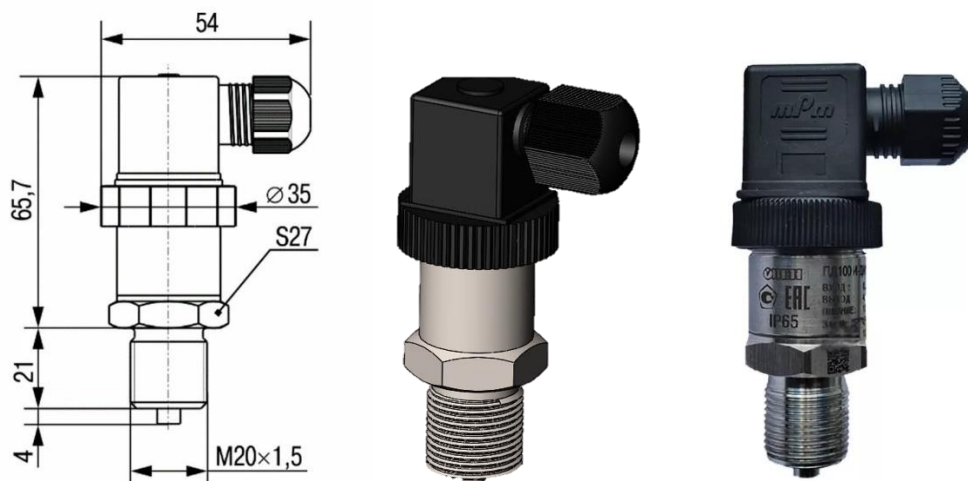


Рисунок 3.6 – Вид сбоку, 3-D модель и внешний вид датчика ПД100И (слева направо) (составлено автором)

Характеристики датчика давления ПД100И приведены в таблице 3.6.

Таблица 3.6 – Основные характеристики датчика давления ПД100И (по данным автора)

Характеристика	Единицы измерения	Значение
Габаритный размер (по высоте)	мм	95
Вес без упаковки	кг	0,2
Выходной сигнал постоянного тока	мА	4-20
Основная приведенная погрешность	%	±1
Диапазон рабочих температур измеряемой среды	°C	-20...+85
Потребляемая мощность	Вт	0,8
Устойчивость к механическим воздействиям	-	группа исполнения V3
Степень защиты корпуса	-	IP65
Вес без упаковки	кг	0,2
Устойчивость к климатическим воздействиям	-	УХЛ3.1

В качестве датчика температуры был выбран датчик термосопротивления ДТСхх5 с коммутационной головкой EXIA. Вид сбоку, 3-D модель и внешний вид датчика ДТСхх5 приведен на рисунке 3.7.

Характеристики датчика давления ДТСхх5 приведены в таблице 3.7.

Дополнительно для отслеживания уровня заполнения, визуального наблюдения волновых процессов, происходящих при эксплуатации

экспериментального стенда, стенд был оборудован смотровым люком, общий вид которого представлен на рисунке 3.8.



Рисунок 3.7 – Вид сбоку, 3-D модель и внешний вид датчика ДТСxx5 (слева направо) (составлено автором)

Таблица 3.7 – Основные характеристики датчика давления ДТСxx5 (по данным автора)

Характеристика	Единицы измерения	Значение
Диапазон измеряемых температур	°C	–50...+100
Температура окружающей среды	°C	–60...+85
Условное давление	МПа	0,1...6,3
Показатель тепловой инерции	с	не более 30
Количество чувствительных элементов	-	1
Материал коммутационной головки	-	пластмасса
Степень защиты	-	IP54
Маркировка взрывозащиты	-	0Ex ia IIC T3 Ga



Рисунок 3.8 – Смотровой люк для экспериментального стенда (составлено автором)

Для подбираемого насоса в первую очередь важна возможность безопасной перекачки бензина, поэтому насос должен быть во взрывозащищенном исполнении. Следует предусмотреть возможность изменения расхода не более чем 50 л/мин, то есть с прерывистым циклом работы. Насос должен быть негабаритный и легко устанавливаемый, должен быть с возможностью установки фильтра-очистителя на линии всасывания, так как после операции по сливу-наливу емкостей есть вероятность накопления механических примесей после зачистки емкостей, что может негативно повлиять на качество проводимых измерений. Исходя из вышеперечисленных требований, предъявляемых к насосному агрегату, был выбран объемный, лопастной электронасос Piusi EX50 12B DC ATEX, оборудованный байпасным клапаном. На рисунке 3.9 приведен слева направо вид сбоку и главный вид с габаритными размерами, а также изображение насоса Piusi EX50 12B DC ATEX.

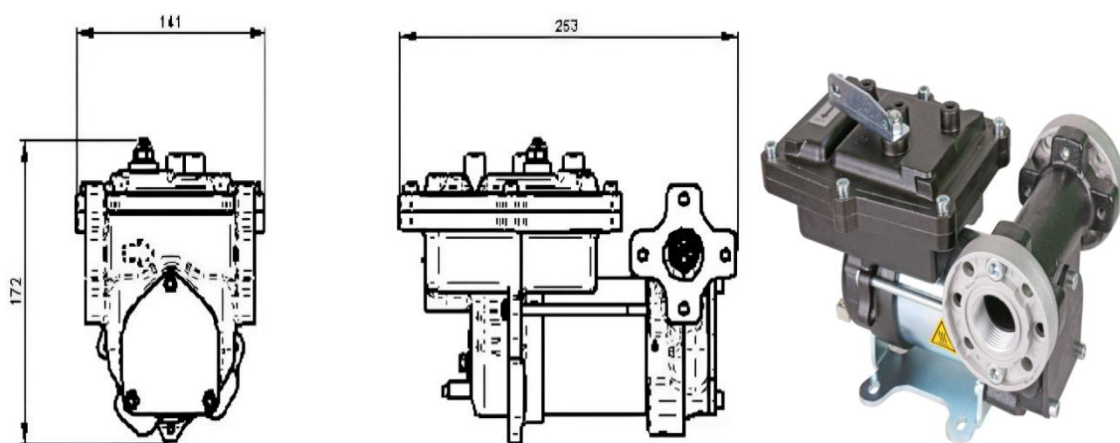


Рисунок 3.9 – Вид сбоку, главный вид и изображение Piusi EX50 12B DC ATEX
(составлено автором)

Данный насос удовлетворяет требованиям по безопасности эксплуатации и габаритам, обеспечивает возможность регулирования расхода, может быть оборудован фильтром, а также прост в монтаже и перемещении. На рисунке 3.10 приведена напорно-расходная характеристика насоса Piusi EX50 12B DC ATEX, предоставленная производителем оборудования.

В таблице 3.8 представлены основные характеристики счетчика, который использовался для определения объема вытесненной из заполняемой емкости газовой смеси.

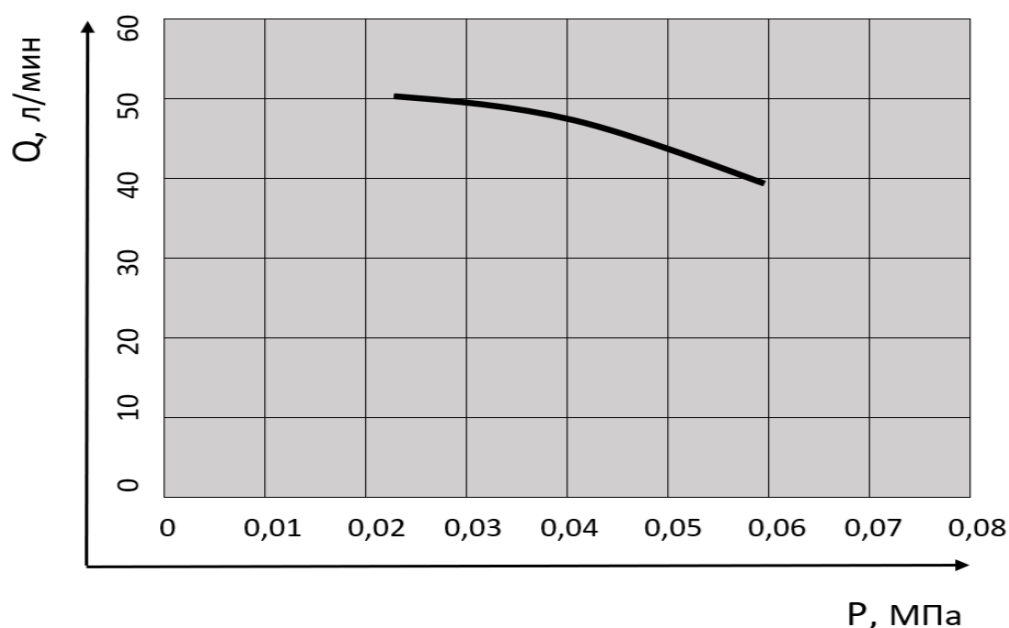


Рисунок 3.10 – Напорно-расходная характеристика насоса Piusi EX50 12B DC

АТЕХ (ось X – давление, ось Y – расход) (составлено автором)

Таблица 3.8 – Основные характеристики счетчика газа Гранд-10 ТК (по данным автора)

Характеристика	Единицы измерения	Значение
Диапазон измерения расхода газа до $Q_{\max}$	м ³ /ч	10
Диапазон измерения расхода газа от $Q_{\min}$	м ³ /ч	0,006
Пределы допускаемой относительной погрешности	%	2
Температура измеряемой среды	°C	минус 30 ... +50
Выходной сигнал	-	импульсный
Масса	кг	1,7
Габаритные размеры	мм	195x110x110
Внешний вид	-	

Для определения общего значения коэффициента превышения объема вытесненной газовой смеси над объемом закаченного продукта, автором предложено следующее критериальное уравнение (3.1):

$$K_{\text{п(общ)}} = a_0 \cdot (Re)^{a_1} \cdot (Sc)^{a_2} \cdot \left(1 - \frac{T_{\text{ГВС}}}{T_{\text{НК}}}\right)^{a_3} \cdot (1 + a_5 \cdot (Fr_{\text{волн}}^*)^{a_4}), \quad (3.1)$$

где $a_0 \dots a_5$ – эмпирические коэффициенты, которые необходимо определить по результатам обработки опытных данных; Re – число Рейнольдса для жидкой фазы;

Sc – число Шмидта для газовой смеси; $T_{ГВС}$ – температура газовой смеси (ГВС), К; $T_{нк}$ – температура начала кипения нефтепродукта, К; $Fr_{волн}^*$ – модифицированное число Фруда, учитывающее периодические колебания емкости.

В формуле (3.1) число Рейнольдса для жидкого продукта определяется по уравнению (3.2):

$$Re = \frac{w \cdot L_x}{\nu_{жидк}}, \quad (3.2)$$

где w – скорость подъема уровня, м/с, определяемая как разность уровней до и после заправки, деленная на время заправки; L_x – характерный линейный размер, м, определяемый как площадь сечения емкости, деленная на внутренний диаметр подающего трубопровода; $\nu_{жидк}$ – кинематическая вязкость жидкой фазы при температуре продукта, м²/с.

В формуле (3.1) число Шмидта для газовой смеси определяется по уравнению (3.3):

$$Sc = \frac{\nu_{ГВС}}{D_{ГВС}}, \quad (3.3)$$

где $\nu_{ГВС}$ – кинематическая вязкость ГВС, м²/с; $D_{ГВС}$ – коэффициент диффузии паров (ГВС), м²/с.

В формуле (3.1) модифицированное число Фруда определяется по уравнению (3.4)

$$Fr_{волн}^* = \frac{\left(\frac{2 \cdot \pi}{T_{кол}}\right)^2 \cdot l}{g}, \quad (3.4)$$

где l – ширина емкости соответственно, м; $T_{кол}$ – полный период 1 колебания емкости, с; g – ускорение свободного падения, м/с².

Выбор критериев подобия обоснован в рамках теории подобия и размерности. Однако структура уравнения модифицирована таким образом, чтобы при отсутствии бортовой качки (то есть для случая $T_{кол}$ стремящемуся к бесконечности) формула естественным путем приходила бы к своему статическому виду. Также можно отметить, что перечень входящих в формулу переменных хорошо согласуется с таковым в модели И.С. Бронштейна, описанной в первой

главе. Область действия формулы расширена на случай влияния бортовой качки, а также за счет числа Шмидта учтены процессы конвективного и молекулярного явлений переноса.

На рисунке 3.11 представлен общий вид экспериментальной установки непосредственно перед проведением экспериментов.



Рисунок 3.11 – Общий вид экспериментальной установки (фото автора)

Эксперименты проводились на бензине АИ-95. В бак экспериментальной установки заливалось приблизительно 105 литров бензина при различных объемных расходах закачки (10,5; 15,75 и 21 л/мин). Качка бака экспериментальной установки осуществлялась с тремя периодами колебаний, которые составляли 26;52;104 с. Температура ГВС в экспериментах составляла приблизительно 20, 25, 30 °С. Всего было проведено 16 экспериментов. После проведения первых 8 экспериментов бензин был заменен на новый из той же партии. Результаты проведения экспериментов представлены в таблице 3.9.

