

На правах рукописи

Голунцов Андрей Сергеевич



**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТРУБОПРОВОДНОГО
ТРАНСПОРТА ВЫСОКОВЯЗКОЙ СМОЛИСТОЙ НЕФТИ
В СМЕСИ С РАЗБАВИТЕЛЕМ
В УСЛОВИЯХ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУР**

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

**Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Санкт-Петербург – 2026

Диссертация выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II».

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор

Николаев Александр Константинович

Официальные оппоненты:

Ковалева Лиана Ароновна

доктор технических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский университет науки и технологий», кафедра прикладной физики, заведующая кафедрой;

Якупов Азамат Ульфатович

кандидат технических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тюменский индустриальный университет», кафедра транспорта углеводородных ресурсов, доцент.

Ведущая организация – федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Самарский государственный технический университет», г. Самара.

Защита диссертации состоится **23 сентября 2026 г. в 11:00** на заседании диссертационного совета ГУ.11 Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II по адресу: 199106, г. Санкт-Петербург, 21-я В.О. линия, д.2, **аудитория № 1163**.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II и на сайте www.spmi.ru.

Автореферат разослан 23 июля 2026 г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ
диссертационного совета



НОСОВ
Виктор Владимирович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследовани

В мировой структуре запасов углеводородов возрастает доля высоковязкой нефти, мировые ресурсы которой, по оценкам, составляют порядка 5,5 трлн баррелей (около 790 млрд т), при этом значительная их часть расположена в северных регионах с суровыми климатическими условиями. Транспорт высоковязкой нефти возможен только при проведении мероприятий для снижения вязкости нефти и приведении их свойств к ньютоновским или близким к ним.

При транспортировке высоковязкой смолистой нефти в смеси с разбавителем в условиях низких температур существенно изменяются её реологические характеристики и режим течения, что приводит к значительным отклонениям фактических гидравлических сопротивлений от расчётных значений, увеличению энергозатрат на перекачку и снижению пропускной способности трубопроводов. Применяемые в инженерной практике методы гидравлического расчёта в недостаточной степени учитывают влияние температуры, состава смеси и неньютоновского поведения потока.

Поэтому актуальной задачей является разработка методов определения реологических свойств смеси высоковязкой смолистой нефти и разбавителя.

Степень разработанности темы исследования

Задачам трубопроводного транспорта высоковязкой нефти посвящены работы отечественных и зарубежных ученых, среди которых следует отметить труды В.Е. Губина, А.А. Коршака, М.В. Лурье, И.Е. Идельчика, А.Д. Альтшуля, В.А. Черникина, Б.А. Тонкошкурова, Н.М. Андреевко, а также исследования зарубежных авторов A.B. Metzner, J.C. Reed, D.W. Dodge, C.F. Colebrook, S. Churchill, B.M. Torrance и A.V. Shenoy, в которых рассмотрены закономерности течения

ньютоновских и неньютоновских жидкостей и предложены методы расчета гидравлических сопротивлений в трубопроводах.

Вопросы реологии смесей нефти, а также моделирования вязкости многокомпонентных углеводородных систем рассмотрены в работах Р.Р. Ташбулатова, Г.И. Келбалиева, Д.Б. Тагиева, С.Р. Расулова, А.Я. Малкина, М.М. Денп, J. Guo и других авторов, где показано, что реологические свойства нефти существенно зависят от температуры, скорости сдвига и компонентного состава смеси

Однако в выполненных исследованиях недостаточно полно отражены вопросы совместного влияния температуры и концентрации разбавителя на реологические параметры высоковязких нефтей и их смесей, а также влияния на гидравлические характеристики трубопроводного транспорта в условиях пониженных температур.

Объект исследования – процесс трубопроводного транспорта высоковязкой смолистой нефти в смеси с разбавителем в условиях низких температур.

Предмет исследования – реологические свойства смеси высоковязкой смолистой нефти и разбавителя.

Цель работы – повышение эффективности трубопроводного транспорта высоковязкой смолистой нефти в смеси с разбавителем в условиях низких температур.

Идея работы. Поставленная цель достигается за счёт выбора рациональных температурно-концентрационных режимов трубопроводного транспорта высоковязкой смолистой нефти в смеси с разбавителем на основе модифицированной степенной реологической модели, учитывающей влияние температуры и состава смеси на коэффициент консистенции и индекс течения.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Выполнить анализ литературных источников, патентных материалов и опыта транспорта высоковязкой нефти.

2. Разработать физико-математическую модель определения реологических свойств бинарной смеси высоковязкой и маловязкой нефти на основе степенной реологической модели.

3. Установить зависимость для расчета коэффициента гидравлического сопротивления при движении высоковязкой нефти в смеси с разбавителем с учетом изменения температуры и состава смеси.

4. Исследовать реологические свойства высоковязкой смолистой нефти и разбавителя в различных концентрациях и температурах.

