

На правах рукописи

Пшенин Владимир Викторович



**ОБОСНОВАНИЕ ТЕХНИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ
РЕШЕНИЙ ПО ОБЕСПЕЧЕНИЮ БЕЗОПАСНОГО И
РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩЕГО ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ
ТРУБОПРОВОДНЫХ СИСТЕМ МОРСКИХ
НЕФТЕНАЛИВНЫХ ТЕРМИНАЛОВ**

*Специальность 2.8.5. Строительство и эксплуатация
нефтегазопроводов, баз и хранилищ*

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

Санкт-Петербург – 2026

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

Научный консультант:

доктор технических наук, профессор

Господариков Александр Петрович

Официальные оппоненты:

Голунов Никита Николаевич

доктор технических наук, доцент, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина», проректор по дополнительному профессиональному образованию;

Бахтизин Рамиль Назифович

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

Николаев Олег Валерьевич

доктор технических наук, общество с ограниченной ответственностью «Научно-исследовательский институт природных газов и газовых технологий - Газпром ВНИИГАЗ», лаборатория моделирования газожидкостных потоков в системах добычи, заместитель начальника.

Ведущая организация – федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ухтинский государственный технический университет», г. Ухта.

Защита диссертации состоится **07 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 № 1171**.

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

Автореферат разослан 07 июня 2026 г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ

диссертационного совета



НОСОВ

Виктор Владимирович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Основной целью энергетической стратегии Российской Федерации на период до 2035 года является укрепление и сохранение позиций Российской Федерации в мировой энергетике. Стратегические задачи, призванные обеспечить достижение поставленной цели, включали в себя: структурную диверсификацию, цифровую трансформацию, оптимизацию пространственного размещения инфраструктуры, уменьшение негативного воздействия на окружающую среду. Ключевыми точками на экспортных направлениях транспорта нефти и нефтепродуктов являются морские терминалы, через которые значительная часть ресурсов поступает на внешние рынки. От безопасного, экономически эффективного, экологически обоснованного их функционирования во многом зависит стратегическая стабильность нефтегазовой отрасли в целом.

Развитие портовых мощностей за последние десятилетия влечет за собой тенденцию к росту объемов перевалки наливных грузов. Существенно увеличилась вместимость судов танкерного флота, а также выросла интенсивность проведения товарно-транспортных операций. Очевидно, что научное осмысление происходящих процессов запаздывает по сравнению с применяемыми, в том числе неоднозначными, инженерными решениями. Отвечая на вызовы, соответствующие интенсификации процессов внутри технологической цепочки транспорта нефти, в промышленности активно внедряются технические решения по повышению энергоэффективности, безопасности, снижению экологических рисков. В ходе реализации данного направления наметилась следующая проблематика, характерная для большинства портов в Российской Федерации и за рубежом: функционирование системы «трубопровод погрузки – танкер – трубопровод отвода газовой фазы – установка рекуперации паров» в научной литературе практически не рассматривалось, поскольку не было соответствующих предпосылок. На практике же решаются конкретные технические задачи, прежде всего, направленные на обеспечение быстрого и безопасного процесса погрузки нефти/нефтепродукта в танкер, остальные вопросы полагаются

вторичными. В рамках эксплуатации отдельных входящих в систему элементов не учитываются значительная нелинейность и нестационарность протекающих в них процессов, что делает режимы эксплуатации системы далекими от рациональных.

Запрос на принятие в учет этих факторов со стороны промышленности в настоящее время сложно переоценить: в то время как объемы отгрузки через морские терминалы неуклонно растут, большая часть реально эксплуатируемых установок рекуперации паров не обеспечивает заданных параметров и нуждается в дорогостоящей замене. В случае отсутствия рекуперации паров, при наполнении танкера может быть безвозвратно потеряно порядка 0,2 кг на 1 т отпущенного продукта. Высокая интенсивность процессов, особенности конструктивного исполнения трубопроводных систем морских нефтеналивных терминалов, а также специфика режимов их эксплуатации, способствуют появлению технологических осложнений при работе наливных трубопроводов и трубопроводов отвода газовой фазы, что негативно сказывается на промышленной и экологической безопасности.

Исследования, проводимые в рамках диссертации, направлены на создание научно-методических основ проектирования и эксплуатации морских нефтеналивных терминалов в части комплексного функционирования трубопроводов отгрузки нефти на танкер, трубопроводов отвода газовой фазы, а также установок рекуперации паров (далее – УРП) и является актуальной проблемой на текущем этапе развития нефтегазовой отрасли.

Степень разработанности темы исследования

Рассматриваемая в диссертации тема характеризуется неоднородной степенью разработанности: в то время как проблемами испарения из резервуаров и емкостей занимался широкий круг ученых и ведущих НИИ, проблемам функционирования систем налива нефти и нефтепродуктов в транспортные емкости посвящено не так много работ. Проблемами испарения нефти и нефтепродуктов в разное время занимались следующие исследователи: Черников В.И., Константинов Н.Н., Абузова Ф.Ф., Бронштейн И.С., Земенков Ю.Д., Коршак А.А., Галеев В.Б., Гизатов М.А., Латыпов Р.Ш., Мартяшова В.А., Молчанова Р.А., Саттарова Д.М.,

Хафизов Ф.М., Ривкин П.Р., Кулагин А.В. (из этих исследователей наливом в транспортные емкости занимались только Константинов Н.Н., Коршак А.А., Галеев В.Б. и Ривкин П.Р.). Среди крупных современных работ по установкам улавливания паров можно выделить работы Коршака А.А. В работах Сахабутдинова Р.З. в большей степени рассматриваются вопросы улавливания выбросов, приуроченных к промысловым условиям. Работы Башкирова В.Н. посвящены технологиям и аппаратному оформлению процессов, сопровождающихся выделением газовой фазы, применительно к задачам химической технологии.

Исследованиям развития и функционирования технических систем морских терминалов и судов танкерного флота посвящены работы Арбузова Н.С., Мастобаева Б.Н., Золотухина А.Б., Баскакова С.П., Ефремкина И.М., Зайкина Д.А., Куликова Н.В., Сапронова В.Н., Иванова А.И. (в частности, только работа Баскакова С.П. посвящена улавливанию паров с танкера). Рассмотрением задач теплообмена на судах танкерного флота ключевое место уделено в работах Щербакова А.З., Селиванова Н.В., Ачиловой Н.Б.

Среди работ зарубежных ученых, можно выделить работы Guilin Hu, Viridi, Panos Deligiannis, Eirik Sorgard, Ole Oldervik, Otto Martens, Tamaddoni Maryam. Особо среди зарубежных работ стоит отметить проект VOCSim, выполненный норвежским институтом SINTEF, в котором принимали участие большинство ведущих мировых нефтегазовых компаний.

Несмотря на наличие большого объема исследований по данным направлениям, описание взаимосвязанного функционирования системы «трубопровод погрузки – танкер – трубопровод отвода газовой фазы – УРП» с учетом особенностей эксплуатации требует комплексного научного обоснования.

Объект исследования – система «трубопровод погрузки – танкер – трубопровод отвода газовой фазы – УРП» на морском нефтеналивном терминале.

Предмет исследований – совокупность гидромеханических явлений в объекте исследований в их взаимосвязи с особенностями эксплуатации.

Цель работы – обеспечение безопасного и ресурсосберегающего функционирования системы «трубопровод погрузки – танкер – трубопровод отвода газовой фазы – установка рекуперации паров» при выполнении товарно-транспортных операций.

Идея работы – поставленная цель достигается путем использования технико-технологических решений, основу которых составляют гидрогазодинамические модели нелинейных и нестационарных процессов в трубопроводных системах морских нефтеналивных терминалов.

Задачи исследований:

1. Определить перспективные решения и имеющиеся резервы в области повышения эффективности эксплуатации трубопроводных систем морских нефтеналивных терминалов и установок рекуперации паров, в целях чего выполнить анализ современной теории и практики их функционирования в контексте рассматриваемой проблематики, а также систематизировать и дать оценку теоретическим результатам исследований процессов испарения при наливке нефти и нефтепродуктов в ходе выполнения операций погрузки танкеров.

2. Разработать обобщенную газодинамическую модель вытеснения газозооной смеси из внутреннего пространства танкера, учитывающую нелинейность и нестационарность протекающих процессов. Провести всесторонний анализ полученной модели и предложить алгоритмы решения полученных уравнений и идентификации параметров исследуемых процессов.

3. Экспериментально апробировать полученную модель на данных реальных погрузок танкеров и провести анализ результатов.

4. Обосновать комплекс подходов по увеличению эффективности эксплуатации установок рекуперации паров на различных видах объектов налива нефти и нефтепродуктов.

5. Разработать и внедрить в производственный процесс рекомендации по основным техническим требованиям к установкам рекуперации паров на морских терминалах, способствующие повышению безопасности и обеспечению ресурсосбережения.

6. Предложить инженерные методики для проектной работы

по определению диаметра трубопровода отвода газовой фазы и рационального расстояния размещения установки рекуперации паров.

7. Разработать алгоритмы управления, повышающие эффективность эксплуатации установок рекуперации паров и сопряженных устройств и систем.

8. Создать теоретическую модель удаления осложнений в виде скоплений воды и конденсата из пониженных участков трубопроводов потоком перекачиваемой среды, провести экспериментальные исследования и проанализировать их результаты.

9. Разработать технологию мониторинга надземных трубопроводов, металлоконструкций и объектов портовой инфраструктуры, в рамках которой провести опытно-конструкторские работы, апробировать и внедрить в эксплуатацию робототехническое устройство дистанционного мониторинга.

Научная новизна работы:

1. Создана математическая модель вытеснения газовой смеси из наполняемого танкера на установку рекуперации паров нефти и нефтепродуктов, учитывающая нестационарность и нелинейность процесса погрузки танкера.

2. Разработано научно-методическое обоснование взаимосвязанной эксплуатации трубопроводов газовой фазы и установок рекуперации паров на объектах налива нефти и нефтепродуктов.

3. Установлены зависимости в форме критериальных уравнений, позволяющие определить критические скорости потока, при которых достигается полное удаление скоплений воды и конденсата из внутренней полости трубопровода потоком перекачиваемой среды.

