

На правах рукописи



ТАШБУЛАТОВ РАДМИР РАСУЛЕВИЧ

**ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ВЯЗКОСТНО-ТЕМПЕРАТУРНЫХ
ХАРАКТЕРИСТИК ТЕЧЕНИЯ СМЕСЕЙ ПРИ СОВМЕСТНОЙ
ТРАНСПОРТИРОВКЕ РАЗЛИЧНЫХ НЕФТЕЙ В СИСТЕМЕ
МАГИСТРАЛЬНЫХ НЕФТЕПРОВОДОВ**

Специальность: 25.00.19 – Строительство и эксплуатация
нефтегазопроводов, баз и хранилищ

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Уфа 2019

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

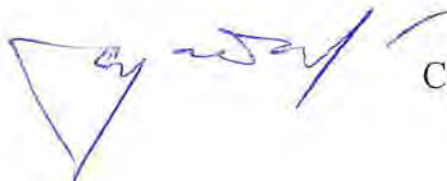
- Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Мастобаев Борис Николаевич
- Официальные оппоненты: **Бажайкин Станислав Георгиевич**
доктор технических наук, профессор
Научно-технический центр ООО «НИИ Транснефть» / главный научный сотрудник
- Николаев Александр Константинович**
доктор технических наук, доцент
ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский горный университет» / профессор кафедры «Транспорт и хранение нефти и газа»
- Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ухтинский государственный технический университет» (г. Ухта)

Защита состоится 24 апреля 2019 года в 14:00 на заседании совета по защите докторских и кандидатских диссертаций Д 212.289.04 при ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет» по адресу: 450062, Республика Башкортостан, г. Уфа, ул. Космонавтов, 1.

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

Автореферат разослан «___» _____ 2019 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Султанов Шамиль Ханифович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. В соответствии с Федеральным законом «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации» от 23.11.2009 № 261-ФЗ и «Энергетической стратегией России на период до 2030 года», утвержденной Распоряжением Правительства Российской Федерации от 13.11.2009 в настоящее время выявление возможности экономии потребляемой энергии при транспортировке нефти по магистральным нефтепроводам является основным приоритетным направлением.

Снижение потребления энергии при перекачке нефти по магистральным нефтепроводам может достигаться различными методами. Многочисленные исследования в этом направлении в основном проводятся для экономии энергии на отдельных односторонних трубопроводах. Однако в связи с развитием сети магистральных нефтепроводов России за последние десятилетия становятся актуальными вопросы энергоэффективного управления нефтяными потоками по всей нефтепроводной системе. В настоящее время управление всей системой магистральных нефтепроводов осуществляется на основе обеспечения проектных объемов перекачки по заявкам грузоотправителей с заданными показателями качества в соответствии с нормируемыми значениями по ГОСТ Р 51858-2002 и в соответствии со схемой нормальных грузопотоков, утвержденной Министерством энергетики Российской Федерации.

Однако на сегодняшний день все чаще на практике встает вопрос о решении задачи нахождения эффективного распределения грузопотоков нефти по системе магистральных нефтепроводов с целью снижения суммарной потребляемой энергии. Данная задача успешно решена путем выбора рациональных режимов перекачки на различных технологических участках магистральных нефтепроводов с использованием современных методов математического программирования. Предлагается метод гибкого планирования перекачки с учетом сохранения качества нефти, наличия свободных емкостей резервуарных парков, имеющегося насосно-силового оборудования и поступающих заявок на снижение режимов перекачки до полной остановки трубопровода при проведении ремонтов, выполнении плановых

работ и т.д. Решением задачи обычно является гибкий план-график работы каждого технологического участка в заданный период времени.

Общим недостатком указанных работ является то, что поиск решения выполняется исходя из готовых карт режимов работы технологических участков, в которых не учитывается изменение реологических свойств формирующихся смесей нефтей при перераспределении грузопотоков. Изучению прогнозирования изменения вязкостно-температурных характеристик течения смесей при транспортировке разнотипных нефтей в системе магистральных нефтепроводов для решения вышеописанной задачи и посвящена настоящая диссертация.

Более того, предлагается расширить потенциал экономии суммарной энергии на перекачку при решении задачи оптимальной загрузки системы магистральных нефтепроводов путем добавления возможности формирования смесей нефтей в узловых точках нефтепроводной системы с определенными реологическими свойствами для того, чтобы более тяжелые и вязкие компоненты нефти сдавались в ближайшие пункты приема и перекачивались в более энергоэффективных режимах перекачки. Таким образом, выбор рациональных маршрутов движения по сети магистральных нефтепроводов специально формируемых смесей нефтей с различными реологическими свойствами позволит выявить новые резервы экономии энергозатрат на перекачку.

Предлагаемые решения и задачи прогнозирования изменения вязкостно-температурных характеристик течения смесей разнотипных нефтей особенно актуальны в нынешних условиях повышения доли добычи нефти с осложненными реологическими характеристиками.

Степень разработанности темы. Научные труды, посвященные повышению энергоэффективности перекачки нефти по магистральным нефтепроводам, можно разделить на две группы. К первой группе относятся работы И. Р. Байкова, С. Е. Кутукова, А. И. Гольянова, А. М. Нечваля, Е. В. Вязунова, В. И. Голосовкера, Ю. П. Ретюнина, М. М. Велиева, И. А. Михеевой, Н. Е. Пирогова, А. К. Николаева, J. G. Jefferson и др. В этих работах решается задача энергоэффективного управления нефтепроводной системой путем распределения грузопотоков нефтей, оптимизации режимов перекачки технологических участков магистральных нефтепроводов и формирования оптимальных планов-графиков их загрузки. Ко второй группе

относятся работы Л. С. Лейбензона, В. С. Яблонского, П. И. Тугунова, В. Ф. Новоселова, Л. С. Абрамзона, Б. Н. Мастобаева, Н. А. Гаррис, В. И. Черникина, W. R. Shu и др., посвященные повышению эффективности перекачки высоковязких нефтей и оптимизации методов специальной перекачки.

Несмотря на большое количество работ по тематике повышения энергоэффективности перекачки нефти по магистральным нефтепроводам отсутствуют работы, в которых учитывалось бы изменение вязкостно-температурных характеристик смесей различных по физико-химическим свойствам нефтей.

