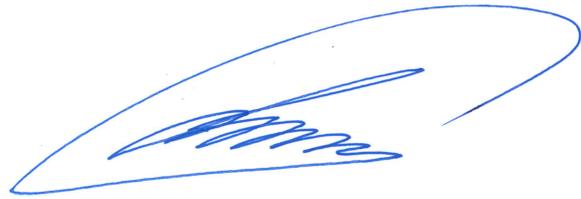


На правах рукописи



ГОЛУНОВ НИКИТА НИКОЛАЕВИЧ

**РАЗВИТИЕ НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКИХ ОСНОВ ПРИМЕНЕНИЯ
ПРОТИВОТУРБУЛЕНТНЫХ ПРИСАДОК ДЛЯ ТРАНСПОРТА НЕФТИ
И НЕФТЕПРОДУКТОВ ПО МАГИСТРАЛЬНЫМ ТРУБОПРОВОДАМ**

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

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Уфа– 2023

Работа выполнена на кафедре проектирования и эксплуатации газонефтепроводов федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И. М. Губкина»

Научный консультант: заслуженный деятель науки РФ
доктор технических наук, профессор
ЛУРЬЕ Михаил Владимирович

Официальные оппоненты: **СОЩЕНКО Анатолий Евгеньевич**
доктор технических наук, профессор
ПАО «Транснефть» / управления инновационного
и научно-технического развития, консультант

ЩИПАЧЕВ Андрей Михайлович
доктор технических наук, профессор
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Санкт-Петербургский горный университет»/
кафедра «Транспорт и хранение нефти и газа»,
заведующий кафедрой

ЗЕМЕНКОВА Мария Юрьевна
доктор технических наук, профессор
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Тюменский индустриальный университет»/
кафедра «Транспорт углеводородных ресурсов»,
профессор

Ведущая организация: 25-й Государственный научно-исследовательский институт химмотологии Министерства обороны Российской Федерации (г. Москва)

Защита диссертации состоится «27» февраля 2024 года в 10-00 на заседании диссертационного совета 24.2.428.03 при Уфимском государственном нефтяном техническом университете по адресу: 450064, Республика Башкортостан г. Уфа, ул. Космонавтов, дом 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет» и на сайте www.rusoil.net

Автореферат диссертации разослан « ____ » _____ 2023 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Султанов Шамиль Ханифович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Магистральные трубопроводные системы для перекачки нефти и нефтепродуктов являются энергоемкими объектами топливно-энергетического комплекса, потребляющими существенное количество электроэнергии. Одной из ключевых задач магистрального транспорта является сокращение энергопотребления и повышение энергоэффективности. Одним из таких способов стало использование полимерных добавок, которые получили название антифрикционных или противотурбулентных присадок (ПТП); в зарубежной литературе такие вещества называют «Drag reducing agents» (DRAs).

При добавлении в нефть или нефтепродукты, перекачиваемые по магистральным трубопроводам, ПТП уменьшают гидравлическое сопротивление жидкости за счет изменения структуры турбулентного течения в трубе, а не за счет изменения свойств самих транспортируемых товарных продуктов. Такая технология получила широкое распространение и активно развивается на трубопроводных системах как способ повышения их энергоэффективности. Приведенные в настоящей диссертации положения направлены на дальнейшее развитие научно-методических основ применения ПТП при транспортировке нефти и нефтепродуктов в системе магистральных трубопроводов.

Начиная с приоритетной работы английского химика Брайана Аткинсона Томса, до настоящего времени выполнено множество исследований в развитие открытого им эффекта, в т.ч. в области исследования гидравлических особенностей использования ПТП на отдельных трубопроводах. Магистральные трубопроводы для перекачки нефти или нефтепродуктов принято делить на технологические (эксплуатационные) участки общей протяженностью 400-600 км, состоящие из гидравлически взаимосвязанных и взаимозависимых между собой перегонов (трубопроводов) в количестве 3-5 ед. (точное количество определяется с учетом множества эксплуатационных факторов) от одной нефтеперекачивающей станции (НПС) с резервуарным парком (РП) до следующей по маршруту перекачки НПС с РП.

Даже если ПТП показывает высокую эффективность по результатам экспериментов на трубных стендах, различных лабораторных установках или на одном конкретном трубопроводе, представляется весьма маловероятным гарантировать такую же ее эффективность для всего технологического участка (ТУ). Высокий эффект от применения ПТП на одном отдельном перегоне магистрального трубопровода может нивелироваться более высокими гидравлическими потерями на других перегонах, а в некоторых случаях – привести к невозможности обеспечить перекачку исходя из эксплуатационных ограничений. Таким образом, критерием эффективности применения ПТП должна являться ее эффективность именно для всего ТУ магистрального нефтепровода (МН) или магистрального нефтепродуктопровода (МНПП).

Не смотря на то, что гидравлическая теория движения жидкости в трубах известна давно, а само ее развитие связано с такими великими учеными как

Джефри Тейлор, Людвиг Прандтль, Теодор фон Карман, из-за сложности самой теории и принятых в ней допущениях, многие практически значимые и, прежде всего, научно-методические основы (а также следующие из нее технологии), разработаны недостаточно, особенно для системы ТУ магистральных трубопроводов.

С учетом изложенного, как в настоящее время, так и в ближайшей перспективе требуется решение **важной народно-хозяйственной проблемы**, заключающейся в необходимости совершенствования и развития научно-методических основ применения ПТП для повышения энергоэффективности существующих и реконструируемых или проектируемых в будущем магистральных трубопроводов для перекачки нефти и нефтепродуктов с учетом эксплуатационно-технологических ограничений.

Целью диссертационной работы является разработка научно-методического обеспечения для технологического проектирования и повышения эффективности эксплуатации магистральных трубопроводов для перекачки нефти и нефтепродуктов при использовании ПТП.

Основные задачи диссертационного исследования:

1. Выполнить критический анализ теоретических исследований в области применения ПТП на магистральных трубопроводах для перекачки нефти и нефтепродуктов, в том числе для определения основного параметра режима перекачки – коэффициента гидравлического сопротивления.

2. Усовершенствовать феноменологическую теорию Т. фон Кармана для квазистационарного движения жидкости в круглой трубе, в том числе порядок расчета коэффициента гидравлического сопротивления с учетом разного механизма действия и концентрации ПТП поверхностного и объемного типов.

3. Разработать методику пересчета на реальные магистральные трубопроводы гидравлических свойств ПТП, определяемых по результатам экспериментальных исследований на трубных стендах, дисковых реометрах и ротационных вискозиметрах.

4. Разработать методику гидравлического расчета стационарной работы ТУ магистральных трубопроводов при использовании ПТП с целью оптимизации режимов перекачки с учетом технологических параметров ТУ и определения оптимальных концентраций ПТП для таких ТУ.

5. Разработать методику расчета квазистационарных режимов с целью сокращения затрат электроэнергии на перекачку перекачки нефти и нефтепродуктов по ТУ магистральных трубопроводов на основе ограниченного применения ПТП.

6. Разработать метод определения начальной концентрации ПТП в буферной пробке различных марок нефтепродуктов для уменьшения объема смесеобразования при их последовательной перекачке.

Научная новизна

1. Впервые предложена и теоретически обоснована необходимость оценки эффективности воздействия ПТП в зависимости от их механизма действия на турбулентный поток.

2. Разработана модель турбулентного течения жидкости с ПТП с учетом

нового подхода по определению граничных (краевых) условий теории Тейлора, на основании которой предложено новое обобщенное уравнение сопротивления в изотермическом трубопроводе с шероховатыми стенками.

3. Разработана методика определения универсальных констант обобщенной теории Т. фон Кармана для расчета коэффициента гидравлического сопротивления по результатам обработки экспериментальных данных эффективности ПТП на исследовательских трубных стендах, в ротационных вискозиметрах и дисковых реометрах.

4. Установлено, что для сокращения смеси, образующейся при последовательной перекачке в зоне контакта партий разноразных нефтепродуктов, необходимо двукратное увеличение концентрации ПТП в пробке от ее первоначальной концентрации в партии.

Предмет исследования – гидравлическая теория перекачки нефти и нефтепродуктов в ТУ с использованием ПТП.

Объект исследования – ТУ МН и МНПП при использовании ПТП.

Теоретическая и практическая значимость основана на развитии научных положений гидравлической теории и совершенствовании научно-методического обеспечения применения ПТП при перекачке нефти и нефтепродуктов по МН и МНПП для сокращения энергозатрат и повышения энергоэффективности.

Практическая значимость

Совокупность исследований, выполненных в диссертации, представляет собой значимое научно-теоретическое и прикладное развитие гидравлической теории движения нефти и нефтепродуктов с ПТП по магистральным трубопроводам, которое может быть квалифицировано как новое научное и практическое достижение. Обоснованные и усовершенствованные положения гидравлической теории, а также предложенные методы расчета гидравлических режимов могут быть использованы на этапе технологического проектирования и эксплуатации новых, реконструируемых или строящихся магистральных трубопроводов с существенным повышением эффективности эксплуатации и сокращением энергозатрат на перекачку, что вносит значительный вклад в развитие ТЭК.

Разработанные методы гидравлического расчета параметров перекачки нефти и нефтепродуктов по ТУ с ПТП внедрены в учебный процесс РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина при выполнении выпускных квалификационных работ и проведении учебных дисциплин по направлениям подготовки 21.03.01 «Нефтегазовое дело» (квалификация «бакалавр») и 21.04.01 «Нефтегазовое дело» (квалификация «магистр»).

Полученные в ходе выполнения исследований и изложенные в настоящей работе положения могут быть также рекомендованы для внедрения в учебный процесс других образовательных организаций высшего образования, при проведении программ повышения квалификации и профессиональной переподготовки для руководителей и специалистов организаций системы трубопроводного транспорта, в профильных отраслевых научно-исследовательских организациях, в том числе в области использования сборно-

разборных (полевых) магистральных трубопроводов для обеспечения топливом.

Методология и методы научного исследования

Для достижения поставленных в работе целей и задач автором проводилось самостоятельное изучение значительного количества архивных, печатных и электронных источников. В работе использовались методы математического моделирования процесса течения в трубопроводе жидкости, содержащей ПТП и численные методы решения систем уравнений. В развитие теоретических и экспериментальных исследований автора предложен новый метод расчета буферной пробки в области контакта последовательно перекачиваемых продуктов с учетом изменяющейся концентрации ПТП и начальной длины самой пробки.

Положения, выносимые на защиту

1. Оценка эффективности воздействия ПТП в зависимости от их механизма действия на турбулентный поток.
2. Модель турбулентного течения жидкости с ПТП с учетом нового подхода по определению граничных (краевых) условий теории Тейлора и новое обобщенное уравнение сопротивления в изотермическом трубопроводе с шероховатыми стенками.
3. Методика определения универсальных констант обобщенной теории Кармана для расчета коэффициента гидравлического сопротивления, определяемых по результатам экспериментальных исследований свойств ПТП в трубных стендах, ротационных вискозиметрах и дисковых реометрах.
4. Метод расчета начальной концентрации ПТП для сокращения объема смеси, образующейся в области контакта партий разносортных нефтепродуктов при их последовательной перекачке.

Степень достоверности и апробация результатов

Достоверность результатов исследования подтверждается корректностью поставки научных задач, четкостью определения границ исследования и использованного математического аппарата, прозрачными методами аппроксимации и обобщения сведений о ранее проведенных экспериментальных исследованиях, исторической преемственностью и последовательностью выполнения соответствующих исследований, а также имеющимися публикациями автора.

Основные положения диссертационной работы были представлены автором на следующих конференциях: III Региональная научно-техническая конференция «Губкинский университет в решении вопросов Нефтегазовой отрасли России», посвященная 110-летию А.И. Скобло и 105-летию Г.К. Шрейбера (г. Москва, 2019); IV Всероссийская научно-практическая конференция «Трубопроводный транспорт углеводородов» (г. Омск, 2020); Международная научно-практическая конференция «Трубопроводный транспорт» (г. Уфа, 2020, 2021, 2022); XIII Международная конференция «Рассохинские чтения» (г. Ухта, 2021); V региональная научно-техническая конференция «Губкинский университет в экосистеме современного образования», посвященная 150-летию со дня рождения И.М. Губкина (г. Москва, 2021); Шестая региональная научно-техническая конференция

«Губкинский университет в решении вопросов нефтегазовой отрасли России», посвященная 100-летию профессора М.В. Ивановой (г. Москва, 2022); XVI Всероссийская научно-техническая конференция «Актуальные проблемы развития нефтегазового комплекса» (г. Москва, 2023); II Всероссийская научная конференция «Транспорт и хранение углеводородов – 2023» (г. Санкт-Петербург, 2023).

Публикации

По теме диссертационной работы имеется 41 публикация, в том числе 26 публикаций в научных изданиях, входящих в Перечень рецензируемых научных изданий ВАК, 2 публикации на английском языке.

Структура и объем работы

Диссертационное исследование состоит из введения, 4-х глав, основных выводов, списка литературы из 428 наименований; изложена на 296 листах машинописного текста, содержит 20 таблиц и 51 рисунок.

Личный вклад автора

Выносимые на защиту научная новизна и положения разработаны автором лично. Во всех публикациях (в т.ч. совместно подготовленных с другими авторами), в которых изложены те или иные положения диссертационного исследования, автору принадлежат вопросы постановки задач исследований, математические модели расчетов.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, сформулированы цель и основные задачи исследования, отражена научная новизна и практическая ценность работы.

В первой главе диссертации дается общая характеристика проблемы – применения ПТП для уменьшения трения между слоями жидкости, движущейся в турбулентном режиме. С момента публикации ставшей классической работы английского химика Б.А. Томса, многими учеными в разных странах мира проведено огромное количество исследований в развитие открытого им эффекта, в т.ч. в области трубопроводного транспорта углеводородов (в первую очередь, нефти и нефтепродуктов). К настоящему времени исследованы различные аспекты воздействия таких присадок на турбулентное течение, изучены химические и физические принципы создания новых видов ПТП, получены критерии их эффективности и устойчивости к разрушению. Вскрыта механика разрушения (деструкции) высокомолекулярных полимеров в потоке несущей жидкости, исследованы особенности использования ПТП в различных термодинамических условиях, а также проведены серии опытно-промышленных перекачек, подтверждающих степень эффективности их применения. Значимый прогресс в использовании этой технологии в нашей стране произошел после разработки оригинальных рецептов собственных марок ПТП и локализации их производства на отечественных предприятиях.

Отмечается весомый вклад в развитие теории и методов расчета течений

жидкости с ПТП отечественных (в т. ч. советских) исследователей, таких как Алиев Р.А., Абдусалямов А.В., Амфилохийев В.Б., Анисимов И.А., Асланов П.В., Баренблатт Г.И., Бахтизин Р.Н., Белоусов Ю.П., Блейхер Э.М., Булина И.Г., Валиев М.И., Варыбок Д.И., Васецкая В.А., Галлямов А.К., Гареев М.М., Гольдштик М.А., Гольянов А.И., Горин Я.Я., Городцов В.А., Грешилов Е.М., Григорян С.С., Гумеров А.Г., Дмитриева Т.В., Добрыченко В.М., Дяченко И.Ф., Ерошкина И.И., Жолобов В.В., Зельдович Я.Б., Иванюта Ю.Ф., Иваненков В.В., Иоселевич В.А., Калашников В.Н., Кобец Г.Ф., Коршак А.А., Лисин Ю.В., Лурье М.В., Манжай В.Н., Марон В.И., Мастобаев Б.Н., Мацкин Л.А., Миллионщиков М.Д., Мирзаджанзаде А.Х., Мовсумзаде Э.М., Муратова В.И., Несын Г.В., Нечваль А.М., Новоселов В.Ф., Пилипенко В.Н., Пименов О.В., Повх И.Л., Подоба Н.А., Прохоров А.Д., Ревель-Муроз П.А., Седов В.А., Станев В.С., Станкевич В.С., Ступин А.Б., Сунагатуллин Н.Р., Тугунов П.И., Хабахпашева Е.М., Чекалова Л.А., Челинцев С.Н., Челинцев Н.С., Черников А.В., Шагиев Р.Г., Шаммазов А.М., Шварц В.М., Шибает В.П., Юфин В.А. и многих других. Возможности и перспективы применения ПТП на магистральных нефтепроводах (МН) и магистральных нефтепродуктопроводах (МНПП), как способ повышения энергоэффективности системы трубопроводного транспорта, увеличения пропускной способности приведены в монографиях и диссертациях Гареева М.М., Лисина Ю.В., Мастобаева Б.Н., Муратовой В.И., Прохорова А.А., Ревель-Муроза П.А., Челинцева Н.С.

К наиболее известным и приоритетным работам зарубежных исследователей необходимо отнести публикации, прежде всего открывателя эффекта В.А. Toms, а также авторов, чьи работы стали «классическими» – Ж. Бусинеска, Т. фон Кармана, Ж. Конт-Белло, И. Никурадзе, Л. Прандтля, Д. Тейлора, И.О. Хинце, Г. Шлихтинга, а также Daas M., El Telbany M.M.M., Fabula A.G., Fruman D.H., Gyr A., Hinch E.J., Hoyt J.W., Interthal W., Kale D.D., Langsholt M., Little R.C., Lumley Y.L., McCormick C.L., Merrill E.W., Mickey H.S., Nadolink R.H., Smith K.A., Soleimani A., Suraiya T., Virk P.S., Yang S.Q., Warholic M.D., Wilski H., Чэнь Ян и многих других.

Необходимо отметить, что гидравлические аспекты использования различных видов ПТП в системе сложных взаимосвязанных и взаимозависимых сегментах трубопроводных систем, которые, в конечном счете и должны дать ответ на вопрос об эффективности использования ПТП на том или ином трубопроводе, отражены в существующих исследованиях в гораздо меньшей степени. Дело в том, что если даже ПТП демонстрирует хорошие результаты на трубопроводном стенде или одном перегоне (линейном участке) трубопровода, это совершенно не гарантирует, что данная ПТП покажет столь же высокие результаты в системе других магистральных трубопроводов.

Как известно, именно технологический участок (ТУ) трубопровода является основным элементом системы магистральных трубопроводов для транспортировки на большие расстояния нефти и нефтепродуктов. ТУ представляет собой совокупность гидравлически взаимосвязанных и взаимозависимых отдельных линейных участков (перегонов) между нефтеперекачивающими станциями (НПС), которые и осуществляют перекачку

нефти и нефтепродуктов в режиме «из насоса – в насос». Каждая НПС имеет свои уникальные гидравлические характеристики исходя из особенностей эксплуатации насосно-энергетического оборудования, в т.ч. коэффициентами полезного действия. А каждый линейный участок (перегон) между последовательно расположенными НПС отличается от других перегонов своими параметрами геометрическими и эксплуатационными параметрами. Все вместе взятое создает систему уникальных гидравлических характеристик, поэтому высокий эффект от применения ПТП на отдельном перегоне может нивелироваться более высокими потерями в других перегонах, гидравлически связанных с данным, и привести к невозможности осуществлять перекачку. В диссертации выдвигается тезис о том, что только эффект от использования ПТП в пределах ТУ может служить критерием эффективности применения этой технологии в том или ином конкретном случае.

