

*На правах рукописи*

**Бадашина Наталья Алексеевна**



**ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ И ТЕМПЕРАТУРНОГО  
РЕЖИМА ТРУБОПРОВОДНОГО ТРАНСПОРТА  
ВЫСОКОВЯЗКОЙ НЕФТИ В ЗАПАДНО-СИБИРСКОЙ  
НЕФТЕГАЗОНОСНОЙ ПРОВИНЦИИ**

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

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

**Санкт-Петербург – 2021**

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

**Научный руководитель:**

доктор технических наук, доцент

*Николаев Александр Константинович*

**Официальные оппоненты:**

*Ковалева Лиана Ароновна*

доктор технических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Башкирский государственный университет», кафедра прикладной физики, заведующая кафедрой;

*Подорожников Сергей Юрьевич*

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

**Ведущая организация** – федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет», г. Уфа.

Защита диссертации состоится 15 февраля 2022 г. в 11:00 на заседании диссертационного совета ГУ 212.224.13 Горного университета по адресу: 199106, г. Санкт-Петербург, 21-я В.О. линия, д.2, ауд. № 1171а.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Горного университета и на сайте [www.spmi.ru](http://www.spmi.ru).

Автореферат разослан 15 декабря 2021 г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ  
диссертационного совета



ФЕТИСОВ  
Вадим Георгиевич

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

### **Актуальность темы исследования**

В настоящее время происходит истощение запасов легких, маловязких нефтей. Доля запасов трудноизвлекаемой нефти постепенно растет и в настоящее время составляет более 65% от общего объема, из них более 13% - высоковязкая нефть. В связи с этим встает вопрос развития месторождений трудноизвлекаемой нефти и, соответственно, методов ее транспортирования. Согласно «Энергетической стратегии развития Российской Федерации на период до 2035 года», утвержденной Распоряжением Правительства РФ от 09.07.2020 №1523р, развитие добычи трудноизвлекаемых запасов нефти и повышение эффективности системы транспортировки нефти и нефтепродуктов на основе внедрения передовых технологий входят в комплекс ключевых мер по решению задач нефтяной отрасли.

В соответствии с Указом Президента РФ от 26.10.2020 N 645 к числу приоритетных направлений развития относится увеличение газопроводных и нефтепроводных сетей, совершенствование подключенных к трубопроводам газовых и нефтяных минерально-сырьевых центров Надым-Пурской и Пур-Тазовской нефтегазоносных областей, где преобладают трудноизвлекаемые запасы нефти, включая высоковязкую нефть.

Обеспечить выполнение указанных выше стратегических задач в части транспорта нефти можно путем разработки научно-обоснованных подходов к транспортировке высоковязкой нефти от промысла к существующим магистралям. На сегодняшний день признанным экспертным сообществом решением является надземная прокладка с использованием протяженных систем электрообогрева. Обеспечение энергоэффективного и безопасного функционирования этих систем ставит перед наукой и техникой большое количество сложных задач, решить которые можно только при комплексном подходе.

Таким образом, разработка основ рациональной эксплуатации надземных нефтепроводов высоковязкой нефти в условиях, характерных для Западно-Сибирской нефтегазоносной

провинции, является не только актуальной научно-технической задачей, но и стратегически важным для развития страны направлением.

#### **Степень разработанности темы исследования**

Тематика обоснования конструктивных и технологических решений для объектов транспорта нефти является относительно хорошо разработанной. Вопросами научно-обоснованных конструктивных технических решений для нефтепроводов, проложенных в сложных природно-климатических условиях занимались Ю.В. Лисин, С.Н. Челинцев, В.И. Суриков, В.В. Павлов, М.Ю. Зотов, Н.Н. Скуридин, Ю.Д. Земенков и др. Исследования по работе СКИН-систем в отечественной практике представлены в основном работами М.Л. Струпинского, Н.Н. Хренкова, А.Б. Кувалдина, а в международной R. Barth, F. Chakkalakal. Под сложными природно-климатическими условиями подразумевается комбинация экстремальных отрицательных температур, высокие ветровые и снеговые нагрузки, явлений, связанных с распространением ММГ и ВМГ.

Обоснованием параметров перекачки высоковязких нефтей с предварительным подогревом занимались Л.С. Абрамзон, П.И. Тугунов, Н.А. Гаррис, В.Е. Губин, В.А. Юфин, Б.Л. Кривошеин, А.А. Коршак, А.К. Николаев, К.Ю. Штукатуров, В.Т. Федоров, В.В. Жолобов, J.K. Lervik, A. V. Metzner и др.

Несмотря на выполненные исследования перекачки высоковязкой нефти в сложных природно-климатических условиях, по-прежнему остаются открытыми вопросы аналитического обоснования технических решений при изменении объемов добычи (обоснование эффективности строительства лупинга, применение циклической перекачки с остановками или использование других способов).