Соответствие паспорту заявленной специальности. Тема работы и содержание исследований соответствуют **пунктам 2 и 3** области исследований, определяемой паспортом специальности 25.00.19 – «Строительство и эксплуатация нефтегазопроводов, баз и хранилищ»: «2. Разработка и оптимизация методов проектирования, сооружения и эксплуатации сухопутных и морских нефтегазопроводов, нефтебаз и газонефтехранилищ с целью усовершенствования технологических процессов с учетом требований промышленной экологии» и «3. Разработка научных основ и усовершенствование технологии трубопроводного транспорта газа, нефти и нефтепродуктов, гидро- и пневмоконтейнерного транспорта».

Целью диссертационной работы является повышение эффективности перекачки разнотипных нефтей по системе магистральных нефтепроводов путем оптимизации распределения грузопотоков нефтей и формирования реологически эффективных смесей в узловых точках.

Основные задачи исследования

1. Исследование возможности минимизации суммарных энергозатрат на перекачку при формировании специальных маршрутов движения разнотипных нефтей и их смесей по разветвленной системе магистральных нефтепроводов и анализ существующих научно-теоретических исследований прогнозирования вязкостно-температурных характеристик течения нефтей и их смесей для решения задачи оптимальной загрузки нефтепроводной системы.

2. Экспериментальные исследования изменения вязкостно-температурных свойств смесей нефтей при бинарном и многокомпонентном смешении для разработки уравнений прогнозирования изменения вязкости перекачиваемого продукта при перераспределении грузопотоков нефтей и их смесей по разветвленной нефтепроводной системе.

3. Экспериментальные исследования изменения вязкостно-температурных свойств смесей нефтей, проявляющих неньютоновские свойства, для формирования теоретического представления изменения реологической кривой течения при смешении.

4. Разработка рекомендаций для решения задачи повышения энергоэффективности перекачки разнотипных нефтей по системе магистральных нефтепроводов путем формирования маршрутов движения специально формируемых смесей нефтей в узловых точках системы.

Научная новизна работы

1 Впервые сформулирована и аналитически решена новая задача формирования маршрутов движения разнотипных нефтей и их смесей по разветвленной системе магистральных нефтепроводов с целью минимизации суммарных энергозатрат на перекачку, отличающаяся учетом изменяющихся реологических параметров нефтей при их смешении и возможностью формирования «энергоэффективных» смесей в узловых точках системы.

2 Установлена новая закономерность формирования вязкости многокомпонентной смеси нефтей, представленная в виде корреляционных зависимостей, сформированных на базе уравнений бинарного смешения, и отличающаяся линейным характером поверхностей уровня вязкости смеси.

3 Разработана новая универсальная модель для описания реологической кривой течения неньютоновских нефтей в широком диапазоне изменения скоростей сдвига от 0 до 1000 1/с, отличающаяся наличием наклонной асимптоты, и обосновано ее применение в задачах прогнозирования вязкостно-температурных свойств неньютоновских смесей нефтей.

Теоретическая значимость. Разработаны методологические основы расчета вязкостно-температурных характеристик течения многокомпонентных нефтяных

смесей в разветвленной системе магистральных нефтепроводов с учетом возможного проявления неньютоновских свойств нефтей, а именно

- установлена аддитивность коэффициента крутизны вискограммы смеси, имеющая линейную зависимость, от массовой концентрации смешиваемых нефтей;
- получены уравнения для определения вязкости трехкомпонентной смеси с использованием координат симплексного пространства на базе модифицированных моделей формирования вязкости бинарных смесей;
- предложена универсальная асимптотическая модель течения, которая позволяет рассчитать по результатам ротационной вискозиметрии значения эффективной вязкости неньютоновской нефти в широком диапазоне температур и скоростей эксплуатации, причем модель хорошо поддается прогнозированию изменения параметров неньютоновского течения при смешении нефтей;
- предложена методика расчета целевой функции в виде суммарной затрачиваемой энергии на перекачку для определения оптимальных параметров смешения нефтей в узловых точках нефтепроводной системы и формирования маршрутов движения потоков нефтей и их смесей по трубопроводам.

Практическая значимость. Математические вязкостно-температурные модели смешения ньютоновских и неньютоновских нефтей и алгоритмы расчета определения параметров оптимального перераспределения грузопотоков разнотипных нефтей в системе магистральных нефтепроводов использованы для доработки программного обеспечения интерактивного макета-тренажера имитационного моделирования процессов трубопроводного транспорта, разработанного ООО «НПП АТП».

Методики расчета вязкости смесей нефтей используются для гидравлических расчетов при проектировании нефтесборных коллекторов в ООО «Ватан Плюс».

Результаты выполненных в диссертационной работе исследований используются в учебном процессе ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет» на кафедре «Транспорт и хранение нефти и газа» при обновлении рабочих программ дисциплин «Физические основы реологии углеводородов» и «Ресурсо-энергосберегающие технологии транспорта хранения нефти и газа» по направлению подготовки студентов «Нефтегазовое дело»

специализации «Эксплуатация и обслуживание объектов транспорта и хранения нефти и газа».

Методология и методы научного исследования. При решении поставленных задач были использованы теоретические и экспериментальные методы исследований. Теоретические исследования включали в себя научный анализ современной теории и практики трубопроводного транспорта нефтей с различными реологическими свойствами, математическое моделирование трубопроводной системы с учетом изменяющихся реологических параметров перекачиваемого продукта. Экспериментальные исследования включали проведение опытов в соответствии с разработанным планом экспериментальных исследований, обработку полученных результатов методами математической статистики в современных программных комплексах.

Положения, выносимые на защиту

1. Методы прогнозирования вязкостно-температурных характеристик течения разнотипных нефтей и их смесей при их транспортировке по системе магистральных нефтепроводов.

2. Теоретические основы определения маршрутов движения нефтей и их специально формируемых смесей по системе разветвленных магистральных нефтепроводов с целью экономии суммарной энергии на перекачку.

Степень достоверности и апробация результатов. Достоверность результатов работы подтверждена данными лабораторных исследований, полученных с использованием поверенных средств измерения и на аттестованном оборудовании по общепринятым методикам, утвержденных в соответствующем порядке. Основные положения диссертационной работы докладывались на следующих мероприятиях: Международная научно-техническая конференция, посвященная памяти академика А.Х. Мирзаджанзаде (Уфа, 2016 г.), XII, XIII международной учебно-научно-практической конференции УГНТУ (Уфа, 2017-2018 гг.), XV Международной научной конференции, посвященной 100-летию Республики Башкортостан (Уфа, 2017 г.), Всероссийской научно-практической конференции с международным участием (Омск, 2017 г.).

