

На правах рукописи



**Абдусалямов Артем Вячеславович**

**ФОРМИРОВАНИЕ КОМПОЗИЦИИ ПРОТИВОТУРБУЛЕНТНОЙ ПРИСАДКИ  
И ЕЁ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ И РЕОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА**

02.00.04 – Физическая химия

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата химических наук

Томск – 2018

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет» и в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте химии нефти Сибирского отделения Российской академии наук.

Научный руководитель: доктор химических наук  
**Манжай Владимир Николаевич**

**Официальные оппоненты:**

**Кряжев Юрий Гаврилович**, доктор химических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем переработки углеводородов Сибирского отделения Российской академии наук, лаборатория зеленой химии, главный научный сотрудник

**Шарифуллин Андрей Виленович**, доктор технических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанский национальный исследовательский технологический университет», кафедра «Химической технологии переработки нефти и газа», профессор

**Ведущая организация:** Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт катализа им. Г. К. Борескова Сибирского отделения Российской академии наук

Защита состоится 29 июня 2018 года в 14 час. 00 мин. на заседании диссертационного совета Д 212.267.23, созданного на базе федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет», по адресу: 634050, г. Томск, пр. Ленина, 36 (учебный корпус № 6 ТГУ, аудитория 311).

С диссертацией можно ознакомиться в Научной библиотеке и на официальном сайте федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет» [www.tsu.ru](http://www.tsu.ru).

Материалы по защите диссертации размещены на официальном сайте ТГУ: <http://www.ams.tsu.ru/TSU/QualificationDep/co-searchers.nsf/newpublicationn/AbdusalyamovAV29062018.html>

Автореферат разослан «\_\_\_» мая 2018 года.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
кандидат химических наук, доцент



Кузнецова  
Светлана Анатольевна

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** Для экономического развития России и её топливно-энергетического комплекса важное значение имеет система трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. Известно, что транспортировка нефти по трубопроводам требует значительных затрат энергии для преодоления сопротивления внутреннего трения жидкости. Введение в жидкость, перекачиваемую по трубопроводам, чрезвычайно малых количеств полимеров (в окрестностях  $\sim 10 \text{ г/м}^3$ ) с высокой молекулярной массой ( $M > 1 \cdot 10^6$ ) уменьшает гидродинамическое сопротивление потока при турбулентном режиме течения. При этом появляется возможность либо значительно снизить энергетические затраты на перекачку при сохранении производительности трубопровода, либо увеличить объёмную скорость течения при сохранении постоянства рабочего давления в трубопроводе. Поэтому разработка новых полимерных присадок для повышения пропускной способности нефтепроводов является актуальной задачей, имеющей важное хозяйственное значение.

Если на начальном этапе применения противотурбулентных добавок они использовались в виде концентрированного раствора, содержащем не более 10 % полимера, то в настоящее время большинство добавок представляют собой композиции суспензионного типа с содержанием активного (полимерного) компонента до 30 %.

Сейчас противотурбулентные присадки (ПТП) в промышленных масштабах используются в регионах мира с относительно мягким климатом, поэтому актуальным является теоретическое и экспериментальное обоснование применения таких присадок в зонах с отрицательной среднегодовой температурой.

**Предмет исследования.** Работа посвящена исследованию влияния физико-химических параметров на величину эффекта снижения гидродинамического сопротивления потока углеводородной жидкости с полимерными добавками в широком температурном интервале, а также разработке метода формирования ПТП суспензионного типа из раствора полигексена.

**Степень разработанности темы исследования.** В литературе описано множество патентов получения ПТП коллоидной формы, но без описания детальной технологии их формирования. Наиболее близкий патент к выполненной работе основан на получении суспензии полигексена с помощью осаждения его из раствора изопропиловым спиртом. Однако данные о формировании суспензии полимера из трехкомпонентной системы полимер – растворитель – сажа отсутствуют.

**Целью работы** является физико-химическое обоснование метода получения полимерной присадки суспензионной формы, растворимой в углеводородных

жидкостях, и установление закономерностей её влияния на скорость турбулентного течения в цилиндрическом канале в широком интервале температур.

Для достижения цели были поставлены следующие задачи:

- провести теоретические и экспериментальные исследования зависимости величины эффекта снижения гидродинамического сопротивления (СГДС) полимерами от температуры;
- расширить представления о влиянии термодинамического качества растворителя на объёмы макромолекулярных клубков в растворе;
- установить причину уменьшения величины СГДС предельно разбавленных растворов при турбулентном перемешивании при малых скоростях сдвига;
- подобрать оптимальные компоненты и условия получения мелкодисперсной суспензии полимера и установить их влияние на процесс осаждения;
- изучить зависимость размера частиц, формирующихся в процессе осаждения полимера из раствора, от полярности дисперсионной среды;
- исследовать физико-химические, реологические и противотурбулентные свойства полученной суспензионной присадки на основе полигексена.

#### **Научная новизна.**

1. Впервые теоретически обосновано и экспериментально доказано, что понижение температуры перекачиваемой жидкости сопровождается уменьшением «оптимальной» концентрации полимера, при которой достигается максимальная величина эффекта.

2. Установлено, что уменьшение величины эффекта СГДС при многократном прохождении разбавленного раствора полимера через цилиндрический канал при малых напряжениях сдвига является следствием не только деструкции полимерных цепей, но и распадом крупных надмолекулярных ассоциатов, состоящих из нескольких взаимно перепутанных макромолекулярных клубков.

3. Экспериментально определены физико-химические условия формирования стабильной суспензии полимера из истинного раствора высокомолекулярного полигексена при осаждении его из многокомпонентной смеси.

**Теоретическая значимость работы.** Результаты исследования значительно дополняют данные о влиянии физико-химических параметров на величину снижения гидродинамического сопротивления потока жидкости при турбулентном течении растворов полимеров. Дополнены представления о межмолекулярных взаимодействиях в растворе полимера при турбулентном перемешивании при малых скоростях сдвига, имеющие прикладное значение в технологии транспортировки нефти и нефтепродуктов. Расширены теоретические представления термодинамической теории растворов полимеров и термодинамике процесса

осаждения дисперсии полимера из многокомпонентного раствора, которые имеют научно-практическое значение для развития методов получения суспензионных ПТП.

**Практическая значимость работы.** В результате исследований физико-химических процессов осаждения и формирования ПТП суспензионной формы впервые удалось:

1. Разработать методику формирования низкозастывающей композиции суспензионной присадки, которая по своим физико-химическим свойствам и противотурбулентным показателям не уступает лучшим импортным аналогам.

2. Получить патент на состав и способ формирования суспензионной присадки, научно-техническая информация которого может быть использована при разработке промышленной технологии.

**Методология и методы исследования.** Научная методология исследования основывается на системном подходе к изучаемой проблеме и комплексном рассмотрении физико-химических процессов осаждения полигексена. Методологической основой послужили работы отечественных и зарубежных специалистов в тематической области диссертационного исследования. В качестве методов исследования применены научное обобщение, а также методы статистического, причинно-следственного и сравнительного анализа.

Все оценки и исследования проведены на современном сертифицированном аналитическом оборудовании с привлечением аттестованных методик в соответствии с нормативно-правовыми требованиями, действующими в РФ.

**Положения, выносимые на защиту:**

1. Увеличение величины эффекта снижения гидродинамического сопротивления при понижении температуры и при улучшении термодинамического качества растворителя обусловлено увеличением размеров макромолекулярных клубков с иммобилизованным растворителем.

2. Понижение величины эффекта снижения гидродинамического сопротивления предельно разбавленных растворов полимеров при малых напряжениях сдвига обусловлено распадом надмолекулярных ассоциатов, состоящих из взаимно перепутанных макромолекул.

3. Абсорбция макромолекул сверхвысокомолекулярного полигексена на внутренней поверхности капилляров частиц сажи в трехкомпонентной системе полимер–растворитель–технический углерод отсутствует.

4. Увеличение полярности дисперсионной среды при осаждении полимера ведёт к увеличению среднего размера получаемых частиц суспензии полигексена.

**Личный вклад автора** состоит в общей постановке задач, активном участии в проведении экспериментальных исследований, анализе и интерпретации полученных данных, а также в написании статей.

**Степень достоверности результатов.** Экспериментальные исследования выполнены на сертифицированном научном оборудовании с использованием аттестованных методик. Проведенные теоретические исследования построены на известных и проверяемых данных, согласуются с опубликованными экспериментальными данными отечественных и зарубежных ученых, не противоречат современным научным представлениям о закономерностях физико-химических процессов. Выдвинутые идеи и положения диссертации базируются на анализе практики, обобщении передового опыта в области методов получения ПТП коллоидной формы. В исследованиях использованы современные методики сбора и обработки исходной информации.

