

На правах рукописи



КАРПОВ ФИЛИПП АЛЕКСЕЕВИЧ

**ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ТРАНСПОРТИРОВКИ НЕФТИ И  
НЕФТЕПРОДУКТОВ ПО МАГИСТРАЛЬНЫМ ТРУБОПРОВОДАМ ЗА  
СЧЕТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПРОТИВОТУРБУЛЕНТНЫХ ПРИСАДОК С  
УЧЕТОМ ИХ ДЕГРАДАЦИИ**

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

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Уфа-2023

Работа выполнена на кафедре «Транспорт и хранение нефти и газа»  
ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет»

Научный руководитель доктор технических наук, доцент  
Гареев Мурсалим Мухутдинович

Официальные оппоненты: Кутуков Сергей Евгеньевич  
доктор технических наук, доцент  
«Научно-технический центр трубопроводного  
транспорта»  
ООО «Научно-исследовательский институт  
трубопроводного транспорта» /  
Управление математического моделирования и  
технологий трубопроводного транспорта,  
главный научный сотрудник  
(г. Уфа)

Байбекова Лия Рафаэльовна  
кандидат технических наук, доцент  
Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Казанский национальный исследовательский  
технологический университет» /  
кафедра «Химической технологии переработки нефти  
и газа», доцент  
(г. Казань)

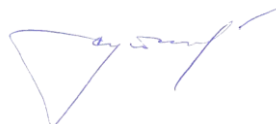
Ведущая организация Федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Российский государственный университет нефти и  
газа (национальный исследовательский университет)  
имени И.М. Губкина» (г. Москва)

Защита диссертации состоится «30» ноября 2023 года в 10-00 на заседании  
диссертационного совета 24.2.428.03, созданного при ФГБОУ ВО «Уфимский государственный  
нефтяной технический университет» по адресу: 450064, Республика Башкортостан, г. Уфа,  
ул. Космонавтов, 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Уфимский  
государственный нефтяной технический университет» и на сайте [www.rusoil.net](http://www.rusoil.net).

Автореферат диссертации разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2023 года.

Ученый секретарь  
диссертационного совета



Султанов Шамиль Ханифович

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### **Актуальность работы**

Одним из наиболее перспективных методов повышения производительности магистральных трубопроводов, является применение противотурбулентных присадок. Несмотря на широкое промышленное внедрение эффект снижения гидродинамического сопротивления при турбулентном течении жидкостей с добавлением полимеров в малых концентрациях (эффект Томса) является предметом дискуссий как зарубежных, так и отечественных исследователей. В области магистрального транспорта жидких углеводородов до сих пор остается актуальным поиск присадок, обладающих максимальной гидравлической эффективностью.

Особенностью эффекта Томса является снижение его проявления со временем, вызванное деструкцией полимерных цепей. В настоящий момент существует множество гипотез о причинах разрушения полимеров в разбавленных растворах при турбулентном течении, но, тем не менее, вывод о главенствующем значении того или иного фактора деструкции является неоднозначным. Для развития научных представлений о природе полимеров в целом и об эффекте Томса в частности, требуется установить физико-химические аспекты процесса деструкции полимеров в растворах при турбулентном течении. Кроме того, является актуальным получение дополнительных данных об особенностях проявления эффекта Томса в условиях промышленной эксплуатации противотурбулентных присадок.

### **Степень разработанности проблемы**

Современная отечественная литература в области течений разбавленных растворов полимеров и, в частности, применения противотурбулентных присадок в магистральном транспорте жидких углеводородов, определения их эффективности снижения гидродинамического сопротивления представлена работами Абдусаламова А.В., Байбековой Л.Р., Белоусова Ю.П., Валиева М.И., Гареева М.М., Голунова Н.Н., Гольянова А.И., Гумерова А.Г., Дусметовой Г.И., Жолобова В.В., Коновалова К.Б., Коршака А.А., Кутукова С.Е., Лисина Ю.В., Лурье М.В., Манжая В.Н., Мастобаева Б.Н., Мирзаджанзаде А.Х., Муратовой В.И., Мягченкова В.А., Несына Г.В., Нечваля А.М., Носикова Ю.Р., Ревель-Муроза П.А., Талипова Р.Ф., Фридлянда Я.М., Худяковой Л.П., Хуссаина М.Н., Хуснуллина Р.Р., Чичканова С.В., Челинцева Н.С., Чэнь Ян, Шагиева Р.Г., Шамсуллина А.И., Шарифуллина А.В., Шаммазова А.М. и др..

### **Соответствие паспорту заявленных специальностей**

Тема и содержание диссертационной работы соответствуют паспорту специальности 2.8.5. – «Строительство и эксплуатация нефтегазопроводов, баз и хранилищ» - п. 2 «Научные

основы системного комплексного (мультидисциплинарного) проектирования конструкций, прочностных, гидромеханических, газодинамических и теплофизических расчетов сухопутных и морских систем трубопроводного транспорта для добычи, сбора, подготовки, транспортировки и хранения углеводородов, распределения, газоснабжения и нефтепродуктообеспечения, подземных и наземных газонефтехранилищ, терминалов, инженерной защиты и защиты от коррозии, организационно-технологических процессов их сооружения, эксплуатации, диагностики, обеспечения системной надежности, механической и экологической безопасности.» и п. 4 «Методы и средства информационных технологий, моделирования, мониторинга, прогнозирования, интеллектуального инжиниринга и управления, автоматизации и роботизации, стандартизации и цифровизации технологических процессов проектирования, сооружения, эксплуатации, диагностики, ремонта сухопутных и морских систем трубопроводного транспорта для добычи, сбора, подготовки, транспортировки и хранения углеводородов, распределения, газоснабжения и нефтепродуктообеспечения, а также других газовых, жидкостных и многофазных сред, гидро- и пневмоконтейнерного транспорта с целью повышения эффективности, надежности и безопасности использования отраслевого потенциала и ресурса трубопроводных конструкций».

**Цель диссертационной работы** состоит в совершенствовании методов оценки изменения гидравлической эффективности применения противотурбулентных присадок при транспортировке нефти и нефтепродуктов по магистральным трубопроводам.

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

1. Анализ и обобщение известных данных об особенностях проявления механической деструкции полимеров при трубопроводном транспорте нефти и нефтепродуктов с добавлением противотурбулентных присадок, а также существующих методов математического моделирования течения жидких углеводородов, обработанных присадками.

2. Аналитическое описание закономерности возникновения механической деструкции противотурбулентных присадок под действием сдвиговых напряжений трения в турбулентном потоке нефти и нефтепродуктов в трубопроводе.

3. Усовершенствование методики расчета распределения давления по длине магистральных нефте- и нефтепродуктопроводов с учетом путевой деградации противотурбулентных присадок.

4. Выявление факторов, влияющих на снижение гидравлической эффективности противотурбулентных присадок под действием касательных напряжений трения при различных технологических режимах работы магистрального трубопровода.

### **Научная новизна работы**

1. Сформулирована и аналитически решена задача определения гидродинамических условий возникновения механической деструкции противотурбулентных присадок в турбулентном потоке нефти и нефтепродуктов.

2. Усовершенствована существующая математическая модель турбулентного течения жидких углеводородов с противотурбулентными присадками с учетом механической деструкции полимера.

3. Установлено влияние изменения гидравлической эффективности противотурбулентных присадок на отклонение фактических параметров технологических режимов работы магистральных нефте- и нефтепродуктопроводов от нормативных значений, и на основании этого усовершенствована методика прогнозного гидравлического расчета трубопроводов с учетом экспериментальных данных о путевой деградации присадок.

### **Теоретическая и практическая значимость работы**

**Теоретическая значимость** работы заключается в следующем:

1. Получено уравнение, описывающее механическую деструкцию противотурбулентных присадок под действием напряжений сдвига при турбулентном течении углеводородного растворителя, учитывающее физико-химические свойства и концентрацию присадки.

2. Повышена точность прогнозного гидравлического расчета магистрального трубопровода при перекачке нефти и нефтепродуктов с противотурбулентными присадками за счёт введения функции изменения интегральной эффективности присадок на основании экспериментальных данных.

3. Установлено по результатам анализа данных промышленного применения противотурбулентных присадок при трубопроводном транспорте нефтепродуктов, что на изменение гидравлической эффективности присадок по длине магистрального трубопровода в рассматриваемых случаях влияет не только механическая деструкция, но и снижение сдвиговых напряжений трения в результате подключения лупинга и уменьшение объема полимерных клубков, вызванное распадом ассоциатов макромолекул.

**Практическая значимость** работы заключается в следующем:

1. Предложено соотношение, которое позволяет проводить аналитическую оценку возникновения механической деструкции противотурбулентных присадок при разработке плановых технологических режимов транспортировки нефти и нефтепродуктов по магистральным трубопроводам без проведения дополнительных турбореометрических и опытно-промышленных испытаний; а также определить требуемые физико-химические свойства присадки, устойчивой к деструкции в заданных гидродинамических условиях, для осуществления ее целенаправленного синтеза.

2. Доказано на основании промышленных данных применения противотурбулентных присадок, что усовершенствованная методика расчета плановых режимов транспортировки нефти и нефтепродуктов с учетом путевой деградации присадки позволяет диспетчерской службе осуществлять более качественный контроль над отклонениями параметров перекачки от нормативных значений.

