

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

На правах рукописи

Борисов Артём Витальевич



СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПОДХОДОВ К КОЛИЧЕСТВЕННОМУ УЧЁТУ
НЕФТИ И НЕФТЕПРОДУКТОВ НА САМОТЕЧНЫХ УЧАСТКАХ
ТРУБОПРОВОДОВ

Специальность 2.8.5. Строительство и эксплуатация нефтегазопроводов,
баз и хранилищ

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук, доцент
Шаммазов И.А.

Санкт-Петербург – 2026

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
ГЛАВА 1 СОВРЕМЕННАЯ ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ САМОТЕЧНЫХ УЧАСТКОВ НЕФТЕ- И НЕФТЕПРОДУКТОПРОВОДОВ	11
1.1 Современное состояние трубопроводной системы магистральных нефте- /нефтепродуктопроводов с самотечными участками	11
1.2 Теоретические подходы к описанию гидравлики течения самотечных участков трубопроводов	22
1.3 Особенности современного расчета коэффициента заполнения в соответствии с нормативными документами.....	30
1.3.1 Сравнительный анализ существующих методик расчета коэффициента заполнения самотечных участков.....	30
1.3.2 Анализ методики расчета коэффициента заполнения самотечного участка трубопровода МИ 3275-2016	31
1.4 Выводы по первой главе.....	35
ГЛАВА 2 ОБОСНОВАНИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКОГО ПОДХОДА К РАСЧЕТУ КОЭФФИЦИЕНТА ЗАПОЛНЕНИЯ	36
2.1 Специфика моделирования гидравлики самотечных участков.....	36
2.2 Моделирование работы самотечного участка и создание многопараметрической модели течения жидкости	51
2.3 Обоснование вида критериального уравнения для расчета коэффициента заполнения	54
2.4 Выводы по второй главе	58
ГЛАВА 3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ЗАПОЛНЕНИЯ САМОТЕЧНЫХ УЧАСТКОВ ТРУБОПРОВОДОВ.....	59
3.1 Описание экспериментального стенда самотечного участка трубопровода для определения коэффициента заполнения	59
3.1.1 Особенности выбора и использования измерительных приборов.....	63
3.1.2 Особенности выбора и использования насосов перекачки жидких сред.....	65

3.2 Планирование экспериментальных исследований	67
3.2.1 Дробные 2^{k-p} факторные планы экспериментов	67
3.2.2 Дробные 3^{k-p} факторные планы экспериментов	68
3.2.3 Построение матрицы планирования экспериментальных исследований	69
3.3 Проведение экспериментальных исследований на самотечном участке	70
3.4 Предварительная обработка результатов экспериментальных исследований на самотечном участке стенда	77
3.5 Статистическая обработка результатов экспериментальных исследований на самотечном участке стенда	81
3.6 Выводы по третьей главе.....	85
ГЛАВА 4 РЕКОМЕНДАЦИИ И ТЕХНИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ ПО СОВЕРШЕНСТВОВАНИЮ КОЛИЧЕСТВЕННОГО УЧЕТА НЕФТИ И НЕФТЕПРОДУКТОВ НА САМОТЕЧНЫХ УЧАСТКАХ ТРУБОПРОВОДОВ	86
4.1 Определение вместимости трубопроводов, транспортирующих жидкие продукты, в зависимости от термобарических условий	86
4.2 Алгоритм определения уровня заполнения трубопровода продуктом перекачки методом триангуляции.....	93
4.3 Рекомендации по оснащению самотечных участков магистральных трубопроводов устройствами по определению коэффициента заполнения	97
4.4 Выводы по четвертой главе.....	104
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	105
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	106
ПРИЛОЖЕНИЕ А Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ	122
ПРИЛОЖЕНИЕ Б Акт о внедрении результатов исследования в ООО «ЗНГО-Импульс»	124
ПРИЛОЖЕНИЕ В Акт о внедрении результатов исследования в ОАО «Сибнефтетранспроект»	125

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования

В основе решения задачи организации транспортировки перевалки нефти и нефтепродуктов лежит магистральный трубопроводным транспорт. Данный вид транспорта обеспечивает надежность поставок, регулируемость режимов перекачки, учёт перекачиваемого сырья, а также гибкость в построении транспортных маршрутов. На момент начала 2025 года у основного оператора товарных поставок ПАО «Транснефть» на балансе состоит более 68 000 км магистральных нефте/-нефтепродуктопроводов, что позволяет транспортировать жидкие углеводороды в страны ближайшего зарубежья и до пунктов сдачи на территории Российской Федерации.

В основе операционной деятельности лежит решение задачи по совершенствованию метрологического обеспечения систем учета количества перекачиваемой нефти и нефтепродуктов. От объема поставляемой продукции на экспорт зависит валовая выручка Российской Федерации и размер налоговых отчислений (вывозная таможенная пошлина), составляющий федеральный бюджет страны, поэтому точность и полнота данных о перекачиваемой нефти и нефтепродуктов имеет стратегическое значение на уровне компании и нефтяной отрасли Российской Федерации.

В парадигме переориентации экспортных поставок с Западно-Европейских направлений на Азиатско-Тихоокеанский рынок возникает недозаполненность существующих транспортных маршрутов ввиду перекачки неполным сечением трубопроводов. Пониженные режимы перекачки нефти и нефтепродуктов в направлении Европы приводят к тому, что уровень заполнения трубопровода снижается и образуются самотечные участки трубопроводов. Данные участки имеют временную характеристику и могут переставать существовать при корректировке режимов перекачки в сторону увеличения расхода. Другая ситуация наблюдается в условиях горной местности, где в результате прокладки нефте/-нефтепродуктопроводов на территории с переменным рельефом местности и, как следствие, изменяющимся профилем трассы трубопровода возникают

самотечные участки. Данные участки в горных условиях чаще всего существуют на постоянной основе, как, например, перевалочный комплекс «Шесхарис» в Азово-Черноморском бассейне, где через организованный постоянный самотечный участок трубопровода производится отгрузка нефтепродуктов с нефтебазы «Грушовая» до причальных сооружений.

Как правило, самотечные участки несут негативный эффект, основной из которых заключается в невозможности корректного проведения количественного учета, поскольку на данных участках нет измерительных приборов и прямое измерение невозможно произвести. Другим существенным нюансом является тот факт, что в процессе эксплуатации самотечных участков при проведении количественного учета продукта перекачки не учитывается влияние шероховатости внутренней поверхности трубопровода и вязкости продукта, а также проявление сил поверхностного натяжения и ряд других факторов.

Важность учета данных факторов сложно переоценить, поскольку эксплуатируемая инфраструктура, представляющая собой трубопроводы, устаревает и шероховатость поверхности увеличивается, а перемешивание нефти и нефтепродуктов в процессе перекачки предполагает различия каждой партии нефти и нефтепродуктов, что влияет на физико-химические свойства. Диссертационная работа направлена на создание научных подходов к обоснованию методов количественного определения нефти и нефтепродуктов в процессе эксплуатации трубопроводов и при остановленной перекачке, что является актуальным для нефтяной отрасли Российской Федерации.

Степень разработанности темы исследования

Рассматриваемой в диссертационной работе темой занимались многие известные отечественные и зарубежные исследователи. Самотечными участками в широком понимании в различный период времени занимались следующие ученые из области гидравлики: Павловский Н.Н., Коршак А.А., Караушев В.А., Чугаев Р.Р., Штеренлихт Д.В, Полад-Заде П.А.

Применительно для решения задач трубопроводной гидравлики о самотечном течении жидкостей были посвящены работы следующих авторов:

Лурье М.В., Дидковская А.С., Коршак А.А., Арбузова Н.С., Голунов Н.Н., Коробков Г.Е.

Вопросами количественного учета перекачиваемых нефти и нефтепродуктов посвящены работы следующих ученых: Рахматуллин Ш.И., Уметбаев Ф.С., Низамутдинов Р.И.

Среди работ зарубежных ученых, можно выделить работы J.P. Giroud, J.M. Dodds, R.J. Poole, Graham Sander. Особо среди зарубежных работ стоит отметить работу Omer Akgiray, выполненную государственным исследовательским университетом Турции г. Стамбул, в которой изложены фундаментальные вопросы по учету продукта перекачиваемой жидкости с учетом переменного коэффициента шероховатости при различной степени заполнения трубопровода.

Несмотря на наличие большого объема исследований по данным направлениям, задача повышения точности определения коэффициента заполнения самотечных участков при более детальном учете влияющих факторов, является актуальной.

Объект исследования – самотечные участки нефте- и нефтепродуктопроводов.

Предмет исследования – зависимость степени заполнения самотечных участков трубопроводов от режимных параметров и физических свойств транспортируемого продукта перекачки.

Цель работы – повышение достоверности определения степени заполнения магистральных трубопроводов на самотечных участках.

Идея работы – для достижения поставленной цели необходимо использовать многофакторные модели, учитывающие относительную шероховатость трубопровода, режим перекачки и вязкость перекачиваемой жидкости.

Задачи исследования:

1. Выполнить анализ современной теории и практики функционирования самотёчных участков магистральных нефте- и нефтепродуктопроводов.

2. Разработать гидравлическую модель для расчета коэффициента заполнения, учитывающую свойства перекачиваемого продукта и режимных параметров перекачки.

3. Разработать конструкцию экспериментального стенда, спланировать и провести эксперименты в рамках апробации полученной модели.

4. Предложить перечень рекомендаций по совершенствованию расчёта самотечных участков для нефте- нефтепродуктопроводов и технических решений, направленных на их реализацию.

Научная новизна работы:

1. Разработана физико-математическая модель для расчета коэффициента заполнения, учитывающая свойства перекачиваемого продукта и режимные параметры перекачки.

2. Получено критериальное уравнение для определения степени заполнения самотечного участка трубопровода, учитывающая влияние свойств перекачиваемого продукта и режимных параметров перекачки.

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

Теоретическая и практическая значимость работы:

1. Разработана гидравлическая модель самотечных участков, позволяющая комплексно учесть влияние второстепенных факторов на формирование степени заполнения трубопровода.

2. Результаты диссертационного исследования использованы на предприятии ООО «ЗНГО-Импульс» (акт внедрения от 24.04.2026, Приложение Б) и внедрены в практику проектной деятельности ОАО «Сибнефтетранспроект» (акт внедрения от 27.04.2026, Приложение В) в виде методических рекомендаций по расчету уровня заполнения трубопроводов на самотёчных участках нефтепроводов и нефтепродуктопроводов.

3. Разработана инженерная методика по расчету вместимости трубопроводов, транспортирующих жидкие продукты, в зависимости от термобарических условий.

4. Разработана программа для ЭВМ, предназначенная для определения степени заполнения на самотечном участке трубопровода (свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024664520 «Программа расчета коэффициента заполнения нефтепровода методом Ньютона-Гаусса», Приложение А).

Методология и методы исследования

В рамках исследований использованы методы математического моделирования процессов. Для получения 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 подходы теории планирования эксперимента.

Положения, выносимые на защиту:

1. Гидравлический расчет самотечных участков следует вести по разработанной автором физико-математической модели, учитывающей критерии Рейнольдса, Фруда, Вебера и относительную шероховатость трубопровода.

2. Коэффициент заполнения самотечного участка трубопровода следует определять по разработанному автором критериальному уравнению, коэффициенты которого определены по результатам испытаний на экспериментальном стенде при перекачке нескольких видов продуктов.

Степень достоверности результатов исследования, выполненных в рамках диссертационной работы, имеет необходимый уровень, который обеспечивается научно обоснованным применением общепризнанных теоретических подходов к рассматриваемым проблемам и использованием высокоточных математических моделей.

Апробация результатов диссертации проведена на 5 научно-практических мероприятиях с докладами, в том числе на 5 международных. За последние 3 года принято участие в 5 научно-практических мероприятиях с докладами, в том числе на 5 международных: XV Международном молодежном научно-практическом конгрессе «Нефтегазовые горизонты» (Россия, г. Москва, 2023 г.); XII Молодежной международной научно-практической конференции «Новые технологии в газовой отрасли: опыт и преемственность» (Россия, г. Москва, 2024 г.); XIX Международной научно-практической конференции «Трубопроводный транспорт-2024», приуроченной к 95-летию со дня рождения профессора В.Ф. Новоселова и к 15-летию со дня образования ООО «НИИ Транснефть» (Россия, г. Уфа, 2024 г.); XIII Молодежной международной научно-практической конференции «Новые технологии в газовой отрасли: опыт и преемственность» (Россия, г. Москва, 2025 г.); XX Международной научно-практической конференции «Трубопроводный транспорт-2025» (Россия, г. Уфа, 2025 г.).

Личный вклад автора. Автором проведен анализ отечественной и зарубежной научной литературы, рассмотрены существующие проблемы функционирования самотечных участков трубопроводов. Разработана физико-математическая модель исследуемого процесса. Проведены экспериментальные исследования. В выполнении экспериментов автор принимал участие лично.

Публикации. Результаты диссертационного исследования в достаточной степени освещены в 5 печатных работах (пункты списка литературы № 100, 101, 103, 104, 117), в том числе в 2 статьях – в изданиях из перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на

соискание ученой степени доктора наук, в 3 статьях – в изданиях, входящих в международную базу данных и систему цитирования Scopus. Получено 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ (Приложение А, пункт списка литературы № 102).

Структура работы. Диссертация состоит из оглавления, введения, 4 глав с выводами по каждой из них, заключения, списка литературы, включающего 120 наименований, и 3 приложения. Диссертация изложена на 125 страницах машинописного текста, содержит 48 рисунков и 15 таблиц.

Благодарности. Автор выражает благодарность сотрудникам кафедры транспорта и хранения нефти и газа Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II, оказавшим помощь в постановке экспериментальных исследований.

ГЛАВА 1 СОВРЕМЕННАЯ ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ САМОТЕЧНЫХ УЧАСТКОВ НЕФТЕ- И НЕФТЕПРОДУКТОПРОВОДОВ

1.1 Современное состояние трубопроводной системы магистральных нефте- /нефтепродуктопроводов с самотечными участками

Система магистральных трубопроводов, эксплуатируемая единым оператором товарных поставок ПАО «Транснефть», составляет 67 350 км. Данную систему определяют магистральные нефтепроводы магистральные нефтепродуктопроводы, протяженность которых 50 870 км и 16 480 км соответственно. Общая протяженность магистральных трубопроводов ПАО «Транснефть» составляет более 26 % от общей протяженности магистральной трубопроводной инфраструктуры на территории Российской Федерации, включающей газотранспортную инфраструктуру ПАО «Газпром». Также, помимо общей протяженности магистральной трубопроводной инфраструктуры, в системе ПАО «Транснефть» на момент 2024-2025 год стоит на балансе компании 495 перекачивающих станций, из которых 402 перекачивающие станции для нефти, а 93 перекачивающие станции для нефтепродуктов. Общий объем резервуарного парка 24,13 млн м³, 19,37 млн м³ и 4,76 млн м³ для нефти и нефтепродуктов соответственно [14].

Основными показателями, характеризующими состояние трубопроводной инфраструктуры являются прирост вновь введенных магистральных трубопроводов за счет капитального строительства, а также показатель введенных в эксплуатацию магистральных нефтепроводов и нефтепродуктопроводов в результате проведения реконструкции и технического перевооружения.

Как следует из годового отчета ПАО «Транснефть» 2024 года, введено в эксплуатацию около 170 км линейной части магистральных нефтепроводов и нефтепродуктопроводов за период 2022-2024 г., что составило 0.0014% прироста к общей протяженности основных активов ПАО «Транснефть» [14]. Основными причинами прироста стало строительство лупингов (участков трубопровода, прокладываемых в дополнении к основному трубопроводу на трассе) на

магистральных нефтепроводах Сургут – Полоцк и Палкино – Приморск, проводимое в период 2023-2024 г. Протяженность магистральных нефтепроводов и нефтепродуктопроводов ПАО «Транснефть» за 2022-2024 год отражена на рисунке 1.1.

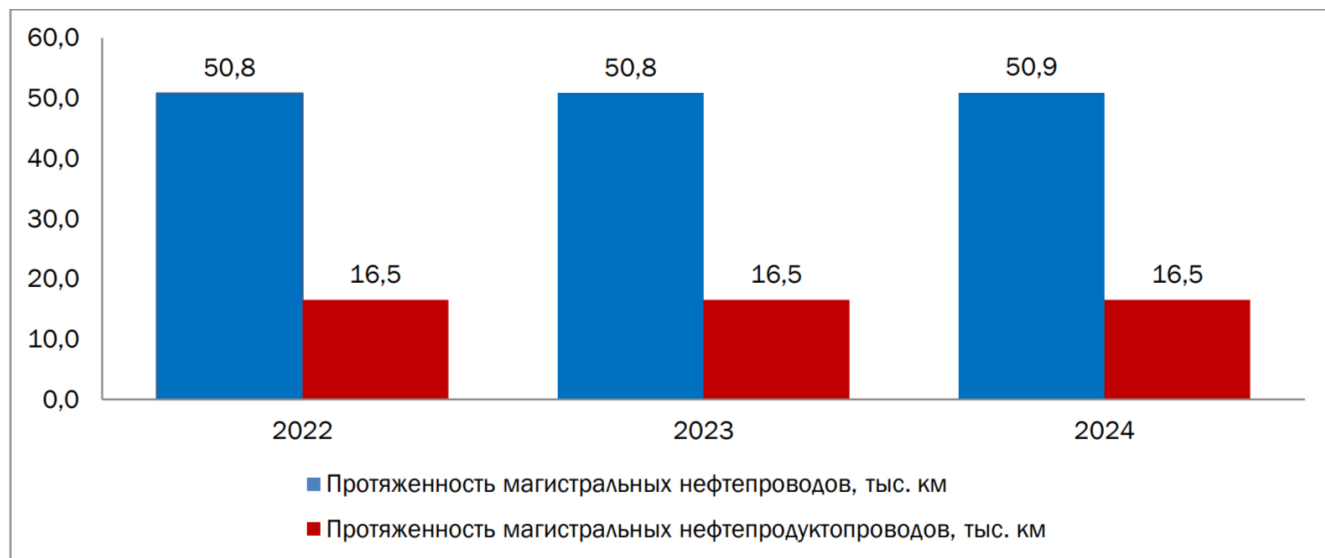


Рисунок 1.1 – Протяженность магистральных нефтепроводов и нефтепродуктопроводов ПАО «Транснефть» за 2022-2024 [13, 14]

Также в 2024 в рамках программы реконструкции и перевооружения, проводимой ПАО «Транснефть» были вновь введены в эксплуатацию более 538 км магистральных нефтепроводов и нефтепродуктопроводов по территории Российской Федерации. Рост протяженности и разветвленности магистрального трубопроводного транспорта неразрывно связано с Энергетической стратегией Российской Федерации на период до 2050 года, утверждённой распоряжением Правительства Российской Федерации от 12.04.2025 №908-р, содержание которой описывает и предусматривает увеличение темпов и объемов добычи нефтегазоконденсатного сырья до показателя более чем 547 млн т. до 2050 года включительно [107]. В таблице 1.1 приведен Прогнозный топливно-энергетический баланс Российской Федерации по сценарию технологического потенциала до 2050, являющегося частью приложения 4 к Энергетической стратегией Российской Федерации. Помимо данного сценария в данном приложении имеется сценарий по ускоренному энергетическому переходу и стресс-сценарий. Сценарий технологического потенциала выбран как наиболее

информативный ввиду отраслевой тенденции на импортозамещение ввиду геополитической обстановки и достижения независимости в технологическом аспекте, что в свою очередь реализует ПАО «Транснефть» и использует практически только отечественные аппараты, материалы и агрегаты при строительстве объектов капитального строительства и эксплуатации опасных производственных объектов.

Таблица 1.1 – Прогнозный топливно-энергетический баланс Российской Федерации по сценарию ускоренного технологического потенциала [107]

Мероприятия	Единицы измерения	2023 год	2030 год	2036 год	2050 год
I. Нефть					
Производство	млн т	531	591	581	547
Поставки (внутренние)	млн т	297	321	321	319
Поставки (экспорт)	млн т	234	270	260	228
II. Нефтепродукты					
Объем переработки	млн т	275	297	297	297
Поставки (внутренние)	млн т	144	155	154	146
Поставки (экспорт)	млн т	131	142	143	151

Как видно из таблицы 1.1 на среднесрочном горизонте планирования до 2030 – 2036 года прогнозируется рост уровня добычи нефти и объем переработки нефти для производства нефтепродуктов, что говорит нам о прогнозируемом повышении уровня мировых цен на нефть и нефтепродукты и, как следствие, увеличения маржинальности переработки и экспортных поставок нефти и нефтепродуктов. Также важно следует обратить внимание на рост уровня внутренних и экспортных поставок нефти и нефтепродуктов суммарно более чем на 7,9% в сравнении с базисным 2023 годом. Это говорит нам о предстоящем росте протяженности трубопроводной инфраструктуры и сопутствующей мощности перекачивающих станций.

Рост инфраструктуры коррелирует с расширением географии нефтедобывающих компаний на территории новых месторождений, а также увеличением добывающих мощностей на уже зрелых разрабатываемых месторождениях, увеличением объемов первичной подготовки нефти и сдачи товарной нефти в линейные нефтепроводные управления системы ПАО «Транснефть» для транспортировки до конечного потребителя. Также рост инфраструктуры связан с прогнозируемым ростом в 2026-2028 году стоимости

мировых цен на нефть, что в свою очередь будет способствовать увеличению объема продаж на потребительских рынках и, как следствие, увеличению пропускной способности магистрального трубопроводного транспорта.

По результатам 2024-2025 года превалирующая доля перекачки добываемого сырья обеспечивается ПАО «Транснефть». Так, например, более 85% добываемой нефти на территории Российской Федерации, более 29% светлых нефтепродуктов (бензин), темных нефтепродуктов и иного углеводородного сырья, производимого на нефтеперерабатывающих заводах Российской Федерации, перекачивается с использованием трубопроводной инфраструктуры и мощностей насосных станций единого оператора поставок ПАО «Транснефть» [90].

Одними из основных стратегических приоритетов компании остается обеспечение планомерного развития системы магистральных трубопроводов и мощностей по приему/отпуску и перевалке транспортируемого сырья. Данные приоритеты достигаются за счет реализации инвестиционной программы по капитальному строительству, реконструкции и перевооружению трубопроводной инфраструктуры. На рисунке 1.2 приведена схема трубопроводной системы ПАО «Транснефть» с основными перевалочными пунктами в морских портах, а также проекты магистрального транспорта нефти, проложенных по территории Российской Федерации на 2024-2025 год [27].

Говоря про операционную деятельность стоит отметить, что средний удельный тариф на транспортировку нефти у ПАО «Транснефть» в сравнении с операторами товарных поставок из стран ближайшего зарубежья остается самым низким. Также очевидным фактом остается протяжённость трубопроводной инфраструктуры вдоль Азиатской части континента и через Европейскую территорию, что характеризует операционную деятельность компании по транспортировке сырья гибкой, надежной и бесперебойной, что особо ценно для контрагентов и партнеров.



Рисунок 1.2 – Схема трубопроводной системы ПАО «Транснефть» с основными перевалочными пунктами в морских портах [27]

На рисунке 1.3 изображены средние удельные индексы на транспортировку нефти компании ПАО «Транснефть» Российской Федерации и компаний из стран ближайшего зарубежья на начало 2025 года [14].

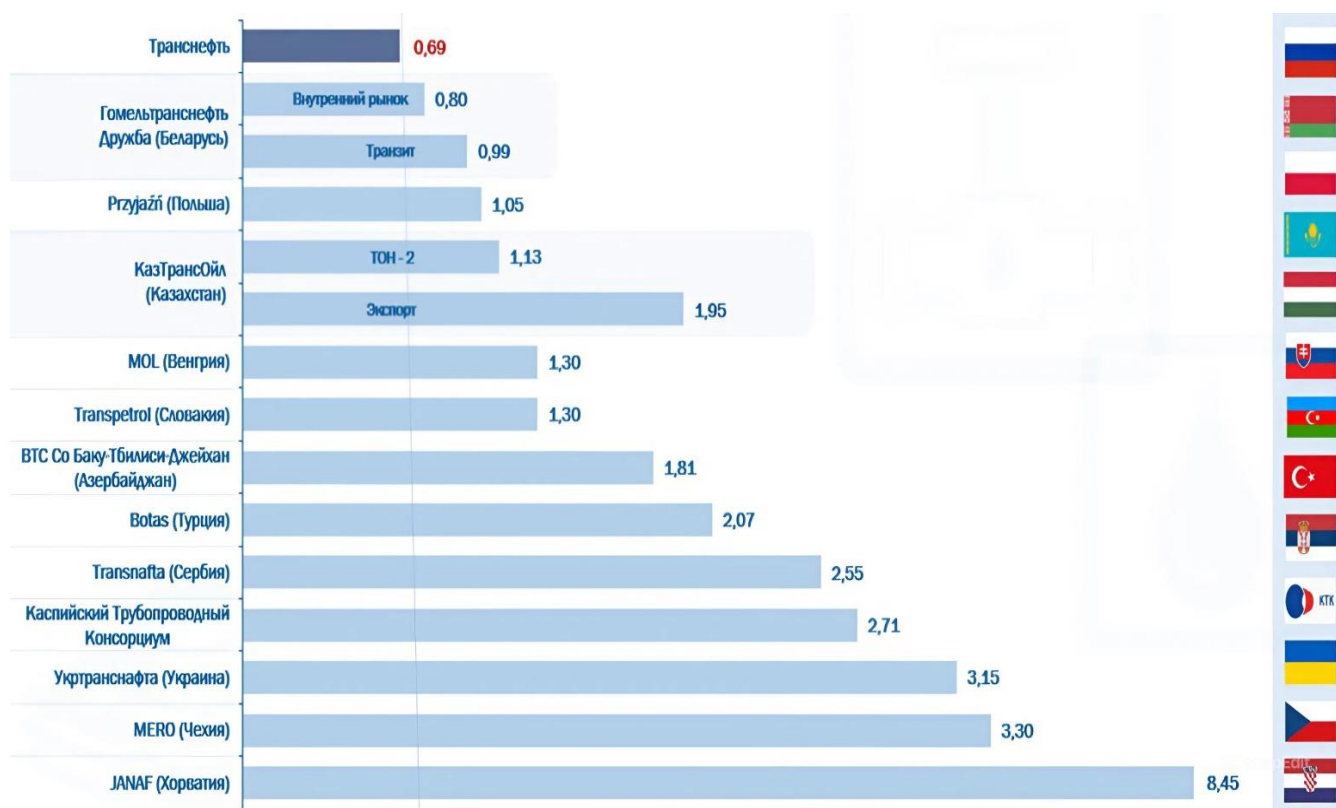


Рисунок 1.3 – Средние удельные индексы на транспортировку нефти компании ПАО «Транснефть» Российской Федерации и компаний и стран ближайшего зарубежья на начало 2025 года [14]

Перспективой развития нефтепроводного бизнеса остается удовлетворение потребностей нефтедобывающих и нефтеперерабатывающих компаний на внутреннем рынке Российской Федерации, а также обеспечение надежных экспортных поставок за счет эффективной эксплуатации магистрального трубопроводного транспорта России. Особенностью бизнес-процессов 2024-2025 по транспортировке нефти и нефтепродуктов стала переориентация экспортных поставок с Европейского направления по магистральному нефтепроводу «Дружба», имеющего историческое значение по снабжению стран Прибалтики и стран Европейской части континента еще со времен СССР, на Азиатско-Тихоокеанский регион импортеров [28]. На рисунке 1.4 изображена графическая структура экспорта/импорта нефти в разрезе мировых регионов и

основных стран-участниц торговли углеводородным сырьем в 2024-2025 году [118].

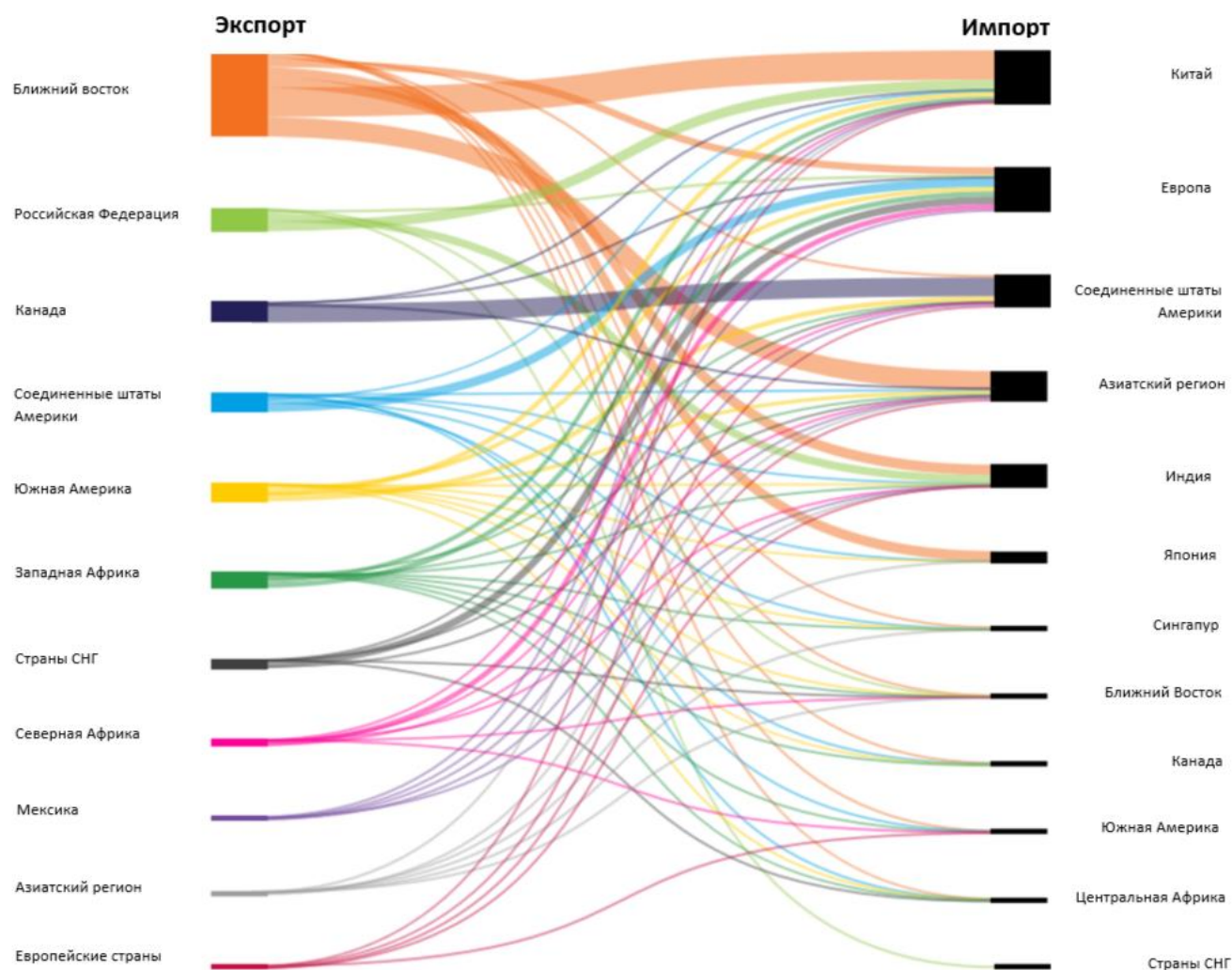


Рисунок 1.4 – Графическая структура экспорта/импорта нефти в разрезе мировых регионов и основных стран-участниц торговли углеводородным сырьем в 2024 году [118]

На рисунке 1.5 изображена графическая структура экспорта/импорта нефтепродуктов в разрезе мировых регионов и основных стран-участниц торговли углеводородным сырьем в 2024-2025 году. Как видно из рисунка 1.4, основной экспорт сосредоточены на двух основных странах Азиатско-Тихоокеанского региона – Индия и Китай. Основной причиной переориентации трубопроводных экспортных поставок нефти стало введение в декабре 2022 года ценового потолка странами G7 в рамках пакета санкций на импорт нефти из России на уровне 60 \$/баррель, а в последствии с 1 февраля 2026 года потолок цен был понижен до 44,1 \$/баррель.

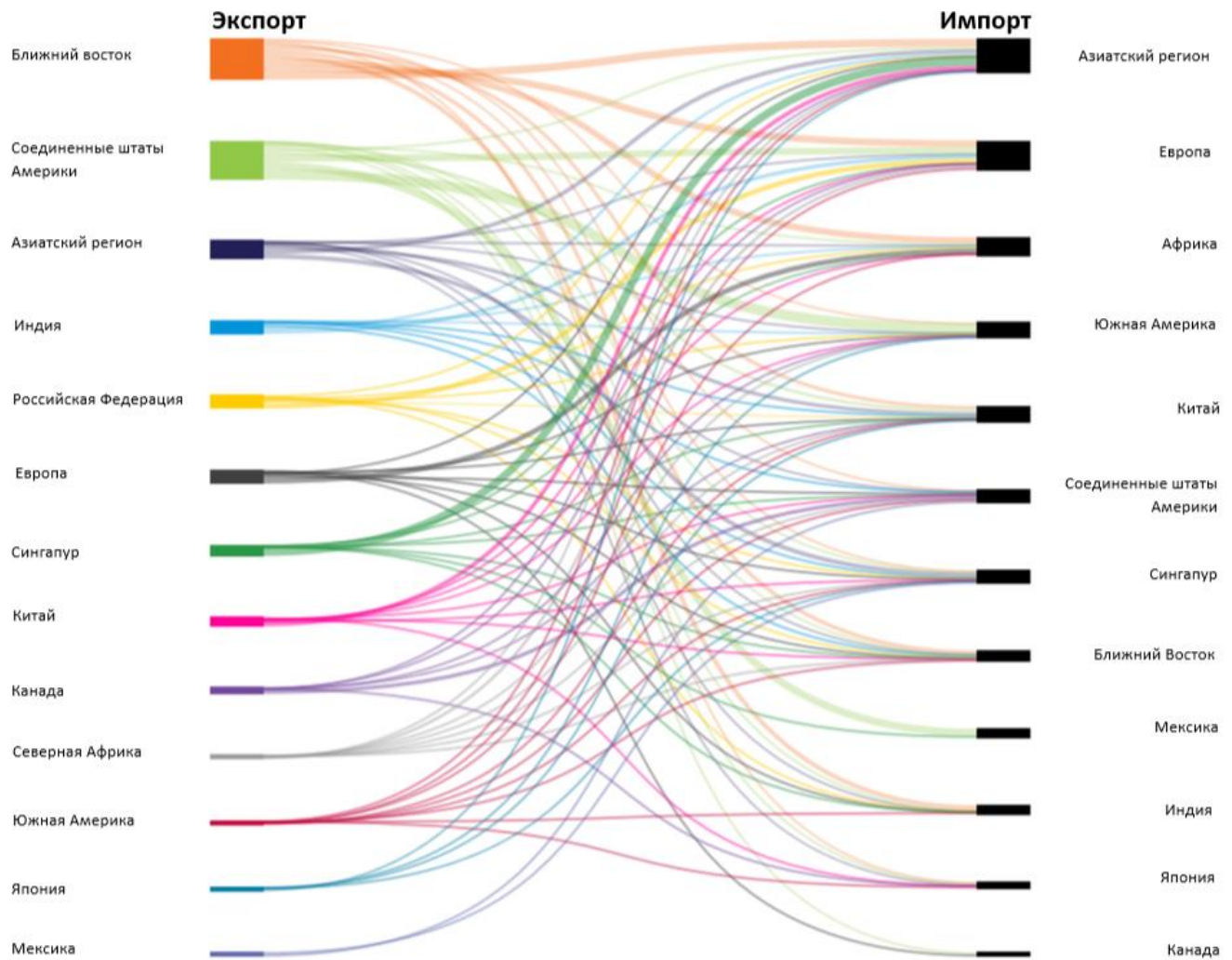


Рисунок 1.5 – Графическая структура экспорта/импорта нефти в разрезе мировых регионов и основных стран-участниц торговли углеводородным сырьем в 2024 году [118]

Данный потолок цен повлек последствия. Ответной мерой стало введение в действие с 1 февраля 2023 года указа Президента Российской Федерации [91], который запрещает поставки нефти и нефтепродуктов, если в договорной обвязке на поставку прямо или косвенно упоминается потолок цен. Следующим шагом стала вышеописанная переориентация поставок нефти и нефтепродуктов в направлении Индии и Китая, не поддержавших введение потолка цен на импортную нефть из России. Данными действиями было снижено негативное влияние от реализации ценового и валютного риска на объем валютной выручки, получаемой от экспорта в страны Азиатско-Тихоокеанского региона, так как с Индией, например, взаиморасчет за поставку нефти и нефтепродуктов был скорректирован с исключением американского доллара из конверсионных

операций и заменой его на национальные валюты – российский рубль и индийский рупий [73].

