

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*

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

Санкт-Петербург – 2026

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

Научный руководитель:

доктор технических наук, доцент

Шаммазов Ильдар Айратович

Официальные оппоненты:

Гареев Мурсалим Мухутдинович

доктор технических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет», кафедра транспорта и хранения нефти и газа, заместитель заведующего кафедрой;

Ямилев Марат Замирович

кандидат технических наук, Общество с ограниченной ответственностью «Научно-исследовательский институт трубопроводного транспорта», управление математического моделирования и технологий трубопроводного транспорта, начальник управления.

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

Защита диссертации состоится **23 сентября 2026 г. в 13:00** на заседании диссертационного совета ГУ.11 Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II по адресу: 199106, г. Санкт-Петербург, 21-я В.О. линия, д. 2, аудитория № 1163.

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

Автореферат разослан 23 июля 2026 г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ

диссертационного совета



НОСОВ

Виктор Владимирович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

В основе решения задачи организации транспортировки перевалки нефти и нефтепродуктов лежит магистральный трубопроводный 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 исследований – 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, учитывающее 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) и внедрены в практику проектной деятельности ОАО «Сибнефтетранспроект» (акт внедрения от 27.04.2026) 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»).

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 проводилась 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, в том числе в 2 статьях – в изданиях из перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук (далее – Перечень ВАК), в 3 статьях – в изданиях, входящих в международную базу данных и систему цитирования Scopus. Получено 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Структура работы. Диссертация состоит из оглавления, введения, 4 глав с выводами по каждой из них, заключения, списка литературы, включающего 120 наименований, и 3 приложений. 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.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы работы, сформулированы цель, задачи работы и научная новизна, перечислены применяемые методы исследования, раскрыты теоретическая и практическая значимость исследования и изложены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе проведен критический анализ современной теории и практики эксплуатации самотечных участков в Российской Федерации и за рубежом в рамках деятельности единого оператора товарных ПАО «Транснефть» поставок. Рассмотрены основные аспекты функционирования самотечных участков нефте- и нефтепродуктопроводов, приведены особенности эксплуатации данных участков. Проанализированы основные известные формулы и действующие методики расчета для определения коэффициента заполнения в отечественной литературе.

Существующий 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. Также установлено, что использование коэффициента Шези для определения степени заполнения самотечных участков нецелесообразно, поскольку указанный коэффициент применим только для руслового течения жидкости, в то время как течение на самотечных

участках неоднородно и на поверхности раздела фаз «газ-жидкость» могут возникать разнообразные эффекты.

На основе анализа установлено, что существует определенный резерв по уточнению коэффициента заполнения трубопровода самотечного участка, поскольку следует учитывать вторичные факторы, ранее не учитываемые в исследованиях.

Во второй главе на основе анализа зарубежных и отечественных источников, а также с учетом вновь выведенных автором зависимостей получена физико-математическая модель функционирования самотечных участков, учитывающая вторичные факторы.

С помощью положений теории подобия и размерностей обоснован основной вид критериального уравнения и предложено, как учесть относительную шероховатость, вязкость, силу поверхностного натяжения и другие факторы, влияющие на формирование самотечного участка с использованием чисел Фруда, Вебера, Рейнольдса.

В третьей главе приведены результаты проведенных автором экспериментальных исследований, обоснована конструкция стенда и проведено планирование многофакторного эксперимента. В результате анализа экспериментальных данных при перекачке на нескольких жидкостях удалось установить коэффициенты критериального уравнения, которые в дальнейшем были обработаны методами математической статистики и показали убедительную сходимость с экспериментальными данными.

В четвертой главе сформирован методологический подход к определению вместимости трубопровода в условиях остановленной перекачки с учетом влияния термобарических параметров для «закрепленного» и «незакрепленного» участка. Предложено использование устройства, позволяющее определять натурно коэффициент заполнения с емкостными

конденсаторами, закрепленных на внутренней полости трубы. Также предложен алгоритм определения уровня заполнения трубопровода продуктом перекачки методом триангуляции. Даны рекомендации по эксплуатации самотечных участков трубопроводов.

Основные результаты отражены в следующих защищаемых положениях:

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

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 и не берет в расчет сложное влияние второстепенных факторов.

Использование современных моделей турбулентности имеет вычислительные сложности, и их тяжело масштабировать для инженерных расчетов трубопроводных систем. В этой связи в рамках упрощенной модели предложено для описания самотечного движения жидкости использовать систему уравнений (1):

$$\begin{cases} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i)}{\partial z_i} = 0 \\ \frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial z_j} = -\frac{\partial p}{\partial z_i} + \frac{\partial}{\partial z_j} \left(\nu \frac{\partial u_i}{\partial z_j} \right) + G_i \end{cases}, \quad (1)$$

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 – удельная объемная сила, Н/м³.

Автором использованы хорошо зарекомендовавшие себя инструменты численного моделирования гидравлических процессов для описания самотечного движения жидкости в нефтепродуктопроводах. Результаты моделирования с использованием предложенной упрощенной модели самотечного движения жидкости представлены на рисунке 1.