Публикации. По теме диссертационной работы опубликовано 12 печатных работ, в том числе 4 в ведущих рецензируемых научных журналах, рекомендованных ВАК Министерства науки и высшего образования РФ, 2 работы в журналах, индексируемых в базе данных Scopus и 1 работа в журнале, индексируемом в базе данных Web of Science.

Объем работы Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав, основных выводов, списка литературы из 139 наименований; изложена на 135 страницах машинописного текста и содержит 70 рисунков и 24 таблицы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы, сформулированы цель и основные задачи исследований, приведены научная новизна и практическая значимость результатов работы.

Первая глава посвящена анализу методов управления распределением грузопотоков нефтей по системе магистральных нефтепроводов и современных теории и практики бинарного и многокомпонентного смешения нефтей.

Современное состояние разветвленной трубопроводной системы магистральных нефтепроводов и увеличение доли добычи нефтей со сложными реологическими свойствами требуют разработки новых энергоэффективных стратегий управления системой магистральных нефтепроводов.

Выявлена возможность минимизации суммарных энергозатрат на перекачку разнотипных нефтей путем управления распределением грузопотоков нефтей с различными реологическими свойствами по системе магистральных нефтепроводов. С этой целью необходимо выполнить усовершенствование существующих формул прогнозирования вязкостно-температурных свойств смесей, чтобы учитывать большое количество компонентов смешения и возможное проявление неньютоновских свойств.

Такой подход позволяет не только повысить научную обоснованность и точность прогнозирования вязкостно-температурных свойств смесей, но и существенно повысить эффективность перекачки разнотипных нефтей по системе магистральных нефтепроводов.

На основе проведенного анализа сформулированы основные задачи экспериментальных исследований.

Во **второй главе** проанализированы общепринятые методы расчета вязкости бинарных смесей нефтей. Основные исследования изложены в научных трудах, посвященных перекачке «реологически сложных» нефтей с разбавителем.

Зависимости вязкости бинарной смеси от концентраций смешения исходных нефтей имеют вид выпуклых к оси состава кривых. При этом для кривой смешения характерно начальное резкое падение вязкости от ее максимального значения, поэтому бинарную смесь не всегда удастся описать полиномом второго порядка.

Для подтверждения общепринятых зависимостей вязкости смеси от соотношения смешения компонентов были проведены лабораторные измерения коэффициента динамической вязкости смесей в следующих пропорциях смешения: 0 %, 25 %, 50 %, 75 %, 100 %. Опыты проводились на ротационном вискозиметре для двух случаев: 1) вязкости смешиваемых нефтей отличаются незначительно (6 и 23 мПа·с); 2) большая разница вязкостей смешиваемых нефтей (15 и 165 мПа·с).

На основании результатов лабораторных исследований было установлено, что универсальной формулы для определения вязкости нефтяных смесей не существует, поскольку физика процесса установления вязкости смеси сильно зависит от физико-химических свойств исходных смешиваемых компонентов. Поэтому была предложена модернизация известных уравнений Кендаля и Монрое, Керна, Аррениуса и Вальтера путем ввода эмпирических коэффициентов, определяемых методом наименьших квадратов по результатам проведенных опытов.

Математическое описание изменения вязкости многокомпонентной смеси простым суммированием полученных уравнений бинарного смешения не является корректным, поскольку необходимо учитывать взаимное влияние каждой комбинации возможных пар исходных смешиваемых нефтей, поэтому требуется принципиально иное решение.

Поскольку вязкость не обладает линейно аддитивными свойствами, решение данной проблемы возможно при использовании моделирования реологических свойств многокомпонентной смеси в многомерном симплексном пространстве, ребра которого отображают взаимное содержание всех возможных пар исходных

смешиваемых компонентов. Состав смеси в симплексном пространстве с любым числом входящих в него компонентов определяется симплексом, т.е. простейшей геометрической фигурой, имеющей k вершин в $(k-1)$ -мерном пространстве. Например, для трехкомпонентной смеси такой фигурой является треугольник концентраций, для четырехкомпонентной – тетраэдр, для пятикомпонентной – пентахор и т.д. Для аппроксимации зависимостей в многомерном симплексном пространстве (диаграммы состав – свойство) обычно используются приведенные полиномы Шеффе.

На основе полученной информации о проявлении смесеобразования в исследованных бинарных системах была предложена модель для описания изменения вязкости многокомпонентной смеси товарных нефтей в симплексных координатах. Модель разработана на базе общепринятых уравнений бинарного смешения. В основе модели лежит предположение о линейном характере ее поверхностей уровня в $(k-1)$ -мерном симплексном пространстве.

Предлагаемая модель применима в случае отсутствия проявления химических взаимодействий между компонентами (проявления минимума вязкости, сингулярных или иррациональных свойств), возникающих достаточно редко и только в случаях смешения нефтей различной природы происхождения. Вероятность возникновения вышеописанных аномальных явлений для подготовленных к транспортировке нефтей ничтожно мала.

При использовании линейчатых уравнений смесеобразования возможно 2 варианта взаимного расположения поверхностей уровня:

1) поверхности уровня могут быть параллельны друг другу, тогда модель можно определить по насыщенному плану экспериментов с проведением минимум $(2k-2)$ испытаний;

2) поверхности уровня не параллельны друг другу и имеют по отношению друг к другу уклон, тогда модель можно определить проведением минимум $(2k-1)$ опытов.

На рисунке 1 представлены основные характеристики отображения предложенной модели для определения вязкости трехкомпонентной смеси в симплексных координатах с параллельными линиями уровня вязкости. Прямые 1, 2

и 3 представляют собой линии уровня вязкости смеси. Точка Р в симплексных координатах $\{x_1, x_2, x_3\}$ в декартовой (бинарной) системе будет иметь координату y , вычисляемую, согласно рисунку 1, по формуле:

$$y = x_3 \cos(\alpha) + x_2 \cos(60^\circ + \alpha), \quad (1)$$

где α – угол между линиями уровня и основанием треугольника концентраций.