Таблица 3.9 – Результаты проведения экспериментов (по данным автора)

Время закачки, с	Расход закачки, л/мин	Вязкость жидкой фазы закачиваемого продукта, м ² /с (*10 ⁶)	Вязкость ГВС, м ² /с (*10 ⁶)	Коэффициент диффузии ГВС, м ² /ч	Температура ГВС, К	Период колебаний, с	Re	Sc	ГГВС/Тнк	Fr*	Кп (эксп)
300	21	0,551	5,35	0,0353	302,85	–	29965	0,5456	0,9897	0	1,246667
400	15,75	0,549	5,36	0,0354	303,15	–	22555	0,5450	0,9906	0	1,159365
600	10,5	0,553	5,34	0,0351	302,45	–	14928	0,5476	0,9883	0	1,110476
300	21	0,561	5,28	0,0343	300,95	52	29430	0,5541	0,9834	0,001637	1,386667
300	21	0,572	5,22	0,0334	299,05	104	28864	0,5626	0,9772	0,000409	1,250476
300	21	0,58	5,177	0,0328	297,85	26	28466	0,5682	0,9733	0,006548	1,965714
300	21	0,5825	5,163	0,0326	297,45	104	28344	0,5701	0,9720	0,000409	1,262857
600	10,5	0,609	5,0077	0,0304	293,15	–	13555	0,5930	0,9580	0	1,110476
600	10,5	0,628	4,899	0,0289	290	–	13145	0,6102	0,9477	0	1,089524
600	10,5	0,609	5,0077	0,0304	293,15	–	13555	0,5930	0,9580	0	1,079048
400	15,75	0,609	5,077	0,0304	293,15	–	20333	0,6012	0,9580	0	1,127937
300	21	0,609	5,077	0,0304	293,15	–	27111	0,6012	0,9580	0	1,18381
300	21	0,578	5,1885	0,0329	298,15	–	28565	0,5677	0,9743	0	1,204762
400	15,75	0,578	5,1885	0,0329	298,15	26	21423	0,5677	0,9743	0,006548	1,55746
400	15,75	0,578	5,1885	0,0329	298,15	52	21423	0,5677	0,9743	0,001637	1,410794
400	15,75	0,609	5,077	0,0304	293,15	104	20333	0,6012	0,9580	0,000409	1,190794

В таблице 3.10 приведены рассчитанные на основе обработки данных эксперимента методами нелинейной регрессии коэффициенты критериального уравнения (3.1). Для определения коэффициентов использовался метод Левенберга — Марквардта.

Таблица 3.10 – Коэффициенты регрессии (по данным автора)

Коэффициент регрессии	Значение
a_0	0,181
a_1	0,173
a_2	-0,443
a_3	0,032
a_4	0,845
a_5	33,379

В результате получено уравнение для коэффициента превышения (3.5):

$$K_{п(общ)} = 0,181 \cdot (Re)^{0,173} \cdot (Sc)^{-0,443} \cdot \left(1 - \frac{T_{гвс}}{T_{нк}}\right)^{0,032} \cdot (1 + 33,379 \cdot (Fr_{волн}^*)^{0,845}). \quad (3.5)$$

В таблице 3.11 приведено сопоставление полученных результатов с экспериментальными данными.

Таблица 3.11 – Сопоставление результатов по определению коэффициента превышения (по данным автора)

Коэффициент превышения (в рамках эксперимента)	Коэффициент превышения (по уравнению 3.5)	Относительная погрешность, %
1,246667	1,224770	1,76
1,159365	1,162610	0,28
1,110476	1,087516	2,07
1,386667	1,412191	1,84
1,250476	1,287198	2,94
1,965714	1,813212	7,76
1,262857	1,284070	1,68
1,110476	1,075635	3,14
1,089524	1,063809	2,36
1,079048	1,075635	0,32
1,127937	1,147073	1,70
1,183810	1,205825	1,86
1,204762	1,228680	1,99
1,557460	1,724468	10,72
1,410794	1,340911	4,95
1,190794	1,199383	0,72

Как видно из таблицы 3.11 полученное критериальное уравнение позволяет в широком диапазоне параметров прогнозировать значение коэффициента превышения с относительной погрешностью не более 10,72%.

На рисунке 3.12 представлено сопоставление предсказанных по критериальному уравнению и полученных в рамках эксперимента значений коэффициента превышения.

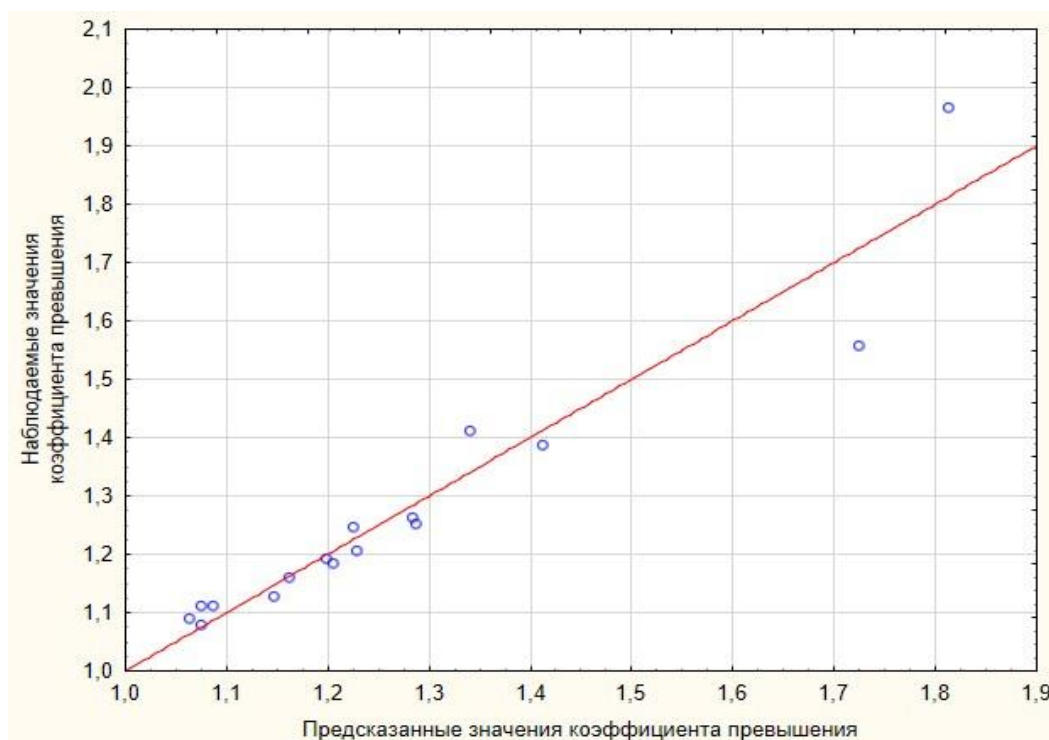


Рисунок 3.12 – Сопоставление предсказанных по критериальному уравнению и полученных в рамках эксперимента значений коэффициента превышения
(составлено автором)

Как видно из рисунка 3.12 регрессионная модель обеспечивает удовлетворительную сходимость с экспериментальными данными.

3.3 Выводы по третьей главе

В результате выполнения работ, проделанных в рамках третьей главы диссертации, по экспериментальным исследованиям процесса вытеснения газовой смеси из наполняемой емкости при различных условиях, можно сделать следующие выводы:

1. Разработана и реализована конструкция экспериментального стенда, при работе на котором возможно изучение широкого перечня вопросов, связанных с процессами вытеснения газовой смеси из наполняемых транспортных емкостей и резервуаров. В том числе реализована возможность имитации качки

наполняемой емкости, что особенно важно для изучения процессов, происходящих при наполнении танкеров.

2. Проведены экспериментальные исследования по определению коэффициента превышения объема вытесняемой ГВС над объемом закачки при различных условиях внешней среды, при различных режимах, а также при отсутствии и наличии качки.

3. Полученные результаты были обработаны с использованием методов математической статистики и на их основе получено критериальное уравнение, которое планируется использовать для прогнозирования возможных значений коэффициента превышения при различных условиях эксплуатации и для различных объектов налива.

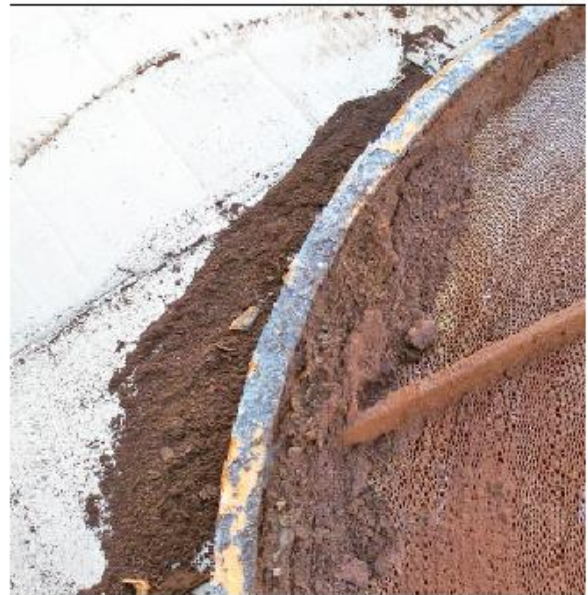
ГЛАВА 4 РЕЗУЛЬТАТЫ РАЗРАБОТКИ РЕКОМЕНДАЦИЙ ПО РАЦИОНАЛЬНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ ТРУБОПРОВОДОВ ОТВОДА ГАЗОВОЙ ФАЗЫ НА ОБЪЕКТАХ НАЛИВА

4.1 Обоснование рациональной периодичности очистки трубопроводов отвода газовой фазы на объектах налива

Работа трубопроводов отвода газовой фазы на объектах налива в рамках технологического процесса неизбежно сопряжена с возникновением разного рода осложнений [66]. К числу таких осложнений можно отнести засорение огнепреградителей и засорение самих трубопроводов в результате накопления механических частиц [99]. Еще одним видом осложнений является образование жидкого конденсата на нижней образующей трубопроводов при определенных термобарических условиях работы системы отвода паров [69]. На рисунке 4.1 приведено два примера засорения из реальной производственной практики по данным ООО «Газспецтехника» [76].



Трубопровод отвода газовой фазы



Огнепреградитель

Рисунок 4.1 – Засорение трубопровода и огнепреградителя по данным ООО «Газспецтехника» [76]

Само появление механических примесей в вытесняемой газовой смеси связано с их наличием в газовой атмосфере танкера и может быть обусловлено неудовлетворительной работой скруббера или ветхостью

газоотводных систем судна. Чаще всего это характерно для нефтяных танкеров большого размера, поскольку они, как правило, инертизируются выхлопными газами. Для танкеров инертизация которых ведется азотной станцией, содержание механических примесей не столь существенно. К тому же пары нефтепродуктов, если говорить о содержании мех. примесей, обычно более чистые, чем пары нефти.

Рассмотрим более подробно к чему может привести засорение трубопроводов отвода газовой фазы и технологического оборудования. Можно выделить три основных зоны воздействия: 1) засорение трубопровода отвода газовой смеси приводит к повышению гидравлического сопротивления 2) засорение технологического оборудования, в особенности огнепреградителей, приводит и к росту перепада давления и к потенциальному риску в области промышленной безопасности 3) попадание механических примесей на активированный уголь в адсорберах весьма быстро сокращает его сорбционную емкость. Такой уголь не прослужит долго, а эффективность рекуперации паров будет весьма низкой [64].

Наиболее быстро в силу своих конструктивных особенностей засоряется огнепреградитель на причале. Замена огнепреградителя на диаметрах свыше DN200 требует специального грузоподъемного оборудования и является трудоемкой операцией. Перепад давления на огнепреградителе является предметом мониторинга. Таким образом, его выход за допустимые пределы может быть определен по фактическим данным. Сложнее обстоит вопрос с протяженными трубопроводами отвода газовой фазы на морских терминалах, которые зачастую недостаточно оборудованы КИПиА. В этой связи целесообразно будет поставить задачу определения прогнозной рациональной периодичности очистки трубопровод отвода газовой фазы. Ниже приведено ее решение в общем виде [67].

Из работы известно классическое уравнение (4.1):

$$\frac{dy}{d\tau} \cdot (1 - \tau) = y + \psi \cdot (1 - (1 - \xi) \cdot \tau^2) - \frac{\sqrt{y^2 - 1}}{\theta}, \quad (4.1)$$

описывающее связь относительного давления y и параметров, характеризующих газопровод отвода газовой фазы и характеристики газовой смеси.

Очевидно, что если бы в параметрах эксплуатации ничего бы не менялось, то кривая, как это описано в работах Пшенина В.В., приблизительно сохраняла такой вид, в каком она представлена ниже на рисунке 4.2 [41].

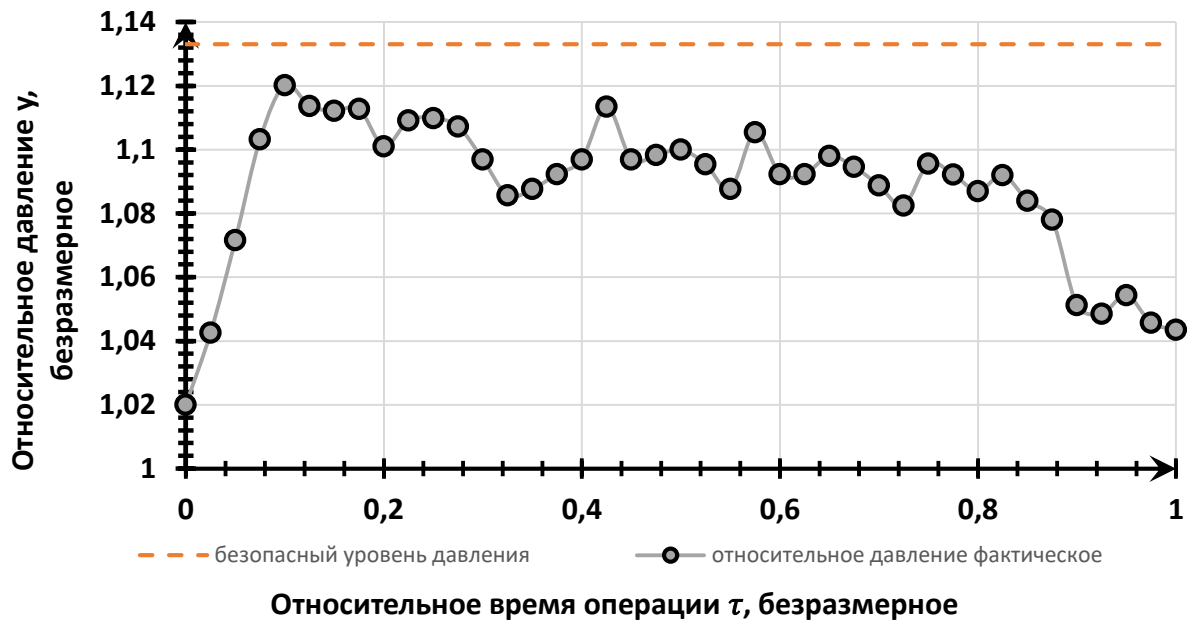


Рисунок 4.2 – Относительное давление в газовом пространстве танкера (данные извлечены из системы автоматики) [41]

Однако, известно, что для трубопроводов отвода газовой фазы в силу описанных выше причин наблюдается их засорение. Таким образом, величина относительного давления y будет со временем расти, и в какой-то момент ее пиковое значение превысит безопасный уровень давления и произойдет стравливание газозвушной смеси в атмосферу.