Необходимо дополнительно отметить особенность порядка проведения гидравлических расчетов полевых магистральных (сборно-разборных) трубопроводов, эксплуатируемых в системе материально-технического обеспечения Минобороны России. Они являются важным элементом системы обеспечения, которая представляет собой совокупность органов военного управления, воинских частей, подразделений и организаций обеспечения моторными топливами. Одним из перспективных и интересных направлений развития трубопроводных систем является интеграция существующих «гражданских» МНПП с инфраструктурой и точками подключения к ним полевых (сборно-разборных) трубопроводов, складов топлива Росрезерва и военных аэродромов в ключевых стратегических регионах страны. Целью такой интеграции является создание устойчивой эшелонированной сети обеспечения топливом, которая позволяет осуществлять оперативную маршрутизацию доставки топлива подвижным воинским частям в гражданское время во время учений и в ходе военных стратегических операций.

В исследованиях проблемы транспортировки нефти и нефтепродуктов по трубопроводам с использованием ПТП, снижающих гидравлическое сопротивление, условно можно выделить три основные направления.

– физико-химическое, к которому относятся исследования в области химии и физики слабых растворов, физических механизмов воздействия различных присадок на турбулентность, выявлению физико-химических свойств присадок, их действию в условиях различных сдвиговых напряжений, стойкости и чувствительности к температуре и давлению, деструкции в турбулентном потоке, в также особенностей их производства, доставки (логистики) и хранения, исследования прочих физико-химических параметров;

– гидравлическое, к которому относятся исследования в области гидравлических зависимостей эффекта снижения гидравлического сопротивления конкретными марками применяемых ПТП, в т.ч. стендовые и лабораторные исследования с целью получения адекватных и удобных инженерных формул для определения коэффициента гидравлического сопротивления с учетом эксплуатационных параметров самого трубопровода и зависимости от внешних условий;

– технологическое, т.е. развитие (совершенствование) существующей гидравлической теории с использованием ПТП не на отдельных линейных участках (перегонах) трубопроводов, а для комплексного системного подхода определения гидравлических параметров ТУ магистральных трубопроводов, в т.ч. определения таких концентраций ПТП, которые обеспечивают оптимальные (экономически выгодные) режимы перекачки с учетом фактических характеристик насосно-силового оборудования, технологических уставок защиты по минимальному и максимальному напорам на, соответственно входе и выходе НПС, прочие показатели.

Первое из указанных направлений исследований – физико-химическое – принято считать достаточно хорошо изученным. Но необходимо отметить, что именно сложность моделирования процессов действия ПТП в турбулентном потоке в трубе является одной из ключевых причин отсутствия общепризнанной гидравлической теории и адекватных инженерных способов расчета. Кроме того, сам общеупотребительный термин «малая противотурбулентная присадка» (ПТП) предполагает многообразие самых разных полимеров, которые, хотя и демонстрируют «эффект Томса» в той или иной степени, но самым принципиальным образом отличаются механике влияния на турбулентность.

ПТП поверхностного действия (Рисунок 1) воздействуют на турбулентность только вблизи внутренней поверхности стенки трубы. Такие ПТП производятся, как правило, на основе гелевых высокомолекулярных полимеров и обладают относительно высокой скоростью деструкции, которая обусловлена разрывом длинных молекул за счет самих турбулентных вихрей. В процессе разрешения молекулы полимера происходит уменьшение его молекулярной массы, снижение линейных размеров и, как следствие, снижение способности уменьшать гидравлическое сопротивление. Изменяя структуру турбулентного течения только в узкой пристеночной области, ПТП поверхностного типа через изменение краевых условий влияют на него в целом, при этом турбулентную вязкость жидкости остается постоянной величиной.

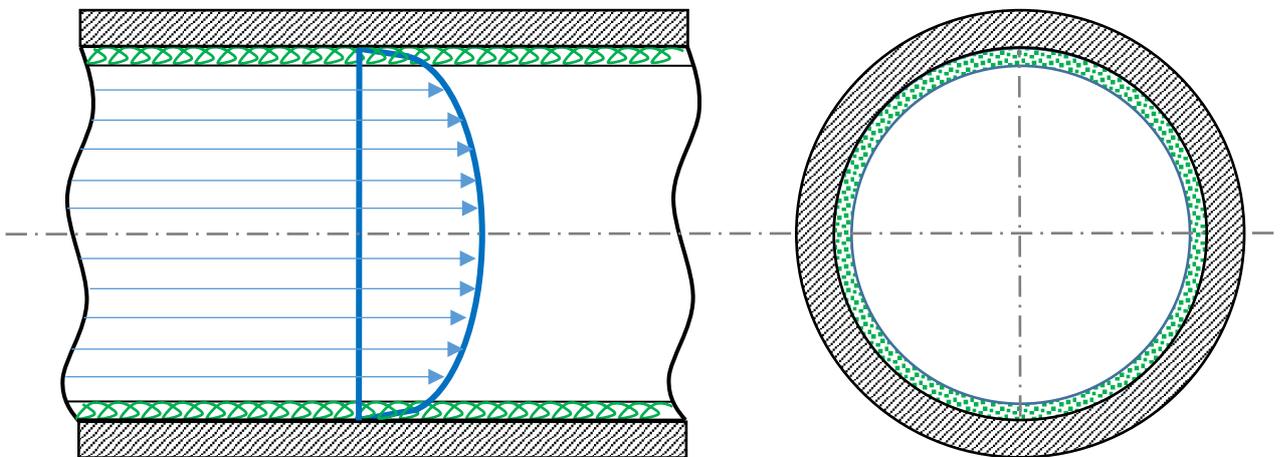


Рисунок 1 – Механизм действия ПТП поверхностного действия

ПТП объемного действия (Рисунок 2) воздействуют на турбулентность не только у стенки трубы, но и во всей структуре потока. К таким ПТП относятся эмульсии, поверхностно-активные вещества, растворы синтетических веществ, мелкодисперсные суспензии. Многочисленными натурными исследованиями подтверждается, что ПТП объемного типа подвержены деструкции в существенно меньшей степени, чем ПТП поверхностного действия. Действуя во всей структуре турбулентного течения такие ПТП изменяют турбулентную вязкость в каждой точке по потоку перекачиваемой жидкости.

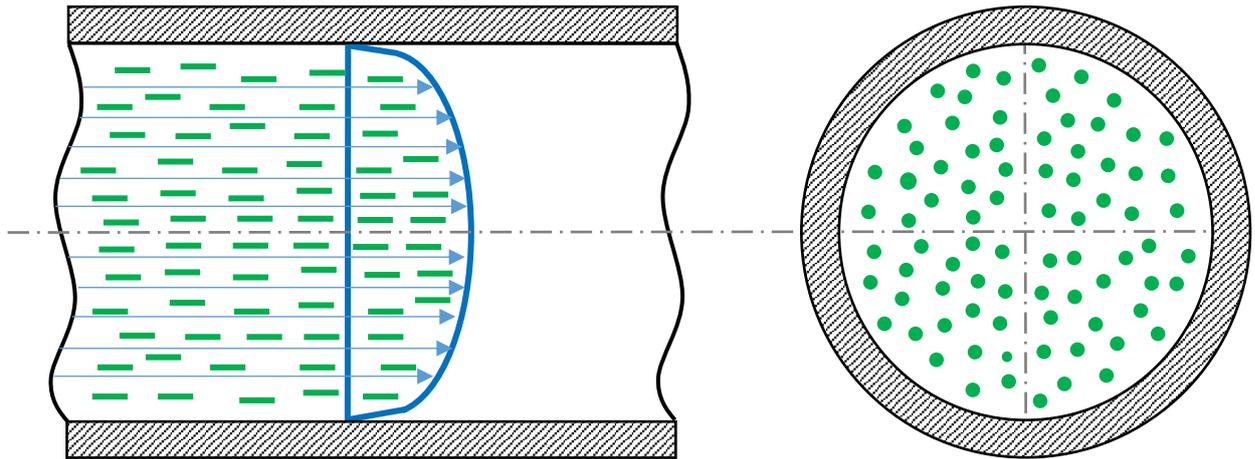


Рисунок 2 – Механизм действия ПТП объемного действия

Второе из указанных направлений исследований – гидравлическое – представляет собой достаточную сложность для изложения из-за значительного количества опубликованных научных работ. Можно с уверенностью предположить, что количество таких работ превышает если не сотни, то десятки тысяч, хотя во всех этих исследованиях есть некоторое сходство. Рассмотрим три основных типа гидравлических исследований, которые имеют некоторые сходства и закономерности.

Первый тип гидравлических исследований основан на обработке результатов тестирования ПТП на экспериментальных стендах и в различного вида лабораторных приборах с последующим представлением полученных данных в виде той или иной эмпирической формулы. Причем для построения новой формулы используются уже известные в гидравлике формулы, в которых входящие в них константы корректируются в соответствии с построенными по результатам экспериментов аппроксимационными зависимостями. Обычно такие формулы дают высокую сходимость с результатами обработки исходных или похожих лабораторных экспериментов, но зачастую не подтверждаются при использовании ПТП в реально эксплуатируемых трубопроводах.

Второй тип гидравлических исследований основан на обработке «натурных» результатов опытно-промышленных перекачек нефти, нефтепродуктов, газожидкостных смесей, водонефтяных эмульсий и других углеводородов на отдельном линейном участке (перегоне) магистрального трубопровода. Однако при определении гидравлической эффективности ПТП в

таких исследованиях зачастую существенное влияние имеют факторы, по сути своей или мало существенные, или мало применимые на других трубопроводах, в результате чего полученные формульные зависимости хорошо отражают результаты использования в данных условиях конкретной ПТП на данном участке трубопровода, однако прогнозировать результаты ее использования в других условиях и на других трубопроводах оказываются мало возможным.

Третий тип гидравлических исследований основан на теоретическом анализе тех изменений, которые происходят после добавления ПТП в пристеночной области трубопровода и в структуре турбулентного потока. Сложность состоит в том, что сама модель турбулентности еще со времен классических математических моделей Людвиг Прандтля и Теодора фон Кармана все также опирается на полуэмпирические уравнения с поправочными полуэмпирическими коэффициентами. Многие ученые за последнее столетие приносили свои новшества, например, дополнительные упруго-пластичные слои, переходные области турбулентности и множество дополнительных расчетных коэффициентов. Данные исследования имеют признанную теоретическую научную базу и подтверждены классическими экспериментами.

Третье из указанных направлений исследований – технологическое – представляет собой наибольшую сложность, так как оно основывается на прогнозировании эффективности использования ПТП не на отдельных линейных участках (перегонах) трубопроводов, а для комплексного системного подхода определения гидравлических параметров ТУ магистральных трубопроводов. Отличительной особенностью диссертации являются исследования гидравлических аспектов использования новой технологии в ТУ МН и МНПП, то есть на участках трубопроводной системы с многочисленными промежуточными НПС. По мнению автора, именно эта особенность, выразившаяся в разработке теории, методов и численных алгоритмов расчета составляет основную новизну выполненных исследований, в т.ч. методов и итерационных алгоритмов определения таких концентраций ПТП, которые обеспечивают оптимальные (экономически выгодные) режимы перекачки с учетом фактических характеристик насосно-силового оборудования, технологических уставок защиты по минимальному и максимальному напорам на, соответственно входе и выходе НПС, прочих показатели.

В заключении первой главы автором делаются выводы:

1. Проведен анализ научных работ в области теории турбулентности, истории появления полимеров, их применения, эволюции научных представлений об эффекте Б.А. Томса при добавлении ПТП в поток транспортируемой жидкости, использовании ПТП в МН и МНПП.

2. По итогам анализа способов определения коэффициента λ гидравлического сопротивления показано, что общепризнанного подхода к этому вопросу не существует, как не существует и единственно верной и общепризнанной теории турбулентного течения жидкости с ПТП, на базе которой можно было бы получить искомую формулу. Коэффициент λ гидравлического сопротивления жидкости является локальной характеристикой турбулентного потока, поэтому не зависит от геометрических параметров

трубопровода или характеристик насосов на НПС. Коэффициент λ зависит от концентрации θ ПТП, физико-химических характеристик жидкости (плотность, вязкость, их зависимость от температуры), гидравлического режима течения.

3. Известная модель сдвиговой турбулентности Т. фон Кармана, представляющая собой фактически феноменологическую модель турбулентного течения жидкости является классической основой для исследования эффектов в турбулентных течениях жидкости с ПТП. Модель дает связь с одной стороны, касательного напряжения между осредненными слоями потока жидкости, и, с другой стороны, скоростью сдвига.

4. При решении универсального уравнения сопротивления (уравнения Т. фон Кармана) автор предлагает учитывать механизм действия присадок:

– для ПТП объемного действия – константу Кармана считать функцией концентрации присадки;

– для ПТП поверхностного действия – дополнить уравнение крайевыми условиями взаимодействия со стенками движущегося турбулентного потока жидкости, в которую добавлена ПТП в определенной концентрации.

Во второй главе диссертации рассматриваются теории и методы, лежащие в основе формул и алгоритмов расчета снижения величины гидравлического сопротивления при турбулентном течении в них жидкостей с добавлением ПТП в трубах, плоских и кольцевых каналах. Исследуются случаи таких течений в области так называемых «гидравлически гладких труб», т.е. при пренебрежении влияния шероховатости стенок на коэффициент λ гидравлического сопротивления, а также с учетом такого влияния. Приведена полуэмпирическая феноменологическая теория сдвиговых турбулентных течений, предложенная Т. фон Карманом и модифицированная в дальнейшем для исследования турбулентных течений с ПТП.

Метод расчет коэффициента λ гидравлического сопротивления основан не на обработке экспериментов потерь давления при течении жидкости со средней по сечению скоростью v , а на использовании гидродинамической теории, определяющей распределение по сечению трубы скоростей $u(r)$ жидкости. По известным параметрам течения получим уравнение для расчета величины коэффициента λ гидравлического сопротивления:

$$\frac{\pi d^2}{4} \cdot \Delta p = \pi d \cdot l \cdot \tau_w, \quad (1)$$

где τ_w – касательное напряжение трения на внутренней поверхности стенки трубопровода;

l – длина сегмента трубопровода.

Тогда:

$$\frac{\Delta p}{l} = \frac{4}{d} \tau_w \quad \text{или} \quad \lambda \frac{1}{d} \cdot \frac{\rho v^2}{2} = \frac{4}{d} \tau_w. \quad (2)$$

Так как величина $\sqrt{\tau_w/\rho}$ имеет размерность скорости, то обозначим ее как u_* ; данную величину также называют динамической скоростью. Тогда:

$$u_*^2 = \frac{\lambda}{8} \cdot v^2 \quad \text{или} \quad \frac{u_*}{v} = \sqrt{\frac{\lambda}{8}}. \quad (3)$$

Таким образом, достаточно знать, как по известному значению u_* динамической скорости рассчитать среднюю по сечению скорость v , чтобы вычислить коэффициент λ гидравлического сопротивления этого течения.

Используем классическое уравнение феноменологической теории Т. фон Кармана как основу для описания квазистационарного движения жидкости в трубе в турбулентном режиме возьмем:

$$\frac{1}{\rho} \tau(r) = -u_*^2 \cdot \frac{r}{r_0} = \nu_T \frac{du}{dr} \quad (4)$$

Особенностью данного уравнения использование в нем «турбулентной» вязкости ν_T (непостоянной величины, зависящей от степени развитости турбулентности) жидкости вместо «обычной» вязкости (постоянной величины, не зависящей от степени развитости турбулентности). Именно Т. фон Карман предложил революционную для того времени идею, что турбулентную ν_T вязкость необходимо считать с учетом ее зависимости от первых двух производных от профиля осредненных по потоку жидкости скоростей (т.е. $u' = du/dr$ и $u'' = d^2u/dr^2$). Таким образом, можно считать, что турбулентная ν_T вязкость является функцией $\nu_T = \nu \cdot \Phi(\nu, u', u'')$, в которой представлена безразмерная Φ функция от своих же аргументов. Используя предложенную Л. Прандтлем «длину пути перемешивания», Карман предложил отношение данных двух производных u'/u'' считать этой «длиной». Так как при решении уравнения получаются три безразмерные величины (т.е. ν, u', u''), то в соответствии с теорией размерности физических величин, из них можно получить единственную безразмерную комбинацию вида $(u')^3/\nu(u'')^2$. Тогда предложенную Т. фон Карманом идею можно представить в виде:

$$\nu_T = \nu \cdot \Phi\left(\frac{u'^3}{\nu \cdot u''^2}\right). \quad (5)$$

Принимая во внимание известный факт, подтвержденный множеством экспериментов, что при движении жидкости в развитом турбулентном режиме ее молекулярная ν вязкость оказывает влияние только в очень узкой пристеночной области и практически не оказывает в центральной части потока (или же оказывает крайне малое, на порядки меньшее влияние, чем в пристеночной области), безразмерная функция Φ может быть только линейной по своему аргументу, а, следовательно, турбулентную вязкость ν_T можно определять без учета молекулярной вязкости ν следующей зависимостью:

$$\nu_T = k^2 \cdot \frac{|u'^3|}{u''^2} \quad \text{или} \quad \frac{\nu_T u''^2}{|u'^3|} = k^2 \quad \text{или} \quad k^2 \frac{|u'^3|}{u''^2} \frac{du}{dr} = -u_*^2 \cdot \frac{r}{r_0}. \quad (6)$$

где $k \approx 0,4$ – константа Кармана, величина которой определена множеством экспериментов. Последнее уравнение представляет полуэмпирическую модель Т. Кармана для турбулентного течения несжимаемой вязкой жидкости в круглой трубе. Фактически выражение для турбулентной вязкости сдвигового турбулентного течения можно рассматривать как реологическую модель турбулизованной среды, а модель Т. Кармана, основанную на этой реологии, – как феноменологическую модель турбулентности.

Интегрируя уравнение в области $0 \leq r \leq r_0$ трубопровода, причем $u'(r) \leq 0$ (скорость монотонно убывает от максимального значения в центре $r = 0$ трубы) и $u''(r) \leq 0$ (поскольку профиль скоростей имеет выпуклость вверх). Имеем:

$$u(r) = \frac{u_*}{k} \left[\sqrt{\frac{r}{r_0}} + C_1 + C_2 \cdot \ln \left| C_2 - \sqrt{\frac{r}{r_0}} \right| \right], \quad (7)$$

где C_1 и C_2 – постоянные интегрирования.