5. Провести экспериментальные исследования коэффициента гидравлических сопротивлений при транспорте смеси высоковязкой нефти и разбавителя.

6. Разработать рекомендации для проектирования нефтепроводов, транспортирующих высоковязкую нефть в смеси с разбавителем.

Научная новизна работы:

1. Выявлены закономерности изменения коэффициента консистенции и индекса течения смеси высоковязкой смолистой и маловязкой нефти в зависимости от температуры и концентрации разбавителя в условиях пониженных температур.

2. Установлено, что учет температурно-концентрационных зависимостей коэффициента консистенции и показателя течения в обобщенном критерии Рейнольдса позволяет определять рациональные режимы трубопроводного транспорта высоковязкой смолистой нефти в смеси с разбавителем.

Соответствие паспорту специальности

Полученные научные результаты соответствуют паспорту специальности 2.8.5. Строительство и эксплуатация нефтегазопроводов, баз и хранилищ по пункту 1. «Технологические процессы и технические средства для проектирования,

сооружения, эксплуатации, теоретические и практические основы взаимодействия объектов трубопроводного транспорта с окружающей средой с целью создания высокоэффективных, энерго- и ресурсосберегающих, надежных, механически и экологически безопасных сухопутных и морских систем трубопроводного транспорта для добычи, сбора, подготовки, транспортировки и хранения углеводородов, распределения, газоснабжения и нефтепродуктообеспечения, а также других газовых, жидкостных и многофазных сред, гидро и пневмоконтейнерного транспорта».

Теоретическая и практическая значимость работы:

1. Получена зависимость параметров степенной реологической модели - индекса течения и коэффициента консистенции для смеси высоковязкой нефти с разбавителем с учетом влияния температуры и концентрации ее компонентов.

2. Установлена зависимость коэффициента гидравлического сопротивления при транспорте высоковязкой нефти в смеси с маловязким разбавителем, которая учитывает изменение индекса течения и коэффициента консистенции.

3. Представлены рекомендации по учету реологических характеристик неньютоновской нефти при гидравлическом расчете трубопроводов, эксплуатируемых в условиях пониженных температур.

4. Разработана программа для ЭВМ по расчету оптимальной концентрации разбавителя, при которой будет обеспечена максимальная производительность трубопровода (свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2024665987 «Программа для расчёта основных параметров гидравлического расчета неньютоновских жидкостей»).

5. Результаты кандидатской диссертации рекомендованы к внедрению в производственной деятельности компании ООО «СТ ЦР» для повышения точности расчетов динамиче-

ской вязкости смеси нефти и снижения трудозатрат на исследование реологических свойств нефти в процессе компаундирования 05.05.2026 г.

Методология и методы исследования. Исследование выполнено на основе системного подхода. При решении поставленных задач использовался комплексный метод исследований, содержащий: анализ и обобщение теоретических и экспериментальных трудов по эксплуатации трубопроводов, транспортирующих высоковязкую смолистую нефть в смеси с разбавителем; теоретический анализ, методы математической статистики, математическое моделирование, статистические методы планирования и обработки экспериментальных данных, исследования в лабораторных условиях.

Положения, выносимые на защиту:

1. Модифицированная модель Оствальда-де Ваале, основанная на зависимостях индекса течения и коэффициента консистенции от температуры и концентрации позволяет определять свойства смеси высоковязкой нефти и разбавителя.

2. Обобщенный критерий Рейнольдса, который учитывает зависимость индекса течения и коэффициента консистенции от температуры и концентрации компонентов смеси высоковязкой нефти и разбавителя, позволяет определять рациональный режим транспорта высоковязкой смолистой нефти в смеси с разбавителем.

Степень достоверности результатов исследования обоснована и подтверждается адекватностью модифицированной реологической модели Оствальда-де Ваале, установленной по критериям Фишера и Пирсона при доверительной вероятности 0,95. Достоверность разработанной зависимости для коэффициента гидравлического сопротивления обоснована высоким коэффициентом детерминации ($R^2 = 0,961$) и средней относительной погрешностью 7,9 % (максимальная – 9,5 %) при сопоставлении с экспериментальными данными.

Апробация результатов диссертации проведена на 5 научно-практических мероприятиях с докладами, в том числе на 4 международных. За последние 3 года принято участие в 5 научно-практических мероприятиях с докладами, в том числе на 4 международных: Международная конференция «Рассохинские чтения» (1-2 февраля 2024 года, г. Ухта); VII Международный молодежный научно-практический форум «Нефтяная столица» (3-4 апреля 2024 года, г. Ханты-Мансийск); XII Молодежная международная научно-практическая конференция «Новые технологии в газовой отрасли: опыт и преемственность» (15-19 апреля 2024 года, г. Москва); IV Всероссийская конференция «Прорывные технологии транспорта и хранения углеводородов» (02-04 апреля 2025 года, г. Санкт-Петербург); IX ежегодная международная научно-практическая конференция «Булатовские чтения» (31 марта 2025 года, г. Краснодар).