Засорение трубопровода отвода газовой фазы в первом приближении можно описать зависимостью вида (4.2):

$$\Delta = \Delta_{\text{нов}} + \alpha \cdot t, \quad (4.2)$$

где Δ – текущее значение абсолютной шероховатости внутренней поверхности трубопровода, мм; $\Delta_{\text{нов}}$ – значение абсолютной шероховатости внутренней поверхности трубопровода новой трубы, мм; α – коэффициент скорости роста шероховатости, мм/год; t – время, прошедшее с начала эксплуатации, год.

Линейная зависимость является хорошим приближением для газозвушных смесей с низкими концентрациями механических примесей. По данным Альтшуля А.Д. для воздухопроводов и газопроводов при небольшой засоренности

коэффициент скорости роста шероховатости составит приблизительно $\alpha \approx 0,05 \frac{\text{мм}}{\text{год}}$.

Условием недопущения открытия мастрайзера будет (4.3):

$$y_{\max} \leq y_{\text{крит}}. \quad (4.3)$$

Для точки $y = y_{\max}$ верно $\frac{dy}{d\tau} = 0$ тогда (4.4):

$$y_{\max} + \psi \cdot (1 - (1 - \xi) \cdot \tau^2) = \frac{\sqrt{y_{\max}^2 - 1}}{\theta}. \quad (4.4)$$

Поскольку $\tau_{\max}$ близко к 0, то членом в скобках, содержащим безразмерное время, пренебрегаем (4.5):

$$y_{\text{крит}} + \psi = \frac{\sqrt{y_{\text{крит}}^2 - 1}}{\theta}. \quad (4.5)$$

Отсюда, после преобразований, получаем (4.6):

$$\theta_{\text{крит}} = \frac{\sqrt{y_{\text{крит}}^2 - 1}}{y_{\text{крит}} + \psi}. \quad (4.6)$$

Таким образом, осталось ответить на главный вопрос: когда величина θ достигнет критического значения $\theta_{\text{крит}}$?

По определению ее значение равно (4.7):

$$\theta = \frac{Q_3 \sqrt{\lambda \frac{L}{D}}}{S \sqrt{RT}}, \quad (4.7)$$

При сохранении условий эксплуатации меняется только λ . Тогда θ можно представить в виде (4.8):

$$\theta = z \sqrt{\lambda}, \quad (4.8)$$

где z – постоянный коэффициент, определяется по формуле (4.9):

$$z = \frac{Q_3 \sqrt{\frac{L}{D}}}{S \sqrt{RT}}. \quad (4.9)$$

Для крупных терминалов, как правило, λ определяется по закону (4.10):

$$\lambda = 0,11 \left(\frac{\Delta}{D} \right)^{0,25}. \quad (4.10)$$

Тогда имеем (4.11):

$$z \sqrt{\lambda} = \frac{\sqrt{y_{\text{крит}}^2 - 1}}{y_{\text{крит}} + \psi}. \quad (4.11)$$

Выражая относительно коэффициента гидравлического сопротивления, получаем следующее выражение (4.12):

$$\lambda = \frac{y_{\text{крит}}^2 - 1}{(y_{\text{крит}} + \psi)^2} \cdot \frac{1}{z^2}. \quad (4.12)$$

Подставим вместо коэффициента гидравлического сопротивления, его значение по формуле (4.13):

$$0,11 \left(\frac{\Delta}{D} \right)^{0,25} = \frac{y_{\text{крит}}^2 - 1}{(y_{\text{крит}} + \psi)^2 z^2}. \quad (4.13)$$

Возведем обе части уравнения в 4-ую степень (4.14):

$$\frac{\Delta_{\text{нов}}}{D} + \frac{\alpha t}{D} = \left(\frac{y_{\text{крит}}^2 - 1}{0,11 \cdot (y_{\text{крит}} + \psi)^2 z^2} \right)^4. \quad (4.14)$$

Выразим отдельно член, содержащий время, в течении которого происходит засорение трубопровода отвода газовой фазы (4.15):

$$\frac{\alpha t}{D} = \left(\frac{y_{\text{крит}}^2 - 1}{0,11 \cdot (y_{\text{крит}} + \psi)^2 z^2} \right)^4 - \frac{\Delta_{\text{нов}}}{D}. \quad (4.15)$$

В результате получаем формулу для определения времени, по истечению которого гидравлическое сопротивление вырастет до опасного уровня (4.16):

$$t = \frac{D}{\alpha} \cdot \left(\left(\frac{y_{\text{крит}}^2 - 1}{0,11 \cdot (y_{\text{крит}} + \psi)^2 z^2} \right)^4 - \frac{\Delta_{\text{нов}}}{D} \right). \quad (4.16)$$

Окончательно получаем формулу для примерной оценки времени засорения трубопровода отвода газовой фазы (4.17):

$$t = \frac{D}{\alpha} \cdot \left(\left(\frac{y_{\text{крит}}^2 - 1}{(0,11 \cdot (y_{\text{крит}} + \psi)^2)^2} \right)^4 - \frac{\Delta_{\text{нов}}}{D} \right) \quad (4.17)$$

Проведем анализ полученных результатов на примере трубопровода отвода газовой фазы DN800, со средним расходом закачки 10000 м³/ч, протяженностью порядка 1500 м, газовой постоянной 186 Дж/(кг·К) и при температуре 293 К.

Из графика на рисунке 4.3 видно, что чем больше содержание механических примесей и, соответственно, коэффициент скорости роста шероховатости, тем чаще потребуется проводить очистку трубопровода. Для описанных выше условий операций погрузки и коэффициенте $\alpha \approx 0,05 \frac{\text{мм}}{\text{год}}$ время достижения критического уровня засорения составит 2,3 года.

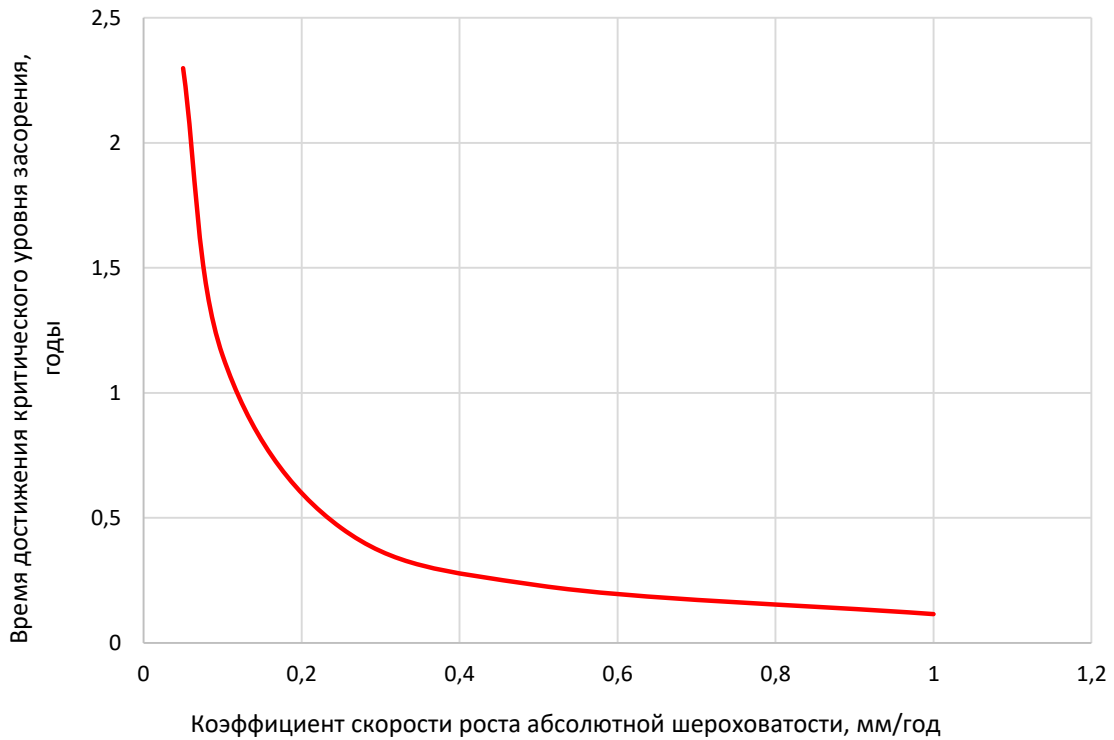


Рисунок 4.3 – График зависимости времени достижения критического уровня засорения от коэффициента скорости роста абсолютной шероховатости (составлено автором)

Отдельный интерес составляет вопрос о том, как зависит время достижения критического уровня засорения от диаметра трубопровода. Чтобы ответить на этот вопрос перепишем зависимость в виде (4.18-4.19):

$$t = \frac{D}{\alpha} \cdot \left(\left(\frac{y_{\text{крит}}^2 - 1}{0,11 \cdot (y_{\text{крит}} + \psi)^2 \cdot z^2} \right)^4 - \frac{\Delta_{\text{нов}}}{D} \right), \quad (4.18)$$

$$z = \frac{Q_3 \sqrt{\frac{L}{D}}}{S \sqrt{RT}} = \frac{Q_3 \sqrt{L}}{\sqrt{RT}} \cdot \frac{1}{\frac{\pi D^2 \sqrt{D}}{4}} = \frac{4 Q_3 \sqrt{L}}{\pi \sqrt{RT}} \cdot \frac{1}{D^{2,5}} = \frac{C}{D^{2,5}}, \quad (4.19)$$

где C – коэффициент, постоянный для данных условий эксплуатации.

Тогда полученное выражение можно представить в виде (4.20):

$$t = \frac{D}{\alpha} \cdot \left(\left(\frac{(y_{\text{крит}}^2 - 1) \cdot D^5}{0,11 \cdot (y_{\text{крит}} + \psi)^2 \cdot C^2} \right)^4 - \frac{\Delta_{\text{нов}}}{D} \right). \quad (4.20)$$

Или после преобразований получим следующее (4.21):

$$t = \frac{D}{\alpha} \cdot \left(\left(\frac{(y_{\text{крит}}^2 - 1)}{0,11 \cdot (y_{\text{крит}} + \psi)^2 \cdot C^2} \right)^4 \cdot D^{20} - \frac{\Delta_{\text{нов}}}{D} \right). \quad (4.21)$$

Особенность этой формулы состоит в том, что время достижения критического уровня засорения зависит от диаметра в 20-ой степени (!) при прочих равных параметрах. Это подчеркивает крайне важную роль корректного выбора диаметра газоотводной системы на этапе проектирования морского терминала. Для полученной формулы (4.21) построим график зависимости времени достижения критического уровня засорения от диаметра трубопровода для условий, приведенных в примере выше (средний расход закачки $10000 \text{ м}^3/\text{ч}$, протяженность порядка 1500 м, газовая постоянная $186 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$ и при температуре 293 К).

На рисунке 4.4 область отрицательных значений показывает, что при данных диаметрах трубопровод отвода газовой фазы изначально не справляется с расходом, то есть сразу находится в критической области. В дальнейшем с увеличением диаметра происходит очень быстрый рост функции (на графике эта часть не показана из-за разницы масштабов). Таким образом, ошибка в выборе диаметра на этапе проектирования может привести к крайне негативным последствиям при эксплуатации. Поэтому желательно выбирать диаметр трубопроводов для отвода паров с некоторым запасом. Величина этого запаса является дискуссионным вопросом.

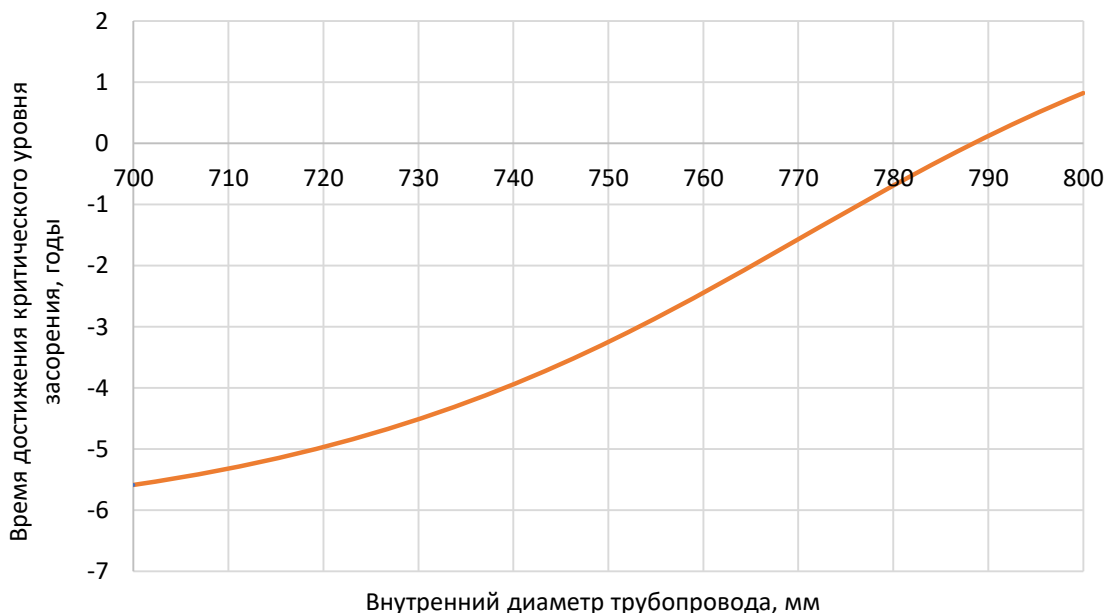


Рисунок 4.4 – График зависимости времени достижения критического уровня засорения от диаметра трубопровода (составлено автором)

В результате проделанной работы можно сделать следующие обобщенные выводы, имеющие значение для рациональной эксплуатации трубопроводов отвода газовой фазы:

1. Корректный выбор диаметра на этапе проектирования обеспечивает стабильную эксплуатацию системы отвода паров. При этом некоторый запас по диаметру позволяет значительно отодвинуть опасную зону достижения критического уровня засорения.