**Апробация работы.** По результатам диссертационных исследований были сделаны доклады на следующих российских и международных конференциях: Всероссийская молодежная конференции с элементами научной школы (Казань, 2011), международная конференция «Композит-2013» (Саратов, 2013), 27-й Симпозиум по реологии (Тверь, 2014), 6-я Всероссийская Каргинская конференция «Полимеры - 2014» (Москва, 2014). VIII и IX Международные конференции «Химия нефти и газа» (Томск, 2012, 2015).

**Публикации.** По материалам диссертации опубликовано 19 работ, в том числе 5 статей в реферируемых журналах из списка, рекомендованного ВАК РФ (из них 4 статьи в журналах, текущие номера которых или их переводные версии индексируются Web of Science и Scopus), 1 патент на изобретение РФ, 12 публикаций в сборниках материалов российских и международных конференций (включая сборник материалов конференции, индексируемый Web of Science), 1 статья размещена на официальном сайте РАН.

**Структура и объём диссертации.** Работа состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка условных обозначений и сокращений, списка использованной литературы из 133 наименований и 3 приложений. Диссертация изложена на 177 страницах, содержит 87 таблиц (включая 65 таблиц в приложениях) и 78 рисунков (включая 13 рисунков в приложении).

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** дается обоснование актуальности работы, мотивируется выбор объектов исследования, приводится цель работы, задачи исследований, Указывается

научная новизна и практическая значимость полученных результатов, формулируются основные положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** рассмотрены вопросы общей гидродинамики, даны основные понятия о снижении гидродинамического сопротивления, а также способы количественного описания эффекта Томса.

В настоящее время в большинстве публикаций представлены эмпирические результаты зависимости эффекта снижения гидродинамического сопротивления (СГДС) от физико-химических и гидродинамических параметров, однако не все результаты однозначно трактуются различными авторами. Существующие в настоящее время гипотезы относительно физической сути явления СГДС требуют дополнений и уточнений. Описанные в данной главе известные способы формирования суспензий на основе высокомолекулярных полимеров представлены в виде чрезвычайно краткой информации и на практике трудно реализуемы даже в лабораторных условиях.

Обзор литературы позволил обосновать цель и задачи исследования, сделать выбор объектов исследования, основных направлений работы и способов её выполнения.

**Во второй главе** представлена структурно-методологическая схема диссертационной работы, дана характеристика исходных веществ, подробно описаны методы исследования противотурбулентных присадок.

В данной главе описаны объекты исследования, методы определения величины СГДС для полимеров различной химической природы при изменении различных физико-химических параметров, таких как температура, термодинамическое качество растворителя, концентрация раствора и молекулярная масса полимера, а также методы контроля получаемых частиц при осаждении полигексена из трехкомпонентной системы.

**В третьей главе** «Физико-химические и гидродинамические свойства полимерных присадок с противотурбулентными свойствами» представлены результаты исследования противотурбулентной эффективности полимеров разной химической природы и различной молекулярной массы, проведенные с целью выявления наиболее эффективных образцов полимеров для дальнейшего формирования из них композиций присадок суспензионной формы. Рассмотрено влияние химической природы растворителя и температуры на величину эффекта Томса, а также проанализированы причины деградации противотурбулентных свойств растворов полимеров.

Величина эффекта снижения гидродинамического сопротивления (эффект Томса) характеризует энергетический выигрыш при перекачке единицы объема

жидкости с противотурбулентной добавкой по сравнению с перекачкой исходной жидкости без растворенного в ней полимера. Количественно величину эффекта снижения гидродинамического сопротивления ( $DR, \%$ ) принято оценивать по относительному уменьшению коэффициента гидравлического сопротивления, выраженному в процентах

$$DR, \% = \frac{\lambda_s - \lambda_p}{\lambda_s} \cdot 100\%, \quad (1)$$

где  $\lambda_s$  – коэффициент гидравлического сопротивления чистого растворителя;  
 $\lambda_p$  – коэффициент гидравлического сопротивления полимерного раствора.

После подстановки в формулу (1) значений коэффициентов сопротивления ( $\lambda_s$  и  $\lambda_p$ ), входящих в формулу Дарси-Вейсбаха  $\Delta P = \lambda \cdot (\rho \cdot \frac{L}{4\pi^2} \cdot R_w^5) \cdot Q^2$ , которая функционально связывает перепад давления ( $\Delta P$ ) между концами трубы с объёмным расходом ( $Q$ ) жидкости, и проведения несложных преобразований была получена другая формула для расчета величины эффекта СГДС

$$DR, \% = \left[ 1 - \frac{Q_s^2}{(Q_s + \Delta Q)^2} \right] \cdot 100\% \quad (2)$$

из которой следует, чем больше величина  $\Delta Q = (Q_p - Q_s)$  приращения объёмного расхода полимерного раствора ( $Q_p$ ) по сравнению с расходом чистого растворителя ( $Q_s$ ), тем больше энергетический выигрыш от применения противотурбулентной добавки.

В известных литературных источниках, посвященных исследованиям закономерностей турбулентного течения, приводится уравнение, связывающее величину приращения объёмного расхода с гидродинамическими параметрами течения и физико-химическими характеристиками растворов полимеров

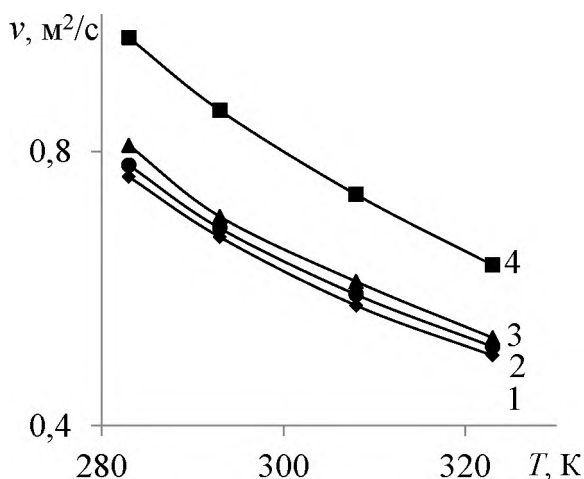
$$\Delta Q = \pi R_w^2 \cdot \Psi \cdot \frac{\tau_w}{(\rho \cdot G)^{1/2}} \cdot \left[ 1 - \left( \frac{G}{\tau_w} \right)^{1/2} \right], \quad (3)$$

где  $S = \pi R_w^2$  – площадь поперечного сечения цилиндрического канала;  
 $\Psi = [\eta] \cdot C / (1 + [\eta] \cdot C)$  – объемная доля макромолекулярных клубков в растворе, зависящая от характеристической вязкости  $[\eta]$  и концентрации раствора полимера ( $C$ );  
 $\tau_w = \Delta P \cdot R_w / 2L$  – напряжение сдвига на стенке трубы радиуса ( $R_w$ ) и длины ( $L$ ) при заданном перепаде давления ( $\Delta P$ );  
 $\rho$  – плотность растворителя;  
 $G = kT/V_k$  – модуль упругости макромолекулярного клубка с иммобилизованным растворителем, .

Принципиально важным является наличие в выражении (3) величины упругости макромолекулярных клубков ( $G$ ), при уменьшении которой приращение

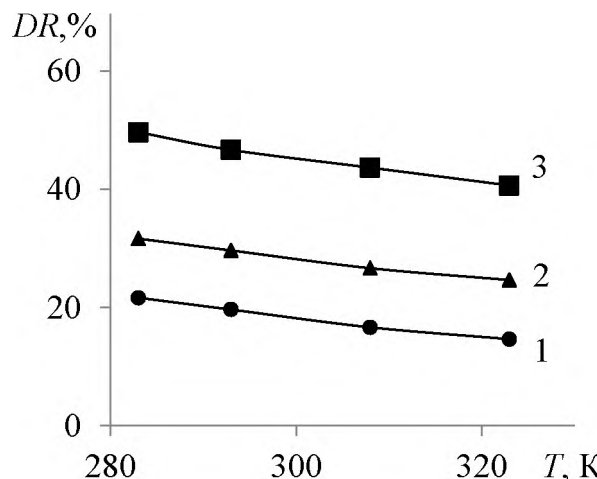
объёмного расхода ( $\Delta Q$ ) увеличивается и в соответствие с выражением (2) становится больше эффект снижения сопротивления ( $DR$ ). Упругость же клубков  $G = kT/V_k$ , имеющая энтропийную природу, уменьшается в двух случаях: при понижении температуры ( $T$ ) и при увеличении объёмов ( $V_k$ ) полимерных клубков с иммобилизованным растворителем.

Рассмотрим результаты проведенных лабораторных экспериментов по влиянию температуры на вязкость и величину эффекта СГДС. Из рисунка 1 закономерно следует, что при уменьшении температуры вязкость растворителя (толуол) и растворов полибутадиена ( $M = 1200$  кг/моль) на его основе увеличивается и, следовательно, должна уменьшаться текучесть всех жидкостей. Но экспериментально измеренная величина эффекта СГДС при этом с понижением температуры растет (рисунок 2), что предсказывается уравнениями (2) и (3).



