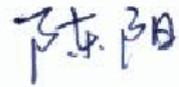


На правах рукописи



ЧЭНЬ ЯН

**ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ПУТЕВОЙ ДЕСТРУКЦИИ
ПРОТИВОТУРБУЛЕНТНЫХ ПРИСАДОК НА ИХ ГИДРАВЛИЧЕСКУЮ
ЭФФЕКТИВНОСТЬ**

Специальность 25.00.19 – «Строительство и эксплуатация
нефтегазопроводов, баз и хранилищ»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Уфа-2020

Работа выполнена на кафедре «Транспорт и хранение нефти и газа» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет»

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент
Нечваль Андрей Михайлович

Официальные оппоненты: **Бажайкин Станислав Георгиевич**
доктор технических наук, профессор
НТЦ ООО «НИИ Транснефть» /
главный научный сотрудник

Голунов Никита Николаевич
кандидат технических наук, доцент
РГУ нефти и газа (НИУ) имени
И.М. Губкина / кафедра «Проектирование и
эксплуатация газонефтепроводов»,
заведующий кафедрой

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования «Ухтинский государственный
технический университет» (г. Ухта)

Защита состоится «16» апреля 2020 года в 11-30 на заседании диссертационного совета Д.212.289.04 при ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет» по адресу: 450062, Республика Башкортостан, г. Уфа, ул. Космонавтов, 1.

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

Автореферат разослан « ___ » _____ 2020 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Султанов Шамиль Ханифович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

По данным «Всемирной книге фактов» за 2016 год в настоящее время общая протяжённость магистральных нефтепродуктопроводов в мире превысила 390 тысяч километров, в том числе: в США 240,7 тысяч километров, в России 19,3 тысяч километров, в Китае 25,5 тысяч километров. В будущем прогнозируется возрастание доли трубопроводного транспорта нефтепродуктов.

Возрастание загрузки нефтепродуктопроводов проводит к росту турбулентного сопротивления трения и, как следствие, росту энергозатрат. Однако гидравлическое сопротивление может быть в значительной степени уменьшено посредством ввода весьма малой добавки полимера – противотурбулентной присадки (ПТП). Снижение гидравлического сопротивления происходит вследствие подавления макромолекулами полимера турбулентных пульсаций (эффект Томса).

Начиная с 1972 года, полимерная противотурбулентная присадка (ПТП) впервые была применена в нефтепроводах Оклахомы (США). Добавка в поток ПТП с концентрацией 21 ppm (г/т) позволила достичь уменьшения гидравлического сопротивления на 25 %. С тех пор противотурбулентные присадки получили широкое применение в трубопроводном транспорте сырой нефти и нефтепродуктов.

В связи со значительной экономической выгодой, вызванной снижением гидравлического сопротивления при добавлении ПТП, в течение почти полувека явление уменьшения турбулентного сопротивления полимерными добавками стало актуальной темой исследования множества отечественных и зарубежных экспертов и ученых.

Однако, из-за сложности процесса возникновения турбулентности, до настоящего времени не существует общепризнанного теоретического обоснования взаимодействия вязкоупругих молекул полимеров и турбулентного потока. Кроме того, при продолжительном воздействии турбулентного потока макромолекулы полимера подвергаются значительным деформациям, что в свою очередь является причиной их механического разрушения (деструкции) и снижения или даже потери эффекта Томса.

Таким образом, улучшение устойчивости и живучести (низкой деструкции) ПТП актуально при перекачке нефти и нефтепродуктов по магистральным трубопроводам на большие расстояния.

Степень разработанности проблемы

Вопросами эффекта снижения гидравлического сопротивления в потоке турбулентности при добавлении полимерных присадок занимались следующие авторы: Белоусов Ю.П. (1986), Голицын Г.С. (1996), Ерошкина И.И. (2000-2004), Прохоров А.А. (2006), Голунов Н.Н. (2006-2019), Коршак А.А. (2006-2009), Хуссаин М.Н. (2009), Манжай В.Н. (1986-2019), Жолобов В.В. (2011-2019), Лурье М.В. (1996-2018), Нечваль А.М. (2007-2019), Челинцев Н.С. (2011), Гареев М.М. (1991-2019), Гольянов А.И. (2012-2019), Лисин Ю.В. (2013-2018), Муратова В.И. (2007-2019), Валиев М.И. (1993-2019), Несын Г. В. (1980-2017), Марон В.И. (1974-2010), Мирзаджанзаде А.Х.(1968-1998), Гумеров А.Г. (1998-2019) и др.

Вопросами путевой деструкции противотурбулентных присадок в потоке перекачиваемой жидкости занимались и отражали в работах отечественные и зарубежных ученые: Уайт С.М. (2008), Шер И. (2008), Перейра А. С. (2012-2018), Элбинг Б.Р. (2009), Нге П. (2010), Дьюпа А. (2013), Тамано С. (2015), Оволаби Б. Е. (2017), Хабибпура М. (2017), Эшрати М. (2017), Сандовала Дж. (2016), Фнджимуги М. (2016), Боеленса А. М. (2016), Музукумара М. (2016) и др..

Несмотря на значительное количество исследований в этом направлении, большинство работ посвящено изучению разрыва молекулярных цепей и нарушения структуры полимеров в реометрах или в коротких трубах. Разрушение молекул полимерной добавки в условиях трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов (путевая деструкция ПТП) является длительным процессом. Поэтому, для выявления общей закономерности путевой деструкции полимерных добавок в трубопроводах значительной протяженности и получения универсальных расчетных зависимостей, требуется проведение дополнительных исследований.

Соответствие паспорту заявленной специальности

Тема и содержание диссертационной работы соответствуют паспорту специальности 25.00.19 – «Строительство и эксплуатация нефтегазопроводов, баз и хранилищ» - п. 2 «Разработка и оптимизация методов проектирования, сооружения и эксплуатации сухопутных и морских нефтегазопроводов, нефтебаз и газонефтехранилищ с целью усовершенствования технологических процессов с учетом требований промышленной экологии» и п. 3 «Разработка научных основ и усовершенствование технологии трубопроводного транспорта

газа, нефти и нефтепродуктов, гидро- и пневмоконтейнерного транспорта».

Целью диссертационной работы является разработка научно-методологической основы прогнозирования гидравлической эффективности противотурбулентных присадок с учетом их путевой деструкции при эксплуатации магистральных нефте- и нефтепродуктопроводов.

В соответствии с поставленной целью были сформулированы и решены следующие **задачи исследования**:

1. Анализ различных факторов, влияющих на эффект снижения гидравлического сопротивления с ПТП и на процесс деструкции ПТП в дисковом реометре;
2. Разработка методики расчета гидравлической эффективности ПТП с учетом путевой деструкции в трубопроводе на основе лабораторной реометрии;
3. Математическое моделирование процесса снижения гидравлического сопротивления с ПТП в турбулентном потоке нефтепродукта, транспортируемого по трубопроводу;
4. Прогнозирование гидравлической эффективности противотурбулентной присадки с учетом её растворения и деструкции.