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:

Разработаны комплексные гидрогазодинамические модели, учитывающие нелинейность и нестационарность протекающих в трубопроводных системах морских нефтеналивных терминалов процессов, а также предложены соответствующие методы решения поставленных в рамках моделей задач, в том числе задач обратной

идентификации параметров, с учетом имеющейся в системе неопределенности.

Практическая значимость работы:

1. С использованием результатов работ автора был сформирован нормативный документ отраслевого уровня СТО.ИНТИ S.40.32 «Установки рекуперации паров. Общие технические требования» (письмо от 12.08.2024, утвержден протоколом совещания Минэнерго России № ПС-311пр от 23.12.2025), получивший необходимую экспертную оценку, а также одобрение большинства нефтегазовых компаний РФ. Нормативный документ выполнен с учетом разработанной базы данных по установкам рекуперации паров, эксплуатируемым на объектах налива нефти и нефтепродуктов (№ 2024620693).

2. Разработан комплекс программ для ЭВМ (свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ №№ 2024612830, 2023664756), предназначенный для расчета процессов в системе «трубопровод погрузки – танкер – трубопровод отвода газовой фазы – установка рекуперации паров» и «танкер – танкер». Рекомендации по оценке параметров товарно-транспортных операций с танкерами использованы в деятельности ООО «Газпромнефть Марин Бункер» (акт о внедрении от 01.09.2025, утвержден протоколом совещания Минэнерго России № ПС-311пр от 23.12.2025).

3. Разработаны рекомендации по рациональной эксплуатации различных типов УРП, способствующие обеспечению ресурсосбережения, а также предложена конструкция экспериментального стенда для независимой экспертной оценки эффективности различных типов УРП (патент на изобретение № 2842918).

4. Предложена и апробирована методика инженерного расчета трубопровода отвода газовой фазы и проектных параметров УРП на площадке АО «Туапсинский морской торговый порт» в рамках проекта по оборудованию причалов № 1 и № 2 трубопроводами отвода паров нефтепродуктов (акт о внедрении от 08.11.2024, утвержден протоколом совещания Минэнерго России № ПС-311пр от 23.12.2025).

5. Разработана методика управления системой инертного газа на плавучем танкере-накопителе в процессе перевалки с судна на

судно.

6. На основе полученных критериальных уравнений по гидродинамической устойчивости водных скоплений разработана и внедрена программа по определению положения водных скоплений по трассе рельефного нефтепровода (свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023615374), что позволяет за счет их раннего обнаружения и устранения снизить риски коррозионных осложнений и повысить безопасность эксплуатации нефтепровода.

7. Разработано несколько прототипов устройств для выявления скоплений воды и иных осложнений во внутренней полости трубопроводов, а также борьбы с ними (патент на изобретение № 2484358, патент на полезную модель № 216457, патент на полезную модель № 216465).

8. Создан испытательный стенд для робототехнического устройства дистанционного мониторинга надземных трубопроводов, объектов инфраструктуры морских терминалов и металлоконструкций.

9. Проведены опытно-конструкторские работы, создано и внедрено робототехническое устройство дистанционного мониторинга технического состояния труднодоступных участков трубопроводов и металлоконструкций (патенты на изобретение № 2842780, № 2778619). При этом в целях достижения передовых научно-технических результатов, были проанализированы отечественные и западные аналоги (свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2025620612). Результаты использованы в деятельности ООО «Газпром межрегионгаз» в части робототехнического обследования надземных газопроводов (акт о внедрении от 24.10.2025, утвержден протоколом совещания Минэнерго России №ПС-311пр от 23.12.2025).

10. Разработан нейросетевой алгоритм классификации элементов трубопроводов и распознавания повреждений лакокрасочного покрытия трубопроводов (свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ №№ 2022616881, 2022662358) и собрана база данных типовых препятствий на трубопроводах (свидетельство о государственной регистрации базы данных

№ 2022621490), а также предложены программы для расчета ресурса элементов обвязки (свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ №№ 2022619090, 2021616742).

11. 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 2 университетов, специализирующихся на подготовке специалистов для нефтегазового комплекса: федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет», федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II» (акт о внедрении от 03.12.2024, акт о внедрении от 24.10.2024, утверждены протоколом совещания Минэнерго России №ПС-311пр от 23.12.2025).

Методология и методы исследования

В рамках теоретического подхода к предмету исследований использованы методы математического моделирования процессов. Для получения решений и оценки их точности использовались методы прикладной математики. Широко использованы методы конечно-элементного моделирования. Для решения отдельных задач анализа экспериментальных данных использованы методы статистической обработки и оценки параметров. При постановке экспериментальных исследований применены методы теории планирования эксперимента. Общим вектором работы являлся последовательный переход от теории к практике с последующей промышленной апробацией полученных результатов.

На защиту выносятся следующие положения:

1. Создание и использование математической модели, описывающей совместное функционирование системы «трубопровод погрузки – танкер – трубопровод отвода газовой фазы – УРП» и учитывающей нелинейность и нестационарность протекающих в ней процессов, позволяет решить комплексную задачу рационального отвода газовой фазы, образующейся при погрузке танкеров на морских нефтеналивных терминалах.

2. Режимы эксплуатации трубопроводов, исключаящие образование водных скоплений и конденсата, обеспечиваются выбором соответствующей критической скорости потока, определяемой с использованием зависимостей в виде критериальных уравнений, получаемых в результате физического и математического моделирования технологического процесса.

3. Внедрение новых научно обоснованных технических и технологических решений по проектированию и эксплуатации трубопроводов отвода газовой фазы и установок рекуперации паров позволяет повысить уровень ресурсосберегающего и безопасного функционирования трубопроводных систем морских нефтеналивных терминалов.

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 моделирования и соответствующих вычислительных мощностей позволило исследовать процессы в трубопроводах сложной конфигурации и технологическом оборудовании. Полученные результаты исследований в достаточной степени согласуются с экспериментальными данными, а также с аналогичными результатами отечественных и зарубежных авторов.

Апробация результатов диссертации за последние 10 лет проведена на 18 научно-практических мероприятиях с докладами, в том числе на 13 международных:

1. II Международная научно-техническая конференция молодежи ПАО «Транснефть» и организации-членов Международной ассоциации транспортировщиков нефти (ноябрь 2017 года, г. Москва). 2. Международный форум-конкурс молодых ученых «Проблемы недропользования» (18-20 апреля 2018 года, г. Санкт-Петербург). 3. XIII Международная учебно-научно-практическая конференция «Трубопроводный транспорт - 2018» (23-24 мая 2018 года, г. Уфа). 4. Всероссийская научно-практическая конференция с международным участием «Актуальные вопросы энергетики» (21 мая 2019 года, г. Омск). 5. Международная научно-

техническая конференция «Транспорт и хранение углеводородного сырья» (28-29 апреля 2021 года, г. Тюмень). 6. XVI Международная учебно-научно-практическая конференция «Трубопроводный транспорт - 2021» (17-18 ноября 2021 года, г. Уфа). 7. Международная научно-техническая конференция «Актуальные проблемы транспорта и хранения углеводородных ресурсов при освоении Арктики и Мирового Океана» (02-03 декабря 2021 года, г. Тюмень); 8. 76-ая Международная молодежная научная конференция «Нефть и газ - 2022» (25-29 апреля 2022 года, г. Москва). 9. Международная научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Новые технологии - нефтегазовому региону» (17-19 мая 2022 года, г. Тюмень). 10. Научно-техническая конференция «Цифровые технологии в добыче углеводородов: цифровая прозрачность» (3-7 октября 2022 года, г. Уфа). 11. Международная конференция «Рассохинские чтения» (02-03 февраля 2023 года, г. Ухта). 12. II Всероссийская научная конференция «Транспорт и хранение углеводородов - 2023» (5-6 апреля 2023 года, г. Санкт-Петербург). 13. Международная научно-техническая конференция «Актуальные проблемы транспорта и хранения углеводородных ресурсов при освоении Арктики и Мирового Океана» (07-08 ноября 2023 года, г. Тюмень). 14. XVI Всероссийская научно-техническая конференция «Проблемы разработки месторождений углеводородных и рудных полезных ископаемых» (7-10 ноября 2023 года, г. Пермь). 15. XVIII Международная научно-практическая конференция «Трубопроводный транспорт - 2023» (16-17 ноября 2023 года, г. Уфа). 16. III Международная научно-практическая конференция «Прорывные технологии в разведке, разработке и добыче углеводородного сырья» (22-24 мая 2024 года, г. Санкт-Петербург). 17. IV Всероссийская конференция «Прорывные технологии транспорта и хранения углеводородов (02-04 апреля 2025 года, г. Санкт-Петербург). 18. XX Международная научно-практическая конференция «Трубопроводный транспорт – 2025» (19–21 ноября 2025 года, г. Уфа).

Личный вклад автора. Автором проведен анализ отечественной и зарубежной научной литературы, рассмотрены

существующие проблемы в рамках эксплуатации трубопроводных систем морских нефтеналивных терминалов. Разработаны математические модели исследуемых процессов, проведена их строгая математическая оценка и обоснование. Организованы и спланированы теоретические и экспериментальные исследования. В выполнении экспериментов автор принимал участие лично. Выполнена промышленная апробация разработанных решений. По результатам работ разработаны нормативные документы, пригодные для применения в рамках деятельности отечественных и зарубежных нефтегазовых компаний и получившие необходимое экспертное заключение.

Публикации. Результаты диссертационного исследования в достаточной степени освещены в 52 печатных работах, в том числе в 13 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 11 статьях – в изданиях, входящих в международную базу данных и систему цитирования Scopus. Получено 4 патента на изобретение, 2 патента на полезную модель, 7 свидетельств о государственной регистрации программы для ЭВМ, 3 свидетельства о регистрации базы данных.

Структура работы. Диссертация состоит из оглавления, введения, 5 глав с выводами по каждой из них, заключения, списка сокращений и условных обозначений, списка литературы, включающего 327 наименований, и 27 приложений. Диссертация изложена на 416 страницах машинописного текста, содержит 126 рисунков и 79 таблиц.

Благодарности. Автор выражает благодарность своим бывшим коллегам из ООО «НТЦ «НИИ Транснефть», с которыми вместе начинал разрабатывать данную тематику и принимал участие в выполнении ряда крупных НИОКР в этой области. Кроме того, автор хотел бы выразить благодарность сотрудникам научного центра «Оценка техногенной трансформации экосистем» Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II за помощь в проведении экспериментов.