В соответствии с методом, предложенным в работах М.В. Лурье и Н.А. Подобы, удовлетворяя условию «прилипания», примем $u' = 0$ при $r = r_0$. Для чего необходимо принять $C_1 = -C_2 \cdot \ln |C_2 - 1|$, тогда:

$$u(r) = \frac{u_*}{k} \left[\sqrt{\frac{r}{r_0}} - 1 + C_2 \cdot \ln \left| \frac{C_2 - \sqrt{\frac{r}{r_0}}}{C_2 - 1} \right| \right]. \quad (8)$$

В теории Т. фон Кармана отсутствовало второе условие взаимодействия со стенкой трубы турбулентного потока перекачиваемой жидкости, которое указанными авторами было обосновано следующим образом: так как вблизи внутренней поверхности стенки трубы должна сказываться молекулярная вязкость ν жидкости, то второе условие должно связывать эту вязкость со следующими параметрами течения:

- $u'_w = \left. \frac{du}{dr} \right|_{r=r_0}$ – наклон профиля скоростей на стенках трубы, (c^{-1});
- $u''_w = \left. \frac{d^2u}{dr^2} \right|_{r=r_0}$ – кривизна профиля на стенках трубы, ($m^{-1}c^{-1}$);
- ν – молекулярная вязкость жидкости, (m^2/c);
- Δ – шероховатость внутренней поверхности трубопровода, (m).

Постоянная C_2 интегрирования находится как:

$$C_2 = 1 + \frac{1 + f(\varepsilon \operatorname{Re} \sqrt{\lambda/8})}{k \cdot k_1 \cdot \operatorname{Re} \sqrt{\lambda/8}}. \quad (9)$$

где $\varepsilon = \Delta/d$ – относительная шероховатость внутренней поверхности стенки.

Формула (8) с выражением постоянной C_2 интегрирования в виде (9) дает распределение скоростей осредненного турбулентного течения несжимаемой вязкой жидкости в круглой трубе. Таким образом, кинематическая структура распределения скоростей $u(r)$ течения может быть рассчитана по известному градиенту давления – т.е. известной величине динамической u_* скорости.

Универсальное уравнения сопротивления для коэффициента λ гидравлического сопротивления, как функции числа Re Рейнольдса и относительной ε эквивалентной шероховатости, имеет вид:

$$\sqrt{\frac{8}{\lambda}} = \frac{1}{k} \left[\ln \frac{k \cdot k_1 \cdot \operatorname{Re} \sqrt{\lambda/8}}{1 + f(\varepsilon \operatorname{Re} \sqrt{\lambda/8})} - 2,283 \right]. \quad (10)$$

В случае режима течения жидкости в трубе без добавления ПТП в области «гидравлически гладких труб», т.е. $f \equiv 0$, уравнение (10) переходит в известное универсальное уравнение сопротивления вида

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 0,884 \cdot \ln \frac{\text{Re} \sqrt{\lambda}}{1 + f(\varepsilon \text{Re} \sqrt{\lambda/8})} - 0,8 \quad \text{или} \quad \frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 0,884 \cdot \ln(\text{Re} \sqrt{\lambda}) - 0,8 \quad (11)$$

решение которого можно аппроксимировать известной формулой Блазиуса $\lambda = 0,3164/\text{Re}^{0,25}$. Константа $k(\theta)$ для ПТП поверхностного действия не изменяется и примерно равна 0,4; в то время как для ПТП объемного действия ее численное значение будет уменьшаться.

Для исследования величины изменения коэффициента λ гидравлического сопротивления за счет влияния шероховатости внутренней поверхности трубы автором использованы классические графики экспериментов И. Никурадзе, при этом в уравнении (11) вводится функция $Y = f(X)$, где $X = \varepsilon \text{Re} \sqrt{\lambda/8}$:

$$Y = f(X) = \begin{cases} \approx 0, & \text{если } \varepsilon \text{Re} \sqrt{\frac{\lambda}{8}} \leq 4,9; \\ 0,31 \cdot \left(\varepsilon \text{Re} \sqrt{\frac{\lambda}{8}} - 4,9 \right), & \text{если } \varepsilon \text{Re} \sqrt{\frac{\lambda}{8}} > 4,9 \end{cases}$$

или

$$f\left(\underbrace{\varepsilon \text{Re} \sqrt{\frac{\lambda}{8}}}_x\right) = \begin{cases} \approx 0, & \text{если } \varepsilon \text{Re} \sqrt{\frac{\lambda}{8}} \leq 4,9; \\ 0,31 \cdot \left(\varepsilon \text{Re} \sqrt{\frac{\lambda}{8}} - 4,9 \right), & \text{если } \varepsilon \text{Re} \sqrt{\frac{\lambda}{8}} > 4,9. \end{cases} \quad (12)$$

Для решения уравнения применим «кусочно-линейная аппроксимацию», т.е. заменим нелинейная зависимость графиков аппроксимации И. Никурадзе на линейную с конечным количеством участков (Рисунок 3)

Из Рисунка 3 можно отметить, что в диапазоне $X < 1$ значения функции достаточно малы, в этой области ее значения практически не зависят от относительной ε шероховатости стенки трубы. В диапазоне $0 \leq X \leq 4,9$ значения функции постепенно растут, но тоже мало отличимы от нуля. Т.е. область функции $Y = f(X)$, где $x = \varepsilon \text{Re} \sqrt{\lambda/8}$, можно определить как область «гидравлически гладких труб», в которой коэффициент λ гидравлического сопротивления зависит от числа Рейнольдса и определяется по формуле Блазиуса $\lambda = 0,3164/\text{Re}^{0,25}$.

В диапазоне при значении $X > 4,9$ значения функции $Y = f(X)$ растут существенно больше нуля (если точнее – то находятся в диапазоне значений от 0,5 и выше), что объясняется влиянием относительной ε шероховатости стенки трубы. Тогда функцию $Y = f(X)$ также можно представить аппроксимацией (Рисунок 4).

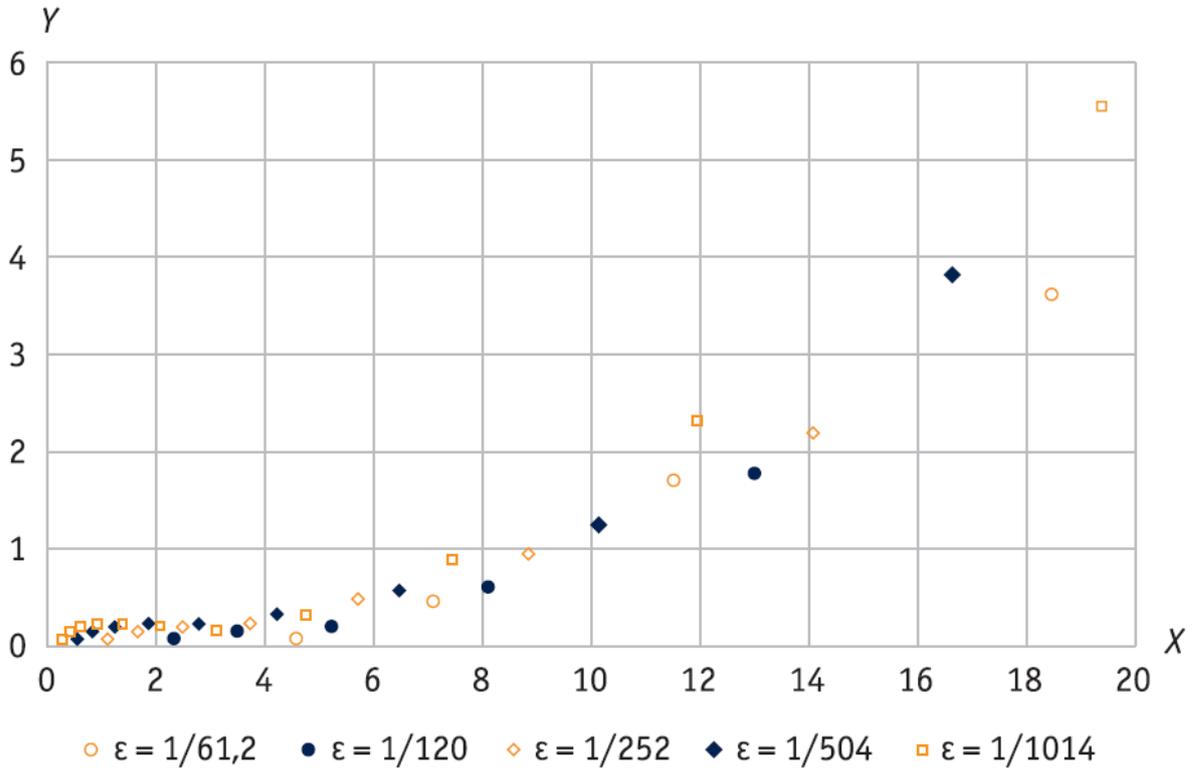


Рисунок 3 – Значения функции $f(X)$ от $X = \epsilon \operatorname{Re} \sqrt{\lambda/8}$ по результатам обработки экспериментов И. Никурадзе

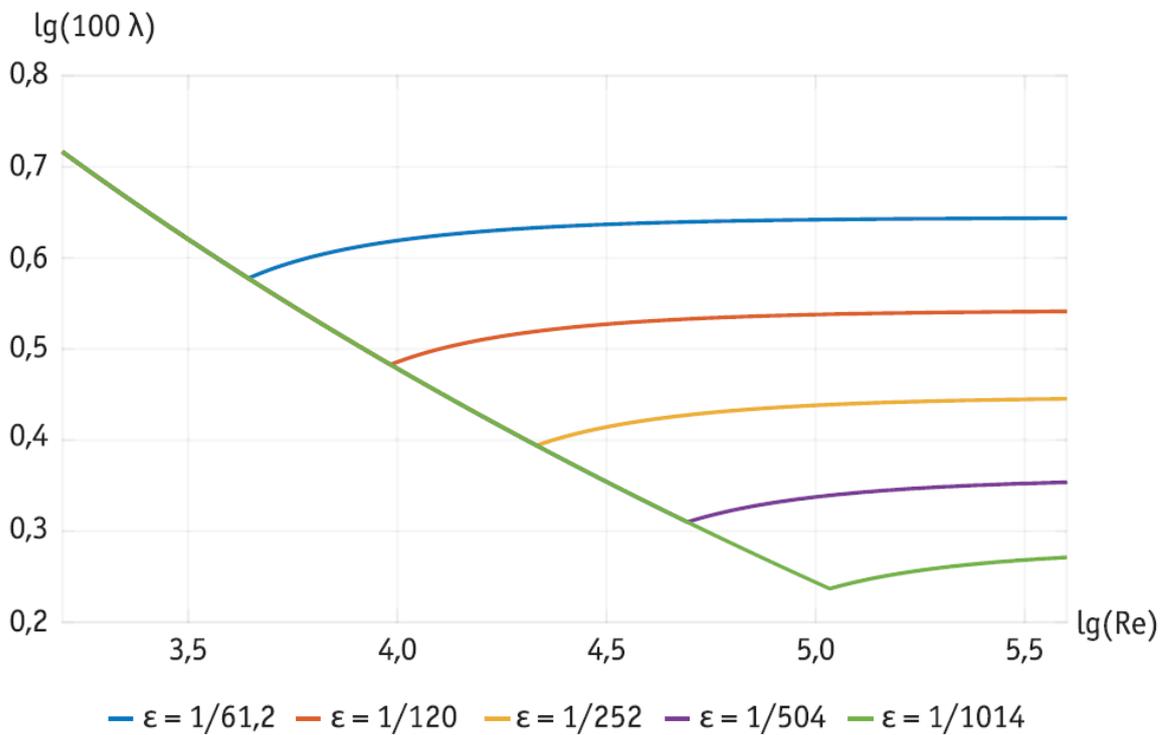


Рисунок 4 – Зависимости коэффициента λ гидравлического сопротивления и числа Re Рейнольдса, построенные на основе уравнения (11) с функцией (12)

На основе анализа данных зависимостей (Рисунок 4) отметим, что для каждого из рассмотренных значений шероховатости ε стенки внутренней поверхности трубы существуют такие значения числа Re Рейнольдса, при которых отсутствует или присутствует необходимость учитывать влияние шероховатости для расчета значения коэффициента λ . При малых значениях числа Re Рейнольдса коэффициент λ гидравлического сопротивления находится по формуле Блазиуса, соответствующей зоне «гидравлически гладких труб», а численные значения коэффициента λ зависят от конкретной трубы и шероховатости ее ε поверхности. По мере роста числа Re Рейнольдса коэффициент λ гидравлического сопротивления плавно «смещается» в зону «смешанного трения», при этом на него начинает оказывать влияние шероховатость ε внутренней поверхности стенки трубы. При дальнейшем росте числа Re Рейнольдса коэффициент λ гидравлического сопротивления достигает зоны «квадратичного трения», когда на величину коэффициента λ гидравлического влияет только шероховатость ε внутренней стенки трубы.

В общем виде, на величину коэффициента λ гидравлического сопротивления оказывают влияние число Re Рейнольдса (режим течения), относительная шероховатость ε внутренней поверхности стенки трубы и концентрация θ ПТП. Тогда для определения коэффициента $\lambda = \lambda(Re, \varepsilon, \theta)$ универсальное уравнение сопротивления (10) имеет вид:

$$\sqrt{\frac{8}{\lambda}} = \frac{1}{k} \left[\ln \frac{k \cdot k_1(\theta) Re \sqrt{\lambda/8}}{1 + f(\varepsilon Re \sqrt{\lambda/8}, \theta)} - 2,283 \right], \quad (13)$$

где $k_1 = k_1(\theta)$ – функция концентрации θ ПТП, определяемая по результатам экспериментов для каждой присадки отдельно, причем $k_1(0) = 28$.

Тогда функцию $f(\varepsilon, Re, \lambda, \theta)$ можно принять по аналогии с рассмотренный выше «кусочно-ломаной» аппроксимацией:

$$f\left(\varepsilon Re \sqrt{\frac{\lambda}{8}}, \theta\right) = \begin{cases} \approx 0, & \text{если } \varepsilon Re \sqrt{\frac{\lambda}{8}} \leq k_3(\theta); \\ k_2(\theta) \cdot \left(\varepsilon Re \sqrt{\frac{\lambda}{8}} - k_3(\theta)\right), & \text{если } \varepsilon Re \sqrt{\frac{\lambda}{8}} > k_3(\theta). \end{cases}, \quad (14)$$

где $k_2(\theta)$ и $k_3(\theta)$ – коэффициенты, зависящие от концентрации θ ПТП; однако, данные коэффициенты должны определяться по результатам обработки экспериментальных исследований, причем $k_2(0) = 0,31$ и $k_3(0) = 4,9$.

Также в главе 2 диссертации рассматриваются:

- способы и примеры расчета коэффициента λ гидравлического сопротивления с учетом шероховатости ε стенки труб и концентрации θ ПТП по результатам экспериментальных исследований

- обобщение универсального уравнения гидравлического сопротивления плоского канала с подвижной стенкой при использовании ПТП;

- определение гидравлической эффективности ПТП с учетом развитости турбулентного течения и шероховатости стенок трубы.

В заключении второй главы делаются выводы:

1. Так как в настоящее время отсутствует единая и общепризнанная гидравлическая теория турбулентного течения жидкости в трубах и каналах при наличии в потоке жидкости ПТП, то и отсутствует единая и общепризнанная методика определения коэффициента λ гидравлического сопротивления, как параметра, имеющего наибольшее значение для использования технологии перекачки нефти и нефтепродуктов с полимерными присадками.

2. По мнению автора, наиболее подходящей теорией для описания турбулентного течения в трубах и каналах является классическая обобщенная теория Т. фон Кармана, так как эта теория:

– *во-первых*, содержит гидродинамическую модель сдвиговых турбулентных течений, позволяющую рассчитывать профиль скоростей турбулентного течения на основе решения универсального дифференциального уравнения модели, вид которого не зависит от того, происходит ли соответствующее сдвиговое течение в круглой трубе или в плоском канале и каковы при этом параметры трубы или канала;

– *во-вторых*, конкретные решения дифференциальных уравнений модели определяются в полном соответствии с тем, как это традиционно делается в физике и математике – с помощью краевых условий, существующих на стенках труб или каналов, отражающих взаимодействие течения с ограничивающими его поверхностями.

3. Использование краевых условий на поверхностях, ограничивающих турбулентное течение, позволяет наиболее естественно учесть влияние малых полимерных присадок, которые изменяют (воздействуют на) эти краевые условия, а через них – как в целом, на течение жидкости, так и, в частности, на интегральные параметры течения, среди которых основным является коэффициент λ гидравлического сопротивления. ПТП изменяют условия течения в тонких пристеночных слоях и увеличивают наклон профиля осредненных скоростей на стенках труб и каналов.

4. Обоснован основной тезис диссертации, согласно которому в турбулентном режиме течения жидкости в трубах и каналах с параллельными стенками, в т.ч. подвижными, коэффициент λ гидравлического сопротивления необходимо определять из универсального уравнения сопротивления. Сугубо эмпирические формулы для расчета этого коэффициента не универсальны, не имеют общей методологической основы получения, зачастую дают некорректный результат. Автором усовершенствовано универсальное уравнение гидравлического сопротивления, предложен методологически логичный способ учета влияния шероховатости стенок внутренней поверхности каналов и труб.

5. Полученное универсальное уравнение сопротивления для плоских каналов с параллельными стенками с различной шероховатостью и допускающими движение одной из них относительно другой с постоянной скоростью в осевом направлении, позволяет рассчитывать коэффициенты гидравлического трения на стенках канала, в том числе при использовании ПТП.

6. Показано, что гидравлическая \mathcal{E} эффективность ПТП, т.е. снижение величины коэффициента λ гидравлического сопротивления при добавлении ПТП в поток перекачиваемой по трубе или в канале жидкости, зависит от параметров:

- относительная ε шероховатость стенок внутренней поверхности трубы или канала, при этом именно влияние шероховатости весьма существенно;
- степень развитости турбулентного режима, характеризующаяся числом Re Рейнольдса, при котором ПТП используется (хотя эта зависимость в количественном отношении меньше, чем зависимость от шероховатости);
- объемная концентрация θ самой присадки, степень влияния которой на изменение характеристик турбулентного режима необходимо определять экспериментально для каждой конкретной марки ПТП.

7. ПТП существенным образом влияют на увеличение величины наклона профиля осредненных скоростей (на стенках труб и каналов) к радиусу трубы в зависимости от их типа и концентрации, степень влияния может быть различной, что в сочетании с изменением величины относительной ε шероховатости существенно влияет на величину коэффициента λ гидравлического сопротивления.

В третьей главе диссертации рассмотрены вопросы тестирования гидравлических свойств ПТП на различных экспериментальных установках, т.е. стендах различной конфигурации, и в лабораторно-исследовательских приборах – вискозиметрах и реометрах. Одна из задач таких экспериментальных исследований состоит в получении исчерпывающих данных о гидравлической эффективности ПТП при ее использовании в трубопроводах с различными диаметрами, различной величиной шероховатости внутренней поверхности стенок труб, режимами транспортирования (в частности, величинами расходов и давлений перекачки), в жидкостях с различными плотностями и вязкостями. В большинстве стендовых и лабораторных исследований, тестирование присадок проводится, как правило, на установках, имеющих существенно меньшие размеры, чем реальные размеры объектов, на которых будет применяться ПТП в дальнейшем. Так как характер турбулентного течения жидкости в таких приборах не подобен характеру (режиму) течения реальной жидкости в эксплуатируемом трубопроводе, то возникает вопрос о корректности переноса экспериментально полученных результатов на модель течения жидкости в реальном трубопроводе.