2. Увеличение концентрации механических примесей в газовоздушной смеси приводит к резкому ускорению достижения критического уровня, поэтому для условий эксплуатации, для которых заранее можно предположить наличие проблемы (обслуживание старых танкеров или танкеров, перевозящих сырую нефть) следует проявлять особую осторожность.

3. Для более легкоиспаряющихся продуктов характерно меньшее содержание механических примесей в газовоздушной среде. Однако, это в каком-то смысле уравнивается тем обстоятельством, что для таких продуктов проблемы засорения куда более опасны поскольку быстрее достигается критическая область.

4.2 Результаты разработки концептуальных решений по системе раннего предупреждения срабатывания газовоздушной смеси

Во время погрузки нефти и нефтепродуктов наблюдается значительное испарение, приводящее к росту давления в газовой фазе танкера. При достижении давлением критического уровня может произойти срабатывание предохранительного клапана (мастрайзера), что вызовет выброс углеводородных паров в атмосферу.

Сброс газов во время погрузки сопровождается рядом неблагоприятных последствий:

1. Риск аварийной остановки операций по наливу в результате сигнала автоматики терминала о превышении допустимой концентрации паров.

2. Нанесение ущерба экологии (даже при отсутствии системы улавливания паров, их контролируемый отвод является более предпочтительным решением).

3. Безвозвратные потери ценных фракций.

В связи с этим, при определении параметров загрузки требуется учитывать закономерности изменения давления внутри резервуара в зависимости от текущей интенсивности потока [63]. В настоящее время отсутствует методика для такого прогнозного расчета, а мониторинг давления осуществляется исключительно по данным датчиков в реальном времени. В ситуации, когда давление продолжает увеличиваться, а спрогнозировать его пиковое значение невозможно, выброс через мастрайзер становится практически неизбежным.

В дифференциальной форме уравнение состояния для газовой смеси имеет следующий вид (4.22):

$$\frac{dP}{dt} \cdot V + \frac{dV}{dt} \cdot P = \frac{dG}{dt} \cdot R \cdot T, \quad (4.22)$$

где P – абсолютное давление в газовой фазе, Па; V – объем газовой фазы, м³; T – термодинамическая температура, К; R – расчётная газовая постоянная для газовой смеси (функция от средней молярной массы), Дж/(кг·К).

Сжимаемость газовой среды в данной постановке задачи не учитывается, так как давление изменяется в пределах, близких к атмосферному (прирост не превышает 10%). Температура в ходе операций налива считается постоянной. Данное предположение является корректным, поскольку танкеры обладают двойными стенками, что нивелирует влияние суточных перепадов температуры на тепловой режим паровоздушной смеси внутри резервуара. Детальному анализу подлежит начальный интервал процесса, где наблюдается линейный рост объемного расхода (рисунок 4.5). Именно на этой стадии сочетаются наиболее интенсивное испарение и увеличение скорости закачки.



Рисунок 4.5 – Динамика изменения объемного расхода продукта в процессе загрузки танкера во времени (составлено автором)

Для упрощения записи все параметры, относящиеся к данному линейному участку, будут обозначаться нижним индексом «1». Вследствие линейного характера изменения расход в любой момент времени t в пределах этого участка может быть определен по уравнению (4.23):

$$Q_3 = \frac{Q_1}{t_1} \cdot t, \quad (4.23)$$

где Q_1 – расход в конце рассматриваемого линейного этапа, $\text{м}^3/\text{с}$; t_1 – время в конце рассматриваемого линейного участка, с ; t – текущее время, отсчитываемое от момента начала налива, с .

С течением процесса налива объём газовой фазы в танкере закономерно сокращается (4.24):

$$V = V_{\text{нач}} - \frac{1}{2} \cdot \frac{Q_1}{t_1} \cdot t^2, \quad (4.24)$$

где $V_{\text{нач}}$ – начальный объём газовой фазы, м^3 ;

С учетом данного допущения уравнение можно представить как (4.25):

$$\frac{dP}{dt} \cdot \left(\frac{V_{\text{нач}} - \frac{1}{2} \cdot \frac{Q_1}{t_1} \cdot t^2}{R \cdot T} \right) - \frac{t \cdot \frac{Q_1}{t_1}}{R \cdot T} \cdot P = \frac{dG}{dt}, \quad (4.25)$$

Для анализа динамики процесса в обобщённых координатах используется безразмерная переменная, характеризующая относительное давление (4.26):

$$y = \frac{P}{P_K}, \quad (4.26)$$

Умножим левую и правую части уравнения (4.25) на величину $\frac{R \cdot T}{Q_1 \cdot P_K}$. После преобразования получаем следующее выражение (4.27):

$$\frac{dy}{d\tau} \cdot \left(\frac{V_{\text{нач}} - \frac{1}{2} \cdot \frac{Q_1}{t_1} \cdot t^2}{Q_1 \cdot t_H} \right) - \tau \cdot \frac{t_H}{t_1} \cdot y = \psi_1 - \frac{\sqrt{y^2 - 1}}{\theta_1}, \quad (4.27)$$

где τ – безразмерное время погрузки; y – безразмерное давление; θ_1 – критерий, отражающий влияние гидравлического сопротивления на скорость изменения давления; ψ_1 – критерий, определяющий вклад процесса испарения в рост давления (на начальном линейном участке налива изменение кинетики массоотдачи во времени не учитывается).

Критерий, отражающий влияние гидравлического сопротивления на скорость изменения давления, определяется по следующей формуле (4.28):

$$\theta_1 = \frac{Q_1 \sqrt{\lambda \cdot \frac{L_{\text{эф}}}{D}}}{S \sqrt{R \cdot T}}. \quad (4.28)$$

Критерий, определяющий вклад процесса испарения в рост давления, определяется по следующей формуле (4.29):

$$\psi_1 = \frac{J_{\text{н}} \cdot F \cdot R \cdot T}{Q_1 \cdot P_{\text{к}}}. \quad (4.29)$$

Существенным недостатком уравнения (4.27) является зависимость безразмерных комплексов θ_1 и ψ_1 от расхода Q_1 на линейном участке, а не от средней интенсивности налива $Q_{\text{ср.н}}$. Данное ограничение может быть устранено путём введения корректирующих коэффициентов.

Уравнение (4.27) можно преобразовать к следующему виду (4.30):

$$\frac{dy}{d\tau} \cdot \left(\alpha - \frac{1}{2} \cdot \tau^2 \cdot \beta \right) - \tau \cdot \beta \cdot y = \Psi_1 - \frac{\sqrt{y^2 - 1}}{\theta_1}, \quad (4.30)$$

где $\alpha = \frac{Q_{\text{ср.н}}}{Q_1}$ – безразмерный коэффициент, равный отношению средней производительности налива за всю операцию $Q_{\text{ср.н}}$ к её значению в конце начального линейного участка Q_1 (средняя производительность рассчитывается как общий объём закачки, делённый на общее время технологической операции); $\beta = \frac{t_{\text{н}}}{t_1}$ – безразмерный коэффициент, представляющий собой отношение общей длительности погрузки $t_{\text{н}}$ ко времени, соответствующему концу первого линейного этапа t_1 .

Итоговое уравнение, описывающее динамику давления при линейном росте расхода налива, имеет вид (4.31):

$$\frac{dy}{d\tau} \cdot \left(1 - \frac{1}{2} \cdot \tau^2 \cdot \gamma \right) = \tau \cdot \gamma \cdot y + \Psi - \frac{\sqrt{y^2 - 1}}{\theta} \quad (4.31)$$

где $\gamma = \beta/\alpha$ – производный коэффициент.

При этом критерии Ψ и θ в этой форме соотношения определяются на основе средней интенсивности закачки $Q_{\text{ср.н}}$. Основной проблемой приведенных выше зависимостей является неопределенность коэффициента Ψ , связанного с массоотдачей. Процесс испарения подвержен влиянию многих сложно

определяемых на практике факторов: качка, конвективные тепловые процессы, нестационарность процесса и тому подобные. Быстрое испарение наливного груза приводит к росту давления внутри танкера и потенциально может вызвать открытие мастрайзера и стравливание излишков в атмосферу.

Покажем способ как этот параметр можно идентифицировать в самом начале операции погрузки по имеющимся данным с автоматизированного рабочего места (АРМ). Для этого разложим уравнение (4.31) в ряд Тейлора возле значения $y(0)=\mu$ (начальное относительное давление в танкере, известно из системы управления погрузкой). Рассмотрим два случая [107].

Случай 1: разложение в линейную зависимость (4.32):

$$y(\tau) = \mu - \frac{\sqrt{\mu^2-1}-\Psi\cdot\theta}{\theta} \cdot \tau. \quad (4.32)$$

Случай 2: разложение с учетом нелинейного квадратичного члена (4.33):

$$y(\tau) = \mu - \frac{\sqrt{\mu^2-1}-\Psi\cdot\theta}{\theta} \cdot \tau + \frac{1}{2} \cdot \frac{\mu \cdot (\sqrt{\mu^2-1} \cdot \beta \cdot \theta^2 - \Psi \cdot \theta + \sqrt{\mu^2-1})}{\sqrt{\mu^2-1} \cdot \theta^2} \cdot \tau^2 \quad (4.33)$$

Рассмотрение более высоких степеней не имеет смысла, поскольку желательно получить простое выражение для идентификации искомого параметра. Несмотря на то, что разложение с учетом нелинейного квадратичного члена имеет несколько более высокую точность, наиболее простым для практики решением является решение с использованием линейного приближения [107]. Поскольку такие параметры, как μ и θ , а также значения $y(\tau)$ на начальном этапе погрузки полагаются известными, то определение параметра Ψ осуществляется по следующей методике (рисунок 4.6).

Для линейной зависимости $y(\tau) = \mu - \frac{\sqrt{\mu^2-1}-\Psi\cdot\theta}{\theta} \cdot \tau$ методом наименьших квадратов по имеющимся данным определяется коэффициент наклона прямой $k = -\frac{\sqrt{\mu^2-1}-\Psi\cdot\theta}{\theta}$. Зная коэффициент k не представляется затруднительным определить искомое значение Ψ (4.34):

$$\Psi = \frac{k \cdot \theta + \sqrt{\mu^2-1}}{\theta}. \quad (4.34)$$

Приведем расчетный пример, полученный с использованием экспериментальных данных по погрузке танкера. Пример представлен на рисунке 4.7 [107]. Из рисунка 4.7 видно, что $k=0,1128$. При $\mu = 1,03$ и $\theta = 0,3$ (4.35):

$$\psi = \frac{0,1128 \cdot 0,3 + \sqrt{1,03^2 - 1}}{0,3} = 0,935. \quad (4.35)$$

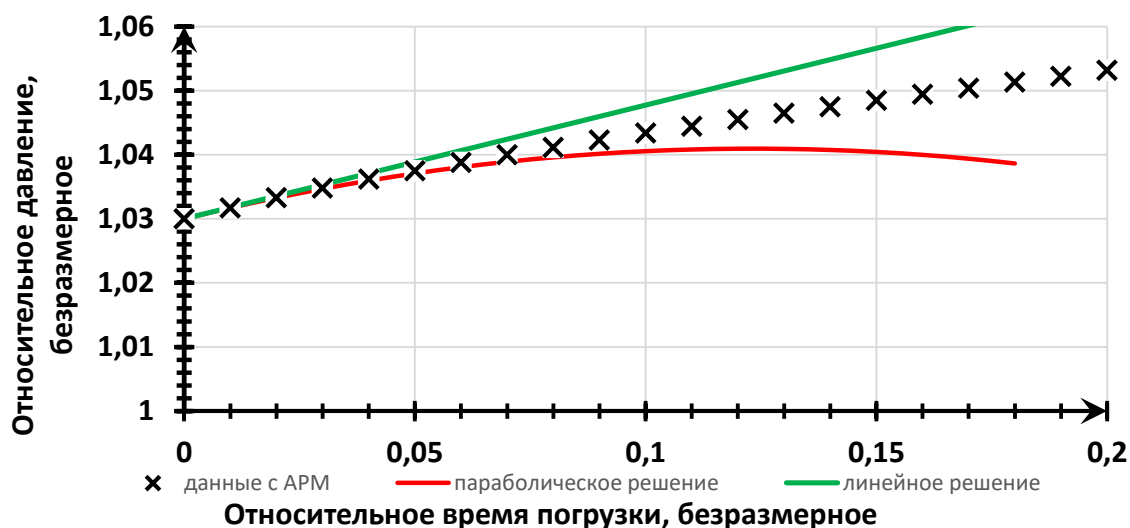


Рисунок 4.6 – Динамика изменения относительного давления
(составлено автором)