Научная новизна работы

1. Получена новая математическая модель прогнозирования гидравлической эффективности ПТП на основе решения уравнений Навье-Стокса и введения демпфирующей функции, учитывающей путевую деструкцию ПТП в условиях транспортировки нефти и нефтепродуктов по магистральным трубопроводам;
2. Предложена новая аналитическая функция для определения интегральной эффективности противотурбулентной присадки и требуемой её концентрации в точке инъекции с учетом активации ПТП и прогнозируемой деструкции в трубопроводе.

Теоретическая и практическая значимость работы

Теоретическая значимость работы заключается в следующем:

1. Разработаны методологические основы прогнозирования гидравлической эффективности ПТП с учетом путевой деструкции в лабораторном турбореометре и в трубопроводе, а именно:
 - установлены зависимости относительного напряжения сдвига от концентрации ПТП θ , числа Рейнольдса Re в дисковом реометре и в трубопроводе;

– определены зависимости гидравлической эффективности ПТП от концентрации ПТП θ , числа Рейнольдса Re и длины участка L (продолжительности тестирования t).

2. Разработаны методологические основы прогнозирования процесса снижения гидравлического сопротивления с ПТП и их деструкции в трубопроводе методами численного моделирования, а именно:

– использования k - ε модели с двумя уравнениями для турбулентного режима течения с учетом добавки полимерной присадки;

– решения уравнения Навье-Стокса при осредненном числе Рейнольдса (RANS).

3. На основании распределения мгновенной скорости и интенсивности турбулентных пульсаций получена математическая модель снижения турбулентного сопротивления с ПТП методом RANS с помощью программы ANSYS FLUENT.

Практическая значимость работы заключается в следующем:

1. Результаты исследований позволяют упростить процедуру расчета требуемой концентрации ПТП с учетом её активации и путевой деструкции при перекачке нефти и нефтепродуктов по трубопроводам.

2. Разработанная математическая модель расчета гидравлической эффективности ПТП с учетом путевой деструкции апробирована и подтверждена Российской компанией «Миррико», а также в условиях промышленного применения на магистральных нефтепроводах Lanzhou-Chengdu-Chongqing (Lan-Cheng-Yu) «PetroChina (CNPC)».

3. Полученные в работе результаты применяются в учебном процессе при подготовке бакалавров и магистров по направлению 21.04.01 «Нефтегазовое дело» на кафедре «Транспорт и хранение нефти и газа» в ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный нефтяной технический университет», а также на кафедре «Транспорт и хранение нефти и газа» факультета «Нефтегазовое дело» Юго-Западного нефтяного университета в КНР.

Методология и методы исследования

Поставленные в работе цели и задачи выполнены с использованием действующих методик проведения экспериментальных исследований, теоретического анализа и методов численного моделирования. Экспериментальные исследования включали проведение опытов в соответствии с разработанным планом экспериментальных исследований, обработку

полученных результатов методами математической статистики в современных программных комплексах. Теоретические исследования включали в себя научный анализ современной теории и практики трубопроводного транспорта нефтей с различными реологическими свойствами, математическое моделирование трубопроводной системы с учетом изменяющихся реологических параметров нефтепродуктов и ПТП. Исследования методом численного моделирования включали обработку данных k - ε модели с двумя уравнениями для турбулентного режима течения при низких числах Рейнольдса с учетом добавки полимерной присадки, решения уравнения Навье-Стокса при осредненном числе Рейнольдса (Reynolds-Averaged Navier-Stokes, RANS) с помощью программы ANSYS FLUENT.

Положения, выносимые на защиту

Результаты лабораторных исследований процесса деструкции противотурбулентных присадок; математическая модель прогнозирования гидравлической эффективности ПТП с учетом путевой деструкции в условиях перекачки нефти и нефтепродуктов по магистральным трубопроводам; общие значимые выводы и рекомендации.

Степень достоверности и апробация результатов

Основные положения диссертации докладывались и обсуждались:

- На конференции Национального фонда естественных наук КНР «Исследование механизма улучшения смазочного потока на стыке глубоководных нефтепроводов» (№.51779212);
- На обсуждении проекта международного сотрудничества Национального фонда естественных наук КНР и Российской Федерации «Исследование синергетического эффекта воздействия на поверхностное граничное сопротивление пристенного слоя и снижения турбулентности потока при добыче и транспорте нефти в условиях низких температур»;
 - на 65, 66 научно-технических конференциях студентов, аспирантов и молодых ученых, г. Уфа, 2014, 2015г.;
 - на VII Международной научно — практической конференции молодых ученых «Актуальные проблемы науки и техники — 2014», г. Уфа, 2014г.;
 - на XII и XIII Международных учебно-научно-практических конференциях УГНТУ, г. Уфа, 2017, 2018г..

Публикации

По материалам диссертации опубликовано 15 печатных работ, в том числе

4 статьи в журналах, входящих в перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий в соответствии с требованиями ВАК Министерства образования и науки РФ; 4 статьи в журналах, индексируемых в базе данных Web of Science; 1 патент КНР на изобретение, 1 проект национальных фондов естественных наук РФФИ и ГФЕН (№ 5181101810, № 19-58-53009).

Структура и объём работы

Диссертационная работа изложена на 158 страницах, включая введение, 4 главы, основные выводы, приложения, 144 страницы машинописного текста, содержит 59 рисунков, 18 таблиц и список литературы из 162 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, сформулированы цель и основные задачи исследования, отражена научная новизна, практическая ценность работы и методы исследований, дана общая характеристика диссертационной работы.

Первая глава посвящена анализу отечественных и зарубежных литературных источников по теме диссертационной работы.

Рассмотрены основные факторы, влияющие на эффективность противотурбулентных присадок и их деструкцию (в трубах малого диаметра и промышленных трубопроводах, в капиллярных и ротационных реометрах).

Приведена оценка методов исследования механизма снижения гидравлического сопротивления с использованием противотурбулентных присадок в турбулентном потоке перекачиваемой жидкости (по изменению реологических параметров, влияния структуры турбулентного потока, динамики молекул полимерных добавок, измерения энергии поля турбулентного потока, а также методами доплеровской и лазерной анемометрии).

Отдельное внимание уделено эффекту путевой деструкции противотурбулентных присадок в потоке перекачиваемой жидкости.

На основе проведенного анализа сформулированы основные задачи исследования.

Во второй главе приводятся результаты экспериментальных исследований гидравлической эффективности с противотурбулентных присадок на лабораторном дисковом турбореометре (Рисунок 1). На основании проведенных лабораторных исследований (пяти марок ПТП и двух марок дизельного топлива) проанализировано влияние концентрации

противотурбулентной присадки θ и её свойств, свойств нефтепродукта (разбавителя), начальной температуры T на эффективность снижения турбулентного сопротивления.