**Рисунок 1** – Зависимость кинематической вязкости жидкостей от температуры:

1 – толуол; растворы полибутадиена в толуоле разной концентрации:  
2 – 0,05 кг/м³; 3 – 0,1 кг/м³; 4 – 0,5 кг/м³



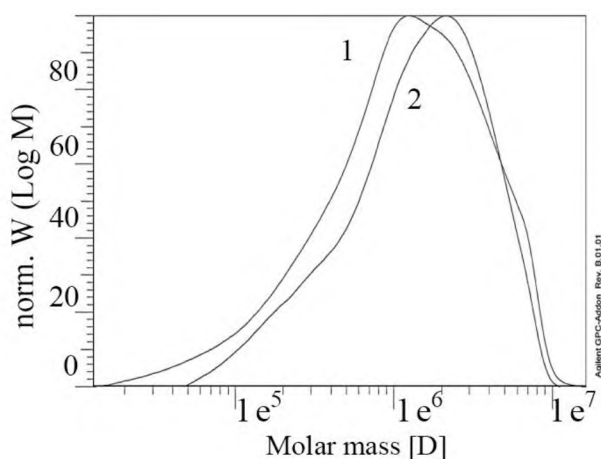
**Рисунок 2** – Зависимость величины эффекта СГДС от температуры при  $\tau_w = 110$  Па для растворов различной концентрации полибутадиена в толуоле: 1 – 0,05 кг/м³; 2 – 0,1 кг/м³; 3 – 0,5 кг/м³.

Но физико-химические характеристики растворов полимеров оказывают влияние не только на величину эффекта, но влияют и на начальные условия его проявления при турбулентном режиме течения жидкости, т.е. будет ли эффект наблюдаться в тех или иных гидродинамических условиях или применение полимеров бесперспективно. Анализ уравнения (3) показывает, что полимерный образец должен обладать некоторыми заданными свойствами, и он становится агентом СГДС только при выполнении неравенства  $M \cdot [\eta] \cdot \tau_w > RT$ . В соответствии с последним неравенством эффект Томса будет проявляться при тем меньших напряжениях сдвига на стенке трубы ( $\tau_w$ ), чем больше характеристическая вязкость полимерного раствора  $[\eta]$  и выше молярная масса ( $M$ ) растворенного образца, а также чем ниже температура ( $T$ ) жидкости. В промышленных нефте- и продуктопроводах

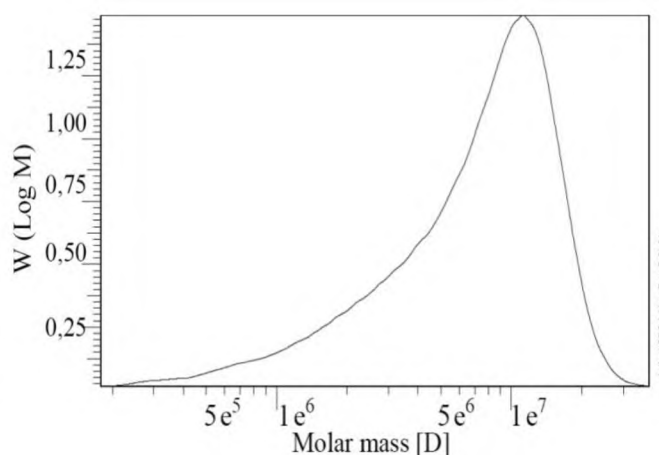
при турбулентном течении углеводородных жидкостей реализуются высокие значения чисел Рейнольдса ( $Re \sim 10^4 - 10^5$ ). При этом величины напряжения сдвига, как правило, имеют очень малые значения в интервале 1 - 10 Па, поэтому эффективными оказываются только полимеры сверхвысокой молярной массы ( $M > 1000$  кг/моль) и очень большой характеристической вязкости ( $[\eta] > 1$  м<sup>3</sup>/кг). Из таблицы 1 следует, что такими образцами при напряжении сдвига  $\tau_w = 10$  Па являются натуральный каучук и выпускаемый промышленностью синтетический полиизопрен. Они обладают достаточно большими относительными молекулярными массами  $M_r \sim (1 - 2) \cdot 10^6$ , которые измерены методом ГПХ (таблица 1 и рисунок 3).

**Таблица 1** – Величины эффекта ( $DR$ ) и молярной массы ( $M$ ) для растворов полимеров в бензине с концентрацией  $C = 2$  кг/м<sup>3</sup> при напряжении сдвига  $\tau_w = 10$  Па

Полимер (марка)	Полибутадиен (NS-116)	Сополимер бутадиена и стирола (SB-24)	Синтетический каучук (SKI-3S)	Натуральный каучук (SVR-3L)
$M$ , кг/моль	219	328	1510	2040
$DR$ , %	-	-	20	35



**Рисунок 3** – ММР образцов каучуков SKI-3S (1) и SVR-3L (2)



**Рисунок 4** – ММР образца полигексена НИОСТ №1

Но и эти образцы не будут востребованы в качестве агентов СГДС для промышленных трубопроводов из-за большого расхода полимера ( $C = 2$  кг/м<sup>3</sup>) для получения относительно невысокого эффекта ( $DR = 20-30$  %) даже при перекачке легких фракций нефтепродуктов (бензин, керосин), в которых каучуки хорошо растворимы и их макромолекулярные клубки имеют максимально развернутые конформации. В нефти же содержатся высокомолекулярные компоненты (смолы,

асфальтены и т.д.), поэтому полимеры растворяется в ней хуже и их противотурбулентная эффективность будет ещё ниже.

Следовательно, для применения полимеров в условиях реальных нефтепроводов требуются синтетические образцы, хорошо растворимые в углеводородных жидкостях и обладающие сверхвысокой молекулярной массой, например, поли- $\alpha$ -олефины. На рисунке 4 приведена кривая молекулярно-массового распределения (ММР) одного из исследованных нами образцов полигексена (НИОСТ №1) со средней молекулярной массой близкой к 10 миллионам.

Результаты экспериментального исследования физико-химических и противотурбулентных свойств двух рентгеноаморфных образцов полигексена, растворенных в гексане и циклогексане, приведены в таблице 2 и на рисунке 5. Для полигексена эти углеводородные жидкости незначительно отличаются по растворяющей способности и являются термодинамически хорошими растворителями.

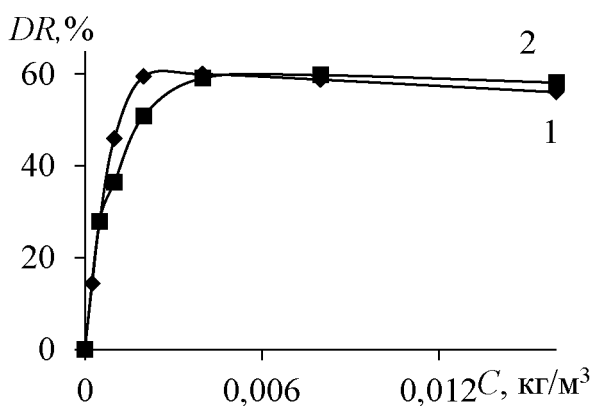
**Таблица 2 – Экспериментально установленные характеристики двух синтезированных образцов полигексена в различных растворителях**

Образец (марка)	$M$ , кг/моль	$[\eta]$ , м <sup>3</sup> /кг	$V_k \cdot 10^{-21}$ , м <sup>3</sup>	$DR$ , %	Растворитель
Полигексен (НИОСТ № 1)	9100	1,12	16,6	60	Гексан
	9100	0,89	13,5	58	Циклогексан
Полигексен (НИОСТ № 2)	7800	0,85	11,0	55	Гексан
	7800	0,64	8,4	52	Циклогексан

Экспериментально установлено, что в одинаковых гидродинамических условиях и при постоянной температуре, величина эффекта Томса зависит от термодинамического качества растворителя, которое влияет на объем макромолекулярного клубка.

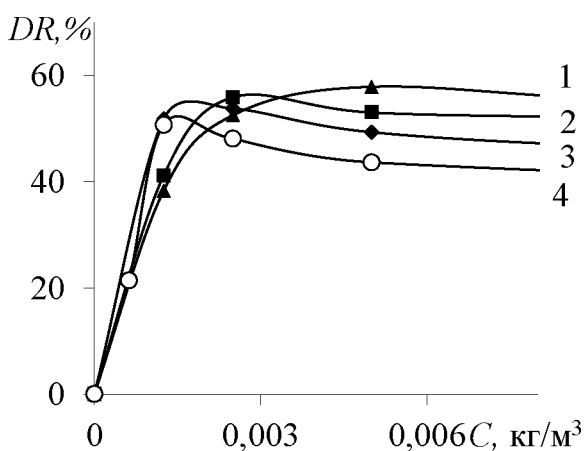
Например, образец полигексена (НИОСТ № 1) с молекулярной массой  $M_r = 9,1 \cdot 10^6$ , растворенный в бензине, имеет ещё бóльшие значения характеристической вязкости  $[\eta] = 1,27 \text{ м}^3/\text{кг}$  и объёмы его клубков также больше  $V_k = 19,3 \cdot 10^{-21} \text{ м}^3$ . Поэтому раствор этого образца в бензине обладает более высокой противотурбулентной эффективностью  $DR = 62 \%$  по сравнению с гексаном и циклогексаном. Высокая эффективность бензина при использовании его в качестве растворителя обусловлена тем, что он в своем составе кроме предельных углеводородов содержит и низкомолекулярные ароматические соединения, которые являются наилучшими растворителями для полигексена.