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 морских нефтеналивных терминалов в Российской Федерации и за рубежом. Установлено, что существенно изменившиеся условия (кратное увеличение грузопотоков, высокая интенсификация процессов, серьезное изменение конструкции танкеров и систем газоотвода, возросшие требования к промышленной и экологической безопасности) должны быть научно осмыслены и проанализированы с целью выдачи рекомендаций по повышению эффективности технологических процессов на морских терминалах.

Система «трубопровод погрузки – танкер – трубопровод отвода газовой фазы – установка рекуперации паров» является единым целым, ее работа должна быть описана соответствующими математическими моделями, которые базируются на анализе механизмов испарения наливных грузов и гидромеханических законах движения газовой и жидкой фазы. Установлено, что существующие математические модели процесса испарения нефти и нефтепродуктов не учитывают сложную специфику и нелинейность операций погрузки танкеров и иных транспортных емкостей и нуждаются в доработке. Трубопроводы подачи нефти на танкер и отвода газовой фазы работают в осложненных условиях, которые определяются спецификой конкретного терминала. Рациональный подход к изучению способов борьбы с осложнениями позволит повысить эффективность их эксплуатации. В этих целях следует разработать соответствующие гидромеханические модели их функционирования. Таким образом, комплексное исследование и управление функционированием системы трубопроводов на основе установленных законов позволяет рационально управлять процессом эксплуатации трубопроводных систем морского нефтеналивного терминала.

Во второй главе на основе анализа процессов, происходящих при заполнении танкера, была создана математическая модель вытеснения газовой смеси. Показано, что для описания динамики изменения давления в газовом пространстве танкера наиболее рационально использовать нелинейное дифференциальное уравнение, полученное автором. Данное уравнение является фундаментом, на основе которого автором решено большое количество ранее поставленных задач, связанных с трубопроводами отвода газовой фазы и установками рекуперации паров. Были предложены пути решения полученного уравнения, оценена его устойчивость и решены следующие частные задачи погрузки нефти на танкер: определен коэффициент превышения, составлены критериальные уравнения для определения времени достижения максимального давления при погрузке и максимальный коэффициент превышения; дана оценка общему объему ГВС, вытесненной из танкера за одну операцию погрузки; представлено решение задачи о законе роста давления для случая линейно растущего объемного расхода закачки; получено решение для частного случая перегрузки с танкера на танкер; решена задача о параметрах отвода ГВС при наполнении цистерн на железнодорожных эстакадах морских терминалов.

В третьей главе представлены результаты экспериментальных исследований, проведенные при участии автора на действующих морских терминалах, осуществляющих деятельность по погрузке в танкеры нефти и нефтепродуктов. Предложены способы решения обратных задач в целях оценки фактических параметров массоотдачи наливных грузов. Установлено, что предложенные во второй главе модели удовлетворительно согласуются с экспериментальными данными. Проанализированы особенности работы различных типов реально эксплуатируемых УРП и предложены пути по повышению эффективности их работы, которые позволили увеличить количество уловленных углеводородов из ГВС и сократить энергозатраты на 20...30%. Сформулированы предложения по технической модернизации существующих систем, повышению их контролепригодности и эффективности.

В четвертой главе в рамках системного осмысления процессов эксплуатации трубопроводов морских терминалов при наличии осложнений в виде водных скоплений проведен анализ существующих научных подходов к вопросам их удаления потоком перекачиваемого продукта. Установлено, что существующие модели в большинстве случаев дают завышенные оценки для критической скорости выноса, имеют противоречия и поэтому нуждаются в уточнении. На основе современных представлений теории турбулентности и многофазной гидродинамики составлена физико-математическая модель для изучения процессов выноса водных скоплений из трубопроводов. Данный подход был всесторонне исследован с точки зрения определения подходящей модели турбулентности, получения сетконе зависящего решения, а также точной настройки параметров. Полученная модель апробирована на экспериментальных данных, полученных на специализированном стенде НТЦ ООО «НИИ Транснефть». Полученные результаты свидетельствуют о высокой точности модели. Предложенная модель позволила разработать программное обеспечение по определению водных скоплений по профилю трассы нефтепровода.

В пятой главе в рамках проведенного анализа по технологическим аспектам эксплуатации трубопроводов отвода газовой фазы на морских терминалах даны общие рекомендации по повышению эффективности их работы, что нашло отражение в разработанном автором отраслевом стандарте СТО ИНТИ S.40.32 «Установка рекуперации паров нефти/нефтепродуктов. Общие технические требования», который получил положительные экспертные заключения большинства нефтегазовых компаний и крупного отраслевого НТЦ. Решены задачи выбора диаметра трубопровода отвода газовой фазы и рационального размещения УРП. В рамках опытно-конструкторской работы изготовлено робототехническое устройство для проведения инспекций надземных технологических трубопроводов сложной пространственной конфигурации, работающее в диапазоне диаметров от DN50 и выше. Эффективность устройства подтверждена заказчиком работ ОКР, а также результатами стендовых и промышленных испытаний с оформлением

соответствующих протоколов. Использование устройства для обследования труднодоступных участков надземных трубопроводов и металлоконструкций позволит повысить промышленную безопасность и снизить стоимость выполнения данного вида работ.

В заключении обобщены результаты проведенного диссертационного исследования и сформулированы рекомендации по их дальнейшему использованию и развитию.

Основные результаты отражены в следующих защищаемых положениях:

1. Создание и использование математической модели, описывающей совместное функционирование системы «трубопровод погрузки – танкер – трубопровод отвода газовой фазы – УРП» и учитывающей нелинейность и нестационарность протекающих в ней процессов, позволяет решить комплексную задачу рационального отвода газовой фазы, образующейся при погрузке танкеров на морских нефтеналивных терминалах.

Существующие модели испарения нефти и вытеснения газозоудшной смеси при операциях погрузки транспортньх емкостей не в полном объеме отвечают фактическим характеристикам существующих процессов. Особенно данное обстоятельство характерно для операций погрузки танкеров. С момента последних крупных работ в рамках научного осмысления данных процессов произошли существенные изменения: 1) кратно увеличился объем судов танкерного флота (так, например, объем наиболее распространенного танкера класса Aframax составляет порядка 120 000 м³ против 4000 м³ в классической работе Константинова Н.Н.); 2) в рамках модернизации портовой инфраструктуры начали активно внедряться установки рекуперации паров нефти/нефтепродуктов (ранее почти всегда сброс газозоудшной смеси осуществлялся напрямую в атмосферу, за рубежом – на факельное устройство); 3) появились протяженные трубопроводы отвода газовой фазы (вплоть до 1500 м), связывающие установки рекуперации с танкером; 4) среди крупных промышленных предприятий появилось осознание стратегической значимости процессов ресурсосбережения и обеспечения экологической безопасности.

Разработка модели вытеснения газовой смеси при операциях погрузки танкеров является важнейшей задачей в целях заложения научного фундамента под дальнейшие решения сопряженных инженерно-технических задач.

Рассмотрим процесс заполнения танкера наливным грузом в морском порте с контролируемым отводом газовой смеси (далее – ГВС). В процессе заполнения танкера в него поступает нефть с некоторым расходом Q_3 , следовательно, объем газового пространства танкера сокращается, при этом растет давление внутри танков P . Рост давления вызван не только изменением объема газового пространства (далее – ГП), но и насыщением ГП парами испаряющейся нефти. Под действием перепада давления между танкером и конечной точкой трубопровода (давление в которой P_K), отводящего газовую фазу, возникает движение ГВС с расходом $Q_{ГВС}$. В том случае, если отводящий газовую фазу трубопровод в силу своих характеристик не способен пропустить образующий объем ГВС, на танкере в целях исключения аварийного повышения давления открывается мастрайзер или специальные сбросные устройства. На рисунке 1 представлена принципиальная схема процесса налива танкера с учетом распределения потоков углеводородов.

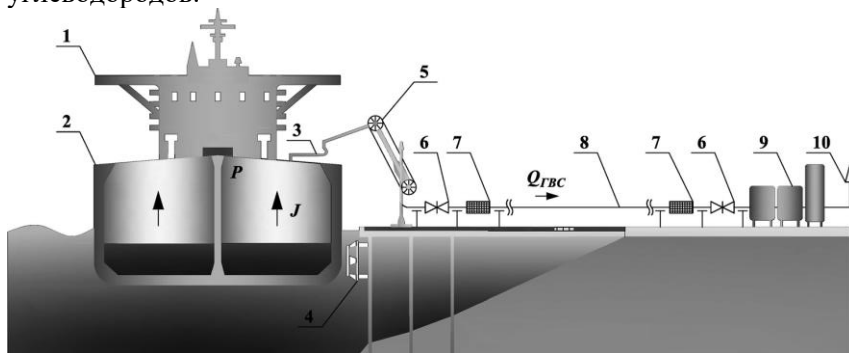


Рисунок 1 – Принципиальная схема процесса налива танкера:
 1 – танкер; 2 – двойной корпус; 3 – узел регулируемого выпуска паров; 4 – узел защиты причальных сооружений; 5 – стендер отвода газовой фазы; 6 – запорно-регулирующая арматура; 7 – детонационный преградитель; 8 – трубопровод отвода газовой фазы; 9 – установка рекуперации паров; 10 – свеча рассеивания

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

Выражая текущее значение объема газового пространства танкера, а также, замечая, что в уравнении (1) изменение объема по времени равно расходу закачки, взятому с обратным знаком, что означает $\frac{dV}{dt} = -Q_3$, получим (2)

$$\frac{dP}{dt} \cdot \left(\frac{V_{\text{нач}} - Q_3 \cdot t}{R \cdot T} \right) + \left(-\frac{Q_3}{R \cdot T} \right) \cdot P = \frac{dG}{dt}, \quad (2)$$

где $V_{\text{нач}}$ – начальный объем газового пространства танкера, м³; Q_3 – объемный расход закачки нефти в танкер, м³/ч.