Основная идея состоит в том, что предлагается использовать результаты экспериментальных исследований ПТП не для физического моделирования процессов в трубопроводах, а для определения инвариантных (постоянных) коэффициентов. Для конкретных типов и марок ПТП такие коэффициенты являются уникальными, так как отражают физику взаимодействия сдвигового турбулентного течения с ограничивающими его поверхностями и, кроме того, являются одинаковым для всех турбулентных течений – как в экспериментальной трубной установке (или в лабораторном приборе), так и в трубопроводе. Затем именно определенные экспериментально коэффициенты предлагается использовать в усовершенствованной модели турбулентности (универсальном уравнении сопротивления вязкой несжимаемой жидкости) для расчета ключевого параметра трубопроводной гидравлики – коэффициента λ гидравлического сопротивления в МН и МНПП.

Для учета результатов тестирования гидравлических свойств ПТП на

экспериментальных трубных стендах можно использовать универсальное уравнение сопротивления (13) и функцию аппроксимации (14) для определения коэффициентов $k_1(\theta)$, $k_2(\theta)$ и $k_3(\theta)$ в серии последовательных экспериментов.

Первую серию экспериментов рекомендуется осуществлять при относительно небольших значениях числа $10^4 < Re < 3 \cdot 10^4$ Рейнольдса – в области «гидравлически гладких труб», т.е. без учета шероховатости ε стенок труб, и принять из (10) следующую закономерность при $f(\varepsilon, Re, \lambda, \theta) = 0$:

$$\sqrt{\frac{8}{\lambda}} = \frac{1}{k} \left[\ln(k \cdot k_1(\theta) \cdot Re \sqrt{\lambda/8}) - 2,283 \right].$$

Так как константа Кармана равна 0,4, то $k_1(\theta)$ при заданном числе Re Рейнольдса и концентрации θ ПТП можно определить по формуле:

$$k_1(\theta) = \frac{1}{Re \cdot \sqrt{\lambda}} \cdot \exp \frac{1 + 3,745 \cdot \sqrt{\lambda}}{0,88 \cdot \sqrt{\lambda}}. \quad (15)$$

Вторую серию экспериментов рекомендуется осуществлять при значениях числа $Re > 3 \cdot 10^5$ Рейнольдса в области «квадратичного трения», т.е. без учета влияния самого числа Рейнольдса на величину коэффициента λ гидравлического сопротивления. Тогда из (10) справедлива закономерность:

$$\sqrt{\frac{8}{\lambda}} = \frac{1}{k} \left[\ln \frac{k \cdot k_1(\theta)}{\varepsilon \cdot k_2(\theta)} - 2,283 \right] \quad (16)$$

Коэффициент $k_2(\theta)$ определяется с учетом уже рассчитанного коэффициента $k_1(\theta)$ по итогам первой серии экспериментов:

$$\ln \frac{k_2(\theta)}{k_1(\theta)} = \frac{1 + 3,745 \sqrt{\lambda}}{0,88 \cdot \sqrt{\lambda}} - \ln \varepsilon. \quad (17)$$

Данное уравнение можно решить напрямую, для чего необходимо при проведении эксперимента на трубном стенде определить значения концентрации θ ПТП при нескольких значениях числа Re Рейнольдса, рассчитать для них соответствующие численные значения коэффициента λ гидравлического сопротивления, после чего обработать для уравнения (13) полученные результаты методом «наименьших квадратов»:

$$\exp \left(- \frac{1 + 3,745}{0,88 \cdot \sqrt{\lambda}} \right) = \frac{1}{Re \cdot \sqrt{\lambda}} \frac{1}{k_1(\theta)} + \varepsilon \frac{k_2(\theta)}{k_1(\theta)}. \quad (18)$$

При отсутствии ПТП, т.е. при $\theta = 0$, можно принять $k_2(0) = 0,31$ и $k_3(0) = 4,9$.

Для любого значения концентрации θ ПТП ее влияние на коэффициент λ гидравлического сопротивления уменьшается по мере достижения достаточно больших чисел Re Рейнольдса. Если при $Re \rightarrow \infty$ значение рассматриваемой функции $f(\varepsilon, Re, \lambda, \theta)$ больше $k_3(\theta)$, тогда:

$$\sqrt{\frac{8}{\lambda}} = \frac{1}{k} \left[\ln \frac{k \cdot k_1(\theta)}{1 + k_2(\theta) \cdot \varepsilon} - 2,283 \right].$$

Подчеркнем, что отношение между собой коэффициентов $k_2(\theta)$ и $k_3(\theta)$ должно быть инвариантом (постоянным) для всех концентраций θ ПТП, при этом $k_2(\theta) = 0,011 \cdot k_1(\theta)$. Если значение рассматриваемой функции $f(\varepsilon, Re, \lambda, \theta)$

меньше $k_3(\theta)$, то режим течения происходит в области «гидравлически гладких» труб, а имеющаяся шероховатость ε трубы постепенно снижает эффективность ПТП, а при дальнейшем росте турбулентности $Re \rightarrow \infty$, полностью нивелирует действие ПТП. При таких числах Рейнольдса режим течения перемещается в область «квадратичного трения», в которой коэффициент λ гидравлического сопротивления не зависит от числа Рейнольдса.

Для учета результатов тестирования гидравлических свойств ПТП в дисковых реометрах необходимо учитывать, что при достаточно большой скорости возникает сдвиговое турбулентное течение в рабочем зазоре между вращающимся диском и неподвижным кожухом. Добавление в жидкость ПТП с различной θ концентрацией позволяет оценить ее влияние на уменьшение скорости вращения диска и коэффициента гидравлического сопротивления. Необходимо отметить, что в указанном зазоре между подвижным диском и неподвижным кожухом режим течения жидкости не подобен режиму течения нефти или нефтепродуктов в участке магистрального трубопровода. Поэтому требуется пересчитывать получаемые экспериментальные данные для их дальнейшего использования на этапе технологического проектирования, эксплуатации и реконструкции магистральных трубопроводов.

На практике многими исследователями используется следующий метод оценки эффективности действия ПТП: измеряются значения момента силы (крутящего момента) для жидкости без ПТП и после добавления с определенной концентрацией ПТП, которая уменьшает коэффициент C_f гидравлического трения, где $\tau_w = C_f \cdot \rho V^2 / 2$ (в этой формуле V – скорость вращающегося диска относительно его неподвижного кожуха). Между неподвижными стенками кожуха и вращающимся с большой частотой вращения диском формируется радиально-симметричное течение (Рисунок 5).

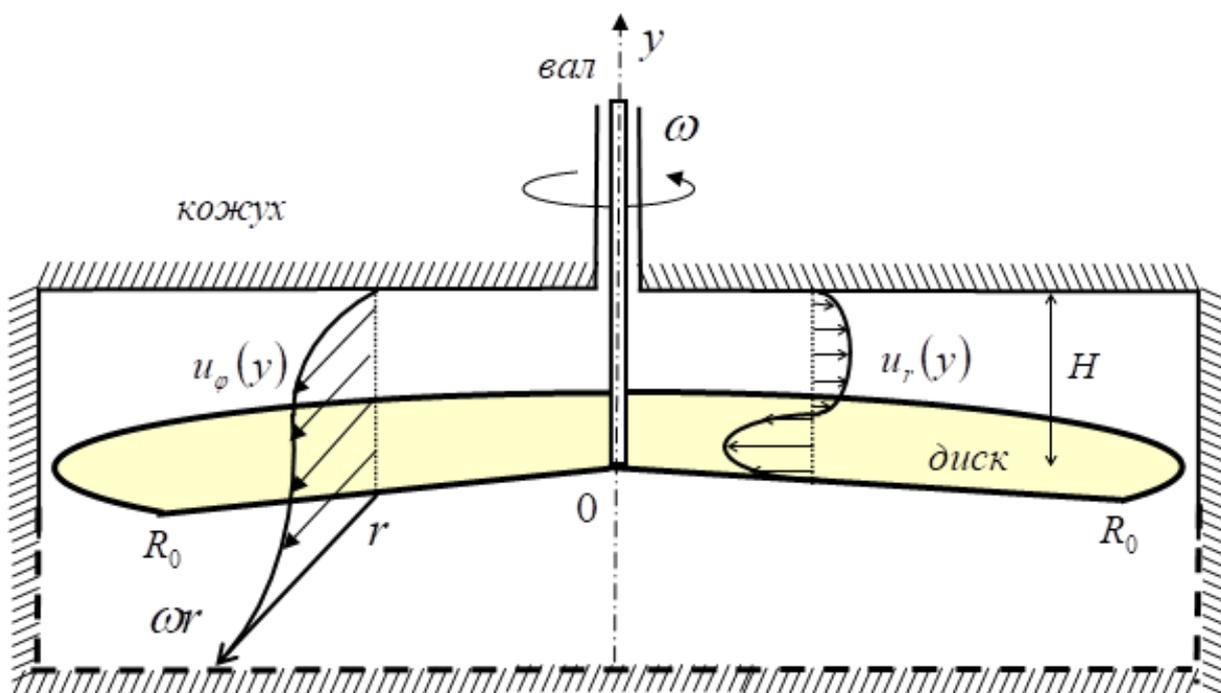


Рисунок 5 – Распределение скоростей в реометре с вращающимся диском

Вектор \vec{U} скорости которого имеет следующие составляющие: окружная u_ϕ , радиальная u_r и осевая u_y . Все три компонента скорости зависят от расстояния r от оси вращения ($0 < r < r_0$, где r_0 – радиус) и координаты расстояния y от плоскости диска. На вращающейся поверхности вектор $\vec{U} = \{\omega r, 0, 0\}$, а на неподвижных поверхностях вектор $\vec{U} = 0$. Рабочая часть реометра, т.е. зазор между диском и кожухом, имеет горизонтальные размеры много большие, чем вертикальные, т.е. $H \ll r_0$, а окружная скорость ωr точек диска по отношению к неподвижному кожуху, велика, поэтому в модели циркуляционного течения жидкости в приборе правомерно выделить интенсивное окружное движение, пренебрегая радиальной и вертикальной компонентами движения, т.е. правомерно считать $\vec{U} = \{u_\phi(y), 0, 0\}$, причем $u_\phi(0) = \omega r$ и $u_\phi(H) = 0$, $0 < r \leq r_0$.

Также в пространстве между поверхностями кожуха и диска формируются две области с различными гидравлическими режимами течения – ламинарным и турбулентным. Такое течение называется «течением Куэтта». Граница между ламинарной и турбулентной областями (режимами) находится на некотором расстоянии r^* от оси вращения, которому соответствует критическое значение числа Рейнольдса, численно равное примерно 3 000. Ламинарная область «течения Куэтта» формируется в той области диска, которая находится от оси вращения на относительно небольшом r расстоянии, т.е. $0 < r < r^*$; линейная скорость $V = \omega r$ движущейся стенки (вращающегося диска) также относительно невелика и число Рейнольдса определяется по формуле $Re = \omega r H / \nu \leq Re_{кр} \approx 3\,000$. Турбулентная область «течения Куэтта» развивается в той области диска, которая находится от оси вращения $r^* < r < r_0$ на существенно большем расстоянии; при этом линейная скорость $V = \omega r$ движущейся стенки (вращающегося диска), также существенно больше и $Re = \omega r H / \nu > Re_{кр}$.

В ламинарном режиме коэффициент C_f трения определяется как:

$$C_f = \frac{2}{Re}.$$

В турбулентном режиме коэффициент C_f определяется из уравнения:

$$\sqrt{\frac{2}{C_f}} = \frac{2}{k} \cdot \ln \left[\frac{0,5k \cdot k_1}{1 + f(\varepsilon Re \sqrt{C_f}/2)} Re \sqrt{\frac{C_f}{2}} + 1 \right]. \quad (19)$$

Если ПТП не используется, т.е. $k \approx 0,4$ и $k_1 = 28$, и стенки абсолютно гладкие, т.е. шероховатость $\varepsilon = 0$, то $f(0) = 0$, уравнение упрощается:

$$\frac{1}{\sqrt{C_f}} = 3,54 \cdot \ln [3,96 \cdot Re \sqrt{C_f} + 1]. \quad (20)$$

Его приближенное решение дается зависимостью $C_f \cdot Re^{0,25} = 0,0154$, которая весьма похожа на известное уравнение Блазиуса, хотя и отличается от него коэффициентом. Если $k_1 = k_1(\theta)$ и $f = f(\varepsilon Re \sqrt{C_f}/2, \theta)$, тогда:

$$\sqrt{\frac{2}{C_f}} = \frac{2}{k} \cdot \ln \left[\frac{0,5k \cdot k_1(\theta)}{1 + f(\varepsilon Re \sqrt{C_f}/2, \theta)} Re \sqrt{\frac{C_f}{2}} + 1 \right]. \quad (21)$$

Решение при этом функции $f = f(\varepsilon Re \sqrt{C_f}/2, \theta)$ имеет вид:

$$f\left(\varepsilon \operatorname{Re} \sqrt{C_f/2}\right) = \begin{cases} 0, & \text{если } \varepsilon \operatorname{Re} \sqrt{\frac{C_f}{2}} \leq k_3(\theta); \\ k_2(\theta) \left(\varepsilon \operatorname{Re} \sqrt{\frac{C_f}{2}} - k_3(\theta) \right), & \text{если } \varepsilon \operatorname{Re} \sqrt{\frac{C_f}{2}} > k_3(\theta) \end{cases}, \quad (22)$$

где $k_2(\theta)$ и $k_3(\theta)$ – инвариантные (постоянные) коэффициенты, которые «показывают» наличие областей, соответственно, «гидравлически гладких труб» и «смешанного трения» и зависят от концентрации θ ПТП. Для многих марок ПТП $k_1(0)=28$; $k_2(\theta)=k_1(\theta)/90$, $\Rightarrow k_2(0) = 28/90 = 0,31$ и $k_3(0) = 4,9$. Если:

- $\varepsilon \operatorname{Re} \sqrt{C_f/2} \leq k_3(\theta)$, то режим течения – турбулентный в области «гидравлически гладких труб»;
- $\varepsilon \operatorname{Re} \sqrt{C_f/2} > k_3(\theta)$, то режим течения также турбулентный, но уже в области «смешанного трения».

На Рисунке 6 представлены графики решения уравнения (22) для коэффициента $C_f(Re, k_1)$ гидравлического трения от параметра $\xi = Re/Re_{кр}$ (число Рейнольдса $Re = \omega r H / \nu$) для некоторых значений k_1 коэффициента (значение шероховатости ε принято 0,02) для ПТП марки «Nessad-447».

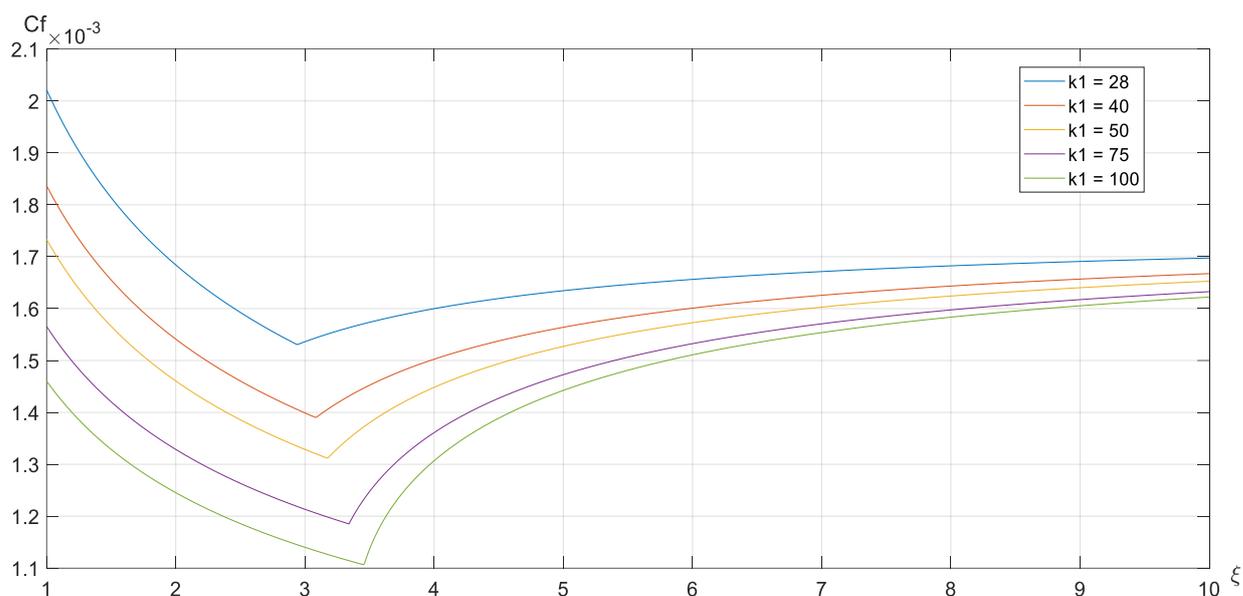


Рисунок 6 – Зависимости коэффициента $C_f(Re, k_1)$ гидравлического трения от параметра $\xi = Re/Re_{кр}$ для некоторых значений k_1 коэффициента

Анализируя графические зависимости коэффициента C_f , можно выделить следующие области для турбулентного режима течения:

- «гидравлически гладких труб», т.е. гладкой поверхности диска (в левой части рисунка), в которой происходит монотонное уменьшение коэффициента C_f по мере увеличения числа Re Рейнольдса;
- «смешанного трения», т.е. области, в которой уже оказывает влияние шероховатость ε диска (в центральной части рисунка), в результате чего коэффициент C_f постепенно увеличивается и выходит на некоторую горизонтальную асимптоту;

– «квадратичного трения», т.е. области, в которой коэффициент C_f зависит только от шероховатости ε диска (в правой части рисунка и далее за его пределами), что характеризуется асимптотическим схождением зависимостей на бесконечности на одну прямую для различных значений k_l коэффициента.