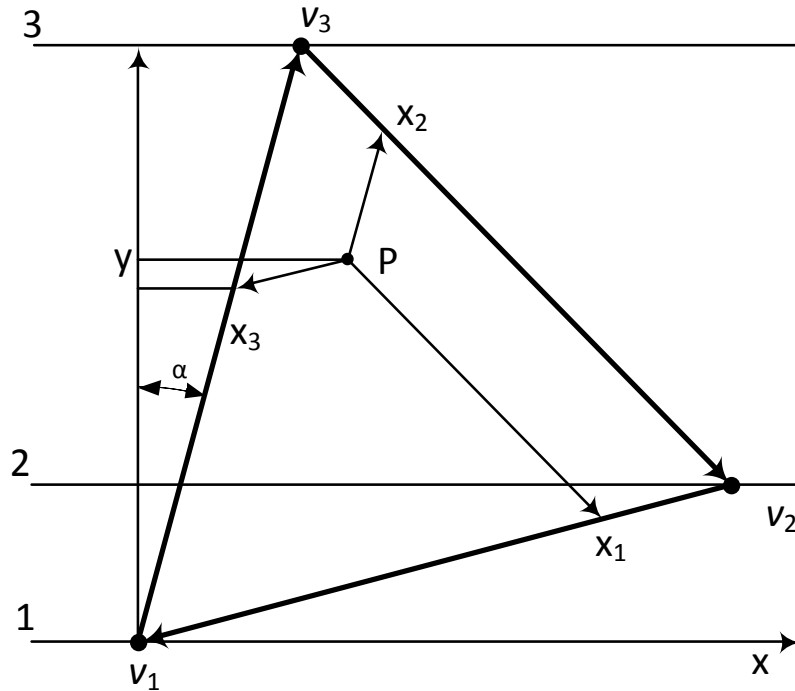


Рисунок 1 – Предлагаемая модель изменения вязкости трехкомпонентной смеси в симплексных координатах с параллельными линиями уровня

Теперь, зная правила перевода координат в бинарную систему, можно использовать любое из модернизированных уравнений бинарных смесей. Например, применение модернизированного уравнения Вальтера даст следующую модель для описания смесеобразования трехкомпонентной смеси:

$$\lg(\lg(v_{mix} + \mu'_V)) = (y \cdot \lg(\lg(v_1 + \mu'_V)) + (1 - y) \cdot \lg(\lg(v_3 + \mu'_V))) / \cos(\alpha), \quad (2)$$

где v_{mix} – коэффициент кинематической вязкости определяемой смеси;

μ'_V – эмпирический коэффициент, зависящий от физико-химических свойств смешиваемых нефтей;

v_i – коэффициент кинематической вязкости исходной смешиваемой i -ой нефти.

Для определения данной модели необходимо выполнить всего лишь одно дополнительное измерение вязкости смеси при трех известных значениях вязкости исходных компонентов.

Для аналитического сравнения эффективности использования предложенной модели (2) с полиномами Шеффе были проведены лабораторные испытания по измерению вязкостей трехкомпонентной смеси нефтей в различных пропорциях смешения. Соотношения смешения нефтей были выбраны в соответствии с методикой планирования эксперимента в симплексном пространстве.

Применение существующих аппроксимирующих полиномов Шеффе для моделирования изменения вязкости при многокомпонентном смешении в системе симплексных координат показало низкую точность, даже при использовании полинома неполного третьего порядка, для построения которого необходимо проведение семи испытаний. Точность уравнений удалось увеличить при моделировании полиномами Шеффе логарифма вязкости смеси. Уравнения достаточно адекватны при использовании полиномов Шеффе второго порядка и выше, для определения коэффициентов которого необходимо 3 и 4 предварительных измерений вязкости смесей.

Таким образом, на примере трехкомпонентной смеси использование предложенной модели позволило в 3 раза сократить количество дополнительных измерений вязкости смесей, чем при использовании адекватно подобранного полинома Шеффе.

Результаты полученной математической модели изменения вязкости трехкомпонентной смеси представлены на рисунке 2. Аналогичные карты линий уровня имеют модели на основе полиномов Шеффе второго и неполного третьего порядка при моделировании логарифма вязкости.

Для определения вязкостно-температурных характеристик смесей нефтей было выполнено исследование изменения коэффициента крутизны вискограммы бинарной смеси подготовленных к транспортировке нефтей.

Лабораторные опыты проводились при смешении высоковязкой нефти с маловязкой в пропорциях 0 %, 25 %, 50 %, 75 %, 100 %. Вязкость измерялась на ротационном вискозиметре при температурах 5 °С, 10 °С, 20 °С, 30 °С, 40 °С и

60 °С. Коэффициент крутизны вискограммы для каждой смеси определялся методом наименьших квадратов.

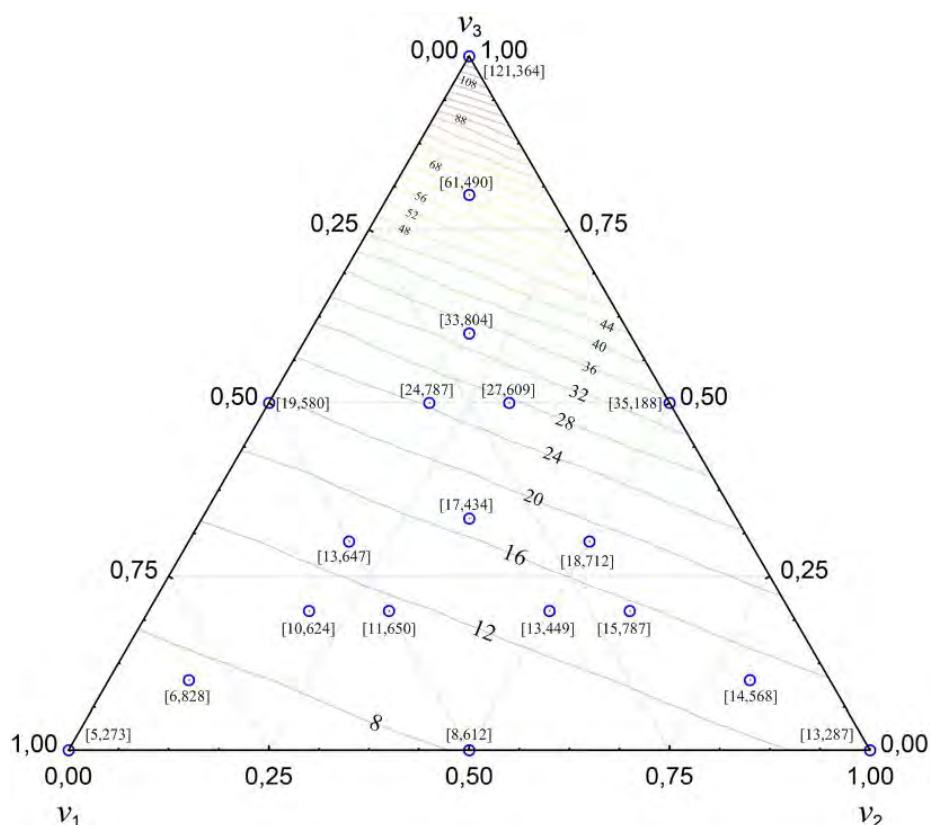


Рисунок 2 – Карта линий уровня вязкости смеси (сСт), построенная по результатам моделирования на симплексных координатах по предлагаемой модели

Результаты лабораторных опытов выявили закономерность, что коэффициент крутизны вискограммы изменяется по линейному закону. Проявление линейной аддитивности коэффициента крутизны вискограммы смеси нефтей в задачах поиска оптимальных концентраций смешения в узловых точках разветвленной нефтепроводной сети означает, что для построения вязкостно-температурной модели смесеобразования не требуется проведение дополнительных промежуточных опытов по измерению вязкости смесей при различных температурах. Данное положение позволяет существенно сократить число необходимых испытаний при необходимости учета возможного изменения температур эксплуатации нефтепроводов.