Изменение массы ГВС в газовом пространстве танкера в уравнении (2) определяется как разница между массой, поступившей в газовое пространство в результате испарения в единицу времени, и массовым расходом газовой фазы, которая отводится по трубопроводу на УРП (3)

$$\frac{dG}{dt} = J \cdot F - \frac{S \sqrt{P^2 - P_K^2}}{\sqrt{R \cdot T} \cdot \sqrt{2 \cdot \ln\left(\frac{P}{P_K}\right) + \lambda \cdot \frac{L_{\text{эф}}}{D}}}, \quad (3)$$

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

Введем следующие безразмерные параметры (4)

$$y = \frac{P}{P_K}; \psi = \frac{J_H \cdot F \cdot R \cdot T}{Q_3 \cdot P_K}; \theta = \frac{Q_3 \sqrt{\lambda \cdot \frac{L_{\text{эф}}}{D}}}{S \sqrt{R \cdot T}}; \tau = \frac{t}{\tau_{\text{зак}}}. \quad (4)$$

Безразмерные параметры имеют следующий физический смысл: y – представляет собой безразмерное отношение давлений; ψ – характеризует величину вклада испарения в общую динамику роста давления в газовом пространстве танкера; θ – характеризует величину вклада гидравлических сопротивлений в динамику роста давления в газовом пространстве танкера; τ – безразмерное время операции погрузки. Окончательно, после подстановки безразмерных параметров из формул (4), с учетом большого количества допущений (их обоснованность подробно рассмотрена в полном тексте диссертации), получаем обобщенное дифференциальное уравнение в безразмерных параметрах для изучения динамики роста давления в ГП танкера (5)

$$\frac{dy}{d\tau} \cdot (1 - \tau) = y + \psi \cdot (1 - (1 - \xi) \cdot \tau^2) - \frac{\sqrt{y^2 - 1}}{\theta}. \quad (5)$$

В данном уравнении впервые установлена взаимосвязь между основными факторами, влияющими на процесс вытеснения газоздушной смеси из наполняемой емкости.

Данное уравнение является нелинейным дифференциальным уравнением первого порядка. Несмотря на то, что в диссертации предложены способы его аналитического решения, в силу неудобства их практического применения предлагается воспользоваться хорошо известным численным методом Рунге-Кутты-Фельберга 4-5 порядков. На рисунке 2 приведен характерный вид графика решения уравнения (5) при различных значениях параметра Ψ , при $\theta = 0,3$ и $\xi = 0,8$. Наиболее примечательным является наличие экстремума, который и определяет максимальное давление внутри танкера. Данное обстоятельство нашло свое подтверждение на практике.

В рамках исследований была проведена серия промышленных экспериментов в целях исследования фактических параметров работы трубопроводных систем отвода газовой фазы и УРП. Опыты проводились на базе морского нефтеналивного

терминала в бухте Козьмина и на территории частного терминала в г. Санкт-Петербург (основной продукт – бензин АИ-95). Подробно эти эксперименты и их результаты рассмотрены в диссертации. В автореферате в качестве примера приведем результаты, полученные при погрузке танкера класса Aframax (в таблицах 1 и 2 приведены параметры и результаты промышленных экспериментов).

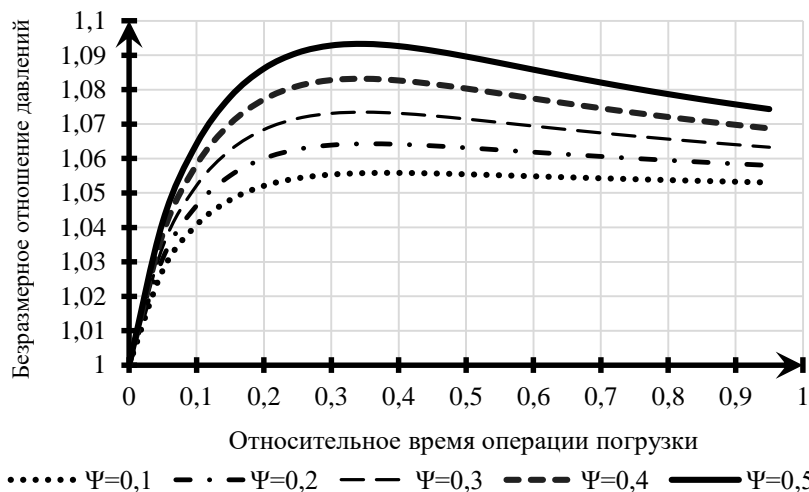


Рисунок 2 – График изменения безразмерного отношения давлений при различных значениях параметра Ψ , при $\theta = 0,3$ и $\varepsilon = 0,8$

Наибольшую сложность представляет определение закона изменения интенсивности массоотдачи с поверхности испаряющегося продукта в процессе погрузки танкера. В этих целях в работе использована методология структурной минимизации среднего риска, впервые предложенная А.Х. Мирзаджанзаде для задач в области реологии, для которых также характерна неопределенность. Теоретические аспекты применения подобных методов были обоснованы в работах академика А.Н. Тихонова.

На рисунке 3 приведено изменение массоотдачи испаряющейся нефти в ходе операции погрузки танкера по экспериментальным данным. Из рисунка 3 виден квадратичный характер убывания плотности потока массы испаряющейся нефти в ходе операции налива, что объясняется уменьшением движущей

силы процесса испарения по мере насыщения ГП грузовых танков. Используя полученное соотношение для моделирования динамики роста давления в газовом пространстве танкера по уравнению (5), получены результаты, представленные на рисунке 4. Из него видно, что при помощи предложенного метода удалось достаточно точно спрогнозировать динамику роста давления в газовом пространстве танкеров: среднеквадратичная погрешность не превышает 700 Па, причем существенная ее доля приходится на переходные режимы. Важность подобного рода моделирования состоит в следующем: за счет обеспечения гармонизации работы газоотводных систем танкера и технологического оборудования УРП как на стадии проектирования, так и на стадии эксплуатации, представляется возможным минимизировать продолжительность открытия мастрейзера, что в конечном итоге благоприятно сказывается как на безопасности, так и на экологичности операций погрузки.

2. Режимы эксплуатации трубопроводов, исключаящие образование водных скоплений и конденсата, обеспечиваются выбором соответствующей критической скорости потока, определяемой с использованием зависимостей в виде критериальных уравнений, получаемых в результате физического и математического моделирования технологического процесса.

Упрощенно условную схему движения потоков жидкой и газовой фазы с образованием осложнений в виде водных скоплений на морском терминале иллюстрирует рисунок 5. Процесс эксплуатации трубопроводов естественным образом в рамках их жизненного цикла сопряжен с рядом осложнений, к числу которых относится образование скоплений воды и конденсата в пониженных точках профиля трассы. Появление воды в трубопроводных системах морских терминалов связано со следующими причинами: 1) некачественная осушка после гидроиспытаний (новое строительство, реконструкции, ремонтные работы); 2) естественное наличие небольшого количества воды в транспортируемом продукте; 3) технологические инциденты (например, прорыв теплообменников, паропроводов-спутников и т.п.); 4) интенсивная откачка продукта из резервуаров с увлечением подтоварной воды потоком 5) поступление

воды из подающего нефтепровода или продуктопровода и недостаточное время статического отстоя; б) для терминалов, у которых отсутствует резервуарный парк (перекачка напрямую с ж/д цистерн или с плавучего судна-накопителя), вода может уже содержаться в подаваемом продукте.



Рисунок 5 – Условная схема движения потоков жидкой и газовой фазы при выполнении товарно-транспортных операций при погрузке танкеров

Наличие водных скоплений в полости трубопроводов создает дополнительное гидравлическое сопротивление, ведущее к увеличению энергозатрат на перекачку, вызывает проблемы с учетом нефти/нефтепродукта при инвентаризации, ведет к ускорению коррозии внутренней поверхности трубы. Известны случаи, когда в грузовых трубопроводах при их значительной протяженности наблюдались ледяные пробки. Помимо рассмотренного выше случая, скопления воды могут наблюдаться на рельефных участках трубопроводов, подающих нефть/нефтепродукт в морской терминал. Наиболее характерные примеры — это терминал Шесхарис и терминал Каспийского трубопроводного консорциума, для которых особенно сильна роль рельефа местности.

Появление конденсата наблюдается и в трубопроводах отвода газовой фазы из танкеров. Трубопроводы отвода газовой фазы, как

правило, не имеют специальной тепловой изоляции. Газовоздушная смесь, выходящая из танкера, имеет повышенную температуру, и в зимнее время за счет интенсивного охлаждения происходит конденсация некоторых фракций нефти/нефтепродукта и воды на нижней образующей отводящего газовую фазу трубопровода. Особенно это характерно для протяженных систем отвода газовой фазы. Несмотря на то что в нормативной документации присутствуют указания о том, что трубопроводы газовой фазы должны прокладываться с уклоном к каплеотбойнику, полностью реализовать это требования на большинстве терминалов невозможно: присутствуют переходы между уровнями технологических эстакад трубопроводов, компенсационные вставки в вертикальной плоскости и иные проектные решения, способствующие накоплению воды и конденсата в проблемных точках (наиболее сложным случаем является отвод 90 градусов).

Были проведены серии экспериментов (силами НТЦ ООО «НИИ Транснефть», г. Уфа) по изучению гидродинамических параметров выноса водных скоплений из пониженных участков профиля трассы нефтепровода на базе специализированного стенда (рисунок 6). Номинальный диаметр трубопровода на экспериментальном стенде – 100 мм, перекачиваемая среда – трансформаторное масло, регулируемый угол наклона составляет от 1 до 70 градусов.



Рисунок 6 – Общий вид стенда с изменяемым профилем

На основе проведенных опытов при участии автора были верифицированы методы гидродинамического моделирования,

позволившие достаточно точно предсказать параметры выноса водных скоплений при переходе на диаметры, превышающие стендовые условия (вплоть до DN1200). Для моделирования использовалось специализированное программное обеспечение Ansys Fluent. В рамках основного метода описания двухфазного потока использован метод контрольных объемов (*VOF*). Для каждого отдельного элемента решалось уравнение движения (6)

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\mu(\nabla \vec{v} + \nabla \vec{v}^T)) + \rho \vec{g} + \vec{F}, \quad (6)$$

где \vec{v} – вектор скорости, м/с; μ – динамическая вязкость, Па·с; ρ – плотность, кг³/м; ∇ – векторный оператор Гамильтона; \vec{g} – ускорение свободного падения, м/с²; \vec{F} – внешние силы, Н/м³; p – давление, Па.

