

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*

**Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Санкт-Петербург – 2026

Диссертация выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II».

Научный руководитель:

кандидат технических наук, доцент

Пшенин Владимир Викторович

Официальные оппоненты:

Валеев Анвар Рашитович

доктор технических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет», кафедра «Транспорт и хранение нефти и газа», профессор;

Игнатик Анатолий Александрович

кандидат технических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ухтинский государственный технический университет», кафедра проектирования и эксплуатации магистральных газонефтепроводов, доцент.

Ведущая организация – государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Альметьевский государственный технологический университет «Высшая школа нефти», г. Альметьевск.

Защита диссертации состоится **28 сентября 2026 г. в 11:00** на заседании диссертационного совета ГУ.11 Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II по адресу: 199106, г. Санкт-Петербург, 21-я В.О. линия, д. 2, аудитория № 1163.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II и на сайте www.spmi.ru.

Автореферат разослан 28 июля 2026 г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ
диссертационного совета



НОСОВ
Виктор Владимирович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

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. Суммарные 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 загрузке. 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.

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 расчетов потерь нефтепродуктов от испарения является неопределенность в области определения объемного расхода вытесняемой газовоздушной смеси, для описания которого принято использовать так называемый «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, механи-

чески 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») 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»).

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.).

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

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.).

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: Международная конференция «Рассохинские чтения» (02-03 февраля 2023 года, г. Ухта); XV Всероссийская конференция молодых ученых, специалистов и студентов «Новые технологии в газовой промышленности (газ, нефть, энергетика)» (23–27 октября 2023 года, г. Москва); XII Молодежная международная научно-практическая конференция «Новые технологии в газовой отрасли: опыт и преемственность» (15–19 апреля 2024 года, г. Москва); 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, 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 (далее – Перечень ВАК), в 2 статьях – в изданиях, входящих в международную базу данных и систему цитирования Scopus. Получено 2 патента на изобретение, 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ, 1 свидетельство о государственной регистрации базы данных.

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.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы работы, сформулированы цель, задачи работы и научная новизна, перечислены применяемые методы исследования, раскрыты

теоретическая и практическая значимость исследования и изложены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе проведен критический анализ современной теории и практики эксплуатации объектов налива нефтепродуктов в Российской Федерации. Рассмотрены существующие модели испарения нефтепродуктов при выполнении операций заполнения резервуаров и транспортных емкостей. Выявлено, что имеющиеся расчетные модели содержат существенную неопределенность. Было установлено, что существующие математические модели процесса испарения нефтепродуктов не учитывают сложную специфику реальных технологических операций по заполнению резервуаров и транспортных емкостей и нуждаются в соответствующей доработке и пересмотре. Определены особенности технологических операций, которые необходимо учитывать при разработке комплексной модели вытеснения паров нефтепродукта из заполняемого резервуара или транспортной емкости.

Во второй главе на основе анализа процессов испарения, происходящих при заполнении резервуаров и транспортных емкостей, была разработана математическая модель вытеснения газовой смеси. Математическая модель основана на известном уравнении состояния газового пространства внутри заполняемого резервуара или транспортной емкости. Ее ключевое отличие от ранее известных моделей состоит в учете явления превышения объемного расхода газовой фазы над объемным расходом закачки и учете особенностей проведения товарно-транспортных операций по закачке продукта. Были предложены пути решения полученного уравнения и получены качественные и количественные оценки для различных условий объектов налива.

В третьей главе представлены результаты экспериментальных исследований, проведенных при участии автора на специально разработанном экспериментальном стенде. Представлено обоснование конструкции экспериментального стенда, а также параметры и режимы работы комплектующего технологического оборудования. Экспериментальный стенд позволяет имитировать различные режимы технологических операций, включая специфические. Экспериментальный стенд позволяет учесть

влияние слошинга (волнообразование на поверхности раздела фаз при качке танкера) на параметры испарения наливного груза. Эксперименты проводились с использованием бензина АИ-95 при различных температурах и объемных расходах закачки. По результатам экспериментов получено критериальное уравнение для определения коэффициента превышения.