Таким образом, во второй главе на основе проведенных лабораторных исследований разработаны математические методы моделирования вязкостно-температурных свойств как бинарных, так и многокомпонентных смесей нефтей для

их дальнейшего использования в задачах оптимальной загрузки разветвленной системы магистральных нефтепроводов, транспортирующих нефти с различными свойствами.

В третьей главе, посвященной учету проявления неньютоновских свойств перекачиваемых нефтей, предложено использование универсальной асимптотической модели для описания изменения реологической кривой течения пластичных, псевдопластичных и вязкопластичных нефтей при смешении с учетом возможного изменения температур.

Асимптотическая модель основана на использовании реальных физически значимых параметров: значения статического и динамического напряжений сдвига и коэффициента пластической вязкости.

$$\tau = \tau_d + \mu \dot{\gamma} - \frac{(\tau_d - \tau_s) \dot{\gamma}_{\Delta\tau/2}}{\dot{\gamma} + \dot{\gamma}_{\Delta\tau/2}}, \quad (3)$$

где τ_d – динамическое напряжение сдвига;

τ_s – статическое напряжение сдвига;

μ – коэффициент пластической вязкости;

$\dot{\gamma}_{\Delta\tau/2}$ – значение скорости сдвига, при котором отклонение напряжения идентифицируемой кривой от прямолинейного участка равно половине разности динамического и статического напряжения.

Главная особенность этой модели заключается в наличии наклонной асимптоты, присутствие которой на истинной реологической кривой неньютоновских нефтей подтверждается во многих научных трудах.

Благодаря наличию наклонной асимптоты и использованию физически значимых коэффициентов, в отличие от широко используемых степенных уравнений, предлагаемая модель обладает лучшими аппроксимационными свойствами для описания сложных процессов изменения реологической кривой течения при смешении нефтей, а также при снижении температуры.

Для аналитического сравнения эффективности использования асимптотической модели и аппроксимирующего степенного уравнения Балкли-Гершеля в задачах описания изменения поведения реологической кривой под действием температуры были проведены экспериментальные исследования.

Измерения напряжений сдвига нефти с проявлением неньютоновских свойств в низкотемпературной зоне проводились на ротационном вискозиметре в широком диапазоне изменения скоростей сдвига при следующих температурах: минус 5 °С, 0 °С, 5 °С, 10 °С, 20 °С, 30 °С, 40 °С.

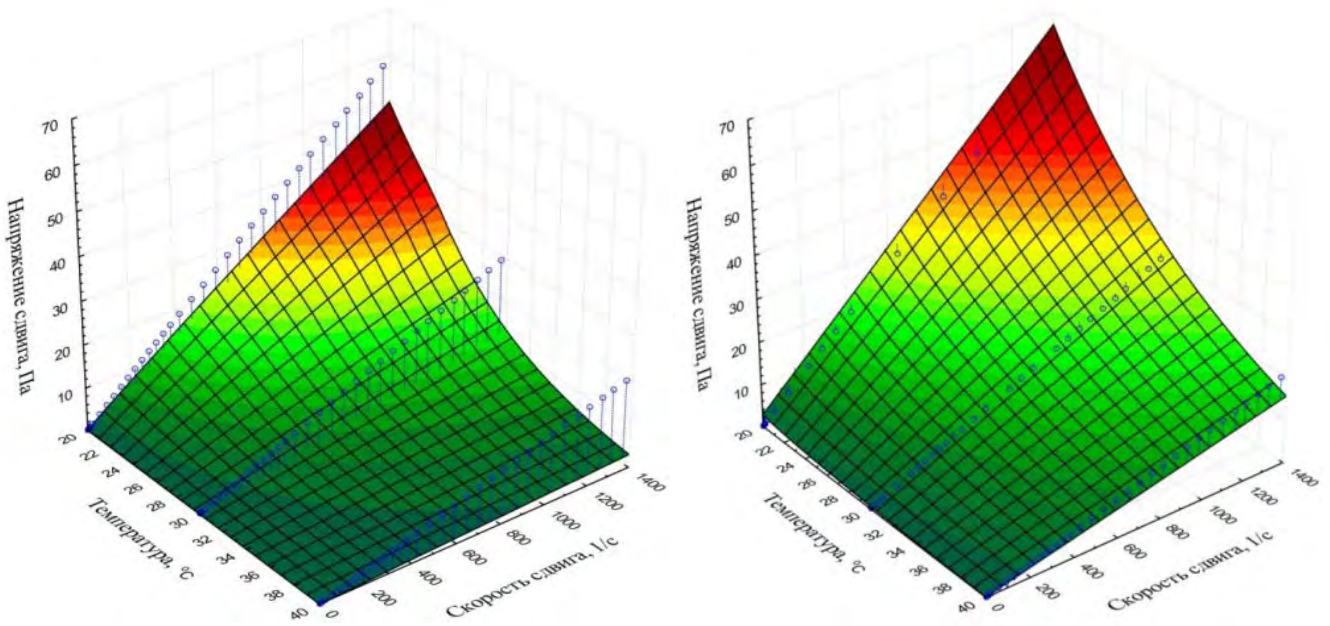
Параметры предложенной модели и уравнения Балкли-Гершеля при изменении температуры достаточно точно аппроксимируются уравнением Рейнольдса-Филонова.

Поскольку асимптотическая модель имеет большее количество параметров, обоснование ее применения в данной задаче выполнялось с помощью критерия минимума функционала среднего риска, позволяющего найти оптимальную сложность модели, при которой обеспечивается достаточная ее точность в соответствии с количеством и уровнем погрешности имеющихся данных. Данный критерий разработан советским математиком В. Н. Вапником для задач восстановления зависимостей по эмпирическим данным.