В работе была использована стандартная *k-ε* модель турбулентности, которая описывается уравнением переноса кинетической энергии турбулентности *k* и скорости ее диссипации *ε*. На рисунке 7 показан характерный вид течения по результатам моделирования.

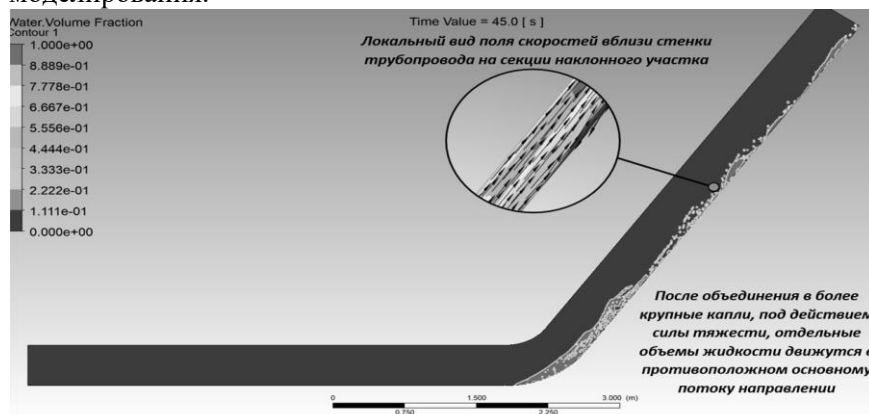


Рисунок 7 – Распределение фаз и характерный вид поля скоростей

Было спланировано 625 вычислительных экспериментов (параметры планирования представлены в таблице 4). В дальнейшем их число было сокращено в соответствии с принципами теории планирования экспериментальных исследований. Было предложено

уточнить K_B в известной формуле для критической скорости выноса водного скопления из пониженных участков (7)

$$W_{\text{вын}} = K_B \sqrt{\frac{g \cdot d \cdot \left(\frac{\rho_B}{\rho_H} - 1\right) \cdot \sin \alpha}{\lambda}}, \quad (7)$$

где K_B – эмпирический коэффициент, безразмерный.

Исходя из положений теории подобия, установлено, что эмпирический коэффициент может быть описан критериальной зависимостью вида $K_B = f(Bo, Ar, \sin \alpha)$, где Bo – число Бонда (характеризует соотношение между объемными силами, действующими в жидкости, и силами поверхностного натяжения), Ar – число Архимеда (характеризует соотношение между архимедовой силой и силами вязкости в потоке жидкости), определяемые соответственно по формулам (8)

$$Bo = \frac{g \cdot d^2 \cdot \Delta \rho}{\sigma}; \quad Ar = \frac{g \cdot d^3 \cdot \rho_H \cdot \Delta \rho}{\mu^2}. \quad (8)$$

При помощи методов нелинейной регрессии, в частности, с использованием алгоритма Левенберга-Марквардта, получены критериальные уравнения для различных диапазонов углов восходящего участка. В ходе обработки данных вычислительного эксперимента для диапазона больших углов ($25^\circ \leq \alpha \leq 70^\circ$) при помощи метода множественной нелинейной регрессии была получена формула для поправочного коэффициента в формуле выносной скорости вида (9)

$$K_B = 0,700 \cdot Bo^{0,019} \cdot Ar^{-0,079} \cdot \sin \alpha^{-0,367}. \quad (9)$$

В ходе обработки данных вычислительного эксперимента для диапазона малых углов ($1^\circ \leq \alpha \leq 8^\circ$) при помощи метода множественной нелинейной регрессии была получена формула для поправочного коэффициента в формуле выносной скорости вида (10)

$$K_B = 0,510 \cdot Bo^{0,147} \cdot Ar^{-0,112} \cdot \sin \alpha^{-0,122}. \quad (10)$$

В промежуточной зоне коэффициенты допустимо определять путем интерполяции. Сравнение результатов расчетов по предложенной модели с расчетами по методикам сторонних авторов приведены в таблице 5. Часть результатов в рамках сравнения с

экспериментальными данными приведена в таблице 6, более подробное сопоставление приведено в полном тексте диссертации (в том числе с наиболее значимыми зарубежными данными). С использованием полученных формул был разработан программный комплекс, который позволяет выявлять на профиле нефтепровода потенциально опасные участки и прогнозировать максимальный объем воды, содержащейся в них при заданных параметрах потока. Это позволяет выбирать режимы, при которых возможно устранение водных скоплений из пониженных точек профиля трассы нефтепровода (рисунок 8), что способствует не только снижению риска коррозионных повреждений, но и повышению гидравлической эффективности перекачки.

3. Внедрение новых научно обоснованных технических и технологических решений по проектированию и эксплуатации трубопроводов отвода газовой фазы и установок рекуперации паров позволяет повысить уровень ресурсосберегающего и безопасного функционирования трубопроводных систем морских нефтеналивных терминалов.

Для трубопроводных систем морских терминалов характерна значительная протяженность, сложность пространственной конфигурации, сильно выраженная специфика технологических аспектов эксплуатации. Несмотря на имеющиеся нормативные подходы к проектированию и эксплуатации таких систем, многие проблемные вопросы остаются раскрытыми не в полной мере. Отсутствует единый подход к борьбе с технологическими осложнениями (скоплениями воды, конденсата, механическими примесями), внепроектными режимами работы оборудования, а также в практике проектирования достаточно часто встречаются концептуально необоснованные решения по выбору оборудования и трассировке трубопроводов. Данное обстоятельство обусловлено широко применяемой практикой использования технологических решений по образцу проектов-аналогов без учета специфики конкретного терминала. Для трубопроводов отвода газовой фазы на УРП остро стоит вопрос определения диаметра, исключающего сброс ГВС в атмосферу, а также рационального расположения УРП. В настоящее время газоотводные системы терминалов могут иметь

протяженность до 1,5 км и достаточно сложный профиль трассы (рисунок 9).

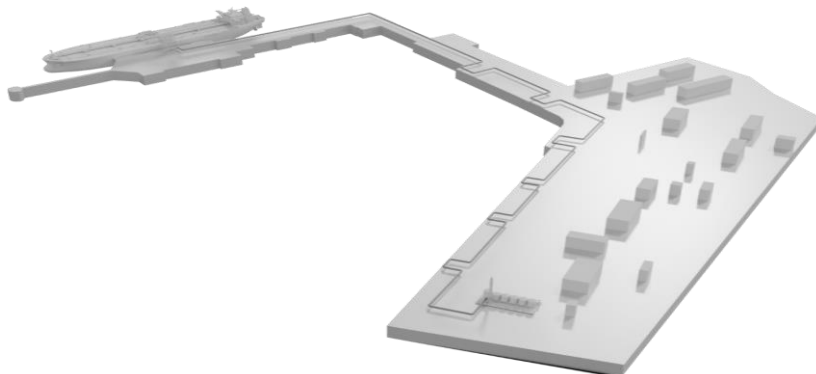


Рисунок 9 – Общая схема газоотвода на примере морского нефтеналивного терминала в бухте Козьмина (толстой линией показана трассировка трубопровода отвода газовой фазы)

На основе разработанной автором общей модели вытеснения газозвдушной смеси при операциях погрузки танкеров были решены следующие задачи: определение диаметра трубопровода отвода газовой фазы и определение рациональной области размещения УРП. Диаметр трубопровода отвода газовой фазы допустимо определять по формуле (11)

$$D = \beta^{5,25} \sqrt{\frac{Q_s^2 \cdot L_{\text{эф}}}{R \cdot T}} \cdot (1,133 + \psi)^2, \quad (11)$$

где β – поправочный коэффициент, который с учетом 10 % запаса равен 0,67. Критерием выбора диаметра является недопущение стравливания избыточной ГВС в атмосферу. Формулу можно использовать только в случае, когда газодувка предназначена для компенсации потерь давления в обвязке УРП.

Очевидно, что наиболее простым критерием размещения УРП является минимизация длины трубопровода отвода газовой фазы с учетом имеющейся инфраструктуры. Рассмотрим, однако, более сложный вопрос, который также часто встречается на практике: каким должна быть длина трубопровода отвода газовой фазы, чтобы образующаяся ГВС могла достигать УРП самотеком?

Ответ на этот вопрос не только позволит отказаться от дорогостоящих взрывозащищенных газодувок, но и уменьшить последствия эксплуатационных осложнений. По результатам анализа общей модели установлено, что такая длина составит (12)

$$L_{min} = \frac{(y_{max}^2 - 1)}{K_{max}^2} \cdot \left(\frac{\pi^2 D^5 \cdot RT}{16 \lambda \cdot Q_3^2} \right), \quad (12)$$

где y_{max} следует принимать при максимальном значении настройки прерывателя вакуума; K_{max} – максимальный коэффициент превышения, безразмерный.

На основе проведенных исследований разработан и внедрен в использование нормативный документ национального уровня СТО.ИНТИ S.40.32 «Установки рекуперации паров. Общие технические требования», получивший положительную экспертную оценку большинства нефтегазовых компаний РФ. При разработке учитывался мировой опыт проектирования и эксплуатации подобных установок, что нашло отражение в собранной базе данных по морским терминалам.

В рамках диссертации были проведены опытно-конструкторские работы по разработке устройства, позволяющего оценивать состояние внешней поверхности трубопроводов и металлоконструкций на труднодоступных участках, находящихся на высоте. Были разработаны решения по стенду для проведения испытаний устройства, для этого была собрана база данных типовых препятствий трубопроводов. Испытательный стенд включает в себя три участка трубопроводов из труб номинальным диаметром DN50, DN100, DN200, имеющих вертикальные и горизонтальные углы поворотов, а также распространенные варианты препятствий. В результате было разработано устройство (рисунки 10 и 11), которое успешно прошло промышленные испытания на нескольких трубопроводах номинальными диаметрами от DN100 до DN150. Параметры устройства и станции управления приведены в таблицах 6 и 7 соответственно. За счет дистанционного обследования исключаются риски производственного травматизма при работе на высоте. Повышение информативности обследований позволяет повысить уровень промышленной безопасности. Наличие модуля

обнаружения микроутечек газа и паров углеводородов позволяет выявлять потенциальные опасности и превентивно их устранять.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании выполненных автором экспериментальных и аналитических исследований разработан комплекс технико-технологических решений, обеспечивающих безопасное и ресурсосберегающее функционирование трубопроводных систем морских нефтеналивных терминалов, что имеет существенное значение для развития нефтегазовой отрасли на текущем этапе.