3. Представленные в работе результаты могут применяться 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».

### **Методология и методы исследования**

Теоретические исследования проблемы деградации противотурбулентных присадок при трубопроводном транспорте нефти и нефтепродуктов представляют собой научный анализ и обобщение данных промышленной эксплуатации присадок и лабораторных экспериментов по изучению закономерностей проявления эффекта Томса.

При разработке условия деструкции противотурбулентных присадок под действием касательных напряжений трения в ламинарном подслое турбулентного потока применена математическая модель вращательного движения вязкоупругого клубка макромолекулы. Аналитическое выражение, описывающее механическую деструкцию присадок под влиянием турбулентных пульсаций, получено на основании математической модели турбулентного течения конечно-растяжимого нелинейно-упругого тела (FENE-P). Вывод аналитических соотношений основан на гипотезе о том, что механическая деструкция макромолекул противотурбулентных присадок возникает при превышении энергии внешнего воздействия, упруго запасаемой связями между сегментами основной цепи, величины энергии разрыва «слабых» химических связей.

Предложенная методика уточненного прогнозного гидравлического расчета магистрального трубопровода при перекачке нефти и нефтепродуктов с противотурбулентными присадками основана на введении в уравнение баланса напоров функции изменения интегральной эффективности присадок по координате от точки ввода, полученной по результатам аппроксимации данных опытно-промышленных испытаний.

### **Положения, выносимые на защиту**

1. Аналитическое соотношение для определения условия возникновения механической деструкции полимера под действием касательных напряжений трения в ламинарном подслое турбулентного потока при трубопроводном транспорте жидких углеводородов с добавлением противотурбулентных присадок.

2. Модификация существующей модели турбулентного течения нефти и нефтепродуктов с противотурбулентными присадками, учитывающая механическую деструкцию полимера при изменении конформации под действием турбулентных пульсаций.

3. Методика учета путевой деградации противотурбулентных присадок при расчете распределения давления по длине магистральных трубопроводов для контроля над отклонением от нормативных параметров транспортировки нефти и нефтепродуктов.

#### **Степень достоверности и апробация результатов**

Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на:

– первом туре III(XV) Международной научно-технической конференции молодежи ПАО «Транснефть», 2019 г.;

– втором туре III(XV) Международной научно-технической конференции молодежи ПАО «Транснефть», 2021 г.;

– 75-ой Международной молодежной научной конференции «НЕФТЬ И ГАЗ», 2021 г.;

– 73-й научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых УГНТУ, 2022 г.;

– XVII Международной учебно-научно-практической конференции «Трубопроводный транспорт–2022», 2022 г.

#### **Публикации**

По материалам диссертационной работы опубликовано 15 печатных работ, в том числе 3 статьи в журналах, входящих в перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий в соответствии с требованиями ВАК Министерства образования и науки РФ; из них 1 статья в журнале, также индексируемом в базе данных Web of Science и Scopus.

Диссертационная работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №20-38-90221.

#### **Структура и объем работы**

Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав, основных выводов, изложена на 155 страницах машинописного текста и содержит 22 рисунка, 13 таблиц и список литературы из 240 наименований.

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

**Первая глава** посвящена анализу отечественных и зарубежных литературных источников по теме диссертационной работы. Рассмотрены особенности моделирования вязкоупругого течения полимерных растворов, а также механической деструкции полимерных цепей.

На основе проведенного анализа сформулированы основные задачи исследования.

**Во второй главе** рассмотрено движение вязкоупругого тела под воздействием сдвиговых нагрузок в ламинарном подслое (Рисунок 1). Конформация макромолекулы в начальный момент времени может быть представлена областью, окруженной сферой с радиусом, равным среднему радиусу инерции клубка. Предполагая механическую деструкцию при сдвиге мгновенным процессом, допустим, что разрыв цепи наступает до приобретения макромолекулой конформации, ориентированной вдоль направления течения растворителя.

В пристенном слое при течении раствора в точке А на макромолекулу действует сила  $F_{mp}$ , которую можно разложить на две компоненты: деформирующую  $F_{деф}$  и вращающую  $F_{вр}$  (Рисунок 1). В начальный момент времени  $F_{деф}$  уравновешена силой упругости  $F_{упр}$ . Под действием неуравновешенной вращательной силы  $F_{вр}$  происходит качение макромолекулы с иммобилизованным растворителем в пристенном слое. При повороте макромолекулы на угол  $\pi/2$  сила упругости перестает уравновешивать деформирующую силу, и запасенная упругая энергия передается во внешнюю среду.

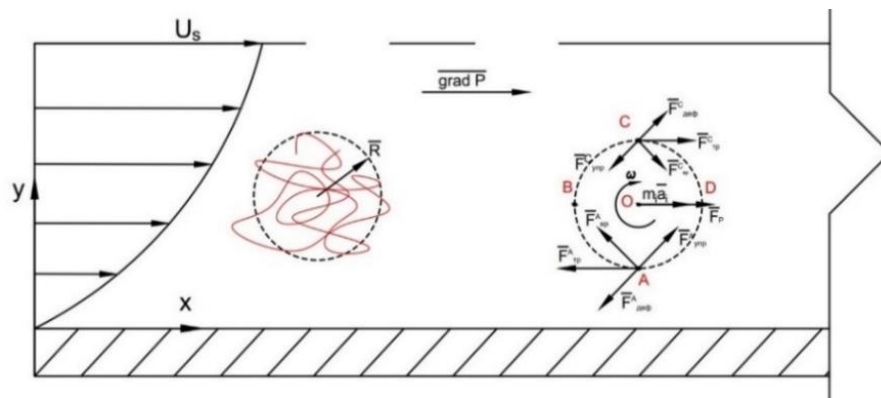


Рисунок 1 – Условная схема движения вязкоупругого тела под воздействия сдвиговых нагрузок в пристеночной области

Данный процесс описывается при помощи следующих гармонических законов:

$$\tau(t) = \tau_0 \cos \omega \cdot t; \quad (1)$$

$$\gamma(t) = \gamma_0 \cos(\omega \cdot t - \delta), \quad (2)$$

где  $\tau_0$  – амплитудное значение касательного напряжения;

$\gamma_0$  – амплитудное значение деформации  $\gamma_0 = \tau_0 / G_0$  ;

$\delta$  – значение фазового угла, называемого углом запаздывания или углом механических потерь;

$\omega$  – циклическая частота вращения, 1/с;

$t$  – время, с;

$G_0$  – модуль упругости, Па.

Модуль упругости может быть найден по формуле:



$$G_0 = NkT = \frac{cRT}{M}, \quad (3)$$

где  $N$  – число цепей в единице объема полимерной системы,  $1/\text{м}^3$ ;  
 $k$  – постоянная Больцмана, Дж/К;  
 $T$  – абсолютная температура, К;  
 $c$  – концентрация полимера в растворе,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;  
 $R$  – универсальная газовая постоянная, равная  $8,314 \text{ Дж}/\text{моль}\cdot\text{К}$ ;  
 $M$  – средняя молярная масса полимера,  $\text{кг}/\text{моль}$ .

Найдем работу за цикл вращения в расчете на единицу объема, Дж/м<sup>3</sup>:

$$\begin{aligned} A &= \int_0^{2\pi} \tau(t) d\gamma = \int_0^{2\pi} \tau(t) \frac{d\gamma}{dt} dt = \int_0^{2\pi} \tau(t) \dot{\gamma} dt = - \int_0^{2\pi} \tau_0 \cos \omega \cdot t [\gamma_0 \omega \sin(\omega \cdot t - \delta)] dt = \\ &= - \frac{\tau_0 \gamma_0}{2} \cos \delta \sin^2 \omega \cdot t \Big|_0^{2\pi} + \frac{\tau_0 \gamma_0}{2} \sin \delta \left( \omega \cdot t + \frac{1}{2} \sin 2\omega \cdot t \right) \Big|_0^{2\pi}, \end{aligned} \quad (4)$$

где  $\dot{\gamma}$  – скорость сдвига,  $1/\text{с}$ .

Первое слагаемое представляет собой энергию, упруго запасаемую в единице объема. За цикл вращения эта энергия равна нулю. Максимальное количество энергии упруго запасается в единице объема за четверть цикла, то есть за  $\pi/2\omega$ :

$$W_1 = \frac{\tau_0^2}{2G_0} \cos \delta \sin^2 \omega \cdot t \Big|_0^{\pi/2\omega} = \frac{\tau_0^2}{2G_0} \cos \delta = \frac{\tau_0^2}{2G_0^2} G', \quad (5)$$

где  $G'$  – компонента комплексного модуля упругости, называемая модулем накопления, Па.

$$G' = G_0 \sum_{p=1}^n \frac{(\omega \theta_m)^2}{p^4 + (\omega \theta_m)^2}, \quad (6)$$

где  $\theta_m$  – время релаксации макромолекулярного клубка, с;  
 $p$  – число кинетически независимых сегментов в полимерной цепи;  
 $n$  – максимальное число кинетически независимых сегментов.