Как видно из рисунка 1.5 аналогичная переориентация поставок на Азиатско-Тихоокеанский регион наблюдается и с экспортными поставками нефтепродуктов за исключением Европейского направления, переориентированного в 2025 году на экспорт в Турцию и Латинскую Америку.

Несмотря на геополитическую ситуацию и переориентацию экспортных потоков на Восточных и Азиатско-Тихоокеанских потребителей, уровень экспортных поставок остается на высоких значениях. Но в силу переориентации экспортных потоков часть трубопроводов работает при пониженных режимах эксплуатации, что определяет неполный уровень заполнения некоторых магистральных потоков трубопроводных систем, образуя в трубопроводной системе так называемые самотечные участки. Одновременно с этим остается часть трубопроводной системы, где магистрали проходят через области с большим перепадом высот, и, не смотря на высокую загрузку, также работают с самотечными участками.

Самотечные участки в нефтепроводах и нефтепродуктопроводах возникают на линейной части в результате выше описанных низконапорных режимов перекачки, а также в результате наличия перепада высот, вызванных особенностями местности залегания, что в свою очередь влияет на изменение профиля трассы эксплуатируемого трубопровода [43]. В первом случае самотечный участок может возникать как временное явление до момента корректирования режима перекачки продукта, например, повышение расхода перекачиваемого продукта и, как следствие, увеличения уровня заполнения тела трубопровода до полного заполнения. Во втором случае при наличии постоянного режима работы трубопровода самотечный участок может сохраняться [103]. Исходя из этих особенностей можно классифицировать самотечные участки трубопроводов по времени их существования:

- постоянные самотечные участки трубопроводов;
- временные самотечные участки трубопроводов.

Наличие обоих классов самотечных участков неравномерно по территории присутствия трубопроводных проектов, например, переменные самотечные участки на равнине с постоянными самотечными участками больше распространены в горной местности, где, как было описано ранее, перепад высот выше по интенсивности в отличие от равнинной местности. Профиль трассы трубопровода при подземной прокладке по горной местности на проектной глубине заложения повторяет рельеф местности, что и вызывает наличие потенциальных временных самотечных участков. Определение количества временных самотечных участков осложнено ввиду изменчивости их возникновения и прекращения существования ввиду изменения режима перекачки, что особо актуально ввиду геополитической ситуации в мире и переориентации поставок нефти и нефтепродуктов на Азиатско-Тихоокеанский рынок сбыта.

Наличие самотечных участков также характеризуется по присутствию их на сухопутных участках трубопроводов и на морских объектах перевалки нефти и нефтепродуктов.

1. Сухопутные самотечные участки

На сухопутной части самотечные участки встречаются как временные, так и постоянные. Особенностью эксплуатации данных участков остается нерегулируемое количество наличие газовой фазы в верхней образующей трубопровода, давление насыщенных паров которой равно давлению перекачиваемой жидкости. На сухопутных участках самотечные участки вызывают сложность с учетом продукта в условиях остановленной перекачки. Особенностью сухопутных самотечных участков остается сложность измерения расхода на нисходящем сегменте трубопровода. На участке после перевальной точки продукт перекачки транспортируется с тем же развиваемым перекачивающими станциями расходом, что и на заполненных участках трубопровода, однако на нисходящем участке на жидкость действует дополнительно сила тяжести, ускоряющая скорость течения жидкости. Таким образом расход на нисходящем сегменте больше, чем на участке до перевальной точки. Однако, самотечные участки не оборудуются расходомерами, что делает

невозможным прямого определения расхода жидкости на данном участке. Примером таких магистральных нефтепроводов могут быть Тихорецк – Новороссийск и Крымск – Грушовая, проложенных в сложном рельефе местности с частыми перепадами высот, как следствие включающих в себя также самотечные участки ввиду горной местности залегания трубопроводов.

2. Морские самотечные участки

Одновременно с сухопутными участками, существуют и морские самотечные участки на объектах перевалки нефти и нефтепродуктов. На данных опасных производственных объектах самотечные участки постоянные. Особенностью их является наличие регулируемого самотечного участка, который позволяет перекачивать продукт до причальных сооружений безнапорной перекачкой, экономя капитальные затраты на строительство насосной станции и электроэнергии на эксплуатации данного участка. Также данные самотечные участки характеризуются наличием информации о расходе перекачиваемого продукта за счет того, что подача нефти/-нефтепродукта регулируется степенью открытия запорно-регулирующей арматуры. Также на морских объектах самотечные участки чаще всего искусственно созданные, поэтому характеристики геометрии самотека и его протяженность известны исходя из проектных решений. Наиболее яркий пример применения самотечного участка на морских объектах – это перевалочный комплекс «Шесхарис» в Азово-Черноморском бассейне в порте г. Новороссийск. Данный перевалочный комплекс играет ключевую роль в экспортных поставках углеводородного сырья на Европейский рынок. На промышленную площадку причальных сооружений «Шесхарис» из промышленной площадкой резервуарного парка «Грушовая» по технологическому тоннелю нефть перекачивается по самотечному участку, образовавшегося за счет различия высотных отметок Южного и Северного порталов технологического тоннеля [100].

Самотечный участок образуется ввиду того, что на некотором участке трубопроводной системы давление, образуемое перекачиваемой жидкостью, снижается до значения давления упругости ее насыщенных паров и жидкость

продолжает перекачиваться на этом сегменте в двух состояниях: в жидком и в газообразном [43]. В нижней образующей внутренней полости трубопровода протекает жидкость, а над ней находится газовоздушная смесь [10].

Определенное время считалось что самотечные участки в нефтепроводах могут способствовать компенсированию гидравлических ударов [1, 2], образующиеся при погрузке нефтяных танкеров, что является не доказанным фактом [3].

В большинстве своем образование самотечных участков имеет негативное влияние:

- образовавшиеся парогазовые скопления создают дополнительное сопротивление на трение, соответственно увеличивая энергозатраты для приводов насосов нефтеперекачивающих станций [96, 97];
- на самотечном участке невозможно проведения качественного дефектоскопического обследования нефтепровода [79, 81];
- на самотечном участке образуются сложности с инвентаризацией [89], подсчетом объема массы нефти и нефтепродуктов во внутренней полости трубы;
- снижение ресурса трубы самотечного участка ввиду кавитационного воздействия на внутреннюю полость трубы [80];
- повышенное содержание в нефти сернистых соединений может вызвать ускоренное протекание коррозионных процессов на внутренней поверхности верхней образующей тела трубы над свободной поверхностью жидкости, что ведет к увеличению вероятности возникновения аварий с потерей нефти и нарушению норм промышленной безопасности производств нанося вред экологии окружающей среды [12].

1.2 Теоретические подходы к описанию гидравлики течения самотечных участков трубопроводов

Изучением самотечных участков нефтепроводов и нефтепродуктопроводов занималось значительное число ученых, таких как М.В. Лурье, А.С. Дидковская [33, 49]. Например, М.В. Лурье изучал данные участки с точки зрения теории и методов расчета нестационарных процессов перекачки жидких продуктов с

возможным образованием и исчезновением парогазовых полостей. По Лурье М.В. [50] с учетом допущения, что силы тяжести и силы трения, действующие на продукт перекачки на самотечном участке трубопровода, превышают действующую силу инерции на том же самотечном участке трубопровода, а также допущения, что давление перекачиваемой жидкости на самотечном участке равно давлению насыщенных паров над перекачиваемой жидкостью до полного заполнения сегмента трубопровода жидкостью, определение факторов, действующих на сегментах трубопровода в условиях неустановившегося течения, заполненных жидкостью лишь частично, сводится к решению системы из дифференциального и алгебраического уравнения (1.1):

$$\begin{cases} \frac{\partial \rho S}{\partial t} + \frac{\partial \rho \vartheta S}{\partial x} \\ \vartheta = -C_{\text{ш}} \sqrt{R_r |\operatorname{tg} \alpha|} \cdot \operatorname{sign} \alpha' \end{cases}, \quad (1.1)$$

где ρ – давление жидкость, Па; ϑ – скорость течения жидкости, м/с; S – степень заполнения сегмента трубопровода; $C_{\text{ш}}$ – коэффициент Шези, м^{0,5}/с; R_r – гидравлический радиус смоченного сечения; α – угол наклона сегмента трубопровода, °.

Общепризнанная теория функционирования самотечных участков подразумевает наличие протяженной парогазовой полости и течение жидкости неполным сечением. На рисунке 1.6 приведена схема самотечного участка по данным ПАО «Транснефть», описывающее движение течения продукта перекачки после перевальной точки в условиях формирования на нисходящем участке парогазовой области, с указанием гидравлического уклона трубопровода и скоростей на полностью заполненном участке и на самотечном участке.

Помимо рассмотренных ранее эксплуатационных проблем при функционировании самотечных участков, еще одним важным аспектом является то обстоятельство, что гидравлическая модель самотечного участка содержит неопределенность.

Наиболее неоднозначным вопросом является определение коэффициента заполнения самотечного участка [86].

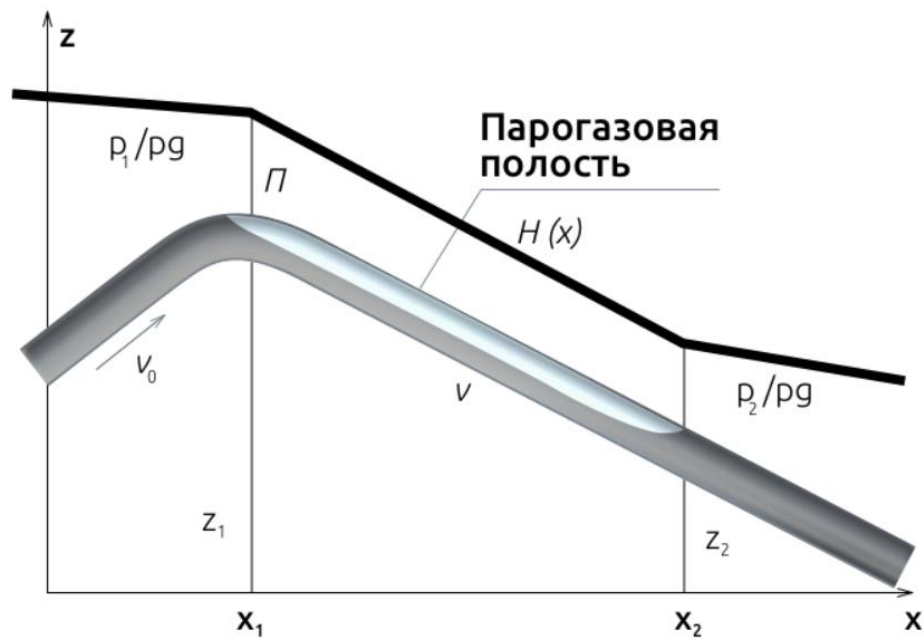


Рисунок 1.6 – Самотечный участок с парогазовой областью, [84]

где Π – перевалочная точка; z_1 – геодезическая отметка перевалочной точки и начала парогазовой области, м; z_2 – геодезическая отметка конца парогазовой области, м; x_1 – координата перевалочной точки и начала парогазовой области, м; x_2 – координата конца парогазовой области, м; $P_1/\rho g$ – пьезометрический напор до самотечного участка, м; $P_2/\rho g$ – пьезометрический напор после самотечного участка, м; $H(x)$ – напор на самотечном участке, м, v_0 – скорость течения на полностью заполненном участке трубопровода, м/с; v – скорость течения на частично заполненном участке трубопровода, м/с

Тем более эта задача становится сложной в свете отсутствия прибора контроля на самотечных участках. На данных участках как правило не устанавливаются манометры, уровнемеры и расходомеры, что определяет несистемность сбора данных о режимах перекачки и уровне заполнения на данных участках [56].

Существующие гидравлические модели самотечных участков построены на формулах русловой гидравлики не позволяют однозначно определить коэффициент заполнения. Рассмотрим существующие способы расчета коэффициента.

В исследовании М.В. Лурье [49] самотечное течение характеризуется как расслоенное, определяя неполное заполнения тела трубы продуктом перекачки, представленное на рисунке 1.7.

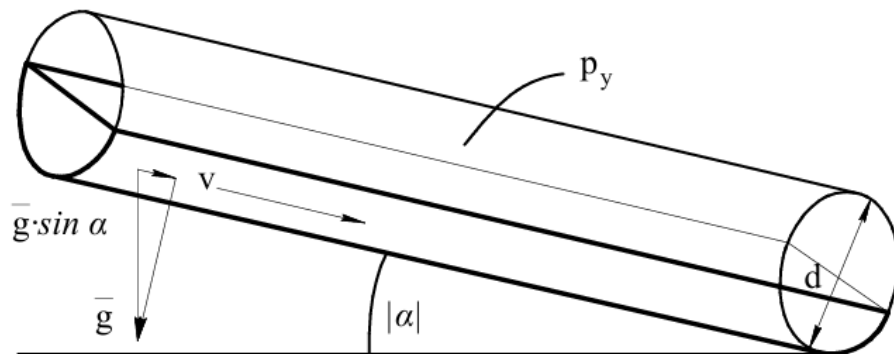


Рисунок 1.7 – Расслоенное самотечное течение жидкости,

где d – диаметр трубопровода, м; α – угол наклона самотечного участка, °; $\bar{g} \cdot \sin \alpha$ – ускорение свободного падения, направленное вдоль оси трубопровода, м/с²; v – скорость течения жидкости, м/с; P_y – давление в парогазовой полости, Па [49].

На рисунке 1.8 представлен элемент жидкости на самотечном участке

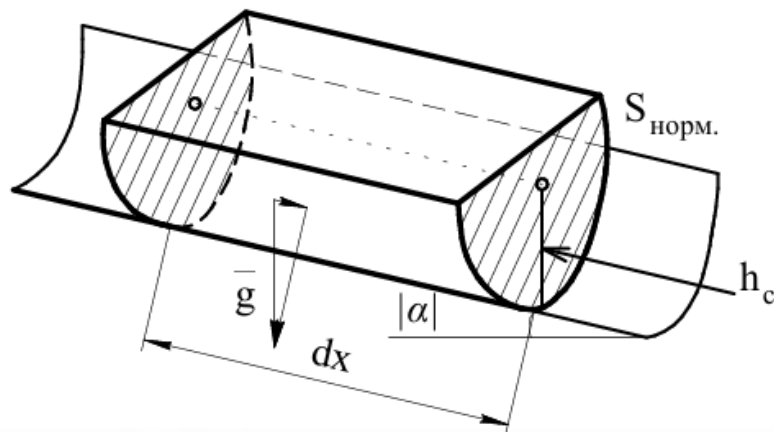


Рисунок 1.8 – Элемент жидкости на самотечном участке,

где dx – элементарная частица длины участка трубопровода, м; $|\alpha|$ – угол наклона самотечного участка, °; $\bar{g}$ – ускорение свободного падения в векторной форме, м/с²; h_c – высота заполнения самотечного участка, м; $S_{\text{норм}}$ – площадь нормального поперечного сечения самотечного участка трубопровода, м² [49]

В соответствии с представленной методикой, скорость течения потока, выраженная через уравнение равновесия потока можно представить через следующую формулу (1.2):

$$v = \sqrt{\frac{8g}{\lambda_c}} \cdot \sqrt{R_r \sin|\alpha|} = C_{Ш} \cdot \sqrt{R_r \sin|\alpha|}, \quad (1.2)$$

где $C_{Ш}$ – коэффициент Шези, $m^{0,5}/c$; R_r – гидравлический радиус смоченного сечения, м; λ_c – безразмерный коэффициент гидравлического сопротивления течению жидкости на самотёчном участке трубопровода; g – ускорение свободного падения, m/c^2 ; $|\alpha|$ – абсолютная величина угла наклона трубопровода по отношению к горизонту в сечении x , °.

В формуле (1.2) коэффициент Шези играет ключевую роль и может быть определен следующим выражением (1.3):

$$C_{Ш} = \sqrt{\frac{8g}{\lambda_c}}. \quad (1.3)$$

В формуле (1.3) коэффициент гидравлического сопротивления λ_c может быть представлен в соответствии с π -теоремой Букингема как функция 3-х аргументов (1.4):

$$C_{Ш} = \sqrt{\frac{8g}{\lambda_c(Re, \sigma, \varepsilon)}}, \quad (1.4)$$

где Re – число Рейнольдса; σ – степень заполнения трубопровода; ε – относительная шероховатость внутренней поверхности трубы.

Ввиду того, что самотечные участки распространены в различных отраслях и производственных процессах, были получены различные формулы коэффициента Шези, например формулы Маннинга, Павловского и другие. Для обобщения решения задачи о заполнении трубопровода, было предложено выражение, решение которого позволяет уточнить глубину потока жидкости для каждого из представленных коэффициентов Шези (1.5):

$$Q = S_{норм} \cdot C_{Ш} \sqrt{R_r \cdot g \sin|\alpha|}, \quad (1.5)$$

где $S_{норм}$ – нормальная глубина потока (некоторая постоянная величина площади смоченной части сечения трубы), м; $S_{норм}$ – площадь части сечения, занятой жидкостью, m^2 .

Данное выражение можно представить системой уравнений (1.6):

$$\left\{ \begin{array}{l} S_{\text{норм}} = \frac{1}{2} \cdot r_0^2 \cdot 2\varphi - \frac{1}{2} \cdot r_0^2 \cdot \sin 2\varphi = \frac{1}{2} r_0^2 \cdot (2\varphi - \sin 2\varphi) \\ \sigma = \frac{S_{\text{норм}}}{S_0} = \frac{1}{2\pi} \cdot (2\varphi - \sin 2\varphi) \\ P_{\text{смоч}} = r_0 \cdot 2\varphi \\ R_{\Gamma} = \frac{S_{\text{норм}}}{P_{\text{смоч}}} = \frac{r_0}{2} \cdot \frac{2\varphi - \sin 2\varphi}{2\varphi} \end{array} \right. , \quad (1.6)$$

где S_0 – площадь полного сечения трубы, м^2 ; 2φ – центральный угол, под которым видна свободная поверхность жидкости, $^\circ$; r_0 – радиус трубы, м ; $P_{\text{смоч}}$ – периметр смоченной части сечения трубы, м .

Расход жидкости на самотечных участках в заполненных сечениях может быть описан через следующее выражение (1.7):

$$Q = v_0 \cdot S_0 = v \cdot S_{\text{норм}}, \quad (1.7)$$

где v_0 – скорость движения жидкости на заполненных участках трубопровода, м/с ; v – скорость течения, м/с .

Из этого следует, что скорость течения жидкости на самотечном участке выше, чем на полностью заполненном участке.

Однако на степень заполнения трубопровода, как следует из формулы (1.5) влияет угол наклона трубопровода. Как результат, в исследовании М.В. Лурье предложены аппроксимационные формулы для расчета степени заполнения трубопровода продуктом перекачки в зависимости от отношения гидравлического уклона к абсолютной величине синуса угла α наклона самотечного участка к горизонту.

В случае выполнения следующего неравенства (1.8):

$$\gamma = i / \sin|\alpha| \geq 1, \quad (1.8)$$

где i – гидравлический уклон участков трубопровода, полностью заполненных жидкостью; γ – отношение гидравлического уклона к абсолютной величине синуса угла α наклона самотечного участка к горизонту.

В случае выполнения следующего неравенства (1.9):

$$32,32 \cdot \lambda_0 \leq \gamma < 1, \quad (1.9)$$

где λ_0 – коэффициент гидравлического сопротивления, при котором коэффициент заполнения σ будет равен 1,

коэффициент заполнения следует определять по следующему выражению (1.10):

$$\sigma = 1 - 2,98 \cdot 10^{-2} \cdot \sqrt{\frac{2\gamma}{\lambda_0}} \cdot (1 - \sqrt{\gamma}). \quad (1.10)$$

В случае выполнения следующего неравенства (1.11):

$$4,87 \cdot \lambda_0 \leq \gamma < 32,32 \cdot \lambda_0, \quad (1.11)$$

коэффициент заполнения следует определять по следующему выражению (1.12):

$$\sigma = 9,39 \cdot 10^{-2} \cdot \sqrt{\frac{2\gamma}{\lambda_0}} + 0,113. \quad (1.12)$$

В случае выполнения следующего неравенства (1.13):

$$\gamma < 4,87 \cdot \lambda_0, \quad (1.13)$$

коэффициент заполнения следует определять по следующему выражению (1.14):

$$\sigma = 0,1825 \cdot \left(\frac{2\gamma}{\lambda_0}\right)^{0,356}. \quad (1.14)$$

Недостатком классического подхода определения коэффициента заполнения является то обстоятельство, что коэффициент Шези принимается по формулам русловой гидравлики и при этом явно не отражена его зависимость от вязкости перекачиваемого продукта и его других параметров.

В работе Ш.И. Рахматуллина [88] была предпринята учесть этот недостаток и предложить способы по определению коэффициента Шези.

Обращаясь к математическому аппарату для определения коэффициента Шези, следует отметить особенность, что зависимости, использующие гидравлический радиус, получены эмпирическим методом и подлежат использованию в гидравлических расчетах исключительно в ограниченном диапазоне скоростей для движения воды и для гидравлических радиусов (1.15):

$$R_\Gamma = \omega / \chi, \quad (1.15)$$

где ω – площадь живого сечения, м²; χ – смоченный периметр, м.

Связь коэффициента заполнения k_3 с коэффициентом Шези определяется его зависимостью от гидравлического радиуса самотечного участка магистрального трубопровода [6]. Для определения данной связи была использована формула Манинга, предназначенная для определения модуля расхода жидкости с учётом

коэффициента заполнения для диапазона варьирующихся диаметров магистральных трубопроводов (1.16):

$$C = \frac{1}{n} \cdot \sqrt[n]{R_r} \quad (1.16)$$

и формула Павловского Н.Н (1.17):

$$\left(C = \frac{1}{n} \cdot R_r^{1,5\sqrt{n}} \right), \quad (1.17)$$

где n – коэффициент шероховатости внутренней стенки трубопровода [94].

Как было описано выше, использование данных формул ограничено перекачиваемой жидкостью и не может быть перенесено с воды на нефть и нефтепродуктов, что в свою очередь оставляет неопределенность в определении влияния параметра вязкости на коэффициент заполнения на самотечном участке трубопроводов. Однако, можно использовать формулу Шези для определения средней скорости течения в открытых руслах для равномерных турбулентных потоков течений (1.18):

$$v = C \cdot \sqrt{R_r \cdot i}, \quad (1.18)$$

где v — средняя скорость течения, м/с, R_r — гидравлический радиус, м, i — уклон для русла, C — коэффициент Шези, связанный с коэффициентом гидравлического трения, $m^{0,5}/c$.

Существенное влияние на коэффициент заполнения и, как следствие, на коэффициент Шези оказывает коэффициент гидравлического сопротивления. Формула А.Д. Альтшуля может быть использована для определения коэффициента Шези на самотечном участке для вязкой жидкости (1.19):

$$C = 20 \cdot l \cdot q \cdot \frac{R_r}{\varepsilon + \frac{0,0385 \cdot v}{(g \cdot R_r \cdot i_c)^{0,5}}}, \quad (1.19)$$

где ε — приведенная линейная шероховатость, мм (для магистральных трубопроводов $\varepsilon = 0,1$ мм); v — кинематическая вязкость жидкости [88].

Предложенный способ, однако, не решает всех проблем с моделированием коэффициента заполнения самотечных участков, так как, как показывает практика, самотечные участки обладают специфичной гидравликой, на которую влияет не только вязкость, но и множество других факторов.

1.3 Особенности современного расчета коэффициента заполнения в соответствии с нормативными документами

1.3.1 Сравнительный анализ существующих методик расчета коэффициента заполнения самотечных участков

В настоящее время существует 4 отечественных источника с описанной методикой определения коэффициента заполнения [35, 76, 82], где последняя методика наиболее актуальная и основана на определении модуля расхода на самотечном участке [55]. Авторским коллективом [58] была предпринята попытка сравнения методик для определения зависимости коэффициента заполнения по критерию точности и однозначности полученных значений. В качестве примера был выбран самотечный участок диаметром $D_y = 500$ мм, жидкость с кинематической вязкостью $\nu = 1$ сСт и расход жидкости $Q = 800$ м³/час. Зависимости результатов расчета коэффициента, полученных по каждой методике на представленных на рисунке 1.9.

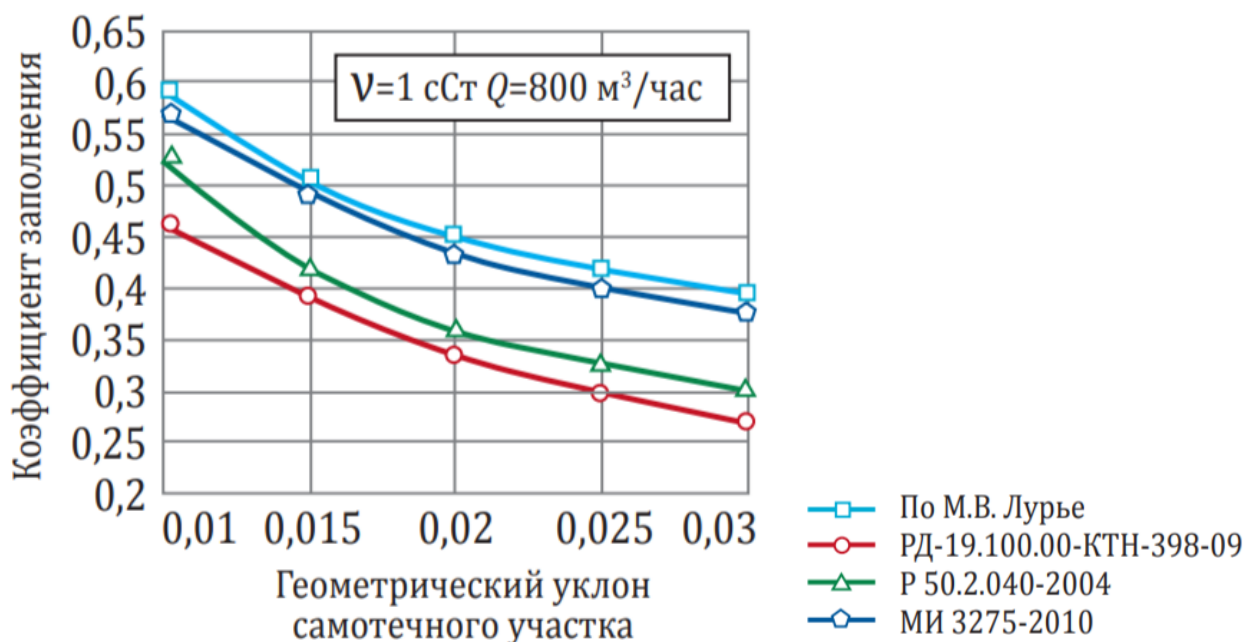


Рисунок 1.9 – Зависимости результатов расчета коэффициента, полученных по каждой методике [58]

По рисунку 1.9 видно, что результаты расчета различаются между собой в среднем на 30%. Это связано с различием применяемых математических и физических моделей в каждой из методик, а также отсутствие данных о

подтверждении сходимости теоретических результатов методик и экспериментально полученных данных о коэффициенте заполнения [46].

1.3.2 Анализ методики расчета коэффициента заполнения самотечного участка трубопровода МИ 3275-2016

Рассмотрим рекомендацию по метрологии МИ 3275-2016 [35] как наиболее актуальную методику на настоящий момент.

Основные рекомендации направлены на определение массы нефтепродуктов в трубопроводах.

Определение массы нефтепродукта определенного сорта в трубопроводе заключается в произведении объема и плотности перекачиваемого продукта, приведенных либо к нормальным условиям, либо к условиям измерения объема.

Следует определять массу нефтепродукта как сумму масс на отдельных участках нефтепродуктопровода (1.20):

$$M_{\text{тр}} = \sum_{i=1}^n M_i, \quad (1.20)$$

где $M_{\text{тр}}$ – масса нефтепродукта в нефтепродуктопроводе, т; i – номер участка нефтепродуктопровода; n – номер последнего участка нефтепродуктопровода; M_i – масса нефтепродукта, находящаяся в определенном участке нефтепродуктопровода, т.

Масса нефтепродукта, находящегося определенном участке нефтепродуктопровода, зависит от плотности и объема данного продукта и определяется следующим образом (1.21):

$$M_i = V_{\text{нп } 20} \cdot \rho_{20} \cdot 10^{-3}, \quad (1.21)$$

где $V_{\text{нп } 20}$ – объем нефтепродукта, равный объему вместимости участка нефтепродуктопровода, приведенного к нормальным условиям, м³; ρ_{20} – средняя плотность нефтепродукта, приведенная к стандартным условиям, кг/м³.

Объем нефтепродукта, равный объему вместимости участка нефтепродуктопровода, приведенного к нормальным условиям определяется следующим образом (1.22):

$$V_{\text{нп } 20} = V_i^{\text{гр}} \cdot \frac{K_{it} \cdot K_{ip}}{K_i^{\text{пер}}}, \quad (1.22)$$

где $V_i^{\text{гр}}$ – геометрическая вместимость участка трубопровода м^3 ; K_{it} – коэффициент, учитывающий влияние температуры на вместимость участка трубопровода, м^3 ; K_{ip} – коэффициент, учитывающий влияние избыточного давления на вместимость участка трубопровода; $K_i^{\text{пер}}$ – коэффициент, учитывающий влияние температуры и избыточного давления на объем нефтепродукта.

Средняя плотность нефтепродукта, приведенная к стандартным условиям, определяется следующим образом (1.23):

$$\rho_{20} = 0,5 \cdot (\rho^{\text{н}} + \rho^{\text{к}}), \quad (1.23)$$

где $\rho^{\text{н}}$ – плотность нефтепродукта, измеренная в начале участка нефтепродуктопровода и приведенная к нормальным условиям, $\text{кг}/\text{м}^3$; $\rho^{\text{к}}$ – плотность нефтепродукта, измеренная в конце участка нефтепродуктопровода и приведенная к нормальным условиям, $\text{кг}/\text{м}^3$.

Из формулы (1.22) видно, что алгоритм учитывает изменение формы тела трубы за счет естественного расширения от влияния внешних температурных изменений, а также исходя из изменения термобарических параметров перекачки жидкости при полном заполнении продуктом перекачки тела трубопровода [46].

Для определения массы нефтепродукта на неполностью заполненного участке трубопровода дополнительно введен коэффициент заполнения, учитывающий уровень заполнения тела трубы продуктом перекачки.

С учетом данного коэффициента формула (1.20) примет следующий вид (1.24):

$$M_i = K_3 \cdot V_{\text{нп } 20} \cdot \rho_{20} \cdot 10^{-3}, \quad (1.24)$$

где K_3 – коэффициент заполнения участка трубопровода продуктом перекачки.

Особую важность представляют из себя самотечные участки нефтепродуктопроводов.

Поскольку на данных участках перекачка ведется неполным сечением за счет гравитационных сил, образуя неустановившийся режим перекачки, то

коэффициент заполнения участка трубопровода на данном участке должен учитывать гидравлический уклон участка трубопровода и скоростную характеристику потока.

Для этого в методике используют табличные значения коэффициента заполнения для каждого модуля расхода и диаметра трубопровода, приведенные в таблице 1.2.

Может возникнуть ситуация, когда модуль расхода не будет соответствовать значениям, приведенным в таблице 2. В данном случае для определения коэффициента заполнения следует выполнить интерполяцию, используя следующую формулу (1.25)

$$K_3(M) = K_3(M_1) \cdot (M_1 - M_0) + K_3(M_0) \cdot (M - M_0) / (M_1 - M_0), \quad (1.25)$$

где M_0, M_1 – ближайшие модули расхода к заданному модулю расхода M , м³/с.

Модуль расхода для самотечного участка трубопровода определяется следующим образом (1.26):

$$M = \frac{Q}{\sqrt{i}}, \quad (1.26)$$

где Q – расход перекачиваемой жидкости, м³/с; i – гидравлический уклон самотечного участка трубопровода.

Гидравлический уклон самотечного участка трубопровода определяется по следующей формуле (1.27):

$$i = \frac{h}{l}, \quad (1.27)$$

где h – разность геодезических отметок начала и конца самотечного участка, м; l – протяженность самотечного участка, м.

Алгоритм расчета коэффициента заполнения, предложенный в нормативном документе МИ 3275 можно признать только оценочным, поскольку он ориентируется только на примитивный расчет модуля расхода и табличные данные.

В этой связи остро возникает необходимость разработки методики расчета коэффициента заполнения, в которой учтены более сложные зависимости [78].

Таблица 1.2 – Значения модуля расхода M по методике МИ 3275-2016 [35]

Коэффициент заполнения K_z	Номинальный диаметр трубопровода DN								
	200	300	350	500	600	700	800	1000	1200
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0,05	0,0184	0,0542	0,0818	0,2118	0,3444	0,5195	0,7417	1,3449	2,1869
0,10	0,0368	0,1058	0,1636	0,4236	0,6888	1,0390	1,4835	2,6897	4,3738
0,15	0,0552	0,1627	0,2455	0,6354	1,0332	1,5586	2,2252	4,0346	6,5607
0,20	0,0736	0,2170	0,3273	0,8472	1,3776	2,0781	2,9669	5,3794	8,7476
0,25	0,0920	0,2712	0,4091	1,0590	1,7221	2,5976	3,7087	6,7243	10,9344
0,30	0,1104	0,3254	0,4909	1,2708	2,0665	3,1171	4,4504	8,0692	13,1213
0,35	0,1288	0,3767	0,5727	1,4826	2,4109	3,6367	5,1922	9,4140	15,3082
0,40	0,1472	0,4339	0,6545	1,6944	2,7553	4,1562	5,9339	10,7588	17,4951
0,45	0,1656	0,4882	0,7364	1,9062	3,0997	4,6757	6,6756	12,1037	19,6820
0,50	0,1840	0,5427	0,8182	2,1180	3,4441	5,1952	7,4174	13,4486	21,8689
0,55	0,2024	0,5967	0,9000	2,3298	3,7885	5,7148	8,1591	14,7935	24,0558
0,60	0,2208	0,6509	0,9818	2,5416	4,1330	6,2343	8,9008	16,1383	26,2427
0,65	0,2392	0,7051	1,0637	2,7534	4,4774	6,7538	9,6425	17,4832	28,4296
0,70	0,2576	0,7593	1,2273	3,1770	4,8218	7,2733	10,3843	18,8280	30,6165
0,75	0,2760	0,8136	1,3091	3,3888	5,1662	7,7928	11,1261	20,1729	32,8034
0,80	0,2944	0,8678	1,3909	3,6006	5,5106	8,3124	12,6095	21,5177	34,9903
0,85	0,3128	0,9221	1,4728	3,8124	5,8550	8,8190	13,3512	22,8686	37,1771
0,90	0,3312	0,9763	1,5546	4,0242	6,1994	9,3514	14,0930	24,2075	39,3640
0,95	0,3495	1,0306	1,6363	4,2360	6,5438	9,8709	14,8350	25,5532	41,5509
1,00	0,3500	1,0800	1,7000	4,2000	6,8882	10,3905	15,5767	26,8972	43,7380

1.4 Выводы по первой главе

Проведен анализ современной теории и практики эксплуатации самотечных участков в Российской Федерации и за рубежом, что позволило сделать следующие выводы:

1. Возникновение самотечного течения на нефте-/нефтепродуктопроводах Российской Федерации в последнее десятилетие стало более частым и закономерным явлением ввиду образования низконапорных режимов перекачки углеводородов на экспортных направлениях.