В рамках выполнения диссертационной работы достигнуты следующие основные результаты:

1. На основе проведенного анализа теории и практики функционирования морских нефтеналивных терминалов установлено, что повысить эффективность их эксплуатации возможно путем реализации системного подхода, заключающегося в научно обоснованном выборе режимов эксплуатации трубопроводных систем, основанном на экспериментально установленных зависимостях, а также результатах моделирования гидродинамических параметров процессов.

2. Теоретически и экспериментально подтверждена математическая модель вытеснения газозооной смеси из внутреннего пространства танкера. Показано, что нелинейность и нестационарность протекающих процессов существенно влияет на их режимные параметры, а их определение можно уточнить путем решения обратных задач.

3. На основе проведенных экспериментальных исследований подтверждены возможности математической модели в части решения прикладных задач по отводу газовой фазы при погрузке танкера, что позволило существенно снизить выбросы в атмосферу и повысить безопасность процесса.

4. Установлено, что режимы эксплуатации установок рекуперации паров в значительной степени зависят от режимов работы трубопроводной системы, что в свою очередь позволило обосновать комплекс подходов по повышению эффективности функционирования УРП на различных объектах налива нефти и нефтепродуктов.

5. Предложен комплекс научно-технических рекомендаций

по рациональному отводу и рекуперации паров на морских нефтеналивных терминалах, нашедший отражение в разработанном нормативном документе СТО.ИНТИ S.40.32 «Установки рекуперации паров. Общие технические требования». Научно обоснованные требования, в рамках разработанного документа, позволяют снизить количество технологических осложнений, повысить безопасность и эффективность эксплуатации установок рекуперации паров.

6. Разработанные методики определения диаметра трубопровода отвода газовой фазы и рационального расположения установки рекуперации паров позволяют минимизировать риск выброса углеводородов в атмосферу и существенно снизить капитальные и эксплуатационные затраты.

7. Разработаны алгоритмы управления, позволяющие на 30-50 % повысить эффективность эксплуатации УРП в части энергопотребления вакуумных насосов, а также достичь экономии топлива до 7% при перевалке с танкера на танкер.

8. Выбор рациональных режимов эксплуатации трубопроводов жидкой и газовой фазы возможен на базе разработанной математической модели, основанной на критериальных уравнениях. Полученные с использованием методов вычислительной гидромеханики результаты, а также их последующая апробация на специализированном стенде позволили теоретически обосновать режимы, исключающие возможность образования осложнений в виде водных скоплений и конденсата.

9. Разработана технология мониторинга надземных трубопроводов и объектов портовой инфраструктуры с использованием разработанного робототехнического устройства. Результаты работы подтверждены стендовыми и промышленными испытаниями. Использование предложенной технологии позволяет повысить уровень промышленной безопасности при эксплуатации трубопроводных систем морских терминалов, а также снизить риски производственного травматизма.

10. Полученный комплекс вычислительных программ для расчета газодинамических процессов «танкер – установка рекуперации паров» и соответствующие рекомендации по моделированию

внедрены в учебный процесс двух университетов, специализирующихся на подготовке выпускников для нефтегазового комплекса: федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет», федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II».

Перспективным направлением дальнейших исследований является углубленное изучение гидрогазодинамических и массообменных процессов, происходящих при различных товарно-транспортных операциях на морских нефтеналивных терминалах. Разработка новых видов техники и научно обоснованных технологий в целях безопасного и экологичного функционирования морских нефтеналивных терминалов позволит обеспечить устойчивое развитие нефтяной отрасли. Отдельно необходимо подчеркнуть важность создания отечественных установок рекуперации паров нефти и нефтепродуктов, учитывающих специфику морских терминалов различного типа. На государственном уровне следует уделять отдельное внимание развитию и модернизации портовой инфраструктуры, и внедрению новых технологических решений, основанных на отечественных разработках.

СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях из Перечня ВАК:

1. Коршак, А.А. Теоретические основы метода выноса скоплений жидкости из многониточных газопроводов потоком перекачиваемого газа / А.А. Коршак, М.Е. Усольцев, **В.В. Пшенин** // Электронный научный журнал Нефтегазовое дело. – 2012. – № 2. – С. 103-113.

2. Коршак, А.А. Удаление скоплений жидкости из магистральных газопроводов / А.А. Коршак, М.Е. Усольцев, **В.В. Пшенин** // Электронный научный журнал Нефтегазовое дело. – 2015. – № 5. – С. 290-335.

3. Коршак, А.А. Условия выноса жидкостных скоплений из магистральных газопроводов / А.А. Коршак, М.Е. Усольцев,

В.В. Пшенин // Наука и техника в газовой промышленности. – 2016. – № 2(66). – С. 66-69.

4. **Пшенин, В.В.** Моделирование газодинамических процессов при наливке танкеров / **В.В. Пшенин**, М.Т. Гайсин // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2017. – № S28. – С. 3-12.

5. Дмитриев, М.Е. Определение относительного расхода газовой фазы при заполнении танкеров / М.Е. Дмитриев, К.К. Садреева, **В.В. Пшенин**, М.Т. Гайсин // Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья. – 2019. – № 1. – С. 10-13.

6. Иванов, А.И. Сравнительная оценка методов определения параметров эмиссии углеводородов на объектах налива, оборудованных установками рекуперации паров / А.И. Иванов, К.К. Садреева, **В.В. Пшенин**, М.Т. Гайсин // Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья. – 2019. – № 2. – С. 5-8.

7. Коршак, А.А. Влияние эксплуатационных факторов на работу адсорбционных установок рекуперации паров нефти / А.А. Коршак, Н.А. Выходцева, М.Т. Гайсин, А.А. Коршак, **В.В. Пшенин** // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2019. – Т. 9, № 5. – С. 550-557.

8. **Пшенин, В.В.** Моделирование процесса вытеснения нефтяных паров при наливке железнодорожных цистерн / **В.В. Пшенин**, Н.А. Зарипова, А.К. Николаев // Территория Нефтегаз. – 2019. – № 6. – С. 78-82.

9. Коршак, А.А. Методика прогнозирования степени улавливания паров углеводородов при абсорбции / А.А. Коршак, А.В. Николаева, А.С. Нагаткина, М.Т. Гайсин, А.А. Коршак, **В.В. Пшенин** // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2020. – Т. 10, № 2. – С. 202-209.

10. **Пшенин, В.В.** Критериальное уравнение для определения времени достижения максимального коэффициента превышения при погрузке танкеров / **В.В. Пшенин**, Г.С. Закирова, А.А. Антонов, А.А. Скоробогатов // Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья. – 2022. – № 3-4. – С. 72-75.

11. **Пшенин, В.В.** Определение общего объема вытесненной газозоудушной смеси за одну операцию погрузки танкера /

В.В. Пшенин, Г.С. Закирова, А.А. Антонов, А.А. Скоробогатов // Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2022. – № 5(139). – С. 122-128.

12. **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. – Т. 20, № 5. – С. 134-139.

13. Коршак, А.А. Повышение эффективности эксплуатации магистральных трубопроводов в рамках проведения высокотехнологичных научных исследований / А.А. Коршак, Т.И. Безымянников, **В.В. Пшенин**, М.З. Ямилев // Энергетическая политика. – 2024. – № 5(196). – С. 60-67.

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

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

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

16. 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.

17. Ямилев, М.З. Использование компактных инспекционных приборов для контроля технического состояния трубопроводов в защитных футлярах / М.З. Ямилев, **В.В. Пшенин**, Д.С. Матвеев [и др.] // Нефтяное хозяйство. – 2022. – № 2. – С. 106-111.

18. **Pshenin, V.** Robot Crawler for Surveying Pipelines and Metal Structures of Complex Spatial Configuration / **V. Pshenin**, A. Liagova, A. Razin [et al.] // Infrastructures. – 2022. – Vol. 7, No. 6. – 20 p.

19. Коршак, А.А. Моделирование выноса водных скоплений из нефтепроводов методами вычислительной гидродинамики /

А.А. Коршак, **В.В. Пшенин** // Нефтяное хозяйство. – 2023. – № 10. – С. 117-122.

20. Коршак, А.А. Определение параметров безнасосной эжекторной установки рекуперации паров бензина / А.А. Коршак, **В.В. Пшенин** // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2023. – Т. 13, № 1. – С. 25-31.

21. **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. – Т. 14, № 2. – С. 120-127.

22. **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. – Т. 265. – С. 121-128.

23. Skorobogatov, A.A. Multiphase Oil-water Flow in Horizontal and Inclined Pipelines. Effect of Flow Velocity on Flow Patterns / A.A. Skorobogatov, **V.V. Pshenin**, С.Р. Tsvetkova, R.A Borisov. // International Journal of Engineering, Transactions B: Applications. – 2025. – Vol. 38, No.8. – P. 1820-1830.

24. **Pshenin, V.V.** Determination of Parameters of Rational Placement of Oil and Petroleum Product Vapor Recovery Unit / **V.V. Pshenin** // International Journal of Engineering, Transactions B: Applications. – 2025. – Vol. 38, No. 2. – P. 362-367.

Патенты/свидетельства на объекты интеллектуальной собственности:

25. Патент на изобретение № 2778619 Российская Федерация, МПК *G01N 29/265 (2006.01)*. Устройство для мониторинга технического состояния металлоконструкций и трубопроводов. Заявка № 2022107148: заявл. 18.03.2022: опубл. 22.08.2022/ **В.В. Пшенин**, Д.О. Нагоров, Т.Н. Гамидов; заявитель/патентообладатель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет». – 12 с.: ил.

26. Патент на изобретение № 2484358 Российская Федерация, МПК *F16L 55/24 (2006.01)*, *B08B 3/12 (2006.01)*, *B08B 9/02 (2006.01)*. Устройство для устранения скоплений жидкости или газа из

проблемных участков газонефтепроводов. Заявка № 2011151954/06: заявл. 19.12.2011: опубл. 10.06.2013 / А.А. Коршак, М.Е. Усольцев, **В.В. Пшенин**, С.В. Самоленков; заявитель/патентообладатель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный горный университет». – 5 с.: ил.

27. Патент на изобретение № 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.