Произвольную макромолекулу, принято заменять простейшей моделью свободно-сочлененной цепи, которая представляется в виде  $N-1$  кинетически независимых сегментов Куна (жестких невесомых стержней), которые последовательно соединены  $N$  шарнирными сочленениями (бусинами). Конформация макромолекул изменяется вследствие теплового движения сегментов цепи, а также под воздействием внешних сил. Количество кинетически независимых сегментов в макромолекуле равно:

$$p = \left( \frac{2 \cdot b \cdot M^{2/3} \cdot \sin \frac{\varphi}{2} \cdot \Phi^{1/3}}{\mu \cdot [\eta]^{1/3}} \right)^2, \quad (7)$$

где  $\Phi$  – универсальная постоянная Флори,  $\text{моль}^{-1}$ ;  
 $\varphi$  – валентный угол между двумя атомами углерода основной цепи;

$\mu$  – молярная масса мономера;

$[\eta]$  – характеристическая вязкость полимерного раствора.

Максимальное время релаксации для модели Каргина-Слонимского-Рауза:

$$\theta_m = 0,608 \frac{(\eta_0 - \eta_s)M}{cRT}, \quad (8)$$

где  $\eta_0$  – динамический коэффициент вязкости раствора, Па·с;

$\eta_s$  – динамический коэффициент вязкости растворителя, Па·с.

В объеме макромолекулярного клубка  $V_\kappa$  упруго запасается, Дж:

$$W_\kappa = W_1 \cdot V_\kappa = \frac{\tau_0^2}{2G_0^2} G' V_\kappa. \quad (9)$$

Объем макромолекулярного клубка может быть рассчитан по формуле:

$$V_\kappa = 0,28 \frac{M \alpha^3 [\eta]_\theta}{\Phi} = 0,28 \frac{M [\eta]}{\Phi} \approx \frac{M [\eta]}{N_A}. \quad (10)$$

С учетом (2.9) выражение (2.8) примет вид:

$$W_\kappa = \frac{\tau_0^2}{2G_0^2} G' V_\kappa = \frac{\tau_0^2 M^2 [\eta]}{2cRT N_A} \sum_{p=1}^n \frac{(\omega \theta_m)^2}{p^4 + (\omega \theta_m)^2}. \quad (11)$$

В одном моле раствора полимерными клубками запасается количество энергии, Дж/моль:

$$W = \frac{\tau_0^2 M^2 [\eta]}{2pcRT} \sum_{p=1}^n \frac{(\omega \theta_m)^2}{p^4 + (\omega \theta_m)^2}. \quad (12)$$

Разрыв главной цепи полимера происходит при превышении энергии, упруго запасаемой макромолекулой, энергии разрыва «слабых» химических связей  $E_0$ , которая для различных полимеров составляет 120-350 кДж/моль. Исходя из этого, можно сформулировать уравнение, описывающее условие, при котором начнется процесс необратимого разрушения полимерных молекул.

Условие начала механической деструкции:

$$W = \frac{\tau_0^2 M^2 [\eta]}{2pcRT} \sum_{p=1}^n \frac{(\omega \theta_m)^2}{p^4 + (\omega \theta_m)^2} \geq E_0. \quad (13)$$

Данное условие является аналитическим описанием механической деструкции противотурбулентных присадок, которое учитывает как характеристики внешнего воздействия  $(\tau_0, T)$ , так и молярную массу  $M$  и концентрацию полимера, а также качество растворителя  $[\eta]$ . Выражение под знаком суммы учитывает проявление релаксационных свойств полимера. Уравнение (13) согласуется с данными экспериментов о том, что механической деструкции при течении полимерного раствора в большей степени подвержены макромолекулы с высокой

молекулярной массой, при большей характеристической вязкости, в меньшей концентрации, под действием высоких напряжений сдвига и при меньшей температуре.

Установлено расчетом по данным опытно-промышленных испытаний противотурбулентной присадки «ВИОЛ» на участке магистрального нефтепровода «Александровское-Анжеро-Судженск», что данная присадка не подвержена механической деструкции под действием касательных напряжений величиной менее 10 Па, достигаемых при турбулентном течении в магистральном трубопроводе. При течении в рабочих колесах центробежных насосов марки НМ наблюдаются высокие значения сдвиговых напряжений трения, превышающие  $10^3$  Па, что приводит к разрыву химических связей макромолекул полимера.

Существующие математические модели турбулентного течения жидких углеводородов с противотурбулентными присадками не учитывают возникновение механической деструкции полимера и нуждается в дополнительном усовершенствовании. Модифицирована с учетом механической деструкции полимера существующая математическая модель  $k$ - $\epsilon$ , основанная на решении системы осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса и дифференциального уравнения изменения тензора конформации  $C_{ij}$  макромолекул. Предложено ввести в систему модельных уравнений дополнительное – для проверки условия возникновения механической деструкции:

$$W = 500 \frac{cRT}{p} L^2 [\eta] \ln f(C_{kk}) \geq E_0, \quad (14)$$

где  $L$  – максимальное относительное удлинение макромолекулы;

$$f(C_{kk}) = \frac{L^2 - 3}{L^2 - C_{kk}} - \text{функция Петерлина};$$

$C_{kk}$  – след тензора конформации.

При выполнении условия (14) возникновения механической деструкции расчет профиля скоростей необходимо проводить по модели  $k$ - $\epsilon$  для турбулентного течения вязкой несжимаемой жидкости. Проиллюстрировано на примере по расчетным данным других авторов применение уравнения (14). Показано, что значение упруго запасаемой энергии  $W$  в точке на расстоянии от стенки  $y^+ = 10$  ( $u^+(y^+)$  и  $y^+$  – безразмерные величины соответственно средней скорости в пристеночной области и координаты стенки в универсальном законе распределения скоростей) превышает порог возникновения механической деструкции 120 кДж/моль, что обусловлено высоким значением тензора конформации  $C_{kk} = 5526$ . Согласно (14) в данной точке полимер подвергается механической деструкции. Начиная с  $y^+ = 10$ , расчет профиля скоростей  $u^+(y^+)$  необходимо проводить по модели турбулентного течения для вязкой несжимаемой жидкости. Различия между существующей моделью  $k$ - $\epsilon$  турбулентного течения

вязкоупругих растворов противотурбулентных присадок и модифицированной моделью, учитывающей по формуле (14) механическую деструкцию полимерных цепей в зависимости от их конформации, приведены на Рисунке 2.

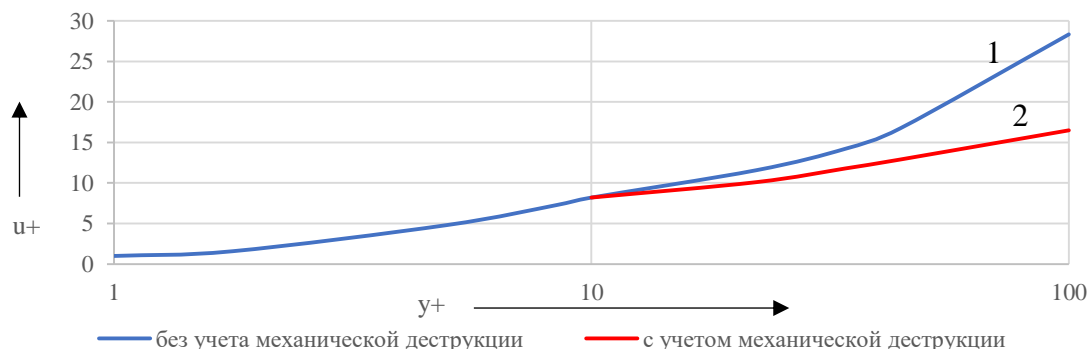


Рисунок 2 – Сравнение расчетных профилей скоростей в соответствии с принятой моделью течения разбавленного вязкоупругого раствора противотурбулентной присадки:

1 – существующая модель  $k-\varepsilon$ ; 2 – усовершенствованная модель  $k-\varepsilon$ , учитывающая механическую деструкцию полимера по уравнению (14).

Таким образом, продемонстрировано, что изменение конформации макромолекул, которое описывает тензор  $C_{ij}$ , влияет на возникновение механической деструкции. Введение уравнения в систему модели  $k-\varepsilon$  позволяет проводить численное моделирование турбулентного течения разбавленных вязкоупругих полимерных растворов, и, в частности, течения в трубопроводах нефти и нефтепродуктов, обработанных противотурбулентной присадкой, с учетом механической деструкции полимерных цепей.

**В третьей главе** приведены результаты разработки методики контроля параметров перекачки при отклонении от нормативных параметров.