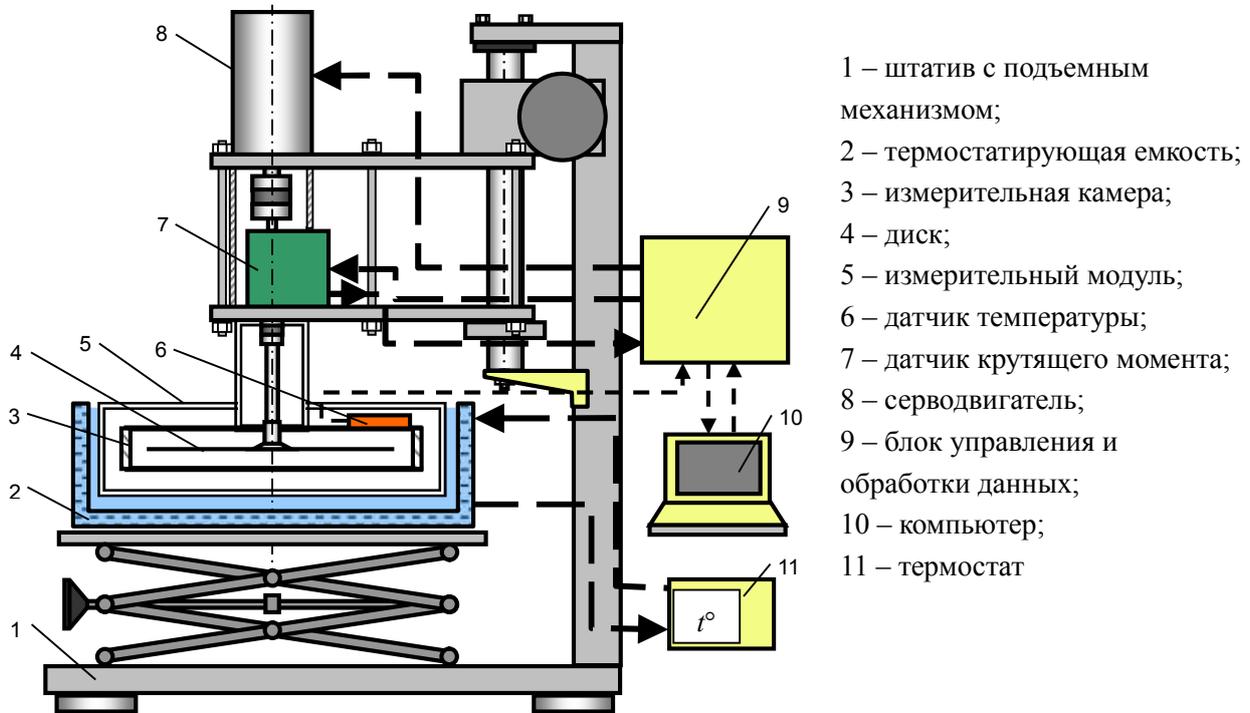


Рисунок 1 – Принципиальная схема лабораторного дискового турбореометра

По результатам лабораторных исследований на турбореометре сделаны следующие выводы:

1. Гидравлическая эффективность исследуемых образцов противотурбулентных присадок при прочих равных условиях прямо пропорциональна увеличению вязкости нефтепродукта (разбавителя);

2. Экспериментально установлено, что по величине гидравлической эффективности образцы ПТП ранжируются в порядке: EP; M-Flowtreat; FLOMXA; Necadd-447; FLOXL. Показано, что компонент ПТП α -полигексен способствует наиболее эффективному снижению турбулентного сопротивления, а его содержание в образцах присадок M-Flowtreat и EP больше, чем в остальных пробах;

3. Установлено, что при повышении начальной температуры пробы раствора ПТП эффективность снижения гидравлического сопротивления также возрастает. Однако, при увеличении концентрации ПТП до $\theta = 60$ ppm, при повышении начальной температуры до $T = 25$ °C, величина DR остается

практически неизменной.

По результатам проведенных лабораторных исследований эффекта деструкции присадки на дисковом турбореометре получены следующие выводы. Темп снижения гидравлической эффективности ПТП зависит от её концентрации в растворе и возрастает с увеличением θ и числа Re . При прочих равных условиях присадка EP превосходит M-Flowtreat как по величине гидравлической эффективности, так и по антидеструкционной устойчивости (Рисунок 2).

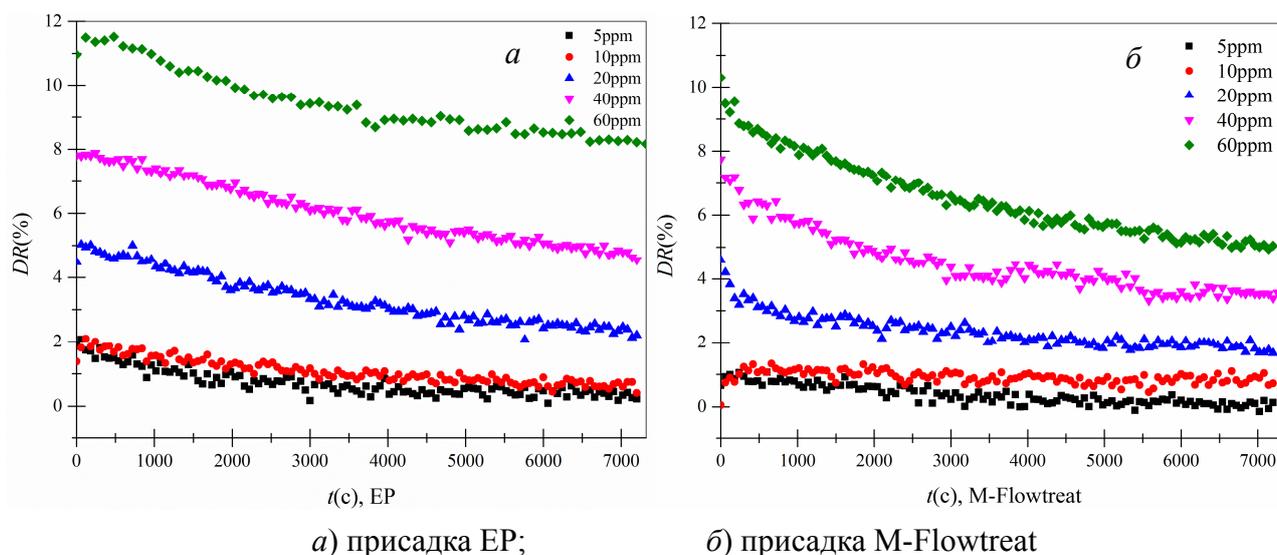


Рисунок 2 – Зависимость DR присадок EP и M-Flowtreat от продолжительности тестирования $n=3000 \text{ мин}^{-1}$ при их концентрации $\theta = (5; 10; 20; 40; 60) \text{ ppm}$

На основании данных опытно-промышленных испытаний ПТП (ОПИ) получена математическая модель расчета снижения гидравлического сопротивления посредством ввода противотурбулентной присадки в трубопровод с относительной погрешностью, не превышающей 0,1.