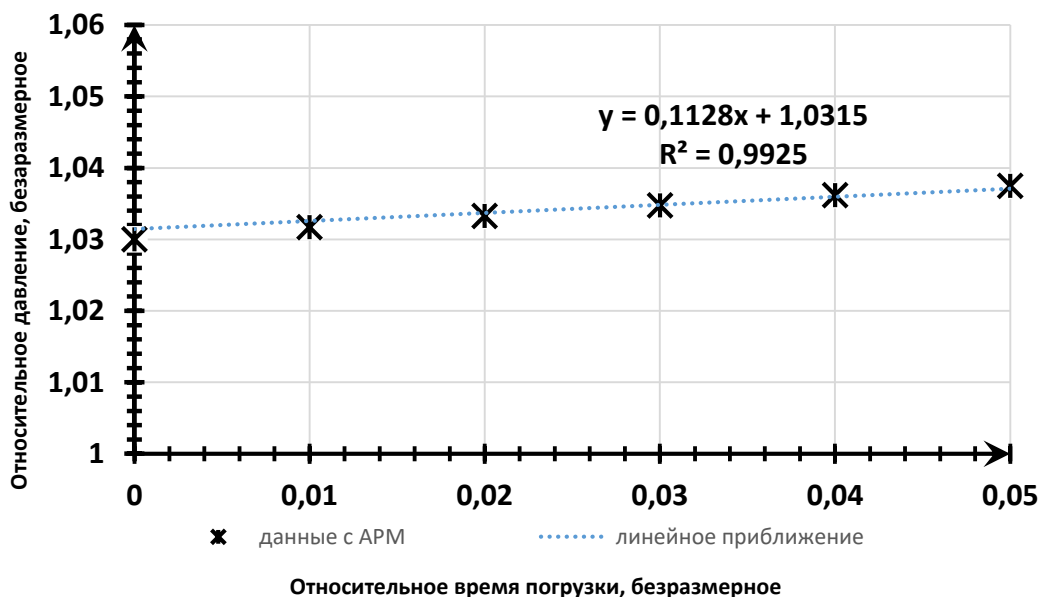


Рисунок 4.7 – Динамика изменения относительного давления в процессе загрузки танкера во времени по экспериментальным данным (составлено автором)

Величина массоотдачи J_H определяется следующим образом (4.36):

$$J_H = \frac{Q_H \cdot P_K \cdot \psi}{F \cdot R \cdot T} \quad (4.36)$$

Оценим величину массоотдачи J_H по формуле (4.36) [68]:

$$J_H = \frac{Q_H \cdot P_K \cdot \Psi}{F \cdot R \cdot T} = \frac{10000 \cdot 101325 \cdot 0,935}{10000 \cdot 170 \cdot 293} = 1,90 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$$

Выполнив данную оценку, можно спрогнозировать дальнейший рост давления по предлагаемому автором уравнению (4.29) и исключить открытие мастрайзера путем, например, более интенсивного отвода паров [61] с использованием установленной на причале газодувки. Алгоритмы управления газодувками на причале в данной работе не рассматриваются и представляют отдельный интерес для научных исследований [27].

Здесь важно отметить, что благодаря ранней сигнализации о возможных технологических осложнениях, персонал морского терминала, задействованный в обеспечении безопасного процесса погрузки, может заранее предпринять необходимые действия по их исключению или минимизации негативных последствий.

4.3 Выводы по четвертой главе

В рамках проведенной в четвертой главе работы представлены результаты разработки рекомендаций по рациональной эксплуатации трубопроводов отвода газовой фазы на объектах налива:

1. Проведено обоснование рациональной периодичности очистки трубопроводов отвода газовой фазы на объектах налива. Корректный выбор диаметра на этапе проектирования обеспечивает стабильную эксплуатацию системы отвода паров. При этом некоторый запас по диаметру позволяет значительно отодвинуть опасную зону достижения критического уровня засорения. Получена новая зависимость, показывающая что время достижения критического уровня засорения зависит от диаметра в 20-ой степени.

2. Приведены результаты разработки концептуальных решений по системе раннего предупреждения срабатывания газовоздушной смеси. Составлено и решено дифференциальное уравнение для начального этапа погрузки, для которого характерен высокий темп роста давления. Благодаря приведенному решению этого уравнения в рядах, появилась возможность идентификации параметров массоотдачи, что дает возможность построить дальнейший прогноз развития

ситуации. Благодаря ранней сигнализации о возможных технологических осложнениях, персонал морского терминала, задействованный в обеспечении безопасного процесса погрузки, может заранее предпринять необходимые действия по их исключению или минимизации негативных последствий.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании выполненных автором диссертации экспериментальных и аналитических исследований обоснованы методы определения потерь нефтепродуктов от испарения при заполнении резервуаров и транспортных емкостей, которые позволяют обеспечить повышение точности прогнозирования параметров данных процессов, что имеет существенное значение для развития нефтяной отрасли на текущем этапе. В рамках выполнения диссертации достигнуты следующие основные результаты:

1. На основе проведенного анализа современной теории определения потерь нефтепродуктов от испарения при заполнении резервуаров и транспортных емкостей, установлено, что при разработке расчетных методов следует более детально учитывать реальные параметры технологических процессов, в особенности явление превышения объема вытесняемой ГВС над объемом закачиваемого продукта.

2. Разработана математическая модель, описывающая параметры вытеснения газовоздушной смеси при наполнении резервуаров и транспортных емкостей на начальном (линейном) участке операции закачки. Особенностью данной модели является то, что впервые была учтена зависимость коэффициента гидравлического сопротивления от скорости ГВС в явном виде, а также явление превышения объема вытесняемой ГВС над объемом закачиваемого продукта. Полученная модель ближе к реальным процессам, поскольку учитывает начальный участок операции закачки, а именно к нему приурочены наибольшие потери от испарения и пиковый рост давления. Разработанный метод расчета потерь нефтепродуктов от испарения при заполнении резервуаров и транспортных емкостей позволяет повысить точность их определения в среднем на 14,2 % за счет учета явления превышения объемного расхода вытесняемой газовоздушной смеси над объемом закачки.

3. Разработана и реализована конструкция экспериментального стенда, при работе на котором возможно изучение широкого перечня вопросов, связанных с процессами вытеснения газовоздушной смеси из наполняемых транспортных емкостей и резервуаров. В том числе реализована возможность имитации качки

наполняемой емкости, что особенно важно для изучения процессов, происходящих при наполнении танкеров. Проведены эксперименты по определению коэффициента превышения объема вытесняемой ГВС над объемом закачки при различных условиях внешней среды, при различных режимах, а также при отсутствии и наличии качки. Установлено, что коэффициент превышения объемного расхода вытесняемой из заполняемой емкости газовоздушной смеси над объемным расходом закачки бензина следует определять по критериальному уравнению, содержащему безразмерные критерии подобия Рейнольдса, Шмидта, относительную температуру газовоздушной смеси, и учитывающему наличие качки при помощи модифицированного числа Фруда, что в совокупности обеспечивает относительную погрешность не более 10,72 % относительно экспериментальных данных.

4. Проведено обоснование рациональной периодичности очистки трубопроводов отвода газовой фазы на объектах налива. Корректный выбор диаметра на этапе проектирования обеспечивает стабильную эксплуатацию системы отвода паров. Получена новая зависимость, показывающая что время достижения критического уровня засорения зависит от диаметра в 20-ой степени. Приведены результаты разработки концептуальных решений по системе раннего предупреждения стравливания газовоздушной смеси. Составлено и решено дифференциальное уравнение для начального этапа погружки, для которого характерен высокий темп роста давления. Благодаря приведенному решению этого уравнения в рядах, появилась возможность идентификации параметров массоотдачи, что дает возможность построить дальнейший прогноз развития ситуации. Благодаря ранней сигнализации о возможных технологических осложнениях, персонал морского терминала может заранее предпринять необходимые действия по их исключению или минимизации негативных последствий.

Перспективой дальнейших исследований является аппаратное воплощение предложенных рекомендаций по оснащению объектов налива системами раннего оповещения о необходимости стравливания газовоздушной смеси из емкостей.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

АЗС	— автозаправочная станция;
АРМ	— автоматизированное рабочее место;
АТР	— Азиатско-Тихоокеанский регион;
ВСТО	— магистральный нефтепровод «Восточная Сибирь – Тихий Океан»;
ГВС	— газовоздушная смесь;
ГП	— газовое пространство;
ГУС	— газоуравнительная система;
ДНП	— давление насыщенных паров;
ЛОС	— летучие органические соединения;
ННК	— независимая нефтегазовая компания;
НПЗ	— нефтеперерабатывающий завод;
ОПЕК	— организация стран — экспортёров нефти;
ПВС	— паровоздушная смесь;
РВС	— резервуар вертикальный стальной;
ТОН	— терминал отгрузки нефти;
УРП	— установка рекуперации паров;
УРС	— уравнение состояния;
ФЗ	— федеральный закон;
ЦДУ	— центральное диспетчерское управление топливно-
ТЭК	энергетического комплекса;
ЕРА	— агентство по охране окружающей среды (Environmental Protection Agency);
IEA	— международное энергетическое агентство (International Energy Agency);
VOF	— метод объёма жидкости (volume of fluid).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абузова, Ф. Ф. Исследование потерь от испарения нефтей и нефтепродуктов и эффективности средств сокращения их в резервуарах : специальность 05.15.07 : диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Абузова Фатиха Фигтяховна ; Уфимский нефтяной институт. – Уфа, 1975. – 334 с.
2. Абузова, Ф.Ф. Потери нефтепродуктов и нефтей от испарения из подземных резервуаров / Ф. Ф. Абузова, В. И. Черников. - Москва : Недра, 1966. - 114 с., 1 л. черт. : ил.; 24 см..
3. Абузова, Ф.Ф. О коэффициенте диффузии паров нефтепродуктов Ф. Ф. Абузова, В. И. Черников // Труды НИИТранснефть. - 1961. - Вып. 1. - С. 146–150.
4. Абузова, Ф.Ф. Потери от испарения из подземных резервуаров с постоянным по высоте поперечным сечением / Ф. Ф. Абузова, В. И. Черников // Труды НИИТранснефть. - 1963. - Вып. 11. - С. 162–185.
5. Абузова, Ф.Ф., Черников В.И. Коэффициент диффузии паров нефтей и нефтепродуктов в воздух М.: ВНИИСПТнефть / Уфа:, 1963.С. 217–224.
6. Абхаирова, С. А., Бронштейн И.С. Изменение физико-химических свойств нефтей при испарении Сб. научн. тр. ВНИИСПТнефть / Уфа:, 1976.С. 188–193.
7. Арбузов, Н. С. Защита морских терминалов от гидроударов путем создания в трубопроводах самотечных участков / Н.С. Арбузов // Нефтяное хозяйство. - 2011. - № 4. - С. 129-131.
8. Арбузов, Н. С. Защита трубопроводов морских нефтеналивных терминалов от гидравлического удара с помощью береговой компенсаторной емкости / Н.С. Арбузов, А.С. Дидковская, М.В. Лурье // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. - 2012. - № 4(8). - С. 33–35.
9. Ачилова, Н. Б. Тепломассообмен и энергосберегающие режимы работы систем подогрева танкеров при перевозке высоковязких застывающих жидкостей : специальность 05.08.05 : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Ачилова Наталья Балтаевна. – Астрахань, 2011. – 177 с.

10. Баскаков, С. П. Основы безопасной эксплуатации танкера : учебник для студентов (курсантов) высших учебных заведений, обучающихся по специальности 26.05.05 (180403) "Судовождение" / С. П. Баскаков, А. Г. Конаков, С. Ю. Развозов ; Министерство транспорта Российской Федерации, Федеральное агентство морского и речного транспорта, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова". - Санкт-Петербург : Изд-во ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова, 2015. - 802, [1] с. : ил..

11. Безбродов, Ю. Н. Снижение потерь нефтепродуктов при сливо-наливных операциях на нефтебазах и АЗС методом рекуперации паровоздушной смеси углеводородов / Ю.Н. Безбродов, Т.М. Гурко // Научная дискуссия: вопросы технических наук. - 2017. - № 1(41). - С. 74–77.

12. Бекежанова, В. Б. Моделирование конвекции в двухфазной системе в условиях диффузионного испарения в замкнутой области / В.Б. Бекежанова, О.Н. Гончарова, А.С. Овчарова // Прикладная механика и техническая физика. - 2023. - № 4 (380) - (64). - С. 14–26.

13. Бронштейн, И.С. Об эффективности различных технических средств в борьбе с потерями от испарения нефти и нефтепродуктов Сб. научн. тр. ВНИИСПТнефть / Уфа:, 1968.С. 153–170.

14. Бронштейн, И.С. Исследование основных параметров понтона для сокращения потерь от испарения нефтепродуктов из резервуаров Сб. научн. тр. ВНИИСПТнефть / Уфа:, 1968.С. 171–185.

15. Бронштейн, И.С. Испарение многокомпонентных смесей в емкостях Сб. научн. тр. ВНИИСПТнефть / 1973.С. 115–122.

16. Бронштейн, И.С. [и др.]. Оценка погрешности определения потерь индивидуальных углеводородов нефти от испарения хроматографическим методом Сб. научн. тр. ВНИИСПТнефть / Уфа:, 1978.С. 123–125.

17. Бронштейн, И.С. [и др.]. К определению коэффициентов превышения объема выходящей из резервуара паровоздушной смеси над объемом закачанной нефти М.: ВНИИСПТнефть / Уфа:, 1985.С. 75–79.

18. Бронштейн, И.С. К вопросу оценки физико-химических свойств нефтей и нефтепродуктов вероятностными методами / И.С. Бронштейн, В.Е. Губин, В.И. Мартынова // Сб. научн. тр. ВНИИСПТнефть / Уфа:, 1972.С. 150–157.

19. Булавин, И. Н. Установки рекуперации паров нефти и нефтепродуктов конденсато-абсорбционного типа / И.Н. Булавин // Химическая техника. - 2016. - № 6. - С. 18.

20. Выходцева, С. А. Биомониторинг акватории бухты Козьмина в районе нефтеналивного терминала ООО «Спецморнефтепорт Козьмино» / С.А. Выходцева, Е.А. Костина, Е.С. Уколова // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. - 2014. - № 1(13). - С. 86–90.

21. Галеев, В. Б. Исследование потерь нефтепродуктов от испарения: специальность 05.15.07: дис. ... канд. техн. наук. – Уфа: 1967. 232 с.

22. Галкова, К. С. Применение систем рекуперации паров с целью повышения безопасности на автозаправочных станциях / К.С. Галкова, Д.А. Мельникова // Научный альманах. - 2022. - № 10–2(96). - С. 100–102.