Давление по трассе участка  $C$  (Рисунок 3) определялось на основании уравнения баланса напоров для определения изменения давления по трассе трубопровода:

$$h_n + \sum_{i=1}^C A_i - \sum_{i=1}^C B_i \cdot Q_0^{2-m} = 1,02 f \cdot Q_0^{2-m} \cdot \left[ \sum_{i=1}^{C-1} l_i + x_c \right] + \Delta z_{x_c} + H_{x_c}, \quad (15)$$

где  $h_n$  – напор, создаваемый подпорным насосным агрегатом;

$A_i$  и  $B_i$  – коэффициенты характеристики  $i$ -ой насосной станции;

$l_i$  – протяженность  $i$ -го участка трубопровода;

$i$  – порядковый номер НПС и участка между НПС,  $1 \leq i \leq n$ ;

$C$  – номер рассматриваемого расчетного участка между НПС (перегона) и НПС;

$f$  – величина гидравлического уклона при единичном расходе,  $f = \beta \frac{v^m}{D^{5-m}}$ ;

$m, \beta$  – коэффициенты в уравнении Лейбензона;

$D$  – внутренний диаметр трубопровода;

$x_c$  – дистанция (расстояние) от начала  $C$ -ой НПС до рассматриваемой точки;

$\Delta z_{x_c}$  – разность геодезических отметок координаты точки трассы на дистанции  $x_c$  и НПС  $C-n$  (начало технологического участка);

$H_{x_c}$  – пьезометрический напор на дистанции  $x_c$ .

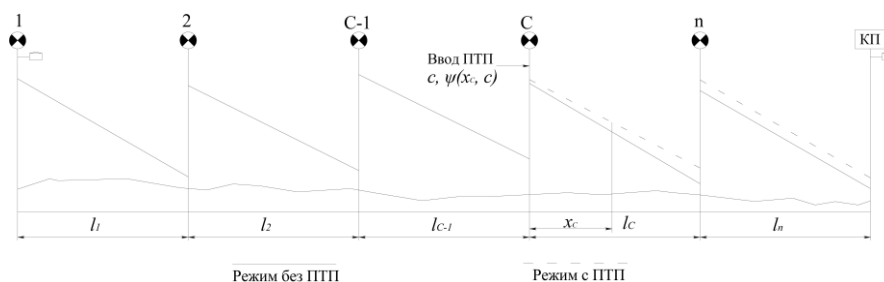


Рисунок 3 – Расчетная схема для определения распределения давления

Выразим пьезометрический напор:

$$H_{x_c} = h_n + \sum_{i=1}^C A_i - \sum_{i=1}^C B_i \cdot Q_0^{2-m} - 1,02f \cdot Q_0^{2-m} \cdot \left[ \sum_{i=1}^{C-1} l_i + x_C \right] - \Delta z_{x_c 1}; \quad (16)$$

Выражение для определения давления  $P_{x_C}$  в точке на трассе трубопровода будет иметь вид:

$$P_{x_C} = H_{x_c} \rho g, \quad (17)$$

где  $\rho$  – плотность перекачиваемой жидкости;  
 $g$  – ускорение свободного падения.

В настоящий момент при расчете режимов перекачки с добавлением противотурбулентных присадок не учитывается изменение ее эффективности по длине магистрального трубопровода. Расчеты проводят по средней эффективности  $\psi_{cp}$  на всем технологическом участке, что может привести к отклонениям расчетных данных от фактических на величину, превышающую нормативные параметры. Для решения данной проблемы при расчетах давления в промежуточных точках трассы предлагается использовать данные опытно-промышленных испытаний об изменении эффективности противотурбулентных присадок. Кроме того, на основании этих данных возможно проводить расчеты технологических режимов перекачки с различной концентрацией противотурбулентной присадки.

При перекачке с добавлением противотурбулентных присадок с концентрацией  $c$  выражение для  $P_{x_C ПТП}$  будет иметь следующий вид:

$$P_{x_C ПТП} = \left( h_n + \sum_{i=1}^C A_i - \sum_{i=1}^C B_i \cdot Q_{ПТП}^{2-m} - 1,02f \cdot Q_{ПТП}^{2-m} \cdot \left[ \sum_{i=1}^{C-1} l_i \cdot (1 - \psi(i)) + x_C \cdot (1 - \psi(x_C)) \right] - \Delta z_{x_C 1} \right) \rho g, \quad (18)$$

где  $\psi(x_C, c)$  – интегральная эффективность присадки с концентрацией  $c$ , на участке  $C$  длиной  $x$ ;  
 $\psi(i, c)$  – интегральная эффективность присадки с концентрацией  $c$ , на  $i$ -ом участке.

Расход в трубопроводе при режиме с ПТП:

$$Q_{ПТП} = \left[ \frac{h_n + \sum_{i=1}^n A_i - \Delta z_{x_c} - h_{ocm}}{1,02f \cdot (1 - \psi(i)) \sum_{i=1}^n l_i + \sum_{i=1}^n B_i} \right]^{\frac{1}{2-m}} \quad (19)$$

Разработанная методика проиллюстрирована двумя примерами на основании данных промышленной эксплуатации магистральных нефте- и нефтепродуктопроводов.

Исходные данные: Участок МНПП DN500, длина участка  $l=177$  км, разность высотных отметок  $\Delta Z= -46$  м. Насосные агрегаты в работе на НПС-1: 20НДСн-М, НМ1700-300 – 2 шт; на НПС-2: НМ1700-300 – 1 шт. Свойства нефтепродукта при условиях перекачки: плотность  $\rho=845$  кг/м<sup>3</sup>, кинематический коэффициент вязкости  $\nu=3$  мм<sup>2</sup>/с. Противотурбулентная присадка «РТ-FLYDE» вводится в двух концентрациях: 8 г/т и 6 г/т.

Был проведен расчет распределения давления по длине магистрального трубопровода без учета и с учетом изменения эффективности противотурбулентной присадки  $\psi_i(x_c)$  ( $P_i$  и  $P_{di}$  соответственно). Результаты расчета проиллюстрированы графиками на Рисунках 4, 5.

Данные опытно-промышленных испытаний об изменении эффективности противотурбулентной присадки возможно использовать при прогнозных расчетах режимов перекачки с применением ПТП произвольной концентрации. На Рисунке 6 изображены графики изменения эффективности ПТП по длине магистрального трубопровода для двух режимов: с вводом присадки в концентрации 8 г/т и 6 г/т.

Кривые гидравлической эффективности на Рисунке 6, начиная со значений, соответствующих  $x_c=16$ км, могут быть аппроксимированы следующими зависимостями:

$$1) \text{ концентрация } 8 \text{ г/т: } \psi(x_c) = 7,12 \cdot 10^{-4} \cdot x^2 - 0,1899 \cdot x + 37,39; \quad (20)$$

$$2) \text{ концентрация } 6 \text{ г/т: } \psi(x_c) = 2,58 \cdot 10^{-4} \cdot x^2 - 0,129 \cdot x + 34,21. \quad (21)$$

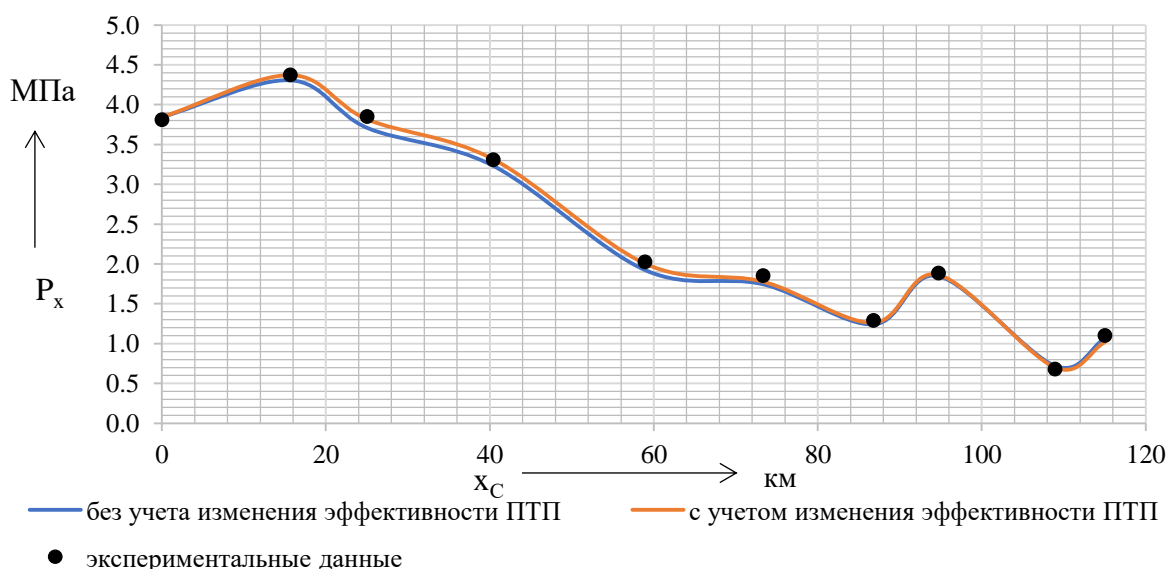


Рисунок 4 – Распределение давления для режима перекачки с вводом ПТП в концентрации 8 г/т