С помощью значений коэффициента C_f гидравлического трения можно определить момент M сопротивления диску жидкости в реометре:

$$\frac{M(\omega, k_l)}{2\pi\rho\omega^2} = \int_0^{r_0} C_f \cdot r^4 dr = \left(\frac{v}{\omega H} \text{Re}_{\text{кр.}} \right)^5 \cdot \left[\frac{1}{2\text{Re}_{\text{кр.}}} + \int_2^{\text{Re}/\text{Re}_{\text{кр.}}} C_f \cdot \xi^4 d\xi \right]. \quad (23)$$

Момент сопротивления без ПТП ($\theta = 0$, $k_l = 28$) обозначим $M_0 = M(\omega, 28)$. Тогда гидравлическая \mathcal{E} (или $DR, \%$) эффективность определяется:

$$DR = \frac{M(\omega, k_l) - M_0(\omega, 28)}{M_0(\omega, 28)} \cdot 100\%. \quad (24)$$

На Рисунке 7 представлено распределение момента касательных напряжений по радиусу диска в области турбулентного течения, из которых следует, что при увеличении коэффициента k_l момент $2\pi\rho\omega^2 \cdot C_f \cdot r^4 dr$ соответствующих касательных напряжений увеличивается от центральной части к краям вращающегося диска, причем, чем больше коэффициент k_l , тем меньше абсолютное значение момента этих напряжений.

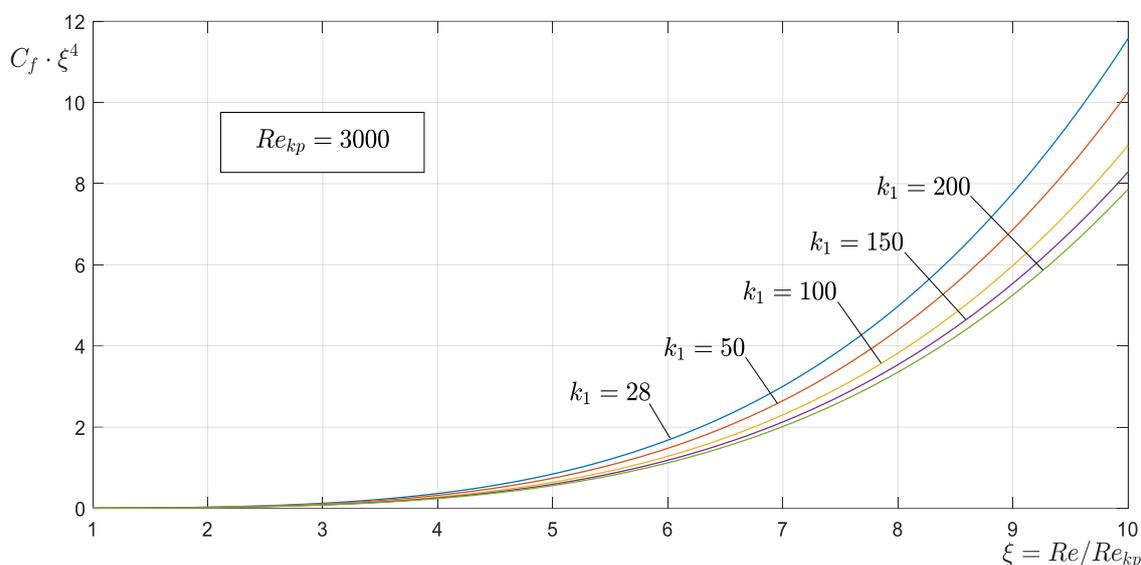


Рисунок 7 – Графики зависимости удельного момента $C_f \xi^4$ трения от числа Re Рейнольдса для некоторых значений инвариантного коэффициента k_l

Очевидно, что любое технологическое мероприятие, ведущее к увеличению инвариантного коэффициента k_l , который учитывает условие взаимодействие движущегося турбулентного потока жидкости со стенками (вращающегося диска или неподвижного кожуха), приводит к уменьшению сопротивления жидкости вращающемуся в ней диску. Таким мероприятием является введение в турбулентный поток жидкости ПТП с концентрацией θ .

Для учета результатов тестирования гидравлических свойств ПТП

ротационных реометрах (вискозиметрах) необходимо учитывать особенности конструкции, при которой испытуемую жидкость помещают в цилиндрический зазор между цилиндрами. Внешний цилиндр вращается с постоянной угловой скоростью, внутренний цилиндр покоится, находясь в равновесии под действием момента сил трения, передаваемых ему от вращающегося цилиндра через жидкость, и удерживающего момента пружины реометра. Чтобы понять структуру турбулентного течения жидкости, рассмотрим кольцевой зазор между двумя коаксиальными цилиндрами с радиусами r_0 меньшего цилиндра и r_1 большего цилиндра, т.е. $r_0 < r_1$. Внешний цилиндр вращается вокруг общей оси с постоянной угловой скоростью ω , внутренний цилиндр неподвижен. Структура течения Куэтта (Рисунок 8) характеризуется только окружной компонентой u_φ скорости $u_\varphi = u(r)$, которая зависит от радиальной r координаты $r_0 \leq r \leq r_1$, где r_0 и r_1 – радиусы, соответственно, внутреннего неподвижного и внешнего подвижного цилиндров, скорости $u(r_0) = 0$ и $u(r_1) = \omega r_1 = V$.

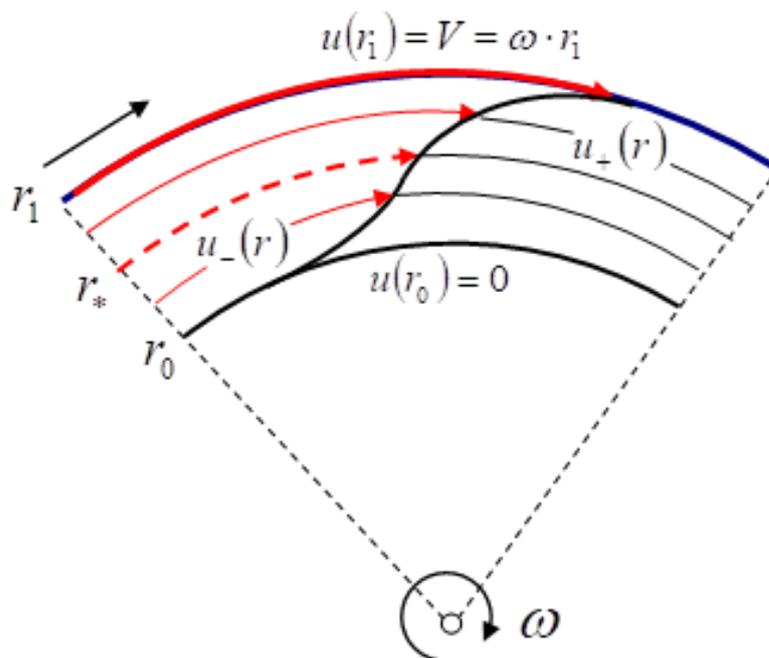


Рисунок 8 – Схема турбулентного течения жидкости в кольцевом зазоре между коаксиальными цилиндрами в ротационном вискозиметре

Так как профиль турбулентных скоростей является двояковыпуклым, его нижняя часть $u_-(r)$, примыкающая к внутреннему цилиндру (обозначена субиндексом «-»), выпукла вверх; а его верхняя часть $u_+(r)$, примыкающая к вращающемуся цилиндру (обозначена субиндексом «+»), выпукла вниз. Для течения жидкости в кольцевом зазоре определим число Re Рейнольдса и касательное напряжение $\tau_{\omega 0}$ трения на поверхности неподвижного цилиндра через коэффициент C_f трения на его же поверхности:

$$Re = V(r_1 - r_0) / \nu \equiv \frac{V r_1}{\nu} \left(1 - \frac{r_0}{r_1}\right) = \frac{\alpha - 1}{\alpha} \cdot \frac{V r_1}{\nu}, \quad \tau_{\omega 0} = C_f \frac{\rho V^2}{2} = \rho u_{*0}^2.$$

Трансцендентное универсальное уравнение для расчета коэффициента C_f трения на поверхности неподвижного цилиндра имеет вид:

$$\sqrt{\frac{2}{C_f}} = \frac{\alpha}{k} \left[\frac{1}{C_1} \ln \left[\frac{2(\alpha-1)}{k \cdot k_- \operatorname{Re} \sqrt{C_f/2}} \cdot \frac{C_2 - C_1}{C_1 + C_2} \right] - \frac{1}{C_2} \ln \left[\frac{2(\alpha-1)}{k \cdot k_+ \operatorname{Re} \sqrt{C_f/2}} \cdot \frac{C_2 - C_1}{C_1 + C_2} \right] \right], \quad (25)$$

Это уравнение можно также назвать универсальным уравнением трения для неподвижного цилиндра, при этом $\alpha = r_1/r_0$, а коэффициенты C_1 и C_2 интегрирования находятся по формулам:

$$C_1 = -1 + \frac{2(\alpha-1)}{k \cdot k_- \operatorname{Re} \sqrt{C_f/2}} \quad \text{и} \quad C_2 = \alpha^2 + \frac{2(\alpha-1) \cdot \alpha^2}{k \cdot k_+ \operatorname{Re} \sqrt{C_f/2}}. \quad (26)$$

В частном случае, когда поверхности обоих цилиндров обладают одинаковой шероховатостью, т.е. $k_- = k_+ = k$ (если оба цилиндра гидравлически гладкие, тогда $k = 28$), и при больших числах Re Рейнольдса через коэффициенты $C_1 \approx 1$ и $C_2 \approx \alpha^2$ уравнение существенно упрощается и имеет вид:

$$\sqrt{\frac{2}{C_f}} = \frac{1}{k} \cdot \frac{\alpha^2 + 1}{\alpha} \ln \left[\frac{\alpha + 1}{\alpha^2 + 1} \cdot \frac{k \cdot k \operatorname{Re} \sqrt{C_f/2}}{2} \right]. \quad (27)$$

Если отношение α радиусов коаксиальных цилиндров близко к единице, т.е. $\alpha \approx 1$, то коэффициент C_f зависит, главным образом, от числа Re Рейнольдса $Re = V \cdot (r_1 - r_0) / \nu$, но не от отношения α радиусов. На Рисунке 9 представлена зависимость $C_f = C_f(Re)$ коэффициента трения на внутреннем (неподвижном) цилиндре при соотношении $\alpha = r_1/r_0$ в диапазоне $1,05 \leq \alpha \leq 1,10$; аппроксимирующая зависимость коэффициента имеет вид $C_f = 0,0153 Re^{0,25}$. При заданном значении α , характеризующем ротационный реометр (вискозиметр), известных критериях Re и ε , трансцендентные уравнения разрешаются относительно коэффициента C_f трения методом итераций. Затем по этому коэффициенту рассчитывается момент M сил на единицу высоты цилиндра, необходимых для удержания в положении покоя внутреннего цилиндра при вращении внешнего с угловой ω скоростью $M = 2\pi r_0 \cdot C_f \cdot \rho V^2 / 2$, где $V = \omega \cdot r_1$.

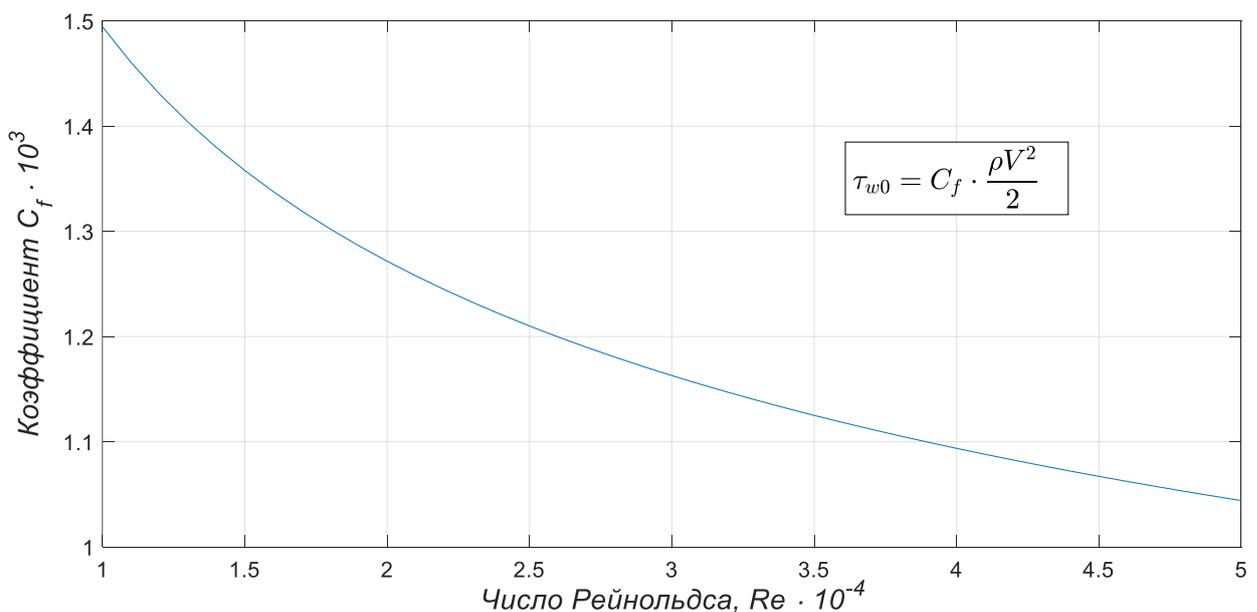


Рисунок 9 – Зависимость $C_f = C_f(Re)$ коэффициента трения на внутреннем (неподвижном) цилиндре ротационного вискозиметра

Как было отмечено ранее, если стенки ротационного вискозиметра гладкие и ПТП не вносятся, то $k_l = 28$ и функции $f = 0$. Добавление же ПТП делает оба коэффициента зависящими от ее концентрации θ так, что $k_l = k(\theta)$ и $f = f(\theta)$, причем обе эти функции являются *универсальными*. Это означает, что они одинаково применимы и для турбулентного течения в вискозиметрах (реометрах) ротационного типа, и для течения в трубопроводах, поэтому, определив их в результате экспериментов, можно далее использовать их для прогноза уменьшения коэффициента λ гидравлического сопротивления в реально эксплуатируемом трубопроводе или при его технологическом проектировании. Например, если поверхности внешнего и внутреннего цилиндров вискозиметра считать гладкими, то при $\alpha = r_1/r_0$ примерно равным 1, коэффициент $k_l = k(\theta)$ можно вычислять из экспериментов по формуле:

$$k(\theta) \cong \frac{2}{k} \frac{1}{\text{Re} \sqrt{C_f(\text{Re}, \theta)/2}} \cdot \exp\left(\frac{k}{2} \sqrt{\frac{2}{C_f(\text{Re}, \theta)}}\right). \quad (28)$$

В общем случае тестирование выполняется в следующем порядке. Задается определенное значение концентрации θ ПТП конкретной марки. Изменяя число оборотов $2\pi/\omega$ внешнего цилиндра, по моменту M сил находится значение касательного напряжения $\tau_{\omega 0}$ трения на поверхности неподвижного цилиндра и, следовательно, коэффициент C_f трения. Далее из уравнения (3.45) рассчитываются $k_l = k(\theta)$ и $f = f(\theta)$, которые используются для расчета величины коэффициента λ гидравлического сопротивления в реально эксплуатируемом трубопроводе или же при его технологическом проектировании.

В заключении третьей главы делаются выводы:

1. Исходя из конструктивных отличий реально эксплуатируемых или проектируемых магистральных трубопроводов, предназначенных для перекачки нефти и нефтепродуктов, от различных экспериментальных установок (трубопроводных стендов различной конфигурации) и лабораторно-исследовательских приборов (дисковых реометров и ротационных вискозиметров), прямой перенос характеристик ПТП, получаемых в результате таких исследований, некорректен.

2. Автором предлагается использовать результаты экспериментов для определения инвариантных (неизменных) коэффициентов, на которых базируется теория турбулентности. Для конкретных типов и марок ПТП такие инвариантные коэффициенты являются одинаковым для турбулентных течений – как в экспериментальных установках, так и трубопроводах.

3. Для исключения или минимизации недостоверности результатов экспериментальных исследований, которые могут быть связаны с полной или частичной деструкцией (разрушением) ПТП, рекомендуется применять объемные устройства, например, автоматические шнековые дозаторы.

4. Показано, что полученные в результате обработки различных экспериментов данные по снижению момента силы (крутящего момента), получаемые на лабораторно-исследовательских приборах, как правило, в $1,5 \div 2,5$ раза меньше реального изменения величины гидравлической эффективности при

добавлении такой же ПТП с той же концентрацией в магистральные трубопроводы для перекачки нефти и нефтепродуктов.

5. Так как при наличии ПТП в определенной концентрации эффект снижения момента силы (крутящего момента) диска обусловлен не только гидравлическим режимом в зазоре, но также трением на его поверхности экспериментальных приборов, то при расчетах необходимо использовать относительную ε шероховатость, моделируя ее на различных жидкостях с добавлением ПТП в разных концентрациях (так как определить реальную шероховатость Δ поверхности диска путем прямого измерения крайне сложно).

6. Перед применением ПТП на магистральных трубопроводах, транспортирующих нефть и нефтепродукты, необходимо обеспечить пересчет (моделирование) гидравлических свойств ПТП по результатам экспериментальных исследований на трубных стендах, в дисковых реометрах и ротационных вискозиметрах. При этом для расчета коэффициента λ гидравлического сопротивления целесообразно применять экспериментально определенные инвариантные коэффициенты, входящие в граничные условия – «прилипания» и «взаимодействия движущегося турбулентного потока жидкости со стенками» усовершенствованной модели турбулентности (универсального уравнения сопротивления вязкой несжимаемой жидкости).

В четвертой главе диссертации излагаются гидравлических аспектов перекачки по магистральным трубопроводам нефти и нефтепродуктов с ПТП. Для того чтобы получить экономический и технологический эффект от их использования недостаточно обеспечивать сохранение их физико-химических свойств, условий хранения, транспортировки и применения. Также необходимо на основе гидравлических методов расчета прогнозировать желаемые результаты и способы их достижения

Специфика перекачки углеводородов по магистральным нефтепроводам (МН) и магистральным нефтепродуктопроводам (МНПП) в целом и с ПТП в частности, состоит в том, что перегоны между последовательно расположенными насосными станциями (НС) не работают независимо друг от друга, а гидравлически связаны. Каждый магистральный трубопровод (МТ) разбит на отдельные технологические участки (ТУ) – это основной гидравлический и эксплуатационный сегмент МТ. Каждый ТУ представляет собой 4-6 отдельных перегонов между последовательно расположенными НС с резервуарными парками, гидравлически связанными друг с другом, т.е. работающими в эксплуатационном режиме перекачки «из насоса – в насос». Изменение гидравлического режима перекачки на одном из перегонов ТУ, приводит к изменению режимов перекачки на других перегонах.

Основной целью МТ является бесперебойная транспортировка потребителям нефти и нефтепродуктов. Для обеспечения заданной пропускной способности разрабатываются «карты режимов», в которых учитываются все эксплуатационные особенности МТ. С учетом того, что разветвленная сеть МТ – это энергоемкая система, то для сокращения затрат электроэнергии на перекачку при сохранении существующей пропускной способности (при отключенных насосных агрегатах) или же увеличения пропускной способности

(при всех включенных насосных агрегатах) может предусматриваться добавление ПТП в транспортируемую жидкость – нефть или нефтепродукт.