Получено соотношение для определения гидравлической эффективности ПТП в трубопроводе:

$$DR_T = 1 - (1 - DR_D) \cdot \frac{\bar{\tau}_T}{\bar{\tau}_D}, \quad (1)$$

где DR_D , DR_T – соответственно эффективность снижения гидравлического сопротивления в дисковом турбореометре и в трубопроводе при одинаковых концентрациях ПТП;

$\bar{\tau}_D$, $\bar{\tau}_T$ – соответственно относительное напряжение сдвига в дисковом

турбореометре и трубопроводе, определяемые по формулам: $\bar{\tau}_d = \left(\frac{\tau_\theta}{\tau_0} \right)_d$,
 $\bar{\tau}_t = \left(\frac{\tau_\theta}{\tau_0} \right)_t$; τ_0, τ_θ – напряжение сдвига при отсутствии (0) и наличии (θ) ПТП.

По данным опытно-промышленных испытаний ПТП с помощью программы MATLAB получена зависимость DR_t от числа Рейнольдса Re , безразмерного относительного диаметра D^* , концентрации присадки θ и её гидравлической эффективности в условиях дискового реометра DR_d :

$$DR_t = 1 - (1 - DR_d) \cdot \frac{\frac{D^*}{Re_t} \cdot \alpha \exp(\beta\theta)}{(4,62 \cdot 10^{-7} Re_d + a) \cdot \exp(b\theta) - (4,64 \cdot 10^{-7} Re_d - 1,03) \cdot \exp(c\theta)}, \quad (2)$$

где α, β, a, b, c – коэффициенты, для конкретной марки противотурбулентной присадки.

Разработаны математические модели прогноза путевой деструкции в лабораторном дисковом турбореометре и в турбулентном потоке нефтепродукта в трубопроводе.

Определены зависимости гидравлической эффективности ПТП от концентрации ПТП θ , числа Рейнольдса Re (интенсивности турбулентности I) и продолжительности тестирования в турбореометре t . Получены регрессионные уравнения зависимости DR для присадок EP и M-Flowtreat при их концентрации $\theta = (5; 10; 20; 40; 60)$ ppm вида:

$$DR_d = I_d \cdot (\alpha\theta + \beta) \cdot \exp[(\gamma\theta + \omega)t], \quad (3)$$

где $\alpha, \beta, \gamma, \omega$ – коэффициенты, для конкретной марки противотурбулентной присадки.

Также получены регрессионные зависимости DR_t от протяженности участка трубопровода L по математической модели прогноза гидравлической эффективности присадки M-Flowtreat (4) с учетом путевой деструкции и начальной концентрации ПТП (Рисунок 3).

$$DR_t = I_t \cdot (\alpha\theta + \beta) \cdot \exp[(\gamma\theta + \omega) \cdot \frac{L}{U}]. \quad (4)$$

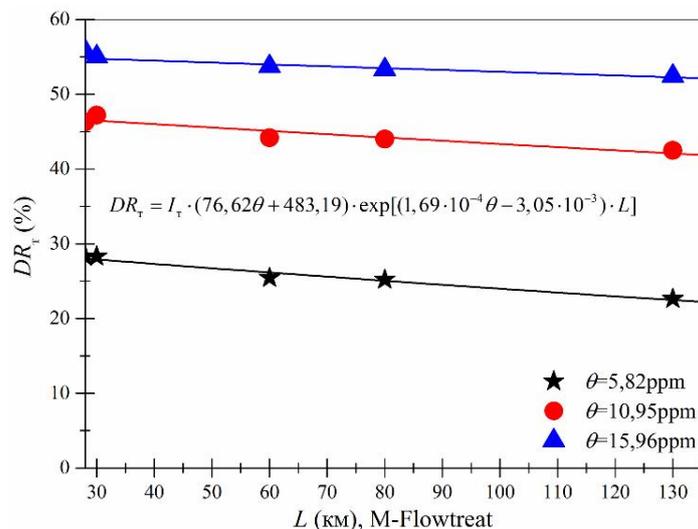


Рисунок 3 – Прогноз изменения DR_T по длине трубопровода для присадки M-Flowtreat

В третьей главе рассматриваются теоретические основы и методы численного моделирования процесса снижения гидравлического сопротивления посредством ввода ПТП с учетом её путевой деструкции в трубопроводе.

Для исследования осевой скорости турбулентного потока в сечении трубопровода в процессе моделирования сделано допущение о замене трехмерного трубопровода двумерным прямоугольником (Рисунок 4).

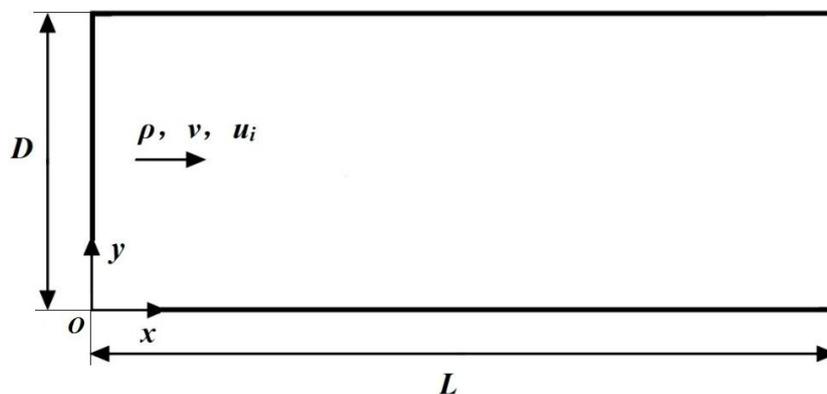


Рисунок 4 – Двумерная вычислительная область и параметры

Уравнение неразрывности имеет вид:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i) = 0, \quad (5)$$

где ρ – плотность жидкости; t – время; i – координаты x и y ; x_i , u_i – соответственно расстояние и скорость на i -м направлении.

Уравнение Навье-Стокса, осредненное по числу Рейнольдса (Reynolds-Averaged Navier-Stokes, RANS) турбулентного потока несжимаемой

ньютоновской жидкости имеет вид:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \overline{\rho u_i u_j} \right). \quad (6)$$

По гипотезе Буссинеска, рейнольдсовое напряжение может определяться по формуле (7) при введении турбулентной вязкости

$$\overline{\rho u_i u_j} = -\mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) + \frac{2}{3} \left(\rho k + \mu_t \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \right) \delta_{ij}, \quad (7)$$

где $i = j, \delta_{ij} = 1; i \neq j, \delta_{ij} = 0;$

μ_t – турбулентная вязкость, $\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon};$

k – кинетическая энергия турбулентности, $k = \frac{\overline{u_i u_i}}{2} = \frac{1}{2} (\overline{u^2} + \overline{v^2} + \overline{w^2});$

ε – скорость диссипации энергии турбулентности, $\varepsilon = \nu \overline{\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_k} \right) \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_k} \right)}.$

Далее, для замыкания осредненного по числу Рейнольдса уравнения Навье-Стокса (6), предложена низкорейнольдсовая k - ε модель с двумя уравнениями турбулентного течения с учетом добавки полимерной присадки.