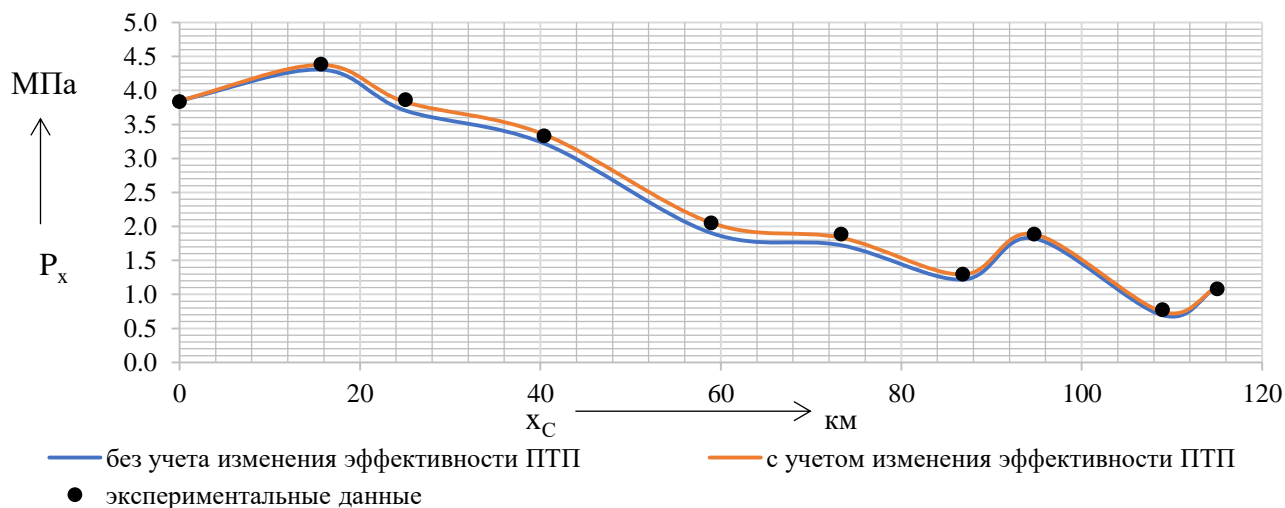


Рисунок 5 – Распределение давления для режима перекачки с вводом ПТП в концентрации 6 г/т

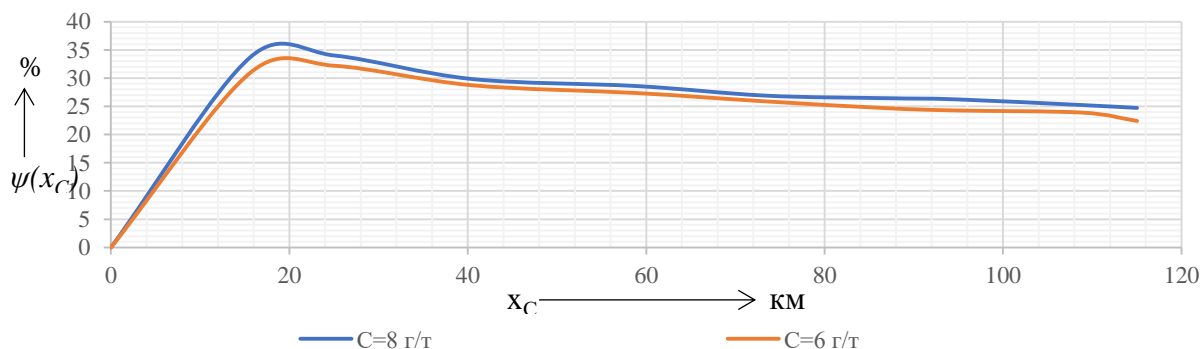


Рисунок 6 – Графики изменения эффективности ПТП по длине магистрального трубопровода при концентрациях 8 г/т и 6 г/т

Рассчитано изменение эффективности по формулам 20 и 21. Используя полученные значения, методом линейной интерполяции получим значения эффективности ПТП для концентрации – 5 г/т в аналогичных точках трассы. Расчетное изменение эффективности ПТП, введенной в концентрации 5 г/т, по длине магистрального трубопровода, проиллюстрировано графиком на Рисунке 7.

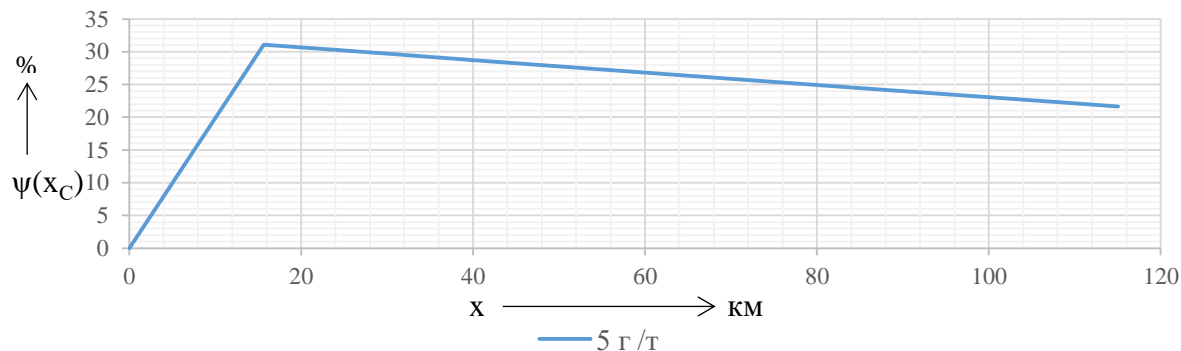


Рисунок 7 – График прогнозного изменения эффективности ПТП по длине магистрального трубопровода при концентрации 5 г/т

На основании расчетных данных об изменении эффективности спрогнозировано распределение давления для режима перекачки с ПТП в концентрации 5 г/т (Рисунок 8). Расчетные значения совпали с промышленной эксплуатацией МНПП при добавлении противотурбулентной присадки в концентрации 5 г/т. с погрешностью, не превышающей 5 %.

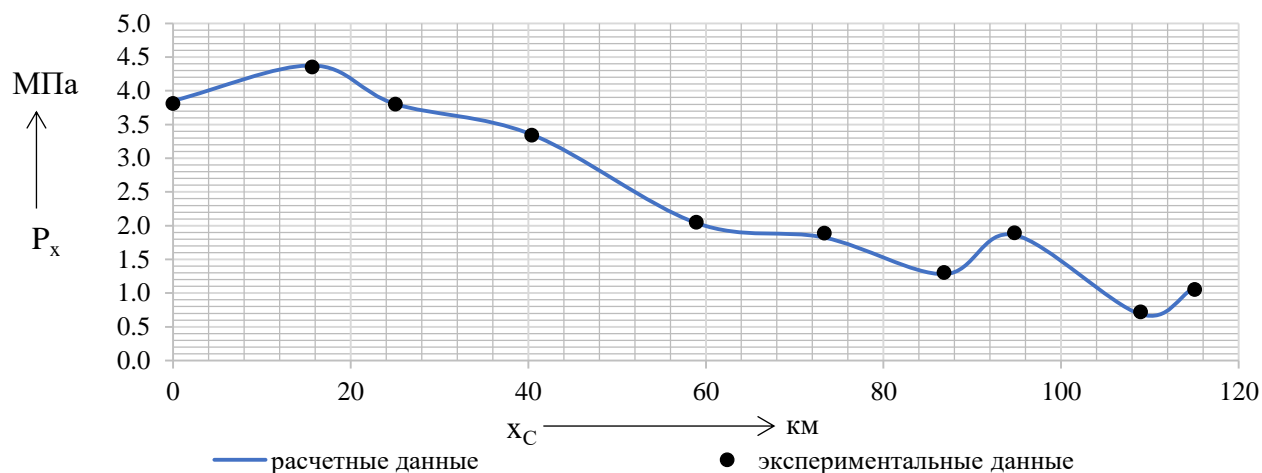


Рисунок 8 – Расчетное распределение давления для режима перекачки с вводом ПТП в концентрации 5 г/т

Таким образом получена адекватная математическая модель снижения эффективности противотурбулентных присадок по длине для различных концентраций. Предложена методика расчета изменения давления по трассе нефтепровода в зависимости от концентрации противотурбулентной присадки с учетом изменения эффективности для возможности контроля за отклонением нормативных параметров.

**В четвертой главе** проведено исследование влияния режимов течения на изменение эффективности противотурбулентных присадок в процессе их применения при эксплуатации магистральных трубопроводов.

В качестве исходных данных для исследований были приняты параметры технологических режимов транспортировки дизельного топлива плотностью  $\rho = 845 \text{ кг/м}^3$  по магистральному нефтепродуктопроводу Ду500 общей протяженностью  $l=177 \text{ км}$ . По трассе нефтепродуктопровода на участке 58-108 км расположен лупинг Ду500. Головная станция – НПС-1 (0 км), промежуточная станция – НПС-2 (115 км). Ввод присадки осуществляется на НПС-1. Расположение датчиков давления по трассе показано на расчетной схеме (Рисунок 9). Характеристики технологических режимов, при которых проводились исследования сведены в Таблицу 1. Чтобы исключить возможную деструкцию полимеров в насосах НПС-2 рассмотрим участок нефтепродуктопровода от НПС-1 до НПС-2.