Результаты расчета функционала среднего риска по результатам лабораторных исследований подтвердили эффективность использования асимптотической модели.

Основной причиной большого отклонения значения функционала среднего риска степенного уравнения Балкли-Гершеля от асимптотической модели является резкое повышение значений коэффициента консистенции (от 15 до 1920) при снижении температуры, что ухудшает выбор параметров аппроксимируемой функции с заданной точностью, особенно в области высоких температур. Применение предложенного асимптотического уравнения позволило сузить диапазон изменения пластичной вязкости до 15-272 мПа·с. Отображение сравниваемых моделей в локальной зоне высоких температур представлено на рисунке 3, где отчетливо видны большие отклонения модели Балкли-Гершеля от опытных данных.

Для аналитического сравнения эффективности использования асимптотической модели с уравнением Балкли-Гершеля в задачах математического описания изменения поведения реологической кривой течения при смешении неньютоновских нефтей были также проведены экспериментальные исследования.



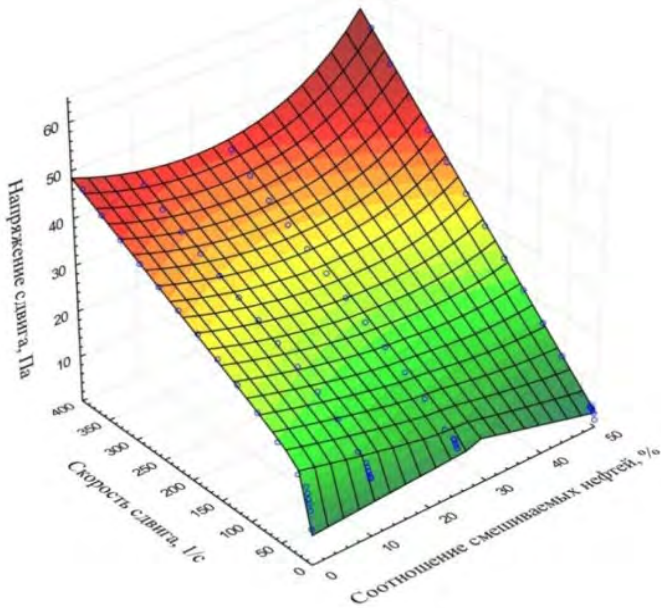
а) б)
 Рисунок 3 – Модели изменения реологической кривой течения на основе уравнения Балкли-Гершеля (а) и асимптотического уравнения (б)

Измерения напряжений сдвига получаемых смесей нефтей проводились на ротационном вискозиметре при смешении в следующих пропорциях: 0 %, 10 %, 25 %, 50 %, 75 %, 90 %, 100 %. Смешивалась маловязкая неньютоновская нефть (0 %) с высоковязкой ньютоновской (100 %). В диапазоне смешения от 0 % до 50 % проявлялись неньютоновские свойства.

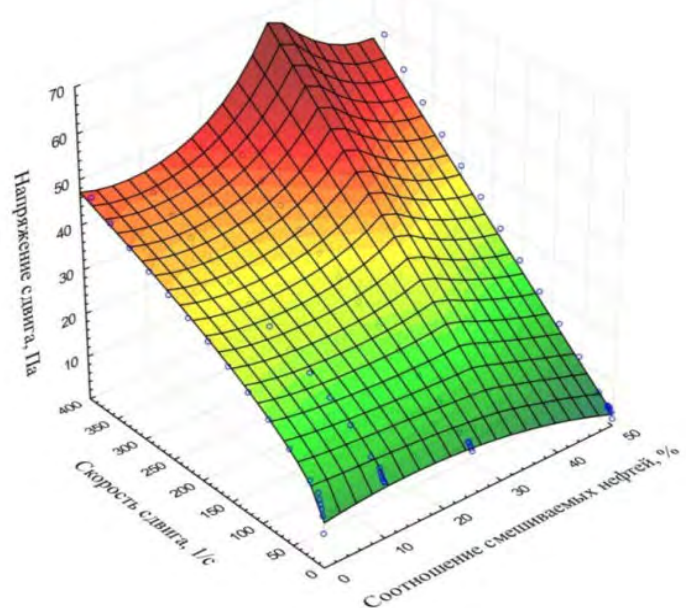
На рисунке 4, а представлена модель асимптотического течения с наложенными результатами лабораторных исследований в локальной области проявления неньютоновских свойств. По опытным данным видно проявление эффекта «минимума вязкости» в диапазоне смешения от 5 % до 35 %, где наблюдается снижение напряжения сдвига.

Из рисунка 4, б, на котором представлена модель Балкли-Гершеля, видно увеличение напряжений сдвига в диапазоне смешения от 30 % до 50 %, что в реальности не имеет места, так как опытные точки оказались внизу поверхности.

Результаты расчета функционала среднего риска также подтвердили эффективность использования асимптотической модели.



а)



б)

Рисунок 4 – Отображение моделей изменения реологической кривой течения неньютоновской зоны при использовании асимптотической кривой течения (а) и уравнения Балкли-Гершеля (б)

Основной причиной большого отклонения значения функционала среднего риска степенного уравнения Балкли-Гершеля от асимптотической модели является «скрытая» зависимость изменения коэффициента консистенции от изменения коэффициента индекса вязкости. Для нахождения связи между коэффициентами консистенции и индекса вязкости необходимо введение дополнительных зависимостей, усложняющих полную модель и значительно повышающих функционал среднего риска. Использование предложенного асимптотического уравнения течения позволило избежать ошибок в области неньютоновского течения.

Таким образом, в третьей главе на основе проведенных лабораторных опытов раскрыты методы повышения точности математического описания изменения реологической кривой течения неньютоновских нефтей при их смешении и при изменении температуры.

В четвертой главе представлены основные научно-теоретические подходы к решению реологической транспортной задачи, заключающейся в поиске соотношений смешения в узловых точках нефтепроводной системы

многокомпонентных смесей нефтей, направляемых на различные направления перекачки, для минимизации суммарных энергозатрат. Решение опирается на симплексную модель расчета вязкости многокомпонентной смеси нефтей, определению параметров которой посвящена вторая глава диссертации. Поскольку в систему магистральных нефтепроводов поступают нефти в разных количествах и с разными параметрами качества, до перехода к выполнению предварительных лабораторных исследований по определению модели расчета вязкости многокомпонентной смеси предлагается найти локальную область допустимого смешения и определить модель только в заданной области. Это существенно сократит количество лабораторных испытаний и повысит точность дальнейших расчетов. В качестве целевой функции предложено использовать суммарную энергию на перекачку, определение которой осуществляется с помощью построения расчетной схемы дерева смешения. Решение в виде затраченной энергии на перекачку предоставляется для каждой точки допустимого смешения в той же локальной области симплексного пространства. Выявив зависимость целевой функции от соотношений смешения многокомпонентных смесей нефтей в узловых точках нефтепроводной системы, можно найти минимальное значение одним из методов поиска области оптимума: симплексным методом, методом Гаусса-Зайделя, градиентными методами, методом крутого восхождения (Бокса-Уилсона), методом случайного поиска и т.д.