По стандартной k - ε модели турбулентности Сполдинга – Лаундера значения k и ε в формуле (7) определяются из совместного решения уравнений (8) и (9):

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - \rho \varepsilon; \quad (8)$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \varepsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \frac{C_{1\varepsilon} \varepsilon}{k} G_k - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k}; \quad (9)$$

$$G_k = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j}, \quad (10)$$

где $C_{1\varepsilon} = 1,44; C_{2\varepsilon} = 1,92; C_\mu = 0,09; \sigma_k = 1,0; \sigma_\varepsilon = 1,3.$

Для турбулентного потока с добавками полимера, на основании решения k - ε модели с двумя уравнениями в программе FLUENT, вводится демпфирующая функция f_μ , учитывающая влияние полимера в пристенной области. Для этого k - ε уравнения дополняются поправочными коэффициентами f_1, f_2 и пользовательскими членами D, E . Тогда преобразование низкорейнольдсовой k - ε модели с двумя уравнениями к условиям течения с добавкой полимера приводится к виду:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - \rho \varepsilon - D; \quad (11)$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \varepsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \frac{C_{1\varepsilon} \varepsilon}{k} G_k f_1 - \frac{\varepsilon^2}{k} C_{2\varepsilon} \rho f_2 + E; \quad (12)$$

$$\mu_t = \rho f_\mu C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}. \quad (13)$$

Анализ экспериментальных данных Дан Тундера, полученных методом доплеровской анемометрии, показал, что наилучшую сходимость обеспечивает низкорейнольдсовая k - ε модель Ян-Шиха, согласно которой $f_1 = 1$; $f_2 = 1$; $D = 0$; f_μ и E равны соответственно:

$$f_\mu = \left[1 - \exp\left(-1.5 \times 10^{-4} R_y - 5 \times 10^{-7} R_y^3 - 10^{-10} R_y^5\right) \right]^{\frac{1}{2}}; \quad (14)$$

$$E = \frac{\mu \mu_t}{\rho} \left(\frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right)^2, \quad (15)$$

где $R_y = \frac{\sqrt{k} y}{\nu}$.

Из анализа уравнений (14) и (15) следует, что вблизи стенки трубопровода $y \rightarrow 0$, $f_\mu \rightarrow 0$, $E \rightarrow \infty$, $\mu_t \rightarrow 0$, следовательно, влияние турбулентности отсутствует. По мере удаления от стенки трубы к её оси $y \rightarrow R$, $f_\mu \rightarrow 1$, $E \rightarrow 0$.

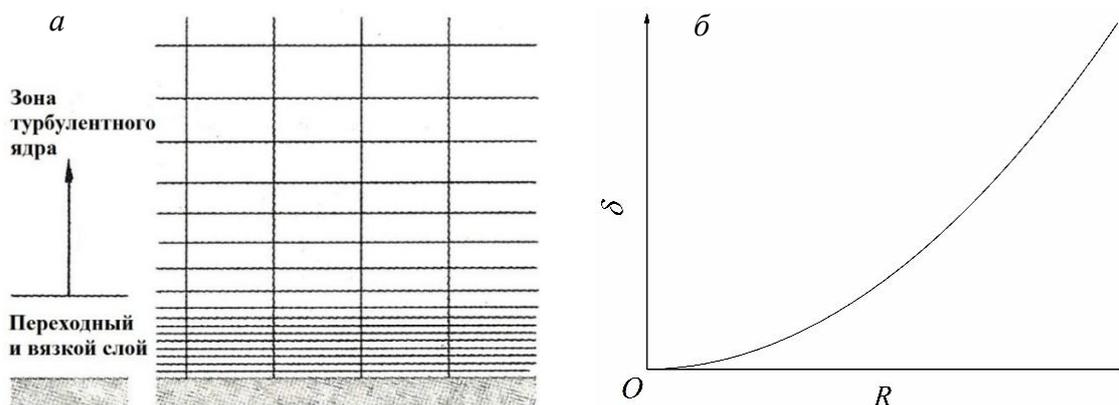
С помощью метода численного моделирования по данным экспериментов Дан Тундера и И. Алсуракджи установлен вид демпфирующей функции f_μ от концентрации присадки θ .

В соответствии с расчетной схемой вычислительной области (Рисунок 4) с помощью ANSYS ICEM CFD 16.0 создана модель турбулентного потока в трубопроводе. Разбиение узлов радиальной сетки модельных трубопроводов диаметрами $D_1 = 40$ мм и $D_2 = 25$ мм, длинами $L_1 = 4$ м, $L_2 = 3$ м было произведено согласно распределению «BiGeometric» (Рисунок 5).

Размер ячейки сетки первого слоя соответственно приняты $y_{11} = 5,838 \cdot 10^{-5}$ м и $y_{12} = 7,018 \cdot 10^{-5}$ м, и задан в общей сложности 51 узел со скоростью роста 1,25.

В осевом направлении трубопровода принято равномерное распределение узлов сетки («Uniform»), и в общей сложности установлено 5100 и 3825 узлов соответственно.

Наконец, расчетная модель потока в трубопроводе разделена на 260100 узлов и 265252 единиц (пример 1), на 195075 узлов и 198939 единиц (пример 2).



а) – расчетная сетка; б) – параболический закон распределения размеров ячейки δ по радиусу трубы R

Рисунок 5 – Разбиение расчетной сетки в пристенной области трубы в низкорейнольдсовой k - ε модели в радиальном направлении

Установленные граничные условия для решения уравнений (5) и (6) приведены в Таблице 1.

Таблица 1 – Граничных условий модельного трубопровода

Положение границы	Наименование	Тип	Граничные условия
Слева	Inlet	Velocity_inlet	$x = 0: U(0, y, t) = \text{const}$
Справа	Outlet	Pressure_outlet	$x = L: P_{\text{изб}}(L, y, t) = 0$
Сверху	Wall	Wall	$y = D: U = 0$
Внизу	Wall	Wall	$y = 0: U = 0$

Для приведенных в Таблице 1 данных, приняты расчетные значения начальной скорости $U = U_{\text{inlet}}$ (Velocity_inlet) для воды и растворов полимера. Давление на выходе (Pressure_outlet) установлено равным нулю $P_{\text{изб}} = 0$. С помощью программы MATLAB получена зависимость $f(\theta, A)$ от θ для противотурбулентной присадки (полиакриламида) и установлен вид демпфирующей функции f_{μ} :

$$f_{\mu} = \left[1 - \exp\left(-1.5 \times 10^{-4} R_y - 5 \times 10^{-7} R_y^3 - 10^{-10} R_y^5\right) \right]^{\frac{1}{2}} \times [\alpha \exp(\beta \theta) + \gamma], \quad (16)$$

где α , β , γ – постоянные коэффициенты для конкретной марки противотурбулентной присадки. Для полиакриламида $\alpha = 0,74$; $\beta = -0,07$; $\gamma = 0,26$.