23. Гиззатов, М. А. Сокращение потерь бензинов от испарения на автозаправочных станциях нефтебаз: специальность 05.15.13: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / М. А. Гиззатов. – Уфа, 1987. – 244 с.

24. Государственный доклад о состоянии и использовании минерально-сырьевых ресурсов Российской Федерации в 2024 году // Министерство природных ресурсов и экологии Российской Федерации : [официальный сайт]. – 2025. – 15 апреля.

– URL: https://www.mnr.gov.ru/docs/gosudarstvennye_doklady/o_sostoyanii_i_ispolzovanii_mineralno_syrevykh_resursov_rossiyskoy_federatsii/ (дата обращения: 10.04.2026).

25. Гохштейн, С. А. Автоматизация технологических процессов морских нефтеналивных портов / С.А. Гохштейн, С.В. Нкитин, А.К. Гуреев // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. - 2014. - № 4(16). - С. 64–66.

26. **Густов, В. С.** Особенности гидравлического расчета трубопроводов отвода газовой фазы на морских нефтеналивных терминалах / **В.С. Густов, В.В. Пшенин, Д.В. Сакал** // Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов – 2026. - № 2 (160). - С. 98-108.

27. **Густов, В. С.** Способ управления режимом работы трубопровода для отвода газовой фазы при выполнении операций загрузки транспортных емкостей / **В.С. Густов, В.В. Пшенин, Г.С. Закирова, Д.В. Сакал, В.С. Борисова** // Нефть. Газ. Новации. - 2025. - № 8 (297). - С. 15-18.

28. **Давлетьяров, Р. Р.** Обеспечение экологической безопасности в районе нефтеналивного терминала Порта Приморск / **Р.Р. Давлетьяров, О.А. Лапина, С.А. Половков** // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. - 2015. - № 2(18). - С. 84–87.

29. **Демёхин, Ф. В.** Разработка методики определения коэффициента диффузии паров пожароопасных жидкостей в воздухе : специальность 05.26.03 : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / **Ф. В. Демёхин**. – Санкт-Петербург, 1999. – 198 с.

30. **Едигаров, С.Г., Курганский М.И., Тимофеев С.Г.** Оценка влияния герметичности дыхательных клапанов на потери от малых дыханий из резервуаров с избыточным давлением Сб. научн. тр. ВНИИСПТнефть / 1972.С. 123–129.

31. **Елшин, К.В., Спектор И. В., Гумеров А. Г.** Потери нефти и нефтепродуктов от испарения из резервуарных парков НПЗ и мероприятия по их резкому сокращению М.: ВНИИСПТнефть / Уфа:, 1961.С. 240–247.

32. **Елшин, К.В., Спектор И. В., Гумеров А. Г.** Потери нефти и нефтепродуктов от испарения из резервуарных парков НПЗ и мероприятия по их резкому сокращению М.: ВНИИСПТнефть / Уфа:, 1961.С. 240–247.

33. **Земенков, Ю. Д.** Методологическое обеспечение экспертных расчетов утечек и выбросов при трубопроводном транспорте жидких углеводородов : специальность 05.15.13 : диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / **Ю. Д. Земенков**. – Тюмень, 1999. – 383 с.

34. Иванов, А. И. [и др.]. Сравнительная оценка методов определения параметров эмиссии углеводородов на объектах налива, оборудованных установками рекуперации паров // Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья. 2019. № 2. С. 5–8.

35. Кириллов, Н. Г. Установки по улавливанию легких фракций углеводородов при хранении нефти и нефтепродуктов на основе машин Стирлинга // Нефтяное хозяйство. 2003. № 2. С. 77–79.

36. Коваленко, М.Ф., Бронштейн И.С. Методы определения потерь нефти и нефтепродуктов от испарения и области их применения Сб. научн. тр. ВНИИСПТнефть / Уфа:, 1978.С. 67–90.

37. Константинов, Н. Н. Борьба с потерями от испарения нефти и нефтепродуктов / Н. Н. Константинов, М.: Гостоптехиздат, 1961. 260 с.

38. Коршак, А. А. [и др.]. Ограничения на использование установок рекуперации паров при операциях с нефтью и нефтепродуктами Уфа: ООО «РН-БашНИПИнефть», 2018.С. 73–74.

39. Коршак, А. А. Прогнозирование потерь нефти и нефтепродуктов от испарения / А. А. Коршак, 2022. 252 с.

40. Коршак, А. А. Оценка области применения установок рекуперации паров нефтепродуктов по зарубежным данным / А. А. Коршак, А. А. Коршак, А. В. Захарченко // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2023. – Т. 13, № 3. – С. 252–260. – DOI 10.28999/2541-9595-2023-13-3-252-260.

41. Коршак, А. А. Использование метода структурной минимизации среднего риска для идентификации массоотдачи испаряющейся нефти при наливе в танкеры / А.А. Коршак, М.Т. Гайсин, В.В. Пшенин // Нефтяное хозяйство. - 2019. - № 10. - С. 108–111.

42. Коршак, А. А. Нефтебазы и АЗС: Учебное пособие для системы профессиональной переподготовки по направлению «Транспорт и хранение нефти, нефтепродуктов и газа» / А. А. Коршак, Г. Е. Коробков, Е. М. Муфтахов, Уфа: ДизайнПолиграфСервис, 2006. 415 с.

43. Коршак, А. А. К расчету фазовых переходов в конденсационных установках рекуперации паров нефти и нефтепродуктов / А.А. Коршак, А.А. Коршак, В.В. Пшенин // Нефтяное хозяйство. - 2021. - № 6. - С. 98–101.

44. Кулагин, А. В. Прогнозирование и сокращение потерь бензинов от испарения из горизонтальных подземных резервуаров АЗС: специальность 25.00.19: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / А. В. Кулагин. – Уфа, 2003. – 183 с.

45. Ладыгин, А. Н. Особенности проектирования Варандейского нефтяного отгрузочного терминала / А.Н. Ладыгин, Г.Д. Закиров, С.Б. Сидоренков // Нефтяное хозяйство. - 2009. - № 4. - С. 40–42.

46. Лазаренко, Б. С. Нефтебазы и нефтяные терминалы: от современного проектирования до эффективной эксплуатации / Б. С. Лазаренко, Е. Н. Макушин // Безопасность труда в промышленности. – 2015. – № 1. – С. 70–75.

47. Латыпов, Р. Ш. Внешняя теплоотдача наземных резервуаров с нефтепродуктами: специальность 05.15.13: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Р. Ш. Латыпов. – Уфа, 1991. – 183 с.

48. Левитин, Р. Е. Эффективность применения дыхательных клапанов при теоретически высоких давлениях их срабатывания / Р.Е. Левитин, А.В. Цыцельская // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2023. – Т. 334. – № 1. – С.187-195.

49. Любин, Е. А. Обоснование технологии улавливания паров нефти из резервуаров типа РВС с использованием насосно-эжекторной установки: специальность 25.00.19: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Е. А. Любин. – Санкт-Петербург, 2010. – 185 с.

50. Мартяшова, В. А. Исследование испарения нефтей и нефтепродуктов из резервуаров в условиях интенсификации технологических процессов: специальность 25.00.19: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / В. А. Мартяшова. – Уфа, 1978. – 241 с.

51. Матвеев, Ю. А. Установка улавливания паров нефтепродуктов с периодической работой холодильного блока на автозаправочных станциях /

Ю.А. Матвеев, В.А. Кузнецов, А.Ю. Мулгачев, А.А. Бутузов // Оборудование и технологии для нефтегазового комплекса. - 2014. - № 4. - С. 59–63.

52. Молчанова, Р. А. Исследования по выбору типов резервуаров для хранения легкоиспаряющихся нефтепродуктов: специальность 05.15.07 : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Р. А. Молчанова. – Уфа, 1981. – 168 с.

53. Николаева, А. В. Моделирование кинетики процессов испарения при отгрузке нефти в танкеры на примере ООО «Транснефть – Порт Козьмино» / А.В. Николаева, А.А. Коршак, В.В. Пшенин // Проблемы недропользования: Сборник научных трудов, Санкт-Петербург, 18-20 апреля 2018 года. - Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский горный университет, 2018. - Т.1. - С. 83–85.

54. Об охране окружающей среды : федеральный закон от 10.01.2002 № 7-ФЗ // Собрание законодательства Российской Федерации. – 2002. – № 2. – Ст. 133.

55. Общая информация // Санкт-Петербургская Международная Товарно-сырьевая Биржа : [официальный сайт]. – 2026. URL: <https://spimex.com/marketdata/info/> (дата обращения: 01.07.2026).

56. Попова, А. Г. Установка рекуперации паров бензина адсорбционного типа для автозаправочных станций / А.Г. Попова, В.О. Апаликов // АПК России. - 2022. - № 1 (29). - С. 62–65.

57. Презентация о Петербургской Бирже // Санкт-Петербургская Международная Товарно-сырьевая Биржа : [официальный сайт]. – 2026. – 30 июня. URL: <https://spimex.com/upload/iblock/cf4/wnbdxpk06j8w3a8nxfo6d5sljvnc3gw7.pdf> (дата обращения: 01.07.2026).

58. Пшенин, В. В. К вопросу определения коэффициента превышения при операциях заполнения емкостей / В.В. Пшенин, Г.С. Закирова, А.А. Антонов, М.Р. Нафи // Трубопроводный транспорт: теория и практика. - 2021. - № 3(79). - С. 44–46.

59. Пшенин, В. В. Получение критериального уравнения для определения коэффициента превышения при наливке танкеров / В.В. Пшенин, Г.С. Закирова,

А.А. Антонов, А.А. Скоробогатов // Нефтегазовое дело. - 2022. - № 5 (20). - С. 134–139.

60. Пшенин, В. В. Определение диаметра трубопровода отвода газовой фазы на морских нефтеналивных терминалах / В.В. Пшенин // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. - 2024. - № 2 (14). - С. 120–127.

61. Пшенин, В. В. Патент № 2831618 Российская Федерация МПК F01B 23/08 (2006.01), F04D 13/02 (2006.01), F03B 17/06(2006.01). Безвальный насосный агрегат для отвода газовой фазы. Заявка № 2024111009 : заявл. 22.04.2024 : опубл. 11.12.2024; В. В. Пшенин, **В. С. Густов**, А. А. Соколов; заявитель/патентообладатель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II». – 9 с.: ил.

62. Пшенин, В. В. Патент № 2842918 Российская Федерация, МПК B01D 53/14 (2006.01). Экспериментальный стенд для изучения процессов рекуперации паров нефти и нефтепродуктов. Заявка № 2025103584 ; заявл. 18.02.2025 ; опубл. 03.07.2025; В. В. Пшенин, **В. С. Густов**, А. А. Соколов ; заявитель /патентообладатель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II». – 15 с.: ил.

63. Пшенин, В. В. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024612830 Российская Федерация. Программа расчёта газодинамических процессов при операциях погрузки танкеров. Заявка № 2024611091 ; заявл. 24.01.2024 ; опубл. 06.02.2024; В. В. Пшенин, **В. С. Густов**, А. А. Соколов ; заявитель /правообладатель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II». – 157 КБ.

64. Пшенин, В. В. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2024620693 Российская Федерация. База данных установок рекуперации паров, эксплуатируемых на объектах налива нефти и нефтепродуктов. Заявка

№ 2024620367 : заявл. 08.02.2024 ; опубл. 13.02.2024; В. В. Пшенин, **В. С. Густов**, А. А. Варламова ; заявитель /правообладатель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II». - 33,5 МБ.

65. Пшенин, В. В. Моделирование процессов вытеснения паров нефти и нефтепродуктов при операциях погрузки танкеров / В.В. Пшенин, В.С. Густов, А.А. Скоробогатов // Рассохинские чтения: Сборник трудов конференции, Ухта, 02-03 февраля 2023 года. - Ухта: Ухтинский государственный технический университет, 2023. - С. 275–278.

66. Пшенин, В. В. Повышение эффективности систем улавливания паров нефти при товарно-транспортных операциях на нефтеналивных терминалах / В.В. Пшенин, Г.С. Закирова // Записки Горного института. - 2024. - (265). - С. 121–128.

67. Пшенин, В. В. Повышение эффективности работы морских нефтеналивных терминалов / В.В. Пшенин, Д.О. Нагорнов, В.С. Густов // Деловой журнал Neftegaz.RU. - 2023. - № 8(140). - С. 112–116.

68. Пшенин, В. В. Численная оценка объемного расхода вытесняемой газовой фазы при погрузке танкеров / В.В. Пшенин, А.И. Фидусь // Миллионщиков-2019: Материалы II Всероссийской научно-практической научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, посвященной 100-летию ГГНТУ, Грозный, 30-31 мая 2019 года. - Грозный: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Грозненский государственный нефтяной технический университет имени академика М.Д.Миллионщикова», 2019. - С. 261–262.

69. Пшенин, В.В. Опыт эксплуатации установки рекуперации паров конденсационного типа / В.В. Пшенин, Д.О. Нагорнов, В.С. Густов, А.В. Борисов // Трубопроводный транспорт: теория и практика. - 2023. - № 1(83). - С. 4–9.

70. Ривкин, П. Р. Исследование потерь нефти и нефтепродуктов от испарения при наливке в транспортные емкости : специальность 05.15.07 : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / П. Р. Ривкин. – Москва, 1975. – 252 с.

71. Ривкин, П.Р. [и др.]. Метод расчета потерь от испарения при наливке транспортных емкостей Сб. научн. тр. ВНИИСПТнефть / Уфа:, 1968.С. 150–155.

72. Сапронов, В. Н. Планирование и оптимизация загрузки нефтеналивных терминалов : специальность 08.00.05 : диссертация на соискание ученой степени кандидата экономических наук / В. Н. Сапронов. – Санкт-Петербург, 2013. – 150 с.

73. Саттарова, Д. М. Потери от испарения из резервуаров и параметры работы газоуравнительных систем при операциях с нестабильными бензинами : специальность 05.15.07 : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Д. М. Саттарова. – Уфа, 1982. – 179 с.