С учетом того, что при прохождении через насосы на НС молекулы ПТП разрушаются (этот процесс называется деструкцией ПТП), а ее концентрация на отдельных перегонах ТУ может различаться, то при необходимости использования ПТП ее вводят на каждой НС после прохождения магистральных насосов. При этом, кроме обеспечения задачи увеличения пропускной способности МТ, использование ПТП оказывает влияние на параметры эксплуатации:

- может изменяться «рабочая точка» на совмещенной $Q-H$ -характеристике участка МТ и группы насосов, так как между ними существует гидравлическая связь и изменение расхода приводит к изменению напора;

- при изменении «рабочей точки» эксплуатационный режим для данного ТУ на отдельной НС или даже на нескольких НС может отклониться от «оптимального», что приведет к уменьшению КПД насосов и, как следствие, перерасходу электроэнергии на перекачку по трубе партий товарных продуктов;

- при изменении гидравлического режима на НС также меняется и гидравлический режим на линейном участке трубопровода, что приводит к изменению коэффициента λ гидравлического сопротивления и гидравлического i уклона, в результате чего происходит перераспределение напоров на входе в НС и на выходе из НС;

- такие напоры имеют технологические особенности: на входе в НПС создается обязательный «подпор» для исключения кавитации в магистральных насосах, а на выходе из НПС – напор ограничивается для недопущения превышения несущей способности трубы (максимального разрешенного в ней напора); перераспределение же напоров во входном и выходной трубопроводах НПС может привести к нарушению таких ограничений, срабатыванию аварийных систем защиты и невозможности эксплуатации ТУ в таком режиме;

- так как существуют эксплуатационные отличия на НС (например, в работе находятся разные марки или диаметры рабочих колес насосов) и линейных перегонах ТУ (например, различные наружные диаметры трубы и способ заложения, характеристики температуры, особенности рельефа и пр.), то концентрация ПТП на каждом из таких перегонов ТУ должна определяться индивидуально, но с учетом того, что весь ТУ – это единая гидравлически взаимосвязанная система из таких отдельных перегонов.

Рассмотрим происходящие изменения на примере перекачки нефти по ТУ, состоящему всего из двух насосных станций – головной (ГНПС) и промежуточной (ПНПС) и двух перегонов (Рисунок 10). Предположим, что для увеличения пропускной способности на втором перегоне вводится ПТП, что снижает коэффициент λ гидравлического сопротивления на линейном участке; расход (пропускная способность) увеличится, вследствие чего:

- дифференциальные ΔH_1 и ΔH_2 напоры на, соответственно, ГНПС и ПНПС уменьшатся и установятся новые $\Delta H_1'$ и $\Delta H_2'$ напоры;

- скорость перекачки нефти на первом перегоне вырастет из-за увеличения расхода, а на втором перегоне уменьшится из-за действия ПТП;

– гидравлический i_1 уклон на первом перегоне изменится и новый гидравлический i_1' уклон будет «круче» ($i_1' > i_1$); гидравлический i_2 уклон на втором перегоне также изменится и новый гидравлический i_2' уклон также будет «круче» ($i_2' > i_2$), но при этом, новый гидравлический i_2' уклон будет более «пологим», чем новый гидравлический i_1' уклон, т.е. $i_2' < i_1'$;

– пьезометрические напоры уменьшатся и напор на выходе ГНПС и ПНПС, переместится, соответственно, из точки A в точку A' , и из точки C в точку C' ; одновременно с этим напор A'' на входе в ГНПС останется неизменным (он определяется по уровню взлива нефти в резервуаре), а напор на входе в ПНПС переместится из точки B в точку B' ; с учетом изменившейся линии гидравлического i_1' уклона на первом перегоне, новый напор B' на входе в ПНПС – подпор перед станцией – может стать по величине меньше минимально допустимого давления (по кавитационному запасу на входе) и привести к ее аварийному отключению (или к включению дроссельных регуляторов, что делает режим эксплуатации менее энергоэффективным).

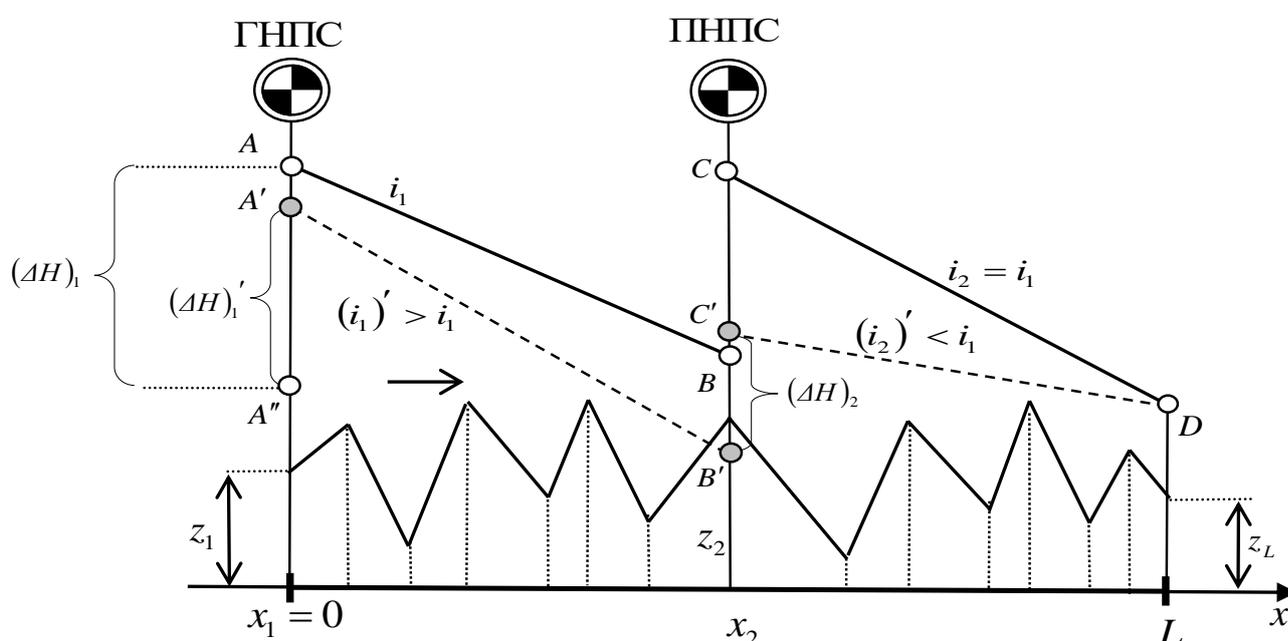


Рисунок 10 – Пример ТУ МН, состоящего из 2х НПС и 2х перегонов, при вводе ПТП на НПС

В целом, такая ситуация для ТУ весьма показательна – изменение гидравлического режима на одном перегоне неизбежно приводит к изменению режима на других перегонах. Поэтому перед использованием ПТП необходимо производить полный гидравлический расчет для всех участков ТУ. В работе П.А. Ревель-Муроza детально рассмотрены общие эксплуатационные характеристики ТУ, в т.ч. вопросы обеспечения высоких КПД ТУ для сокращения энергоемкости транспортировки нефти и нефтепродуктов.

Рассмотрим методику гидравлического расчета стационарной работы ТУ МТ при использовании ПТП на примере трубопровода постоянного внутреннего d диаметра, который работает с расходом перекачки нефти $Q = const$. На каждом из перегонов ТУ добавляется ПТП, с концентрацией θ_i ($i = 1, 2, 3, \dots K$). Так как

$$h_m \geq \frac{P_y}{\rho g} + h_{\text{кав.}m}(Q), m = 2, 3, \dots K$$

и линии нагнетания (максимальное давление нагнетания):

$$H_{\text{ст.}m} = h_m + \Delta H_m \leq \frac{P_{\text{max.}m}}{\rho g} = H_{\text{max.}m} \quad m = 2, 3, \dots K,$$

где $h_{\text{кав.}m}(Q)$ – кавитационный запас магистрального насоса, определяемый по его паспортной ($Q - H$) – характеристике;

$H_{\text{ст.}m}$ – напор, созданный всеми работающими насосами (на выходе) НПС;

$P_{\text{max.}m}$ – максимально допустимое давление в m -м участке трубопровода;

$H_{\text{max.}m}$ – несущая способность m -го участка трубопровода.

При этом, линия распределения полного напора $H(x)$ по длине перегона для данного значения расхода в каждом рассматриваемом x сечении должна проходить «ниже» ее $H_{\text{max}}(x)$ несущей способности и «выше» геодезических отметок $z(x)$ профиля трубопровода, т.е.:

$$z(x) < H(x) \leq H_{\text{max}}(x). \quad (32)$$

В начале 2000-х гг. руководителем московской научной школы трубопроводной гидравлики профессором М.В. Лурье и профессором А.С. Дидковской был разработан алгоритм гидравлического расчета ТУ с учетом характеристик насосного оборудования и линейной части трубопровода без использования ПТП. Как было сказано выше, введение в поток перекачиваемой жидкости ПТП приводит к изменению карты режимов ТУ. А применение ПТП на разных перегонах ТУ с различной концентрацией еще больше усложняет задачу, увеличивая множество возможных вариантов эксплуатации трубопровода. В результате требуется разработка новой методики (алгоритма) гидравлического расчета ТУ магистральных трубопроводов для перекачки нефти и нефтепродуктов с различной концентрацией ПТП на его отдельных перегонах. Такой алгоритм разработан автором. В целом, логика предложенной методики во многом совпадает с алгоритмом М.В. Лурье и А.С. Дидковской, но принципиально отличается способом расчета коэффициента λ гидравлического сопротивления с учетом ПТП и, главное, выявлением и анализом возникающих эффектов, а для определения коэффициента λ в области «гидравлически гладких труб» используется универсальное уравнение сопротивления.

В качестве примера, рассмотрим ТУ постоянного диаметра $D = 820$ мм и общей протяженностью 260 км (в нашем случае в диапазоне в интервале от 540 км до 800 км). По ТУ, состоящему из ГНПС и 3х ПНПС, в первоначальном режиме перекачивают нефть без добавления ПТП. Красным цветом показана линия гидравлического уклона (распределение напоров) для всего ТУ, а зеленым цветом – профиль трассы трубопровода (Рисунок 11). Предположим, что для увеличения пропускной способности данного, рассматриваемого в качестве примера, ТУ МН принято решение использовать ПТП. В Таблице 1 приведены результаты моделирования сценариев ввода ПТП с концентрацией $\theta = 10$ ppm на НПС для увеличения пропускной способности ТУ МН. Для каждого из сценариев отмечены НПС словом «да», на которых происходит ввод ПТП, и словом «нет», на которых ПТП не вводится.

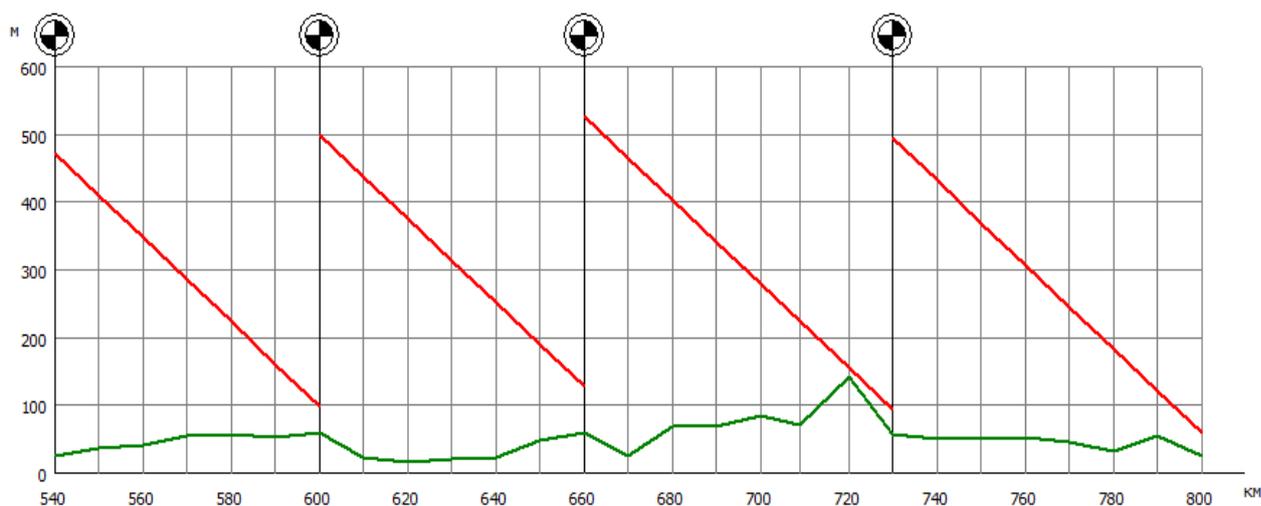


Рисунок 11 – Пример расчета режима работы ТУ МН без применения ПТП

Таблица 1 – Результаты моделирования сценариев ввода ПТП на НПС для увеличения пропускной способности ТУ МН

№	Сценарий ввода ПТП				Расход Q (м ³ /ч) в сценарии	Графическое представление
	НПС №1	НПС №2	НПС №3	НПС №4		
1	нет	нет	нет	нет	3897	Рисунок 11
2	да	нет	нет	нет	4004	Рисунок 12а
3	нет	да	нет	нет	4004	Рисунок 12б
4	нет	нет	да	нет	режима нет (НПС №3)	
5	нет	нет	нет	да	режима нет (НПС №4)	
6	да	да	нет	нет	4115	Рисунок 13а
7	да	нет	да	нет	4135	Рисунок 13б
8	да	нет	нет	да	режима нет (НПС №4)	
9	нет	да	да	нет	режима нет (НПС №2)	
10	нет	да	нет	да	режима нет (НПС №4)	
11	нет	нет	да	да	режима нет (НПС №3)	
12	да	да	да	нет	4263	
13	да	да	нет	да	режима нет (НПС №4)	
14	да	нет	да	да	режима нет (НПС №3)	
15	нет	да	да	да	режима нет (НПС №2)	
16	да	да	да	да	4415	Рисунок 14

Были рассмотрены и смоделированы следующие сценарии:

- сценарий №1: перекачка по ТУ МН осуществляется добавлением ПТП, при этом номинальный расход перекачки составляет 3897 м³/ч;
- сценарии №2÷№5: ПТП добавляется только на одной НПС; при вводе ПТП на НПС №1 и НПС №2 расход перекачки увеличивается до 4 004 м³/ч (т.е. на 3%), а при вводе ПТП на НПС №3 и НПС №4 нарушается условие по минимально допустимому напору в линии всасывания НПС, в связи с чем данный сценарий нереализуем;
- сценарии №6÷№11: ввод ПТП осуществляется на 2-х НПС в разных комбинациях, при этом только 2 сценария оказываются работоспособными, а 4 сценария – нет;

- сценарии №12÷№15: ввод ПТП осуществляется на 3-х НПС в разных комбинациях, при этом только 1 сценарий дает увеличение пропускной способности до $4\,263\text{ м}^3/\text{ч}$ (т.е. на 9%), а остальные 5 – неработоспособны;
- сценарий №16: ввод ПТП осуществляется на всех 4-х НПС, при этом пропускная способность увеличивается до $4\,415\text{ м}^3/\text{ч}$ (т.е. на 13%).

Для некоторых из рассмотренных сценариев приведена графическая интерпретация результатов моделирования – распределения напоров (линии гидравлического уклона), соответствующая такому сценарию. Из анализа сценариев введения ПТП на одной НПС (Рисунок 12) можно видеть, что сами уклоны на разных перегонах отличаются, при этом добавление ПТП на НПС №2 снижает подпор в ее линии всасывания и может привести к ее отключению.

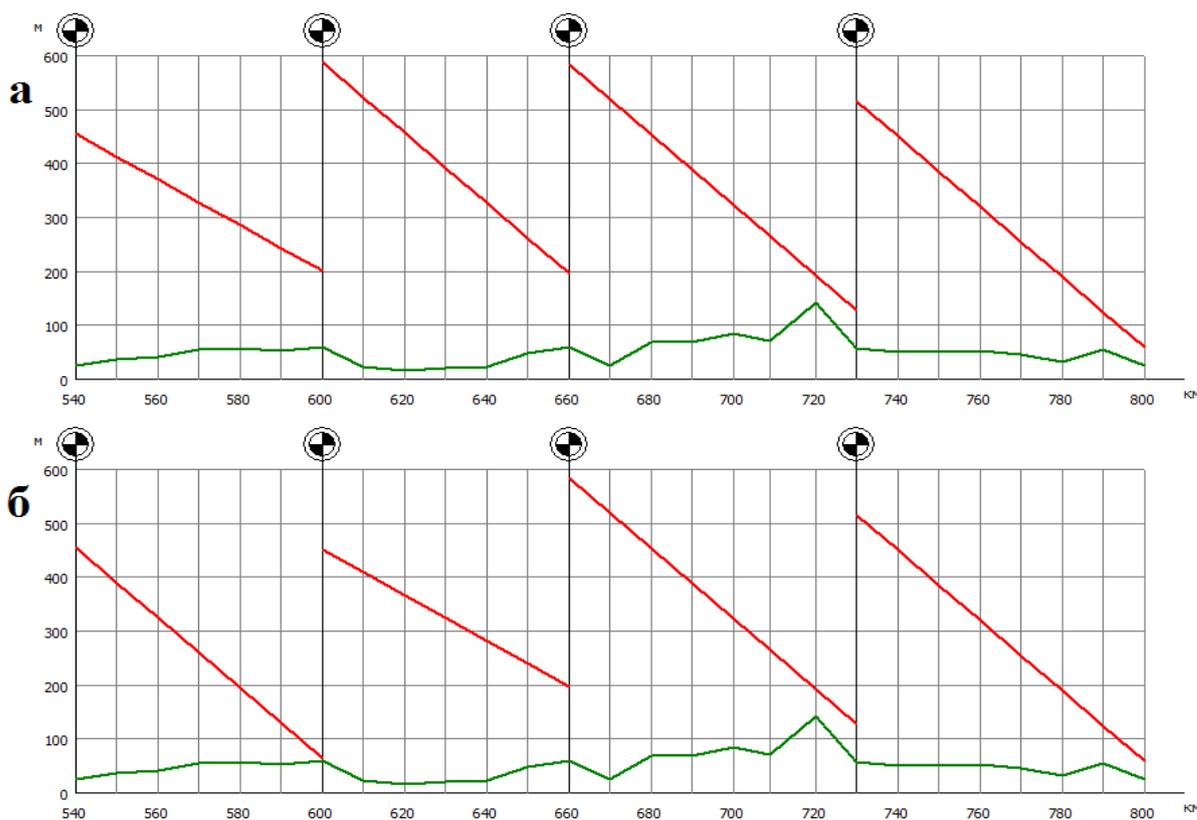


Рисунок 12 – Режим работы ТУ МН при добавлении ПТП на одной НПС:
а – на НПС № 1, б – на НПС № 2

При добавлении ПТП одновременно на двух НПС оказываются осуществимы всего 2 сценария и б – это НПС № 1 и № 2 (Рисунок 13а) или НПС № 1 и № 3 (Рисунок 13б). Другие сценарии при добавлении ПТП не реализуемы, так как приводят к аварийному отключению НПС по превышению условия минимального напора на всасывающей линии НПС.