Таким образом, решая совместно уравнение неразрывности (5), уравнение Рейнольдса-среднего Навье-Стокса (6), низкорейнольдсовую k - ε модель с двумя уравнениями турбулентности (11) и (12) методом RANS с учетом демпфирующей функции (16), получена математическая модель снижения

турбулентного сопротивления с использованием ПТП:

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i) &= 0; \\ \frac{\partial}{\partial t} (\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_i u_j) &= -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \overline{\rho u_i' u_j'} \right); \\ \frac{\partial (\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho k u_i)}{\partial x_i} &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - \rho \varepsilon; \\ \frac{\partial (\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho \varepsilon u_i)}{\partial x_i} &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \frac{C_{1\varepsilon} \varepsilon}{k} G_k - \frac{\varepsilon^2}{k} C_{2\varepsilon} \rho + \frac{\mu \mu_t}{\rho} \left(\frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right)^2, \end{aligned} \right. \quad (17)$$

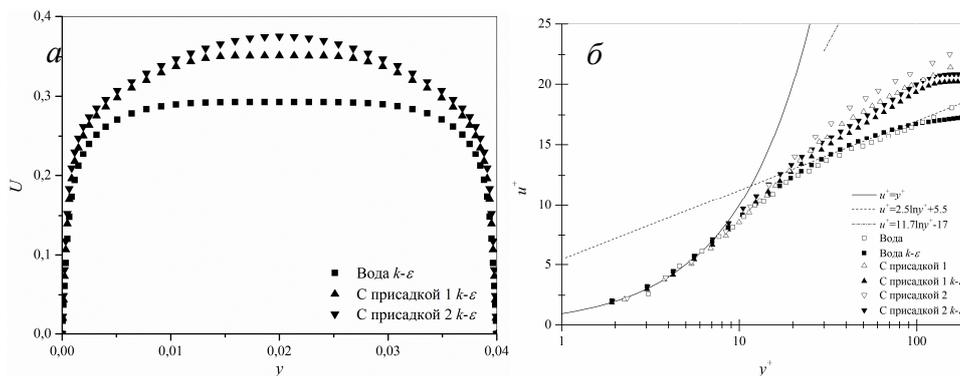
где G_k, R_y, μ_t, f_μ равны соответственно:

$$G_k = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j}; R_y = \frac{\sqrt{k} y}{\nu}; \mu_t = \rho f_\mu C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}; \quad (18)$$

$$f_\mu = \left[1 - \exp(-1.5 \times 10^{-4} R_y - 5 \times 10^{-7} R_y^3 - 10^{-10} R_y^5) \right]^2 \times [\alpha \exp(\beta \theta) + \gamma],$$

$$f_1 = 1, f_2 = 1, D = 0; C_{1\varepsilon} = 1.44, C_{2\varepsilon} = 1.92, C_\mu = 0.09, \sigma_k = 1.0, \sigma_\varepsilon = 1.3.$$

На основании модели снижения гидравлического сопротивления в трубопроводе с использованием ПТП (17), с помощью программы ANSYS FLUENT получены результаты распределения скорости с учетом деструкции присадки (при различных значениях скорости трения: $u_\tau = 16,9; 27,8; 37,3$ мм/с; при различных концентрациях ПТП: $\theta = 20; 107; 110; 113; 115; 116$ ppm). Пример расчета при $u_\tau = 16,9$ мм/с для трубопровода $D_1 = 40$ мм в сечении $x = 3,8$ м показан на Рисунках 6 и 7.



а) Поля распределения скорости по результатам численного моделирования;

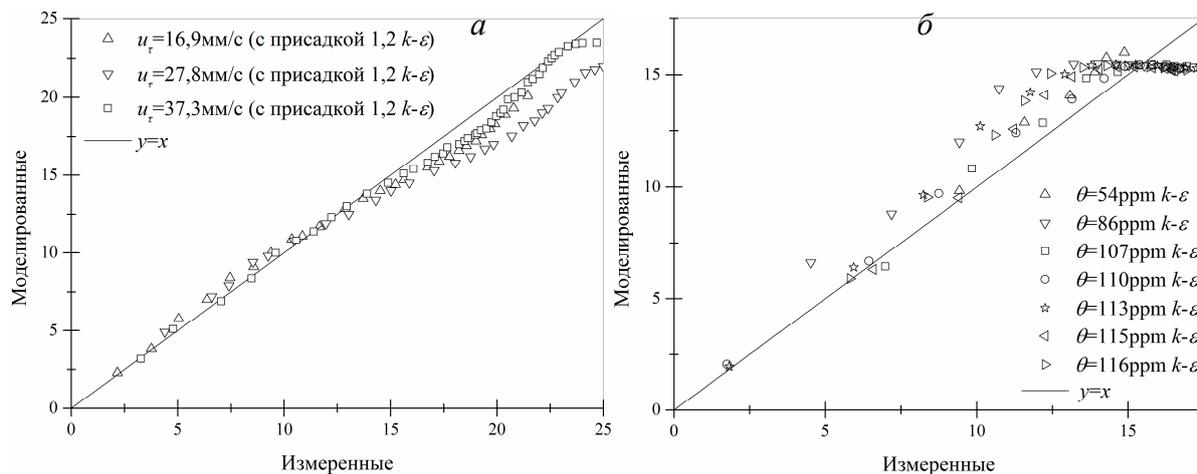
б) Зависимость скорости в сечении трубы u^+ от безразмерного расстояния y^+

1 – раствор полиакриламида, подвергнутый воздействию сдвиговых напряжений;

2 – раствор полиакриламида без деструкции

Рисунок 6 – Результаты численного моделирования для трубопровода

$$D_1 = 40 \text{ мм в сечении } x = 3,8 \text{ м при } u_\tau = 16,9 \text{ мм/с}$$



а) при различных значениях скорости трения: $u_\tau = 16,9; 27,8; 37,3 \text{ мм/с}$;

б) при различных концентрациях ПТП: $\theta = 20; 107; 110; 113; 115; 116 \text{ ppm}$

Рисунок 7 – Относительная погрешность измеренных и моделированных скоростей течения

Сопоставляя данные эксперимента и результаты численного моделирования можно сделать следующие выводы:

- эффект снижения гидравлического сопротивления при вводе ПТП в турбулентный поток жидкости проявляется в переходном и, преимущественно, в логарифмическом слоях;
- деструкция макромолекул полимера (раствор 1) снижает гидравлическую эффективность ПТП (раствор 2);
- увеличение концентрации ПТП и числа Рейнольдса повышает гидравлическую эффективность ПТП;
- в вязком слое эффекта снижения сопротивления при вводе ПТП не наблюдается.

Таким образом, предлагаемый метод численного моделирования для исследования механизма снижения сопротивления с ПТП позволяет:

- прогнозировать распределение скорости в осевом направлении сечения трубы при снижении гидравлического сопротивления с ПТП с погрешностью, не превышающей 5 %;
- определять зону действия снижения гидравлического сопротивления в потоке с ПТП по сечению трубы;
- прогнозировать гидравлическую эффективность DR с учетом деструкции ПТП;
- прогнозировать распределение интенсивности турбулентности с помощью программы ANSYS FLUENT.