Далее приводится апробация решения задачи нахождения оптимального энергоэффективного перераспределения грузопотоков специально формируемых смесей для наиболее простой одноузловой конфигурации трубопроводной сети (рисунок 5). На станцию № 1 поступают 3 различных вида нефтей с соотношением $P \{0,5; 0,2; 0,3\}$ (рисунок 6). Модель смесеобразования определена по результатам лабораторных испытаний, представленных в главе 2 (рисунок 2). Полученная смесь распределяется в том же соотношении на 2 технологических участка в различных направлениях. Первый технологический участок, диаметром 1020 мм и длиной 200 км, состоит из двух станций. Второй технологический участок, диаметром 1220 мм и длиной 100 км, из одной станции.

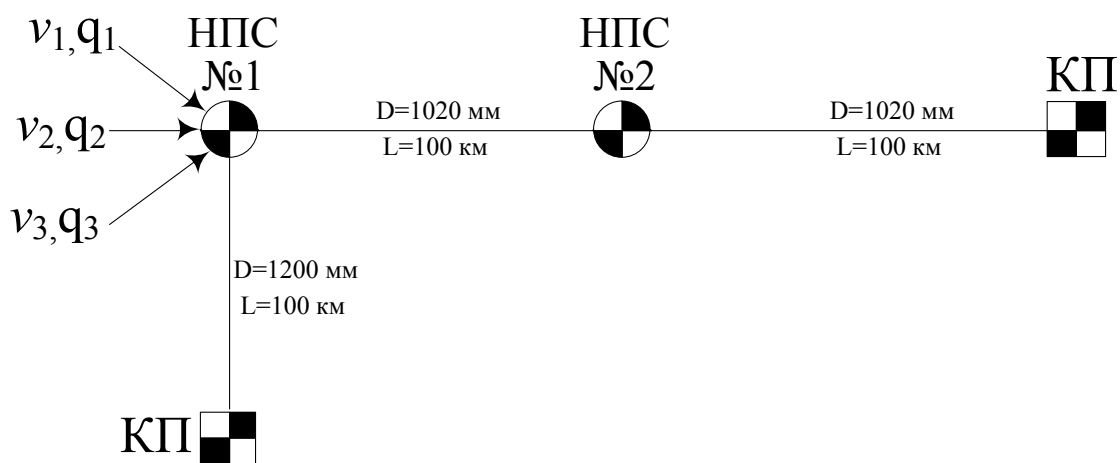


Рисунок 5 – Фрагмент схемы маршрута движения нефти по системе магистральных нефтепроводов

В результате расчетов получилось, что исходную смесь P лучше делить на смесь P_1 (любая точка на отрезке AA'), имеющую вязкость 9,715 сСт и идущую в первый технологический участок, и смесь P_2 (точка пересечения отрезка BB' и прямой P_1P), имеющую вязкость 17,143 сСт и идущую во второй технологический участок (рисунок 6). Сэкономленная энергия для рассмотренной конфигурации трубопроводной сети составила $3,394 \cdot 10^{11}$ Дж или 94,28 МВт·ч в год. Полученные расчеты показали, что в случае нерационального управления смешением возможна потеря энергии до $250 \cdot 10^{11}$ Дж или 6944,28 МВт·ч в год.

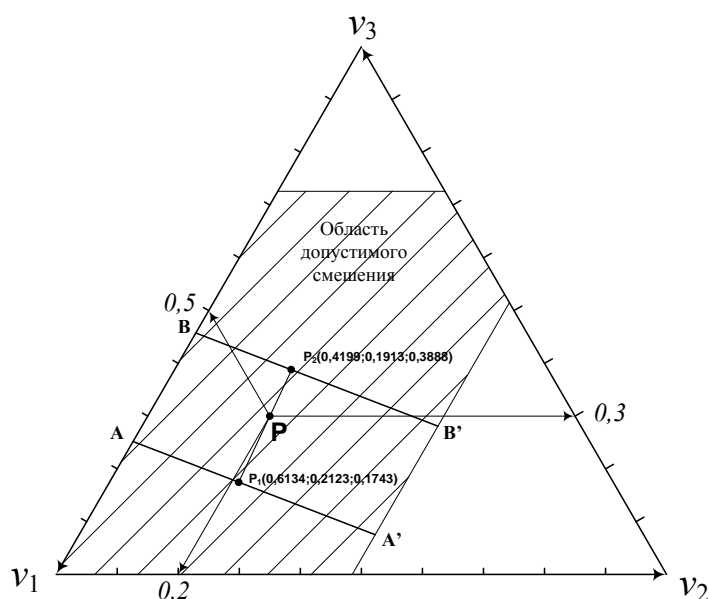


Рисунок 6 – Расположение на симплексном пространстве точек концентраций смешения нефтей, направляемых на различные направления движения нефтей по сети магистральных нефтепроводов

Таким образом, в четвертой главе были продемонстрированы основы методики расчета оптимальных концентраций смешения нефтей в узловых точках нефтепроводной системы для экономии суммарной энергии на перекачку разнородных нефтей за счет оптимизации грузопотоков специально формируемых смесей с различными реологическими свойствами.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты проведенных в диссертационной работе экспериментальных и теоретических исследований позволяют сделать следующие основные выводы:

1 Выявлены новые способы повышения энергоэффективности перекачки нефтей с различными вязкостно-температурными характеристиками за счет формирования реологически эффективных смесей в узловых точках разветвленной системы магистральных нефтепроводов и их оптимального распределения по различным технологическим участкам и направлениям перекачки.

2 Предложены методы прогнозирования вязкостно-температурных параметров смесей нефтей, образующихся при перераспределении грузопотоков разнотипных нефтей и их смесей по разветвленной нефтепроводной системе. Выявлена необходимость проведения предварительных лабораторных испытаний для определения модели смешения. Предложенная модель определения вязкости многокомпонентной смеси подготовленных к транспорту нефтей, отличающаяся от полиномов Шеффе наличием линейных поверхностей уровня, позволяет сократить количество необходимых предварительных лабораторных измерений вязкости смесей. На примере трехкомпонентной смеси показано, что удалось в 3 раза уменьшить количество дополнительных измерений вязкости смесей, чем при использовании адекватно подобранного полинома Шеффе.