Личный вклад автора заключается в постановке цели и задач исследования, теоретическом обосновании зависимости индекса течения и коэффициента консистенции от температуры и концентрации компонентов смеси высоковязкой смолистой и маловязкой нефти, выполнении экспериментальных исследований реологических свойств высоковязкой смолистой нефти и ее смеси с маловязким разбавителем, обработке и анализе полученных данных, разработке зависимостей для определения реологических параметров смеси, а также в сопоставлении теоретических и экспериментальных исследований с применением методов математической статистики.

Публикации. Результаты диссертационного исследования в достаточной степени освещены в 5 печатных работах, в том числе в 2 статьях - в изданиях из перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора

наук (далее – Перечень ВАК), в 3 статьях - в изданиях, входящих в международные базы данных и системы цитирования Scopus. Получено 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Структура работы. Диссертация состоит из оглавления, введения, 4 глав с выводами по каждой из них, заключения, списка литературы, включающего 112 наименований, и 3 приложений. Диссертация изложена на 131 странице машинописного текста, содержит 38 рисунков и 24 таблицы.

Благодарности. Автор выражает глубокую благодарность и искреннюю признательность научному руководителю Николаеву А.К. и сотрудникам кафедры транспорта и хранения нефти и газа Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II за консультации при работе над диссертацией.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы работы, сформулированы цель, задачи работы и научная новизна, раскрыты теоретическая и практическая значимости исследования и изложены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе проведен анализ литературных источников, патентных материалов и опыта транспорта высоковязкой нефти в условиях пониженных температур. Рассмотрены реологические свойства высоковязких нефтей и их смесей с разбавителями, а также существующие подходы к описанию их течения. Выполнен анализ методов расчета гидравлических характеристик потока неньютоновских жидкостей в трубопроводах. На основании проведенного анализа сформулированы цель и задачи исследования.

Во второй главе представлены результаты теоретических исследований реологических свойств высоковязкой нефти и ее смесей с разбавителем.

Рассмотрены существующие реологические модели неньютоновских жидкостей и обоснован выбор степенной модели для описания течения исследуемых систем. Установлены зависимости реологических параметров смеси от температуры и концентрации разбавителя.

Получены аналитические зависимости, позволяющие учитывать изменение реологических свойств при определении гидравлических характеристик потока в трубопроводах.

В третьей главе представлены результаты экспериментальных исследований реологических свойств высоковязкой нефти и ее смесей с разбавителем.

Описана методика проведения экспериментов и условия их выполнения. Выполнена обработка экспериментальных данных и определены значения реологических параметров смеси. Проведен анализ влияния температуры и концентрации разбавителя на изменение реологических характеристик.

Полученные результаты использованы для обоснования зависимостей, применяемых при расчете гидравлических характеристик трубопроводного транспорта.

В четвертой главе разработаны рекомендации по проектированию трубопроводов, транспортирующих высоковязкую смолистую нефть в смеси с разбавителем в условиях низких температур.

На основе разработанной модификации степенной модели построены карты удельных энергозатрат на транспортировку одной тонны нефтяной смеси в координатах «температура – концентрация», позволяющие определять рациональные режимы транспортировки исследуемой системы. Для исследуемой нефтяной смеси установлено, что повышение температуры от 5 до 50 °С при рациональном содержании разбавителя приводит к снижению удельных энергозатрат на транспортировку одной тонны нефти в 11,4 раза.

В заключении отражены основные результаты работы, подтверждающие достижение поставленной цели.

Основные результаты отражены в следующих защищаемых положениях:

1. Модифицированная модель Оствальда-де Ваале, основанная на зависимостях индекса течения и коэффициента консистенции от температуры и концентрации позволяет определять свойства смеси высоковязкой нефти и разбавителя.

Одной из наиболее распространенных реологических моделей является степенная модель Оствальда-Де Ваале (1):

$$\tau = K \dot{\gamma}^n, \quad (1)$$

где K – коэффициент консистенции, $\text{Па} \cdot \text{с}^n$, n – индекс течения.

При смешении высоковязкой нефти с маловязкой происходит изменение структурного состояния системы, связанное с дестабилизацией асфальтено-смолистых агрегатов и снижением числа межагрегатных взаимодействий. В результате уменьшается связность пространственной структуры, что приводит к снижению коэффициента консистенции и увеличению индекса течения.

Указанные процессы носят нелинейный характер, поскольку изменение реологических параметров определяется не только объемным содержанием компонентов, но и их эффективным структурным вкладом, зависящим от межкомпонентных взаимодействий в системе.