Эпюра распределения напоров по ТУ при введении ПТП сразу на всех 4 перегонах показана на Рисунке 14. Несмотря на рост расхода перекачки на 13%, именно в данном режиме образуется самотечный участок протяженностью около 3 км на перегоне между НПС №3 и №4.

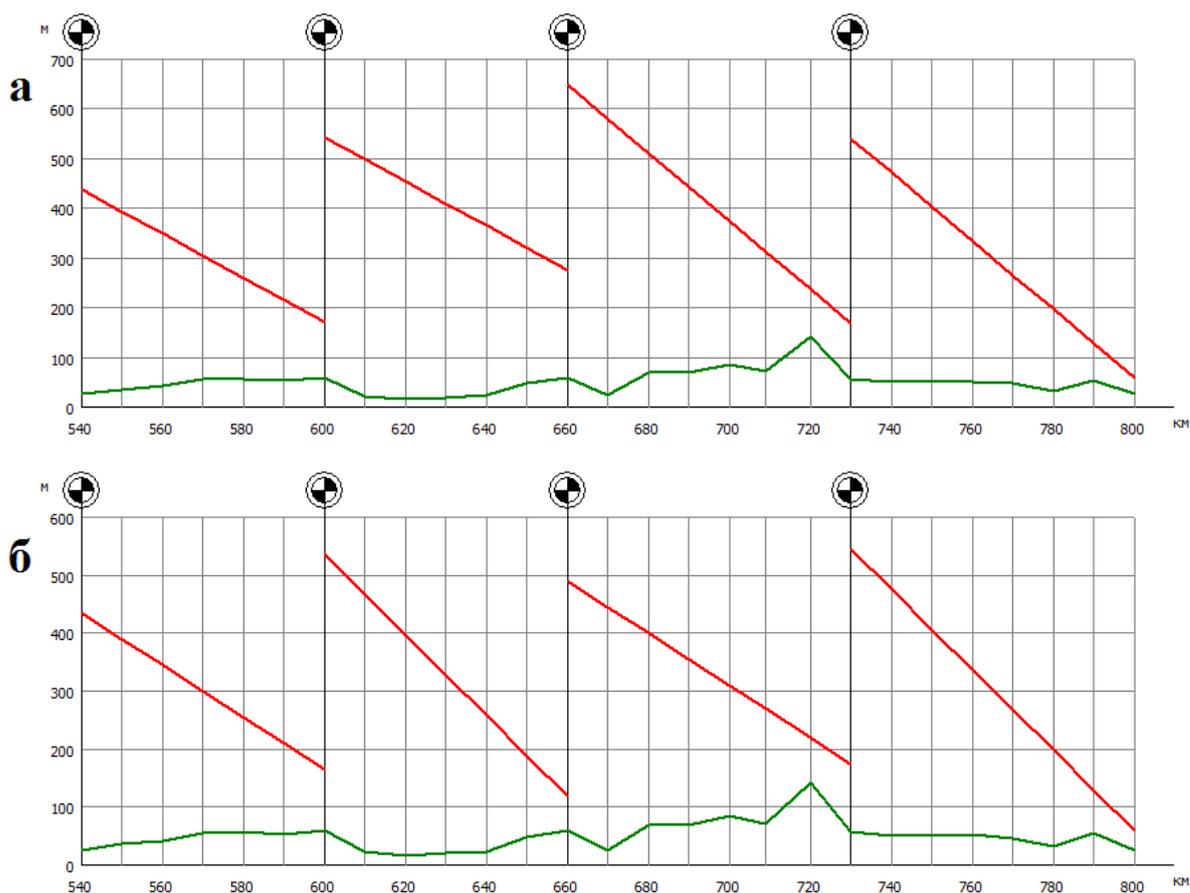


Рисунок 13 – Режим работы ТУ МН при добавлении ПТП на одной НПС:
а – на НПС № 1 и № 2, б – на НПС № 1 и № 3

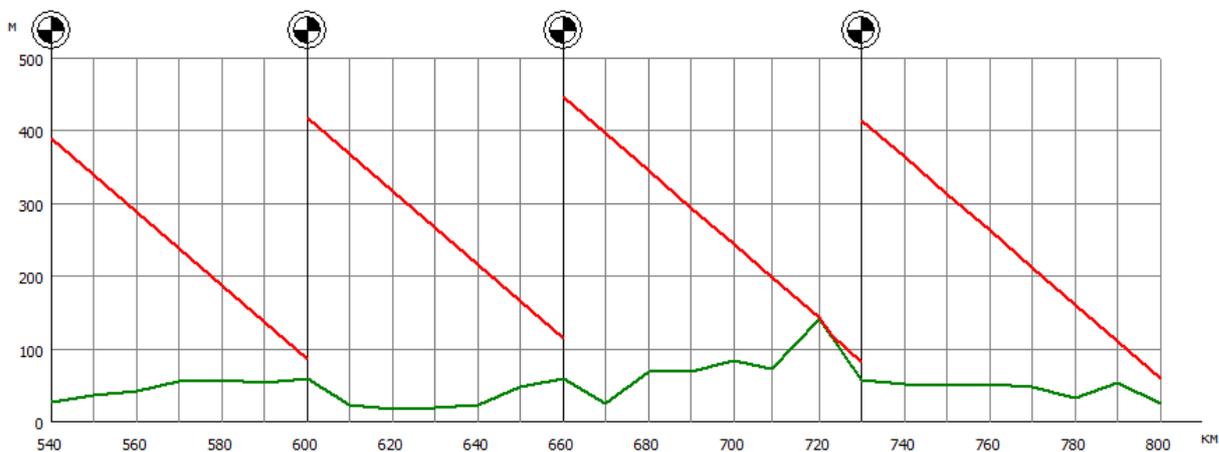


Рисунок 14 – Режим работы ТУ МН при добавлении ПТП на всех НПС

Представленные сценарии перекачки нефти по ТУ с добавлением ПТП не отражают всех возможных вариантов. Можно также рассмотреть сценарии:

- применения различных марок ПТП или переменной концентрации ПТП на различных перегонах, что изменит коэффициенты $k_1(\theta)$, $k_2(\theta)$ и $k_3(\theta)$;
- моделирования различных конфигураций включения и выключения насосов на НПС, в том числе замена марок самих насосов или их рабочих колес;
- изменения геометрии трубы, в первую очередь – прокладки лупинга.

Применение методики обеспечивает многовариантное моделирование различных режимов работы (сценариев) ТУ МН или МНПП и прогнозирование не только «позитивных», но и «негативных» сценариев, при которых не происходит увеличение пропускной способности, но и, наоборот, возникает вероятность аварийного отключения. Преимуществом рассмотренного итерационного алгоритма является то, что он позволяет осуществлять гидравлический расчет стационарной работы ТУ при использовании ПТП с учетом критерия оптимального энергопотребления на насосах НПС. Т.е. методика позволяет смоделировать такой режим работы (сценарий) ТУ МН или МНПП, при котором операционные затраты на потребление электроэнергии будут минимальными.

Также в данной главе диссертации рассмотрены вопросы оптимизации режимов перекачки на ТУ МТ с использованием карт режимов, при этом допускается множество расходов перекачки:

$$\{Q_1 = Q_{min}, Q_2, Q_3 \dots Q_{m-1}, Q_m = Q_{max}\}.$$

Каждому из таких режимов соответствуют значения давления, соответственно, P^s_k всасывания и P^H_k нагнетания на головной и каждой из промежуточных НПС. Следовательно, также можно определить:

- дифференциальные напоры $\Delta H_k = (P^H_k - P^s_k)/\rho g$;
- КПД $\eta(Q_k)$.

Тогда, каждому из таких допустимых технологических режимов эксплуатации соответствуют затраты электроэнергии, потребляемой электродвигателями на НПС $\{N_1, N_2 \dots N_m\}$:

$$N_k = \frac{\rho \cdot g \cdot Q_k \cdot \Delta H_k}{\eta_k \cdot (Q_k)}, k = 1, 2, 3 \dots m. \quad (32)$$

Каждый из режимов работы ТУ МН и МНПП в «карте» обеспечивает определенный за период T времени объем перекачки (поставки) транспортируемого продукта потребителю, при этом работники службы эксплуатации всегда стремятся таким образом составить «карту режимов» и обеспечить переход с режима на режим, чтобы обеспечивались оптимальные показатели количества работающих и неработающих насосных агрегатов. Ключевой вопрос состоит в следующем – при каких вариантах включения насосов и продолжительности их работы (с учетом режимов работы в дневное и ночное время) достигается оптимальное выполнение плана перекачки?

Очевидно, что предусмотренное «картой режимов» множество вариантов работы имеет свой конкретный расход перекачки, а не требуемый средний q расход. Подбор «оптимального» режима эксплуатации ТУ не должен предполагать каких-то сложных технологий и необоснованных затрат, а если учесть различную стоимость тарифов на электроэнергию, то обеспечить работу ТУ со средним q расходом можно, но экономически такое решение будет нецелесообразным. Таким образом, «оптимальность» характеризуется подбором такой оптимальной комбинации (чередования) режимов, каждый из которых по отдельности может и не являться самым экономически выгодным, но именно их совокупность (сочетание) и позволяет выполнить объемы перекачки с минимальными финансовыми затратами.

d_s – внутренний диаметр трубы s -го перегона;

$\lambda(Q, d_s, \theta_s) = \lambda(Q, d_s) \cdot k(\theta_s)$ – коэффициент гидравлического сопротивления;

$k(\theta_s)$ – коэффициент, моделирующий характеристику ПТП с концентрацией θ_s (при этом $k(\theta_s) \equiv k_s, 0 \leq k_s \leq 1$);

l_s – протяженность s -го перегона (расстояние между двумя НПС на каждом из перегонов ТУ);

L – длина (протяженность) всего ТУ.

Представим зависимость коэффициента λ гидравлического сопротивления:

$$\lambda(Re, \varepsilon, \theta) = \lambda(Re, \varepsilon) \cdot k(\theta_s),$$

где ε – относительная шероховатость внутренней стенки трубы, Re – число Рейнольдса, которые можно рассчитать через усредненный d_{cp} диаметр.

Чтобы определить, насколько требуется увеличить пропускную способность (расход) перекачки, введем еще один безразмерный $a(Q)$ параметр:

$$a(Q) = \frac{\left(z_1 + h_{nl} + \sum_{s=1}^{S=N} F_s(Q) \right) - (z_L + h_L)}{\lambda(Q, d_{cp}) \cdot \frac{8,16 \cdot Q^2 \cdot L}{\pi^2 g d_{cp}^5}} \quad (34)$$

при этом $0 < a(Q) \leq 1$. Тогда уравнение баланса напоров примет вид:

$$\sum_{s=1}^{S=N} k(\theta_s) \cdot \frac{l'_s}{d'^5_s} = a(Q). \quad (35)$$

В результате получим систему:

$$\begin{cases} \sum_{s=1}^{S=N} k(\theta_s) \cdot \frac{l'_s}{d'^5_s} = a(Q), \\ \sum_{s=1}^{S-1} k(\theta_s) \cdot \frac{l'_s}{d'^5_s} \leq b_s(Q). \end{cases} \quad (36)$$

Примем, что эксплуатационные характеристики ТУ известны и необходимо с помощью ПТП конкретной марки увеличить пропускную способность (расход) до некоторого значения Q от уже известного значения начального Q_0 расхода. Без использования ПТП увеличения расхода не происходит и верны следующие показатели:

$$Q = Q_0; \theta_s = 0; k(\theta_s) = 1; a = 1; b_s = \sum_{s=1}^{S-1} \frac{l'_s}{d'^5_s}.$$

Таким образом, для увеличения пропускной способности трубопровода от начального Q_0 значения до значения Q (при этом $Q > Q_0$), необходимо использовать имеющуюся (заданную) марку ПТП с известными характеристиками. Тогда примем суммарный расход вводимой на отдельных перегонах ПТП в единицу времени как $Q(\theta_1 + \theta_2 + \dots + \theta_N)$, при $\theta_1 \geq 0, \theta_2 \geq 0, \dots, \theta_N \geq 0$. Критерием оптимизации при решении данной задачи будет минимальное количество применяемой $\theta_1 + \theta_2 + \dots + \theta_N$ ПТП, т.е. выполнялось условие:

$$C = \sum_{s=1}^{S=N} \theta_s \rightarrow \min. \quad (37)$$

Постановка задачи выбора оптимальных концентраций ПТП, относится к области динамического программирования, при котором не линейны целевая функция или ее ограничения. Автором в диссертации показано, что:

- решение задачи определения оптимальных концентраций ПТП по ТУ МН позволяет выбрать из всего множества вариантов самый оптимальный с учетом экономического фактора – стоимости ПТП;

- при заданном номинальном расходе Q_0 перекачки целевая функция определения минимальной суммы $\theta_1 + \theta_2 + \dots + \theta_N$ концентраций является линейной функцией, а основное уравнение образовано монотонно убывающей выпуклой функцией $k(\theta)$;

- при увеличении с помощью ПТП пропускной способности ТУ МН до некоторого значения расхода Q от первоначального значения Q_0 , на отдельных перегонах ее концентрация может отличаться, однако критерием оптимальности использования ПТП является ее минимальное количество, полученное как сумма концентраций ПТП на отдельных перегонах ТУ;

- в результате расчета таких оптимальных концентраций могут быть выявлены такие перегоны ТУ, на которых требуется использовать ПТП (ее концентрация будет больше нуля) и на которых применение ПТП не требуется (ее концентрация на таком перегоне будет равна нулю);

- существуют такие альтернативные варианты решения задачи, что оптимальное количество применяемой ПТП может быть существенно меньше, чем в варианте, при котором на всех перегонах концентрация ПТП одинакова.

В диссертации приведены численные примеры оптимизационных расчетов и показано, что оптимальный режим ввода ПТП на отдельные перегоны ТУ МН позволяет уменьшить объем используемой ПТП до 10-15% по сравнению с объемом, который необходим при введении ПТП с одинаковыми концентрациями на всех перегонах для достижения поставленной цели.

Добавление ПТП в нефть или нефтепродукты существенно увеличивает число возможных режимов эксплуатации ТУ МТ, открывает способ экономии суммарных затрат перекачку. Суть способа состоит в том, чтобы уменьшить затраты на оплату не столько общего объема расходуемой электроэнергии, сколько на оплату ее наиболее дорогой составляющей – сетевой мощности, т.е. средней за месяц максимальной мощности в часы пиковой нагрузки, которые устанавливаются специализированной организацией для каждого месяца и ценовой зоны. С этой целью предлагается отказаться от использования в часы пиковой нагрузки наиболее энергоемких сочетаний работающих насосов с компенсацией выпадающей пропускной способности путем введения ПТП.

Из практики эксплуатации систем трубопроводного транспорта известно, что существенная доля эксплуатационных затрат приходится на оплату электроэнергии, при этом используются три основные составляющие:

- почасовой тариф за потребленную электроэнергию, определяемый «по счетчику» для каждого часа, отличающийся в регионах исходя из особенностей системы энергоснабжения ценовых категорий потребителей электроэнергии;

- за покупную мощность, которая определяется в часы пикового спроса по среднеарифметическому значению за прошедший за месяц;

– за сетевую мощность, которая рассчитывается для каждой ценовой зоны энергосистемы отдельно как среднее за месяц максимальных значений мощности, потребленной в плановые часы пиковой нагрузки.

В структуре суммарных затрат на оплату электроэнергии (Рисунок 15), рассчитанной для модельных ТУ МН на основе усредненных значений графиков перекачки, наибольшую долю составляет тариф «за сетевую мощность» (42%), чуть меньшая доля (37%) приходится на почасовой тариф, доля по тарифу «за покупную мощность» наименьшая (21%) из трех, хотя тоже весьма существенна.

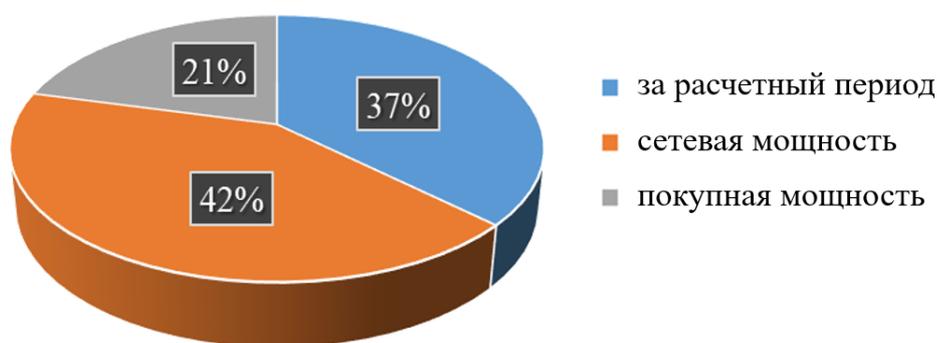


Рисунок 15 – Структура затрат на оплату потребляемой электроэнергии на основе усредненных значений для массива данных ТУ МН

Применение ПТП снижает гидравлические потери в линейной части ТУ, что позволяет обеспечить или заданный объем перекачки меньшим числом работающих насосов (и сократить энергопотребление) или увеличить заданный объем перекачки при том же номинальном режиме работы насосов (и получить большую выручку за счет большего объема перекачки). При этом, если стоимость ПТП меньше, чем оплата электроэнергии на работу двигателей, то это сократит эксплуатационные затраты и повысит экономические показатели организации транспорта нефти и нефтепродуктов. В итоге, применение ПТП может помочь сократить потребление электроэнергии, приходящейся на наиболее затратную – «сетевую мощность» – за счет временного отказа от наиболее энергоемких режимов и при одновременном сохранении заданной «картой режимов» пропускной способности трубопровода.

В диссертации приведен пример расчета режимов работы ТУ МТ с учетом видов и показателей затрат, которые входят в общую структуру энергопотребления организациями системы трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. В указанном примере в зависимости от концентрации θ ПТП марки «FLO XL» (вводилась на одном линейном перегоне) была определена зависимость эксплуатационных затрат в месяц (Рисунок 16).

Из анализа графика следует, что минимальные эксплуатационные затраты в размере 103,121 млн руб. соответствуют объему перекачки в $7200 \text{ м}^3/\text{ч}$ и обеспечиваются благодаря вводу ПТП с концентрацией $\theta_s = 5 \text{ ppm}$ на 2-м перегоне ТУ. Такой режим эксплуатации ТУ МН является оптимальным. Его применение сокращает эксплуатационные затраты на 2,307 млн. руб. (в месяц) или 27,684 млн. руб. (в год) по сравнению с графиком без использования ПТП.