2. Гидравлические зависимости для описания движения жидкости на самотечных участках трубопроводов являются широко известными, однако, их вывод основан на классических формулах русловой гидравлики применительно к потоку воды с использованием коэффициента Шези, что нецелесообразно использовать для определения степени заполнения на самотечных участках трубопроводов.

3. Алгоритм расчета коэффициента заполнения, предложенный в отечественной методике МИ 3275-2016 можно считать исключительно оценочным при проведении количественного учета нефти и нефтепродуктов, поскольку он ориентируется только на примитивный расчет модуля расхода течения жидкости.

4. Существует определенный резерв по уточнению коэффициента заполнения трубопровода самотечного участка поскольку следует учитывать вторичные факторы.

ГЛАВА 2 ОБОСНОВАНИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКОГО ПОДХОДА К РАСЧЕТУ КОЭФФИЦИЕНТА ЗАПОЛНЕНИЯ

2.1 Специфика моделирования гидравлики самотечных участков

В рамках Главы 1 было показано, что исследование самотечных участков трубопроводов и гидродинамические процессы на данных сегментах вызывают особый интерес в зарубежном и отечественном научном сообществе трубопроводного транспорта углеводородов в том числе из-за того, что, несмотря на примитивную гидравлику при ближайшем её рассмотрении процесса было отмечено, что на результат формирования самотечного течения жидкости, на коэффициент заполнения трубопровода и на коэффициенты Шези влияет значительное количество вторичных факторов [68]. Стал очевиден тот факт, что требуется экспериментальное исследование влияния данных факторов на вышеописанные коэффициенты и на сам процесс образования самотека [93].

Среди наиболее значимых исследований самотечных режимов перекачки можно выделить работу с экспериментальными исследованиями университета Лафборо в Великобритании [113]. Авторы данного исследования оценивали работу нового измерительного датчика на основе микроволновой технологии для определения расхода в трубопроводе на различных углах наклона, диаметрах трубопровода и режимах перекачки жидкости на различных глубинах потока [112].

В рамках данной работы был спроектирован и смонтирован экспериментальный стенд для изучения процесса самотечного течения жидкостей, включающий в себя эталонный измеритель, новый измерительный датчик на основе микроволнового излучения, а также необходимые емкости, трубопроводные обвязки, соединительные муфты и детали трубопроводов. На рисунке 2.1 приведен общий вид стенда с обозначениями элементов конструкции и технологии экспериментального стенда.

На стенде используется следующее оборудование:

1. Микроволновый измеритель;
2. Емкость слива/налива жидкости;

3. Эталонный магнитный измеритель.

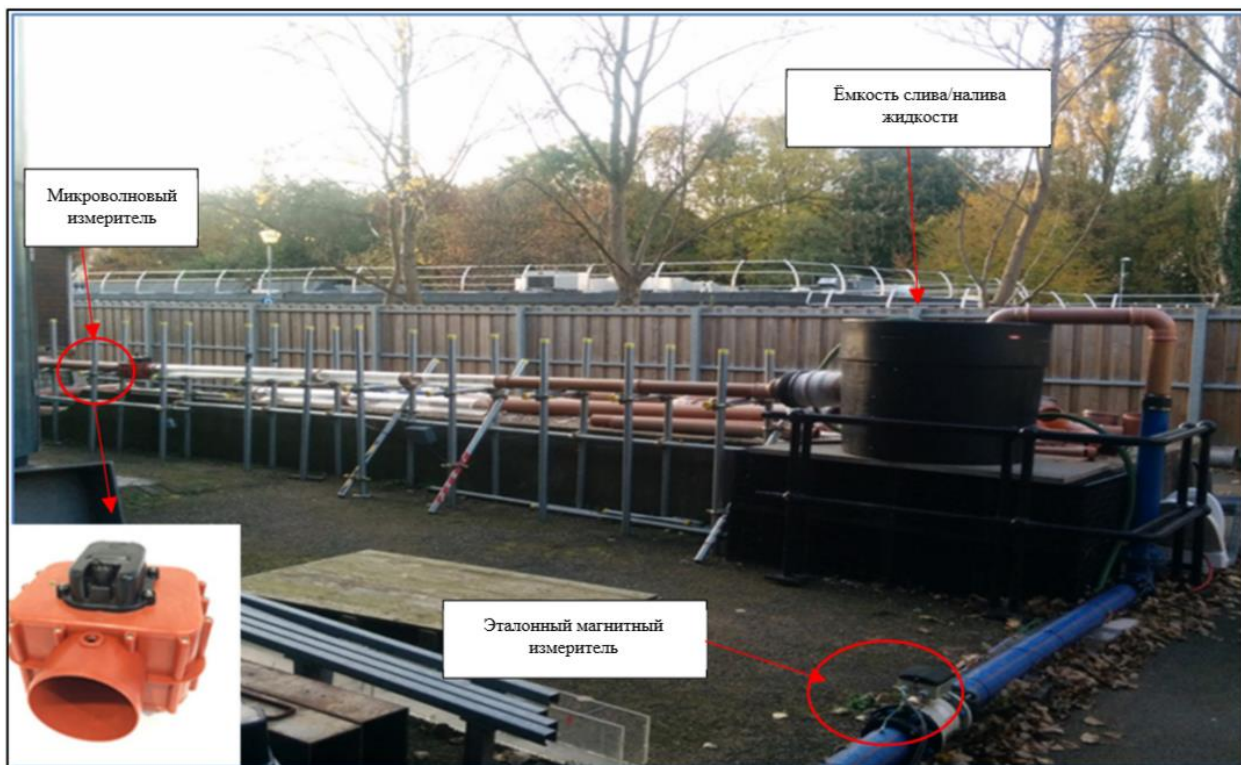


Рисунок 2.1 – Общий вид стенда для определения расхода в трубопроводе при различных углах наклона [113]

Данный стенд включает в себя емкость для слива/налива экспериментальной жидкости, эталонный магнитный измерителем и микроволновым измерителем с удаленным доступом. Данное оборудование обвязано трубопроводами диаметрами от DN100 до DN150. Данный стенд достаточно металлоемкий, несмотря на использование ПВХ труб. Особенностью стенда является использование микроволного измерителя уровня заполнения трубопровода, а также эталонный магнитный измеритель, с результатами измерения которого сравнивают данные, полученные с микроволнового измерителя.

Микроволновый измеритель приведен на рисунке 2.2.

Для данного стенда была разработана технологическая схема экспериментального стенда, приведенная на рисунке 2.3. Для обеспечения адекватной работы стенда были определены основные технические параметры стенда. Основные технические параметры экспериментального стенда для

определения расхода в трубопроводе на различных углах наклона приведены в таблице 2.1.

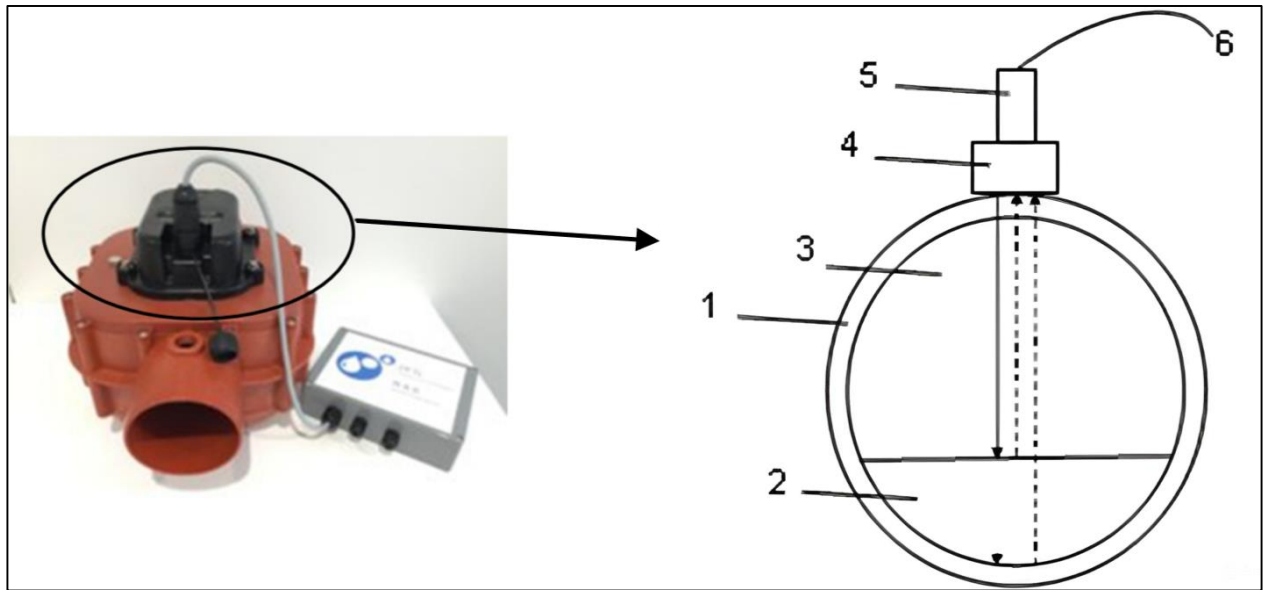


Рисунок 2.2 – Микроволновое оборудование (слева) и поперечный разрез (справа), где: 1 – трубопровод, 2 – уровень жидкости, 3 – парогазовое пространство, 4 – волноводы, 5 – микроволновый датчик, 6 – соединительный кабель [113]

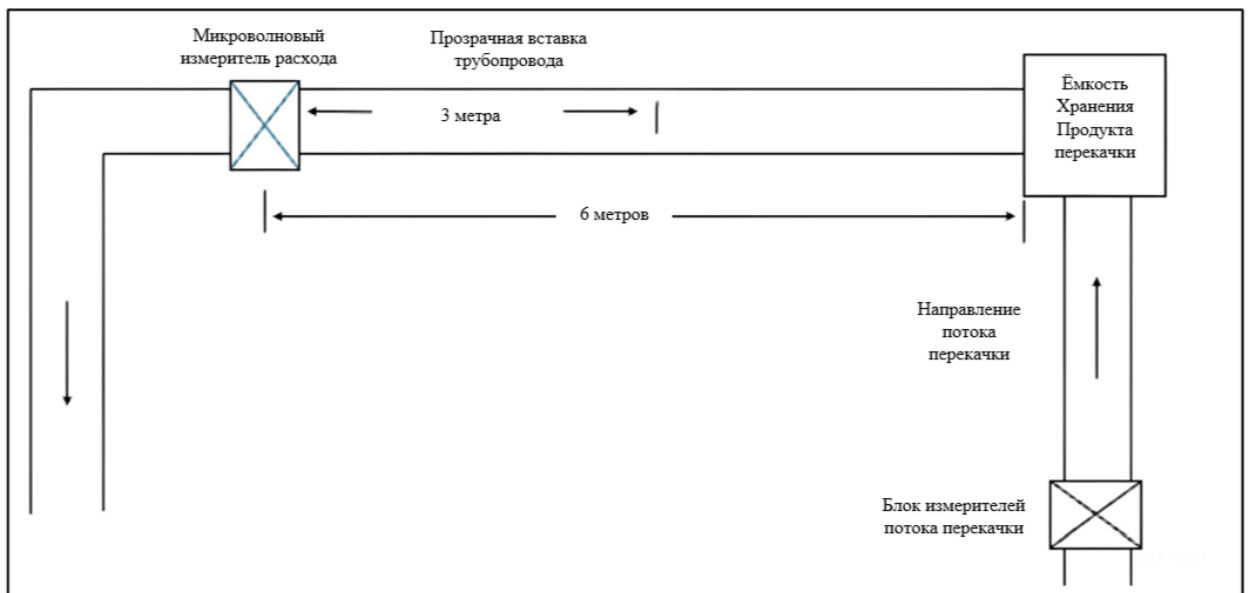


Рисунок 2.3 – Технологическая схема экспериментального стенда для определения расхода в трубопроводе на различных углах наклона [42]

Таблица 2.1. – Технические параметры экспериментального стенда для определения расхода в трубопроводе (по данным автора)

№ п/п	Характеристика	Единицы измерения	Значение
1	Ширина	мм	3000
2	Длина	мм	2100
3	Высота	мм	1000
4	Расстояние микроволнового измерителя от резервуара	мм	6000
5	Материальное исполнения трубопроводов	-	Поливинилхлорид (ПВХ)
6	Диаметр трубопроводов	мм	101,6; 152,4
7	Материальное исполнения опорных конструкций		Сталь
8	Технологическое оборудование		
8.1	Микроволновый измеритель		
8.1.1	Частота	ГГц	10
8.1.2	Количество датчиков	шт	3
8.1.3	Точность измерения уровня жидкости	мм	0,1
8.2	Электромагнитный расходомер		
8.2.1	Точность	%	±2,5
8.2.1	Диапазон расхода	л/с	0,6 - 22,6
9	Материальное исполнение резервуара	-	Сталь
10	Диапазон изменения угла наклона трубопроводов	°	1-2
11	Турбулентный тип потока	-	Турбулентный
11.1	Число Рейнольдса	-	От $0,27 \cdot 10^5$ - $3,25 \cdot 10^5$
12	Сверхкритические потоки	-	-
12.1	Число Фруда	-	1,5 - 3,6

Основной целью данной работы было использование представленной формулы Коулбрука-Уайта (2.1):

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log_{10} \left(\frac{k_s}{3.71 \cdot D} + \frac{2.51}{Re \cdot \sqrt{f}} \right), \quad (2.1)$$

где f – коэффициент гидравлического трения; k_s – коэффициент трения, м.

Применение данной формулы обосновано тем, что была предпринята попытка экспериментального установления связи данной формулы с коэффициентом Шези. Было проведено 176 экспериментов на двух разных углах наклона и двух диаметрах трубопровода. Полученное облако экспериментальных значений расхода для 3-х комбинаций «диаметр трубопровода/угол наклона», а также распределения коэффициента Шези для 3 комбинаций представлены на рисунке 2.4.

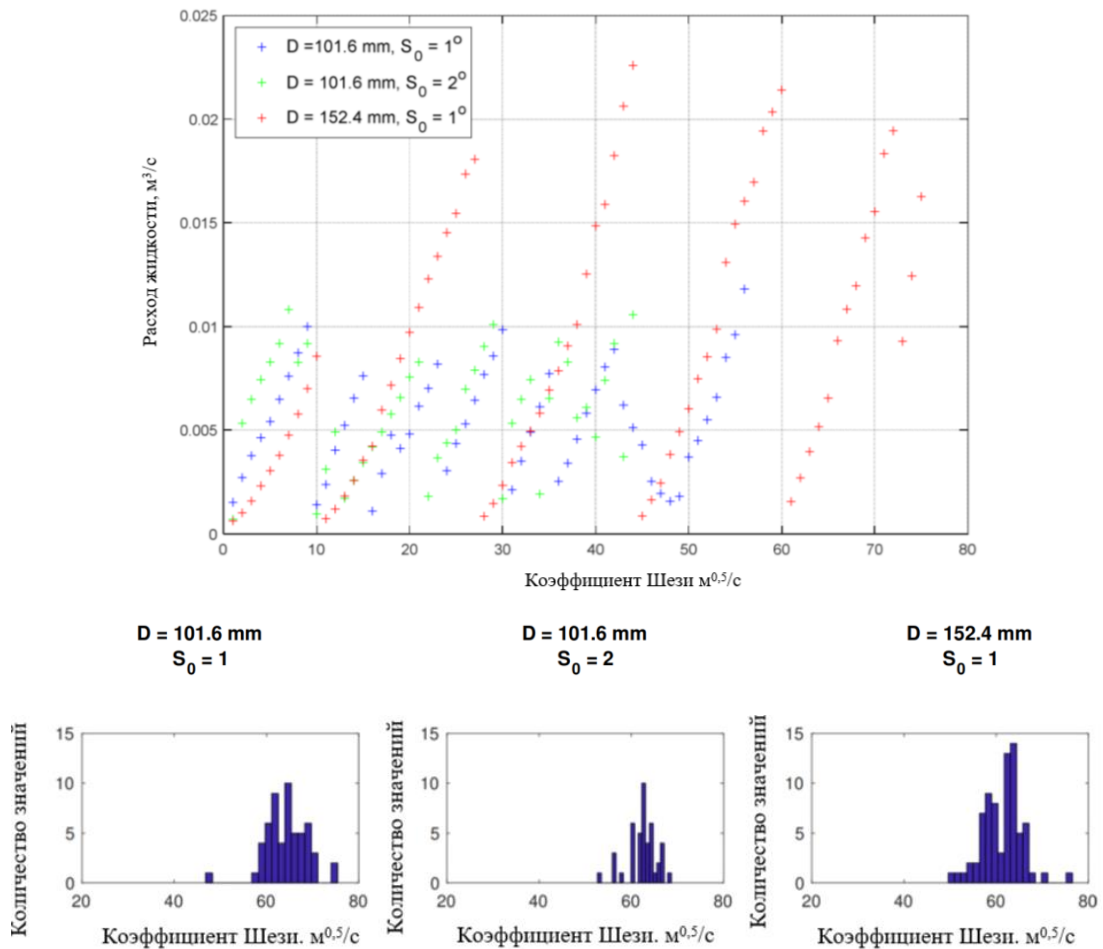


Рисунок 2.4 – Облако экспериментальных значений расхода для 3-х комбинаций «диаметр трубопровода/угол наклона» (сверху) и распределения коэффициента Шези для 3 комбинаций (снизу), где D – диаметр трубопровода, м; S_0 – угол наклона трубопровода, ° [113]

Авторы работ отметили, что при разном заполнении тела трубопровода коэффициент заполнения зависит сильно нелинейно от режима течения [119]. Также при проведении экспериментов наблюдались вторичные эффекты. Общей рекомендацией авторского коллектива является то, что для более достоверного определения коэффициента заполнения требуется обрабатывать экспериментально полученные данные.

Другим не менее важным исследованием можно выделить коллективную работу научного коллектива из Национальной ядерной лаборатории г. Уэрингтон и университета г. Ливерпуль [111]. Авторский коллектив исследовал течение жидкости, а именно распределение скоростей при различных глубинах потока в

частично заполненных трубных секциях при различных режимах (ламинарный/турбулентный).

В рамках данной работы был спроектирован и смонтирован экспериментальный стенд для изучения процесса самотечного течения жидкостей. На рисунке 2.5 приведена схема экспериментального стенда, включающая в себя насос, резервуар для хранения жидкости, узел гашения пульсаций, блок измерения потока, цилиндрической камеры, рабочего трубопровода, узла измерения давления и блока видеокамер.

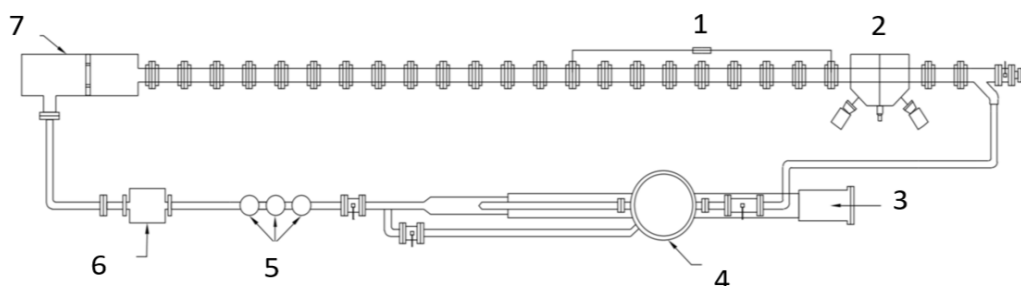


Рисунок 2.5 – Схема экспериментального стенда, где 1 - узел измерения давления, 2 – блок видеокамер, 3 – насос, 4 – резервуар для хранения жидкости, 5 – узел гашения пульсаций, 6 – узел измерения расхода, 7 – цилиндрическая камера [111]

Подача жидкости в рабочую секцию осуществляется насосом, который подает жидкость из коллекторного бака объемом 500 л из нержавеющей стали. Перед поступлением в рабочую секцию рабочая жидкость проходит через три гасителя пульсаций и массовый расходомер Кориолисова типа и подается в цилиндрическую камеру, где поток полностью реверсируется и проходит через набор сит для устранения остаточного завихрения, прежде чем попасть на вход рабочей секции. После рабочей секции жидкость проходит блок с видеокамерами для фиксации уровня заполнения трубопровода и подается обратно в коллекторный бак по гибкому резиновому шлангу, завершая таким образом цикл подачи.

Для обеспечения адекватной работы стенда были определены основные технические параметры стенда. Основные технические параметры экспериментального стенда по исследованию распределения скоростей потока приведены в таблице 2.2.

Таблица 2.2 – Основные технические параметры экспериментального стенда по исследованию распределения скоростей потока (по данным автора)

№ п/п	Характеристика	Единицы измерения	Значение
1	Длина	мм	2330
2	Материальное исполнения трубопроводов	-	Боросиликатное стекло
3	Диаметр трубопроводов	мм	100
4	Материальное исполнения опорных конструкций		Сталь
5	Технологическое оборудование		
5.1	Винтовой насос		
5.1.1	Расход	м ³ /ч	1,5 - 225
5.1.2	Давление	МПа	2,4
5.1.3	Температура перекачиваемой жидкости	°С	-10...100
9.2	Расходомер		
9.2.1	Точность	%	±0,1
9.2.1	Диапазон расхода	кг/ч	100 - 3000
10	Емкостное оборудование		
10.1	Резервуар		
10.1.1	Материальное исполнение	-	Сталь
10.1.2	Объем	л	500
11	Диапазон изменения глубины потока	%	24 - 100
12	Количество пульсационный демпферов	шт.	3
13	Тип системы подготовки потока	-	Экраны для удаления завихрений

В рамках работы была попытка обработки экспериментально полученных данных о перекачки жидкости относительно числа Фруда.

Для обработки использовалась следующая формула (2.2):

$$Fr = \frac{\tilde{m}}{\rho} \sqrt{\frac{2R \sin \theta}{g R^6 (\theta - \frac{1}{2} \sin 2\theta)^3}}, \quad (2.2)$$

где θ – угол поперечного сечения боковой образующей трубы, °; R – радиус поперечного сечения трубы, м; $\tilde{m}$ – массовый расход, кг/с.

При наблюдаемых экспериментально полученных малых коэффициентах заполнения трубопровода в работе было отмечено интенсивное волнообразование на поверхности перекачиваемой жидкости.

Пример волнообразования по результатам проведения серии экспериментов на экспериментальном стенде в Национальной ядерной лаборатории г. Уэрингтон и университета г. Ливерпуль приведен на рисунке 2.6.



Рисунок 2.6 – Интенсивное волнообразование на поверхности перекачиваемой жидкости экспериментального стенда [111]

Интенсивное волнообразование при перекачке жидкости неполным сечением на данном экспериментальном стенде указывает на следующие потенциальные проблемы:

1. Профиль скорости перекачиваемой жидкости сильно неоднороден [57, 64];
2. При малом коэффициенте заполнения проявляются вторичные эффекты [29];
3. Ставится под сомнение использования в расчетах понятия «гидравлический радиус» поскольку поверхность жидкости неоднородная в результате неоднородного волнообразования [5].

В этой связи, использование простейших формул гидравлики не представляется целесообразным при обработке экспериментальных данных ввиду того, что они не учитывают данные неоднородности и не решают выше описанные проблемы.

Данные неоднородности и волнообразования вызваны неравномерностью полей скоростей течения. На рисунке 2.7 приведено распределение полей скоростей течения жидкости при различном коэффициенте заполнения трубопровода.

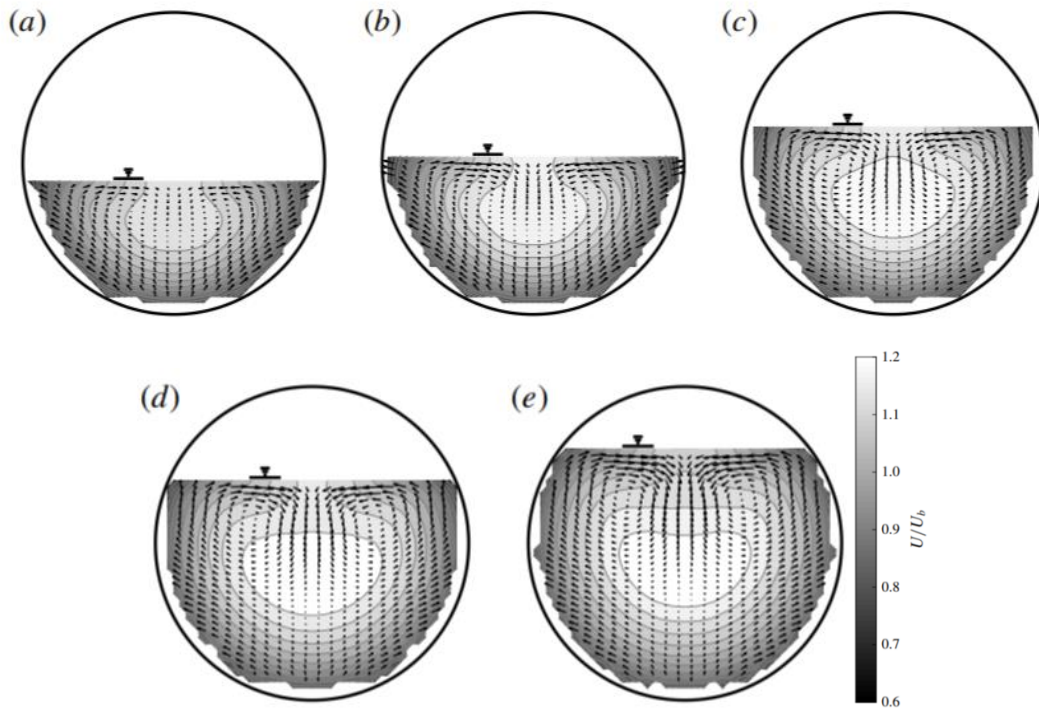


Рисунок 2.7 – Распределение полей скоростей течения жидкости при коэффициенте заполнения трубопровода 0,44 (a), 0,52 (b), 0,62 (c), 0,7 (d), 0,8 (e), где U/U_b – отношение скорости течения жидкости в определенном поле потока к объемной скорости течения всего потока [111]

При детальном рассмотрении распределения полей скоростей течения жидкости на рисунке 2.7 можно заметить, что при более низком уровне жидкости явление влияния близости стенок становится более заметным.

Отечественные исследователи также занимались проблемой самотечного течения на трубопроводах. Одной из неочевидных проблем самотечного режима перекачки, помимо указанных проблем в Главе 1, является то обстоятельство, что при последовательной перекачке смесь, предположительно, будет образовываться интенсивнее [105]. Данное обстоятельство связано с тем, что на самотечном участке скорость течения продукта в разы больше и, как следствие, при последовательной перекачке будет происходить смесеобразование различных партий жидких продуктов [106].

В этой связи, в Институте проблем транспорта энергоресурсов (далее – ИПТЭР) был спроектирован и собран крупномасштабный стенд по изучению

режимов перекачки на самотечных участках трубопроводов [36, 95]. Схема экспериментального стенда приведена на рисунке 2.8.

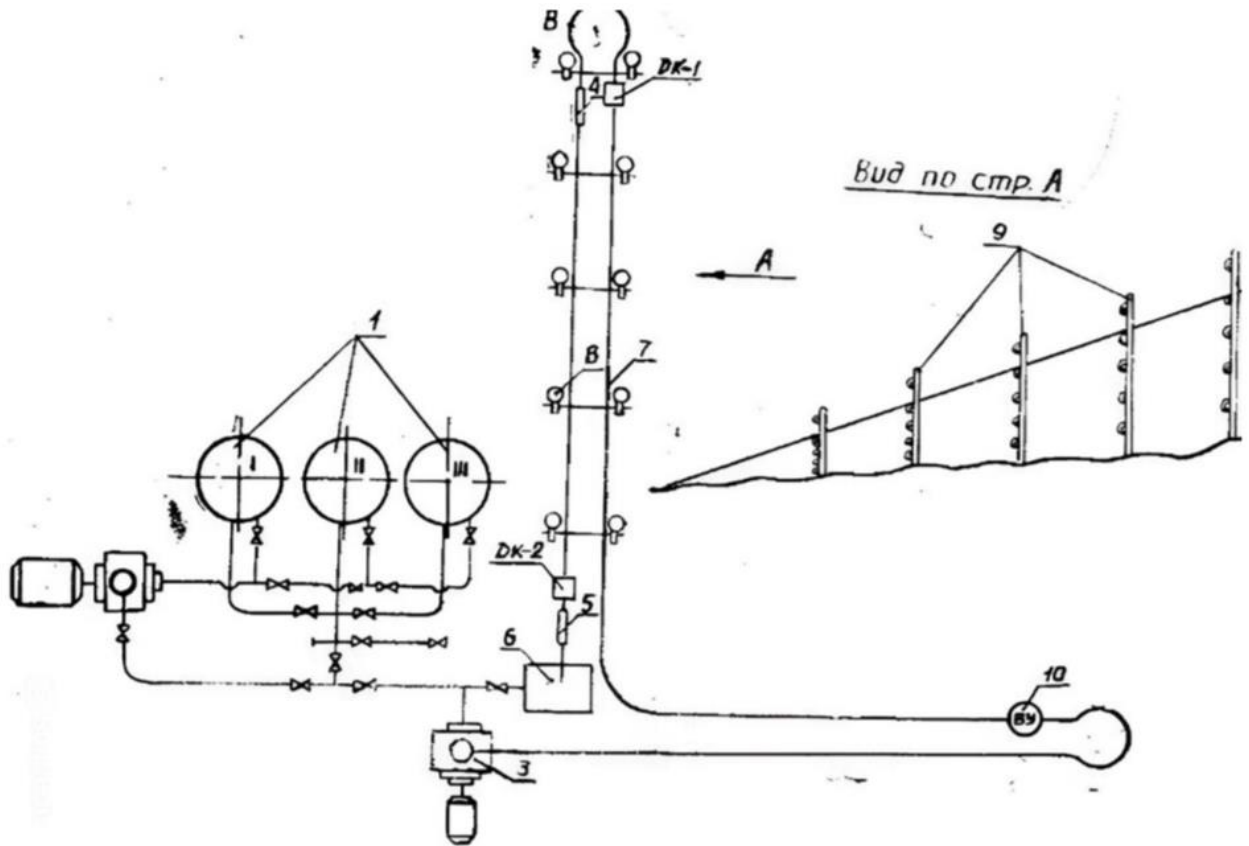


Рисунок 2.8 – Схема экспериментального стенда по исследованию эксплуатации самотечных участков трубопроводов ИПТЭР, где 1 – откалиброванные резервуары; 2,3 – блок центробежных насосов; 4,5 – стеклянные вставки; 6 – дополнительная емкость с запорной арматурой; 7,8 – восходящий и нисходящий участок трубопровода; 9 – опоры с регулированием угла наклона; 10 – впрыскивающее устройство [36]

Научный коллектив изучал экспериментальное изменение средней скорости течения движения жидкости на самотечном участке, а также отношение H/d . Скорость течения фиксировали по времени прохождения введенного в трубопроводную систему раствора NaCl от впрыскивающего устройства до датчиков концентратометров ДК-1 и ДК-2.

Размеры самотечных участков были 20,95 метров и 38,90 метров, угол наклона изменялся от 2° до 14° . Также в ходе опытов проводился замер температуры и замер смоченного периметра трубопровода. Уровень заполнения верифицировался на прозрачных вставках трубопроводной системы стенда.

В рамках деятельности ИПТЭР было получено следующее критериальное уравнение, описывающее отношение скоростей заполненного и самотечного участка трубопровода через число Рейнольдса и угол наклона самотечного участка (2.3):

$$\frac{U_c}{U} = 4800 \frac{i^{0,326}}{Re^{0,66}}, \quad (2.3)$$

где U_c – скорость течения жидкости на самотечном участке неполным сечением, м/с; U – скорость течения жидкости на горизонтальном участке полным сечением, м/с; i – угол наклона самотечного участка; Re – число Рейнольдса.

По полученному выражению (2.3) при известном угле наклона и режиме перекачки, описанному числом Рейнольдса, можно говорить не только о скорости течения на самотечном участке, но и об отношении глубины заполнения самотечного участка к диаметру трубопровода при значениях от 0,1 до 1 включительно.

Одновременно, полученная формула является концептуально неполной относительно числа параметров, от которых зависит скорость на самотечном участке трубопровода, поскольку в формуле учтен только гидравлический уклон самотечного сегмента и число Рейнольдса.

В действительности же на жидкость оказывает влияние множество факторов, например шероховатости внутреннего покрытия тела трубопровода, поверхностное натяжение перекачиваемой жидкости, число Фруда и другие параметры.

Учесть данные факторы научному коллективу не удалось ввиду проведения серии экспериментов лишь на водно-солевом растворе и отсутствия сравнения различных продуктов перекачки на данном экспериментальном стенде. Также причине затруднилось тиражирование данного стенда ввиду ограниченности выбора продукта перекачки в трубопроводной системе экспериментального стенда.

Все вышеизложенное показывает, что в исследованиях второй половины XX века ученые уже пришли к тому, что единственный истинный подход к

определению коэффициента заполнения трубопровода – это экспериментальный подход.

Одним из основных и фундаментальных исследований в рамках изучения степени заполнения самотечных участков стал научный труд автора из государственного исследовательского университета Турции г. Стамбул [108], посвященному сравнению нескольких подходов в определении отношения глубины заполнения самотечного участка к диаметру трубопровода самотечного участка с использованием коэффициента Маннинга и учетом влияющих факторов на уровень заполнения трубопровода.

Предполагалось, что уравнение Маннинга может быть использовано в том случае, когда коэффициент шероховатости поверхности постоянный. На данном предположении построены уравнения исследователей Саатк (1990 г. и 1992 г.) [115, 116] и Джиру (2000 г.) [110].

Однако, ряд исследований показал, что коэффициент шероховатости n зависит от коэффициента заполнения h/D . Поэтому становится очевидным, что следует использовать уравнения, учитывающие данную зависимость.

Говоря о зависимости от числа Рейнольдса, исследователь Мэсси в 1989 г. [114] пришел к выводу, что зависимость от числа Рейнольдса имеет смысл игнорировать только при высоких значениях.

Однако, режимы перекачки в самотечных участках имеют низконапорный характер ввиду неполного сечения перекачиваемой жидкости с небольшими числами Рейнольдса [8,69], что говорит о том, что при уточнении коэффициента заполнения на самотечных участках число Рейнольдса игнорировать нельзя. На рисунке 2.9 приведено поперечное сечение с центральным углом θ и высотой заполненности трубопровода продуктом перекачки h .

В основе исследования приведены вновь выведенные формулы гидравлики. В формулах (2.4 – 2.7) исследователь описывает геометрические характеристики потока. Угол поперечного сечения боковой образующей трубы через высоту заполненности трубопровода продуктом перекачки и радиус трубопровода (2.4):

$$\theta = 2\cos^{-1}\left(1 - \frac{2h}{2R}\right). \quad (2.4)$$

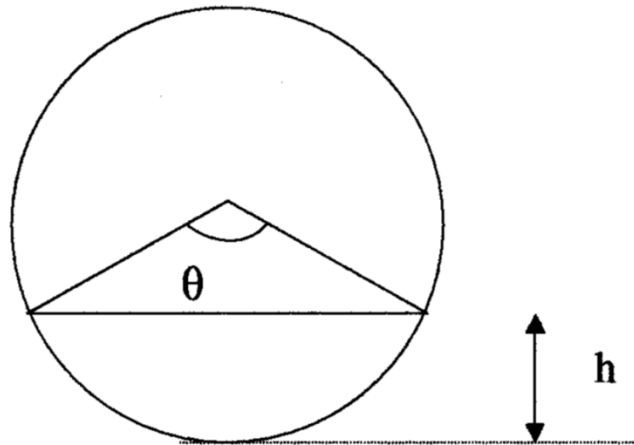


Рисунок 2.9 – Поперечное сечение с центральным углом и высотой заполненности трубопровода продуктом перекачки, где θ – центральный угол диаметра трубопровода, °; h – высота заполненности трубопровода продуктом перекачки, м [108]

Площадь поперечного сечения трубопровода определяется по следующей формуле (2.5):

$$A = \frac{D^2}{8} (\theta - \sin \theta) \quad (2.5)$$

где A – площадь поперечного сечения трубопровода, м².