При повышении температуры молекулярные взаимодействия ослабевают, следовательно, вязкость и коэффициент консистенции уменьшаются. Эмпирически установлено, что коэффициент консистенции экспоненциально уменьшается с ростом температуры (2):

$$K_i(T) = K_0 \cdot e^{AT}. \quad (2)$$

При смешении компонентов изменение этих взаимодействий носит неаддитивный характер, что учитывается зависимостью (3):

$$K(T, C) = (K_1(T) \cdot (1 - C))^{\beta_{K1}} + (K_2(T) \cdot C)^{\beta_{K2}}, \quad (3)$$

где C - концентрация разбавителя, доли, K_1 и K_2 - коэффициенты консистенции компонентов, $\text{Па} \cdot \text{с}^n$, β_{K1} и β_{K2} - коэффициенты межкомпонентного взаимодействия.

Изменение индекса течения при нагреве обусловлено снижением структурированности нефти и переходом к ньютоновскому поведению, что позволяет описать его экспоненциальной зависимостью от температуры (4):

$$n_i(T) = 1 + (n_{i,0} - 1) \cdot e^{-k_i(T_2 - T_1)}, \quad (4)$$

где $n_{i,0}$ - значение n_i при температуре T_1 , k_i - коэффициент скорости перехода индекса течения n к единице, T_1 - температура, при которой определяются начальные значения $n_{i,0}$, °C, T_2 - температура исследуемой жидкости, °C.

Влияние концентрации разбавителя проявляется в изменении степени нелинейности течения, что учитывается введением коэффициентов ξ_1 и ξ_2 (5):

$$n(T, C) = n_1(T) \cdot (1 - C)^{\xi_1} + n_2(T) \cdot C^{\xi_2}, \quad (5)$$

где ξ_1 и ξ_2 - эмпирические коэффициенты, определяющие степень нелинейности изменения индекса течения от концентрации компонентов смеси.

Подстановка полученных зависимостей в степенную модель приводит к обобщённому уравнению (6):

$$\tau(T, C) = \left(\begin{aligned} &((K_{0,1} \cdot e^{A_1 T}) \cdot (1 - C))^{\beta_{K1}} \\ &+ ((K_{0,2} \cdot e^{A_2 T}) \cdot C)^{\beta_{K2}} + \alpha C \times (1 - C) \end{aligned} \right). \quad (6)$$

$$\cdot \dot{\gamma}^{(1+(n_{1,0}-1) \cdot e^{-k_1 \cdot \Delta T}) \cdot (1-C)^{\xi_1} + (1+(n_{2,0}-1) \cdot e^{-k_2 \cdot \Delta T}) \cdot C^{\xi_2} + \beta C \cdot (1-C))}.$$

которое учитывает совместное влияние температуры и состава смеси на реологические свойства. График этой зависимости представлен на рисунке 1.

Аналогично для динамической вязкости (7):

$$\eta(T, C) = \left(\left((K_{0,1} \cdot e^{A_1 T}) \cdot (1 - C) \right)^{\beta_{K1}} + \left((K_{0,2} \cdot e^{A_2 T}) \cdot C \right)^{\beta_{K2}} + \alpha C \cdot (1 - C) \right) \cdot \dot{\gamma}^{(1+(n_{1,0}-1) \cdot e^{-k_1 \cdot \Delta T}) \cdot (1-C)^{\xi_1} + (1+(n_{2,0}-1) \cdot e^{-k_2 \cdot \Delta T}) \cdot C^{\xi_2} + \beta C \cdot (1-C) - 1}. \quad (7)$$

В ходе работы было проведено сопоставление разработанной модели с классическими аддитивными моделями Аррениуса и Кендаля–Монрое (рисунок 2). Предложенная модель описывает экспериментальные данные с существенно меньшей погрешностью, особенно в области низких температур и при повышенной концентрации высоковязкой нефти.

Экспериментальные исследования реологических свойств нефти Северо-Комсомольского и Ванкорского месторождений, а также их смесей в объемном соотношении 1/9, 2/8, 3/7, 4/6, 5/5, 6/4, 7/3, 8/2 и 9/1 проводились на ротационном вискозиметре Rheotest RN 4.1. Выбор именно этих нефтей обусловлен условиями реального трубопроводного транспорта: нефть Северо-Комсомольского месторождения характеризуется высокой вязкостью и более выраженным неньютоновским поведением, тогда как нефть Ванкорского месторождения является легкой и может быть использована в качестве разбавителя для улучшения реологических свойств смеси при ее транспорте. Существующая система магистральных нефтепроводов подразумевает смешение этой нефти.

Эксперимент спланирован как полный многоуровневый двухфакторный, в котором варьировались температура и состав смеси. Измерения проводились в диапазоне скоростей сдвига от

1 до 300 с⁻¹ и температур от 5 до 60 °С. Такая область изменения параметров выбрана с учетом условий трубопроводного транспорта.