3 Для задач прогнозирования вязкостно-температурных свойств неньютоновских нефтей и их смесей предложено использовать уравнение реологической кривой течения, отличающееся от степенных моделей наличием наклонной асимптоты. Предложенная модель позволяет полностью автоматизировать расчеты эффективной вязкости нефтей и их различных смесей в

широком диапазоне изменения скоростей сдвиги от 0 до 1000 1/с. Параметры уравнения при изменении температуры достаточно точно аппроксимируются уравнением Рейнольдса-Филонова. Повышение сложности модели в отличие от уравнения Балкли-Гершреля математически обосновано с помощью критерия функционала среднего риска. Установлено, что при прогнозировании изменения реологической кривой течения при смешении неньютновских нефтей функционал среднего риска асимптотической модели по сравнению с уравнением Балкли-Гершеля ниже в 4,4 раза, а при снижении температуры – в 12 раз.

4 Предложен метод определения целевой функции для нахождения оптимальных концентраций смешения специально формируемых смесей в узловых точках нефтепроводной системы для их дальнейшей транспортировки по различным направлениям сети. Результаты апробации методики снижения суммарных энергозатрат на перекачку разнотипных нефтей даже по простой одноузловой системе показали возможность снижения энергопотребления насосов за счет перераспределения потоков специально формируемых смесей до 94,28 МВт·ч в год. В случае нерационального управления смешением возможна потеря энергии до 6944,28 МВт·ч в год.

По теме диссертационного исследования опубликовано 12 научных работ:

– *статьи в изданиях, индексируемых в Scopus:*

1. Tashbulatov, R. Modeling Rheological Properties in Blending of Anomalously Viscous Oils / R. Tashbulatov, R. Karimov, A. Valeev, A. Kolchin, B. Mastobaev // Journal of Engineering and Applied Sciences. – 2018. – Vol. 13, Issue 5. – P. 4728–4732. DOI: 10.3923/jeasci.2018.4728.4732.

2. Tashbulatov, R. The Asymptotic Rheological Model of Anomalously Viscous Oil / R. Tashbulatov, R. Karimov, A. Valeev, A. Kolchin and B. Mastobaev // Journal of Engineering and Applied Sciences. – 2018. – Vol. 13, Issue 7. – P. 5502–5506. DOI: 10.3923/jeasci.2018.5502.5506.

– *статьи в изданиях, индексируемые в Web of Science:*

3. Ташбулатов, Р. Р. Узловая реологическая задача смешения нефтей для оптимального распределения грузопотоков в разветвленной сети нефтепроводов /

Р. Р. Ташбулатов, Р. М. Каримов, А. Р. Валеев, Б. Н. Мастобаев // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2018. – Т. 8. – № 5. – С. 532–539. DOI: 10.28999/2541-9595-2018-8-5-532-539.

– *статьи в ведущих рецензируемых научных журналах, рекомендованных ВАК Министерства науки и высшего образования:*

4. Каримов, Р. М. Повышение энергоэффективности перекачки за счет перераспределения грузопотоков и оптимального смещения реологически сложных нефтей / Р. М. Каримов, Р. Р. Ташбулатов, Б. Н. Мастобаев // Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья. – 2017. – № 3. – С. 13–18.

5. Ташбулатов, Р. Р. Асимптотическая модель для описания реологической кривой неньютоновского течения нефтяных смесей / Р. Р. Ташбулатов, Р. М. Каримов, Б. Н. Мастобаев, А. Р. Валеев // Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья. – 2017. – № 5. – С. 14–23.

6. Ташбулатов, Р. Р. Аппроксимация реологической кривой в низкотемпературных зонах аномального течения неньютоновских нефтей с использованием асимптотической модели / Р. Р. Ташбулатов, Р. М. Каримов, Б. Н. Мастобаев, А. Р. Валеев // Трубопроводный транспорт: теория и практика. – 2017. – № 4 (62). – С. 19-22.

7. Ташбулатов, Р. Р. Анализ изменения вязкостно-температурной зависимости бинарной нефтяной смеси / Р. Р. Ташбулатов, Р. М. Каримов, Б. Н. Мастобаев, А. Р. Валеев // Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья. – 2018. – № 2. – С. 5-9.

– *тезисы конференций:*

8. Ташбулатов, Р. Р. Сравнительный анализ точности применяемых моделей вязкостно-температурных зависимостей при решении задач трубопроводного транспорта / Р. Р. Ташбулатов, Р. М. Каримов // Трубопроводный транспорт – 2017 : тез. докл. XII Междунар. учеб.-науч.-практ. конф. – Уфа : Изд-во УГНТУ, 2017. – С. 189–191.

9. Ташбулатов, Р. Р. Прогнозирование реологических свойств смесей при совместном трубопроводном транспорте нефтей / Р. Р. Ташбулатов, Р. М. Каримов // Трубопроводный транспорт углеводородов : матер. Всеросс. науч.-практ. конф. с

междунар. участием / Минобрнауки России, ОмГТУ. – Омск : Изд-во ОмГТУ, 2017. – С. 88–91.

10. Ташбулатов, Р. Р. К вопросу моделирования течения аномально вязких и застывающих нефтей / Р. Р. Ташбулатов, Р. М. Каримов, Л. Х. Сафиуллина // Современные проблемы истории естествознания в области химии, химической технологии и нефтяного дела : матер. XV Междунар. науч. конф., посвященной 100-летию Республики Башкортостан. – Уфа, 2017. – С. 138–140.

11. Ташбулатов, Р. Р. Моделирование реологических свойств смесей нефтей при их многокомпонентном смешении на основе применения симплексных координат / Р. Р. Ташбулатов, Р. М. Каримов // Трубопроводный транспорт – 2018: тез. докл. XIII Междунар. учеб.-науч.-практ. конф. – Уфа: Изд-во УГНТУ, 2018. – С. 123-124.

12. Ташбулатов Р.Р. Анализ и поиск функциональной зависимости расхода в магистральном нефтепроводе от изменения вязкости нефти для ее применения в симплексных координатах / Р.Р. Ташбулатов, Р.М. Каримов // Трубопроводный транспорт – 2018: тез. докл. XIII Междунар. учеб.-науч.-практ. конф. – Уфа: Изд-во УГНТУ, 2018. – С. 124-125.