Классическое определение гидравлического радиуса трубопровода описано данной формулой (2.6):

$$R_h = \frac{D}{4} \left(\frac{\theta - \sin \theta}{\theta} \right), \quad (2.6)$$

где R_h – гидравлический радиус трубопровода, м.

В 1984 году исследователь Эскритт [109] предложил использование альтернативного определения гидравлического радиуса через подход, что гидравлический радиус будет равен площади потока, деленного на сумму смачиваемого периода и половины ширины раздела фаз «газ-жидкость» в поперечном сечении трубопровода (2.7):

$$R_h = \frac{D}{4} \left(\frac{\theta - \sin \theta}{\theta + \sin(\frac{\theta}{2})} \right). \quad (2.7)$$

Исследователь связывал это с тем, что турбулентный поток жидкости в полностью заполненном трубопроводе и при неполном сечении отличается. При

неполном сечении и образовании свободного газового пространства образуются волны, рассеивающие свободную энергию, что тоже следует учитывать.

Используем следующую формулу для определения расхода через критерий характеристики потока K и наклон линии энергетической эффективности S (2.8):

$$Q = \frac{K}{n} \cdot D^{\frac{8}{3}} \cdot S^{\frac{1}{2}} = \frac{A}{n} \cdot R_h^{2/3} \cdot S^{1/2}, \quad (2.8)$$

где K – критерий характеристики потока.

Подставим (2.5), (2.6) в выражение (2.8) и выразим критерий потока K для постоянного коэффициента шероховатости (2.9):

$$K_h = \frac{Q_n}{D^{8/3} S^{1/2}} = 0.0496 \cdot (\theta - \sin\theta)^{5/3} \cdot \theta^{-2/3}, \quad (2.9)$$

где K_h - критерий потока для постоянного коэффициента шероховатости.

Для изучения влияния глубины потока h на коэффициент шероховатости n автором был введен дополнительный критерий характеристики потока K_{hf} , основанный на значении коэффициента шероховатости в условиях полностью заполненного потока (2.10):

$$K_{hf} = \frac{Q \cdot n_f}{D^{8/3} S^{1/2}} = \frac{n_f \cdot K_h}{n} = \frac{K_h}{f(\theta)}, \quad (2.10)$$

где n_f – коэффициент шероховатости при отношении $h/D = 1$; K_{hf} – критерий характеристики потока, основанный на значении коэффициента шероховатости в условиях полностью заполненного потока.

Автор уточняет последовательность расчета для коэффициента заполнения в 2 вариантах – для *постоянного* и *переменного* коэффициента Маннинга.

Если проводить расчет в парадигме *постоянного* коэффициента шероховатости, то следует в первую очередь определить критерий характеристики потока (2.1.9) и воспользоваться формулой для определения угла поперечного сечения боковой образующей трубы для предполагаемого диапазона $0 \leq h/D \leq 0,938$ (2.11):

$$\theta = 1.28 \cdot K_h^{-0.26} \cdot \cos^{-1}(1 - 5.965 K_h), \quad (2.11)$$

а для предполагаемого диапазона $0,938 \leq h/D \leq 1$ воспользоваться следующим выражением (2.12):

$$\theta = 5.278 + (22.151 - 50.087 \cdot K_h) \cdot \sqrt{0.335282 - K_h}. \quad (2.12)$$

Как итог, зная угол поперечного сечения боковой образующей трубы и радиус трубопровода, следует воспользоваться формулой (2.4) для определения степени заполнения, выразив оттуда h/D .

Если проводить расчет в парадигме *переменного* коэффициента шероховатости, то следует в первую очередь определить критерий характеристики потока (2.10) и воспользоваться формулой для определения угла поперечного сечения боковой образующей трубы для предполагаемого диапазона $0 \leq h/D \leq 0,972$ (2.13):

$$\theta = 1.3645 \cdot K_{hf}^{-0.2537} \cdot \cos^{-1}(1 - 6.1606 K_{hf}), \quad (2.13)$$

а для предполагаемого диапазона $0,972 \leq h/D \leq 1$ воспользоваться следующим выражением (2.14):

$$\theta = 5.6106 + (18.9 - K_{hf}) \cdot \sqrt{0.324642 - K_{hf}}. \quad (2.14)$$

Как итог, зная угол поперечного сечения боковой образующей трубы и радиус трубопровода, следует воспользоваться формулой (2.4) для определения степени заполнения, выразив оттуда h/D .

При этом предложены упрощенные корреляции, которые исключают итерации. Проведен обзор опыта Эккерта [115, 116] и Джиру [110], которые показали убедительную сходимость. Автор предлагает использовать некоторые уравнения для определения коэффициента заполнения.

В случае, если известны скоростные и расходные характеристики потока, а предполагаемый коэффициент заполнения будет составлять не более 0.4, следует использовать следующую универсальную формулу для определения степени заполнения (2.15):

$$\frac{h}{D} = 0.9106 \cdot \left(\frac{Q}{VD^2}\right)^{0.6876}. \quad (2.15)$$

Также, в случае, если предполагаемый коэффициент заполнения будет больше 0.4, а также если нам важна точность определения заполнения трубопровода, можно использовать альтернативную формулу для определения степени заполнения (2.16):

$$\frac{h}{D} = 0.0047 \cdot \left(\frac{8A}{D^2}\right)^3 - 0.0453 \cdot \left(\frac{8A}{D^2}\right)^2 + 0.2554 \cdot \left(\frac{8A}{D^2}\right). \quad (2.16)$$

Несмотря на конечный набор явных формул, облегчающих оценку степени заполнения трубопровода по известным геометрическим характеристикам трубы и скоростным характеристикам потока, и применимость их для различных случаев заполнения трубопровода данные выражения имеют некоторую степень недооснащенности зависимостей влияющих факторами на целевую переменную. В действительности, на самотечном участке помимо скоростных характеристик перекачиваемой жидкости и шероховатости на степень заполнения влияют свойства перекачиваемого продукта, такие как сила натяжения, вязкость продукта, а также многие другие, что также оставляет невозможным точно определять степень заполнения трубопровода [45, 51].

По результатам анализа наиболее близких к теме исследования работ установлено, что существующие экспериментальные попытки верификации формул гидравлики для самотечных участков показали, что примитивные гидравлические модели не учитывают следующие особенности:

1. Формулы для коэффициента заполнения – нелинейные и зависят от диапазона уровня заполнения жидкости на самотечном участке;
2. Классические формулы гидравлики не учитывают проявление вторичных эффектов, таких как завихрения потока, брызги и волнообразование на поверхности раздела фаз «газовоздушная смесь-жидкость» на самотечном участке трубопровода [52].

2.2 Моделирование работы самотечного участка и создание многопараметрической модели течения жидкости

Гидравлические зависимости для описания движения жидкости на самотечных участках трубопроводов являются широко известными [30], однако, их вывод основан на классических формулах русловой гидравлики применительно к потоку воды и не берет в расчет сложное влияние второстепенных факторов [70, 98].

В этой связи автором предложено использовать хорошо зарекомендовавшие себя инструменты численного моделирования гидравлических процессов для описания самотечного движения жидкости в нефтепродуктопроводах. Результаты моделирования в программном комплексе Ansys представлены на рисунке 2.10.

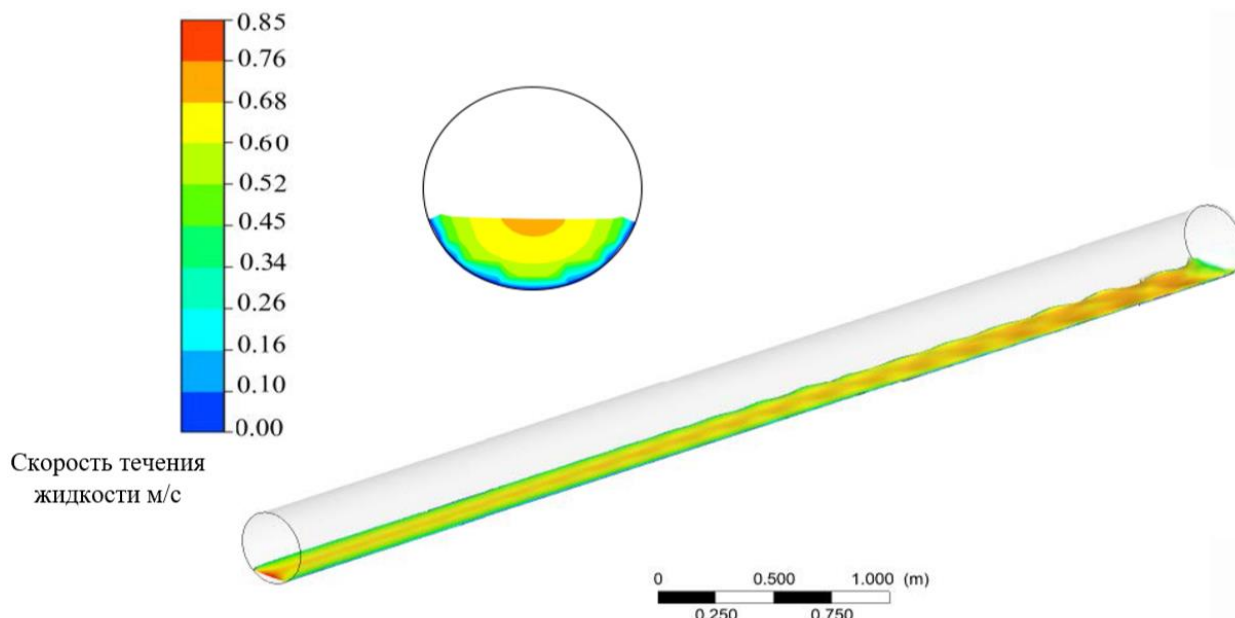


Рисунок 2.10 – Результаты моделирования самотечного участка в программном комплексе ANSYS, отдельно показано распределение скоростей жидкости в сечении (составлено автором)

Использование современных моделей турбулентности имеет вычислительные сложности, и их тяжело масштабировать для инженерных расчетов трубопроводных систем [54]. В этой связи в рамках упрощенной модели, предложено для описания самотечного движения жидкости использовать систему уравнений (2.17):

$$\begin{cases} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i)}{\partial z_i} = 0 \\ \frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial z_j} = -\frac{\partial p}{\partial z_i} + \frac{\partial}{\partial z_j} \left(\nu \frac{\partial u_i}{\partial z_j} \right) + G_i' \end{cases} \quad (2.17)$$

где ρ – плотность продукта, кг/м³; t – текущее время, с; i ($i = 1, 2$) – направления в декартовых координатах; z_i – пространственная координата, м; u – скорость движения продукта, м/с; p – давление, Па; ν – кинематическая вязкость, м²/с; G_i – удельная объемная сила, Н/м³.

В целях анализа распределения модуля скорости по сечению трубопровода на самотечных участках, был проведен вычислительный эксперимент в программном комплексе Ansys для различных уровней заполнения трубопровода.

Результат моделирования представлен на рисунке 2.11.

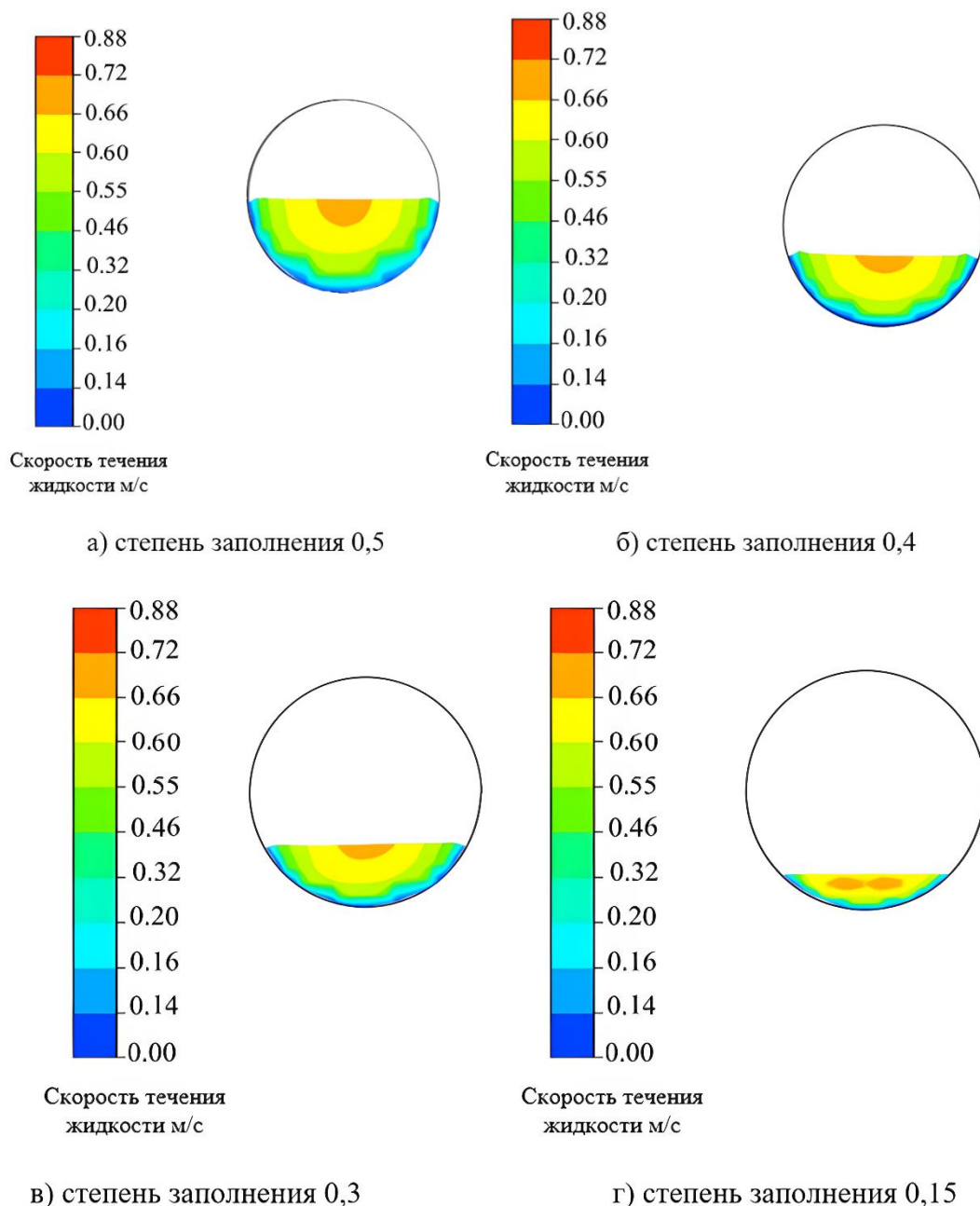


Рисунок 2.11 – Результаты моделирования самотечного участка для ДТ-Л-К5 при различных уровнях заполнения сечения трубопровода (составлено автором)

В качестве параметров транспортируемого продукта были приняты параметры летнего дизельного топлива ДТ-Л-К5. Поля скоростей изучались для уровней заполнения трубы 0,5, 0,4, 0,3, 0,15 соответственно. В качестве газовой

фазы (на рисунке условно не показана) принята условная газовоздушная смесь (пары дизельного топлива + воздух). Сжимаемостью жидкости пренебрегаем. Коэффициент поверхностного натяжения принят равным 30 мН/м. Эффектами, связанными с теплообменом, пренебрегаем. Процесс считается изотермическим.

В работе при моделировании была использована сетка с максимальным размером элемента в 3 мм, что является весьма грубым решением, однако оно позволяет в первом приближении увидеть основные черты гидромеханического процесса без привлечений высокопроизводительной компьютерной техники. Граничные условия заданы в виде – «поле скорости на входе», «давление на выходе». Массообменом между фазами пренебрегаем.

По результатам моделирования, стал очевидным тот факт, что при низких уровнях заполнения сечения трубопровода начинают проявляться эффекты, которые не удастся описать с использованием классической трубопроводной гидравлики. Наблюдалось, что при коэффициентах заполнения от 0 до 0,15 поля скоростей искажаются, потому что начинает сказываться близость стенки трубы, особенно это характерно для высоких скоростей течения на самотечном участке. При искажении поля скоростей от симметричного, на поверхности жидкости образуются небольшие волны.

Очевидно, что аналитическое описание таких процессов крайне трудоемкий процесс. Тем более, что это было показано лишь путем моделирования. В этой связи было решено экспериментально проверить данные гипотезы и по результатам экспериментов получить упрощенные зависимости, которыми можно пользоваться без привлечения аппарата в виде программно-вычислительных комплексов, использующих методы вычислительной гидродинамики.

2.3 Обоснование вида критериального уравнения для расчета коэффициента заполнения

Процесс образования самотечного участка при перекачке жидких продуктов начинается с того, что продукт перекачки преодолевает перевальную точку и дальнейшее течение происходит безнапорно, причем участок трубопровода после перевальной точки должен быть неполностью заполнен (коэффициент заполнения

остается меньше 1) [15, 48]. Также процесс образования самотечного участка можно описать как снижения давления перекачиваемой жидкости до значения давления упругости насыщенных паров перекачиваемой жидкости на снисходящем участке трубопровода после перевальной точки [43]. При это в верхней образующей трубопровода на данном участке остается неподвижный насыщенный газоздушный пар, а в нижней образующей трубопровода происходит неустановившееся течение жидкого продукта за счет гравитационных сил [33].

Исходя из физически описанной картины происходящего, следует предположить, что на уровень заполнения самотечного участка перекачиваемой жидкостью влияет геометрия и диаметр тела трубопровода, физико-химические и реологические свойства перекачиваемой жидкости, режим перекачки, а также шероховатость поверхности внутреннего тела трубопровода самотечного участка [66, 78]. Исходя из выше приведенный влияющих свойств можно выделить основные влияющие факторы: диаметр трубопровода, скорость течения перекачиваемой жидкости, вязкость жидкости, ускорение свободного падения с учетом угла наклона самотечного участка, плотность перекачиваемой жидкости, поверхностное натяжение на границе раздела фаз и абсолютная шероховатость поверхности трубопровода.

Соответственно, значение уровня заполнения самотечного участка можно представить в следующем виде (2.18):

$$h = f(D, v_{ж}, \nu_{ж}, g \cdot \sin \alpha, \rho_{ж}, \sigma, \Delta), \quad (2.18)$$

где D – диаметр трубопровода, м; $v_{ж}$ – скорость течения перекачиваемой жидкости, м/с; $\nu_{ж}$ – вязкость перекачиваемой жидкости, м²/с; $g \cdot \sin \alpha$ – ускорение свободного падения с учетом угла наклона самотечного участка, м/с²; $\rho_{ж}$ – плотность перекачиваемой жидкости, кг/м³; σ – поверхностное натяжение на границе раздела фаз, кг/с²; Δ – абсолютная шероховатость поверхности трубопровода, м.

Преобразуем данное выражение, заменив все переменные на их размерности (2.19):

$$h = f\left(M, \frac{M}{c}, \frac{M^2}{c}, \frac{M}{c^2}, \frac{kg}{M^3}, \frac{kg}{c^2}, M\right). \quad (2.19)$$

Возведем каждую переменную в степень x_n , перемножим переменные и добавим константу C , поскольку влияние каждого фактора на целевую функцию может быть нелинейным и получим следующее выражение (2.20):

$$h = C \cdot D^{x_1} \cdot v_{ж}^{x_2} \cdot v_{ж}^{x_3} \cdot (g \cdot \sin \alpha)^{x_4} \cdot \rho_{ж}^{x_5} \cdot \sigma^{x_6} \cdot \Delta^{x_7}. \quad (2.20)$$

В гидродинамических процессах особое место занимают три первичные величины, а именно: масса M , время T и расстояние L [40]. Через данные переменные описываются основные параметры, приведенные выше, а также некоторые критерии подобия, описывающие гравитационные силы, инерционные силы и их отношения. Выразим представленное выше выражение (2.19), поделив левую и правую часть выражения на размерность каждой из первичных величин и объединим в систему уравнений (2.21):

$$\begin{cases} h = C \cdot D^{x_1} \cdot v_{ж}^{x_2} \cdot v_{ж}^{x_3} \cdot (g \cdot \sin \alpha)^{x_4} \cdot \rho_{ж}^{x_5} \cdot \sigma^{x_6} \cdot \Delta^{x_7} (:L) \\ h = C \cdot D^{x_1} \cdot v_{ж}^{x_2} \cdot v_{ж}^{x_3} \cdot (g \cdot \sin \alpha)^{x_4} \cdot \rho_{ж}^{x_5} \cdot \sigma^{x_6} \cdot \Delta^{x_7} (:M). \\ h = C \cdot D^{x_1} \cdot v_{ж}^{x_2} \cdot v_{ж}^{x_3} \cdot (g \cdot \sin \alpha)^{x_4} \cdot \rho_{ж}^{x_5} \cdot \sigma^{x_6} \cdot \Delta^{x_7} (:C) \end{cases} \quad (2.21)$$

Получена система уравнений, первое из которых будет результатом сокращения обеих частей выражения на расстояние, второе будет результатом сокращения обеих частей выражения на массу, третье будет результатом сокращения обеих частей выражения на время, представлена в следующем виде (2.22):

$$\begin{cases} 1 = x_1 + x_2 + 2x_3 + x_4 - 3x_5 + x_7 \\ 0 = x_5 + x_6 \\ 0 = -x_2 - x_3 - 2x_4 - 2x_6 \end{cases}. \quad (2.22)$$

Решение данной системы не представляется возможным, так как число переменных больше, чем число уравнений. Выразим переменные x_2 и x_5 , из последних двух уравнений (2.23):

$$\begin{cases} 1 = x_1 + x_2 + 2x_3 + x_4 - 3x_5 + x_7 \\ x_6 = -x_5 \\ x_2 = -x_3 - 2x_4 - 2x_6 \end{cases}. \quad (2.23)$$

Подставим выражение x_6 в третье уравнение системы и получим следующую систему уравнений (2.24):

$$\begin{cases} 1 = x_1 + x_2 + 2x_3 + x_4 - 3x_5 + x_7 \\ x_6 = -x_5 \\ x_2 = -x_3 - 2x_4 + 2x_5 \end{cases}. \quad (2.24)$$

Подставим выражение x_2 в первое уравнение системы и получим следующую систему уравнений (2.25):

$$\begin{cases} 1 = x_1 - x_3 - 2x_4 + 2x_5 + 2x_3 + x_4 - 3x_5 + x_7 \\ x_6 = -x_5 \\ x_2 = -x_3 - 2x_4 + 2x_5 \end{cases}. \quad (2.25)$$

Упростим первое выражение системы сложением подобных слагаемых и выразим отсюда x_1 (2.26):

$$\begin{cases} x_1 = 1 - x_3 + x_4 + x_5 - x_7 \\ x_6 = -x_5 \\ x_2 = -x_3 - 2x_4 + 2x_5 \end{cases}. \quad (2.26)$$

Подставим полученные выражения переменных x_1, x_2, x_6 в выражение (2.19) и получим следующее выражение (2.27):

$$h = C \cdot D^{1-x_3+x_4+x_5-x_7} \cdot v_{\text{ж}}^{-x_3-2x_4+2x_5} \cdot v_{\text{ж}}^{x_3} \cdot (g \cdot \sin \alpha)^{x_4} \cdot \rho_{\text{ж}}^{x_5} \cdot \sigma^{-x_5} \cdot \Delta^{x_7} \quad (2.27)$$

Сократив левую и правую часть выражения на диаметр D и сгруппировав множители по показателю степени получим следующее выражение (2.28):

$$\frac{h}{D} = C \cdot \left(\frac{v_{\text{ж}}}{D \cdot v_{\text{ж}}}\right)^{x_3} \cdot \left(\frac{D \cdot g \cdot \sin \alpha}{v_{\text{ж}}}\right)^{x_4} \cdot \left(\frac{D \cdot \rho_{\text{ж}} \cdot v_{\text{ж}}^2}{\sigma}\right)^{x_5} \cdot \left(\frac{\Delta}{D}\right)^{x_7}. \quad (2.28)$$

Поскольку знак перед переменными x_3 и x_4 не определен, то их можно принять с обратным знаком, получив следующее выражение (2.29):

$$\frac{h}{D} = C \cdot \left(\frac{D \cdot v_{\text{ж}}}{v_{\text{ж}}}\right)^{x_3} \cdot \left(\frac{v_{\text{ж}}^2}{D \cdot g \cdot \sin \alpha}\right)^{x_4} \cdot \left(\frac{D \cdot \rho_{\text{ж}} \cdot v_{\text{ж}}^2}{\sigma}\right)^{x_5} \cdot \left(\frac{\Delta}{D}\right)^{x_7}. \quad (2.29)$$

При моделировании гидромеханических процессов на самотечных участках нами предложено использовать критерии подобия, представленные формулами (2.30 – 2.33):

1. Для характеристики отношения сил инерции к силам вязкости в потоке жидкости выбрано число Рейнольдса (2.30):

$$Re = \frac{v \cdot D}{\nu}. \quad (2.30)$$

2. Для характеристики отношения инерционных сил к гравитационным силам в потоке жидкости выбрано число Фруда (2.31):

$$Fr = \frac{v^2}{(g \cdot \sin \alpha) \cdot D}. \quad (2.31)$$

3. Для описания баланса между силами инерции и силами поверхностного натяжения, действующих на потока жидкости, выбрано число Вебера (2.32):

$$We = \frac{\rho \cdot D \cdot v^2}{\sigma}. \quad (2.32)$$

4. Для описания абсолютной шероховатости к линейному размеру сечения потока жидкости выбрана относительная шероховатость (2.33):

$$\varepsilon = \frac{\Delta}{D}. \quad (2.33)$$

Выразим полученное выражение, полученное через критерии подобия, и заменим переменные x_3, x_4, x_5 и x_7 на безразмерные параметры a_0, a_1, a_2 и a_3 и получим следующее уравнение (2.34):

$$\frac{h}{D} = C \cdot (Re)^{a_0} \cdot (Fr)^{a_1} \cdot (We)^{a_2} \cdot (\varepsilon)^{a_3}. \quad (2.34)$$

Таким образом, с использованием теории подобия и размерностей обоснован общий вид критериального уравнения для определения коэффициента заполнения с безразмерными параметрами в степени каждого из критерия.

2.4 Выводы по второй главе

1. Экспериментальные попытки верификации формул гидравлики для самотечных участков показали, что примитивные гидравлические модели имеют некоторую степень недооснащенности зависимостей, влияющих факторами на целевую переменную. Данные модели не учитывают всех первичных и вторичных параметров, влияющих на образование самотечного участка.

2. Предложена модель движения жидкости на самотечных участках нефте-/нефтепродуктопроводов, представленной системой дифференциальных уравнений.

3. Обоснован общий вид уравнения для определения коэффициента заполнения самотечных участков трубопроводов, включающее в себя такие критерии подобия как число Рейнольдса, число Вебера, число Фруда и относительную шероховатость трубопровода.

ГЛАВА 3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ЗАПОЛНЕНИЯ САМОТЕЧНЫХ УЧАСТКОВ ТРУБОПРОВОДОВ

3.1 Описание экспериментального стенда самотечного участка трубопровода для определения коэффициента заполнения

В рамках выполнения диссертационного исследования была предложена конструкция экспериментального стенда, представленная ниже на рисунке 3.1.

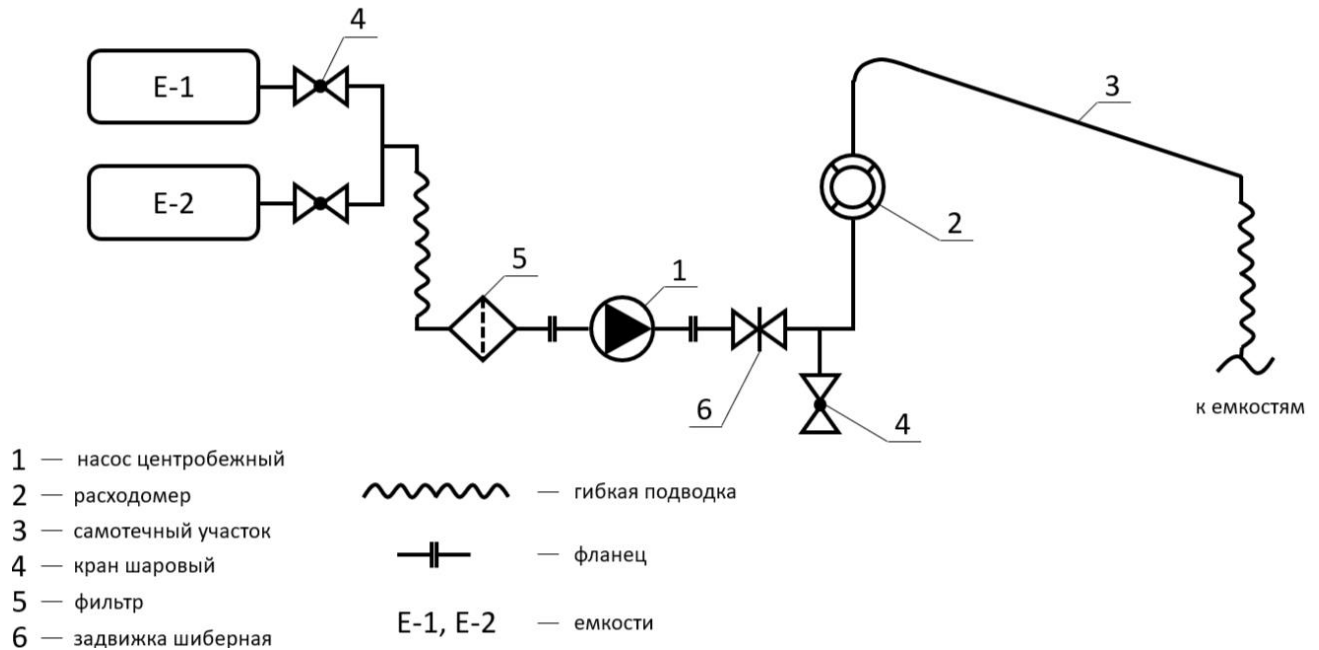


Рисунок 3.1 – Технологическая схема экспериментального стенда для определения коэффициента заполнения с обозначениями (составлено автором)

Перед началом сборки экспериментального стенда было подобрано необходимое оборудование и материалы для опорных конструкций, определены технические параметры экспериментального стенда. В таблице 3.1 приведены технические параметры экспериментального стенда.

Таблица 3.1 – Параметры экспериментального стенда (по данным автора)

№ п/п	Характеристика	Единицы измерения	Значение
1	Ширина	мм	3000
2	Длина	мм	2500
3	Высота	мм	1800
4	Масса*	кг	15
5	Потребляемая мощность оборудования	Вт	251,5
6	Материальное исполнения трубопроводов	-	Профилированный поликарбонат (ПП)
7	Наружный диаметр трубопроводов	мм	50

Продолжение Таблицы 3.1

№ п/п	Характеристика	Единицы измерения	Значение
8	Толщина стенки трубопровода	мм	1,5
9	Материальное исполнения опорных конструкций		Сталь Ст3
10	Технологическое оборудование		
10.1	Насос Piusi EX50 12B DC ATEX		
10.1.1	Мощность	Вт	250
10.1.2	Производительность	м ³ /ч	3
10.1.3	Давление	МПа	0,11
10.1.4	Перепад давления/напор	м	10
10.2	Расходомер TUF-2000 В с датчиками ТМ1		
10.2.1	Мощность	Вт	1,5
10.2.1	Диапазон скоростей	м/с	0-10
10.2.2	Точность/Относительная погрешность	%	±1
11	Емкостное оборудование	-	
11.1	Количество	-	2
11.2	Материальное исполнение	-	Полиэтилен низкого давления (ПНД)
11.3	Объем	л	400
12	Трубопроводная обвязка		
12.1	Протяженность трубопроводной обвязки	м	9
12.2	Диаметр трубопроводной обвязки	мм	16
12.3	Материал трубопроводной обвязки	-	Поливинилхлорид (ПВХ)

В системе трубопроводов экспериментального стенда планируется обращения нескольких материальных сред [41]. В таблице 3.2 приведены основные параметры материальных сред.

Таблица 3.2 – Основные параметры материальных сред, обращающихся в трубопроводной системе экспериментального стенда (по данным автора)

№ п/п	Характеристика	Единицы измерения	Значение
ДТ-Л-К5 Евро ГОСТ 32511-2013			
1	Вязкость	мм ² /с	4,33
2	Плотность	кг/м ³	826
4	Поверхностное натяжение	Н/м	0,029
Вода техническая ГОСТ Р 51232-98			
5	Вязкость	мм ² /с	1,00
6	Плотность	кг/м ³	1000
7	Содержание воды		
8	Поверхностное натяжение	Н/м	0,072
Водно-глицериновый раствор			
9	Вязкость	мм ² /с	1,88
10	Плотность	кг/м ³	1052

Продолжение Таблицы 3.2

№ п/п	Характеристика	Единицы измерения	Значение
11	Содержание воды		
12	Поверхностное натяжение	Н/м	0,063

Для проведения эксперимента и эксплуатации стенда было использовано следующее инвентарное оборудование:

1. Средства измерений: Рулетка ГОСТ 7502-98 [19], расходомер ГОСТ Р 8.1026-2023 [25], портативный профилометр ГОСТ 19300-86 [16] и ультразвуковыми преобразователями ГОСТ Р 55725 – 2013 [24], уровнемер ГОСТ 8.321-2013 [20];

2. Тара: канистра транспортная полимерная ГОСТ Р 52620-2006 [22];

3. Шероховатость ГОСТ 2789-73 [17].

Характеристики шероховатости приведены в таблице 3.3.

Таблица 3.3 – Характеристика шероховатости внутреннего покрытия трубопроводов (по данным автора)

№ п/п	Характеристика	Единицы измерения	Значение
Шероховатость			
1	Шероховатость 1 тип	мм	0,01
2	Шероховатость 2 тип	мм	0,4
3	Шероховатость 3 тип	мм	0,8

Технологическая схема предполагает выполнение следующих функций:

1. Перекачку продукта (ДТ-Л-К5 Евро ГОСТ 32511-2013 [18], водно-глицериновый раствор, вода техническая ГОСТ Р 51232-98 [21]) по контуру стенда в диапазоне объемных расходов от 0,18 до 0,93 м³/ч;

2. Изменение угла наклона самотечного участка от 5 до 15 градусов;

3. Регулирование режимов работы путем управляемого закрытия/открытия задвижки;

4. Измерение/сбор и хранение информации, с датчиков и технологического оборудования.

Экспериментальный стенд представлен в таблице 3.4.

Таблица 3.4 – Экспериментальный стенд имитирующий работу самотечных участков нефтепроводов (по данным автора)

			
Общий вид экспериментального стенда	Емкостные накопители продукта перекачки	Ультразвуковой расходомер	Nascos Piusi
			
Самотечный участок с фотофиксацией	Тройниковое соединение трубопроводной обвязки	Датчики ТМ1 ультразвукового расходомера	Врезка в емкостный накопитель с краном
			
Металлоконструкция для Z-образного самотечного участка трубопровода	Металлоконструкция для установки емкостных накопителей	Металлоконструкция для Z-образного самотечного участка трубопровода	Общий вид металлоконструкций экспериментального стенда

3.1.1 Особенности выбора и использования измерительных приборов

При выборе измерительных приборов основное внимание уделялось расходомеру, способного удовлетворять требованиям по чувствительности к определенному диапазону измерений значений расхода (до $1,5 \text{ м}^3/\text{ч}$), диаметру трубопровода DN50, возможности определения расхода различных перекачиваемых сред (Дизельное топливо, вода техническая, ручной ввод данных по водно-глицериновому раствору), возможности ввода данных о исследуемом трубопроводе (плотность материала, толщина трубопровода). Был выбран расходомер TUF-2000 [60]. Для данного расходомера есть 2 схемы установки ультразвуковых датчиков – «Z-метод» и «V-метод» [83]. «Z-метод» применяется для установки датчика-приемника и датчика-излучателя ультразвукового расходомера на трубопроводах DN25 – DN200 на диаметрально противоположных верхней и нижней образующей трубопровода, а также на определенном расстоянии между датчиками, в то время как V-метод применяется для установки датчика-приемника и датчика-излучателя ультразвукового расходомера на трубопроводах DN200 – DN6000 на одной и той же образующей трубопровода, а также на определенном расстоянии между датчиками [23]. Для проведения экспериментов был выбран «Z-метод» ввиду того, что в экспериментальной установке использованы трубопроводы DN50. Схемы установки датчиков для каждого из вышеописанных методов (главный вид и вид сбоку) приведены на рисунке 3.2. и на рисунке 3.3.