Перед обработкой экспериментальных данных были определены коэффициенты консистенции и индексы течения для каждого сочетания температуры и состава смеси. Для сопоставления дисперсии отклонения модели с дисперсией экспериментальных данных использовался критерий Фишера (8):

$$F = \frac{S_1^2}{S_2^2}, \quad (8)$$

где S_1^2 и S_2^2 – оценки дисперсий, соответственно, расчетной и экспериментальной выборок.

Результаты определения несмещенных дисперсий модели и экспериментальных данных для напряжения сдвига и динамической вязкости, а также расчет F-критерия Фишера представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Результаты расчета F-критерия Фишера

	S_1^2	S_2^2	F	$F_{\text{табл}}$
Напряжение сдвига	1,31	17319,47	$7,56 \cdot 10^{-5}$	1,286
Динамическая вязкость	0,001	2,07	$54,89 \cdot 10^{-5}$	

$F_\eta \ll F_{\text{табл}}$ и $F_\tau \ll F_{\text{табл}}$ при уровне значимости $\alpha = 0,05$. Таким образом, можно сделать вывод, что дисперсия отклонений между расчётными и экспериментальными значениями не превышает дисперсию экспериментальных данных и обусловлена преимущественно случайными погрешностями измерений.

Дополнительно применялся критерий согласия Пирсона, значения которого не превышали критических, что свидетельствует о корректности экспериментальной выборки.

Полученные результаты подтверждают адекватность предложенной модели и корректность обобщённых зависимо-

стей параметров степенной модели Оствальда–де Ваале от температуры и концентрации разбавителя, что доказывает сформулированное научное положение.

2. Обобщенный критерий Рейнольдса, который учитывает зависимость индекса течения и коэффициента консистенции от температуры и концентрации компонентов смеси высоковязкой нефти и разбавителя, позволяет определять рациональный режим транспорта высоковязкой смолистой нефти в смеси с разбавителем.

Гидравлическое сопротивление при трубопроводном транспорте определяется потерями давления на трение, которые для потока жидкости в круглой трубе выражаются уравнением Дарси-Вейсбаха (9):

$$\Delta P = \lambda \frac{L}{D} \frac{\rho v^2}{2}, \quad (9)$$

где λ – коэффициент гидравлического сопротивления, ρ – плотность, кг/м^3 , v – средняя скорость потока, м/с , D – диаметр трубопровода, м , ΔP – потери давления, Па .

Для ньютоновских жидкостей коэффициент гидравлического сопротивления определяется числом Рейнольдса, однако для смеси высоковязкой нефти и разбавителя, обладающей не-ньютоновскими свойствами, использование классических зависимостей не обеспечивает корректного описания потерь давления.

Реологическое поведение смеси описывается степенной моделью Оствальда–де Ваале с учетом функциональных зависимостей индекса течения и коэффициента консистенции (10):

$$\tau = K(T, C) \cdot \dot{\gamma}^{n(T, C)}. \quad (10)$$

Выражение (10) включает разработанные в работе зависимости параметров степенной модели от температуры и концентрации разбавителя, что позволяет определять реологические свойства смеси высоковязкой нефти при различных

условиях транспортирования. В отличие от классической модели, данное выражение учитывает их изменение, что обеспечивает более точный расчёт гидравлического сопротивления.

С учётом разработанных зависимостей реологических параметров, представленных в выражении (10), для описания режима течения получено обобщённое число Рейнольдса (11):

$$Re_g = \frac{\rho \cdot v^{2-n(T,C)} \cdot D^{n(T,C)}}{8^{n(T,C)-1} \cdot K(T,C) \cdot \left(\frac{3n(T,C)+1}{4n(T,C)}\right)^{n(T,C)}}, \quad (11)$$

которое учитывает влияние температуры и концентрации компонентов в смеси высоковязкой и маловязкой нефти.

При ламинарном режиме течения формула для коэффициента гидравлического сопротивления будет иметь вид (12):

$$\lambda = \frac{16}{Re_g}. \quad (12)$$

Таким образом, формула (12) обобщает классическую зависимость $\lambda = \frac{64}{Re}$ для ньютоновских жидкостей, вводя обобщённое число Рейнольдса Re_g , учитывающее реологические параметры $K(T, C)$ и $n(T, C)$. Это позволяет рассчитывать гидравлические потери при транспорте вязкой нефти в смеси с разбавителями.

Экспериментальные исследования проводились на пробах нефти магистрального нефтепровода Пурпе-Самотлор. Для количественной оценки соответствия экспериментальных данных расчетной зависимости была выполнена оценка абсолютной $\Delta\lambda$ и относительной δ погрешности, а также среднеквадратичное отклонение $\delta_{ср}$ и коэффициент детерминации R^2 .