На рисунке 5 представлены зависимости величины эффекта СГДС от концентрации растворов полигексена в гексане и циклогексане. Концентрационные кривые для всех пар полимер – растворитель имеют экстремум (максимум) при некоторой концентрации, называемой оптимальной концентрацией ( $C_{опт.}$ ).



**Рисунок 5** – Зависимость величины эффекта Томса от концентрации раствора полигексена (НИОСТ №1) при  $\tau_w = 10$  Па в разных растворителях:

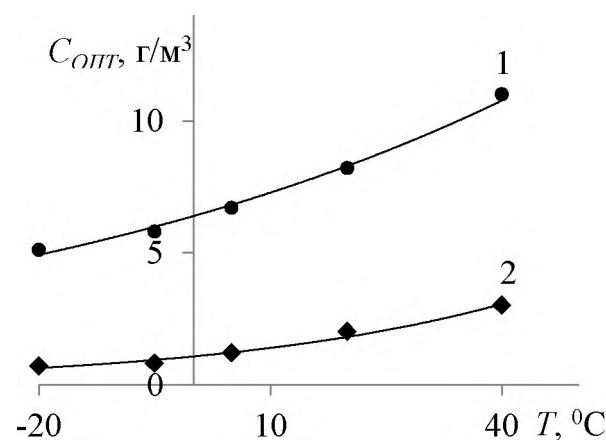
- 1 – гексан ( $C_{опт.} = 2,5$  г/м<sup>3</sup>);
- 2 – циклогексан ( $C_{опт.} = 5,5$  г/м<sup>3</sup>)



**Рисунок 6** – Зависимость величины эффекта Томса ( $DR, \%$ ) от концентрации для раствора полигексена (марки Wacker) в гептане при  $\tau_w = 4$  Па при различных температурах:

- 1 –  $T = 313K$ ;      2 –  $T = 298K$ ;
- 3 –  $T = 278K$ ;      4 –  $T = 258K$

Противотурбулентная эффективность полимера чаще всего оценивается не величиной максимального значения эффекта ( $DR_{MAX}$ ), а оптимальной концентрацией, при которой эта величина достигается. Меньшее значение оптимальной концентрации у раствора полимера в гексане свидетельствует о том, что для полигексена термодинамическое качество этого растворителя лучше, чем у циклогексана.



**Рисунок 7** – Зависимость оптимальной концентрации достижения максимальной величины эффекта

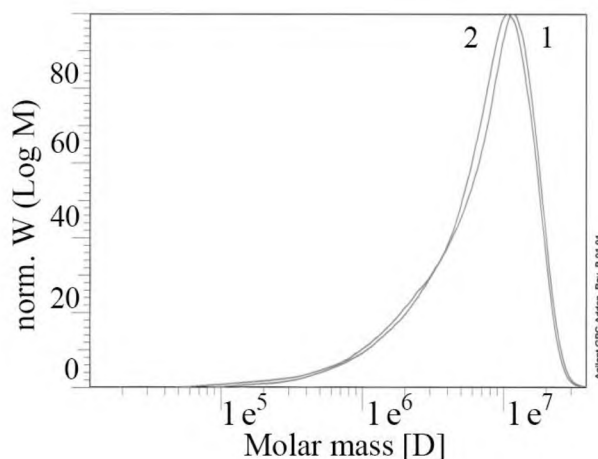
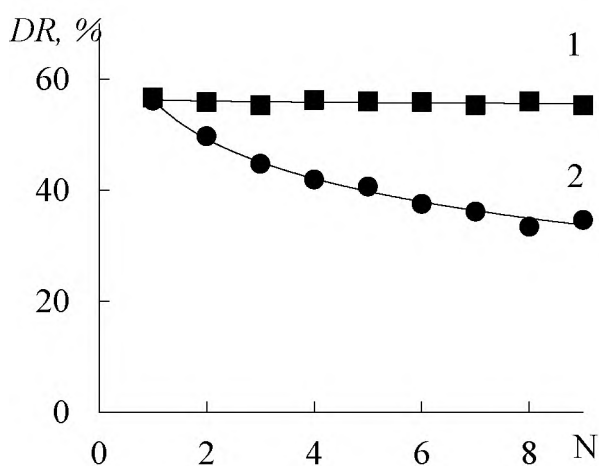
( $DR_{MAX} \sim 60 \%$ ) от температуры:

- 1 – Полигексен (НИОСТ № 1);
- 2 – Сополимер гексена с деценом (Wacker)

Экспериментальные результаты, представленные на рисунке 6, свидетельствуют о том, что при понижении температуры величина максимального эффекта остается практически постоянной ( $DR_{MAX} \sim 55 \%$ ), но величина оптимальной концентрации ( $C_{опт.}$ ), при которой достигается этот эффект, уменьшается. Отчетливо

видно (рисунок 7), что оптимальная концентрация растворов полимеров (Вагер и НИОСТ № 1), соответствующая максимальному эффекту ( $DR_{MAX} \sim 55\%$ ), при понижении температуры в интервале от  $+40\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  уменьшается. Это говорит в пользу предпочтительного применения противотурбулентных агентов при низких температурах.

Характерной особенностью растворов полимеров является их склонность к уменьшению величины эффекта при многократном прохождении через цилиндрический канал (рисунок 8, кривая 2) и, особенно, при прохождении через местные гидравлические сопротивления. Наблюдаемый экспериментальный факт принято объяснять деструкцией полимерных цепей, сопровождающейся уменьшением молекулярной массы (объёма) образца полимера. Однако проведенными исследованиями показано (рисунок 9), что механодеструкция при малых напряжениях сдвига отсутствует.



**Рисунок 8** – Зависимость величины эффекта ( $DR$ ) от числа ( $N$ ) проходов раствора полигексена в гептане через канал турбореометра при  $\tau_W = 10$  Па:

1 –  $C = 0,04$  кг/м<sup>3</sup>; 2 –  $C = 0,002$  кг/м<sup>3</sup>

**Рисунок 9** – Молекулярно-массовое распределение образца НИОСТ №1:

1 – исходный раствор полимера;  
2 – раствор полимера после воздействия напряжения сдвига  $\tau_W = 10$  Па

Уменьшение величины СГДС наблюдается только у предельно разбавленных растворов, у которых макромолекулярные клубки не соприкасаются друг с другом и между ними существуют прослойки неиммобилизованного растворителя, т.е. клубки являются кинетически независимыми частицами. Такая структура предельно разбавленных растворов присуща системам полимер – растворитель, концентрация которых ниже оптимального состояния ( $C < C_{Опт.}$ ). Раствор, результаты исследования которого представлены на рисунке 8, имеет оптимальную концентрацию  $C_{Опт.} = 0,008$  кг/м<sup>3</sup>. В случае же превышения оптимальной концентрации ( $C > C_{Опт.}$ ) клубки начинают соприкасаться и, при этом их цепи частично переплетены между собой,

наблюдается другая картина, при которой деградация отсутствует (рисунок 8, прямая 1).

Причина уменьшения величины эффекта при каждом последующем проходе разбавленного раствора через канал реометра, на наш взгляд, заключается в том, что следствием действия малых сдвиговых нагрузок является процесс распада надмолекулярных образований, протекающий в предельно разбавленном растворе полимера, приготовленном из концентрированного раствора ( $C > C_{\text{опт.}}$ ). По мере разбавления раствора и последующего перемешивания в процессе его течения сплошная флуктуационная сетка раствора распадается на отдельные надмолекулярные фрагменты, состоящих из нескольких взаимно перепутанных макромолекул. В случае предельного разбавления растворов ( $C \rightarrow 0$  и  $\psi \ll 1$ ) между ассоциатами макромолекул возникают обширные области чистого растворителя, в которые, приняв форму клубка, переходят распутывающиеся полимерные цепи. Таким образом, изначально существующие ассоциаты макромолекул, имеющие объёмы ( $V_{\text{асс.}}$ ), распадаются на более мелкие и кинетически независимые клубки индивидуальных макромолекул, объёмы которых становятся меньше размеров исходных надмолекулярных ансамблей ( $V_k < V_{\text{асс.}}$ ), что и приводит к падению величины эффекта (рисунок 8, кривая 2).