Рисунок 3.2 – Схема установки датчиков ультразвукового расходомера на трубопроводе «V-метод» (слева – главный вид, справа – вид сбоку) [77]

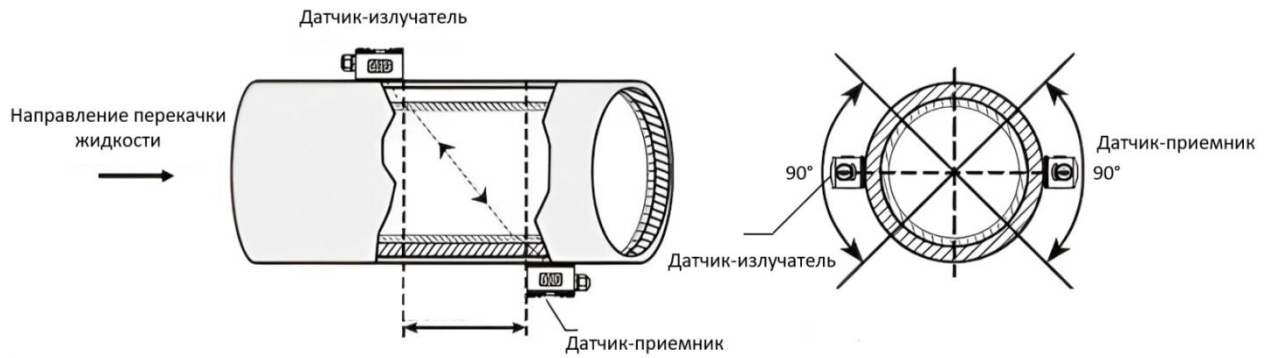


Рисунок 3.3 – Схема установки датчиков ультразвукового расходомера на трубопроводе «Z-метод» (слева – главный вид, справа – вид сбоку) [77]

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

Таблица 3.5 – Перечень датчиков ультразвукового расходомера TUF-2000 с диапазонами подходящих диаметров труб и температур измеряемых сред (по данным автора)

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

В системе экспериментального стенда обращаются среды, температура которых при проведении эксперимента не будет превышать 30°C. Из таблицы 3.1

и таблицы 3.3 видно, что наружный диаметр трубопровода из профилированного поликарбоната для определения коэффициента заполнения на самотечном участке составляет DN50. Исходя из всего выше перечисленного, по таблице 3.4 видно, что TS-2 – наиболее подходящая модель датчиков для ультразвукового расходомера по диаметру и наиболее близкому диапазону температур.

3.1.2 Особенности выбора и использования насосов перекачки жидких сред

Как описывалось ранее, для проведения эксперимента предполагается использование системы экспериментального стенда с различными перекачиваемыми средами, наиболее приближенных по своим физико-химическим к нефти и нефтепродуктам, перекачиваемых в магистральных трубопроводных системах, а также использование существующих товарных нефтепродуктов, перекачиваемых нефтепродуктопроводами. Как видно из таблицы 3.2 это дизельное топливо, вода, а также водно-глицериновый раствор, имитирующий по своим свойствам нефть некоторых товарных сортов. Для подбираемого насоса в первую очередь нужно предусмотреть возможность перекачивать различные среды, в том числе взрывоопасные, такие как дизель, поэтому насос должен быть во взрывозащищенном исполнении [7]. Насос должен быть электрический. Следует предусмотреть возможность изменения расхода не более чем 50 л/мин, то есть с прерывистым циклом работы. Насос должен быть негабаритный и легко устанавливаемый, должен быть с возможностью установки фильтра-очистителя на линии всасывания, так как после операции по сливу-наливу емкостей есть вероятность выпадения естественного осадка из продуктов перекачки и возникновения механических примесей после зачистки емкостей, что может негативно повлиять на качество проводимых измерений. На рисунке 3.4 приведена краткая характеристика насосов по принципу действия, по виду сил действующих на жидкость, по характеру процессов вытеснения жидкости, а также по направлению движения жидкости в насосе.

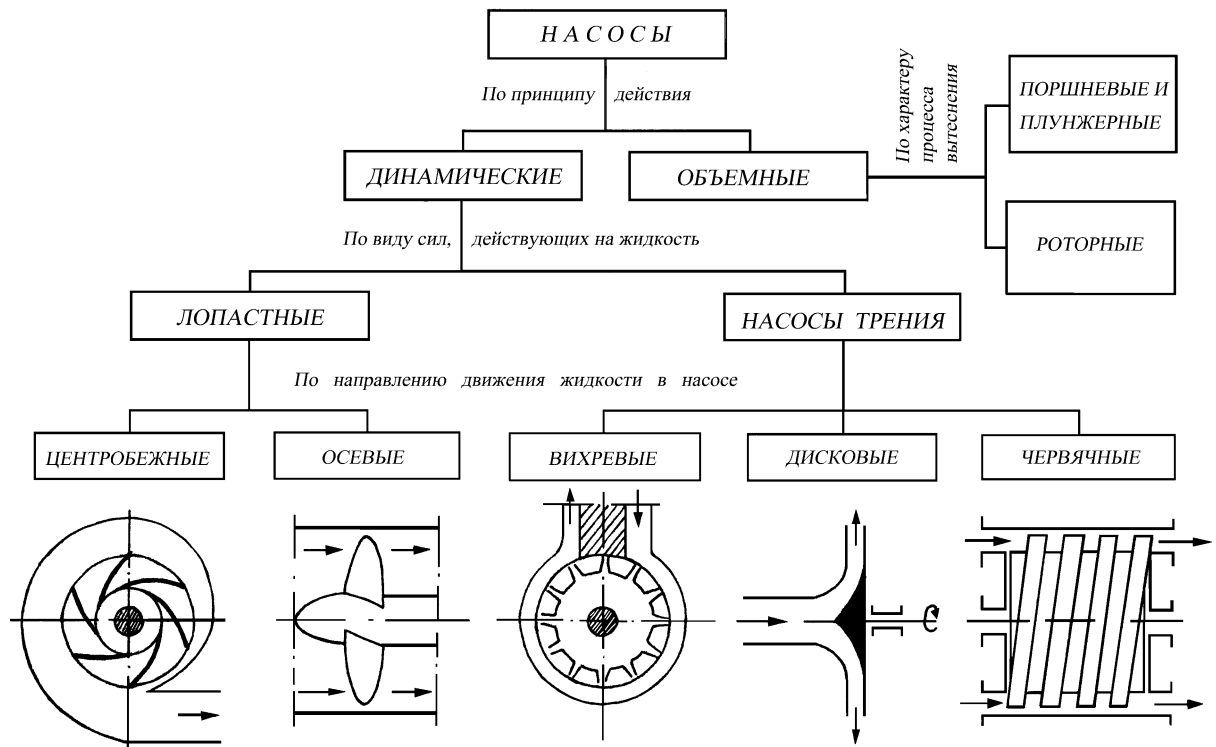


Рисунок 3.4 – Характеристика насосных агрегатов по принципу действия, по виду сил действующих на жидкость, по характеру процессов вытеснения жидкости, а также по направлению движения жидкости в насосе [87]

Исходя из выше перечисленных требований, предъявляемых к насосному агрегату, был выбран самозаправляющийся, объемный, лопастной электронасос Piusi EX50 12B DC ATEX, оборудованный байпасным клапаном. На рисунке 3.5 приведен слева направо вид сбоку и главный вид с габаритными размерами, а также изображение насоса Piusi EX50 12B DC ATEX.

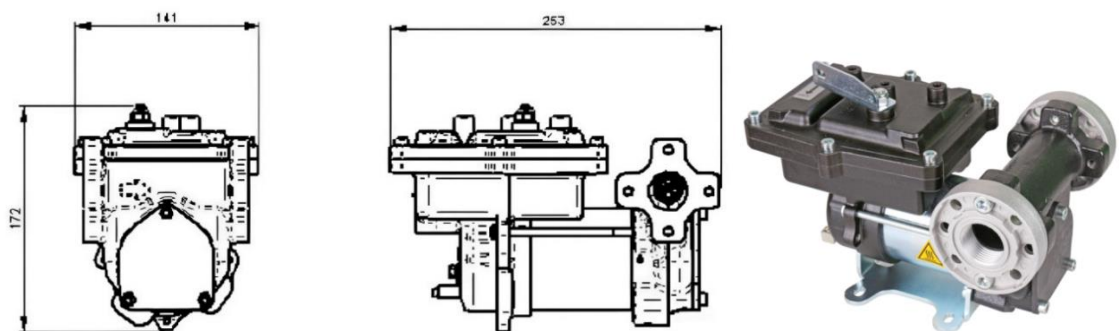


Рисунок 3.5 – Вид сбоку, главный вид и изображение Piusi EX50 12B DC ATEX (составлено автором)

Данный насос подходит под требования о количестве возможных перекачиваемых продуктах, требованиям по безопасности эксплуатации и габаритам, обеспечивает возможность регулировать расхода, может быть

оборудован фильтром, а также прост в монтаже и перемещении [59]. На рисунке 3.6. приведена напорно-расходная характеристика насоса Piusi EX50 12B DC АТЕХ.

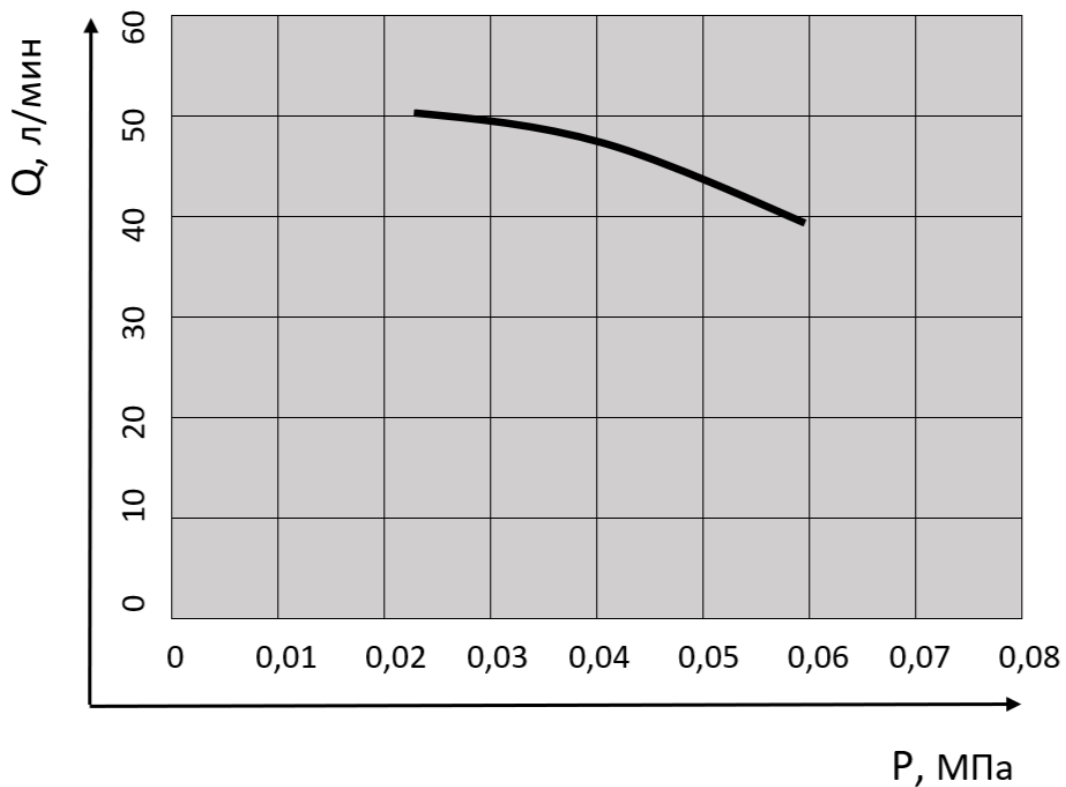


Рисунок 3.6 – Напорно-расходная характеристика насоса Piusi EX50 12B DC АТЕХ (ось X – давление, ось Y – расход) (составлено автором)

3.2 Планирование экспериментальных исследований

При постановке и планировании проведения натурных экспериментов особую роль составляет рассмотрение всевозможных комбинаций влияния факторов на целевую функцию.

3.2.1 Дробные 2^{k-p} факторные планы экспериментов

Особенность использования дробных факторных планов на производстве в рамках промышленных экспериментов заключается в возможности кратного сокращения количества экспериментов. Например, рассмотрим случай, когда на целевую переменную влияет около 11 факторов, каждый из которых регулируется на 2-х уровнях, максимум и минимум. В данном примере количество факторов, именуемое как k , будет равно 11. В случае проведения полного факторного эксперимента потребовалось бы провести 2048 экспериментов, что, безусловно, требует большего внимания к времени и точности проведения серии

экспериментов, а также к увеличению стоимости инвентарного оборудования, расходных материалов и ресурсов для проведения исследования. В данном случае наглядно можно заметить, что уменьшение порядка экспериментов позволит сосредоточиться на выявлении главных эффектов при использовании дробного факторного плана вместо полного факторного плана. Альтернативным аргументом в пользу использования дробного факторного плана заключается в игнорировании связей высоких порядков, что позволяет исключать лишние связи.

Как было описано выше, дробный факторный план является альтернативой полному факторному плану, сокращающий при этом кратно число экспериментов с допустимым некоторым снижением точности, но с принципиальным сохранением основных главных связей. Обращаясь к примеру, использованием дробного факторного плана, использующего часть данных от исходной выборки, с регулированием факторов на 2-х уровнях позволит сократить число опытов с 2048 до 64 опытов [74].

3.2.2 Дробные 2^{k-p} факторные планы экспериментов

При использовании дробных факторных планов следует отметить, что регулирование факторов только на двух уровнях исключает возможность анализировать степени зависимостей целевой переменной от факторов. Также возникает закономерный вопрос об использовании категориальных переменных факторов, использующих более 2-х категорий. Исходя из данных вызовов и ограничений факторные планы были модернизированы и вместо 2^{k-p} дробных факторных планов было предложено использовать 3^{k-p} , позволяющие изменять фактор на 3-х уровнях для выявления нелинейных зависимостей, при том, что общий механизм работы по определению числа экспериментов схож с 2-х уровневými дробными факторными планами [74].

В рамках данного исследования расход перекачки, относительная шероховатость, тип продукта перекачки и угол наклона самотечного участка были выбраны в качестве факторов. Относительная шероховатость и тип перекачиваемого продукта представлены категориальными переменными, что

исключает возможность использования $2^{**}(k-p)$ планов и делает выбор $3^{**}(k-p)$ планирования оптимальным для серии экспериментов.

3.2.3 Построение матрицы планирования экспериментальных исследований

Варьирование факторов осуществлялось на 3-х уровнях. В целях рационального проведения экспериментальных исследований предложена матрица планирования экспериментов, представленная в таблице 3.6.

Таблица 3.6 – Матрица экспериментальных исследований (по данным автора)

Измерение	Скорость, м/с	Угол наклона, °	Шероховатость, мм	Продукт перекачки
1	-1,0	-1,0	-1,0	-1,0
2	-1,0	-1,0	0,0	1,0
3	-1,0	-1,0	1,0	0,0
4	-1,0	0,0	-1,0	1,0
5	-1,0	0,0	0,0	0,0
6	-1,0	0,0	1,0	-1,0
7	-1,0	1,0	-1,0	0,0
8	-1,0	1,0	0,0	-1,0
9	-1,0	1,0	1,0	1,0
10	0,0	-1,0	-1,0	1,0
11	0,0	-1,0	0,0	0,0
12	0,0	-1,0	1,0	-1,0
13	0,0	0,0	-1,0	0,0
14	0,0	0,0	0,0	-1,0
15	0,0	0,0	1,0	1,0
16	0,0	1,0	-1,0	-1,0
17	0,0	1,0	0,0	1,0
18	0,0	1,0	1,0	0,0
19	1,0	-1,0	-1,0	0,0
20	1,0	-1,0	0,0	-1,0
21	1,0	-1,0	1,0	1,0
22	1,0	0,0	-1,0	-1,0
23	1,0	0,0	0,0	1,0
24	1,0	0,0	1,0	0,0
25	1,0	1,0	-1,0	1,0
26	1,0	1,0	0,0	0,0
27	1,0	1,0	1,0	-1,0

Матрица планирования сформирована для исследования влияния на коэффициент заполнения трубопровода на самотечном участке 4-х факторов: скорость; угол наклона трубопровода; шероховатость; тип перекачиваемого продукта [61]. В таблице 3.6 приведен результат планирования четырехфакторного эксперимента, регулируемого на трёх уровнях, образуя дробный факторный план из девяти блоков. Таблица включает в себя 27

экспериментов, позволяющих установить линейные и квадратичные зависимости для 4-х факторов. Основные факторы не смешаны друг с другом и не зависимы друг от друга [53].

3.3 Проведение экспериментальных исследований на самотечном участке

Важными аспектами при проведении эксперимента является функциональная исправность, регулируемость изменения технологических параметров режимов перекачки и угла наклона самотечного участка, возможность оперативного переключения перекачиваемой жидкости между сериями экспериментов и монтирования самотечного участка с переменной шероховатостью в соответствии с таблицей 3.3.

В ходе реализации намеченного плана экспериментального исследования (см. таблицу 3.6) было проведено 27 экспериментов.

Эксперименты проводились на 3-х уровнях для влияющих факторов.

Примеры тестовых экспериментов на дизельном топливе при различных углах наклона экспериментального стенда, а также с различными расходными характеристиками приведен на рисунках 3.7 – 3.9. На рисунке 3.7 представлено заполнение самотечного участка экспериментального стенда дизельным топливом при 5° наклона и расходе $0,94 \text{ м}^3/\text{ч}$.

На рисунке 3.8 представлено заполнение самотечного участка экспериментального стенда дизельным топливом при 10° наклона и расходе $0,56 \text{ м}^3/\text{ч}$.

На рисунке 3.9 представлено заполнение самотечного участка экспериментального стенда дизельным топливом при 15° наклона и расходе $0,18 \text{ м}^3/\text{ч}$.

При проведении экспериментов требуется менять как расход перекачки продукта за счет управляемого закрытия крана на выходе с насоса. Также требуется регулировать наклон самотечного участка для достижения различных пространственных конфигураций существующих участков натуральных магистральных участков. Также переменным параметром при проведении

экспериментов является шероховатость внутреннего покрытия трубопроводов [67].

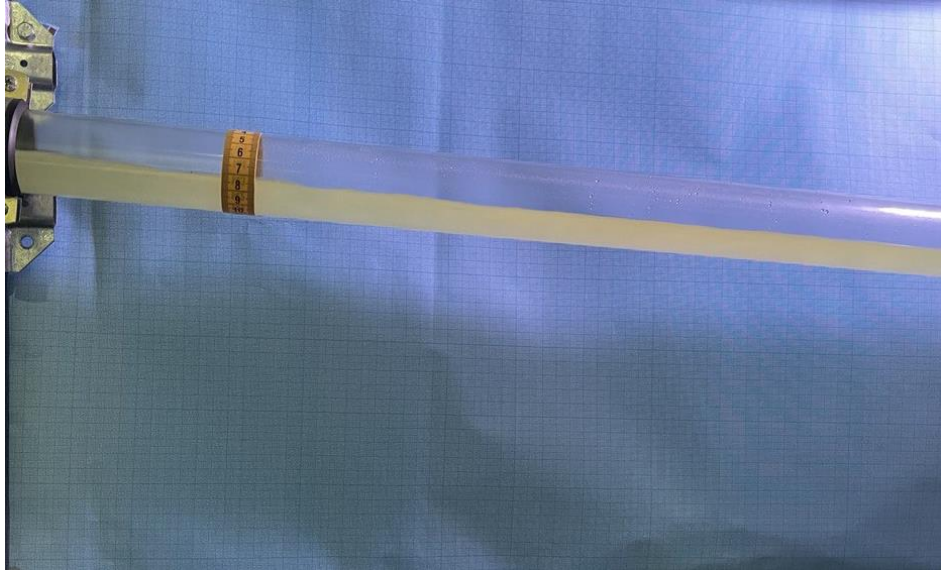


Рисунок 3.7 – Заполнение самотечного участка экспериментального стенда дизельным топливом при 5° наклона и расходе $0,94 \text{ м}^3/\text{ч}$ (фото автора)

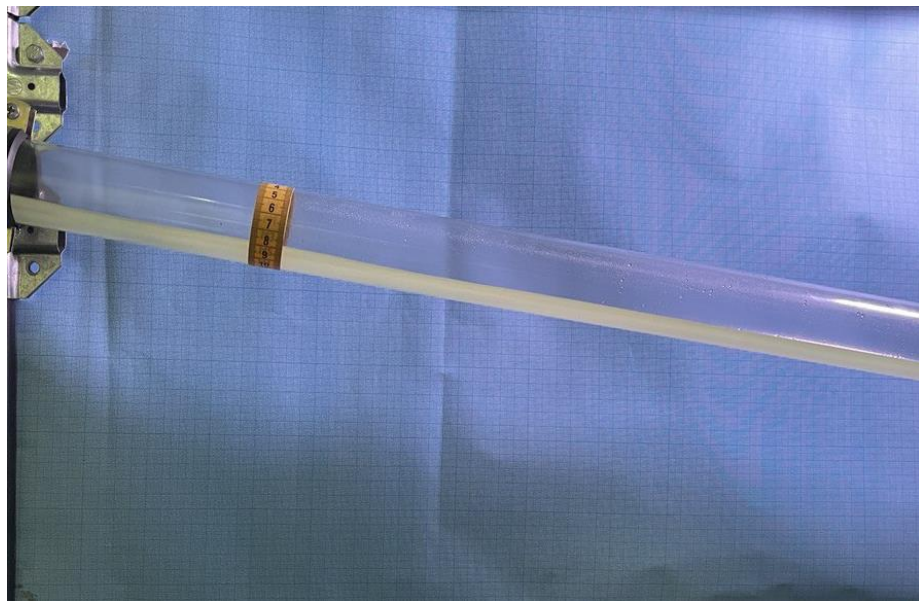


Рисунок 3.8 – Заполнение самотечного участка экспериментального стенда дизельным топливом при 10° наклона и расходе $0,56 \text{ м}^3/\text{ч}$ (фото автора)

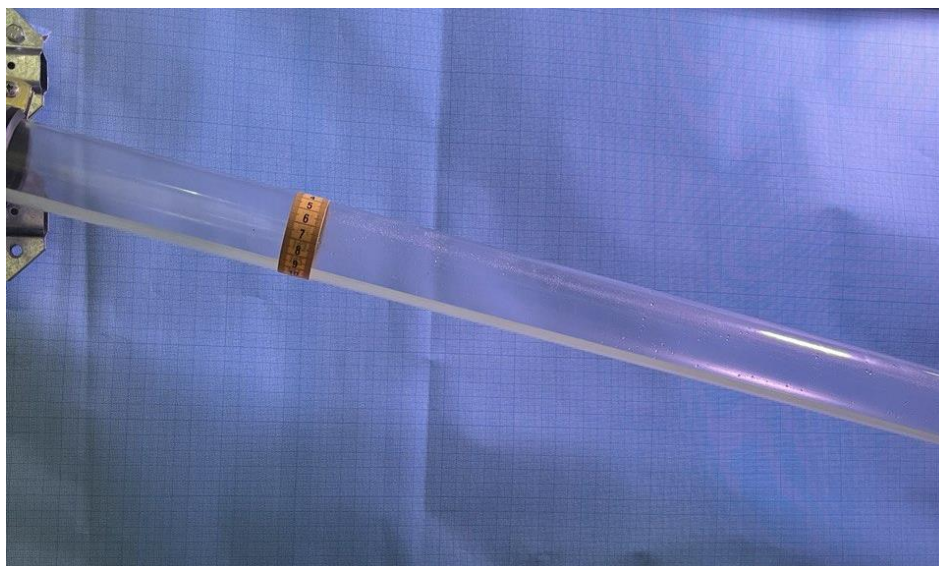


Рисунок 3.9 – Заполнение самотечного участка экспериментального стенда дизельным топливом при 15° наклона и расходе $0,18 \text{ м}^3/\text{ч}$ (фото автора)

Для этого использовались сменные трубные секции с различным покрытием, имитирующем старение трубопровода и срок его эксплуатации. Например, секции с покрытием $0,4\text{-}0,8 \text{ мм}$ имитируют старые трубы, находящиеся в эксплуатации примерно $10\text{-}20$ лет с потенциально возможными дефектами, коррозией и отложениями продуктов перекачки, влияющих на коэффициент заполнения самотечного участка. Покрытие на трубные вставные секции нанесено было в соответствии с данными из таблицы 3.3.

Внешний вид секции с шероховатостью $0,4 \text{ мм}$ приведен на рисунке 3.10. При проведении экспериментов при определении коэффициента заполнения особую важность вызывала форма поверхности перекачиваемой жидкости на границе раздела фаз «жидкость-газ», на наибольшей шероховатости, имевшей сетчатую форму [85]. Наблюдение данного эффекта волнообразования, упомянутого в Главе 2, говорит о том, что наблюдается приемлемая сходимость в постановке и проведении натурных экспериментов в сравнении с опытами зарубежных и отечественных коллег из научного сообщества.



Рисунок 3.10 – Сменная трубная секция самотечного участка трубопровода экспериментального стенда с шероховатостью 0,4 мм (фото автора)

Форма поверхности перекачиваемой жидкости на границе раздела фаз при проведении серии экспериментов на дизельном топливе приведена на рисунках 3.11 – 3.13. На рисунке 3.11 изображено фото с нижней образующей трубопровода волны на поверхности перекачиваемого дизельного топлива самотечном участке экспериментального стенда.



Рисунок 3.11 – Волны на поверхности перекачиваемого дизельного топлива на самотечном участке экспериментального стенда, (фото снизу) (фото автора)

На рисунке 3.12 изображено фото снизу сбоку аналогичного наблюдаемого проявления вторичного эффекта на поверхности перекачки, а на рисунке 3.13 изображено фото справа сбоку участка экспериментального стенда с волнообразованием на поверхности перекачиваемого дизельного топлива



Рисунок 3.12 – Волны на поверхности перекачиваемого дизельного топлива на самотечном участке экспериментального стенда, (фото снизу) (фото автора)



Рисунок 3.13 – Волны на поверхности перекачиваемого дизельного топлива на самотечном участке экспериментального стенда, (фото справа) (фото автора)

Проведение исследований проводилось по следующей схеме:

1. Монтирование трубной секции с требуемой шероховатостью для серии экспериментов в соответствии с таблицей 3.6;
2. Корректирование уровня наклона самотечного участка трубопровода экспериментального стенда путем изменения положения подвижной каретки и

фиксирование положения на вертикальной штанге с использованием болтового соединения каретка-штанга;

3. Опорожнение всей системы экспериментального стенда и дальнейшее наполнение емкости и системы трубопроводов требуемой жидкостью для серии экспериментов;

4. Тестовый запуск насоса для наполнения системы экспериментального стенда перекачиваемой жидкостью;

5. Нанесение контактной жидкости на датчики ультразвукового расходомера и калибровка расходомера на тестовом запуске системы путем ввода физических свойств трубопровода, свойств перекачиваемой жидкости, таких как вязкость и плотность, выбор из возможных типов датчиков для ультразвукового расходомера, расстояния между датчиками;

6. Проведение серии экспериментов, определение степени заполнения самотечного участка трубопровода продуктом перекачки, определение значения расхода в трубопроводной системе;

7. Остановка работы насоса, остановка работы расходомера, опорожнение системы экспериментального стенда, промывка трубопроводной системы стенда, зачистка емкостей хранения от остатков перекачиваемой жидкости, демонтирование участка трубопровода с заданной шероховатостью.

8. Предварительный расчет коэффициента заполнения, оценка адекватности полученных значений, фиксация выполнения серии эксперимента в журнале экспериментов.

В результате проведения экспериментальных исследований по намеченному плану получены результаты, представленные в таблице 3.7.

Таблица 3.7 – Результаты проведенных экспериментальных исследований на стенде (по данным автора)

Измерение	Скорость, м/с	Угол наклона, °	Шероховатость, мм	Продукт перекачки	Длина дуги по внешней стенке трубы, см
1	0,03	5	0,01	Дизель	2,9
2	0,03	5	0,4	Глицериновый раствор	4,5
3	0,03	5	0,8	Вода	4,1
4	0,03	10	0,01	Глицериновый раствор	3,25
5	0,03	10	0,4	Вода	2,8
6	0,03	10	0,8	Дизель	3,85
7	0,03	15	0,01	Вода	1,65
8	0,03	15	0,4	Дизель	3,35
9	0,03	15	0,8	Глицериновый раствор	3,2
10	0,09	5	0,01	Глицериновый раствор	4,35
11	0,09	5	0,4	Вода	5,5
12	0,09	5	0,8	Дизель	5,85
13	0,09	10	0,01	Вода	3,75
14	0,09	10	0,4	Дизель	5,15
15	0,09	10	0,8	Глицериновый раствор	5
16	0,09	15	0,01	Дизель	4,9
17	0,09	15	0,4	Глицериновый раствор	4,6
18	0,09	15	0,8	Вода	5,35
19	0,15	5	0,01	Вода	4,5
20	0,15	5	0,4	Дизель	6,45
21	0,15	5	0,8	Глицериновый раствор	6,05
22	0,15	10	0,01	Дизель	5,35
23	0,15	10	0,4	Глицериновый раствор	5,7
24	0,15	10	0,8	Вода	5,7
25	0,15	15	0,01	Глицериновый раствор	5
26	0,15	15	0,4	Вода	4,8
27	0,15	15	0,8	Дизель	5,25

3.4 Предварительная обработка результатов экспериментальных исследований на самотечном участке стенда

В процессе проведения эксперимента необходимо получить данные о степени заполнения самотечного участка трубопровода с использованием измерительного уровня, смонтированного поперек оси трубопровода самотечного участка в условиях неизменной температуры перекачиваемой среды [31]. Самотечный участок с установленным измерительным уровнем изображен на рисунках 3.7 – 3.9. Схема поперечного сечения участка самотечного участка с геометрическими показателями, характеризующих уровень заполнения данного участка, отражена на рисунке 3.14.

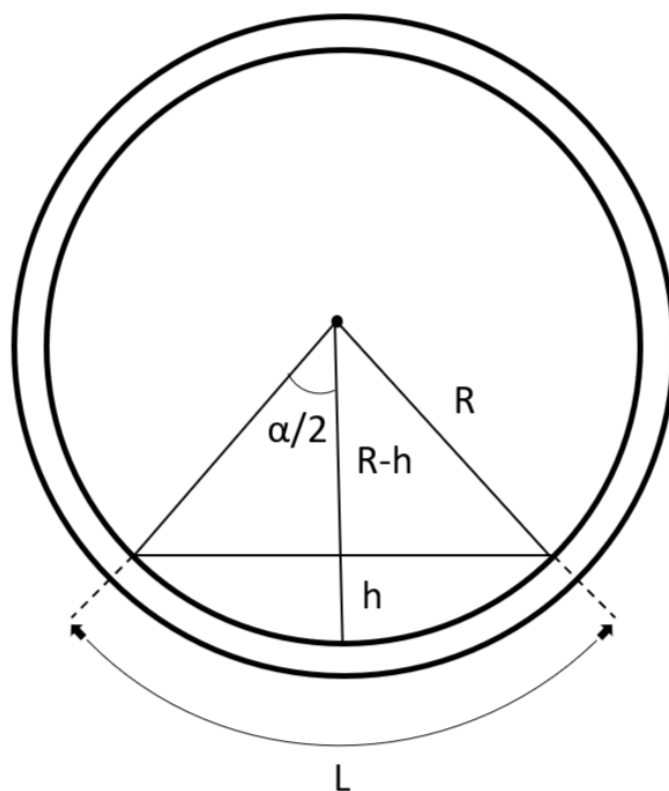


Рисунок 3.14 – Схема поперечного сечения участка самотечного участка с геометрическими показателями, характеризующих уровень заполнения данного участка, где α – центральный угол, опирающийся на дугу L , °; h – высота наполнения трубопровода перекачиваемой жидкостью, мм; R – внутренний радиус трубопровода, мм; L – длина дуги самотечного участка трубопровода, наполненного перекачиваемой жидкостью, мм

(составлено автором)

Показателем уровня заполнения в существующих методиках по определению уровня заполнения трубопроводов является h , высота наполнения трубопровода перекачиваемой жидкостью, использованный, соответственно, для данных экспериментов [75].

Однако, для определения данного показателя необходимо произвести расчет по переводу первично полученного значения L , дуги участка трубопровода, наполненного перекачиваемой жидкостью, в h , высоту наполнения трубопровода перекачиваемой жидкостью.

Угол $\alpha/2$ является углом в прямоугольном треугольнике, соответственно косинус половины центрального угла $\cos(\alpha/2)$ можно выразить как отношение катета $R-h$ к гипотенузе R (3.1):

$$\cos(\alpha/2) = \frac{R-h}{R}. \quad (3.1)$$

Угол α является центральным в окружности и опирается на дугу длиной L . Соответственно, длину дуги можно выразить как отношение радиуса окружности, градусной меры центрального угла, который опирается на данную дугу через следующее выражение (3.2):

$$L = \frac{\pi \cdot R \cdot \alpha}{180^\circ}, \quad (3.2)$$

где π – число Пи, выраженное в радианах, $^\circ$.

Выразим из формулы (3.2) центральный угол α и, поделив левую и правую часть выражения на $1/2$, получим выражение половины центрального угла $\alpha/2$ (3.3):

$$L = \frac{\pi \cdot R \cdot \alpha}{180^\circ} \rightarrow \frac{\alpha}{2} = \frac{L \cdot 90^\circ}{\pi \cdot R}. \quad (3.3)$$

Выразим внутренний радиус трубопровода R через половину внутреннего диаметра трубопровода $1/2 D$, подставим в формулу (3.1), разделим числитель и знаменатель на D и получим следующее выражение (3.4):

$$\cos(\alpha/2) = \frac{R-h}{R} = \frac{1/2 \cdot D - h}{1/2 \cdot D} = \frac{1/2 - h/D}{1/2}. \quad (3.4)$$

Из равенства (3.3) выразим отношение высоты наполнения трубопровода перекачиваемой жидкостью h к внутреннему диаметру трубопровода D через косинус половины центрального угла $\cos(\alpha/2)$ (3.5):

$$\cos(\alpha/2) = \frac{1/2 - h/D}{1/2} \rightarrow \frac{h}{D} = \frac{1}{2} \cdot (1 - \cos(\alpha/2)). \quad (3.5)$$

Подставив выражение половины центрального угла $\alpha/2$ из формулы (3.3) в равенство (3.5) получим результирующее выражение отношения высоты наполнения трубопровода перекачиваемой жидкостью h к внутреннему диаметру трубопровода D (3.6):

$$\frac{h}{D} = \frac{1}{2} \cdot (1 - \cos(\alpha/2)) \rightarrow \frac{h}{D} = \frac{1}{2} \cdot (1 - \cos(\frac{L \cdot 90^\circ}{\pi \cdot R})). \quad (3.6)$$

[26]. В качестве определяющих критериев подобия были выбраны безразмерные числа, приведенные в Главе 2. Для характеристики отношения сил инерции к силам вязкости в потоке жидкости, описанное в формуле (2.29), выбрано число Рейнольдса (3.7):

$$Re = \frac{v \cdot D}{\nu}. \quad (3.7)$$

Для характеристики отношения инерционных сил к гравитационным силам в потоке жидкости, описанное в формуле (2.30), выбрано число Фруда (3.8):

$$Fr = \frac{v^2}{(g \cdot \sin \alpha) \cdot D}. \quad (3.8)$$

Для описания баланса между силами инерции и силами поверхностного натяжения, действующих на потока жидкости, описанное в формуле (2.31), выбрано число Вебера (3.9):

$$We = \frac{\rho \cdot D \cdot v^2}{\sigma}. \quad (3.9)$$

Для описания отношения абсолютной шероховатости к линейному размеру сечения потока жидкости, описанная в формуле (2.32), выбрана относительная шероховатость (3.10):

$$\varepsilon = \frac{\Delta}{D}. \quad (3.10)$$

Результаты предварительной обработки экспериментальных данных представлены в таблице 3.8.