Среднее значение абсолютной погрешности составляет 0,024, максимальное – 0,065; среднее значение относительной погрешности составляет 7,97%, максимальное – 9,48%; среднеквадратичное отклонение $\delta_{ср} = 0,034$, коэффициент детерминации $R^2 = 0,961$.

На рисунке 3 представлена зависимость гидравлического сопротивления по формуле 12 и результаты экспериментальных исследований.

Потери давления на трение, вычисляемые через (12) и уравнение Дарси–Вейсбаха, совместно с плотностью перекачиваемой смеси характеризуют удельные энергозатраты на транспорт одной тонны нефти (13):

$$e(T, C) = \frac{\Delta P(T, C)}{\rho_{\text{см}}(T, C)}. \quad (13)$$

Сопоставление значений $e(T, C)$ для различных сочетаний температуры и концентрации дает возможность выделить область параметров, при которых достигаются минимальные затраты энергии на перекачку. Введение разработанных температурно-концентрационных зависимостей коэффициента консистенции и индекса течения позволяет обоснованно определять рациональные параметры подготовки высоковязкой смолистой нефти к трубопроводному транспорту в условиях низких температур.

Результаты расчета удельной энергетической эффективности представлены на рисунке 4 в виде изолиний удельных энергозатрат на транспортировку нефтяной смеси в зависимости от температуры и концентрации высоковязкой нефти. Построенная карта режимов наглядно демонстрирует, что энергозатраты резко снижаются в диапазоне температур 10–20 °С, однако при выборе температуры необходимо учитывать, что для обеспечения требований по плотности смеси 895 кг/м³ содержание высоковязкой нефти (нефти Северо-Комсомольского месторождения) в смеси не должно превышать 30,2 %

Полученные результаты подтверждают возможность использования разработанной модификации степенной модели для оценки энергетических показателей транспортировки высоковязкой смолистой нефти в смеси с разбавителем.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе решена актуальная научно-техническая задача повышения эффективности трубопроводного транспорта высоковязкой смолистой нефти в смеси с разбавителем в условиях низких температур за счет учета реологических свойств транспортируемой среды и разработки методики расчета гидравлических сопротивлений при движении бинарных нефтяных смесей.

По результатам выполненных теоретических и экспериментальных исследований получены следующие основные результаты:

1. Для смеси высоковязкой смолистой нефти маловязкого разбавителя в диапазоне температур 5–60 °С и концентраций высоковязкой нефти 0–100 % экспериментально определены коэффициент консистенции и показатель течения, характеризующие реологические свойства исследуемой системы.

2. Получены температурно-концентрационные зависимости коэффициента консистенции и показателя течения, позволяющие определять реологические параметры смеси без проведения дополнительных экспериментальных исследований в исследованном диапазоне условий.

3. Установлено, что область применения разработанной модели ограничивается диапазонами температур и концентраций, в которых смесь сохраняет псевдопластические свойства. Для чистой высоковязкой нефти область применения модели составляет 5–40 °С, для смесей с содержанием высоковязкой нефти 70–90 % - 5–30 °С, для смеси с содержанием высоковязкой нефти 60 % - 5–20 °С.

4. Экспериментально подтверждена возможность использования предложенной зависимости для определения коэффициента гидравлического сопротивления при транспортировании смеси высоковязкой нефти и разбавителя.

5. Для нефтепровода Пурпе–Самотлор при расходе 1900 т/ч установлено, что выполнение требований ПАО «Транснефть» по плотности товарной нефти ограничивает максимально допустимую объёмную долю нефти Северо-Комсомольского месторождения в смеси значением 30,2 %.

6. Установлено, что при максимально допустимой доле высоковязкой нефти 30,2 % повышение температуры смеси с 5 до 50 °С приводит к снижению удельных энергозатрат на транспортировку в 11,4 раза.

7. Построены карты режимов, позволяющие определять удельные энергозатраты транспортировки в зависимости от температуры и состава смеси, которые можно использовать для выбора параметров подготовки высоковязкой нефти к трубопроводному транспорту.

Дальнейшие перспективы развития темы исследования связаны с расширением области применимости разработанного подхода за счет создания и уточнения физико-математических моделей, описывающих реологическое поведение высоковязких нефтей и их смесей с разбавителями. Полученные в дальнейшем зависимости могут быть положены в основу усовершенствованных инженерных методик гидравлического и теплогидравлического расчета трубопроводов, транспортирующих высоковязкие неньютоновские нефтяные системы, а также использоваться при выборе рациональных режимов перекачки и концентрации разбавителя.

СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях из Перечня ВАК:

1. Николаев, А.К. Сравнительный анализ эффективности методов и технологий обработки тяжелых и высоковязких нефтей для улучшения их транспортных свойств для трубопроводного транспорта / А.К. Николаев, К.И. Плотникова, **А.С. Голунцов**, Е.Д. Журба // Оборудование и технологии для нефтегазового комплекса. - 2023. - № 4. - С. 57-63.