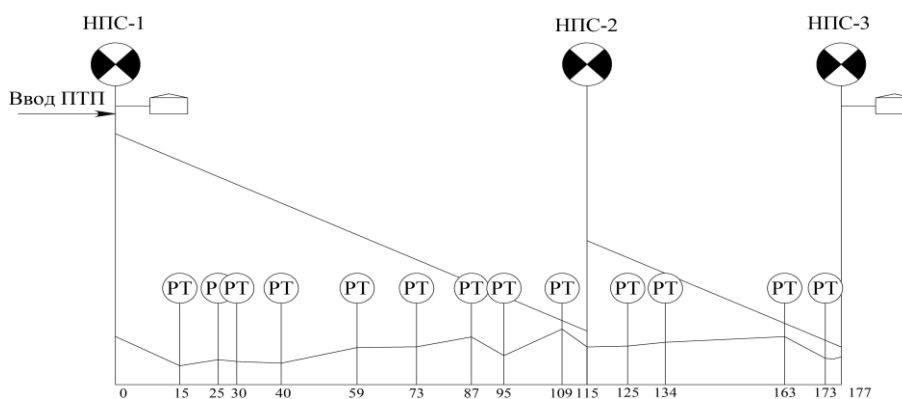


Рисунок 9 – Расчетная схема технологического участка

Для определения изменения эффективности противотурбулентных присадок при открытии лупинга были рассмотрены режимы 2-0-№1, 2-0-№2, 2-0-№3, 2-0-№4, 2-0-№5, 2-0-№6 (Таблица 1). График изменения напора по длине трубопровода для указанных режимов приведены на Рисунке 10.

На Рисунке 11 представлены результаты расчета изменения эффективности противотурбулентных присадок по длине МНПП при транспортировке нефтепродукта на режимах 2-0-№2, 2-0-№3, 2-0-№5, 2-0-№6. Как видно из Рисунка, при совместном применении лупинга и ввода противотурбулентной присадки, в качестве способов увеличения пропускной способности трубопровода, эффективность противотурбулентной присадки снижается.

Таблица 1 – Характеристика исследуемых технологических режимов

№ технологического режима	Количество МНА в работе	Концентрация ПТП, г/т	Лупинг	Комбинация подключения НА	
				НПС-1	НПС-2
				ПНА – 2х20НДсН-М МНА – 3хНМ1700-300	МНА – 3хНМ1700-300
1	2	3	4	5	6
2-0-№1	2	0	Закрыт	1хПНА + 2хМНА	НПС не в работе
2-0-№2		6			
2-0-№3		8			
2-0-№4		0	Открыт		
2-0-№5		6			
2-0-№6		8			
2-1-№1	3	0	Открыт	1хПНА + 2хМНА	1хМНА
2-1-№2		6			
2-1-№3		8			
3-2-№1	5	0	Открыт	1хПНА + 3хМНА	2хМНА
3-2-№2		6			
3-2-№3		8			

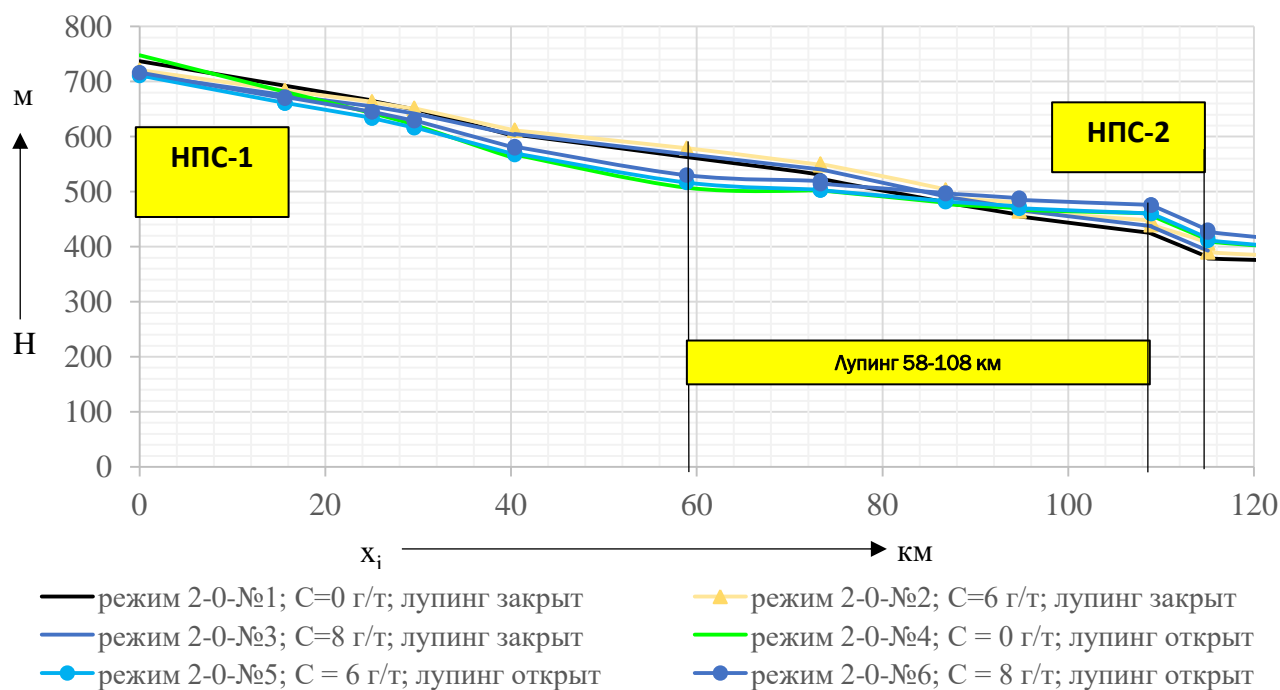


Рисунок 10 – График изменения напора по длине трубопровода при транспортировке нефтепродукта на режимах 2-0-№1, 2-0-№2, 2-0-№3, 2-0-№4, 2-0-№5, 2-0-№6

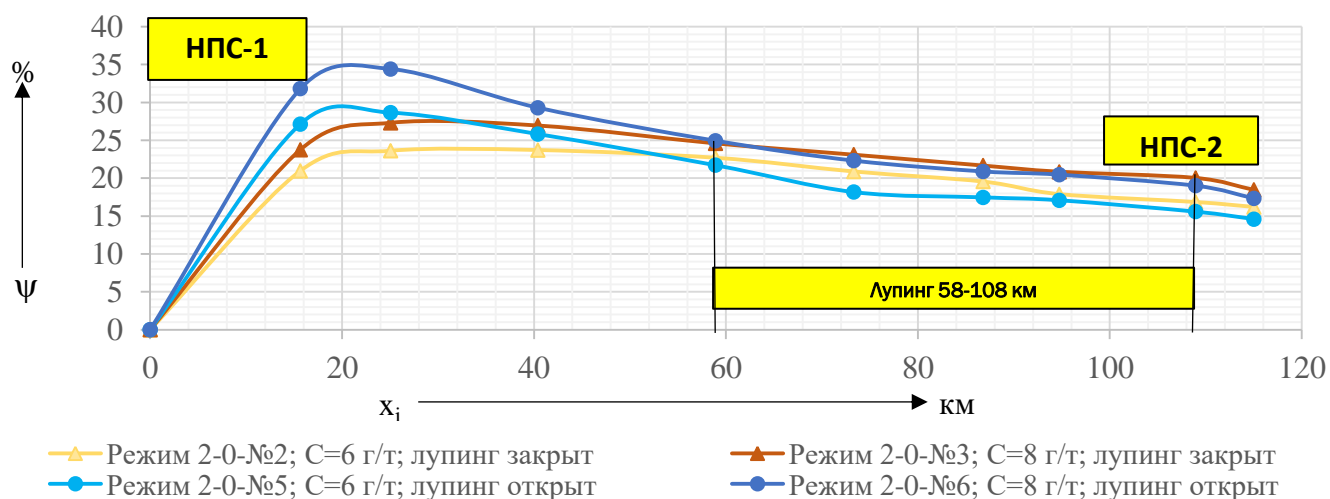


Рисунок 11 – Изменение эффективности противотурбулентных присадок по длине МНПП при транспортировке нефтепродукта на режимах 2-0-№2, 2-0-№3, 2-0-№5, 2-0-№6

Рассмотрим режимы 2-0-№4, 2-0-№5, 2-0-№6, 2-1-№1, 2-1-№2, 2-1-№3, 3-2-№1, 3-2-№2, 3-2-№3. График изменения напора по длине трубопровода для указанных режимов приведены на Рисунке 12. На Рисунке 13 представлены графики изменения эффективности противотурбулентных присадок по длине МНПП при транспортировке нефтепродукта на режимах 2-0-№5, 2-0-№6, 2-1-№2, 2-1-№3, 3-2-№2, 3-2-№3. Как видно из Рисунка, при переходе от режимов 2-0-№5 (2-0-№6) к режимам 2-1-№2 (2-1-№3) соответственно эффективность противотурбулентных присадок возрастает. Однако, при переходе от режимов 2-1-№2 (2-1-№3) к 3-2-№2 (3-2-№3) соответственно, эффективность снижается.