74. Сафронов, В.Я. [и др.]. К расчету потерь от испарения из-за негерметичности резервуаров Сб. научн. тр. ВНИИСПТнефть / 1977.С. 67–94.

75. Селиванов, Н. В. Моделирование тепломассообмена высоковязких жидкостей в колеблющейся емкости (Разработка методов расчета, эксперимент, промышленное использование): специальность 01.04.14: диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Н. В. Селиванов. – Астрахань, 2002. – 397 с.

76. Трофимов, А. В. Эффективная рекуперация от компании «Газспецтехника» / А.В. Трофимов // Территория Нефтегаз. - 2013. - № 10. - С. 99.

77. Трофимов, А.В. Рекуператоры ООО «Газспецтехника» как вклад в экономику, экологию и промышленную безопасность нефтеперерабатывающих предприятий и автозаправочных станций / А.В. Трофимов // Территория Нефтегаз. - 2019. - № 5. - С. 64–66.

78. Хайдуков, О. П. Системы инертных газов на танкерах и их эксплуатация : Учебное пособие / О. П. Хайдуков, А. С. Трусов, Е. В. Кузнецов. - Новороссийск: НГМА, 2000. - 116 с.

79. Хафизов, Ф. М. Сокращение потерь от испарения бензинов из резервуаров уменьшением взаимодействия воздуха с испаряющейся поверхностью: специальность 05.15.13: дис. ... канд. техн. наук – Уфа, 1988. – 179 с.

80. Чернер, А. М. Арктический терминал по отгрузке нефти с Новопортовского месторождения – новый форпост освоения Севера России / А. М.

Чернер, Д. А. Сугаипов, В. В. Крупенников, С. С. Девятьяров, И. Л. Сандлер // Нефтяное хозяйство. – 2015. – № 12. – С. 16–19.

81. Шупляк, А. Ю. Математическое моделирование массопереноса в процессе испарения многокомпонентных жидкостей / А. Ю. Шупляк, С. П. Шкаруппа, А. М. Штеренберг // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия «Физико-математические науки». – 2013. – № 3(32). – С. 98–109.

82. Щербаков, А. З. Теория и технология транспорта высоковязких нефтей и нефтепродуктов в нефтеналивных судах и хранения их в резервуарах : специальность 05.15.07 : диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / А. З. Щербаков. – Астрахань, 1979. – 318 с.

83. Щербаков, А. З., Наконечников Г. Н. Анализ и оценка фактических потерь светлых нефтепродуктов от испарения при транспортировке в танкерах 1988.

84. Bazhaykin, S. G., Mukhametzyanov R. R., Stepanyugin A. V. Oil product losses rationing in the airport fuel supply system // SCIENCE & TECHNOLOGIES OIL AND OIL PRODUCTS PIPELINE TRANSPORTATION. 2019. № 4 (9). С. 452–457.

85. Brambilla, S., Manca D. Accidents involving liquids: A step ahead in modeling pool spreading, evaporation and burning // Journal of Hazardous Materials. 2009. № 2–3 (161). С. 1265–1280.

86. Carty, R., Schrod T. Concentration Profiles in Ternary Gaseous Diffusion // Industrial & Engineering Chemistry Fundamentals. 1975. № 3 (14). С. 276–278.

87. DeLuchi, M. A. Emissions from the Production, Storage, and Transport of Crude Oil and Gasoline // Air & Waste. 1993. № 11 (43). С. 1486–1495.

88. Galeev, A. D., Salin A. A., Ponikarov S. I. Numerical simulation of evaporation of volatile liquids // Journal of Loss Prevention in the Process Industries. 2015. (38). С. 39–49.

89. Hassanvand, A., Hashemabadi S. H., Bayat M. Evaluation of gasoline evaporation during the tank splash loading by CFD techniques // International Communications in Heat and Mass Transfer. 2010. № 7 (37). С. 907–913.

90. Huang, W. [и др.]. Numerical simulation and applications of equivalent film thickness in oil evaporation loss evaluation of internal floating-roof tank // *Process Safety and Environmental Protection*. 2019. (129). С. 74–88.

91. Huang, W. [и др.]. A calculation method for simulation and evaluation of oil vapor diffusion and breathing loss in a dome roof tank subjected to the solar radiation // *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2020. (195). С. 107568.

92. Huang, Weiqiu Experimental determination and numerical simulation of vapor diffusion and emission in loading gasoline into tank // *化工学报*. 2016. № 12 (0). С. 4994.

93. Husain, M. [и др.]. Crude oil under negative pressures and hydrocarbons emission containment 2003.

94. Invernizzi, Marzio, Sironi Selena Odour Emission Rate Estimation Methods for Hydrocarbon Storage Tanks // *Chemical Engineering Transactions*. 2021. (85). С. 67–72.

95. Karbasian, H. R. [и др.]. A new method for reducing VOCs formation during crude oil loading process // *Journal of Mechanical Science and Technology*. 2017. № 4 (31).

96. Measures to Reduce Emissions of VOCs during Loading and Unloading of Ships in the EU [Электронный ресурс]. URL: <https://www.ec.europa.eu/environment/air/pdf/vocloading.pdf> (дата обращения: 04.11.2025).

97. Mitrovic, J. Josef Stefan and his evaporation–diffusion tube—the Stefan diffusion problem // *Chemical Engineering Science*. 2012. (75). С. 279–281.

98. Paulauskienė, T., Zabukas V., Vaitiekūnas P. Investigation of volatile organic compound (voc) emission in oil terminal storage tank parks/lakiųjų organinių junginių (loj) emisijos tyrimas naftos terminalo talpyklų parkuose // *Journal of environmental engineering and landscape management*. - 2009. - № 2 (17). - С. 81–88.

99. Pshenin, V., Zaripova N., Zaynetdinov K. Modeling of the crude oil (or petroleum products) vapor displacement during rail tanks loading // Petroleum Science and Technology. 2019. № 24 (37). C. 2435–2440.

100. Ramírez, C. A. Dimensionless approach-to-steady-state criteria required for estimating binary gas diffusivities in the Stefan column // Results in Engineering. 2025. (27). C. 106361.

101. Rota, R. [и др.]. Emissions from Fixed-Roof Storage Tanks: Modeling and Experiments // Industrial & Engineering Chemistry Research. 2001. № 24 (40). C. 5847–5857.

102. Siddiqui, A., Verma M., Tulett D. A periodic planning model for maritime transportation of crude oil // EURO Journal on Transportation and Logistics. 2013. № 4 (2). C. 307–335.

103. Siddiqui, A., Verma M., Verter V. An integrated framework for inventory management and transportation of refined petroleum products: Pipeline or marine? // Applied Mathematical Modelling. 2018. (55). C. 224–247.

104. Statistical Review of World Energy [Электронный ресурс]. – URL : https://www.bpb.de/system/files/dokument_pdf/Statistical_Review_of_World_Energy_2024.pdf (дата обращения 04.03.2026).

105. Tamaddoni, M. [и др.]. Experimental study of the VOC emitted from crude oil tankers // Process Safety and Environmental Protection. 2014. № 6 (92).

106. **Gustov, V.** Comparative assessment of diffusion modeling methods in evaporation problems of liquid bulk cargoes during tanker loading / **V. Gustov**, V. Pshenin, E. Dzhemilev, D. Sakal // Frontiers in Chemical Engineering. - 2026. - Vol. 8. - p. 1-14. DOI: 10.3389/fceng.2026.1775892.

107. **Gustov, V.** Substantiation of Solutions for Enhancing the Environmental Safety Level of a Marine Oil Terminal under Conditions of High Intensification of Technological Processes. / **V. Gustov**, V. Pshenin, G. Zakirova // Frontiers in Marine Science. - 2026. Vol. 13. - P. 1 – 12. DOI: 10.3389/fmars.2026.1849663.

108. Vlasov, V. A. Diffusion-kinetic model of liquid evaporation from a Stefan tube: A solution to the Stefan diffusion problem // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2020. (163). С. 120379.

109. Zhang, C. [и др.]. A systematic literature review on the evaporation loss mechanisms and local diffusion characteristics of volatile organic compounds (VOCs) from petrochemical storage tanks // Journal of Loss Prevention in the Process Industries. 2026. (99). С. 105801.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Патент на изобретение № 2842918

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2842918

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ СТЕНД ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ
ПРОЦЕССОВ РЕКУПЕРАЦИИ ПАРОВ НЕФТИ И
НЕФТЕПРОДУКТОВ**

Патентообладатель: *Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования "Санкт-
Петербургский горный университет императрицы
Екатерины II" (RU)*

Авторы: *Пшенин Владимир Викторович (RU), Густов Вадим
Сергеевич (RU), Соколов Александр Алексеевич (RU)*

Заявка № 2025103584

Приоритет изобретения 18 февраля 2025 г.

Дата государственной регистрации

в Государственном реестре изобретений
Российской Федерации 03 июля 2025 г.Срок действия исключительного права
на изобретение истекает 18 февраля 2045 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Ю.С. Зубов

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



(19) **RU** (11) **2 842 918** (13) **C1**
(51) МПК
B01D 53/14 (2006.01)

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(52) СПК
B01D 53/14 (2025.01)

(21)(22) Заявка: 2025103584, 18.02.2025
(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
18.02.2025
Дата регистрации:
03.07.2025
Приоритет(ы):
(22) Дата подачи заявки: 18.02.2025
(45) Опубликовано: 03.07.2025 Бюл. № 19
Адрес для переписки:
199106, Санкт-Петербург, В.О., 21 линия, 2,
Санкт-Петербургский Горный Университет,
Прищепа Олег Михайлович

(72) Автор(ы):
Пшенин Владимир Викторович (RU),
Густов Вадим Сергеевич (RU),
Соколов Александр Алексеевич (RU)
(73) Патентообладатель(и):
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования "Санкт-Петербургский горный
университет императрицы Екатерины II"
(RU)
(56) Список документов, цитированных в отчете
о поиске: RU 2645540 C1, 21.02.2018. RU
2157717 C2, 20.10.2000. RU 2106903 C1,
20.03.1998. RU 2657445 C1, 19.06.2018. RU 39928
U1, 20.08.2004. RU 2452556 C1, 10.06.2012. JP
59048649 B2, 28.11.1984.

(54) ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ СТЕНД ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ПРОЦЕССОВ РЕКУПЕРАЦИИ ПАРОВ НЕФТИ И НЕФТЕПРОДУКТОВ

(57) Реферат:
Изобретение относится к машиностроению, в частности к экспериментальным стендам, и предназначено для изучения газодинамических процессов, протекающих при операциях погрузки нефтяных танкеров. Расширение функциональных возможностей экспериментального оборудования для изучения процессов рекуперации паров нефти и нефтепродуктов достигается за счёт установки рабочей ёмкости на подвижной платформе, соединённой с шаговыми двигателями,

обеспечивающими периодическое движение рабочей ёмкости, что позволяет учитывать влияние состояния свободной поверхности воды, т. е. качки танкеров, на процесс рекуперации. Кроме того, применение различных ёмкостей для расходного бака, резервуара хранения абсорбента и конденсатосборника позволяет оценивать эффективность рекуперации в зависимости от рода жидкости, применяемой в качестве абсорбента. 1 ил.

RU 2 842 918 C1

RU 2 842 918 C1

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Патент на изобретение № 2831618

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2831618

БЕЗВАЛЬНЫЙ НАСОСНЫЙ АГРЕГАТ ДЛЯ ОТВОДА
ГАЗОВОЙ ФАЗЫ

Патентообладатель: *Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
"Санкт-Петербургский горный университет
императрицы Екатерины II" (RU)*

Авторы: *Пшенин Владимир Викторович (RU), Густов
Вадим Сергеевич (RU), Соколов Александр Алексеевич
(RU)*

Заявка № 2024111009

Приоритет изобретения 22 апреля 2024 г.

Дата государственной регистрации

в Государственном реестре изобретений

Российской Федерации 11 декабря 2024 г.

Срок действия исключительного права

на изобретение истекает 22 апреля 2044 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Ю. С. Зубов



(Продолжение)

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



(19) **RU** (11) **2 831 618**⁽¹³⁾ **C1**

(51) МПК
F01B 23/08 (2006.01)
F04D 13/02 (2006.01)
F03B 17/06 (2006.01)

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(52) СПК
F01B 23/08 (2024.08); F04D 13/02 (2024.08); F03B 17/06 (2024.08)

(21)(22) Заявка: 2024111009, 22.04.2024 (24) Дата начала отсчета срока действия патента: 22.04.2024 Дата регистрации: 11.12.2024 Приоритет(ы): (22) Дата подачи заявки: 22.04.2024 (45) Опубликовано: 11.12.2024 Бюл. № 35 Адрес для переписки: 190106, Санкт-Петербург, 21 линия, В.О., 2, ФГБОУ ВО "СПбГУ императрицы Екатерины II", Патентно-лицензионный отдел	(72) Автор(ы): Пшенин Владимир Викторович (RU), Густов Вадим Сергеевич (RU), Соколов Александр Алексеевич (RU) (73) Патентообладатель(и): Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II" (RU) (56) Список документов, цитированных в отчете о поиске: RU 2745673 C1, 30.03.2021. RU 2778191 C1, 15.08.2022. US 6254364 B1, 03.07.2001. RU 71387 U1, 10.03.2008.
---	--

(54) БЕЗВАЛЬНЫЙ НАСОСНЫЙ АГРЕГАТ ДЛЯ ОТВОДА ГАЗОВОЙ ФАЗЫ

(57) Реферат:

Изобретение относится к машиностроению, в частности к безвальным насосным агрегатам, и предназначено для рекуперации гидравлической мощности и отвода газовоздушной смеси. Техническим результатом является сокращение потерь от испарения лёгких фракций углеводородов и снижение расхода электроэнергии. Безвальный насосный агрегат для отвода газовой фазы за счёт установки гидравлической турбины, рабочей жидкостью которой является нефть, подаваемая в транспортные ёмкости нефтяного танкера, приводимый указанной турбиной безвального насоса, позволяет обеспечить принудительный отвод газовоздушной смеси из газового пространства танкера и её транспортировку к установке рекуперации паров. 4 ил.