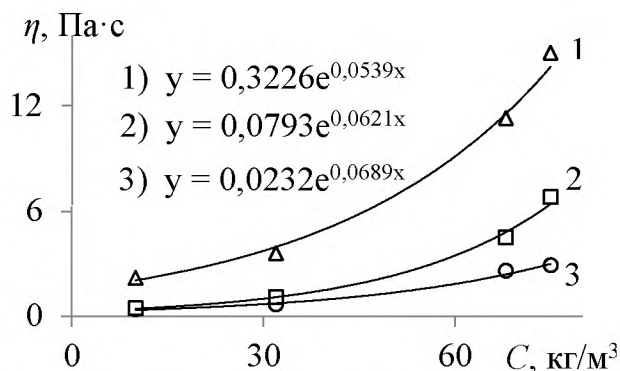
При турбореометрическом тестировании концентрированных растворов ( $C > C_{\text{опт.}}$  и  $\psi \approx 1$ ) между ассоциатами макромолекулярных клубков отсутствуют прослойки свободного растворителя и, следовательно, отсутствует возможность для распутывания полимерных цепей с последующим формированием из них клубков меньших размеров. Другими словами, в концентрированных растворах объёмы макромолекулярных клубков, находящихся в стесненных обстоятельствах, т.е. тесно соприкасающихся и переплетенных между собой, после каждого очередного прохода полимерного раствора через канал турбореометра не изменяются ( $V_k = \text{const}$ ). Поэтому не изменяется и величина эффекта.

**В четверной главе «Формирование противотурбулентных присадок суспензионной формы»** представлены результаты исследования эффективности известных присадок коллоидной формы, а также описаны основные этапы получения суспензии из полимерного эластомера методом осаждения из раствора и стабилизации её за счет частичной сорбции высокодисперсной сажи на поверхности частиц полимера.

Увеличение содержание полимера в концентрате приводит к экспоненциальному росту вязкости раствора (рисунок 10) и превращению его в нетекучий студень, который невозможно закачать в нефтепровод из-за высокого противодействия в нем. Как видно из рисунка 10, при увеличении содержания

полимера вязкость полимерных концентратов возрастает по экспоненциальному закону. У раствора самого эффективного и высокомолекулярного образца полигексена ( $M_r = 5 \cdot 10^6$ ) вязкость концентрата намного превышает значение 10 Па·с даже при небольшой концентрации полимера в нем  $C = 70 \text{ кг/м}^3$  (7 % масс.). Поэтому в последнее десятилетие стали широко применяться противотурбулентные присадки суспензионной формы.

Проведенными реологическими исследованиями установлено, что истинный раствор полимера с небольшой концентрацией полимера всего лишь 5% масс. обладает заметно выраженными неньтоновскими свойствами, т.е. его вязкость сильно зависит от скорости сдвига (рисунок 11, кривая 1) в области её малых значений, т.е. как раз в интервале скоростей, при которых осуществляется дозирование присадки в трубопровод.

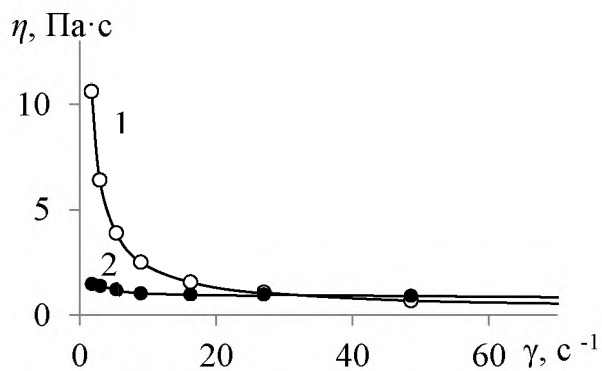


**Рисунок 10.** – Зависимость динамической вязкости полимеризатов от содержания полигексена в гептане.

Молекулярная масса образцов:

1 –  $M_r = 5 \cdot 10^6$ ; 2 –  $M_r = 1 \cdot 10^6$ ;

3 –  $M_r = 0,5 \cdot 10^6$



**Рисунок 11.** – Зависимость вязкости ( $\eta$ ) от скорости сдвига ( $\gamma$ ) для суспензии Baker (2), содержащей 30 % и для 5%-го истинного раствора в гептане полимера (1), выделенного из суспензии Baker.

Суспензионная присадка, содержащая 30 % того же самого мелкодиспергированного полимера, является ньютоновской жидкостью и её вязкость практически не зависит от скорости сдвига (рисунок 11, кривая 2). При этом вязкость суспензии заметно ниже, чем вязкость 5%-го раствора полимера в области малых скоростей сдвига.

Таким образом, переводя полимер из раствора в коллоидную форму, можно увеличить количество гидродинамически активного агента в единице объёма присадки и вместе с тем уменьшить вязкость закачиваемой композиции. Проведённые исследования, подробно описанные в работе [1], ещё на начальном этапе формирования собственной композиции противотурбулентной присадки суспензионной формы нами впервые были сформулированы следующие критерии для дисперсной фазы:

- а) содержание нефтерастворимого полимера в количестве не менее 25 % мас.;
- б) молекулярная масса полимера должна быть не менее  $5 \cdot 10^6$ ;
- в) размер частиц дисперсии не более 0,1 мм.

Дисперсионная среда должна обладать следующими свойствами:

- а) иметь низкую температуру застывания и не растворять суспендированный полимер;
- б) неограниченно растворяться в углеводородных жидкостях.

Дальнейшие исследования [5] подтвердили, обоснованность полученных критериев. Установлено, что всем критериям соответствуют ПТП только зарубежного производства (таблица 3), которые имеются в настоящее время на нефтяном рынке и проявляют высокую эффективность в углеводородных жидкостях (~ 50 %) при содержании полимерной фазы (~ 30 % масс.) и обладают малыми значениями  $C_{\text{ОПТ}}$ .

**Таблица 3 – Содержание полимера в импортных присадках и оптимальная концентрация**

Название ПТП	Baker	Necadd	X-Pand	LiquidPower
Содержание фазы (полимера), масс. %	32	30	31	28
$C_{\text{ОПТ}}$ , кг/м <sup>3</sup>	0,005	0,008	0,0010	0,0012

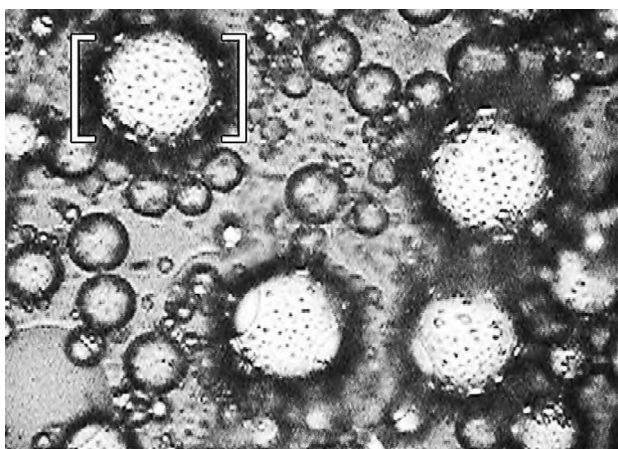
Дисперсионная среда всех ПТП зарубежного производства, определенная методами газовой хроматографии и масс-спектрометрии, представляет собой смесь органических соединений сложного состава, содержащая более пяти компонентов, основными из которых являются высшие спирты и метиловые эфиры пропиленгликолей. Методами ИК-спектроскопии и гель-проникающей хроматографии установлено, что дисперсная фаза представлена сополимером гексена с небольшим содержанием додецена.

На втором этапе формирования противотурбулентной присадки суспензионной формы были проведены теоретические исследования и на основе термодинамических представлений Флори–Хаггинса получено уравнение для параметра взаимодействия  $\chi_{кр}$ , который характеризует “устойчивость” полимерного раствора к осаждению по мере ухудшения термодинамического качества растворителя.

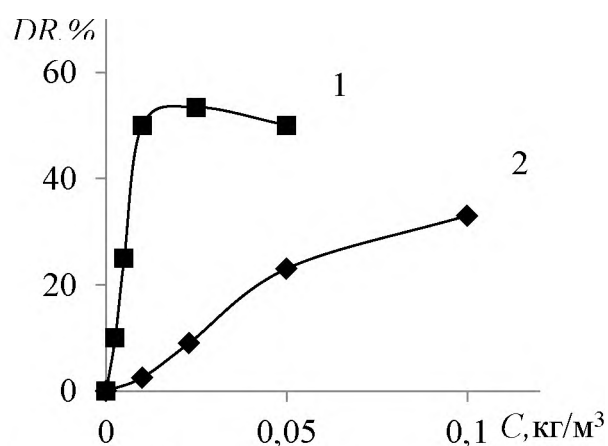
$$\chi_{кр} = \frac{1}{2} \left( 1 + \frac{1}{\sqrt{Z}} + \frac{1}{\sqrt{X}} \right) \quad (4)$$

Анализ уравнения (4) показывает, что раствор более устойчив к осаждению при более низкой молекулярной массе, которая характеризуется параметром  $(1/Z^{0.5})$ , а также малым содержанием частиц дополнительного компонента в растворе  $(1/X^{0.5})$ ,

которые не способны взаимодействовать с растворителем или с сегментами макромолекул. По сравнению с двухкомпонентной системой (полимер – растворитель), добавка дополнительного компонента ведёт к увеличению параметра  $\chi_{кр}$  на некоторую величину и будет тем выше, чем меньше содержание последнего.