Таблица 3.8 – Результаты предварительной обработки экспериментальных данных (по данным автора)

Коэффициент заполнения	Число Рейнольдса	Число Фруда	Число Вебера	Относительная шероховатость
0,0817	325,6351	0,1496	1,2089	0,000212
0,1891	750,7987	0,1496	0,7063	0,008510
0,1588	1410	0,1496	0,5877	0,017021
0,1019	750,7987	0,1060	0,7063	0,000212
0,0763	1410	0,1060	0,5877	0,008510
0,1410	325,6351	0,1060	1,2089	0,017021
0,0269	1410	0,0868	0,5877	0,000212
0,1080	325,6351	0,0868	1,2089	0,008510
0,0989	750,7987	0,0868	0,7063	0,017021
0,1775	2252,3961	0,4489	6,3570	0,000212
0,2732	4230	0,4489	5,2897	0,008510
0,3049	976,9053	0,4489	10,8809	0,017021
0,1341	4230	0,3180	5,2897	0,000212
0,2425	976,9053	0,3180	10,8809	0,008510
0,2298	2252,3961	0,3180	6,3570	0,017021
0,2214	976,9053	0,2605	10,8809	0,000212
0,1970	2252,3961	0,2605	6,3570	0,008510
0,2599	4230	0,2605	5,2897	0,017021
0,1891	7050	0,7482	14,69362	0,000212
0,3614	1628,1755	0,7482	30,2247	0,008510
0,3234	3753,9936	0,7482	17,6585	0,017021
0,2599	1628,1755	0,5301	30,2247	0,000212
0,2912	3753,9936	0,5301	17,6585	0,008510
0,2912	7050	0,5301	14,6936	0,017021
0,2298	3753,9936	0,4342	17,6585	0,000212
0,2132	7050	0,4342	14,6936	0,008510
0,2512	1628,1755	0,4342	30,2247	0,017021

3.5 Статистическая обработка результатов экспериментальных исследований на самотечном участке стенда

При проведении оценки линейной модели исследователь может получить результаты об отсутствии линейной зависимости между целевой переменной и влияющими факторами. В таком случае в модель множественной регрессии следует добавить нелинейные полиномиальные члены для использования нелинейного оценивания на исследуемой модели

Метод нелинейного оценивания распространяется на почти все известные регрессионные модели, как на непрерывные, так и на разрывные регрессии, некоторые из которых представлены пробит и логит регрессиями, моделью экспоненциального роста и другими.

Среди выше перечисленных и наиболее известных методов для минимизации функций потерь при нелинейном оценивании можно выделить использование эвристического метода Хука-Дживса. Суть данного алгоритма включает 2 этапа – исследующий поиск и поиск по образцу. На первом этапе, находясь в некоторой точке с координатами $\{x, y\}$, итерационно определяем расположение параметров модели с оптимизированием функции потерь для каждого параметра и перемещением параметром в новое место в m -мерном пространстве.

Вторым шагом будет экстраполяция текущей точки с новой точкой в пространстве с увеличенным шагом. Из новой базовой точки производится оценка оптимальности и продолжается алгоритм с 1 шага, тем самым определяя глобальный минимум функции потерь, учитывая нелинейные зависимости [63, 9].

Для статистической оценки полученных значений и нахождения глобального минимума функции потерь был выбран метод Хука-Дживса.

При помощи метода Хука-Дживса для нелинейной регрессии были определены коэффициенты нелинейной регрессии, описывающие зависимости факторов эксперимента и целевой функции, а именно – коэффициента заполнения. Значения коэффициентов регрессионной модели представленные в таблице 3.9.

Таблица 3.9 – Значения коэффициентов регрессии (по данным автора)

Коэффициент	Значение
C	0,775876
a ₀	-0,071120
a ₁	0,215788
a ₂	0,073954
a ₃	0,077218

Таким образом, окончательно, с учетом полученных коэффициентов, общий вид критериального уравнения для коэффициента заполнения (2.33), полученного в Главе 2 с использованием теории подобия и размерностей, можно записать в следующем виде (3.11)

$$\frac{h}{D} = 0,776 \cdot (Re)^{-0,0711} \cdot (Fr)^{0,2158} \cdot (We)^{0,07395} \cdot (\varepsilon)^{0,07722}. \quad (3.11)$$

На рисунке 3.15 представлен график сопоставления наблюдаемых и предсказанных значений коэффициента заполнения.

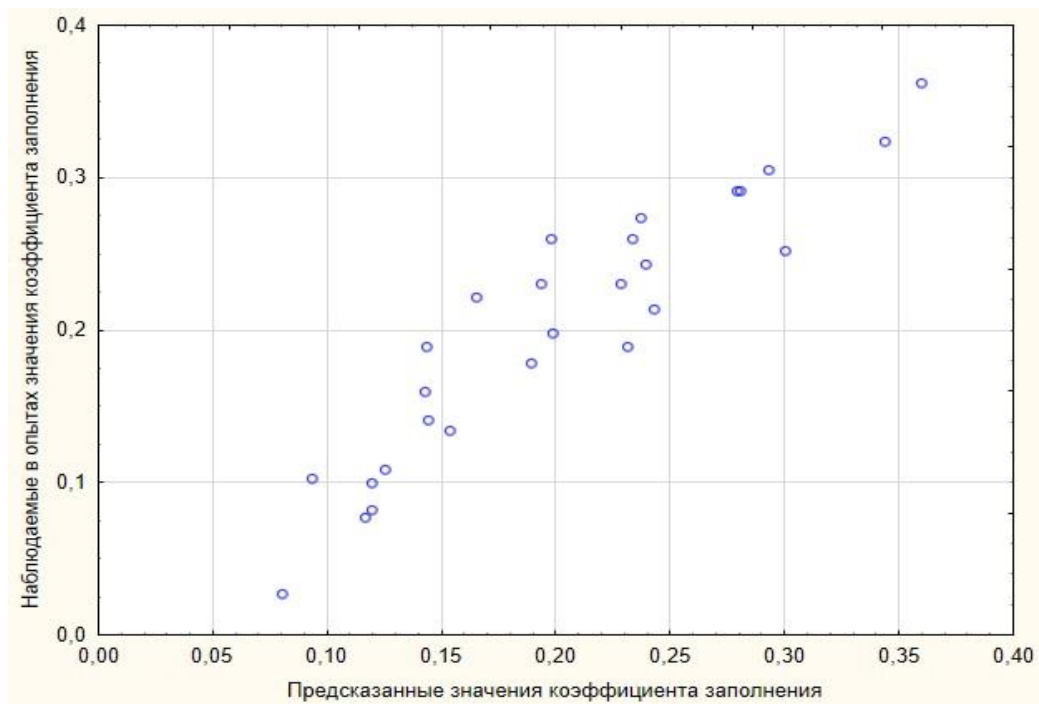


Рисунок 3.15 – Наблюдаемые и предсказанные по модели значения коэффициента заполнения (составлено автором)

Из рисунка 3.15 видно, что облако точек тяготеет к прямой линии, проведенной из начала координат под углом 45 градусов, что свидетельствует о высоком качестве модели [92]. На рисунке 3.16 приведена гистограмма распределения остатков.

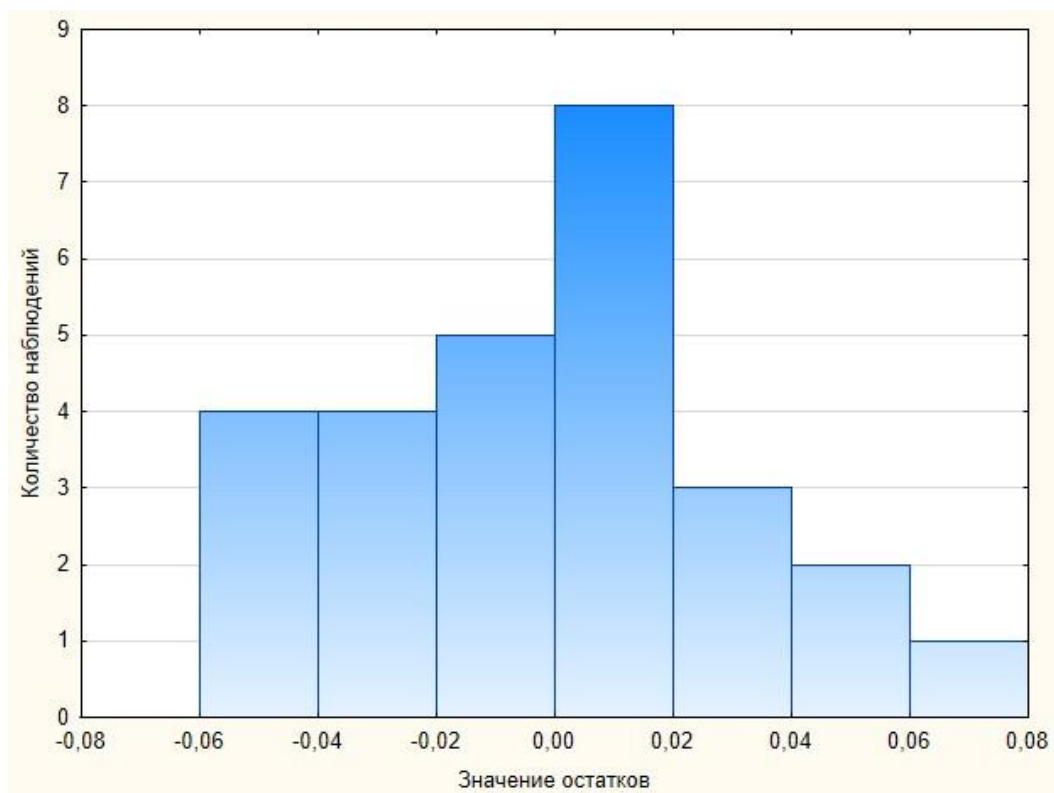


Рисунок 3.16 – Гистограмма распределения остатков (составлено автором)

В целях оценки нормального распределения остатков, также был проведен специализированный тест, результаты которого представлены на рисунке 3.17.

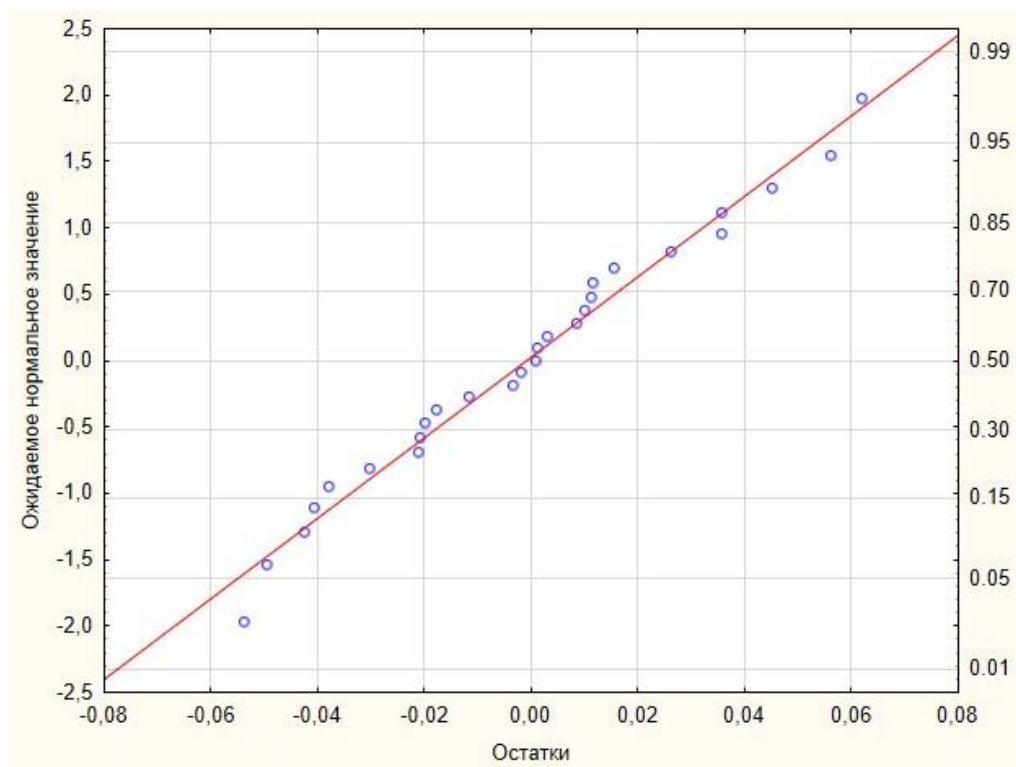


Рисунок 3.17 – График ожидаемого нормального распределения остатков (составлено автором)

Из рисунка 3.16 видно, что гистограмма распределения остатков близка по своей форме к нормальной, что свидетельствует об отсутствии в экспериментах систематической ошибки (в таком случае мы бы наблюдали асимметрию или отклонения на концах гистограммы) [71].

Из рисунка 3.17 видно, что ожидаемые нормальные значения остатков почти целиком ложатся на красную линию, что свидетельствует о верности предположений о нормальном характере их распределения [4]. В таблице 3.10 приведено сравнение наблюдаемых в рамках экспериментов и предсказанных значений коэффициента заполнения.

Таблица 3.10 – Сравнение наблюдаемых в рамках экспериментов и предсказанных значений коэффициента заполнения (по данным автора)

Наблюдаемое значение	Предсказанное значение	Отклонение	Относительная погрешность
0,082	0,120	-0,038	46,23
0,189	0,144	0,045	23,91
0,159	0,143	0,016	9,83
0,102	0,093	0,009	8,48
0,076	0,117	-0,041	53,24
0,141	0,145	-0,003	2,47
0,027	0,081	-0,054	199,34
0,108	0,126	-0,018	16,29
0,099	0,120	-0,021	21,36
0,178	0,189	-0,012	6,58
0,273	0,237	0,036	13,11
0,305	0,293	0,012	3,85
0,134	0,154	-0,020	14,69
0,243	0,239	0,003	1,28
0,230	0,229	0,001	0,46
0,221	0,165	0,056	25,39
0,197	0,199	-0,002	0,96
0,260	0,198	0,062	23,82
0,189	0,231	-0,042	22,35
0,361	0,360	0,001	0,32
0,323	0,344	-0,021	6,41
0,260	0,234	0,026	10,16
0,291	0,281	0,010	3,44
0,291	0,280	0,011	3,91
0,230	0,194	0,036	15,58
0,213	0,243	-0,030	14,12
0,251	0,301	-0,049	19,63

Из таблицы 3.10 можно сделать вывод, что если убрать грубый выброс (выделен цветом), то среднее значение относительной погрешности не превышает 20%, что является хоть и достаточно высокой величиной, но допустимой в рамках общей сложности модели. К тому же в данном случае относительная погрешность не вполне представительна, поскольку рассматриваются величины меньше 1, получаются завышенные оценки [4].

3.6 Выводы по третьей главе

1. В целях изучения влияния различных факторов на коэффициент заполнения самотёчного участка трубопровода был спроектирован специализированный экспериментальный стенд и составлена программа экспериментальных исследований с использованием подходов теории планирования эксперимента;

2. На основе результатов проведенных экспериментов было получено критериальное уравнение вида

$$\frac{h}{D} = 0,776 \cdot (Re)^{-0,0711} \cdot (Fr)^{0,2158} \cdot (We)^{0,07395} \cdot (\varepsilon)^{0,07722},$$

которое относительно хорошо (за исключением явных выбросов и ошибок измерений) описывает экспериментальные данные в области небольших чисел Рейнольдса.

3. Адекватный перенос полученных зависимостей на магистральные трубопроводы возможен только после введения корректирующих коэффициентов, установленных по результатам обработки базы данных по действующим самотёчным участкам.

ГЛАВА 4 РЕКОМЕНДАЦИИ И ТЕХНИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ ПО СОВЕРШЕНСТВОВАНИЮ КОЛИЧЕСТВЕННОГО УЧЕТА НЕФТИ И НЕФТЕПРОДУКТОВ НА САМОТЕЧНЫХ УЧАСТКАХ ТРУБОПРОВОДОВ

На основании полученного в Главе 3 критериального уравнения, представленного формулой (3.11) можно сделать вывод о том, что потенциально возможное решение для определения степени заполнения самотечного участка при перекачке жидких углеводородов было предложено. Однако, следует отметить, что в современных реалиях перекачка нефти и нефтепродуктов производится партиями, а также перекачка может быть приостановлена для переориентации направления перекачки [65]. Из этого следует, что уравнение, основанное на определении в том числе скоростных характеристик потока не подойдет, поскольку данный параметр будет обнулять целевую функцию. Наиболее важными параметрами в случае остановленной перекачки являются температура и давление, поскольку при остановленной перекачки температура понижается и изменяется давление перекачиваемой жидкости, что может маскировать эффект утечки и приводить к расхождениям при проведении количественного учёта. В этой связи следует обратить внимание на случай остановленной перекачки, рассмотреть особенности определения вместимости трубопроводной системы и предложить рекомендации по учёту нефти и нефтепродуктов в зависимости от изменения термобарических параметров перекачиваемой нефти и нефтепродуктов на самотечных участках.

4.1 Определение вместимости трубопроводов, транспортирующих жидкие продукты, в зависимости от термобарических условий

В данном пункте рассматриваются вопросы расчета вместимости трубопроводов, по которым осуществляется транспорт жидких углеводородных продуктов, в зависимости от термобарических условий. Данные расчеты важны для таких насущных задач практики трубопроводного транспорта как проведение инвентаризации и установление факта незаконного отбора нефти/нефтепродукта из трубопровода. В работе приводится основополагающее уравнение состояния остановленного трубопровода, при рассмотрении которого фокус внимания

сосредоточен на изменении геометрической вместимости трубопровода в зависимости от изменения температуры и давления перекачиваемой среды. При рассмотрении изменения объема, из классических уравнений механики, получены уточненные зависимости для двух случаев: подземного и надземного варианта прокладки. Проведено сравнение полученных зависимостей с подходом, установленном в рамках действующих нормативных документов, в частности Р 50.2.040-2004 [76]. При анализе рассматриваемых зависимостей установлено, что ряд эффектов таких как изменение объема газа и температурный фактор «маскируют» эффект утечки/незаконного отбора, препятствуя их идентификации по данным изменения давления/температуры. Аналитическое объяснение процессов, происходящих в остановленном трубопроводе, позволит в дальнейшем дать количественную оценку возникающим неопределенностям, что облегчит принятие решение и позволит внести корректировки в используемое программное обеспечение.

Для находящегося в эксплуатации магистрального трубопровода характерен ряд явлений, которые могут повлиять на результаты расчета количества нефти и нефтепродуктов в остановленном участке, к таковым можно отнести:

- 1) наличие водных и газовых скоплений [38, 44, 47];
- 2) наличие самотечных участков [32, 34];
- 3) изменение температуры в процессе остывания [39];
- 4) частичное растворение пузырьков газа/собственных паров, обуславливающее изменение коэффициента сжимаемости нефти/нефтепродукта [42, 72];
- 5) наличие утечек или несанкционированных врезок;
- 6) способ прокладки и конструктивные особенности трубопровода.

Очевидно, что для учета перечисленных выше факторов следует разработать теоретическое обоснование, позволяющее с приемлемой степенью точности оценить количество нефти и нефтепродукта в остановленных участках с учетом имеющихся неопределенностей и степени оснащённости линейной части устройствами объективного контроля. Данная задача является комплексной и

включает в себя формирование адекватной исследуемым процессам физической модели, в основу которой положено соответствующее уравнение состояния, с учетом поправок на указанные выше факторы.

Как правило, инвентаризацию проводят без остановки перекачки. Приведенные в работе формулы можно использовать, представляя нестационарный процесс как последовательность стационарных состояний. В отдельных случаях (например, в процессе установления причин дисбаланса из-за незаконного отбора или утечек) расчет количества продукта ведется в остановленном трубопроводе спустя некоторое время после завершения нестационарных процессов.

В силу важности этого вопроса, предпринимались многочисленные попытки увеличить точность расчета и дать рекомендации по рационализации размещения средств измерения давления и температуры на линейной части. На данный момент основные рекомендации по расчетам содержатся в документе Р 50.2.040-2004 [76]. Несмотря на высокий уровень проработанности вопроса, учесть все влияющие факторы является крайне затруднительной задачей. Решение этой задачи может быть достигнуто только после проведения ряда НИР в части изучения процессов аккумуляции газовых и водных скоплений, установления их потенциального объема, изучения коэффициента заполнения самотечных участков, оценки влияния рельефа местности, конструктивных особенностей трубопроводной системы и т.п.

В данной работе внимание сосредоточено на вопросе формирования методологического подхода к определению вместимости трубопровода в зависимости от термобарических условий как основы для дальнейших расчетов [37]. Ниже представлены основные идеи и теоретические предпосылки, которые следует учитывать при формировании нормативных методических документов по расчету количества нефти/нефтепродуктов. Все приведенные формулы представлены для одного участка трубы с одинаковым диаметром и толщиной стенки.

Изменение геометрического объема трубы $dV_{\text{трубопровод}}$ вследствие изменения термобарических условий должно быть равно сумме изменений объема нефти/нефтепродукта $dV_{\text{жидкость}}$ и объема газа $dV_{\text{газ}}$. Основное уравнение для остановленного участка магистрального трубопровода имеет вид (4.1):

$$dV_{\text{т}} = dV_{\text{ж}} + dV_{\text{г}}, \quad (4.1)$$

где $dV_{\text{т}}$ – изменение объема трубопровода, м^3 ; $dV_{\text{ж}}$ – изменение объема нефти/нефтепродукта, м^3 ; $dV_{\text{г}}$ – изменение объема газовых скоплений, м^3 .

Рассмотрим отдельно изменение объема нефти/нефтепродукта в трубе (4.2):

$$dV_{\text{ж}} = Q_{\text{ж}} \cdot d\tau + V_{\text{ж}} \cdot [\alpha_{\text{ж}} \cdot dT_{\text{ж}} - K_{\text{ж}} \cdot dp] - Q_{\text{у}} \cdot d\tau, \quad (4.2)$$

где $Q_{\text{ж}}$ – расход закачки (или отбора) нефти/нефтепродукта в остановленную трубу, взятый с соответствующим знаком, $\text{м}^3/\text{ч}$; $d\tau$ – относительно малый промежуток времени, с; $\alpha_{\text{ж}}$ – объемный коэффициент теплового расширения нефти/нефтепродукта (равен трем линейным), $1/^\circ\text{C}$; $dT_{\text{ж}}$ – изменение температуры нефти/нефтепродукта за время $d\tau$, $^\circ\text{C}$; $K_{\text{ж}}$ – коэффициент сжимаемости нефти/нефтепродукта, $1/\text{Па}$; $V_{\text{ж}}$ – начальный объем нефти/нефтепродукта в трубе, м^3 ; dp – изменение давления нефти/нефтепродукта за время $d\tau$, Па ; $Q_{\text{у}}$ – расход утечек (или несанкционированных врезок), $\text{м}^3/\text{ч}$.

Из формулы (4.2) видно, что изменение объема газа и температурный факторы «маскируют» эффект утечки, препятствуя ее идентификации по данным изменения давления/температуры. Кроме того, незаконные врезки зачастую выполняются с устройством арматуры, перекрывающей линию отбора продукта при остановке перекачки [62]. Таким образом, выявить их значительно сложнее.

Водные скопления в первом приближении не учитываются (водные скопления практически несжимаемы, тем более внесение этой корректировки мало повлияет на результат, поскольку как показали исследования по водным скоплениям их совокупный объем как правило составляет 0...1 % и менее от геометрического объема трубы) [11, 99].

Изменение объема трубопровода dV_T в зависимости от изменения давления и температуры следует определять исходя из механического состояния участка (закрепленный/незакрепленный):

1) для случая закрепленной трубы (как подземные участки) (4.3):

$$dV_T = \frac{\pi \cdot D_1^2}{4} \cdot L \cdot \left[\frac{(1-\nu^2) \cdot D_0 \cdot dp}{t \cdot E_{\text{сталь}}} + 2 \cdot \alpha_L \cdot (1 + \nu) \cdot dT_{\text{стенка}} \right], \quad (4.3)$$

где D_1 – внутренний диаметр участка, м; L – длина участка, м; D_0 – срединный диаметр (исходя из законов механики, диаметр D_0 – это срединный диаметр, но на практике, поскольку сосуд считается тонкостенным его заменяют диаметром внутренним D_1 для удобства вычислений), м; ν – коэффициент Пуассона трубной стали; $E_{\text{сталь}}$ – модуль упругости трубной стали, МПа; t – толщина стенки трубопровода на участке, мм; α_L – линейный коэффициент теплового расширения стали, $^{\circ}\text{C}^{-1}$; $dT_{\text{стенка}}$ – изменение температуры стенки трубопровода на участке, $^{\circ}\text{C}$; dp – изменение давления в трубопроводе на участке, Па;

2) для случая незакрепленной трубы (надземные участки) (4.4):

$$dV_T = \frac{\pi \cdot D_1^2}{4} \cdot L \cdot \left[\frac{\left(\frac{5}{4} - \nu\right) \cdot D_0 \cdot dp}{t \cdot E_{\text{сталь}}} + 3 \cdot \alpha_L \cdot dT_{\text{стенка}} \right]. \quad (4.4)$$

Для надземных участков считается что трубопровод может свободно расширяться по всем направлениям, что соответствует классической задаче о расширении тонкостенного цилиндра, нагруженного внутренним давлением. Для подземных участков считается что трубопровод может расширяться только в сечении, поскольку продольные перемещения компенсируются силами трения грунта. Рассмотрим два случая: незакрепленный участок и закрепленный участок.

Случай 1. «Незакрепленный» участок трубопровода. В соответствии с теорией для модели тонкостенной трубы, продольное напряжение σ_L определяется следующим выражением (4.5):

$$\sigma_L = \frac{D}{4t} dp, \quad (4.5)$$

а окружное напряжение σ_C , возникающие под действием внутреннего давления, определяется следующим выражением (4.6):

$$\sigma_c = \frac{D}{2t} dp, \quad (4.6)$$

где dp – приращение внутреннего давления, Па; t – толщина стенки трубопровода, мм.

Продольную относительную деформацию трубы можно найти из обобщённого закона Гука (4.7):

$$\varepsilon_L = \frac{\sigma_L}{E} - \mu \frac{\sigma_c}{E}, \quad (4.7)$$

где μ – коэффициент Пуассона.

При подстановке выражения (4.5) и (4.6) в выражение (4.7) и получим следующее выражение (4.8):

$$\varepsilon_L = \frac{dpD}{2tE} \left(\frac{1}{2} - \mu \right). \quad (4.8)$$

Окружную относительную деформацию трубы можно так же найти из обобщённого закона Гука (4.9):

$$\varepsilon_c = \frac{\sigma_c}{E} - \mu \frac{\sigma_L}{E}. \quad (4.9)$$

При подстановке выражения (4.1.5) и (4.1.6) в выражение (4.1.9) было получено следующее выражение (4.10):

$$\varepsilon_c = \frac{dpD}{2tE} \left(1 - \frac{1}{2} \mu \right). \quad (4.10)$$

Изменение объёма под действием внутреннего давления (4.11):

$$\Delta V_p = \frac{\pi}{4} (D + \varepsilon_c D)^2 (L + \varepsilon_L L) - \frac{\pi D^2}{4} L. \quad (4.11)$$

При раскрытии скобок и сокращении малых величин более высокого порядка в выражении (4.9) получим следующее выражение (4.12):

$$\Delta V_p = \frac{\pi}{4} (D^2 + 2\varepsilon_c D^2 + \varepsilon_c^2 D^2) (L + \varepsilon_L L) - \frac{\pi D^2}{4} L = \frac{\pi D^2}{4} L (2\varepsilon_c + \varepsilon_L). \quad (4.12)$$

В этом случае относительное изменение объёма определяется из следующего выражения (4.13):

$$\frac{\Delta V_p}{V_1} = \frac{dpD}{4tE} \left(\frac{5}{4} - \mu \right), \quad (4.13)$$

где V_1 – начальный объём трубы, м³.

Случай 2. «Закрепленный» участок трубопровода. Изменение объёма закреплённой трубы от внутреннего давления можно выразить в виде (4.14):

$$dV_p = \frac{\pi D'^2}{4} L - \frac{\pi D^2}{4} L, \quad (4.14)$$

где dV_p – изменение объёма под действием давления, м³; D – начальный диаметр трубы, м; D' – конечный диаметр трубы, м; L – длина трубы, м.

Конечный диаметр отличается приращением δD , что означает $D' = D + \delta D$.

Из этого следует, что выражение (4.14) можно представить в следующем виде (4.15):

$$dV_p = \frac{\pi D^2}{4} L \cdot \left(1 + \frac{2 \cdot \delta D}{D} + \frac{\delta^2 D}{D^2} - 1 \right). \quad (4.15)$$

При сокращении деформации второго порядка было получено следующее выражение (4.16):

$$dV_p = \pi D L \left(\frac{\delta D}{2} \right). \quad (4.16)$$

Так как тонкостенная труба закреплена $\frac{\delta L}{L} = 0, \sigma_L = \mu \sigma_c$ получаем следующее выражение (4.17):

$$\frac{\delta D}{D} = \frac{\sigma_c(1-\mu^2)}{E}. \quad (4.17)$$

При подстановке $\frac{\delta D}{D}$ и σ_c в выражение (4.17) получится следующее выражение (4.18):

$$dV_p = \frac{\pi D L}{2} \cdot \frac{D \cdot \sigma_c(1-\mu^2)}{E} = V_1 \cdot \frac{D \cdot dp \cdot (1-\mu^2)}{t E}. \quad (4.18)$$

Таким образом, относительное изменение объёма определяется следующим выражением (4.19):

$$\frac{dV_p}{V_1} = \frac{D \cdot dp \cdot (1-\mu^2)}{t E}. \quad (4.19)$$

Получив соотношения для вычисления изменения объёма трубопровода для двух случаев, можно констатировать выполнение основной задачи по определению взаимосвязи вместимости трубопровода с термобарическими условиями [104]. Затем совмещая основное уравнение для состояния остановленного участка с уравнением для наиболее распространенного случая закрепленного трубопровода и выражая расход утечки, получаем (4.20):

$$Q_y = Q_{ж} + V_{ж} \cdot \left[\alpha_{ж} \cdot \frac{dT_{ж}}{d\tau} - K_{ж} \cdot \frac{dp}{d\tau} \right] - \frac{dV_T}{d\tau} + \frac{dV_{Г}}{d\tau}. \quad (4.20)$$

4.2 Алгоритм определения уровня заполнения трубопровода продуктом перекачки методом триангуляции

Для обеспечения получения фактических показателей коэффициента заполнения нефтепровода проведен расчет, обеспечивающий расчет напряжений между емкостными конденсаторами, установленных по окружности ортогонально продольной оси трубопровода и закрепленных на внутренней полости трубы и дающий, как следствие, корректный коэффициент заполнения трубы [101, 117].

Получая входные данные по параметрам перекачки нефти, значения напряжений данные с конденсаторов (по периметру трубопровода) строится предварительная диаграмма распределения напряжений, связывая конденсаторы с одинаковой координатой оси y .

После этого усредняются значения напряжений для соседних по вертикали пар конденсаторов для корректного отображения диаграммы.

Результат расчета представлен на рисунке 4.1.

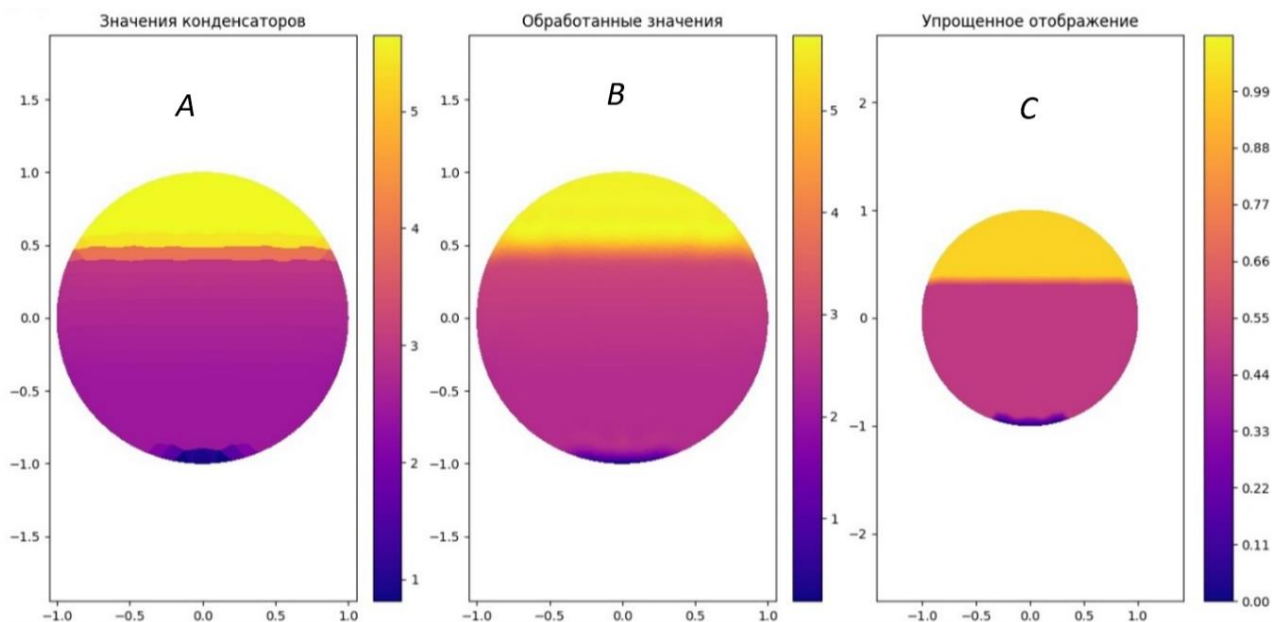


Рисунок 4.1 – Круговые диаграммы распределения напряжений с последовательным усреднением данных (составлено автором), где A - предварительная диаграмма заполнения трубопровода; B – круговая диаграмма обработанная по примера фрактальной графики, C – круговая диаграмма с отчетливыми границами раздела фаз «нефть-вода» и «нефть-воздух» [101, 117]

На рисунке 4.2 представлена структурная схема работы алгоритма расчета коэффициента заполнения трубопровода.

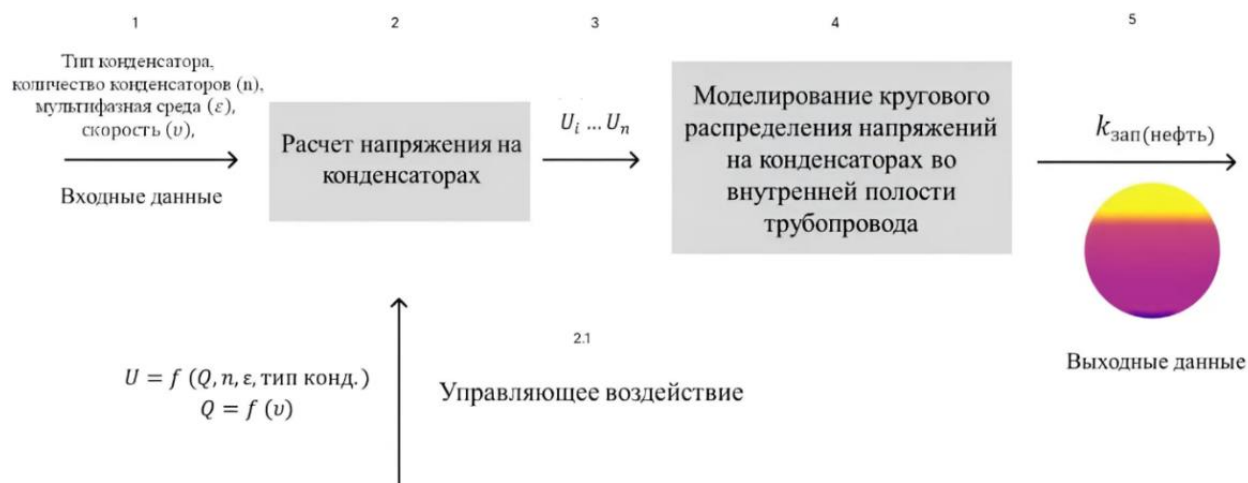


Рисунок 4.2 – Структурная схема последовательности выполнения расчета по определению коэффициента заполнения трубопровода [101,117]

Применяя метод линейной интерполяции, усредняются значения напряжений для каждой пары вышеперечисленных конденсаторов по формуле (4.21):

$$\frac{x - x_i}{x_{i+1} - x_i} = \frac{y - y_i}{y_{i+1} - y_i} \quad (4.21)$$

$$y = y_i + \frac{x - x_i}{x_{i+1} - x_i} (y_{i+1} - y_i)$$

где x_i , x_{i+1} – узлы интерполяции, y_i , y_{i+1} – значения в узлах интерполяции, y – значение при интересующем x .