RU 2 831 618 C 1

RU 2 831 618 C 1

ПРИЛОЖЕНИЕ В

Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2024620693

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации базы данных

№ 2024620693

**База данных установок рекуперации паров,
эксплуатируемых на объектах налива нефти и
нефтепродуктов**

Правообладатель: *федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования «Санкт-
Петербургский горный университет императрицы
Екатерины II» (RU)*

Авторы: *Пшенин Владимир Викторович (RU), Густов Вадим
Сергеевич (RU), Варламова Антонина Алексеевна (RU)*

Заявка № 2024620367

Дата поступления 08 февраля 2024 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре баз данных 13 февраля 2024 г.



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Ю.С. Зубов

(Продолжение)

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



RU2024620693

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ
ГОСУДАРСТВЕННАЯ РЕГИСТРАЦИЯ БАЗЫ ДАННЫХ, ОХРАНЯЕМОЙ
АВТОРСКИМИ ПРАВАМИ

Номер регистрации (свидетельства):
2024620693
Дата регистрации: 13.02.2024
Номер и дата поступления заявки:
2024620367 08.02.2024
Дата публикации и номер бюллетеня:
13.02.2024 Бюл. № 2

Автор(ы):
Пшенин Владимир Викторович (RU),
Густов Вадим Сергеевич (RU),
Варламова Антонина Алексеевна (RU)
Правообладатель(и):
федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования «Санкт-Петербургский горный
университет императрицы Екатерины II» (RU)

Название базы данных:

База данных установок рекуперации паров, эксплуатируемых на объектах налива нефти и нефтепродуктов

Реферат:

База данных содержит информацию об эксплуатируемых на различных объектах нефтегазовой промышленности установках рекуперации паров с указанием используемых технологий рекуперации паров, проектных расходов паров и др. База данных может быть использована для технико-экономической оценки конкурирующих технологий, а также при проведении практических занятий для студентов профилей 21.05.06 «Магистральные трубопроводы и газонефтехранилища», 21.03.01 «Сооружение и ремонт объектов систем трубопроводного транспорта», 21.03.01 «Эксплуатация и обслуживание объектов транспорта и хранения нефти, газа и продуктов переработки». Тип ЭВМ: IBM PC-совмест. ПК; ОС: Windows Vista/7/8/10.

Вид и версия системы управления базой данных: MySQL

Объем базы данных: 33,5 МБ

ПРИЛОЖЕНИЕ Г

Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2024612830

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2024612830

**Программа расчёта газодинамических процессов при
операциях погрузки танкеров**

Правообладатель: *федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Санкт-Петербургский горный университет
императрицы Екатерины II» (RU)*

Авторы: *Пшенин Владимир Викторович (RU), Густов
Вадим Сергеевич (RU), Соколов Александр Алексеевич
(RU)*

Заявка № 2024611091

Дата поступления 24 января 2024 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 06 февраля 2024 г.



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Ю.С. Зубов

(Продолжение)

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



RU2024612830

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ
ГОСУДАРСТВЕННАЯ РЕГИСТРАЦИЯ ПРОГРАММЫ ДЛЯ ЭВМ

Номер регистрации (свидетельства):
2024612830
Дата регистрации: 06.02.2024
Номер и дата поступления заявки:
2024611091 24.01.2024
Дата публикации и номер бюллетеня:
06.02.2024 Бюл. № 2

Автор(ы):
Пшенин Владимир Викторович (RU),
Густов Вадим Сергеевич (RU),
Соколов Александр Алексеевич (RU)
Правообладатель(и):
федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования «Санкт-Петербургский горный
университет императрицы Екатерины II» (RU)

Название программы для ЭВМ:

Программа расчёта газодинамических процессов при операциях погрузки танкеров

Реферат:

Программа предназначена для анализа газодинамических процессов при операциях погрузки танкеров. Программа обеспечивает выполнение функций: построение графиков зависимости следующих величин от времени: объёмного расхода налива нефти / нефтепродукта в танкер, коэффициента превышения, расхода газозооушной смеси в трубопроводе газовой фазы, давления в газовом пространстве танкера; вывод указанных величин для заданного момента времени. Программа может быть полезна при проектировании установок рекуперации паров и определении оптимальных параметров их работы. Программа может быть использована при проведении практических занятий для студентов профилей 21.05.06 «Магистральные трубопроводы и газонефтехранилища», 21.03.01 «Сооружение и ремонт объектов систем трубопроводного транспорта», 21.03.01 «Эксплуатация и обслуживание объектов транспорта и хранения нефти, газа и продуктов переработки».

Язык программирования: C++

Объём программы для ЭВМ: 157 КБ

ПРИЛОЖЕНИЕ Д

Акт о внедрении результатов исследования в ООО «Северная компания»



188669, Россия, Ленинградская обл.,
Всеволожский район, город Мурино,
ул. Кооперативная, 24, лит. А-а

(812) 7777-9-88
www.nordcompany.ru
mail@nordcompany.ru

УТВЕРЖДАЮ

Генеральный директор

ООО «Северная Компания»

Шебаленков И.Г.

Дата « 15 » апреля 2026 г.

М.П.

АКТ

о внедрении (использовании) результатов
кандидатской диссертации

Густова Вадима Сергеевича, соискателя ученой степени по научной специальности
2.8.5. Строительство и эксплуатация нефтегазопроводов, баз и хранилищ

Рабочая комиссия в составе:

Председатель: главный технолог ООО «Северная Компания» Тутуев Д.Л.

Члены комиссии: Начальник участка ЭМ и КИП и А 1 категории ООО «Северная Компания» Цюпак Р. В., Начальник участка ПНР 1 категории ООО «Северная Компания» Лаврентьев А. Г.

Составили настоящий акт о том, что результаты диссертации на тему «Обоснование методов расчета потерь нефтепродуктов от испарения при заполнении резервуаров и транспортных ёмкостей», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по научной специальности 2.8.5. Строительство и эксплуатация нефтегазопроводов, баз и хранилищ, могут быть использованы в производственной деятельности ООО «Северная Компания» и аффилированных организаций в виде рекомендаций по расчету потерь нефтепродуктов от испарения при заполнении резервуаров и транспортных емкостей, а также для повышения эффективности технологических процессов, применяющихся в деятельности ООО «Северная Компания»

Применение данных рекомендаций по расчету позволяет сократить количество необходимых экспериментальных исследований для определения потерь нефтепродукта при заполнении резервуаров и транспортных емкостей.

Использование указанных результатов позволит не менее чем на 20% повысить точность расчетов испарений нефтепродуктов и снизить трудозатраты на исследование рекуперационных технологий.

Решение принято членами комиссии ООО «Северная Компания»

Председатель комиссии

главный технолог

Тутуев Д.Л.

Члены комиссии:

Начальник участка ЭМ и КИП и А 1 категории

Цюпак Р. В.

Начальник участка ПНР 1 категории

Лаврентьев А. Г.

ПРИЛОЖЕНИЕ Е

Акт о внедрении результатов исследования в ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II»

УТВЕРЖДАЮ



Проректор по образовательной деятельности
Санкт-Петербургского горного университета
императрицы Екатерины II

к.т.н., доц. Петраков Д.Г.

«19» июня 2026 г.

**о внедрении результатов кандидатской диссертации
Густова Вадима Сергеевича**

**на тему: «Обоснование методов расчета потерь нефтепродуктов от испарения
при заполнении резервуаров и транспортных ёмкостей», по научной
специальности**

**2.8.5. – «Строительство и эксплуатация нефтегазопроводов, баз и хранилищ»
в учебный процесс Санкт-Петербургского горного университета
императрицы Екатерины II**

Результаты диссертационной работы Густова Вадима Сергеевича на тему «Обоснование методов расчета потерь нефтепродуктов от испарения при заполнении резервуаров и транспортных ёмкостей», представленной на соискание ученой степени доктора технических наук, внедрены в учебный процесс Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II».

Разработанные автором математические модели процесса улавливания паров на морских нефтеналивных терминалах, а также методы повышения эффективности эксплуатации трубопроводных систем морских терминалов изучаются по дисциплинам «Математические модели процессов транспорта и хранения углеводородов», «Нефтебазы и АЗС», «Эксплуатация газонефтепроводов» специальности 21.05.06 «Нефтегазовая техника и технологии» в рамках лекционных и практических занятий.

Декан нефтегазового факультета

**Заведующий кафедрой
транспорта и хранения
нефти и газа**

(подпись)

 (подпись)

Подопригора Д.Г.

Шаммазов И.А.

ПРИЛОЖЕНИЕ Ж

Паспорт на автомобильное топливо для экспериментального стенда

 Система менеджмента качества
 ГОСТ Р ИСО 9001-2015 (ISO 9001:2015)
 Сертификат № РОСС RU.13СК03.00563
 до 26.12.2027г.

Изготовлено в России
 Изготовитель: ООО "КИНЕФ"
 187110, г.Кириши, Ленинградская обл.,
 шоссе Энтузиастов, 1

Аналитический центр
 Аттестат аккредитации
 № РОСС RU.0001.510501

Паспорт продукции № 225

Автомобильный бензин экологического класса К5
 марки АИ-95-К5 по ГОСТ 32513-2023
 (Декларация о соответствии ЕАЭС N RU Д-РУ.РА09.В.34240/24
 с 11.10.2024 по 10.10.2027)

Код ОКПД2 19.20.21.135
 Номер резервуара: 80
 Дата изготовления продукта 0XL 02.11.2025
 Дата отбора проб по ГОСТ 2517: 02.11.2025

Взлив: 1558
 Тоннаж: 3215
 Номер партии: 225
 Дата проведения анализа продукции: 03.11.2025



№	Наименование показателей	Норма ТР ТС	Норма	Факт. данные	Метод испытания
1.	Октановое число: по исследовательскому методу, не менее	80	95	95,2	ГОСТ 8226
	по моторному методу, не менее	76	85	86,5	ГОСТ 511
2.	Концентрация свинца, мг/дм ³ , не более	отсутствие	отсутствие	отсутствие	ГОСТ EN 237
3.	Содержание промытых смол, мг/100 см ³ , не более	-	5	3	ГОСТ 1567
4.	Индукционный период, мин, не менее	-	360	1389	ГОСТ 4039
5.	Массовая доля серы, мг/кг, не более, для бензинов экологического класса: К5	10	10	менее 3	ГОСТ ISO 20846
6.	Объемная доля бензола, %, не более, для бензинов экологического класса: К5	1	1	0,05	ГОСТ 32507 (метод Б)
7.	Объемная доля углеводородов, %, не более, для бензинов экологического класса: К5				ГОСТ 32507 (метод Б)
	олефиновых	18	18	0,48	
	ароматических	35	35	34,28	
8.	Массовая доля кислорода, %, не более, для бензинов экологического класса: К5	2,7	2,7	0,22	ГОСТ EN 13132
9.	Объемная доля оксигенатов, %, не более, для бензинов экологического класса: К5				ГОСТ EN 13132
	метанола	отсутствие	отсутствие	отсутствие	
	этанола	5	5	отсутствие	
	изопропанола	10	10	отсутствие	
	трет-бутанола	7	7	отсутствие	
	изобутанола	10	10	отсутствие	
	эфиров, содержащих 5 или более атомов углерода в молекуле	15	15	1,2	
	других оксигенатов (с температурой конца кипения не выше 210°C)	10	10	отсутствие	
10.	Коррозия медной пластинки (3ч при 50°C)	-	Класс 1	Класс 1	ГОСТ 32329
11.	Внешний вид	-	Чистый, прозрачный	соответствует	ГОСТ 32513 п.8.2
12.	Плотность при 15°C, кг/м ³	-	725,0 - 780,0	736	ASTM D 4052

(Продолжение)

№	Наименование показателей	Норма ТР ТС	Норма	Факт. данные	Метод испытания
13.	Концентрация марганца, мг/дм ³ , не более	отсутствие	отсутствие	отсутствие	ГОСТ 33158
14.	Концентрация железа, мг/дм ³ , не более	отсутствие	отсутствие	отсутствие	ГОСТ 32514
15.	Объемная доля монометиланилина, %, не более,				ГОСТ 32515
	для бензинов экологического класса: К5	отсутствие	отсутствие	отсутствие	
16.	Давление насыщенных паров, кПа:				ГОСТ EN 13016-1
	- в летний период	35-80	35-80	65,0	
	- в зимний период	35-100	35-100		
17.	Фракционный состав:				ГОСТ 2177 (метод А)
	- объемная доля испарившегося бензина, %, при температуре:				
	70°C (И70)		15 - 50	47,5	
	100°C (И100)	-	40 - 70	61,5	
	150°C (И150), не менее	-	75	85,5	
	- конец кипения, °C, не выше	-	215	190	
	- объемная доля остатка в колбе, %, не более	-	2	1,0	
18.	Индекс паровой пробки (ИПП)	-	не нормируется	983	ГОСТ 32513 п.8.3
	Присадки:			отсутствие	

Примечание: За отсутствие принимается значение результата ниже диапазона измерений.

Заключение: бензин неэтилированный соответствует требованиям ГОСТ 32513-2023 и требованиям Технического регламента Таможенного союза ТР ТС 013/2011 "О требованиях к автомобильному и авиационному бензину, дизельному и судовому топливу, топливу для реактивных двигателей и мазуту".

Гарантийный срок хранения бензинов всех марок - 1 год со дня изготовления.

Требования безопасности

Бензины являются малоопасными продуктами и по степени воздействия на организм человека относятся к 4-му классу опасности в соответствии с ГОСТ 12.1.007.

Меры предосторожности при хранении, транспортировании, использовании и утилизации в соответствии с требованиями ГОСТ 32513-2023.

Зам. начальника центра
(аналитического-по контролю качества)

Начальник лаборатории

Инженер-лаборант

Дата выдачи паспорта:



03.11.2025

Кондратьева Е.М.

Васильева М.С.

Соколова Л.Ф.