**Рисунок 12** – Фрагмент фотографии через микроскоп (увеличение  $\times 20$ ) «обратной» эмульсии (50% нефти и 50% воды) в присутствии полигексена.



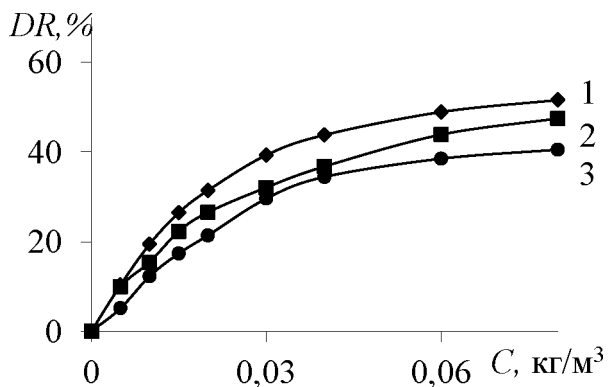
**Рисунок 13** – Зависимость величины эффекта от концентрации полигексена:  
 1 – раствор полигексена в нефти без воды;  
 2 – раствор полигексена в «обратной» водонефтяной эмульсии

Для выбора дополнительного компонента и его обоснования были проведены исследования водонефтяных эмульсий [2, 6]. Установлено, что при добавлении полигексена в «обратную» водонефтяную эмульсию (рисунок 12), он адсорбируется на поверхности асфальтенов и смол, которые своей сольватной оболочкой стабилизируют капли эмульгированной воды. Вследствие вывода адсорбированных макромолекул полимера из дисперсионной среды, состоящей из низкомолекулярных компонентов нефти, происходит заметное падение противотурбулентной эффективности полигексена в «обратной» эмульсии (рисунок 13) по сравнению с безводным раствором полигексена в углеводородной жидкости (нефти).

Относительная близость химической природы асфальтенов и смол с техническим углеродом определило выбор дополнительного компонента (сажи) для стабилизации суспензии полимера путем создания на поверхности дисперсных частиц полимера ( $d_p \sim 0,1$  мм) структурно-механического барьера из частиц сажи для предотвращения их слипания. Методом БЭТ проведено определение удельной поверхности образца мелкодисперсной сажи и вычислен средний диаметр пор в её частицах ( $d_{т.у.} \approx 5$  мкм  $\ll d_p$ ). Установлена удельная поверхность  $S_{уд} = 216$  м<sup>2</sup>/г и средний диаметр пор в частицах сажи составляет всего  $\sim 11$  нм, что намного меньше среднего радиуса макромолекулярных клубков, равного ( $R_k \sim 100$  нм). Следовательно, абсорбцию макромолекул во внутреннюю полость частичек технического углерода

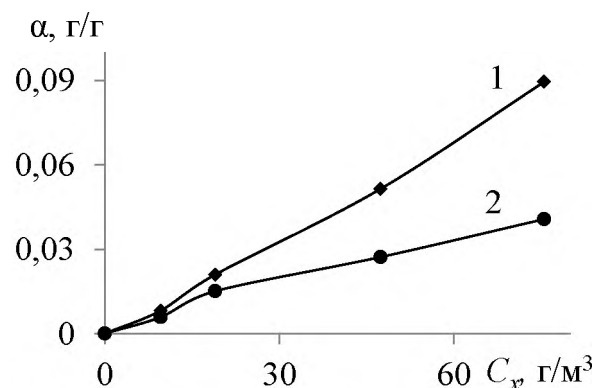
можно исключить. Следует отметить, что введение в систему частиц сажи не учитывается в полученном уравнении (4), однако появление границы раздела фаз вызывает адсорбцию макромолекул полигексена с большей молекулярной массой на поверхности частиц технического углерода (параметр  $1/Z$  в уравнении 4 уменьшается), что приводит к увеличению параметра взаимодействия  $\chi_{кр}$  и повышает устойчивость раствора к осаждению.

В растворе макромолекулы клубки находятся в конформации свернутого клубка и способны адсорбироваться на частицах технического углерода отдельными сегментами.



**Рисунок 14** – Зависимость величины эффекта Томса от концентрации полигексена ( $\tau_w = 4$  Па) при различном содержании технического углерода:

1 –  $m_{т.у.}/m_p = 0$ ;      2 –  $m_{т.у.}/m_p = 5$ ;  
3 –  $m_{т.у.}/m_p = 10$

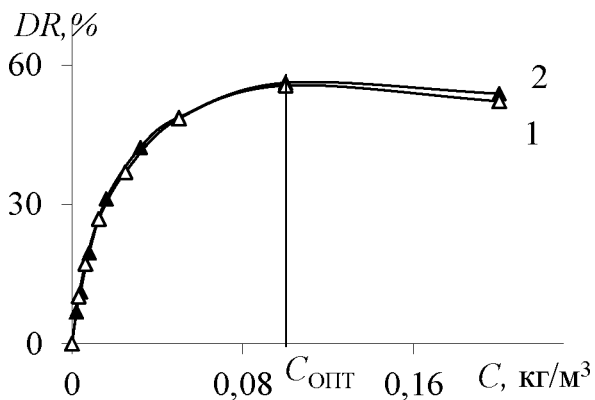


**Рисунок 15** – Зависимость величины адсорбции ( $\alpha$ , г/г) от концентрации полигексена в растворе ( $C_x$ , г/м³) при различном содержании технического углерода:

1 –  $m_{т.у.}/m_p = 10$ ;      2 –  $m_{т.у.}/m_p = 5$

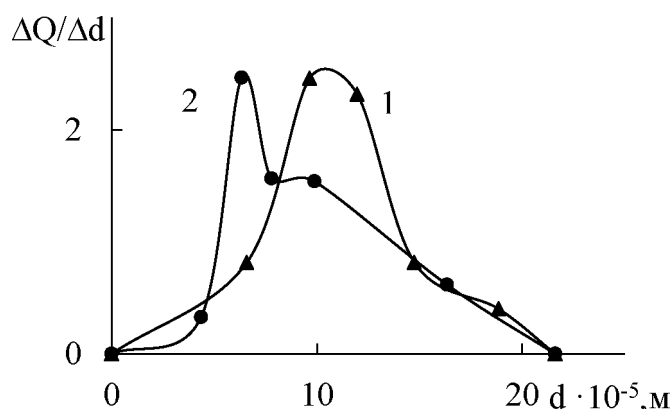
Методом турбулентной реометрии экспериментально установлено, что при добавлении сажи в концентрированный раствор полигексена в большом количестве, превышающем массу растворенного полимера в несколько раз ( $m_{т.у.} > m_p$ , где  $m_{т.у.}$  – масса сорбента;  $m_p$  – масса растворенного полигексена) наблюдается адсорбция макромолекул на частицах сажи. При увеличении содержания сажи величина адсорбции полигексена возрастает, а противотурбулентная эффективность раствора снижается (рисунок 14 и 15). Следовательно, избыточное количество сажи в композиции ухудшает её противотурбулентные свойства.

При разбавлении раствора и пропорциональном уменьшении концентрации полигексена и содержания сажи, кривые зависимости эффекта идентичны и накладываются друг на друга (рисунок 16), а параметр ( $C_{опт.} = 100$  г/м³), характеризующий эффективность полимера, остается неизменным для двух систем.

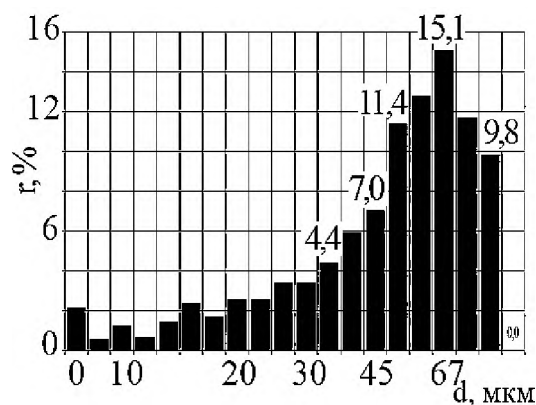


**Рисунок 16** – Зависимость величины эффекта от концентрации полимера ( $M=2000 \text{ кг/м}^3$ ) при  $\tau_w = 4 \text{ Па}$  для двух систем: 1 – полигексен-гептан; 2 – полигексен-гептан-сажа ( $m_{т.у.}/m_p = 0,02$ )

Следующим этапом получения суспензии полигексена являлось его осаждение из раствора. При изменении полярности раствора за счет добавления порций спирта, уменьшается сольватация макромолекулярных клубков и разрушается сплошная флуктуационная сетка, вследствие чего образуются первичные фрагменты суспензии полимера. В качестве жидкости-осадителя из ряда спиртов был выбран гексанол. Он обладает высокой плотностью и вязкостью по сравнению с низшими спиртами, имеет высокую температуру кипения ( $T_{\text{кип}} = 157 \text{ }^\circ\text{C}$ ) и приемлемую для северных широт температуру плавления ( $T_{\text{пл}} = -52 \text{ }^\circ\text{C}$ ). Для проведения сравнительной оценки размеров образующихся при осаждении частиц (рисунок 17), наряду с гексанолом в качестве дисперсионной среды были выбраны также и другие спирты.