В четвертой главе предложены рекомендации по повышению эффективности эксплуатации существующих трубопроводов отвода газовой фазы на объектах налива. Сформулированы предложения по рациональной эксплуатации и техническому перевооружению существующих систем, повышению их контролепригодности и эффективности, с учетом разработанных автором решений.

В заключении сформулированы основные выводы по диссертации.

Основные результаты отражены в следующих защищаемых положениях:

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 газовоздушной смеси над объемом закачки.

Существующие модели испарения нефти и вытеснения газовоздушной смеси при операциях заполнения резервуаров и при погрузке транспортных емкостей не в полном объеме отвечают фактическим характеристикам существующих процессов. Как правило, расчеты ведутся для некоторого усредненного объемного расхода закачки, а начальный и конечный этапы операции погрузки, на которых объемный расход закачки изменяется линейно, игнорируются. К тому же в рамках сложившейся практики при расчетах потерь нефтепродуктов от испарения при заполнении резервуаров и транспортных емкостей не учитывается явление превышения объема вытесняемой газовоздушной смеси над объемом закачки продукта по причине отсутствия надежных научно обоснованных зависимостей или используется стандартное значение 1,25. Рассмотрим процесс заполнения транспортной ёмкости

наливным грузом с контролируемым отводом газовоздушной смеси (далее – ГВС). В процессе заполнения в ёмкость поступает нефтепродукт с некоторым расходом Q_3 , в результате чего объем газового пространства уменьшается, а давление P внутри ёмкости возрастает. Увеличение давления вызвано не только сокращением объема газовой фазы, но и насыщением её парами испаряющегося нефтепродукта. Под действием перепада давления между ёмкостью и конечной точкой газоотводящего трубопровода (давление в которой – P_K) происходит движение ГВС с расходом $Q_{ГВС}$. На рисунке 1 представлена принципиальная схема процесса заполнения транспортной ёмкости.

Уравнение для газового пространства заполняемой транспортной емкости (или резервуара) в дифференциальной форме записывается в виде (1):

$$\frac{dP}{dt} \cdot V + \frac{dV}{dt} \cdot P = \frac{dG}{dt} \cdot R \cdot T, \quad (1)$$

где P – давление в газовом пространстве ёмкости, Па; t – текущее время от начала налива, ч; V – текущий объем газового пространства ёмкости, м³; G – масса ГВС в газовом пространстве, кг; R – газовая постоянная ГВС, Дж/(кг·К); T – температура ГВС, К.

Введем следующие безразмерные параметры (2):

$$y = \frac{P}{P_K}; \quad \theta = \frac{Q_3 \sqrt{\lambda \cdot \frac{L_{эф}}{D}}}{S \sqrt{R \cdot T}}. \quad (2)$$

где P_K – конечное давление в трубопроводе газовой фазы, Па; J – интенсивность массоотдачи с поверхности испарения, кг/(м²·ч); F – площадь поверхности испарения, м²; S – площадь сечения трубопровода газовой фазы, м²; $L_{эф}$ – эффективная длина трубопровода газовой фазы, с учетом всех местных гидравлических сопротивлений, м; D – диаметр трубопровода газовой фазы, м; λ – коэффициент гидравлического сопротивления, безразмерный.

Используя выражение для коэффициента превышения, найдем объемный расход газовоздушной смеси (3):

$$K_{\Pi} = \frac{Q_{\Gamma BC}}{Q_3} = \frac{\sqrt{y^2 - 1}}{\theta}; v_{\Gamma BC} = Q_3 \cdot \frac{\sqrt{y^2 - 1}}{S \cdot \theta}, \quad (3)$$

где y – относительное давление (отношение давления в ёмкости к давлению в конечной точке трубопровода отвода газовой фазы); $v_{\Gamma BC}$ – скорость газовой смеси в трубопроводе отвода газовой фазы, м/с.