Интерполяция основана на разбиении пространства между конденсаторами на n частей, n выбирается исходя из требуемой точности построения круговой диаграммы. Из-за итерационной реализации удобно искать значения y «столбиками» таким образом, что горизонтальная координата x не изменяется, а рассчитывается y . Формула интерполяции примет вид (4.22):

$$U = U_i + \frac{U_{i+1} - U_i}{n}, \quad (4.22)$$

где U – значение напряжение в интересующей точке, B ; U_i – значение напряжение между исходными конденсаторами, B ; U_{i+1} – значение напряжения между следующими конденсаторами, B ; n – количество частей.

Диаграмма строится методом треугольников (правая часть рисунка 4.3), где для каждого треугольника считается значение напряжения.

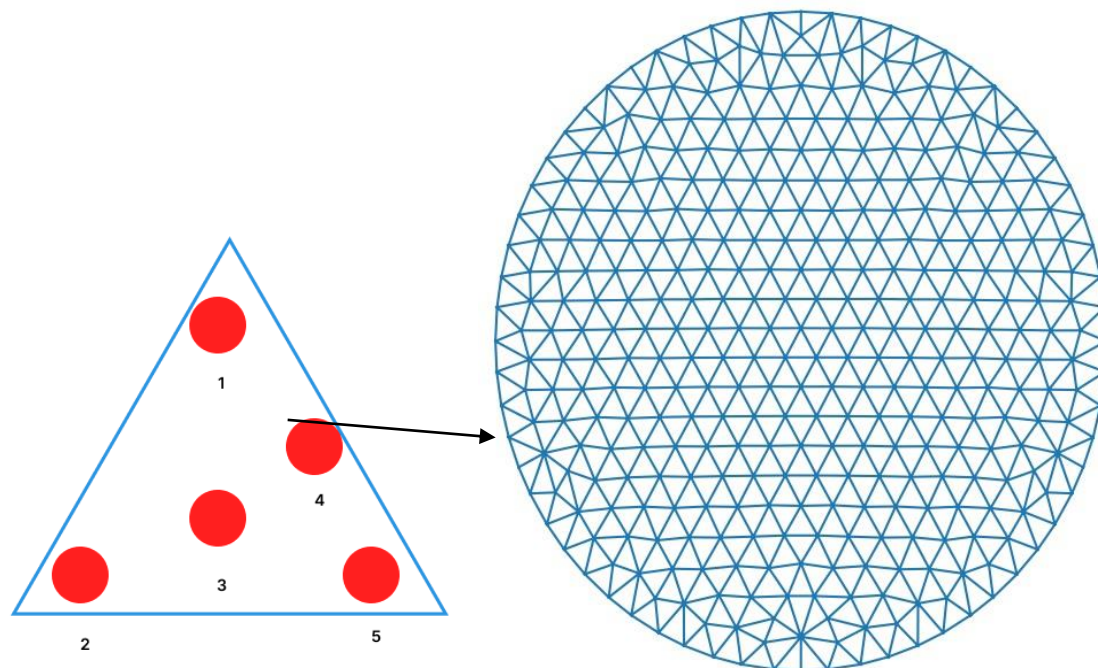


Рисунок 4.3 – Диаграмма распределения напряжений методом «треугольников»
(составлено автором)

Для этого значениям напряжения присваивались координаты x и y , которые попадали в периметр треугольников (левая часть рисунка 4.3). Рассмотрим последовательную реализацию данного метода.

Методом Ньютона-Гаусса по поиску наименьших квадратов отклонения значения напряжений, определим минимальную сумму, воспользовавшись следующей формулой (4.23):

$$S(m) = \sum_{i=1}^n [f(x_i, m) - y_i]^2, \quad (4.23)$$

где $S(m)$ – функция от нескольких переменных; $f(x_i, m)$ – скалярная функция, определяемая неизвестными параметрами; y_i – экспериментальное значение в некоторой точке; x_i – вектор экспериментальных данных; m – вектор неизвестных параметров.

Вектор m необходимо подобрать таким образом, чтобы сумма квадратов погрешностей $S(m)$ была минимальной.

По задумке диаграммы определяется вектор неизвестных m как значение скалярной функции (4.24):

$$f(x_i) = m. \quad (4.24)$$

Заключительным этапом метода треугольников является поиск решения, сводящегося к нахождению среднего арифметического значения напряжения для каждого треугольника, в роли значения функции в точке выступит значение напряжения в некоторой точке (4.25):

$$U_{\text{треуг.}} = \frac{\sum_{i=1}^n U_i}{n}, \quad (4.25)$$

где $U_{\text{треуг.}}$ – среднее напряжение в треугольнике диаграммы, В; U_i – напряжение в точке, посчитанное интерполяционным методом (точки 1-5 на рисунке 4.3), В; n – количество точек внутри треугольника.

Значения напряжений передавались в матрицу для построения диаграммы (рисунок 4.3) и соответствующие треугольники раскрашивались согласно усредненному значению напряжения в них (рисунок 4.1 А). После этого происходит разбиение треугольников на несколько более мелких, по примеру фрактальной графики (рисунок 4.1 В).

Для этого использовался метод Ньютона-Гаусса (4.24) для определения значений внутри вновь разбитых треугольников. Значения внутри треугольников представлялись в качестве вектора. Поэтому решение можно представить в виде (4.26):

$$Ax = b, \quad (4.26)$$

где A – вектор значений новых треугольников, b – вектор значения разбитого треугольника, x – вектор решений, минимизирующий отклонение A от b .

Таким образом общий вид выражения будет выглядеть следующим образом (4.27):

$$[U_1 \quad U_2 \quad \dots \quad U_n] \cdot \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \dots \\ x_n \end{bmatrix} = [U_{\text{треуг.}}]. \quad (4.27)$$

Вектор A , в данном случае, ищется перебором таким образом, чтобы приблизить значения матрицы A к b . Чтобы исключить ложные знания элементы вектора x подбирались по закону (4.28):

$$x_i = \frac{k}{n}, \quad (4.28)$$

где k – эмпирический коэффициент, подбираемый программой, n – количество элементов в векторах A , x .

Количество элементов в векторах зависит от того, какой точной требуется вывести диаграмму, так как на это количество треугольников разделится исходный треугольник. Результатом такой аппроксимации является вектор A , который присваивается полученным треугольникам.

В заключении производится расчет коэффициента заполнения геометрическим способом. Для этого известны линия раздела вода-нефть и нефть-воздух (рисунок 4.2.1 С). Выбирается участок диаграммы между ними и площадь заполнения нефтью считается как сумма площадей сегментов и секторов, входящий в эту зону (4.29):

$$S_{\text{нефть}} = \sum_{i=1}^n S_i, \quad (4.29)$$

где S_i – площадь сегмента/сектора с продуктом перекачки (нефтью), м^2 .

Рассчитать коэффициент заполнения внутритрубного пространства можно осуществить по следующему формульному соотношению (4.30):

$$k = \frac{S_{\text{нефть}}}{S_{\text{вн.сеч}}}, \quad (4.30)$$

где $S_{\text{вн.сеч}}$ – площадь внутреннего сечения трубы, м^2 .

Алгоритм расчета, приведенный в данной статье, сможет помочь определять степень заполнения тела трубы продуктом перекачки с учетом получаемых данных по контуру поперечного сечения трубопровода. Алгоритм позволит определять уровень заполнения продуктом перекачки и предварительно оценивать участок на наличие возможных утечек или незаконного отбора, верифицируя полученный результат коэффициента заполнения с значением, полученным через критериальное уравнение [101].

4.3 Рекомендации по оснащению самотечных участков магистральных трубопроводов устройствами по определению коэффициента заполнения

В целях технической реализации предложенных решений, направленных на повышение достоверности определения коэффициента заполнения на самотечных

участках трубопроводов, было рассмотрено использование известного метода электроимпедансной томографии на самотечных участках.

Принцип действия электроимпедансной томографии основан на измерении разности потенциалов между электродами, которое устанавливается в зависимости от диэлектрической проводимости среды, заполняющей внутреннюю полость трубопровода [120]. Концептуально принцип действия устройства представлен на рисунке 4.4.

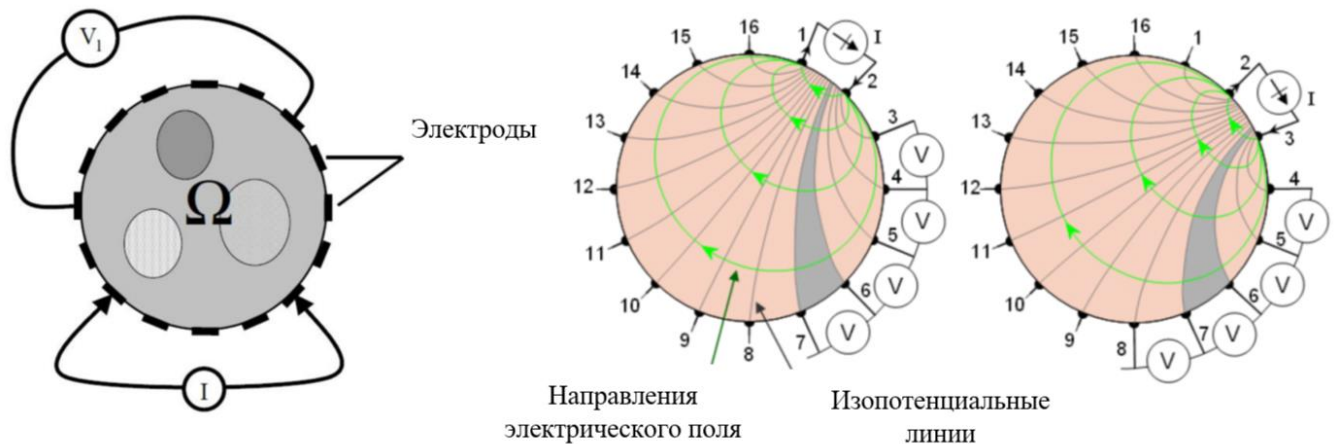


Рисунок 4.4 – Схема работы электрической импедансной томографии, где I – сила постоянного тока, А; V – измеряемое напряжение, В [120]

Однако, следует оценить возможность детектирования режимов (паттернов) течения нефти и нефтепродуктов, поскольку пустоты могут осложнять проведение процессов определения коэффициента заполнения.

По результатам серии построения моделей в программном комплексе Ansys Fluent из 8 известных в гидравлике режимов течения наиболее часто встречаемыми являются расслоеное и кольцевое течение, представленные на рисунке 4.5 [117].

Результаты моделирования позволяют сделать вывод, что использование электрической импедансной томографии возможно на некотором удалении от перевальной точки ввиду необходимости установления потока перекачки без проявления вторичных признаков, как на рисунке 4.6 при кольцевом режиме перекачки.

Одним из удобных в реализации решений является кольцо электродов. Для проверки гипотезы о возможности использования электрической импедансной

томографии следует воспроизвести известное решение, представленное в открытом доступе для свободного использования [120]. Место установки данного кольца и управляющей платы на самотечном участке трубопровода приведен на раннем эскизе экспериментального стенда на рисунке 4.6.

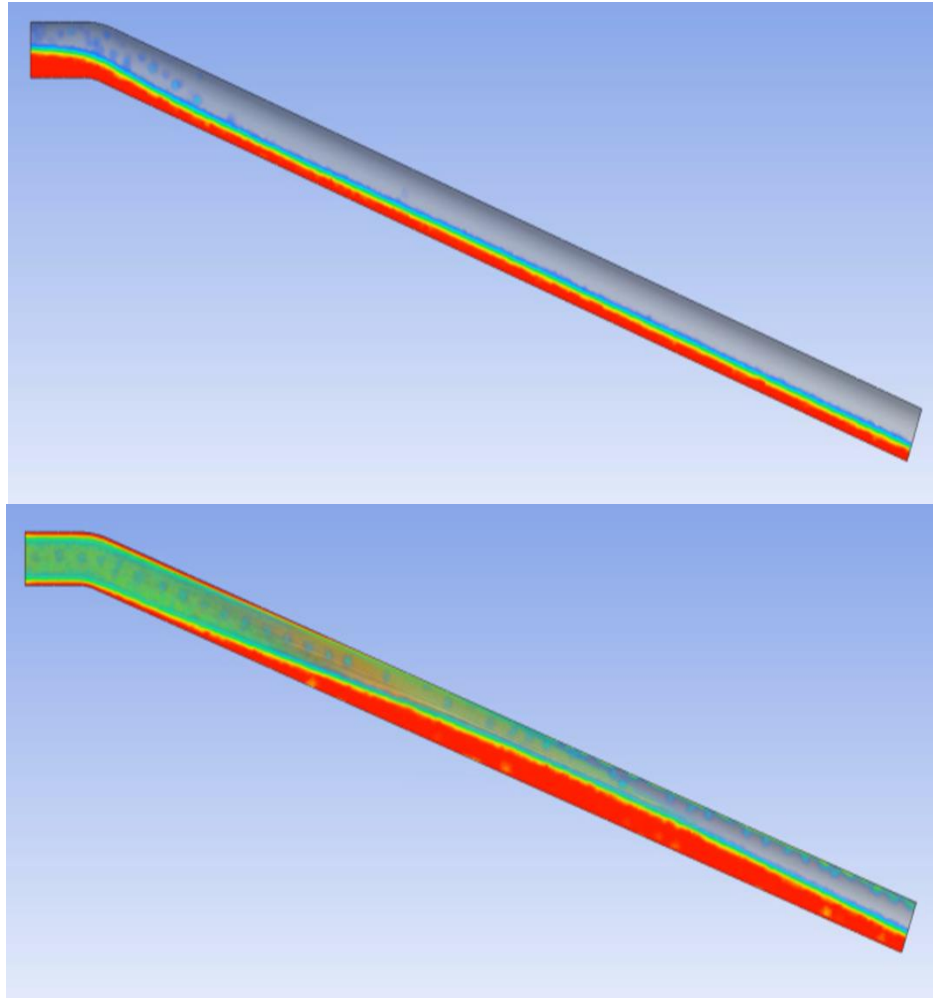


Рисунок 4.5 – Расслоеное (сверху) и кольцевое (снизу) течение на самотечном участке трубопровода в программном комплексе Ansys Fluent
(составлено автором)

Данное кольцо для измерения емкостных свойств перекачиваемой жидкости рационально устанавливать непосредственно на самотечный участок на этапе сооружения линейной части магистрального нефтепровода и/или нефтепродуктопровода с некоторым отступом от перевальной точки ввиду необходимости установления стабильности потока. Пример расположения предложен на рисунке 4.6.

Управляющая плата выполнена в многослойном виде. В целях аппаратного воплощения устройства предложено схмотехническое решение по печатной плате приведенной на рисунке 4.7.

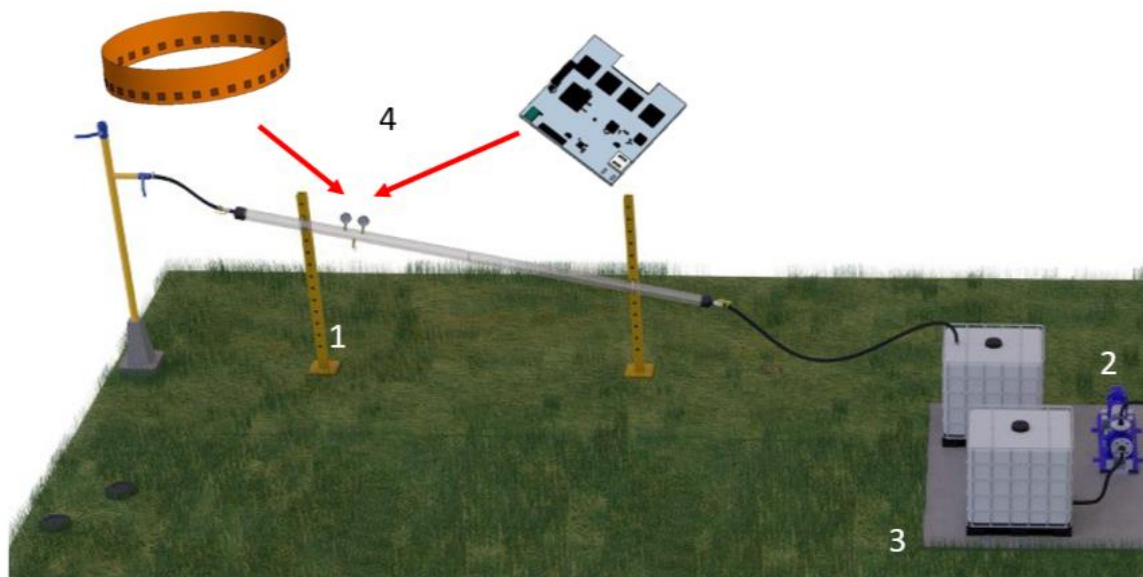


Рисунок 4.6 – Эскиз экспериментального стенда с самотечным участком, где 1 – самотечный участок; 2 – насос для перекачки жидкости; 3 – емкости для хранения жидкости, 4 – кольцо конденсаторов и управляющая плата [100]

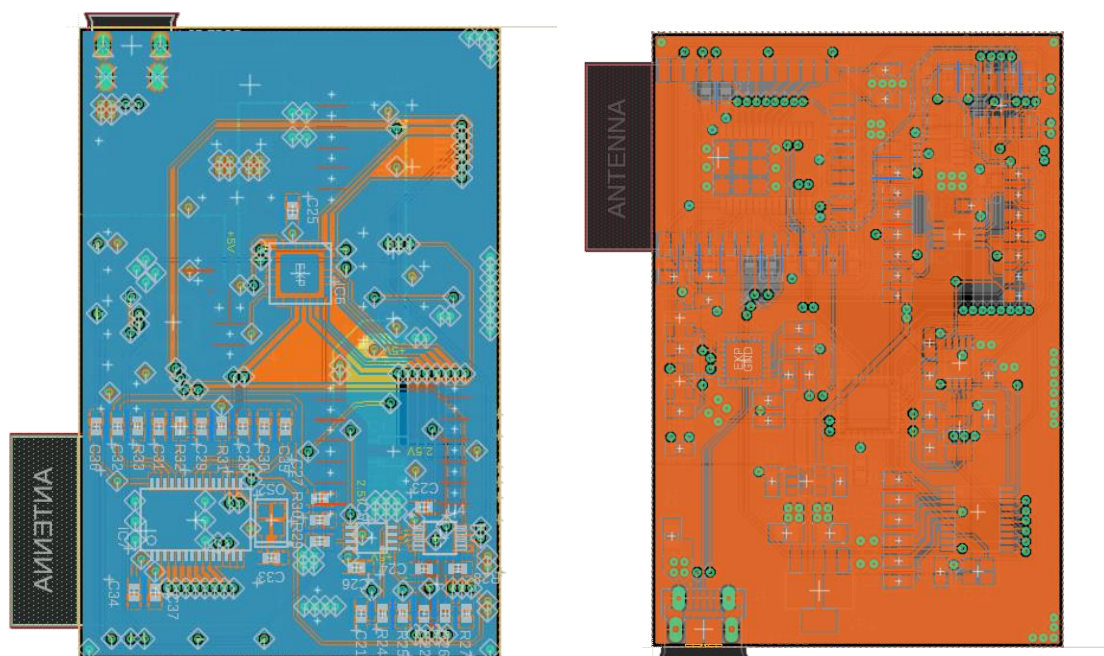


Рисунок 4.7 – Разведенная схема печатной платы (PCB layout) (синяя схема – левая сторона платы, оранжевая схема – правая сторона платы)

(составлено автором)

После того, как плата была создана на заводе-изготовителе, следующим этапом следует приступить к реализации комплексного технического решения. На рисунках 4.8 – 4.9 приведено разработанное техническое решение по плате устройства и его реализация.

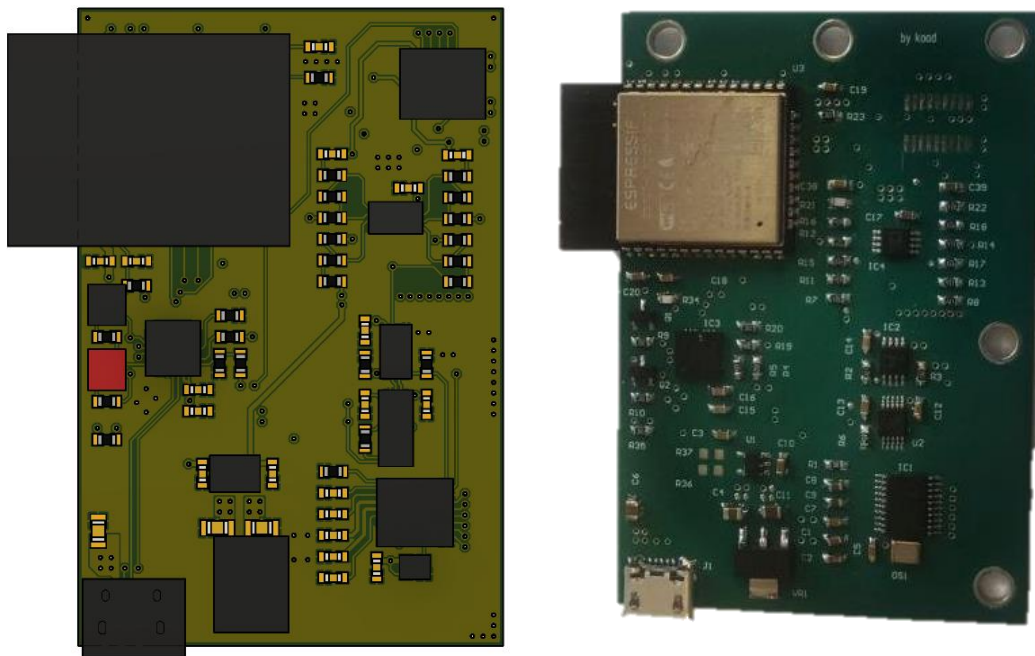


Рисунок 4.8 – Техническое решение по плате устройства, левая сторона платы (слева – 3-D модель, справа – плата в собранном состоянии) (составлено автором)

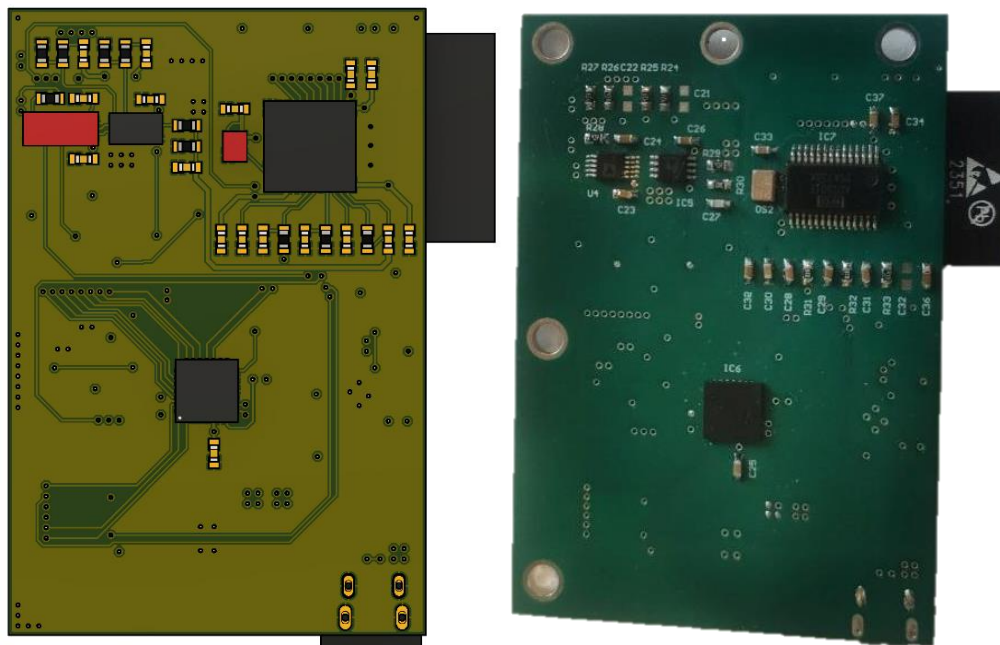


Рисунок 4.9 – Техническое решение по плате устройства, правая сторона платы (слева – 3-D модель, справа – плата в собранном состоянии) (составлено автором)

В рамках конструкторской проработки разработана система выносных электродов, подключаемых к устройству. Укомплектованное данной системой устройство (в сборе) приведено на рисунке 4.10 – 4.11.

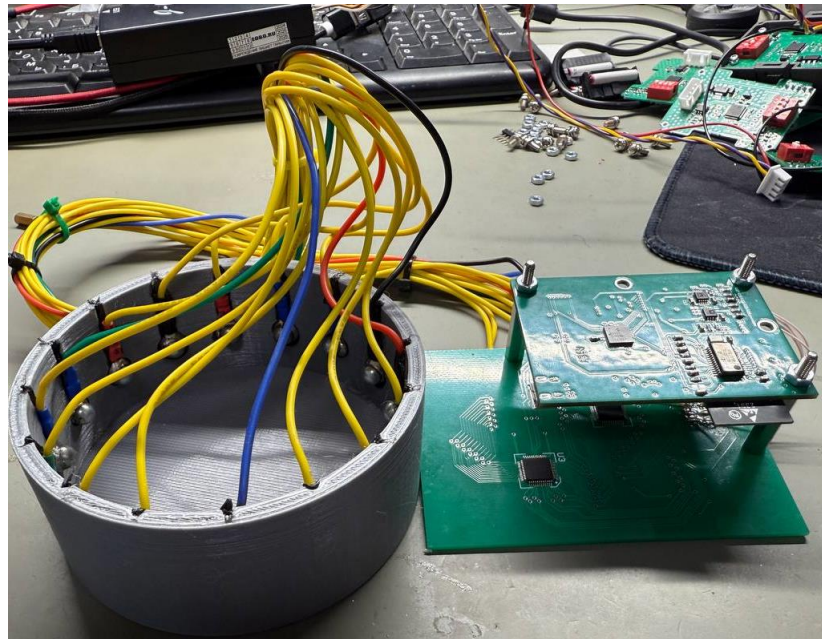


Рисунок 4.10 – Укомплектованное устройство с кольцом электродов (слева) и управляющей платой (справа) (фото автора)

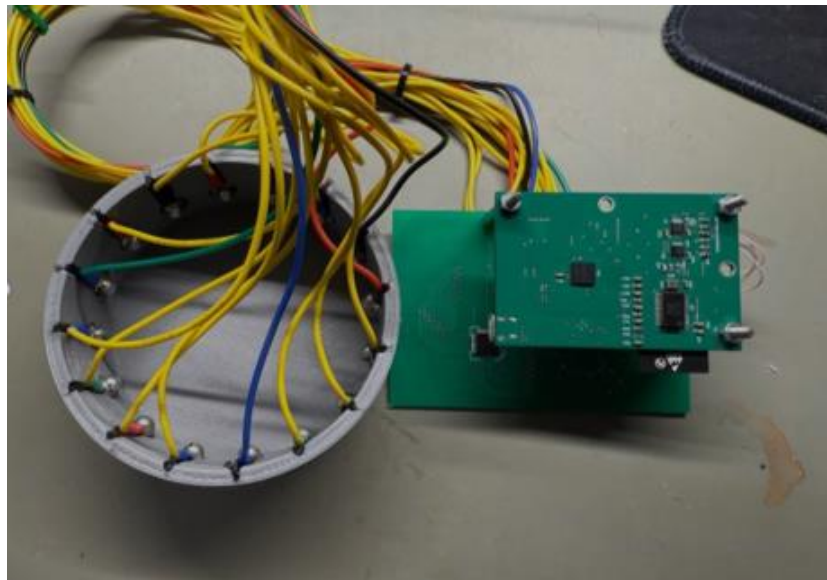


Рисунок 4.11 – Укомплектованное устройство с кольцом электродов (слева) и управляющей платой (справа) (фото автора)

Тестирование работы данного устройства было осуществлено в рамках постановки и проведения эксперимента в Главе 3 и показало удовлетворительную сходимость с полученными результатами.

С целью оценки работы платы и проверки работоспособности разработанной программы для ЭВМ для данной платы [102], был проведен сравнительный расчет для 4 известных значениях коэффициента заполнения самотечного участка экспериментального стенда на различных режимах работы.

Для каждого ряда измерений были получены средние квадратичные отклонения S (1), которые позволяют оценить степень расхождений между методами (4.31):

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (4.31)$$

где x_i – результат единичного i измерения, $\bar{x}$ – среднее арифметическое значение n измерений.

Расчет S -отклонения для каждого типа трубы приведены в таблице 4.1

Таблица 4.1 – S -отклонения для каждого типа трубы (по данным автора)

Коэффициент заполнения, см	S -отклонение
2,9	0,0511
3,75	0,0485
4,9	0,0336
5,7	0,0272

Как видно из таблицы, лучше всего сходятся результаты с высоким коэффициентом заполнения.

Для более объективного сравнения результатов, полученных на экспериментальном стенде с использованием программы для ЭВМ [Приложение А], была проведена количественная оценка их согласованности. В качестве метрики выбран коэффициент детерминации (R^2), позволяющий определить степень совпадения между двумя наборами числовых значений, представлена формулой (4.32):

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \hat{x}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (4.32)$$

где x_i – результат единичного i измерения по существующей методике, $\hat{x}_i$ – результат единичного измерения по программе ЭВМ, $\bar{x}$ – среднее арифметическое значение n измерений.

Полученное значение коэффициента детерминации составило $R^2=0,968$ (близкое к 1), что указывает на почти полное совпадение между результатами, полученными по расчетным значениям и результатами собственного расчета.

4.4 Выводы по четвертой главе

1. Изменение объема газовых скоплений, температурный фактор, изменение сжимаемости – маскируют эффект утечки на самотечном участке. Поскольку полученное уравнение (4.20) не учитывает изменение температуры по сечению трубы и темп остывания на различных участках, идентификацию утечек надо проводить как можно в более короткое время.

2. С целью идентификации утечки в остановленном трубопроводе логично разбивать процесс на фазу поднятия давления путем закачки фиксированного объема продукта, фазу стабилизации, и фазу отбора фиксированного объема продукта. Полученная кривая «гистерезиса» позволит по результатам регистрации фактических трендов изменения давления и температуры оценить объем расхода утечки.

3. Предложено использование электрической импедансной томографии и разработанного автором алгоритма определения уровня заполнения трубопровода продуктом перекачки для прямого определения уровня заполнения самотечного участка. Вопрос о рациональной степени оснащенности линейной части устройствами измерения остается темой перспективных исследований.

4. Предложена последовательность расчета влияния термобарических параметров на геометрическую вместимость тела трубы для «закрепленного» и «незакрепленного» самотечных участков.

5. Полученные рекомендации по расчету уровня заполнения самотечных участков нефтепроводов и нефтепродуктопроводов использованы на предприятии ООО «ЗНГО-Импульс» в гидромеханическом модуле расчета коэффициента заполнения и внедрены в практику проектной деятельности ОАО «Сибнефтетранспроект» (Приложение Б, Приложение В).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации предложены новые научно-технологические решения для развития товарно-транспортных операций в области перекачки нефти и нефтепродуктов трубопроводным транспортом, направленные на уточнения определения коэффициента заполнения на самотечных участках с учётом физико-химических свойств перекачиваемого продукта и режимных параметров эксплуатации через использование критериев подобия.

В рамках выполнения диссертационной работы достигнуты следующие основные результаты:

1. Выполнен анализ современной теории и практики функционирования самотёчных участков магистральных нефте- и нефтепродуктопроводов, позволивший установить резервы по повышению точности количественного учета нефти и нефтепродуктов на самотечных участках трубопроводов;

2. Разработана гидравлическая модель для расчета коэффициента заполнения, учитывающая свойства перекачиваемого продукта и режимных параметров перекачки;

3. Разработана конструкция экспериментального стенда, спланированы и проведены эксперименты в рамках апробации полученной модели. Проведенные эксперименты показали убедительную сходимость предложенного уравнения с экспериментальными данными (в пределах 15,76%) и появление предсказанных в рамках диссертации гидравлических эффектов;

4. Предложен перечень рекомендаций по совершенствованию расчёта самотечных участков для нефте- нефтепродуктопроводов и технических решений, направленных на их реализацию.

Перспективой дальнейших исследований является аппаратное воплощение предложенных рекомендаций по оснащению линейной части приборами/устройствами, в том числе с использованием емкостной и электроимпедансной томографии. Актуальным также остается интеграция решений в системы диспетчерского управления потоками перекачки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Арбузов, Н.С. Защита морских терминалов от гидроударов путем создания в трубопроводах самотечных участков / Н.С. Арбузов // Нефтяное хозяйство. – 2011. – № 4. – С. 129-131.
2. Арбузов, Н.С. Теория и расчет систем защиты морских нефтеналивных терминалов от гидравлических ударов : специальность 25.00.19 «Строительство и эксплуатация нефтегазопроводов, баз и хранилищ» : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Арбузов Николай Сергеевич. – Москва, 2011. – 23 с.
3. Архангельский, В.А. Расчеты неустановившегося течения в открытых водотоках. М.: АН СССР, 1947. 136 с.
4. Бакеева, Л.В. Математика. Элементы математической статистики. Корреляционно-регрессионный анализ: Методические указания для выполнения расчетных заданий / Санкт-Петербургский горный университет. Сост.: Л.В. Бакеева, Е.В. Пастухова, СПб, 2019. 42 с.
5. Бахтизин, Р.Н. Моделирование и алгоритмы гидравлического расчета стационарного режима работы нефтепродуктопроводных систем / Р.Н. Бахтизин, А.Н. Пирогов, А.М. Нечваль, Н.Е. Пирогов, Л.В. Сухарников // Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья. – 2018. – № 3. – С. 27-31. – DOI 10.24411/0131-4270-2018-10302.
6. Бурчаков, В.В. Количественный учет нефтепродуктов на самотечных участках трубопроводов / В.В. Бурчаков // НТС «Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья». – М.: ЦНИИИТЭнефтехим, 1987. – № 5. – С. 17-18.
7. Быков, Л.И. Типовые расчёты при сооружении и ремонте газонефтепроводов : учебное пособие / под общ. ред. Л. И. Быкова. — 2 е изд. — Уфа : УГНТУ, 2015. — 324 с.
8. Валиев, М.И. Метод моделирования стационарных течений в трубопроводных сетях при наличии парогазовых полостей / М. И. Валиев, А. В. Ковардаков, А. Л. Лаптев, И.А. Бенидовский, Н.Р. Гульмутдинов // Наука и

технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2015. – № 4(20). – С. 96-99.

9. Васильев, Б.Ю. Метод построения цифровой модели рельефа с применением интерполяции на основе теории полюсов и алгоритма Хука-Дживса : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Васильев Богдан Юрьевич. – Санкт-Петербург, 2024. – 158 с.

10. Воронов, А.Г. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019619910 Российская Федерация. Модуль идентификации участков ЛЧ МН с неполным сечением и динамики их поведения : № 2019618659 : заявл. 16.07.2019 : опубл. 26.07.2019 / А.Г. Воронов, И.С. Симонов, И.А. Бенидовский [и др.] ; заявитель ПАО «Транснефть», АО «Транснефть-Верхняя Волга», ООО «НИИ Транснефть».