**Рисунок 17** – Дифференциальное распределение ( $\Delta Q/\Delta r$ ) размеров частиц ( $r \cdot 10^{-5}$ ) в дисперсиях, полученных в разных спиртах: 1 – Дисперсия полимера в бутаноле ( $d_{\text{ср}} \sim 110 \text{ мкм}$ ); 2 – Дисперсия полимера в гексаноле ( $d_{\text{ср}} \sim 65 \text{ мкм}$ ).



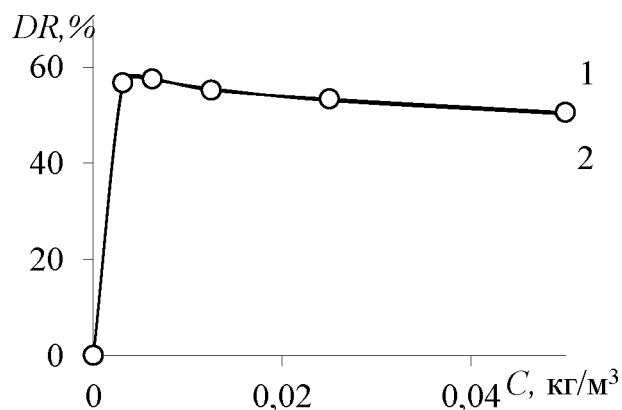
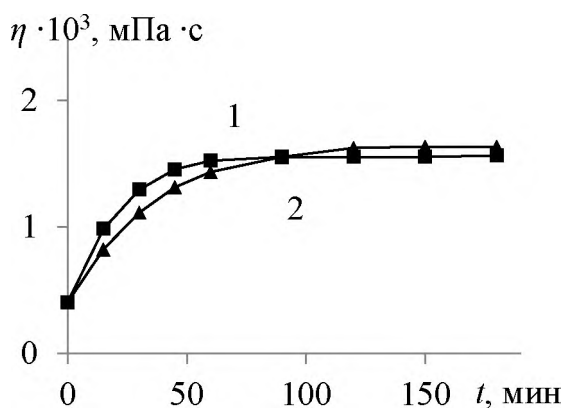
**Рисунок 18** – Зависимость относительного содержания частиц дисперсии ( $r$ ) в гексаноле от их размеров ( $d$ , мкм), полученной методом седиментографии.

Из рисунка 18 видно, что следствием уменьшения полярности молекул спирта при увеличении углеводородного радикала в их структуре является уменьшение среднего размера частиц суспензии. После экспериментального обоснования компонентного состава была сформирована присадка коллоидной формы АВА-1, приведенная в таблице 4.

**Таблица 4** – Состав противотурбулентной присадки коллоидной формы.

Вещество	масс. %
Поли-а-олефин (полигексен)	25
Технический углерод	1
Дисперсионная среда (гексанол и ПАВ)	74

Для оценки качества сформированной присадки коллоидной формы АВА-1 провели исследование её физико-химических и реологических свойств и сравнили с аналогичными параметрами присадки растворной формы, полученной из того же образца исходного полимера. Технологическая эффективность суспензионных присадок зависит от скорости их растворения, поэтому были проведены исследования зависимости времени растворения суспензии от размеров частиц. Экспериментально подтверждено (рисунок 19), что с увеличением размера частиц полимера в суспензии время растворения дисперсии возрастает.



**Рисунок 19** – Изменение динамической вязкости гептана ( $\eta = 0,39 \cdot 10^{-3}$  Па·с) от времени растворения в нем суспензии полигексена до гомогенного раствора постоянной концентрации ( $C = 10$  кг/м<sup>3</sup>): 1 –  $r_{cp} = 65 \cdot 10^{-6}$ , м; 2 –  $r_{cp} = 110 \cdot 10^{-6}$ ,

**Рисунок 20** – Зависимость величины эффекта от концентрации при  $\tau_w = 10$  Па: 1 – Раствор полигексена в гептане, приготовленный из исходного полимера; 2 – Раствор в гептане, приготовленный из сформированной суспензии.

Гидродинамическими исследованиями установлено, что после перевода полимерного раствора в коллоидную форму его противотурбулентная эффективность остается на прежнем уровне (рисунок 20). Следовательно, в процессе получения присадки путем коагуляции макромолекул при замене растворителя в отличие от механического диспергирования полимерных образцов (полимерных тел) деструкция цепей отсутствует.

Экспериментально установлены другие физико-химические параметры полученной ПТП (таблица 5). Полученные данные свидетельствуют о том, что полученная присадка коллоидной формы АВА-1 является достойным конкурентом на

рынке уже существующих противотурбулентных присадок, лучшая из которых присадка Baker.

**Таблица 5 – Физико-химические свойства АВА-1 и импортных аналогов**

	Содержание полимера в суспензии, % мас.	$C_{OPT}$ , кг/м <sup>3</sup>	$DR_{MAX}$ , %	$T_{ПЛ}$ , К	Вязкость, $\eta$ , Па·с	Фактор устойчивости, (Ф)	Время растворения присадки до гомогенного раствора (t, мин.)
АВА-1	25	0,008	60	233	2,1	0,10	60
Baker	32	0,006	60	248	1,5	0,03	180
Necadd	30	0,008	60	254	3,8	0,07	160

### ВЫВОДЫ

По результатам проведенных исследований можно сделать следующие выводы.

1. Теоретически показано и экспериментально обосновано, что при понижении температуры противотурбулентная эффективность полимеров повышается вследствие уменьшения оптимальной концентрации полимерного раствора ( $C_{OPT}$ ), при которой достигается максимальная величина эффекта снижения гидродинамического сопротивления ( $DR_{MAX}$ ). Понижение температуры перекачиваемой жидкости с растворенным полимером для увеличения эффективности действия присадки ограничивается температурой стеклования полимера и температурой плавления растворителя.
2. Термодинамическое качество растворителя оказывает существенное влияние на величину эффекта Томса вследствие разной степени развернутости макромолекулярного клубка в растворе. Чем больше объём клубка с иммобилизованным растворителем, тем выше величина эффекта при заданных гидродинамических параметрах турбулентного течения.
3. Экспериментально установлено, что при многократном прохождении раствора полимера через цилиндрический канал при малом напряжении сдвига, происходит не только деструкция полимерных цепей, но распад надмолекулярных ассоциатов, состоящих из большого числа взаимно переплетенных макромолекул. Процесс распутывания цепей, приводящий к разрушению ассоциатов, сопровождается снижением величины эффекта СГДС ( $DR$ ), что является следствием уменьшения объемов надмолекулярных образований ( $V_{Acc.}$ ) до размеров индивидуальных макромолекулярных клубков ( $V_k$ ).
4. Установлено, что технический углерод является оптимальным компонентом, способствующим стабилизации суспензии полимера за счет создания

структурно-механического барьера. Абсорбция во внутреннюю полость сверхвысокомолекулярных клубков полимеров отсутствует. Экспериментально доказано, что малое содержание технического углерода (до 1% масс.) в суспензионной присадке не влияет на противотурбулентную эффективность полимера.

5. Экспериментально установлено, что увеличение среднего размера частиц образующейся суспензии полигексена в процессе осаждения происходит вследствие увеличения полярности дисперсионной среды.
6. Комплексное изучение реологических и физико-химических свойств полученной ПТП суспензионного типа показало, что данная присадка по своим характеристикам не уступает самым лучшим импортным аналогам.

### **Основные результаты отражены в следующих публикациях**

*Статьи в журналах, включенных в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук:*

1. **Абдусалямов А. В.** Антитурбулентные присадки суспензионной формы для трубопроводного транспорта нефти / А. В. Абдусалямов, В. Н. Манжай // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. – 2013. – № 4. – С. 102–106. – 0,24 / 0,14 а.л.

2. Манжай В. Н. Влияние высокомолекулярных эластомеров на турбулентное течение углеводородных жидкостей / В. Н. Манжай, **А. В. Абдусалямов**, Ю. Р. Носикова // Известия Томского политехнического университета. – 2015. – Т. 326, № 3. – С. 19–24. – 0,45 / 0,23 а.л.

*Scopus:* **Manzhay V. N.** Influence of high molecular elastomers on a turbulent flow of hydrocarbon liquids / V. N. Manzhay, A. V. Abdusalyamov, Y. R. Nosikova // Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering. – 2015. – Vol. 326, is. 3. – P. 19–24.

3. Манжай В. Н. Деградация полимерных растворов при турбулентном течении в цилиндрическом канале / В. Н. Манжай, Ю. Р. Носикова, **А. В. Абдусалямов** // Журнал прикладной химии. – 2015. – Т. 88, № 1. – С. 125–131. – 0,57 / 0,30 а.л.