2. Николаев, А.К. Исследование реологических свойств высоковязкой нефти Северо-Комсомольского нефтегазоконденсатного месторождения / А.К. Николаев, **А.С. Голунцов**, М.С. Комаровский, Д.А. Федченко // Оборудование и технологии для нефтегазового комплекса. - 2024. - № 2. - С. 76-79.

Публикации в изданиях, входящих в международные базы данных и системы цитирования Scopus:

3. Nikolaev, A.K. Determination of the coefficient of hydraulic resistance when using anti-turbulence additives / A.K. Nikolaev, **A.S. Goluntsov**, A. Turro Breff // Reliability: Theory & Applications. – 2024. – Vol. 19, Special Issue 6. - P. 107-124. DOI: 10.24412/1932-2321-2024-681-107-124.

4. Nikolaev, A. Evaluation of the Effectiveness of Anti-Turbulence Additives in the Transportation of High-Viscosity Oil at Low Ambient Temperatures / A. Nikolaev, A. Zhukov, **A. Goluntsov**, E. Shirmaher // Processes. – 2025. – Vol. 13, Issue 5. – Art. 1434. – 15 p. DOI: 1434. 10.3390/pr13051434.

5. Nikolaev, A. A physically based rheological model for predicting the flow behavior of non-newtonian crude oil mixtures under cold climate conditions / A. Nikolaev, **A. Goluntsov**, K. Plotnikova // Frontiers in Chemical Engineering – 2026. – Vol. 8. – 17 p. DOI: 10.3389/fceng.2026.1736520.

Патенты/свидетельства на объекты интеллектуальной собственности:

6. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024665987 Российская Федерация. Программа для расчёта основных параметров гидравлического расчёта неньютоновских жидкостей. Заявка № 2024664235: заявл. 20.06.2024; опубл. 09.07.2024 / А.К. Николаев, **А.С. Голунцов**, М.С. Комаровский; заявитель/правообладатель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II» – 13 КБ.

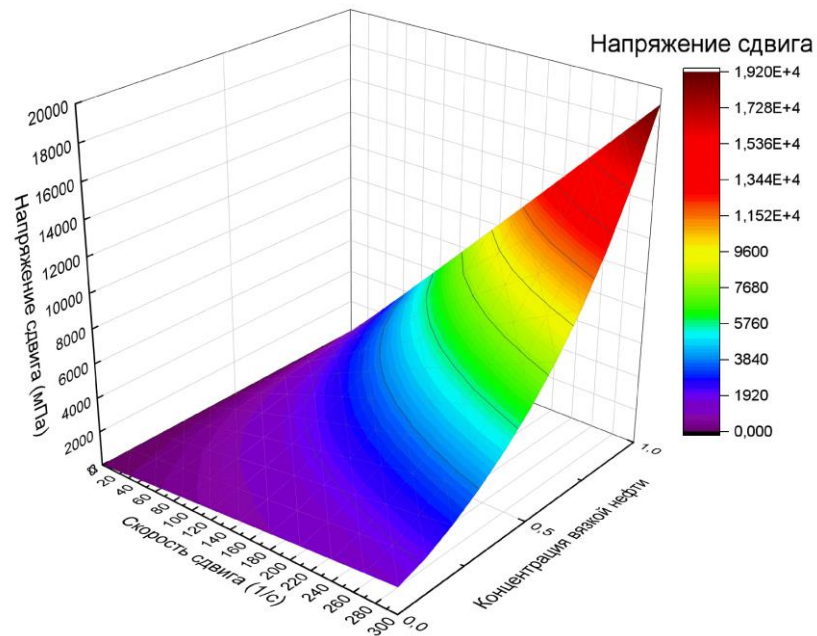


Рисунок 1 – Зависимость напряжения сдвига от температуры и концентрации высоковязкой нефти в смеси по формуле (6)