11. Галлямов, А.К. Влияние скоплений воды и газа на эксплуатационные характеристики магистральных трубопроводов/А.К. Галлямов, В.Е. Губин // Транспорт и хранение нефти и нефтепродуктов. НТО – М.: ВНИИОЭНГ, 1970. – 43с.

12. Гафаров, Н.А. Комплексная природоохранная технология сбора, промысловой подготовки и транспорта сероводородсодержащих газов : специальность 05.15.06 : автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук / Гафаров Наиль Анатольевич. – Москва, 2000. – 48 с.

13. Годовой отчет ПАО «Транснефть» за 2023 год // ПАО «Транснефть» : [официальный сайт]. – 2024. – 21 мая. – URL: https://транснефть.рф/upload/iblock/1c8/r7mg0k0712p4hx12ezisn7e5keglhsgq/2024.05.21_GO_2023.pdf (дата обращения 04.03.2026).

14. Годовой отчет ПАО «Транснефть» за 2024 год // ПАО «Транснефть» : [официальный сайт]. – 2025. – 27 июня. – URL: https://tt.transneft.ru/upload/iblock/294/yrd0hxuizjbryh5rrf8w7w72aw11ahvg/2025.06.27_GO_2024.pdf (дата обращения 04.03.2026).

15. Голунов, Н.Н. Развитие научно-методических основ применения противотурбулентных присадок для транспорта нефти и нефтепродуктов по

магистральным трубопроводам : специальность 25.00.19 «Строительство и эксплуатация нефтегазопроводов, баз и хранилищ» : диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Н. Н. Голунов. – Уфа, 2024. – 296 с.68

16. ГОСТ 19300–86. Средства измерений шероховатости поверхности профильным методом. Профилографы-профилометры контактные. Типы и основные параметры. — Введ. 1987-07-01. — М.: Стандартиформ, 1987. — 7 с.

17. ГОСТ 2789–73. Шероховатость поверхности. Параметры и характеристики. — Введ. 1975-01-01. — М.: Стандартиформ, 2017. — 7 с.

18. ГОСТ 32511–2013. Топливо дизельное ЕВРО. Технические условия. — Введ. 2015-01-01. — М.: Стандартиформ, 2015. — 21 с.

19. ГОСТ 7502-98. Рулетки измерительные металлические. Технические условия. — М. : Стандартиформ, 2000. — 11 с.

20. ГОСТ 8.321–2013. Государственная система обеспечения единства измерений. Уровнемеры промышленного применения. Методика поверки. — Введ. 2015-07-01. — М.: Стандартиформ, 2015. — 21 с.

21. ГОСТ Р 51232–98. Вода питьевая. Общие требования к организации и методам контроля качества. — Введ. 1999-07-01. — М.: ИПК Издательство стандартов, 1999. — 21 с.

22. ГОСТ Р 52620–2006. Тара транспортная полимерная. Общие технические условия. — Введ. 2008-01-01. — М.: Стандартиформ, 2008. — 45 с.

23. ГОСТ Р 55724–2013. Контроль неразрушающий. Соединения сварные. Методы ультразвуковые. — Введ. 2015-07-01. — М.: Стандартиформ, 2015. — 20 с.

24. ГОСТ Р 55725–2013. Контроль неразрушающий. Преобразователи ультразвуковые пьезоэлектрические. Общие технические требования. — Введ. 2015-07-01. — М.: Стандартиформ, 2015. — 16 с.

25. ГОСТ Р 8.1026–2023. Государственная система обеспечения единства измерений. Преобразователи расхода турбинные, расходомеры турбинные, счётчики жидкости турбинные. Методика поверки. — Введ. 2023-08-01. — М.: Российский институт стандартизации, 2023. — 32 с.

26. ГОСТ 8.587–2019. Государственная система обеспечения единства измерений. Масса нефти и нефтепродуктов. Методики (методы) измерений. — Введ. 2020-04-30. — М.: Стандартиформ, 2019. — 28 с.

27. Государственный доклад о состоянии и использовании минерально-сырьевых ресурсов Российской Федерации в 2024 году // Министерство природных ресурсов и экологии Российской Федерации : [официальный сайт]. — 2025. — 15 апреля. — URL: https://www.mnr.gov.ru/docs/gosudarstvennye_doklady/o_sostoyanii_i_ispolzovanii_mineralno_syrevykh_resursov_rossiyskoy_federatsii/ (дата обращения: 10.04.2026).

28. Гривач, А.И. Переориентация экспорта российских углеводородов на новые рынки: вызовы и перспективы / А.И. Гривач, И.В. Юшков // Проблемы национальной стратегии. — 2025. — № 3(90). — С. 206-231. — DOI 10.52311/2079-3359_2025_3_206.

29. Громека, И.С. О скорости распространения волнообразного движения жидкостей в упругих трубах // Собр. соч. М.: Изд-во АН СССР. 1952. — с.172-183.

30. Губин, В.Е. Трубопроводный транспорт нефти и нефтепродуктов / В.Е. Губин, В.В. Губин. — М.: Недра, 1982. — 296 с.

31. Галиуллин, М.М. Изменение температуры нагретой жидкости по длине трубопровода в режиме заполнения / М.М. Галиуллин, А.Р. Валеев, М.И. Баязитов [и др.] // Нефтегазовое дело. — 2016. — Т. 14, № 1. — с. 100-105.

32. Дидковская, А.С. Предотвращение технологических осложнений последовательной перекачки нефтепродуктов в условиях неполной загрузки трубопроводов : автореферат дис. ... кандидата технических наук : 05.15.13 / Российский государственный университет нефти и газа. — Москва, 1998. — 28 с.

33. Дидковская, А.С. Метод расчета переходных процессов, сопровождаемых образованием парогазовых полостей / А.С. Дидковская // Территория Нефтегаз. — 2019. — № 6. — С. 72-76.

34. Жолобов, В.В. Распределение объема водных скоплений в профильном нефтепроводе / В.В. Жолобов, В.Ю. Морецкий, Р.Ф. Талипов //

Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2022. – Т. 12. – № 5. – С. 438-451.

35. Ишмухаметов, И.Т. Трубопроводный транспорт нефтепродуктов / И.Т. Ишмухаметов, С.Л. Исаев, М.В. Лурье, С.П. Макаров. – М. : Нефть и газ, 1999. – 300 с.

36. Корнилов, Г.Г. Изменение средней скорости и отношения H/d при движении жидкостей на самотечных участках (СУ) / Г.Г. Корнилов, А.П. Кутыршин // ИПТЭР. – 1971. – С. 15-23.

37. Коробков, Г.Е. Движение нефтей и нефтепродуктов в трубопроводах незаполненным сечением : специальность 25.00.19 «Строительство и эксплуатация нефтегазопроводов, баз и хранилищ» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Коробков Геннадий Евгеньевич. – Уфа, 1971. – 167 с.

38. Коршак, А.А. К вопросу о выносе скоплений воды потоком перекачиваемой жидкости / А.А. Коршак // Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. 2018. № 6 (116). С. 90-98. DOI: 10.17122/ntjoil-2018-6-90-98.

39. Коршак, А.А. Ресурсосберегающие методы и технологии при транспортировке и хранении нефти и нефтепродуктов. – Уфа: ДизайнПолиграфСервис. – 2006. – 192 с.

40. 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.

41. Коршак, А.А. Патент № 2484358 С1 Российская Федерация, МПК F16L 55/24, B08B 3/12, B08B 9/02. устройство для устранения скоплений жидкости или газа из проблемных участков газонефтепроводов : № 2011151954/06 : заявл. 19.12.2011 : опубл. 10.06.2013 / А.А. Коршак, М.Е. Усольцев, В.В. Пшенин, С.В. Самоленков ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего

профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный горный университет».

42. Кутуков, С.Е. Разработка методов функциональной диагностики технологических режимов эксплуатации магистральных нефтепроводов : специальность 25.00.19 «Строительство и эксплуатация нефтегазопроводов, баз и хранилищ» : диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Кутуков Сергей Евгеньевич. – Уфа, 2003. – 391 с.

43. Кутуков, С.Е. Формирование самотечного участка в магистральном трубопроводе / С.Е. Кутуков, В.Ю. Морецкий, В.В. Жолобов, О.В. Четверткова // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2024. – Т. 14, № 5. – С. 400-410. – DOI 10.28999/2541-9595-2024-14-5-400-410.

44. Кутуков, С.Е. Характеристика участка нефтепровода со скоплением воды / С.Е. Кутуков, С.Г. Бажайкин, Г.Р. Мухаметшин // Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2016. – № 4 (106). – С. 118-125.

45. Лурье, М.В. Итерационный алгоритм гидравлического расчета установившихся режимов работы магистральных нефтепроводов / М.В. Лурье, А.С. Дидковская // Территория Нефтегаз. – 2013. – № 3. – С. 74-79.

46. Лурье, М.В. Математическое моделирование процессов трубопроводного транспорта углеводородов. -М.: ГУП Изд-во «Нефть и газ» РГУ нефти и газа имени И.М. Губкина, 2002. – С. 128-156.

47. Лурье, М.В. Удаление скоплений воды из трубопровода потоком перекачиваемой нефти / М.В. Лурье // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2017. – Т. 7. – № 1. – С. 62-69.

48. Лурье, М.В. Задачник по трубопроводному транспорту нефти, нефтепродуктов и газа / М.В. Лурье. – Москва : ООО «Недра – Бизнес-центр», 2003. – 349 с.

49. Лурье, М.В. Математическое моделирование процессов трубопроводного транспорта нефти, нефтепродуктов и газа / М.В. Лурье. – Москва : РГУ нефти и газа имени И.М. Губкина, 2012. – 456 с.

50. Лурье, М.В. Метод расчета переходных процессов в нефтепроводах с возможным образованием и исчезновением парогазовых полостей / М.В. Лурье // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2011. – № 4. – С. 58-63.

51. Лурье, М.В. Расчет заполнения жидкостью участка рельефного нефтепровода / М.В. Лурье, А.С. Дидковская, Н.С. Арбузов // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2013. – № 4(12). – С. 32-35.

52. Лурье, М.В. Теоретические основы трубопроводного транспорта нефти, нефтепродуктов и газа : Учебник / М.В. Лурье. – Москва : Издательство «Недра», 2017. – 477 с.

53. Маркова, Е.В. Комбинаторные планы в задачах многофакторного эксперимента / Е.В. Маркова, А.В. Лисенков. – Москва : Федеральное государственное унитарное предприятие «Академический научно-издательский, производственно-полиграфический и книгораспространительский центр «Наука», 1979. – 345 с.

54. Меренков, А.П. Теория гидравлических цепей / А.П. Меренков, В.Я. Хасилев, В.Г. Сидлер [и др.] ; Сибирский энергетический институт СО АН СССР; Ответственный редактор: д.т.н. М.Г.Сухарев. – Москва : Федеральное государственное унитарное предприятие «Академический научно-издательский, производственно-полиграфический и книгораспространительский центр «Наука», 1985. – 280 с.

55. МИ 3275-2016. Государственная система обеспечения единства измерений. Метрологическое обеспечение учёта нефтепродуктов при их транспортировке по системе магистральных нефтепродуктопроводов. Основные положения. — Введ. 2016-10-28. — М.: [ПАО «Транснефть»], 2016. — 84 с.

56. МИ 3533-2015. Государственная система обеспечения единства измерений. Методика расчёта массы нефтепродуктов в трубопроводах линейной части магистральных нефтепродуктопроводов. — Введ. 2015-06-01. — М.: [ПАО «Транснефть»], 2015. — 79 с.

57. Михайлов, Д.А. О расчетной схеме течения нефти за перевальной точкой / Д.А. Михайлов, А.А. Гольянов, А.И. Гольянов // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2013. – №1. – С. 17.

58. Михайлов, Д.А. Анализ результатов исследований и нормативной базы по эксплуатации магистральных трубопроводов с перевальными точками / Д.А. Михайлов, А.А. Гольянов, А.И. Гольянов // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2012. – № 3(7). – С. 64-71.

59. Михайлов, Д.А. О распределении напора насосных перекачивающих станций, оборудованных насосными агрегатами с частотно регулируемым приводом / Д.А. Михайлов, А.И. Гольянов // Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья. – 2011. – № 1. – С. 6-8.

60. Модульный ультразвуковой расходомер TUF-2000M [Электронный ресурс] // Datchiki.com : сайт компании. — URL: <https://datchiki.com/product/tuf-2000m-modulnyj-ultrazvukovoj-raskhodomer/?ysclid=mp5eczku9d39162633> (дата обращения: 13.04.2026).

61. Моргунов, А.П. Планирование и анализ результатов эксперимента : учеб. пособие / А.П. Моргунов, И.В. Ревина ; Минобрнауки России, ОмГТУ. – Омск : Изд-во ОмГТУ, 2014. – 344 с.

62. Незаконные врезки – основной фактор преступного вмешательства в деятельность магистральных трубопроводов // ПАО «Траснефть». – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://транснефть.рф/media-center/newspress/publications/nezakonnye-vrezki-osnovnoy-faktor-prestupnogo-vmeshatelstva-v-deyatelnost-magistralnykh-truboprovodo/> (дата обращения 09.02.2026).

63. Нелинейное оценивание [Электронный ресурс] // lib.uni-dubna.ru : электронный ресурс. — URL: <https://lib.uni-dubna.ru/search/files/statistica/modules/stnonlin.html> (дата обращения 14.03.2026).

64. Низамутдинов, Р.И. Метод контроля целостности магистральных нефтепроводов без самотечных участков на основе гидродинамической волновой

теории : специальность 05.11.13 «Приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Низамутдинов Руслан Ильдарович. – Санкт-Петербург, 2017. – 116 с.

65. Николаев, А.К. Рекомендации по повышению эффективности эксплуатации трубопроводов, транспортирующих высоковязкую нефть / А.К. Николаев, Н.А. Зарипова, В.В. Пшенин // Международный научно-исследовательский журнал. – 2021. – № 9-1(111). – С. 138-143. – DOI 10.23670/IRJ.2021.9.111.022.

66. Нугманова, Н.И. Особенности гидравлического расчёта простого трубопровода с самотечными участками / Н.И. Нугманова, К.А. Игликова, Д.Ф. Ишкильдина, Ю.О. Танашевич // Фундаментальные и прикладные исследования в науке и образовании: сборник статей Международной научно-практической конференции, Новосибирск, 25 января 2020 года. Том Часть 1. – Новосибирск: Общество с ограниченной ответственностью «Аэтерна», 2020. – С. 28-29.

67. Орлов, В.А. Гидравлические исследования и расчет самотечных трубопроводов из различных материалов / В.А. Орлов // Водоснабжение и санитарная техника. – 2008. – № 8. – С. 45-50.

68. Орлов, В.А. Разработка методики и автоматизированной программы определения коэффициента Шези s и относительной шероховатости n для исследований безнапорных трубопроводов / В. А. Орлов, С. П. Зоткин, Е. В. Орлов, Р.Е. Хургин, А.В. Малеева // Вестник МГСУ. – 2012. – № 3. – С. 205-210.

69. РД-35.240.50-КТН-0109-23. Автоматизация и телемеханизация технологического оборудования площадочных и линейных объектов. Основные положения. — Введ. 2023-09-01. — М.: [ПАО «Транснефть»], 2023. — 571 с.

70. Павловский, Н.Н. Гидравлический справочник. – М. ; Л., ОНТИ, 1937. – 890 с.

71. Палий, И.А. Прикладная статистика: Учебное пособие для вузов – М.: Высшая школа, 2004. – 176 с.

72. Панахов, Г.М. Влияние газовыделения на гидравлические характеристики течения жидкости в трубопроводе / Г.М Панахов, Э.М. Аббасов, В.Г. Гусейнов, П.Т. Мусеибли // Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья. – 2015. – № 2. – С. 19-22.

73. Пашковский, И.О. Российский рынок энергоносителей в современных условиях санкционного давления / И.О. Пашковский // Экономика и бизнес: теория и практика. – 2023. – № 5-2(99). – С. 201-204. – DOI 10.24412/2411-0450-2023-5-2-201-204.

74. Планирование эксперимента [Электронный ресурс] // lib.uni-dubna.ru : электронный ресурс. – URL: <https://lib.uni-dubna.ru/search/files/statistica/modules/stexdes.html> (дата обращения 14.03.2026).

75. Постановление Правительства Российской Федерации от 16 мая 2014 г. №451 «Об утверждении Правил учёта нефти» (с изменениями и дополнениями от 17 октября 2022 г.).

76. Р 50.2.040–2004. Метрологическое обеспечение учёта нефти при её транспортировке по системе магистральных нефтепроводов. Основные положения. — Введ. 2005-01-01. — М.: ФГУП «ВНИИР», 2005. — 45 с.

77. Расходомер ультразвуковой Streamlux SLS 700P [Электронный ресурс] // Pribor S.ru : официальный сайт компании. — URL: https://www.pribor-s.ru/opisanie/streamlux-sls-700p?utm_medium=organic&utm_source=yandexsmartcamera (дата обращения: 13.04.2026).

78. Рахматуллин, Ш.И. К оценке динамического баланса объемов нефти в трубопроводе с самотечными участками / Ш.И. Рахматуллин, Г.А. Гумерова, В.В. Ванифатова // Трубопроводный транспорт нефти – 2001. – №3. – С. 24-27.

79. Рахматуллин, Ш.И. Метод диагностирования утечек нефти из трубопровода с самотечными участками / Ш.И. Рахматуллин, В.Г. Карамышев, Р.У. Баямирова // Нефть. Газ. Новации. – 2012. – № 9(164). – С. 52-55.

80. Рахматуллин, Ш.И. Особенности диагностирования утечек нефти в трубопроводах с самотечными участками / Ш.И. Рахматуллин, В.Г. Карамышев, Р.У. Баямирова // Нефть. Газ. Новации. – 2012. – № 9(164). – С. 56-59.

81. РД 153-39.4-056-00. Правила технической эксплуатации магистральных нефтепроводов. — Введ. 2001-01-01. — М.: ИПТЭР, 2000. — 184 с. — Утверждён приказом Министерства энергетики Российской Федерации от 03.10.2000 № 93.

82. РД-19.100.00-КТН-398-09. Методика расчётов заполнения самотечных участков трубопровода нефтью и технические предложения по обеспечению сохранения информации при пропуске ВВП на самотечных участках. — Введ. 2010-03-01. — М.: ОАО «АК «Транснефть», 2009. — 52 с.

83. Руководство по эксплуатации SLS720F [Электронный ресурс] // SL Solutions : официальный сайт компании. — 2020. — URL: https://sls.prosolution.ru/wpcontent/uploads/2020/12/re_sls720f_noyabr.pdf (дата обращения: 13.04.2026).

84. Самотечные участки и перевальные точки // ПАО «Транснефть». — [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://discoverrussia.interfax.ru/wiki/49/> (дата обращения 04.02.2026).

85. Сунагатуллин, Р.З. К вопросу вычисления объема паровой полости на самотечном участке трубопровода / Р.З. Сунагатуллин, В.В. Жолобов, А.И. Гольянов // Нефтегазовое дело. – 2016. – Т. 14, № 3. – С. 116-123.

86. Сунагатуллин, Р.З. Способ контроля баланса нефти при квазинестационарных режимах работы участка нефтепровода с безнапорным течением / Р.З. Сунагатуллин, А.М. Чионов, С.В. Петренко // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2021. – Т. 11, № 1. – С. 40-45. – DOI 10.28999/2541-9595-2021-11-1-40-45.

87. Схема и принцип действия центробежного насоса [Электронный ресурс] // Life Styling.ru : информационный портал. — URL: <https://life-styling.ru/shema-i-princip-dejstviya-centrobezhnogo-nasosa> (дата обращения: 24.03.2026).

88. Тажигулов, А.М. Методика расчета количества нефти на самотечных участках трубопровода с учетом ее вязкости / А.М Тажигулов, Ш.И. Рахматуллин // Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2007. – № 4(70). – С. 49-54.

89. Тажигулов, А.М. Определение количества вязкой жидкости на самотечном участке трубопровода и опорожнение аварийного участка от нефтепродукта / А.М Тажигулов, Ш.И. Рахматуллин, В.Г. Карамышев // Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2007. – № 3(69). – С. 42-46.

90. Транспорт в России 2024 // Федеральная служба государственной статистики : [официальный сайт]. – 2024. – 27 ноября. – URL: https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/Transport_2024.pdf (дата обращения 04.03.2026).

91. Указ Президента РФ от 27.12.2022 № 961 (ред. от 28.04.2023) «О применении специальных экономических мер в топливно-энергетической сфере в связи с установлением некоторыми иностранными государствами предельной цены на российские нефть и нефтепродукты» // СПС Консультант Плюс. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_435651/ (дата обращения 04.02.2026).

92. Чалганова, А.А. Построение множественной регрессии и оценка качества модели с использованием табличного процессора Excel. Учебное пособие по дисциплине «Эконометрика» / А.А. Чалганова. – [Текст : электронный]. – Санкт-Петербург : РГГМУ, 2022. – 90 с.

93. Чионов, А.М. Анализ применения консервативной неявной разностной схемы при моделировании самотечного течения в приближении мелкой воды / А.М. Чионов, А.Е. Сунцов, С.А. Коршунов // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2026. – Т. 16, № 1. – С. 52-60. – DOI 10.28999/2541-9595-2026-16-1-52-60.

94. Чугаев, Р.Р. Гидравлика. Л.: Энергоиздат. Ленинградское отделение, 1982. – 672 с.

95. Чужинов, С.Н. Патент на полезную модель № 180902 U1 Российская Федерация, МПК G01F 3/00, E21B 47/00. Стенд для исследования течения жидкости на самотечных участках в трубопроводе : № 2017137797 : заявл. 30.10.2017 : опубл. 29.06.2018 / С.Н. Чужинов, Р.З. Сунагатуллин, М.Р. Лукманов [и др.] ; заявитель ПАО «Транснефть», ООО «НИИ Транснефть», АО «Транснефть-Урал».

96. Шагиев, Р.Г. Заполнение самотечных участков рельефных нефтепроводов с неполным занятым сечением с целью пропуска внутритрубных инспекционных приборов / Р.Г. Шагиев // Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2011. – № 1(83). – С. 92-100.

97. Шагиев, Р.Г. Течение неньютоновской степенной нефти на самотечных участках нефтепроводов с неполным занятым сечением / Р.Г. Шагиев // Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2009. – № 4(78). – С. 42-44.

98. Шаммазов, А.М. Основы трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов / А.М. Шаммазов, А.А. Коршак, К.Р. Ахмадуллин // Учебное пособие. – Уфа: Ди-зайнПолиграфСервис. 2000. – 160 с.

99. Шаммазов, А.М. О скоплениях газа и жидкости в трубопроводах/А.М. Шаммазов, А.К. Галлямов, Г.Е. Коробков // Изв. вузов. Нефть и газ. – 1972. – №8. – С. 82-87.

100. Шаммазов, И.А. Моделирование работы самотечных участков нефтепровода / И.А. Шаммазов, **А.В. Борисов**, В.С. Никитина // Безопасность труда в промышленности. – 2024. – № 1. – С. 74-80. – DOI 10.24000/0409-2961-2024-1-74-80.

101. Шаммазов, И.А. Совершенствование подходов к определению уровня заполнения тела трубы продуктом перекачки / И.А. Шаммазов, **А.В. Борисов**, Б.С. Александрук, В.С. Никитина, Д.И. Муллабаев // Проблемы сбора, подготовки

и транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2024. – № 3(149). – С. 159-173. – DOI 10.17122/ntj-oil-2024-3-159-173.

102. Шаммазов, И.А. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024664520 Российская Федерация. Программа расчета коэффициента заполнения нефтепровода методом Ньютона-Гаусса. Заявка № 2024663183 : заявл. 11.06.2024 : опубл. 20.06.2024 / И.А. Шаммазов, В.В. Пшенин, **А.В. Борисов** ; заявитель/правообладатель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II». – 1 с. : ил. – Текст: непосредственный.

103. Шаммазов, И.А. Особенности влияния сложных горных условий на строительство и эксплуатацию самотечных участков трубопроводного транспорта / И.А. Шаммазов, **А.В. Борисов**, Б.С. Александрук, В.Д. Мурин, В.С. Никитина // Безопасность труда в промышленности. – 2025. – № 7. – С. 39-43. – DOI 10.24000/0409-2961-2025-7-39-43.

104. Шаммазов, И.А. Определение вместимости трубопроводов, транспортирующих жидкие продукты, в зависимости от термобарических условий / И.А. Шаммазов, **А.В. Борисов**, В.В. Пшенин, А.А. Густов // Нефтегазовое дело. – 2024. – Т. 22, № 1. – С. 122-128. – DOI 10.17122/ngdelo-2024-1-122-128.

105. Шулятиков, В.И. Патент на полезную модель № 123454 U1 Российская Федерация, МПК E21B 47/00. Стенд для исследования газогидродинамических процессов : № 2012135769/03 : заявл. 21.08.2012 : опубл. 27.12.2012 / И.В. Шулятиков, А.А. Плосков, В.И. Шулятиков ; заявитель Общество с ограниченной ответственностью «Научно-исследовательский институт природных газов и газовых технологий - Газпром ВНИИГАЗ».

106. Шулятиков, В.И. Патент на полезную модель № 133194 U1 Российская Федерация, МПК E21B 47/00. Стенд для исследования газогидродинамических процессов : № 2013111024/05 : заявл. 12.03.2013 : опубл. 10.10.2013 / И. В. Шулятиков, А. А. Плосков, В. И. Шулятиков ; заявитель ООО

«Научно-исследовательский институт природных газов и газовых технологий - Газпром ВНИИГАЗ».

107. Энергетическая стратегия Российской Федерации на период до 2050 года // Министерство энергетики Российской Федерации : [официальный сайт]. – 2025. – 12 апреля. – URL: <https://minenergo.gov.ru/upload/iblock/d6a/Energostrategiya-RF-do-2050-goda.pdf> (дата обращения 01.03.2026).

108. Akgiray, O. Simple Formulae for Velocity, Depth of Flow, and Slope Calculations in Partially Filled Circular Pipes / O. Akgiray // Environmental Engineering Science. – 2004. – Vol. 3. – P. 371-385. – DOI 10.1089/109287504323067012.

109. Escrit, L. B. Flow in sewers // Sewerage and Sewage Treatment — International Practice. — New York : John Wiley & Sons, 1984. — P. 620.

110. Giroud, J. Calculation of Flow Velocity in Pipes as a Function of Flow Rate / J. Giroud, B. Palmer, J.E. Dove // Geosynthetics International. – 2000. – Vol. 7. – P. 583-600. – DOI 10.1680/gein.7.0183.

111. Henry, C.N. Partially filled pipes: Experiments in laminar and turbulent flow / C.N. Henry, J.M. Dodds, R.J. Poole, L.F. Cregan // Journal of Fluid Mechanics. – 2018. – Vol. 848. – P. 467-507. – DOI 10.1017/jfm.2018.345.

112. Korostynska, O., Mason A., Al-Shamma'a A. Microwave sensors for the non-invasive monitoring of industrial and medical applications / O. Korostynska, A. Mason, A. Al-Shamma'a // Sensor Review. – 2014. – Vol. 34. – P. 182–191. – DOI 10.1108/SR-11-2012-725.

113. Koutsospyrou, V., Sander G.C., El-Hamalawi A., Wallace D., Croft M. Measuring Variable Discharge Under Partially Full Pipe Flow / V. Koutsospyrou, G.C. Sander, A. El-Hamalawi, D. Wallace, M. Croft // Processes. – 2025. – Vol. 13. – P. 1-14. – DOI 10.3390/pr13041089.

114. Massey, B.S. Mechanics of Fluids / B. S. Massey, Ward-Smith J. — 6th ed. — London: Chapman & Hall, 1989. — 696 p. — URL:

<https://ndl.ethernet.edu.et/bitstream/123456789/8015/1/Mechanics%20of%20Fluids%20.pdf> (дата обращения: 13.05.2026).

115. Saatci, A. Closure to “Velocity and Depth of Flow Calculations in Partially Filled Pipes” / A. Saatci // *Journal of Environmental Engineering-asce*. – 1990. – Vol. 116. – P. 454. – DOI 10.1061/(ASCE)0733-9372(1992)118:3(454.2).

116. Saatci, A. Velocity and Depth of Flow Calculations in Partially Filled Pipes / A. Saatci // *Journal of Environmental Engineering-asce*. – 1990. – Vol. 116. – P. 1202-1208. – DOI 10.1061/(ASCE)0733-9372(1990)116:6(1202).

117. Shammazov, I.A. Algorithmic Models for Determining the Flow Patterns of Oil Pipelines in Gravity Sections / I.A. Shammazov, **A.V. Borisov**, B.S. Aleksandruk, G.V. Loptenko, V.S. Nikitina // *International Journal of Engineering, Transactions A: Basics*. – 2025. – Vol. 38, No. 10. – P. 2476-2485. – DOI 10.5829/ije.2025.38.10a.22.

118. Statistical Review of World Energy 2025 [Электронный ресурс]. – URL : <https://www.energyinst.org/statistical-review> (дата обращения 20.05.2026).

119. Yoon, J.I., Sung J., Ho Lee M. Velocity profiles and friction coefficients in circular open channels / J.I. Yoon, J. Sung, M. Ho Lee // *Journal of Hydraulic Research*. – 2012. – Vol. 50. – P. 304–311. – DOI 10.1080/00221686.2012.673745.

120. Zamora-Arellano, F., López-Bonilla O.R., García-Guerrero E.E., Olguín-Tiznado J.E., Inzunza G.E., López-Mancilla D., Tlelo-Cuautle E. Development of a Portable, Reliable and Low-Cost Electrical Impedance Tomography System Using an Embedded System / F. Zamora-Arellano, O.R. López-Bonilla, E.E. García-Guerrero, J.E. Olguín-Tiznado, G.E. Inzunza, D. López-Mancilla, E. Tlelo-Cuautle // *Electronics*. – 2021. Vol. – 10. – P. 1-24. DOI 10.3390/electronics10010015.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2024664520

**Программа расчета коэффициента заполнения
нефтепровода методом Ньютона-Гаусса**

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

Авторы: *Шаммазов Ильдар Айратович (RU), Пшенин
Владимир Викторович (RU), Борисов Артём Витальевич
(RU)*

Заявка № 2024663183

Дата поступления 11 июня 2024 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 20 июня 2024 г.



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Ю.С. Зубов

(продолжение)

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



RU2024664520

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ
ГОСУДАРСТВЕННАЯ РЕГИСТРАЦИЯ ПРОГРАММЫ ДЛЯ ЭВМ

Номер регистрации (свидетельства):
2024664520
Дата регистрации: 20.06.2024
Номер и дата поступления заявки:
2024663183 11.06.2024
Дата публикации и номер бюллетеня:
20.06.2024 Бюл. № 6

Автор(ы):
Шаммазов Ильдар Айратович (RU),
Пшенин Владимир Викторович (RU),
Борисов Артём Витальевич (RU)
Правообладатель(и):
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования «Санкт-Петербургский горный
университет императрицы Екатерины II» (RU)

Название программы для ЭВМ:
Программа расчета коэффициента заполнения нефтепровода методом Ньютона-Гаусса

Реферат:

Программа предназначена для изучения режимов перекачки нефти и нефтепродуктов на самотечных участках трубопровода и для автоматизации определения коэффициента заполнения трубопровода продуктом перекачки. Программа включает в себя программный код, написанный на языке Python и тестовый набор входных данных. Программа обеспечивает выполнение следующих функций: выполнение обработки входных данных; выполнение расчета конденсаторов; построение графика кругового распределения напряжений на конденсаторах нефтепровода; выполнение расчета коэффициента заполнения трубопровода.

Язык программирования: Python

Объем программы для ЭВМ: 33 КБ

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Акт о внедрении результатов исследования в ООО «ЗНГО-Импульс»



ООО «ЗАВОД НЕФТЕГАЗОВОГО ОБОРУДОВАНИЯ - ИМПУЛЬС»
426039, Удмуртская Республика, г. Ижевск, ул. Воткинское шоссе, зд. 382.
ОГРН 1151840000795 | ИНН 1840035402 | КПП 184001001 | ОКПО 29998893

р/с 40702810629100000347 в Филиал "Нижегородский"
ОАО «Альфа-Банк» г. Ижевск, к/с 30101810200000000824, БИК 042202824

Тел.: +7 (3412) 56-15-36 | E-mail: info@zavodimpuls.ru | www.zavodimpuls.ru

УТВЕРЖАЮ
Генеральный директор
И. Ю. Корнев
Дата « 2026 г.

АКТ

о внедрении результатов кандидатской диссертации
Борисова Артема Витальевича
по научной специальности

2.8.5. «Строительство и эксплуатация нефтегазопроводов, баз и хранилищ»

Комиссия в составе:

Председатель

Абрамов Сергей Игоревич – Директор по качеству;

Члены комиссии:

Вишняков Иван Александрович – Директор по развитию;

Рогозов Алексей Алексеевич – Руководитель направления по нефтеперерабатывающим и нефтехимическим предприятиям.

Составлен настоящий акт о том, что результаты диссертации на тему «Совершенствование подходов к количественному учёту нефти и нефтепродуктов на самотечных участках трубопроводов», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук, использованы ООО «ЗНГО-Импульс» в виде методических рекомендаций по расчету уровня заполнения тела трубопровода на самотечных участках нефтепроводов и нефтепродуктопроводов.

Результаты диссертационного исследования, а именно критериальное уравнение, использованы в модуле гидромеханического моделирования трубопроводных систем в рамках расчета коэффициента заполнения.

Использование полученных результатов диссертации, представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук, позволяет:

- снизить риски наступления аварийных ситуаций и повысить уровень промышленной безопасности;
- повысить точность расчета коэффициента заполнения самотечных участков трубопровода на 15,76 %.

Председатель комиссии

Директор по качеству

Абрамов Сергей Игоревич

Члены комиссии

Директор по развитию

Вишняков Иван Александрович

Руководитель направления по нефтеперерабатывающим и нефтехимическим предприятиям

Рогозов Алексей Алексеевич

ПРИЛОЖЕНИЕ В

Акт о внедрении результатов исследования в ОАО «Сибнефтетранспроект»



Открытое акционерное общество «Сибирский институт по проектированию предприятий транспорта и хранения газа, нефти и нефтепродуктов»
«СИБНЕФТЕТРАНСПРОЕКТ»

644009 г. Омск-9, ул. 10 лет Октября, 180-Б, Код ОКПО 05197295,
ЕГРЮЛ 1025500970428, ИНН / КПП 5504002567 / 550401001

тел. (3812) 32-90-12,
факс (3812) 32-91-13,
E-mail: sntp@sntp.ru

УТВЕРЖДАЮ

Генеральный директор

ОАО «Сибнефтетранспроект»

И.В. Крупников

22.09.2026 г.

АКТ

внедрения результатов диссертационной работы

Борисова Артема Витальевича

Результаты исследований, представленных в диссертационной работе Борисова Артема Витальевича «Совершенствование подходов к количественному учёту нефти и нефтепродуктов на самотёчных участках трубопроводов», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по научной специальности 2.8.5 – Строительство и эксплуатация нефтегазопроводов, баз и хранилищ, внедрены в практику проектной деятельности ОАО «Сибнефтетранспроект» в виде методических рекомендаций по расчету уровня заполнения трубопроводов на самотёчных участках нефтепроводов и нефтепродуктопроводов.

Разработанная автором диссертации методика тестировалась на следующих объектах проектирования:

- «Отпускные технологические трубопроводы от резервуарных парков до нефтепирса»;
- «Реконструкция нефтепирса. II этап»;
- «Реконструкция нефтебазы ООО «Норд Стар» и инфраструктуры морского нефтеналивного специализированного порта Витино».

Использование предложенной в диссертации методики расчёта уровня заполнения самотёчных участков трубопроводов позволяет:

- снизить риски наступления аварийных ситуаций и повысить уровень промышленной безопасности;
- повысить точность расчёта коэффициента заполнения самотёчных участков трубопроводов более чем на 15 %.

Председатель комиссии:

Главный инженер

Крупников А.В.

Члены комиссии:

Начальник конструкторско-технологического отдела

Толбин С.А.

Начальник отдела
по проектированию КС

Ваняшов А.Д.