28. Патент на изобретение № 2842780 Российская Федерация, МПК *F16L 55/32 (2006.01)*. Роботизированный комплекс дистанционного мониторинга газопроводов. Заявка №2024138501: заявл. 18.12.2024: опубл. 01.07.2025 / **В.В. Пшенин**, Д.О. Нагорнов, В.А. Матвеева; заявитель/ патентообладатель Акционерное общество "Газпром газораспределение". – 10 с.: ил.

29. Патент на полезную модель № 216457 Российская Федерация, СПК *G01N 27/22 (2023.01)*. Устройство для определения скоплений воды в трубопроводе. Заявка № 2022134221: заявл. 26.12.2022: опубл. 07.02.2023/ **В.В. Пшенин**, Э.Р. Джемилев, М.С. Комаровский; заявитель/патентообладатель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет». – 9 с.: ил.

30. Патент на полезную модель № 216465 Российская Федерация, СПК *G01N 23/083 (2023.01)*. Устройство для определения скоплений воды в трубопроводе. Заявка № 2022134396: заявл. 27.12.2022: опубл. 07.02.2023 / **В.В. Пшенин**, Э.Р. Джемилев, Л.Р. Розанова; заявитель/патентообладатель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет». – 9 с.: ил.

31. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022616881 Российская Федерация.

Программа для обработки данных на наличие коррозионных повреждений и их обнаружения с помощью сверточной нейронной сети. Заявка № 2022615229 : заявл. 30.03.2022: опубл. 18.04.2022 / **В.В. Пшенин**, А.Д. Разин, Г.С. Закирова; заявитель/правообладатель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет». – 943 МБ.

32. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022619090 Российская Федерация. Программа для расчёта срока безопасной эксплуатации газопровода. Заявка № 2022618630: заявл. 13.05.2022: опубл. 19.05.2022 / Э.Р. Джемилёв, **В.В. Пшенин**, Л.Р. Розанова; заявитель/правообладатель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет». – 13 КБ.

33. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022662358 Российская Федерация. Программа для обнаружения объектов на сырых данных с использованием заранее обученной моделью нейронной сети для классификации. Заявка № 2022661008, заявл. 14.06.2022: опубл. 01.07.2022/ **В.В. Пшенин**, А.Д. Разин, Э.Р. Джемилев; заявитель/правообладатель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет». – 997 КБ.

34. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021616742 Российская Федерация. Программа для расчета остаточного ресурса штамповарного тройника стального газопровода. Заявка № 2021615661: заявл. 20.04.2021: опубл. 26.04.2021/ **В.В. Пшенин**, Л.А. Ягодаров, И.П. Рузимуродов; заявитель/правообладатель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет». – 52 КБ.

35. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023664756 Российская Федерация. Расчет режимных параметров транспорта продукта. Заявка № 2023663961: заявл. 30.06.2023: опубл. 07.07.2023 / **В.В. Пшенин**, Е.А. Кузнецова,

А.А. Густов; заявитель/правообладатель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет». – 130 МБ.

36. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023615374 Российская Федерация. Программа выявления технологических осложнений в процессе эксплуатации нефтепровода. Заявка № 2023614048: заявл. 02.03.2023: опубл. 14.03.2023 / Э.Р. Джемилёв, **В.В. Пшенин**, А.А. Скоробогатов; заявитель/правообладатель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет». – 130 МБ.

37. 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.

38. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2022621490 Российская Федерация. База данных типовых конструктивных элементов газопроводов, собранная при испытании робототехнического устройства и обработанная сверточной нейронной сетью. Заявка № 2022621389: заявл. 14.06.2022: опубл. 23.06.2022/ **В.В. Пшенин**, А.Д. Разин, Э.Р. Джемилев; заявитель/правообладатель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет». – 61556 КБ.

39. 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.

40. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2025620612 Российская Федерация. База данных робототехнических устройств для обследования металлоконструкций. Заявка № 2025620167: заявл. 22.01.2025: опубл. 05.02.2025 / **В.В. Пшенин**, А.А. Скоробогатов, Р.А. Борисов; заявитель/правообладатель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II». – 640 КБ.

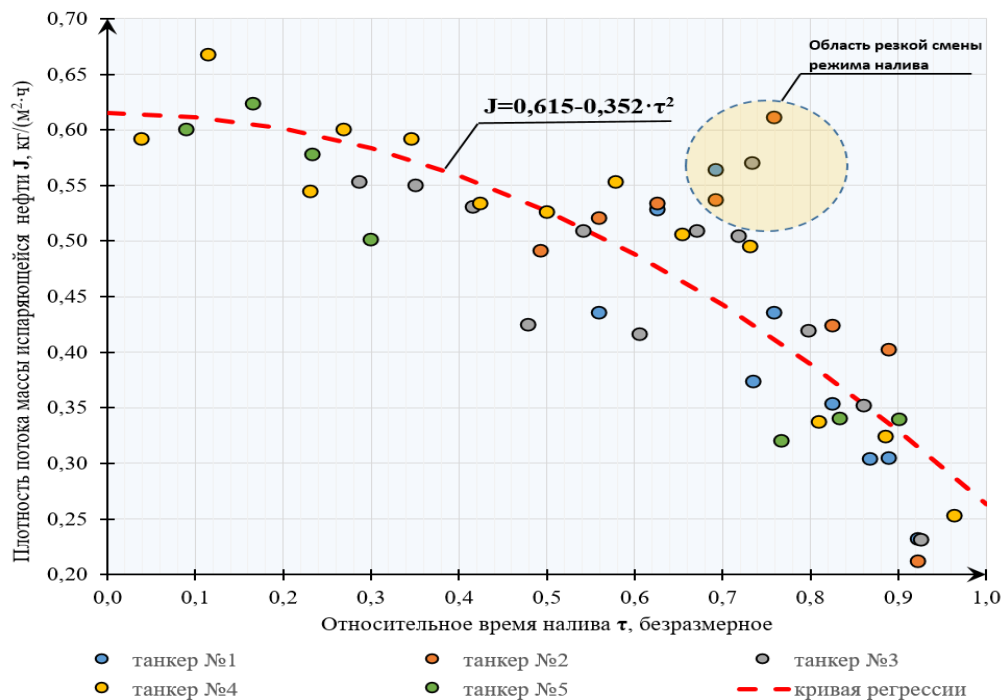


Рисунок 3 – График изменения массоотдачи испаряющейся нефти в ходе операции погрузки танкера



Рисунок 4 – График сопоставления результатов моделирования динамики роста давления в газовом пространстве танкера с экспериментальными данными

Таблица 1 – Сопоставление результатов моделирования динамики изменения давления в ГП танкера с экспериментальными данными

Текущее время от начала налива, ч	Экспериментальные данные по давлению в ГП танкера, Па	Давление в ГП танкера, рассчитанное по уравнению (5), Па
2	3	4
0	101815	101815
0,41	102595	105124
1,08	104365	105612
1,41	109215	107570
2,08	110645	109866
2,41	112355	110511
2,58	112455	110761
3,41	111035	111443
3,91	111225	111580
4,41	110835	111602
5,41	110445	111468
6,41	110395	111236
7,41	110345	110982
8,41	110495	110730
9,41	110235	110487
10,41	110495	110253
10,91	110385	110139
11,41	107005	106389
11,91	108325	106309
12,91	106075	104007
13,33	101325	101325

Таблица 2 – Основные параметры операции погрузки типового танкера

Параметр	Единицы измерения	Значение
Общий объем	м ³	131617
Габариты	м	241 x 44
Способ инертзации ГП	—	выхлопные газы
Плотность нефти при 20 °С	т/м ³	0,8447
ДНП нефти по Рейду	кПа	52,1
Общее время операции погрузки	ч	13,33
Средний объемный расход погрузки (так называемый «рейт»)	м ³ /ч	10 000

Таблица 3 – Уровни факторов при выполнении вычислительных экспериментов

Факторы	Величины факторов при уровне				
	1	2	3	4	5
Номинальный диаметр DN	400	500	700	1000	1200
Угол наклона восходящего участка α , градусы	1/-	2/25	4/40	6/55	8/70
Нефть: плотность, кг/м ³ кинематическая вязкость, мм ² /с	Н №1	Н №2	Н №3	Н №4	Н №5
	798	815	849	865	888
	4,5	3,9	9,8	25,1	47,6
$V_{ск}/D^3$	1	2	3	4	5

Таблица 4 – Сравнение данных вычислительного эксперимента по выносной скорости с расчетными величинами по методикам различных авторов

Θ , град	D, мм	Нефть	Выносная скорость, м/с						
			в рамках эксперимента	по методике Лурье М.В.	δ , %	по методике Галлямова А.К. (Галлямова-Байкова-Аминова)	δ , %	по методике Чарного И.А.	δ , %
70	1000	Н №2	1,36	4,19	208,37	1,35	0,54	16,16	1088,11
70	1200	Н №4	1,51	3,47	129,86	0,38	75,13	13,37	785,61
55	400	Н №5	0,75	1,25	66,88	0,05	93,17	4,82	542,98
55	500	Н №1	1,15	2,67	132,12	0,93	18,94	10,28	794,34
55	700	Н №2	1,20	3,11	159,47	1,15	4,54	12,00	899,71
55	1200	Н №4	1,35	3,20	136,71	0,40	70,51	12,31	812,00
40	400	Н №5	0,80	1,12	39,71	0,06	92,77	4,31	438,30
40	500	Н №1	0,95	2,34	146,55	0,99	3,93	9,02	849,91
40	700	Н №2	1,20	2,76	129,85	1,22	2,05	10,63	785,57
40	1000	Н №3	1,36	2,93	115,59	0,88	35,42	11,30	730,65
25	500	Н №4	0,83	1,26	52,25	0,25	70,22	4,87	486,60
25	700	Н №5	0,91	1,29	42,26	0,09	90,21	4,99	448,11
Θ , град	D, мм	Нефть	Выносная скорость, м/с						
			в рамках эксперимента	по формуле автора	δ , %	по методике Дидковской А.С.	δ , %	по методике Галлямова А.К.	δ , %
70	1000	Н №2	1,36	1,34	1,55	1,83	34,68	1,90	39,99
70	1200	Н №4	1,51	1,47	2,95	1,52	0,39	3,08	103,98
55	400	Н №5	0,75	0,77	2,91	0,57	23,70	1,46	95,11
55	500	Н №1	0,85	1,03	21,10	1,22	6,12	1,34	16,09
55	700	Н №2	1,2	1,13	6,12	1,42	18,62	1,48	23,25
55	1200	Н №4	1,35	1,42	5,50	1,46	8,22	2,97	119,79
40	400	Н №5	0,8	0,75	5,80	0,55	30,75	1,42	76,95
40	500	Н №1	0,95	1,00	5,42	1,16	22,19	1,27	33,58
40	700	Н №2	1,2	1,09	9,26	1,37	13,92	1,42	18,28
40	1000	Н №3	1,36	1,26	7,04	1,45	6,85	2,10	54,58
25	500	Н №4	0,83	0,86	3,06	0,72	13,23	1,46	75,88
25	700	Н №5	0,91	0,92	0,55	0,74	18,93	1,88	106,92