Однако в предложенной модели не учитываются вторичные эффекты, которые наблюдаются на практике. В этой связи предложено дополнить ее эмпирическими соотношениями, построенными с использованием методов теории подобия.

Соответственно, значение уровня заполнения самотечного участка можно представить в следующем виде (2):

$$h = f(D, v_{ж}, \nu_{ж}, g \cdot \sin \alpha, \rho_{ж}, \sigma, \Delta), \quad (2)$$

где D – диаметр трубопровода, м; $v_{ж}$ – скорость течения перекачиваемой жидкости, м/с; $\nu_{ж}$ – вязкость 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 внутренней поверхности трубопровода, м.

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 (3):

$$h = C \cdot D^{x_1} \cdot v_{ж}^{x_2} \cdot \nu_{ж}^{x_3} \cdot (g \cdot \sin \alpha)^{x_4} \cdot \rho_{ж}^{x_5} \cdot \sigma^{x_6} \cdot \Delta^{x_7}, \quad (3)$$

где $x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7$ – степени переменных.

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 (4):

$$\begin{cases} 1 = x_1 + x_2 + 2x_3 + x_4 - 3x_5 + x_7 \\ x_6 = -x_5 \\ x_2 = -x_3 - 2x_4 - 2x_6 \end{cases} \quad (4)$$

В рамках решения системы уравнений (4) с использованием теории подобия и размерностей обоснован общий вид критериального уравнения для определения коэффициента заполнения (5):

$$\frac{h}{D} = C \cdot (Re)^a \cdot (Fr)^b \cdot (We)^c \cdot (\epsilon)^d, \quad (5)$$

где Re – число Рейнольдса; Fr – число Фруда; We – число Вебера; ϵ – относительная шероховатость поверхности трубопровода; a, b, c, d – степени чисел Рейнольдса, Фруда, Вебера и относительной шероховатости.

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.

В рамках выполнения диссертационного исследования была предложена конструкция экспериментального стенда, представленная ниже на рисунке 2.

В таблице 1 приведены технические параметры экспериментального стенда.

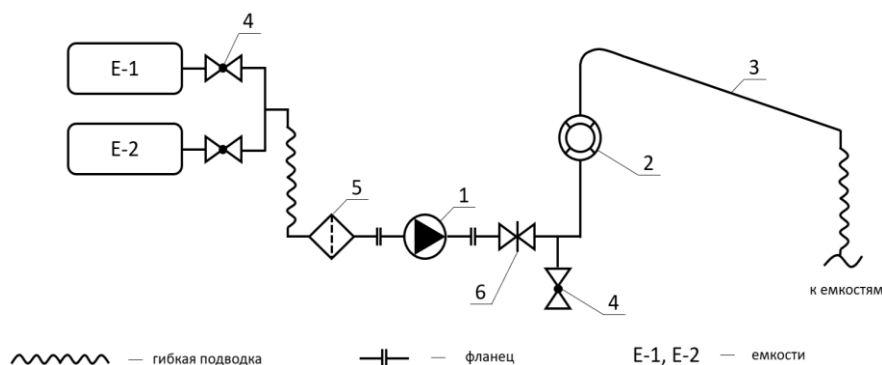


Рисунок 2 – Общий вид стенда с изменяемым профилем, где 1 – насос центробежный, 2 – расходомер, 3 – самотечный участок, 4 – кран шаровый, 5 – фильтр, 6 – задвижка шиберная.

Технологическая схема стенда обеспечивает выполнение следующих функций:

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

2. Изменение угла наклона самотечного участка трубопровода в диапазоне от 5 до 15 градусов.

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

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

5. Изменение шероховатости внутренней поверхности трубопровода с использованием сменных трубных секций.

Для проведения экспериментального исследования была создана шероховатость внутреннего покрытия трубопроводов в диапазоне 0,01 – 0,8 мм с использованием композитно-клеевой смеси.

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 определяет выбор дробных $3^{**}(k-p)$ факторного плана, оптимальным для серии экспериментов. Варьирование факторов осуществлялось на 3-х уровнях.

Было спланировано 27 экспериментов (параметры планирования представлены в таблице 2).

Таблица 2 – Параметры планирования экспериментов

Измерение	Факторы			
	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

Продолжение таблицы 2

Измерение	Факторы			
	Скорость, м/с	Угол наклона, °	Шерохова- тость, мм	Продукт перекачки
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
<i>Примечание: 1,0,-1 = уровни факторов, где 1 – наибольшее значение количественной/категориальной переменной; 0 – среднее значение количественной/категориальной переменной; -1 – наименьшее значение количественной/категориальной переменной.</i>				

Результаты проведенных экспериментов доказали возникновение волн на поверхности жидкости при малых уровнях заполнения трубопровода, что проиллюстрировано на рисунке 3.

На основе результатов проведенных экспериментов было получено критериальное уравнение вида (6):

$$\frac{h}{D} = 0,776 \cdot (Re)^{-0,0711} \cdot (Fr)^{0,2158} \cdot (We)^{0,07395} \cdot (\varepsilon)^{0,07722}, \quad (6)$$

где Re – число Рейнольдса; Fr – число Фруда; We – число Вебера; ε – относительная шероховатость внутренней поверхности трубопровода.