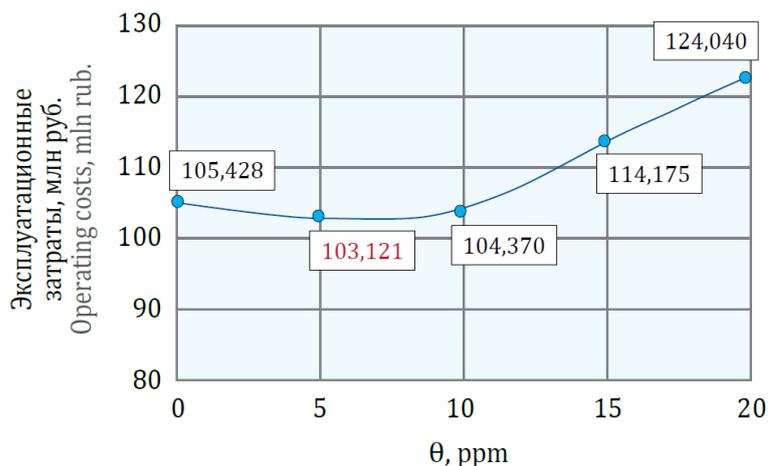


Рисунок 16 – Зависимость эксплуатационных затрат на перекачку нефти от концентрации θ ПТП при ее вводе на одном перегоне

Способ сокращения затрат электроэнергии на основе ограниченного применения ПТП для перекачки по ТУ показывает свою эффективность. При текущем уровне тарифов на электроэнергию, стоимости ПТП его применение экономически целесообразно, сокращает эксплуатационные затраты на перекачку. Эффективность способа обеспечивается за счет того, что при добавлении ПТП в трубопровод за счет частичного отключения насосных агрегатов в периоды, характеризующиеся высокими тарифами на электроэнергию, происходит снижение энергопотребления, и, следовательно, снижение сетевой мощности с компенсацией выпадающего расхода.

В завершающей части четвертой главы рассмотрен метод и алгоритм расчета квазистационарного течения жидкости в МТ с использованием ПТП, а также изложены особенности применения ПТП, в том числе определения ее первоначальной концентрации с учетом деструкции для сокращения объема смеси, образующейся при последовательной перекачке различных марок топлив в зоне их непосредственного контакта.

В заключении четвертой главы делаются выводы:

1. Утверждается, что для проведения достоверного анализа режимов работы ТУ в случае использования ПТП требуется гидравлический расчет ТУ как единой взаимосвязанной гидравлической системы трубопровода и НПС, работающих в эксплуатационном режиме перекачки «из насоса – в насос», при этом необходимо определить предполагаемый объем потребляемой электроэнергии, тип, количество и концентрацию ПТП.

2. Утверждается, что принятие решения об использовании и концентрации ПТП на перегонах ТУ МН и МНПП должно приниматься только после проведения многовариантного расчета и прогнозирования «позитивных» и «негативных» сценариев; в противном случае возможна реализация сценария аварийного отключения промежуточных НПС и ТУ целиком.

3. Разработанный итерационный алгоритм гидравлического расчета стационарной работы ТУ, состоящего из гидравлически взаимосвязанных

перегонов, с применением ПТП позволяет заранее моделировать ожидаемый результат – снизить гидравлическое сопротивление и увеличить пропускную способность; при этом его простота обеспечивает точность расчетов.

4. Методами динамического программирования осуществляется решение задачи определения оптимальных концентраций ПТП по ТУ, при этом исходным критерием является экономический фактор – стоимость ПТП – с учетом того, что для отдельных перегонов можно подобрать такое сочетание концентраций ПТП, что затраты на их приобретение будут минимальны (и могут быть такие перегоны на ТУ, на которых ПТП не применяется).

5. Способ сокращения затрат электроэнергии за счет снижения энергопотребления при частичного отключения насосных агрегатов в периоды с высокими тарифами на электроэнергию основан на ограниченном применении ПТП. Критерием оптимальности является минимум суммарных эксплуатационных затрат на оплату потребленных насосными агрегатами электроэнергии и мощности, а также стоимости необходимого количества ПТП.

6. Добавление ПТП в область контакта последовательно перекачиваемых партий товарных продуктов за счет уменьшения коэффициента гидравлического сопротивления (и «наполнения» профилей осредненных скоростей турбулентного потока) уменьшает количество смеси. Для сокращения объема смеси с учетом деструкции ПТП необходимо двукратное увеличение ее концентрации в пробке от ее первоначальной концентрации в партии.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Анализ проведенных теоретических и практических исследований применения ПТП на магистральных трубопроводах для перекачки нефти и нефтепродуктов показал следующие закономерности и проблемные области: с учетом многообразия ПТП не существует единого общепризнанного объяснения механизма эффекта Томса, в том числе единой общепризнанной теории определения коэффициента λ гидравлического сопротивления в потоке жидкости в трубе (при этом сам коэффициент λ зависит только от концентрации θ ПТП, физико-химических характеристик жидкости, температуры, гидравлического режима течения); существует необходимость дальнейшего развития и совершенствования феноменологической модели Т. фон Кармана турбулентного течения жидкости (универсального уравнения сопротивления) для решения практических задач трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов; для более точного решения уравнения Т. фон Кармана необходимо учитывать механизм ПТП – объемного или поверхностного действия.

2. В развитие гидравлической теории квазистационарного движения жидкости в круглой трубе разработан способ расчета коэффициента λ гидравлического сопротивления с учетом относительной шероховатости ε труб и концентрации ПТП по результатам экспериментальных исследований. Использование краевых условий на поверхностях, ограничивающих турбулентное течение, позволяет наиболее естественно учесть влияние ПТП,

которые изменяют эти краевые условия, а через них – на параметры течения, среди которых основным является коэффициент λ гидравлического сопротивления. ПТП изменяют условия течения в тонких пристеночных слоях и увеличивают наклон профиля осредненных скоростей на стенках труб и каналов. Доказано, что относительное уменьшение коэффициента λ гидравлического сопротивления (гидравлическая эффективность) зависит не только концентрации ПТП, но также от шероховатости ε внутренней поверхности трубы и от числа Re Рейнольдса (хотя эта зависимость в количественном отношении меньше, чем зависимость от шероховатости).

3. Разработана методика пересчета на реальные магистральные трубопроводы гидравлических свойств ПТП, определяемых по результатам экспериментальных исследований на трубных стендах, дисковых реометрах и ротационных вискозиметрах. В методике предложено использовать результаты экспериментов для определения коэффициентов пересчета для конкретных типов и марок ПТП. Перед их практическим использованием на реальных трубопроводах необходимо обеспечить расчет гидравлических свойств ПТП по результатам экспериментальных исследований для определения коэффициента λ гидравлического сопротивления.

4. Разработанная методика (итерационный алгоритм) гидравлического расчета стационарной работы ТУ магистральных трубопроводов при использовании ПТП на одном или нескольких перегонах между НС с целью оптимизации режимов перекачки позволяет определять коэффициент λ гидравлического сопротивления с учетом технологических параметров ТУ и особенностей самой ПТП (ее концентрации и принципа действия), в результате чего определение оптимальных концентраций ПТП выполняется на основе экономических показателей – а именно их минимальной стоимости. Гидравлические расчеты конкретных примеров ТУ МН показывают, что при различных длинах перегонов между НПС концентрации ПТП на этих перегонах должны быть различными, причем в оптимальном режиме сумма концентраций ПТП может быть сокращена до 10-15% по сравнению со случаем равной концентрации ПТП на всех перегонах.

5. Разработанная с целью сокращения затрат электроэнергии на перекачку нефти и нефтепродуктов по ТУ магистральных трубопроводов методика расчета квазистационарных режимов основывается на ограниченном применении ПТП для разных участков трубопровода. В качестве основного критерия (критерия оптимальности) принимается минимум суммарных эксплуатационных затрат на оплату потребленных насосными агрегатами электроэнергии. Приведены конкретные примеры, показывающие, что отказ от использования режимов перекачки в часы максимальных тарифов на электроэнергию с компенсацией возникающего уменьшения пропускной способности ТУ МН за счет ввода ПТП сокращает эксплуатационные расходы на 1,5-3 млн. руб. в месяц. При текущем уровне стоимости ПТП и электроэнергии применение предложенного способа является экономически целесообразным, целесообразно продолжить его изучение с учетом реальной номенклатуры ПТП, производимых отечественными заводами-изготовителями, и фактической

реализацией технологических режимов перекачки нефти и нефтепродуктов по магистральным трубопроводам.

6. Разработан метод определения начальной концентрации ПТП при ее добавлении в зону контакта партий разносортных нефтепродуктов при их последовательной перекачке для уменьшения смесеобразования до 50%. Объем начальной концентрации θ_0 ПТП в разделительной пробке с учетом компенсации ее путевой деградации ПТП по линейной части магистрального трубопровода должен быть в 2,2 раза больше минимальной концентрации θ_{min} , необходимой для эффективного уменьшения перемешивания нефтепродуктов.

**Результаты диссертационной работы представлены в публикациях
Статьи в журналах, входящих в перечень ВАК**

1. Голунов Н.Н., Лурье М.В. Способ уменьшения объема смеси нефтепродуктов при их последовательной перекачке // НТС «Транспорт и хранение нефтепродуктов». – М. – 2004. – № 7. – С. 10-12.

2. Голунов Н.Н. Уменьшение смесеобразования при последовательной перекачке нефтепродуктов как один из способов сохранения их качества // «Управление качеством в нефтегазовом комплексе». РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина. – М.: ФГУП «Изд-во «Нефть и газ». – 2005. – № 4. – С. 57-59.

3. Голунов Н.Н., Лурье М.В. Об одном способе уменьшения смеси при последовательной перекачке нефтепродуктов // «Известия вузов «Нефть и газ». – Тюмень: Тюменский государственный нефтегазовый университет. – 2006. – № 3. – С. 49-52.

4. Голунов Н.Н., Лурье М.В. Использование результатов стендовых испытаний малых противотурбулентных добавок для гидравлических расчетов промышленных трубопроводов // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2016. – № 4. – С. 32-37.

5. Голунов Н.Н. Последовательная перекачка нефтепродуктов с использованием малых противотурбулентных добавок для уменьшения объема смеси // Труды РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина. – 2017. – № 4. – С. 94-100.

6. Голунов Н.Н. Трансформация энергетического пространства и модели логистики углеводородов в Азиатско-тихоокеанском регионе // Нефть, газ, бизнес. – 2017. – № 11. – С. 44-47.

7. Голунов Н.Н., Мержоев М.Г. Теория и алгоритм расчета квазистационарных режимов перекачки нефти с противотурбулентными присадками // Территория «Нефтегаз». – 2017. – № 12. – С. 72-77.

8. Голунов Н.Н. Уменьшение смеси при последовательной перекачке нефтепродуктов // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2018. – № 1. – С. 68-73.

9. Голунов Н.Н. Расчет количества противотурбулентной добавки для формирования разделительной пробки между нефтепродуктами, транспортируемыми методом последовательной перекачки // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2018. – № 2. – С. 218-223.

10. Голунов Н.Н. Основные аспекты определения количества противотурбулентной присадки в зоне контакта последовательно транспортируемых нефтепродуктов // Труды РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина. – 2018. – № 2. – С. 31-36.

11. Голунов Н.Н. Параметры последовательной перекачки нефтепродуктов с использованием малых противотурбулентных добавок для уменьшения объема образующейся смеси // Территория «Нефтегаз». – 2018. – № 5. – С. 68-72.
12. Голунов Н.Н., Лурье М.В. Интерпретация результатов тестирования малых противотурбулентных добавок в ротационных приборах // Территория «Нефтегаз». – 2018. – № 6. – С. 84-90.
13. Голунов Н.Н. Влияние малых противотурбулентных присадок на гидравлическую эффективность и смесеобразование при последовательной перекачке // Территория «Нефтегаз». – 2018. – № 6. – С. 92-97.
14. Голунов Н.Н. Гидродинамическое обоснования использования теории Кармана для расчета гидравлического сопротивления шероховатых трубопроводов в присутствии противотурбулентных добавок // Территория «Нефтегаз». – 2018. – № 10. – С. 66-70.
15. Голунов Н.Н., Лурье М.В. Выбор оптимального режима эксплуатации технологического участка нефтепровода с применением карт режимов работы // Территория «Нефтегаз». – 2018. – № 12. – С. 76-80.
16. Голунов Н.Н. Теория реометра ротационного типа для испытания полимерных добавок в турбулентном режиме // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2019. – № 1. – С. 40-45.
17. Голунов Н.Н. Алгоритм гидравлического расчета технологического участка нефтепровода при использовании противотурбулентной присадки // Территория «Нефтегаз». – 2019. – № 1-2. – С. 94-100.
18. Голунов Н.Н., Лурье М.В. Приближенная теория дискового реометра для тестирования малых противотурбулентных добавок // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2019. – № 3. – С. 248-255.
19. Голунов Н.Н., Дидковская А.С., Лурье М.В. Итерационный алгоритм гидравлического расчета взаимосвязанных участков нефтепровода при использовании противотурбулентных добавок // Территория «Нефтегаз». – 2019. – № 4. – С. 74-83.
20. Голунов Н.Н. Идентификация параметров противотурбулентной присадки // Территория «Нефтегаз». – 2019. – № 11. – С. 76-82.
21. Голунов Н.Н. Особенности тестирования противотурбулентных присадок в дисковых реометрах // Территория «Нефтегаз». – 2020. – № 1-2. – С. 88-96.
22. Голунов Н.Н., Лурье М.В. Построение феноменологической теории турбулентности в жидкости с малыми противотурбулентными присадками // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2020. – Т. 10. – № 2. – С. 48-56.
23. Голунов Н.Н. Влияние шероховатости плоскости диска на результаты измерений гидравлического сопротивления в дисковом реометре // Территория «Нефтегаз». – 2020. – № 3-4. – С. 118-122.
24. Голунов Н.Н., Дидковская А.С., Лурье М.В. Оптимальные концентрации противотурбулентной присадки для увеличения пропускной способности магистрального нефтепровода // Территория «НЕФТЕГАЗ». – 2021. – № 9-10. – С. 38–43.
25. Голунов Н.Н. Способ уменьшения эксплуатационных затрат на перекачку нефти за счет использования противотурбулентной присадки / Булыгин А.Л., Голунов Н.Н., Лурье М.В., Штанько Е. О. // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2022. – № 1. – С. 57-67.

26. Голунов Н.Н. О некоторых историко-технологических аспектах применения противотурбулентных присадок на магистральных трубопроводах // Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья. – 2023. – № 2. – С. 5-11.

Статьи в переводных журналах

27. Golunov N.N. Petroleum products interface volume reduction in back-to-back batching. Pipeline Science and Technology. 2019; 3(1): 369–374.

28. Golunov N.N. and Lurie M.V. Derivation of phenomenological turbulence theory in liquid with small additives of drag reducing agents. Pipeline Science and Technology. 2020; 4(2): 118-125.

Патент на результаты интеллектуальной деятельности

29. Голунов Н.Н., Лурье М.В. Способ последовательной перекачки разносортных нефтепродуктов. Патент на изобретение № 2256119 от 10.12.2003. – Бюл. – 2005. – № 19

В других изданиях и материалах конференций

30. Голунов Н.Н. Уменьшение смесеобразования нефтепродуктов при последовательной перекачке по трубопроводам путем изменения структуры турбулентного течения малыми полимерными добавками // Материалы Международной конференции «Фундаментальные проблемы разработки нефтегазовых месторождений, добычи и транспортировки углеводородного сырья». РАН. Институт проблем нефти и газа. – М.: ГЕОС. – 2004. – С. 99-100.

31. Голунов Н.Н. Новый способ уменьшения смеси при последовательной перекачке нефтепродуктов // Научная конференция аспирантов, молодых преподавателей и научных сотрудников «Молодежная наука нефтегазовому комплексу». РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина. – М.: РГУНГ. – 2004. – С. 6.

32. Голунов Н.Н. Способ уменьшения смеси, образующейся при последовательной перекачке нефтепродуктов // 6-я научно-техническая конференция, посвященная 75-летию Российского государственного университета нефти и газа им. И.М. Губкина «Актуальные проблемы состояния и развития нефтегазового комплекса России». РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина. – М.: РГУНГ. – 2005. – С. 199.

33. Голунов Н.Н. Использование противотурбулентных присадок в зоне контакта партий разносортных нефтепродуктов для уменьшения смесеобразования при последовательной перекачке. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина. – М.: РГУНГ. – 2006. – 135 С.

34. Голунов Н.Н. Перекачка нефти или нефтепродуктов с противотурбулентной добавкой, инжектируемой в поток с переменным расходом // XIV Международная учебно-научно-практическая конференция «Трубопроводный транспорт – 2019». – Уфа. – УГНТУ. – 2019. – С. 39-41.

35. Голунов Н.Н. Малые противотурбулентные присадки как средство уменьшения смеси при последовательной перекачке нефтепродуктов // III Региональная научно-техническая конференция «Губкинский университет в решении вопросов нефтегазовой отрасли России», посвященная 110-летию А.И. Скобло и 105-летию Г.К. Шрейбера. – Москва. – РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина. – 2019. – С. 38

36. Голунов Н.Н., Лурье М.В. О феноменологической теории жидкости с малыми противотурбулентными присадками // IV-я Всероссийская научно-практическая конференция «Трубопроводный транспорт углеводородов». – Омск. – 2020. – С. 64-69.

37. Голунов Н.Н. О некоторых вопросах феноменологической теории турбулентности жидкости при добавлении противотурбулентных присадок // XIII Международная конференция «Рассохинские чтения». – Ухта. – 2021. – Часть 2. – С. 34-38.

38. Голунов Н.Н., Лурье М.В. Об использовании противотурбулентных присадок для увеличения пропускной способности нефтепровода // V региональная научно-техническая конференция «Губкинский университет в экосистеме современного образования», посвященная 150-летию со дня рождения И.М. Губкина. – Москва. – РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина. – 2021. – С. 200.

39. Голунов Н.Н. Об использовании противотурбулентных присадок для сокращения эксплуатационных затрат в процессе эксплуатации трубопроводов // Шестая Региональная научно-техническая конференция «Губкинский университет в решении вопросов нефтегазовой отрасли России», посвященная 100-летию профессора М.В. Ивановой. – Москва. – РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина. – 2022. – С. 269-270.

40. Голунов Н.Н. Об оптимизации эксплуатационных затрат на магистральных нефте- и нефтепродуктопроводах при использовании противотурбулентных присадок // XVII Международная научно-практическая конференция «Трубопроводный транспорт – 2022». – Уфа. – УГНТУ. – 2022. – С. 79-81.

41. Голунов Н.Н. О методах расчета коэффициента гидравлического сопротивления при транспортировании по магистральным трубопроводам нефти и нефтепродуктов с применением противотурбулентных присадок // XVI Всероссийская научно-техническая конференция «Актуальные проблемы развития нефтегазового комплекса». – Москва. – РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина. – 2023. – С.250-258.