Запишем предложенное Л.С. Лейбензоном выражение для коэффициента гидравлического сопротивления (4):

$$\lambda = \frac{A}{Re^m} = \frac{A}{\frac{v_{\Gamma BC}^m \cdot D^m}{\nu_{\Gamma BC}^m}}, \quad (4)$$

где A, m – коэффициенты, зависящие от режима течения; $\nu_{\Gamma BC}$ – кинематическая вязкость газовой смеси, м²/с.

Окончательно можно получить зависимость для расхода газовой смеси в явном виде (5):

$$Q_{\Gamma BC} = \frac{\pi}{4} \cdot D^{\frac{5-m}{2-m}} \cdot \sqrt[2-m]{\frac{(y^2 - 1) \cdot R \cdot T}{A \cdot L \cdot \nu_{\Gamma BC}^m}}. \quad (5)$$

Тогда для коэффициента превышения получаем следующее выражение (6):

$$K_{\Pi} = \frac{\frac{\pi}{4} \cdot D^{\frac{5-m}{2-m}} \cdot \sqrt[2-m]{\frac{(y^2 - 1) \cdot R \cdot T}{A \cdot L \cdot \nu_{\Gamma BC}^m}}}{Q_3}. \quad (6)$$

Совокупные массовые потери продукта от испарения при наполнении резервуара или транспортной емкости за одну операцию могут быть найдены по следующей формуле (7):

$$M = \int_0^{t_n} \frac{\pi}{4} \cdot D^{\frac{5-m}{2-m}} \cdot \sqrt[2-m]{\frac{(y^2 - 1) \cdot R \cdot T}{A \cdot L \cdot \nu_{\Gamma BC}^m}} \cdot m_y(t) dt, \quad (7)$$

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

В целях оценки точности предложенного метода расчета потерь нефтепродуктов от испарения были проведены вычисления с использованием формулы (6) для различных условий: от станций автоналива до крупных морских терминалов. Как известно, широко применяемая на практике формула В.И. Черникина для определения потерь от «больших дыханий» занижает потери на величину среднего коэффициента превышения, а на практике часто используют стандартное значение 1,25. Результаты вычислительного эксперимента с использованием формулы (6) применительно к бензинам приведены в таблице 1.

Исходя из таблицы 1, 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, а стандартное значение 1,25). Более точные сведения о границах применимости представлены в полном тексте диссертации.

2. 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 газовой смеси, и учитывающему наличие качки при помощи модифицированного числа Фруда, что в совокупности обеспечивает относительную погрешность не более 10,72 % относительно экспериментальных данных.

Долгое время считалось, что объем газовой смеси, вытесняемой в атмосферу при операциях заполнения резервуаров и транспортных емкостей, равен объему закачиваемого нефтепродукта. Впоследствии это утверждение было опровергнуто многочисленными экспериментальными исследованиями. Было введено понятие коэффициента превышения, однако на сегодняшний день в расчетных методиках определения потерь нефтепродуктов от испарения оно практически не используется по причине отсутствия надежных расчетных зависимостей. Классической формулой для определения коэффициента превышения является следующая зависимость (8):

$$K_{\Pi} = 1 + \frac{J \cdot F}{Q_3 \cdot \rho} \quad (8)$$

где J – интенсивность массоотдачи с поверхности испарения, кг/(м²·ч), F – площадь поверхности испарения, м².

Прямое использование зависимости (8) не представляется возможным. Во-первых, эта зависимость справедлива для мгновенного значения коэффициента превышения, а на практике гораздо важнее максимальное или среднеинтегральное его значение. Во-вторых, величина J меняется сложным образом, и в настоящее время не накоплено еще достаточно сведений о характере ее изменения для различных продуктов. На величину в значительной мере влияют: тип нефтепродукта, температура, внешние условия, интенсивность процесса и т.д.

В целях комплексного исследования влияния различных факторов на величину K_{Π} автором была разработана и реализована конструкция специализированного экспериментального стенда (рисунок 2) для изучения процессов испарения при наполнении резервуаров и транспортных емкостей при различных режимах, соответствующих реальным параметрам технологических процессов. Технические характеристики стенда и параметры проведения экспериментов приведены в таблице 2.