Таблица 5 – Сравнение экспериментальных данных по выносной скорости (расходу модельной жидкости) с расчетными величинами по различным методикам

Параметры испытаний	Q, м³/ч	V н, л	V к, л	Расчетные величины по расходу жидкости, соответствующему выносной скорости, м³/ч				
				По критериальному уравнению	Дидковская А.С.	Лурье М.В.	Галлямов А.К.	Чарный И.А.
Угол 20 градусов, плотность 1000 кг/м³	3,68	2,20	2,10	8,07	6,19	10,12	12,71	39,00
	4,54	2,40	2,15					
	7,00	2,20	1,20					
	16,80	2,80	0					
Угол 8 градусов, плотность 1000 кг/м³	2,99	2,43	2,40	7,56	5,14	6,23	10,55	23,99
	3,66	2,50	2,45					
	4,47	2,50	2,43					
Угол 5 градусов, плотность 1000 кг/м³	1,48	2,63	2,60	7,16	4,57	4,74	9,39	18,27
	3,00	2,20	2,20					
	4,51	2,20	2,00					
	10,80	2,20	0					
Угол 12 градусов, плотность 1000 кг/м³	3,67	2,40	2,40	7,66	5,49	7,60	11,28	29,30
	4,49	2,40	2,40					
	6,97	2,40	1,90					
	12,7	2,40	0					
Угол 70 градусов, плотность 1000 кг/м³	2,97	11,00	5,13	8,63	7,56	17,31	15,54	66,71
	4,77	11,00	2,80					
	6,96	11,00	1,00					
	8,97	11,00	0					
Угол 20 градусов, плотность 1335-1369 кг/м³	2,98	2,40	2,40	14,61	12,34	20,19	16,19	77,79

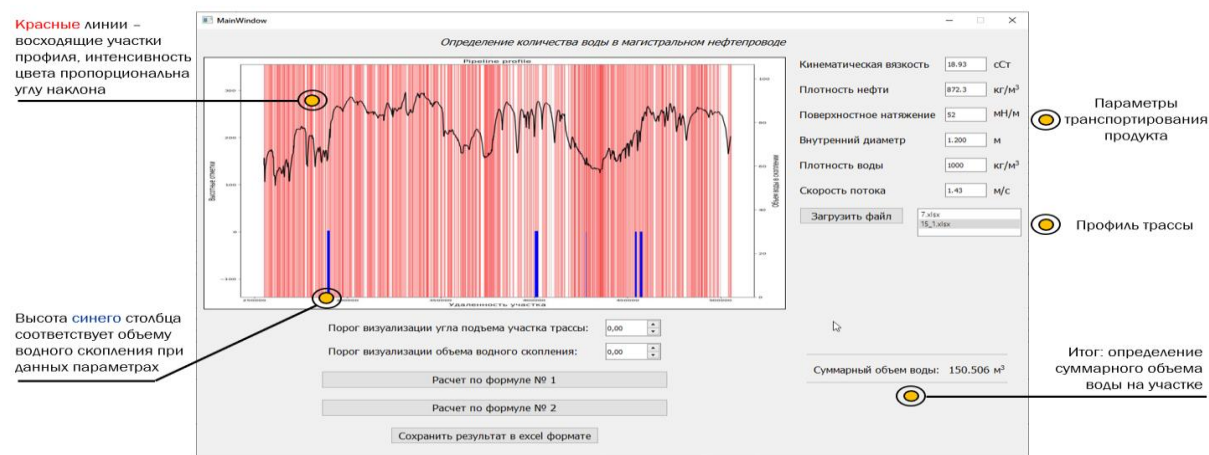


Рисунок 8 – Внешний вид интерфейса программного комплекса для определения количества воды по профилю трубопровода

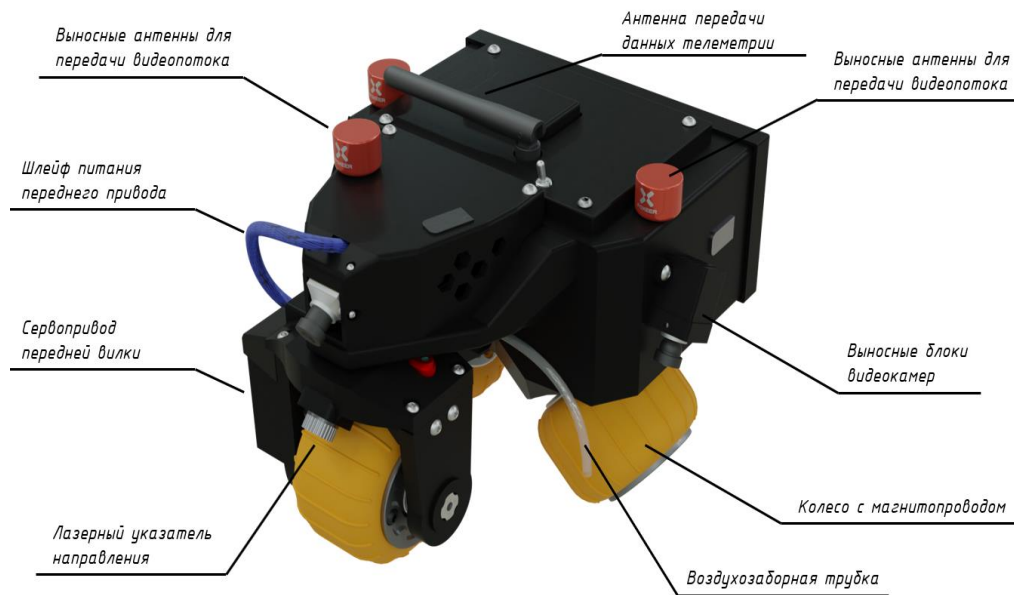


Рисунок 10 – Общий вид роботизированного комплекса дистанционного мониторинга трубопроводов и металлоконструкций

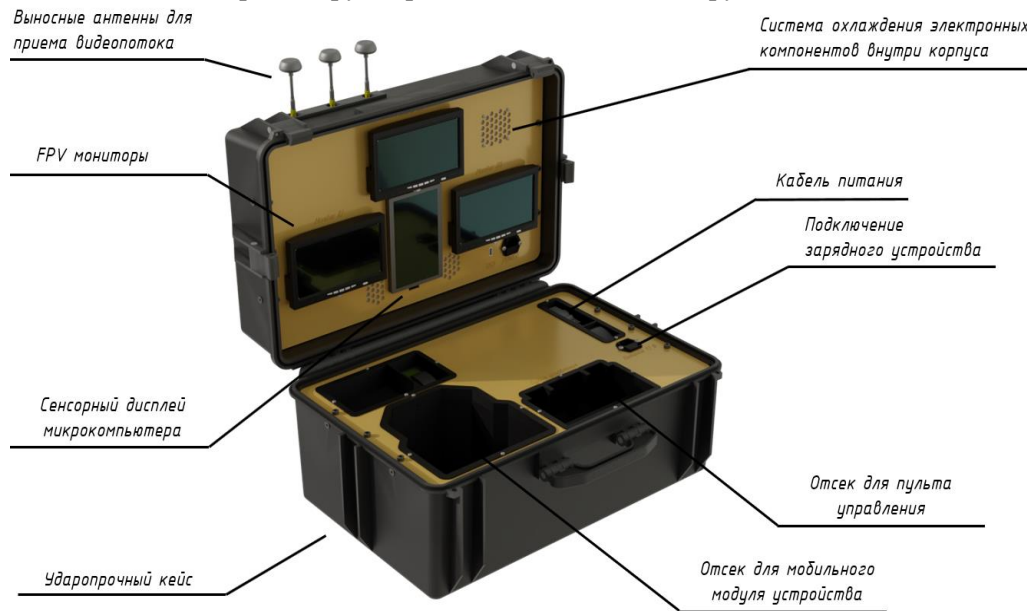


Рисунок 11 – Общий вид станции управления

Таблица 6 – Технические характеристики станции управления

Характеристики	Единицы измерения	Значения
Габариты	мм	610x430x310
Вес	кг	18
Количество приемников	шт.	3
Параметры приемника	–	Приёмник FPV 5.8 Boscarn RC832 5.8 ГГц 32 канала
Количество экранов FPV	шт.	3
Параметры экрана	–	7-дюймовый ЖК-дисплей TFT FPV 1024x600
Аккумулятор	–	Security Force SF 1217 12V / 17Ah
Микрокомпьютер	–	Raspberry Pi 4 Model B
Экран микрокомпьютера	шт.	1
Параметры экрана микрокомпьютера	–	7-дюймовый дисплей 1024x600 для Raspberry pi

Таблица 7 – Технические характеристики роботизированного комплекса

Характеристика	Единицы измерения	Значение
Ширина	мм	177
Длина	мм	191
Высота	мм	153
Масса	кг	2,1
Мощность приводов	кг·см	33
Заряд аккумуляторов	мА·ч	10000
Минимальный объемный расход обнаруживаемой утечки паров	л/ч	15
Диапазон обследуемых диаметров	–	от DN50 и выше
Кинематическая схема	–	трехколесное шасси, внутри колеса использован магнитопровод
Длительность работы на одном полном аккумуляторе без его смены	ч	не менее 2
Возможность смены аккумулятора	–	да
Газоанализатор со встроенным модулем индикации утечек газа	–	да
Управляющий радиоканал, передача видеопотока и телеметрии	–	Управление 2,4 ГГц, видеопоток 5,8 ГГц, телеметрия 2,4 ГГц
Дальность действия (на открытой местности, без препятствий)	м	до 200