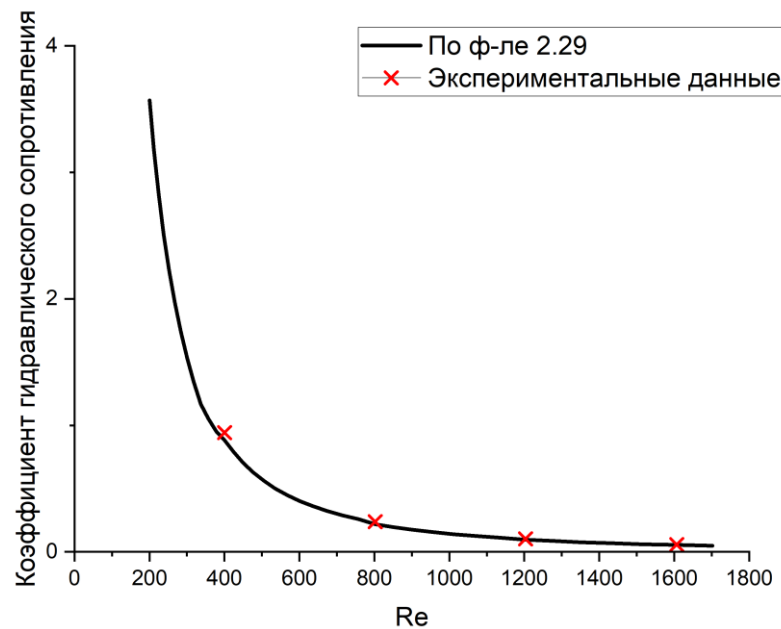


Рисунок 3 – Результаты экспериментального исследования коэффициента гидравлического сопротивления и график функции $\lambda(Re)$ по формуле (12)

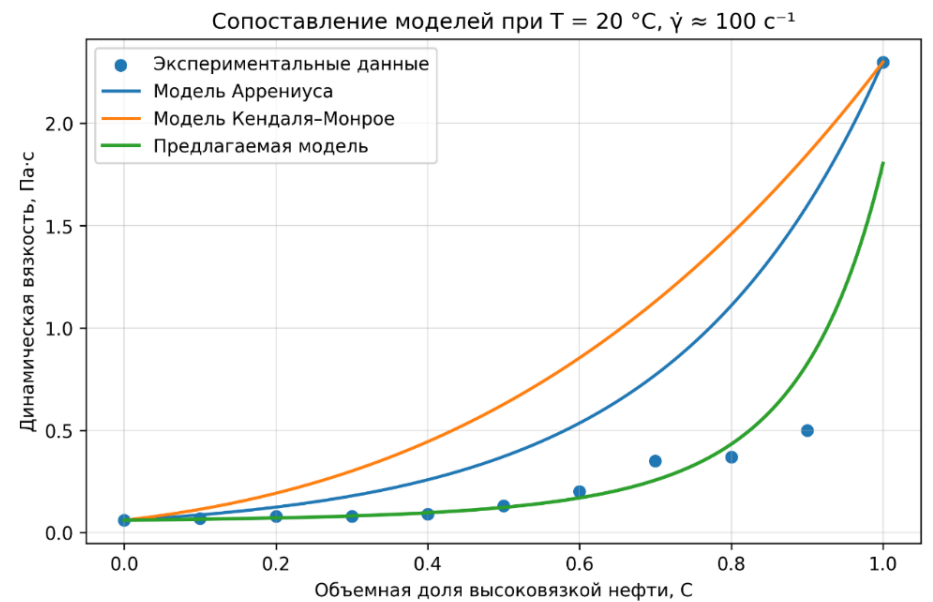


Рисунок 2 – Сопоставление экспериментальных и расчётных значений вязкости смеси нефтей Северо-Комсомольского и Ванкорского месторождений при температуре 20 °С

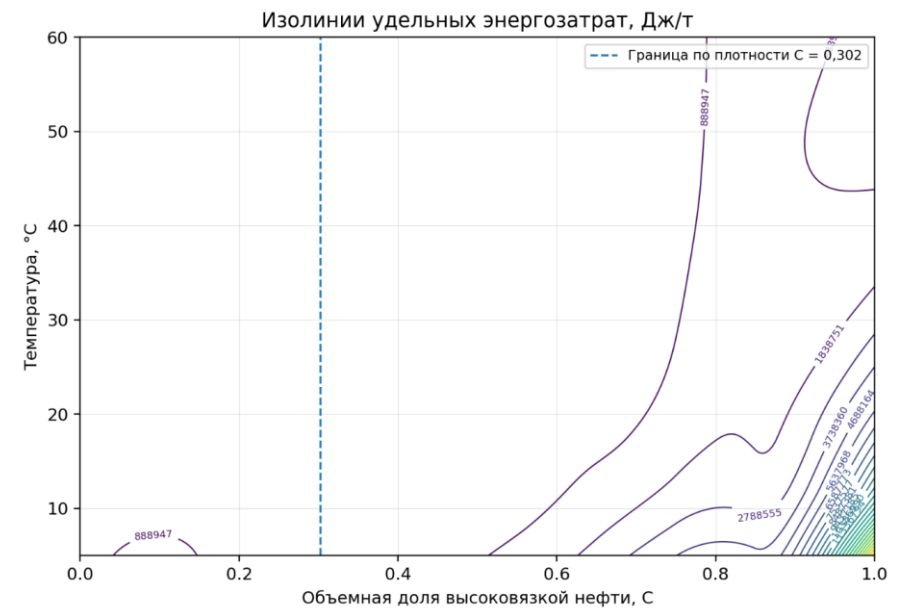


Рисунок 4 – Изолинии удельных энергозатрат на транспортировку нефтяной смеси в зависимости от температуры и концентрации высоковязкой нефти