Получено критериальное уравнение, которое относительно хорошо (с учетом исключения явных выбросов и ошибок измерений) описывает экспериментальные данные в области небольших чисел Рейнольдса. Адекватный перенос полученных зависимостей на магистральные трубопроводы возможен только после введения корректирующих коэффициентов, установленных по результатам обработки базы данных по действующим самотёчным участкам.

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 ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях из Перечня ВАК:

1. 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. – № 1. – С. 122-128.

2. 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. – С. 159-173.

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

3. 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.

4. 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.

5. 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.

Патенты/свидетельства на объекты интеллектуальной собственности:

6. 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.

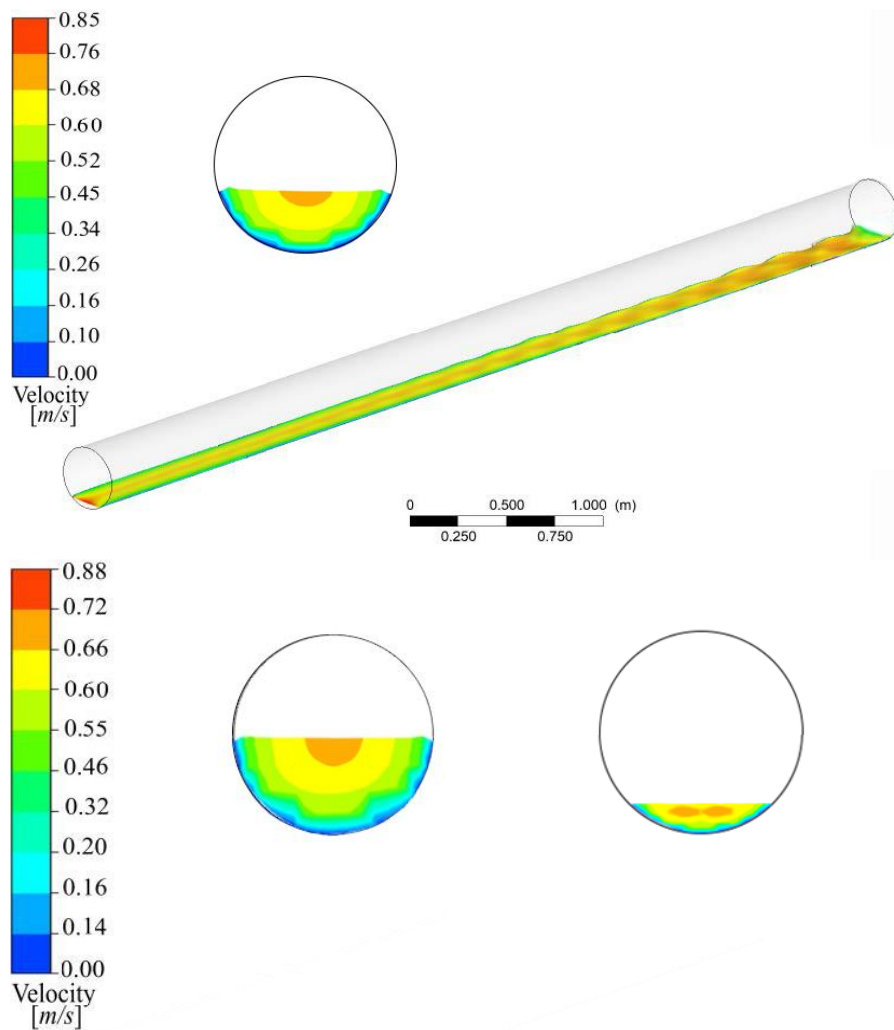


Рисунок 1 – Результаты моделирования самотечного участка в программном комплексе ANSYS и распределение скоростей жидкости в сечении при степени заполнения 0,5 и 0,15

Таблица 1 – Технические параметры экспериментального стенда

Характеристика	Единицы измерения	Значение
Ширина	мм	3000
Длина	мм	2500
Высота	мм	1800
Масса	кг	15
Потребляемая мощность	Вт	251,5
Материальное исполнение	-	Поликарбонат
Наружный диаметр трубопроводов	мм	50
Толщина стенки трубопровода	мм	1,5
Материальное исполнение опор	-	Сталь Ст3
Технологическое оборудование	-	-
Насос Piusi EX50	-	-
Мощность	Вт	250
Производительность	м ³ /ч	3
Давление	МПа	0,11
Перепад давления/напор	м	10
Расходомер TUF-2000	-	-
Мощность	Вт	1,5
Диапазон скоростей	м/с	0-10
Относительная погрешность	%	±1
Емкостное оборудование	-	-
Количество	-	2
Материальное исполнение	-	Полиэтилен
Объем	л	400
Трубопроводная обвязка	-	-
Протяженность обвязки	м	9
Диаметр трубопровода	мм	16
Материал трубопровода	-	Поливинилхлорид



Рисунок 3 – Волны на поверхности перекачиваемого дизельного топлива на самотечном участке трубопровода экспериментального стенда