Содержание диссертации соответствует паспорту научной специальности 25.00.19 – Строительство и эксплуатация нефтегазопроводов, баз и хранилищ, а именно: пункту 1 «Напряженное состояние и взаимодействие с окружающей средой трубопроводов, резервуаров и оборудования при различных

условиях эксплуатации с целью разработки научных основ и методов прочностного, гидравлического и теплового расчетов нефтегазопроводов и газонефтехранилищ»; пункту 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».

**Целью работы** является повышение эффективности перекачки высоковязкой нефти с учетом ее реологических свойств.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие **задачи**:

1. Выполнить анализ изученности существующих методов транспортирования высоковязкой нефти в условиях, характерных для Западно-Сибирской нефтегазоносной провинции.

2. Провести экспериментальные исследования реологических свойств высоковязкой нефти Тазовского месторождения.

3. Теоретически обосновать формулы для гидравлического расчета нефтепроводов, транспортирующих высоковязкие нефти, проявляющие сложные реологические свойства.

4. Выполнить исследование применения депрессорных и противотурбулентных присадок в трубопроводном транспорте высоковязких нефтей.

5. Разработать рекомендации по транспортированию высоковязкой нефти на основе исследований ее реологических свойств в условиях изменяющихся объемов добычи.

#### **Идея работы**

Обоснование технических решений по перекачке нефти до пункта сдачи в систему магистральных трубопроводов на разных этапах разработки месторождения в условиях, характерных для Западно-Сибирской нефтегазоносной провинции, возможно путем использования полученных аналитических зависимостей для потерь напора при транспорте степенной жидкости.

#### **Научная новизна работы**

1. На основании изучения реологических свойств нефти

Тазовского месторождения получены экспериментальные графические зависимости напряжений сдвига от скоростей сдвига при различных температурах и установлено, что расчет транспорта нефти с этого месторождения целесообразно выполнять по степенной зависимости.

2. Получена модифицированная формула Лейбензона для расчета потерь напора при гидравлическом расчете нефтепроводов, транспортирующих нефть, подчиняющуюся степенному закону Оствальда-де-Ваале.

#### **Теоретическая значимость работы**

На основе законов гидравлики неньютоновских жидкостей предложены формулы расчета потерь напора для жидкостей, подчиняющихся закону Оствальда-де-Ваале. Показана их связь с классическими уравнениями гидравлики, проанализирована эффективность транспорта по надземному нефтепроводу, транспортирующему высоковязкую нефть.

#### **Практическая значимость работы**

1. На основе выполненного анализа опыта эксплуатации нефтепроводов, транспортирующих неньютоновскую нефть, разработаны рекомендации по технологии транспортирования нефти в условиях, характерных для Западно-Сибирской нефтегазосной провинции.

2. Предложена последовательность расчета падения давления в остановленном трубопроводе, пригодная для определения утечек нефти.

3. Разработана программа для ЭВМ по построению совмещенной характеристики насосной станции и нефтепровода, транспортирующего высоковязкую нефть («Программа для изучения режимов работы неизотермического нефтепровода», программа зарегистрирована в Государственном реестре программ для ЭВМ, свидетельство о регистрации № 2020666058).

#### **Методология и методы исследования**

Основой проведенных исследований является системный подход к изучаемым объектам и явлениям. При решении поставленных задач были использованы теоретические и

экспериментальные методы исследований. Теоретические исследования включали в себя анализ и обобщение имеющегося опыта по техническим решениям для нефтепроводов в условиях, характерных для Западно-Сибирской нефтегазоносной провинции, математическое обоснование формул для их гидравлического расчета. Экспериментальные исследования включали качественное и количественное определение свойств нефти. Исследования проводились при помощи высокотехнологичного оборудования – газового хроматомасс-спектрометра и ротационного вискозиметра.

**На защиту выносятся следующие положения:**

1. Гидравлический расчет нефтепроводов, транспортирующих нефть, реологические свойства которой описываются степенным законом Оствальда-де-Ваала, необходимо проводить по модифицированной формуле Лейбензона (1,2):

$$h = \beta \cdot \frac{l \cdot \left(\frac{k}{\rho}\right)^{m^*} \cdot Q^{\frac{7}{3}(1-m^*)}}{d^{6-5m^*}} \text{ – для турбулентного режима,} \quad (1)$$

где  $h$  – потери напора по длине,  $l$  – длина,  $\rho$  – плотность нефти,  $Q$  – расход,  $d$  – внутренний диаметр трубопровода, расчетные