В четвертой главе предложен метод прогнозирования гидравлической эффективности противотурбулентных присадок с учетом их деструкции в потоке перекачиваемой жидкости. На основании данных опытно-промышленных испытаний (ОПИ) ПТП (Рисунок 8) предложена методика определения требуемой концентрации противотурбулентной присадки с учётом начального участка активации и путевой деструкции.

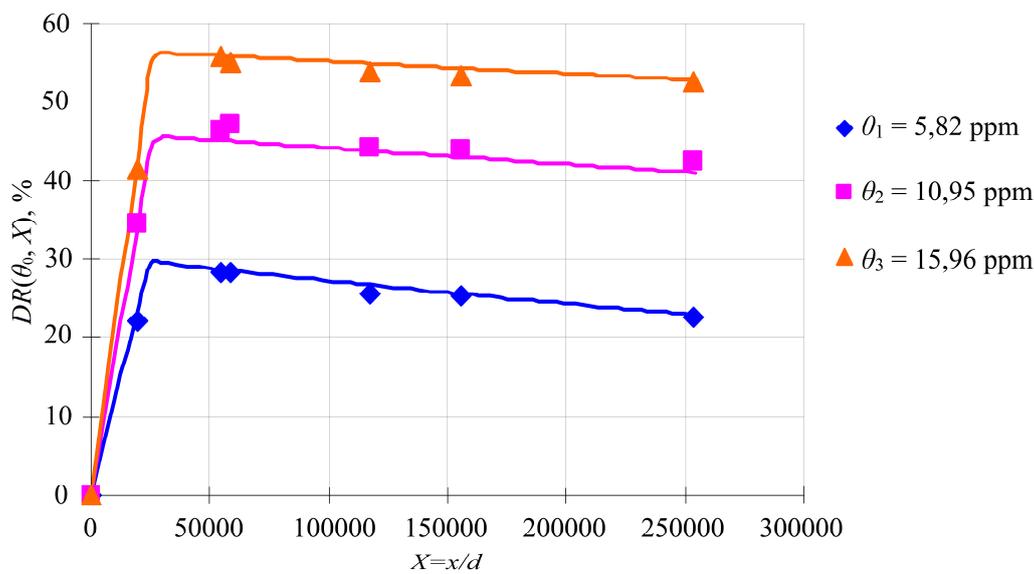


Рисунок 8 – Изменение гидравлической эффективности ПТП «M-FLOWTREAT» по длине участка трубопровода

Полагая, что на начальном участке гидравлическая эффективность присадки линейно возрастает и далее убывает по закону, близкому к экспоненциальному, можно записать:

$$DR(\theta_0, X) = A \cdot X \quad \text{при } X \leq X_a; \quad (19)$$

$$DR(\theta_0, X) = C \cdot e^{-BX} \quad \text{при } X_a < X \leq L_0, \quad (20)$$

где $X = x/d$ – относительное удаление от точки ввода присадки;

X_a – относительная длина начального участка активации ПТП;

$L_0 = L/d$ – относительная длина трубопровода;

A, B, C – коэффициенты, зависящие от вводимой концентрации ПТП и условий проведения ОПИ (режима перекачки, свойств нефтепродукта-разбавителя и присадки, температуры и т. п.).

Обработка данных ОПИ позволила получить следующие значения:

$$A = 4,248 \cdot 10^{-4} \cdot \theta_0^{0,587}; \quad (21)$$

$$B = 1,248 \cdot 10^{-5} \cdot \theta_0^{-1,364}; \quad (22)$$

$$C = \frac{\theta_0}{a_1 + a_2 \cdot \theta_0}, \quad (23)$$

где θ_0 – начальная концентрация присадки в точке ввода при условии её полного растворения (ppm);

a_1, a_2 – коэффициенты асимптоты Вирка (для ПТП M-Flowtreat $a_1 = 0,1396$; $a_2 = 8,88 \cdot 10^{-3}$).

Концентрация ПТП в потоке нефтепродукта на расстоянии X от места её ввода может быть найдена из выражения с погрешностью, не превышающей 3 %:

$$\theta(X) = \frac{a_1 \cdot DR(\theta_0, X)}{1 - a_2 \cdot DR(\theta_0, X)}. \quad (24)$$

С учетом (19), (20) и (24) вычисляется эффективная среднеинтегральная концентрация противотурбулентной присадки на участке L_0 :

$$\theta_{cp} = \frac{1}{L_0} \cdot (J_1 + J_2). \quad (25)$$

где J_1 и J_2 – интегральные суммы концентрации ПТП соответственно на участке активации и деструкции присадки, определяемые по формулам:

$$J_1 = \int_0^{X_a} \frac{a_1 \cdot A \cdot X}{1 - a_2 \cdot A \cdot X} \cdot dX = -\frac{a_1}{a_2} \cdot \left[X_a + \frac{1}{a_1 \cdot A} \cdot \ln(1 - a_2 \cdot A \cdot X) \right]; \quad (26)$$

$$J_2 = \int_{X_a}^{L_0} \frac{a_1 \cdot C \cdot e^{-BX}}{1 - a_2 \cdot C \cdot e^{-BX}} \cdot dX = \frac{a_1}{a_2 \cdot B} \cdot \ln \left(\frac{a_2 \cdot C \cdot e^{-BL_0} - 1}{a_2 \cdot C \cdot e^{-BX_a} - 1} \right). \quad (27)$$

При заданном значении концентрации вводимой присадки θ_0 , аналогично рассчитывается и её средняя интегральная эффективность:

$$DR_{cp} = \frac{1}{L_0} \cdot \left(\int_0^{X_a} A \cdot X dX + \int_{X_a}^{L_0} C \cdot e^{-BX} dX \right) = \frac{1}{L_0} \cdot \left[A \cdot \frac{X_a^2}{2} + \frac{C}{B} \cdot (e^{-BX_a} - e^{-BL_0}) \right]. \quad (28)$$

Предлагаемый метод расчета с достаточной для практического использования точностью позволяет:

- прогнозировать гидравлическую эффективность противотурбулентной присадки с учетом её растворения и деструкции;
- определять длину участка активации ПТП;
- вычислять начальную концентрацию вводимой присадки для обеспечения заданной гидравлической эффективности.

Обобщая экспериментальные и теоретические результаты, можно конкретизировать условия снижения явления деструкции ПТП в условиях промышленного применения:

- уменьшение числа Рейнольдса Re (соответственно скорости U и интенсивности турбулентности I) при перекачке нефтепродуктов с ПТП;
- увеличение молекулярной массы молекулы присадки M и упругости полимера (соответственно числа Вайсенберга Wi) при условии постоянного расхода нефтепродуктов с ПТП;
- снижение времени t или расстояния транспортирования L при постоянной скорости перекачки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. В результате проведенных исследований на лабораторном турбореометре проанализировано влияние свойств нефтепродукта (разбавителя), свойств противотурбулентной присадки и её концентрации θ в растворе, начальной температуры T на эффективность снижения гидравлического сопротивления с учетом эффекта деструкции ПТП. Показано, что темп снижения гидравлической эффективности ПТП вследствие деструкции возрастает с увеличением концентрации ПТП и частоты вращения диска.