Экспериментальный стенд обеспечивает выполнение следующих операций:

1. Измерение и управление объемным расходом закачки.
2. Измерение объемного расхода газовой фазы.
3. Регулирование гидравлического сопротивления на линии отвода газовой фазы.
4. Измерение и управление температурой продукта и вытесняемой газовой фазы.
5. Обеспечение возвратно-поступательного движения, имитирующего бортовую качку танкера в целях изучения явления волнообразования при качке.
6. Регистрация показаний всех датчиков, сохранение журнала наблюдений и его первичная обработка.

Было спланировано проведение экспериментов для различных уровней влияющих факторов. По результатам обработки экспериментальных данных было получено критериальное уравнение для максимального коэффициента превышения, а при помощи методов нелинейной регрессии определены его коэффициенты (9):

$$K_{п(общ)} = 0,181 \cdot (Re)^{0,173} \cdot (Sc)^{-0,443} \times \left(1 - \frac{T_{ГВС}}{T_{НК}}\right)^{0,032} \cdot (1 + 33,379 \cdot (Fr_{волн}^*)^{0,845}), \quad (9)$$

где Re – число Рейнольдса для жидкой фазы; Sc – число Шмидта для газовой смеси; $T_{ГВС}$ – температура газовой смеси, К; $T_{НК}$ – температура начала кипения нефтепродукта, К; $Fr_{волн}^*$ – число Фруда, учитывающее периодические колебания емкости.

В формуле (9) число Рейнольдса для жидкого продукта определяется по уравнению (10):

$$Re = \frac{w \cdot L_x}{\nu_{жидк}}, \quad (10)$$

где w – скорость подъема уровня, м/с, определяемая как разность уровней до и после закачки, деленная на время закачки; 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.

Число Шмидта для ГВС определяется по формуле (11):

$$Sc = \frac{\nu_{ГВС}}{D_{ГВС}}, \quad (11)$$

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

Модифицированное число Фруда определяется по уравнению (12):

$$Fr_{волн}^* = \frac{\left(\frac{2 \cdot \pi}{T_{кол}}\right)^2 \cdot l}{g}, \quad (12)$$

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

В таблице 3 и на рисунке 3 приведено сопоставление полученных результатов с экспериментальными данными. Как видно из таблицы 3, полученное критериальное уравнение

позволяет в широком диапазоне параметров прогнозировать значение коэффициента превышения с относительной погрешностью не более 10,72%.

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 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. 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 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.

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 газовой 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 газовой смеси из емкостей.

СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях из Перечня ВАК:

1. **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.

2. **Густов, В.С.** Особенности гидравлического расчета трубопроводов отвода газовой фазы на морских нефтеналивных терминалах / **В.С. Густов, В.В. Пшенин, Г.Е. Коробков, Г.С. Закирова, А.А. Варламова** // Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. - 2026. - № 2 (160). - С. 98-108.

Публикации в изданиях, входящих в международную базу данных и систему цитирования Scopus:

3. **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

4. **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

Патенты/свидетельства на объекты интеллектуальной собственности:

5. Патент на изобретение № 2842918 Российская Федерация, МПК В01Д 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.

6. Патент на изобретение № 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.

7. 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.

8. Свидетельство о 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.