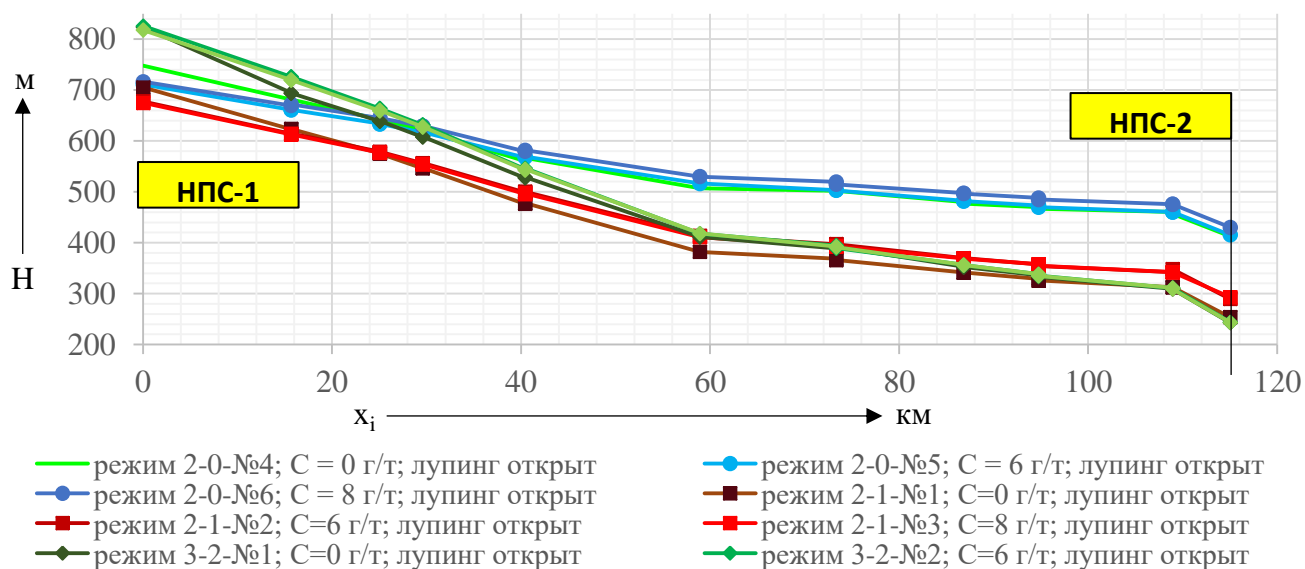


Рисунок 12 – График изменения напора по длине трубопровода при транспортировке нефтепродукта на режимах 2-0-№4, 2-0-№5, 2-0-№6, 2-1-№1, 2-1-№2, 2-1-№3, 3-2-№1, 3-2-№2, 3-2-№3

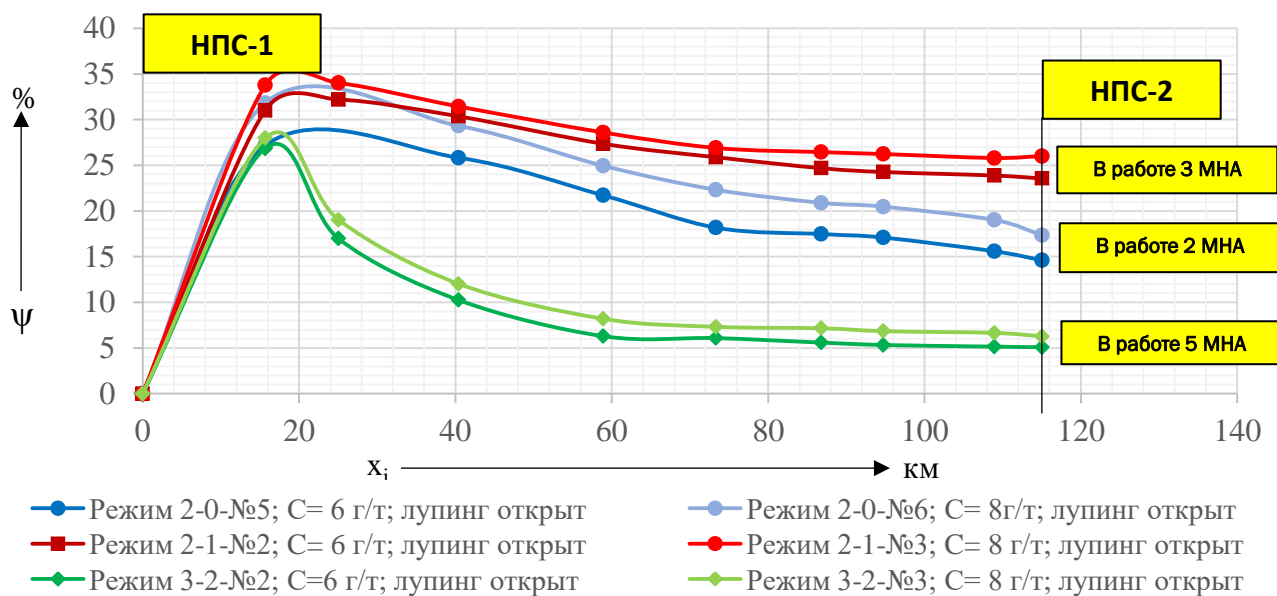


Рисунок 13 – Изменение эффективности противотурбулентных присадок по длине МНПП при транспортировке нефтепродукта на режимах 2-0-№5, 2-0-№6, 2-1-№2, 2-1-№3, 3-2-№2, 3-2-№3

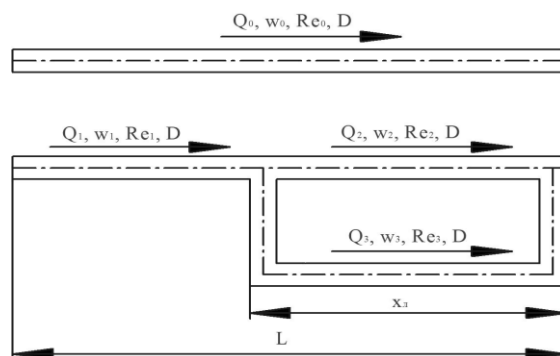


Рисунок 14 – Принципиальная расчетная схема подключения лупинга

При подключении лупинга производительность трубопровода увеличивается  $Q_1 > Q_0$  (Рисунок 14). При этом возрастает скорость  $w_1 > w_0$  и число Рейнольдса  $Re_1 > Re_0$ . Однако, на участке с подключенным лупингом, в основной нитке и лупинге производительность, скорость и число Рейнольдса снижается. Эффективность противотурбулентной присадки на участке с подключенным лупингом, при подключении лупинга снижается в основном трубопроводе и в лупинге из-за снижения скорости и числа Рейнольдса потока, что сказывается на общей (интегральной) эффективности.

Причиной снижения эффективности присадки при переходе к режимам с более высокими числами Рейнольдса и касательными напряжениями (режимы 3-2-№2, 3-2-№3) является процесс механической деструкции полимерных цепей. Для оценки возможности проявления разрыва химических связей в рассматриваемых гидродинамических условиях применим уравнение, полученное в разделе 2.

Противотурбулентная присадка представляет собой раствор полимеров и сополимеров терминальных олефинов с длиной боковой цепи  $C_6-C_4$  в бутаноле-1. Основой сополимера является гексен-1. Молярная масса присадки –  $M = 5,8 \cdot 10^3$  кг/моль, характеристическая вязкость  $[\eta] = 1,32$  м<sup>3</sup>/кг.

Для проверки условия возникновения механической деструкции проведем расчет упругой энергии, запасаемой в одном моле химических связей между кинетическими сегментами макромолекулы противотурбулентной присадки в условиях транспортировки дизельного топлива на режимах 2-0-№6, 2-1-№3, 3-2-№3 (Таблица 2).

Таблица 2 – Результаты расчета упругой энергии, запасаемой в одном моле химических связей между кинетическими сегментами макромолекулы противотурбулентной присадки в условиях транспортировки дизельного топлива на режимах 2-0-№6, 2-1-№3, 3-2-№3

Параметр	Режим		
	2-0-№6	2-1-№3	3-2-№3
Концентрация, г/г	8		
Эффективность ПТП $\psi$ , %	17,34	26,01	6,29
Расход Q, т/ч	930	1230	1500
Re	261048	345257	421045
Касательные напряжения $\tau$ , Па	4,57	7,79	11,41
Скорость сдвига, 1/с	1802,56	3074,35	4502,76
Упругая энергия, кДж/моль	19,83	78,52	208,51

Согласно проведенным расчетам, при транспортировке дизельного топлива по магистральному трубопроводу на режиме 3-2-№3 с пятью магистральными насосами ( $C = 8$  г/т,  $Re = 421045$ ,  $\tau = 11,41$  Па) связями между кинетическими сегментами макромолекул противотурбулентной присадки, упруго запасается 208,51 кДж/моль энергии. Однако, данное значение превышает первый уровень энергии активации деструкции «слабых» химических связей, который составляет 120-130 кДж/моль и близко ко второму уровню – 220 кДж/моль. Проведенные расчеты позволяют сделать вывод о том, что на режиме 3-2-№3 происходит механическая деструкция макромолекул противотурбулентной присадки, имеющих молярную массу  $M = 5,8 \cdot 10^3$  кг/моль и более.

Таким образом, становится возможным сделать вывод о существовании максимального «порога» значений касательных напряжений трения  $\tau_{пор}^{max}$ , при достижении которого рост гидравлической эффективности противотурбулентной присадки сменяется падением, вызванным механической деструкцией. Для рассматриваемого примера расчетное значение верхних «пороговых» напряжений составляет  $\tau_{пор}^{max} \approx 9,2$  Па.