*в переводной версии журнала:*

Manzhay V. N. Degradation of Polymer Solutions in a Turbulent Flow in a Cylindrical Channel / V. N. Manzhay, Yu. R. Nosikova, **A. V. Abdusalyamov** // Russian Journal of Applied Chemistry. – 2015. – Vol. 88, is. 1. – P. 118–123. – DOI: 10.1134/S1070427215010176 (*Web of Science*)

4. Коновалов К. Б. Сравнительное изучение действия противотурбулентных присадок для углеводородных жидкостей / К. Б. Коновалов, **А. В. Абдусалямов**, В. Н. Манжай, М. А. Казарян, В. И. Сачков // Краткие сообщения по физике ФИАН. – 2015. – Т. 42, № 12. – С. 36–42. – 0,31 / 0,15 а.л.

*в переводной версии журнала:*

Kononov K. B. Comparative study of the effect of antiturbulent additives for hydrocarbon liquids / K. B. Kononov, **A. V. Abdusalyamov**, V. N. Manzhay, M. A. Kazaryan, V. I. Sachkov // Bulletin of the Lebedev Physics Institute. – 2015. – Vol. 42, is. 12. – P. 356–359. – DOI: 10.3103/S1068335615120064. (*Web of Science*)

5. **Абдусалимов А. В.** Турбулентное течение водонефтяных и модельных водобензиновых эмульсий в присутствии полимерных добавок / А. В. Абдусалимов, Кловис Ле Гран Монкам Монкам, Л. В. Чеканцева, В. Н. Манжай // Нефтяное хозяйство. – 2016. – № 1. – С. 81–84. – 0,29 / 0,16 а.л.

*Scopus: Abdusalyamov A. V.* Turbulent flow of water-oil emulsions in the presence of polymer additives / A. V. Abdusalyamov, Clovis Le Grand Monkam Monkam, L. V. Chekantseva, V. N. Manzhai // Neftyanoe khozyaystvo – Oil Industry. – 2016. – Is. 1. – P. 81–84.

*Патент Российской Федерации:*

6. Пат. 2607914 Российская Федерация, МПК51 В01F 3/08, С08F 10/14, С08F 4/642, С08F 2/02, F17D 1/17. Способ формирования и состав противотурбулентной присадки / Манжай В. Н., Абдусалимов А. В.; патентообладатель: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт химии нефти Сибирского отделения Российской академии наук (RU). – № 2015150475 ; заявл. 24.11.2015 ; опубл. 11.01.17, Бюл. № 2. – 8 с. – 0,37 / 0,19 а.л.

*Статья в сборнике материалов конференции, индексируемом Web of Science:*

7. Manzhai V. N. Turbulent flow of oil-water emulsions with polymer additives / V. N. Manzhai, Monkam Monkam Clovis Le Grand, A. V. Abdousaliyomov // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2014. – Vol. 21 : XVIII International Scientific Symposium in Honour of Academician M. A. Usov: Problems of Geology and Subsurface Development. Tomsk, Russia, April 07–11, 2014. – Article number 012028. – 7 p. – DOI: 10.1088/1755-1315/21/1/012028. – 0,2 / 0,11 а.л.

*Публикации в сборниках материалов конференций:*

8. **Абдусалимов А. В.** Потенциальный агент снижения гидродинамического сопротивления для нефтепроводов / А. В. Абдусалимов, В. Н. Манжай // Нефть и нефтехимия : сборник материалов Всероссийской молодежной конференции с элементами научной школы. Казань, 24–25 ноября 2011 г. – Казань, 2011. – С. 9–13. – 0,11 / 0,07 а.л.

9. **Абдусалимов А. В.** Суспензионные композиции полимеров как потенциальные агенты снижения гидродинамического сопротивления для нефтепроводов / А. В. Абдусалимов, В. Н. Манжай // Химия нефти и газа : материалы VIII Международной конференции. Томск. 24–28 сентября 2012 г. – Томск, 2012. – С. 344–346. – 0,09 / 0,05 а.л.

10. **Абдусалимов А. В.** Трубопроводный транспорт углеводородных жидкостей с антитурбулентными присадками в арктических условиях / А. В. Абдусалимов, В. Н. Манжай // Россия в Арктике. XXI век: среда обитания, общество, освоение : материалы I Всероссийской молодежной конференции. Томск, 14–15 июня 2012 г. – Томск, 2012. – С. 130–132. – 0,09 / 0,05 а.л.

11. **Абдусалимов А. В.** Технологические особенности перекачки нефти с полимерными присадками нового поколения / А. В. Абдусалимов, В. Н. Манжай // Перспективные полимерные композиционные материалы. Альтернативные технологии. Переработка. Применение. Экология : доклады Международной конференции «Композит – 2013». Саратов, 25–27 июня 2013 г. – Саратов, 2013. – С. 91–93. – 0,12 / 0,06 а.л.

12. Манжай В. Н. Использование эластомеров для трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов [Электронный ресурс] / В. Н. Манжай, А. В. Абдусалимов // Добыча, подготовка, транспорт нефти и газа : материалы VI Всероссийской научно-

практической конференции. Томск, 24–26 сентября 2013 г. – С. 59–62. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM). – 0,09 / 0,05 а.л.

13. Носикова Ю. Р. Исследование полиизопрена в турбулентном режиме течения / Ю. Р. Носикова, В. Н. Манжай, **А. В. Абдусаламов** // Полимеры – 2014 : Шестая Всероссийская Каргинская конференция. Москва, 27–31 января 2014 г. – М., 2014. – Т. 1 : Программа конференции и сборник тезисов пленарных, приглашенных и устных докладов. – С. 200. – 0,04 / 0,02 а.л.

14. Лазоренко О. С. Влияние высокочастотного акустического поля на структурно-механические параметры неводных растворов углеводов [Электронный ресурс] / О. С. Лазоренко, **А. В. Абдусаламов**, Г. И. Волкова // Перспективы развития фундаментальных наук : сборник научных трудов XI Международной конференции студентов и молодых ученых. Томск, 22–25 апреля 2014 г. – Томск, 2014. – С. 394–396. – URL: [http://science-persp.tpu.ru/Previous%20Materials/Konf\\_2014.pdf](http://science-persp.tpu.ru/Previous%20Materials/Konf_2014.pdf) (дата обращения: 22.12.2017). – 0,16 / 0,04 а.л.

15. Манжай В. Н. Сравнительное исследование промышленных антитурбулентных присадок для трубопроводного транспорта нефти / В. Н. Манжай, **А. В. Абдусаламов** // 27 симпозиум по реологии : материалы. Тверь, 08–13 сентября 2014 г. – Тверь, 2014. – С. 137–138. – 0,06 / 0,03 а.л.

16. **Абдусаламов А. В.** Определение молекулярных характеристик полимеров турбореометрическим методом / А. В. Абдусаламов, В. Н. Манжай // Современные проблемы науки о полимерах : материалы 10-й Санкт-Петербургской конференции молодых ученых. Санкт-Петербург, 10–13 ноября 2014 г. – Санкт-Петербург, 2014. – С. 78. – 0,17 / 0,09 а.л.

17. **Абдусаламов А. В.** Влияние физических и химических воздействий на величину эффекта Томса / А. В. Абдусаламов, В. Н. Манжай // Химия нефти и газа : материалы IX Международной конференции. Томск, 22–25 сентября 2015 г. – Томск, 2015. – С. 373–377. – 1 электрон. опт. диск (DVD-ROM). – 0,23 / 0,15 а.л.

18. Манжай В. Н. Сравнительная эффективность протвотурбулентных присадок коллоидной формы / В. Н. Манжай, К. Б. Коновалов, **А. В. Абдусаламов** // Химия нефти и газа: Материалы IX Международной конференции. Томск, 22–25 сентября 2015 г. – Томск, 2015. – С. 392–395. – 1 электрон. опт. диск (DVD-ROM). – 0,16 / 0,8 а.л.

*Статья на официальном сайте РАН:*

19. Манжай В. Н. Турбулентное течение углеводородных жидкостей с полимерными добавками при низкой температуре [Электронный ресурс] / В. Н. Манжай, **А. В. Абдусаламов** // Поисквые фундаментальные научные исследования в интересах развития Арктической зоны Российской Федерации на 2014 год. – Российская академия наук : официальный сайт. – URL: [http://www.ras.ru/viewstaticdoc.aspx?id=6fa0e4e3-9753-428b-a447-1befb815cd93&\\_Language=ru](http://www.ras.ru/viewstaticdoc.aspx?id=6fa0e4e3-9753-428b-a447-1befb815cd93&_Language=ru). – М., 2014. – 11 с. – URL: <http://www.ras.ru/FStorage/Download.aspx?id=9ab45525-6542-48d6-a975-1363e288ef37> (дата обращения: 22.12.2017). – 0,58 / 0,3 а.л.