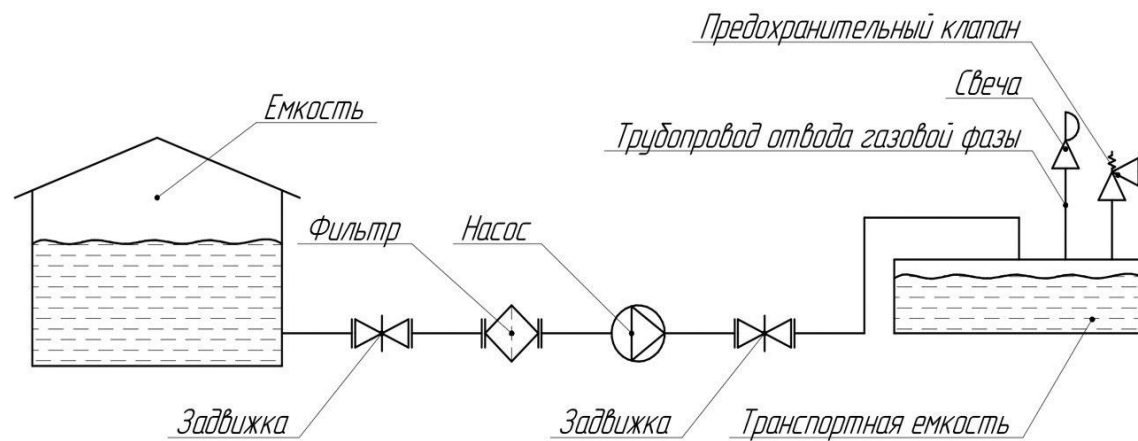


Рисунок 1 – Принципиальная схема процесса заполнения транспортной ёмкости

Таблица 1 – Результаты вычислительного эксперимента

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



Рисунок 2 – Общий вид экспериментального стенда

Таблица 2 – Параметры проведения эксперимента

Характеристика	Единицы измерения	Значение
Объём емкости	л	400
Период колебаний	с	26/52/104
Потребляемая мощность	кВт	45
Обращающийся в технологической схеме продукт	–	Бензин АИ-95
Температура продукта	°С	20; 25; 30
Расход закачки продукта	л/мин	10,5; 15,75; 21

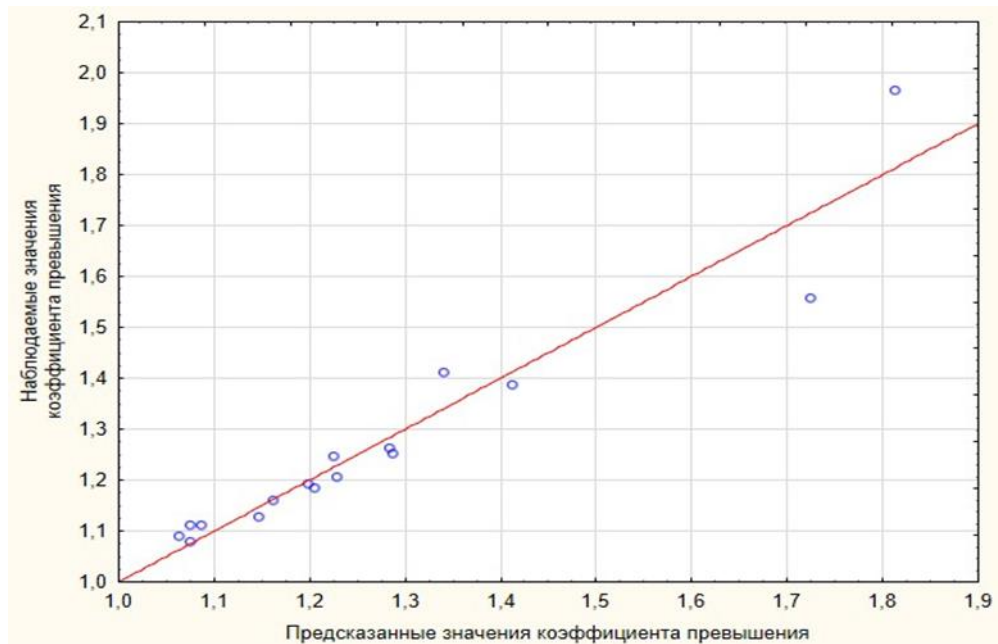


Рисунок 3 – Сопоставление предсказанных по критериальному уравнению и полученных в рамках эксперимента значений коэффициента превышения

Таблица 3 – Сопоставление предсказанных по критериальному уравнению и полученных в рамках эксперимента значений коэффициента превышения

Коэффициент превышения (в рамках эксперимента)	Коэффициент превышения по уравнению (9)	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