Выявлено снижение интегральной эффективности противотурбулентной присадки по длине магистрального нефтепродуктопровода для всех рассмотренных режимов перекачки. Данный факт является следствием распада ассоциатов макромолекул в условиях турбулентного течения, который приводит к уменьшению объема индивидуальных клубков, проявляющих способность к снижению гидродинамического сопротивления.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. По результатам анализа и обобщения существующих экспериментальных исследований закономерностей проявления эффекта Томса, выявлена необходимость математического описания механической деструкции полимеров, как фактора снижения гидравлической эффективности противотурбулентных присадок. Установлено, что существующие математические модели турбулентного течения нефти и нефтепродуктов, обработанных противотурбулентными присадками, нуждаются в дополнительной модификации, поскольку они не учитывают вероятное возникновение деструкции полимера под действием касательных напряжений трения.

2. Разработано уравнение для оценки механической деструкции противотурбулентных присадок при транспортировке нефти и нефтепродуктов по магистральным трубопроводам. Данное уравнение учитывает влияние касательных напряжений трения  $\tau$  и физико-химических свойств присадки на разрыв «слабых» химических связей в макромолекулах в условиях турбулентного течения. Адекватность полученного соотношения

подтверждена расчетом по данным опытно-промышленных испытаний противотурбулентной присадки «ВИОЛ» на магистральном нефтепроводе «Александровское – Анжеро-Судженск»:

- при течении в трубопроводе при  $\tau = 2,7 \text{ Па}$  механическая деструкция присадки не проявляется;

- при течении в рабочем колесе магистрального насоса марки НМ при  $\tau > 10^3 \text{ Па}$  противотурбулентная присадка подвергается механической деструкции.

Усовершенствована с учетом возникновения механической деструкции полимеров модель турбулентного течения жидких углеводородов с добавлением противотурбулентных присадок, основанная на решении системы осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса и дифференциального уравнения изменения тензора конформации макромолекул.

3. Разработана методика расчета распределения давления по длине магистральных нефте- и нефтепродуктопроводов с учетом путевой деградации противотурбулентных присадок. При сопоставлении с экспериментальными данными результатов расчета параметров перекачки по средней гидравлической эффективности присадок выявлено, что отклонение расчетных значений от фактических превышает допустимое – 0,2 МПа. Расчет по предлагаемой методике позволяет снизить отклонение до 0,08 МПа. Относительная погрешность прогнозного гидравлического расчета магистрального нефтепродуктопровода для произвольной концентрации не превысила 5%.

4. На основании промышленных данных установлены закономерности снижения гидравлической эффективности противотурбулентной присадки при различных режимах эксплуатации магистрального нефтепродуктопровода:

- подключение лупинга приводит к снижению средней гидравлической эффективности противотурбулентной присадки в трубопроводе, что обусловлено более низкими касательными напряжениями трения  $\tau = 1,24 \text{ Па}$  при течении на участке с лупингом, по сравнению с участком без лупинга –  $\tau = 4,57 \text{ Па}$  ;

- при достижении в трубопроводе пороговых значений касательных напряжений трения  $\tau_{\text{пор}}^{\text{max}} \approx 9,2 \text{ Па}$  происходит механическая деструкция макромолекул с молярной массой более  $M = 5,8 \cdot 10^3 \text{ кг/моль}$  при концентрации ввода присадки 8 г/т;

- снижение интегральной эффективности противотурбулентной присадки по длине трубопровода на всех режимах транспортировки вызвано уменьшением объема индивидуальных клубков макромолекул в результате распада ассоциатов в условиях турбулентного течения.

### Основные результаты работы опубликованы в 16 научных трудах.

- статьи в изданиях, индексируемых в *Web of Science, Scopus, утвержденных ВАК РФ*:

1. Гареев, М.М. Математическая модель распределения давления в магистральном трубопроводе при перекачке с применением противотурбулентных присадок с учетом их деградации / М.М. Гареев, М.И. Валиев, **Ф.А. Карпов** // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2021. – Т. 11. – № 4. – С. 396–406.

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

1. Гареев, М.М. Условие деструкции противотурбулентных присадок / М.М. Гареев, **Ф.А. Карпов** // Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья. – 2018.– №1. – С. 24-29.

2. **Карпов, Ф.А.** Изменение эффективности противотурбулентных присадок в зависимости от технологического режима магистрального трубопровода / Ф.А. Карпов, М.М. Гареев // Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья. – 2022. – №1,2. – С 16-23

- тезисы в материалах различных конференций

1. **Карпов Ф.А.** Математическое моделирование турбулентного течения вязкоупругих полимерных растворов жидких углеводородов с добавлением противотурбулентных присадок с учетом механической деструкции полимеров / Ф.А. Карпов, М.М. Гареев // Трубопроводный транспорт – 2022: тезисы докладов XVII Международной учебно-научно-практической конференции / УГНТУ – Уфа, 2022.– С. 98-99.

2. **Карпов Ф.А.** Изменение эффективности противотурбулентных присадок в зависимости от технологического режима магистрального трубопровода / **Ф.А. Карпов, М.М. Гареев** // 73-ая научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых: материалы конф./ УГНТУ. – Уфа, 2022. – С.252-253.

3. **Карпов Ф.А.** Причины снижения эффективности противотурбулентных присадок при эксплуатации магистральных трубопроводов / **Ф.А. Карпов, М.М. Гареев** // Второй тур III(XV) Международной научно-технической конференции молодежи ПАО «Транснефть», сборник докладов конференции. – Уфа, 2021. – С.123-125.

4. **Карпов Ф.А.** Изменение эффективности противотурбулентных присадок в процессе их применения при эксплуатации магистральных нефте- и нефтепродуктопроводов / **Ф.А. Карпов, М.М. Гареев** // «Нефть и газ – 2021»: тезисы докладов 75-й Международной молодежной научной конференции / РГУ им. Губкина. – Москва, 2021. – Т. 1 – С. 478-479.

5. Гареев, М. М. Механическая деструкция противотурбулентных присадок / М. М. Гареев, **Ф. А. Карпов.** // Перспективные материалы с иерархической структурой для новых

технологий и надежных конструкций; Химия нефти и газа : тез. докл. междунар. конф., г. Томск, 1-5 окт. 2018 г. / Междунар. симп. «Иерархические материалы: разработка и приложения для новых технологий и надежных конструкций». - Томск, 2018. - С. 32-33

6. **Карпов Ф.А.** Изменение эффективности противотурбулентных присадок при турбулентном течении с подключенным лупингом / **Ф.А. Карпов, М.М. Гареев** // Трубопроводный транспорт– 2020: тезисы докладов XV Международной учебно-научно-практической конференции / УГНТУ. – Уфа, 2020.– С.59-61.

7. **Карпов Ф.А.** Причины снижения эффективности противотурбулентных присадок при эксплуатации магистральных трубопроводов / **Ф.А. Карпов, М.М. Гареев** // Первый тур III(XV) Международной научно-технической конференции молодежи ПАО «Транснефть», сборник докладов конференции. – Уфа, 2019. – С. 260-262.

8. **Карпов, Ф. А.** Механическая деструкция противотурбулентных присадок в процессе транспортировки по магистральному трубопроводу / **Ф. А. Карпов, М. М. Гареев** // Материалы 69-й научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых УГНТУ / УГНТУ. - Уфа, 2018. - Т. 1. - С. 604-605.

9. **Карпов Ф.А.** Аналитическое описание процесса механической деструкции противотурбулентных присадок в процессе транспортировки по магистральному трубопроводу / **Ф.А. Карпов, М.М. Гареев**// Трубопроводный транспорт-2018: тезисы докладов XIII Междунар. учеб.-науч.-практ. конф./ УГНТУ. – Уфа, 2018 – С.76-77.

10. **Карпов Ф.А.** Изучение деградации противотурбулентных присадок на основе линейной теории вязкоупругости / **Ф.А. Карпов, М.М. Гареев** // Актуальные проблемы науки и техники-2017: материалы X Междунар. науч.-практ. конф. молодых ученых /УГНТУ. – Уфа, 2017.– Т. 1. – С. 41-42.

11. **Карпов Ф.А.** Количественное описание деструкции противотурбулентных присадок / **Ф.А. Карпов, М.М. Гареев** //Трубопроводный транспорт-2017: материалы XII Междунар. учеб.-науч.-практ. конф./ УГНТУ. – Уфа, 2017. – С. 102-103.

12. **Карпов, Ф. А.** Условие деструкции жидких полимерных систем при турбулентном течении растворителя / **Ф. А. Карпов, М. М. Гареев.** // 68-я научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых УГНТУ : сб. материалов конф. / УГНТУ. - Уфа, 2017. - Кн. 1. - С. 548-549.

13. **Карпов Ф.А.** Возможность изучения деградации полимерных присадок на дисковом турбореометре/ **Ф.А. Карпов, М.М. Гареев** //Трубопроводный транспорт-2015: материалы X Междунар. учеб.-науч.-практ. конф./ УГНТУ – Уфа, 2015. – С.115-116.