2. Получена математическая модель расчета гидравлической эффективности DR противотурбулентной присадки с учетом процессов её активации и путевой деструкции, которая позволяет определять величину DR в условиях транспортировки по трубопроводу на основании адаптации данных, полученных экспериментально на дисковом реометре. Относительная погрешность предлагаемой модели не превышает 9 %.

3. Разработаны методологические основы прогнозирования процесса снижения гидравлического сопротивления с ПТП и их деструкции в трубопроводе методами численного моделирования, а именно путём:

- использования k - ε модели с двумя уравнениями для турбулентного режима течения с учетом добавки полимерной присадки;
- решения уравнения Навье-Стокса при осредненном числе Рейнольдса (RANS);
- снижения турбулентного сопротивления с использованием ПТП методом RANS с помощью программы ANSYS FLUENT.

Предлагаемые методы численного моделирования для исследования механизма снижения гидравлического сопротивления при вводе ПТП позволяют:

- определять зону действия эффективного снижения гидравлического сопротивления в потоке с ПТП;

– прогнозировать распределение скорости в осевом направлении турбулентного потока с ПТП с погрешностью, не превышающей 5 %;

– с помощью программы ANSYS FLUENT прогнозировать распределение интенсивности турбулентности в потоке с ПТП.

4. Разработана методика прогнозирования гидравлической эффективности противотурбулентной присадки на линейном участке трубопровода с учетом её активации и деструкции, позволяющая рассчитывать интегральную гидравлическую эффективность ПТП и необходимую её концентрацию в точке инъекции. Предложены методы повышения устойчивости ПТП к деструкции в условиях трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов.

Основные результаты работы опубликованы в 15 научных трудах.

- статьи в изданных, индексируемых в Web of Science:

1. **Chen Yang**, Li Changjun*, A.M.Nechval, etc al. Commercial field testing improves understanding of DRA degradation [J]. Oil&Gas journal. 2018, 116(3):78-84. (SCI: 000427662700023)

2. **Chen Yang**, Li Changjun*, A.M.Nechval, etc al. New drag-reduction efficiency model promises operating savings [J]. Oil&Gas journal. 2017,115(5):70-75. (SCI:000401304400019)

3. **Чэнь Ян**, Ли Чангджун*, А.М.Нечваль, etc al. Деструкция антифрикционных присадок результаты полевых испытаний на 130-километровом нефтепродуктопроводе [J]. Oil&Gas journal Russia. 2018,8(128):88-94.

4. **Чэнь Ян**, Ли Чангджун*, А.М.Нечваль, etc al. Новая модель прогноза снижения сопротивления потоку с применением противотурбулентных присадок [J]. Oil&Gas journal Russia. 2017,6(116):80-84.

- статьи в ведущих рецензируемых журналах и изданиях, утверждённых ВАК РФ:

5. **Чэнь Ян**. Анализ различных факторов влияющих на эффективность снижения гидравлического сопротивления при добавлении противотурбулентных присадок / **Чэнь Ян**, Нечваль А.М., Муратова В.И. // Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. 2019. – № 2. – С. 142–152.

6. **Чэнь Ян**. Прогноз гидравлической эффективности при перекачке жидкости с противотурбулентной присадкой с использованием методов численного

моделирования / **Чэнь Ян**, Нечваль А.М., Муратова В.И. // Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья. 2019. – № 2. – С. 9–13.

7. **Чэнь Ян**. Оценка влияния путевой деструкции противотурбулентной присадки на её гидравлическую эффективность / Нечваль А.М., Муратова В.И., **Чэнь Ян** // Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья. 2017. – № 1. – С. 43–49.

8. **Чэнь Ян**. Экстремальный подход к задаче гидравлического расчета стационарного режима работы нефтепродуктопроводных систем / Шаммазов А.М, Пирогов А.Н., Нечваль А.М., Пирогов Н.Е., Сухарников Л.А., **Чэнь Ян**, Ахияров Р.Ж. // "Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья" 2019. – № 1. – С. 5–9.

- тезисы в материалах различных конференций

9. **Чэнь Ян**. Оценка деструкции противотурбулентной присадки на дисковом турбурометре / А.М. Нечваль, Чэнь Ян // Трубопроводный транспорт – 2018: XIII Международная учебно-научно-практическая конференция: Сб. Материалов конф. / Редкол.: Р.Н.Бахтизин, С.М.Султанмагомедов и др. – Уфа: Изд-во УГНТУ, – 2018. – С.102-103.

10. **Чэнь Ян**. Определение требуемой концентрации противотурбулентной присадки с учетом её растворения и путевой деструкции/ А.М. Нечваль, Чэнь Ян // Трубопроводный транспорт – 2017: XII Международная учебно-научно-практическая конференция: Сб. Материалов конф. / Редкол.: Р.Н.Бахтизин, С.М.Султанмагомедов и др.– Уфа: Изд-во УГНТУ, – 2017. – С.146-147.

11. **Чэнь Ян**. Учёт деструкции противотурбулентных присадок в трубопроводах/ Чэнь Ян, А.М. Нечваль // 66-я научно-технические конференции студентов, аспирантов и молодых учёных: Сб. Материалов конф. – Кн.1 / Редкол.: Ю.Г. Матвеев и др. – Уфа: Изд-во УГНТУ. –2015. – С.194-196.

12. **Чэнь Ян**. Влияние реологических параметров на снижение сопротивления режимов турбулентного течения с полимерными добавками / Чэнь Ян, А.М. Нечваль // Трубопроводный транспорт – 2014: Материалы VII Международная научно-практическая конференция молодых ученых «Актуальные проблемы науки и техники – 2014» / – Уфа: Изд-во УГНТУ.– 2014. – С.109-110.

13. **Чэнь Ян**. Эффективность противотурбулентных присадок для снижения гидравлического сопротивления магистральных трубопроводов /

Чэнь Ян, А.М. Нечваль // 65-я научно-технические конференции студентов, аспирантов и молодых учёных: Сб. Материалов конф. – Кн.3 / Редкол.: Ю.Г. Матвеев и др. – Уфа: Изд-во УГНТУ. –2014. – С.201.

- Патенты на полезную модель и изобретение

14. **Chen Yang**. A polymer turbulent drag reduction measurement method and the device: China. Patent 201711418626.4[P].

– Проекты национальных фондов естественных наук

15. Национальный фонд естественных наук РФФИ и ГФЕН (№ 5181101810, №19-58-53009), Исследование синергетического эффекта воздействия на поверхностное граничное сопротивление пристенного слоя и сглаживания турбулентности потока при добыче и транспорте нефти в условиях низких температур, 01.2019-12.2020, РФ и КНР.