коэффициенты:  $A = \frac{n^{\frac{4}{3}}}{3}$ ,  $\beta = 0,026 \cdot n^{-0,7}$ ,  $m^* = \frac{1}{3n+1}$ ;

$$h = \beta \cdot \frac{l \cdot \left(\frac{k}{\rho}\right) \cdot Q^n}{d^{3n+1}} \text{ – для ламинарного режима,} \quad (2)$$

где  $h$  – потери напора по длине,  $l$  – длина,  $Q$  – расход,  $d$  – внутренний диаметр трубопровода, расчетные коэффициенты:

$A = 64$ ,  $\beta = 4,3 \cdot n^{1,7}$ ,  $m^* = 1$ ,

в диапазоне параметра  $0,5 \leq n \leq 1,25$  для обоих случаев.

2. Повысить эффективность эксплуатации нефтепроводов, транспортирующих неньютоновские жидкости, в зависимости от их производительности возможно следующим образом: при производительности выше проектной рекомендуется использовать лупинг, а при пониженном расходе с периодическими остановками необходимо рассчитать рациональное число циклов по формуле (3):

$$\text{Ц}_{\text{скин}} = \sqrt{\frac{2Q}{Q_1} \cdot \frac{Q_1 - Q}{u_{\text{скин}}} \left( \sigma_p \varepsilon_{\text{от}} + M_1 \frac{Q_1 - Q}{Q_1} \cdot \sigma_q \right)} = \text{Ц}_0 \sqrt{\frac{u_2}{u_{\text{скин}}}}, \quad (3)$$

где  $u_{\text{скин}} = N_{\text{скин}} \cdot \tau_{\text{скин}} \cdot \frac{\sigma_3}{\eta_3} = \frac{\pi \cdot d \cdot K}{\xi} \cdot (T_{\text{уст}} - T_{\text{окр}}) \cdot \tau_{\text{скин}} \cdot \frac{\sigma_3}{\eta_3}$  - затраты на подогрев нефти во время остановки, где  $N_{\text{скин}}$  - мощность системы,  $\tau_{\text{скин}}$  - время работы системы обогрева,  $\xi$  - поправочный коэффициент,  $T_{\text{уст}}$  - температура поддержания.

**Степень достоверности результатов исследования** обоснована и подтверждена теоретическими исследованиями и выводами аналитических зависимостей при транспортировании высоковязких нефтей в Западно-Сибирской нефтегазоносной провинции; результатами лабораторных исследований реологических свойств и состава нефти, а также опытно-промышленных экспериментов по изучению применения противотурбулентных присадок; сопоставлением теоретических и экспериментальных исследований с применением методов математической статистики и регрессионного анализа; сходимостью результатов экспериментов с результатами натуральных испытаний менее 5%.

#### **Апробация результатов**

Основные положения и результаты работы докладывались на следующих семинарах и конференциях:

Одиннадцатом всероссийском форуме студентов, аспирантов, молодых ученых «Наука и инновации в технических университетах» (г. Санкт-Петербург, 2017 г.), 58-ой Международной научной конференции студентов и молодых ученых «Современные проблемы горного производства» (г. Краков, Польша, 2017 г.), XIII Международной учебно-научно-практической конференции «Трубопроводный транспорт 2018» (г. Уфа, 2018 г.), Конференции молодых ученых «Freiberg-St.Petersburg Colloquium of young scientists» (г. Фрайберг, Германия, 2018 г.), 73-ей Международной молодежной научной конференции «Нефть и газ-2019» (г. Москва, 2019 г.), XII Российско-Германском сырьевом форуме (г. Санкт-Петербург, 2019 г.).

#### **Личный вклад автора**

Автором проведен анализ и систематизация данных по существующим методам транспортирования нефти в условиях, характерных для Западно-Сибирской нефтегазоносной провинции,



выполнены экспериментальные исследования образцов нефти Тазовского месторождения. Представлено теоретическое обоснование гидравлического расчета трубопроводов высоковязкой нефти и разработаны рекомендации по их эксплуатации.

#### **Публикации по работе**

Результаты диссертационной работы в достаточной степени освещены в 17 печатных работах, в том числе в 4 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 1 статье - в издании, входящем в международную базу данных и систему цитирования Scopus. Получено свидетельство о регистрации программы для ЭВМ.

#### **Структура работы**

Диссертация состоит из оглавления, введения, четырех глав с выводами по каждой из них, заключения, списка литературы, включающего 159 наименований и 8 приложений. Диссертация изложена на 144 страницах машинописного текста, содержит 44 рисунка и 26 таблиц.

#### **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

*Во введении* обоснована актуальность диссертационной работы, поставлены цель и задачи исследований, а также сформулирована идея работы, выдвинуты защищаемые положения, выявлены научная новизна и практическая значимость.

*В первой главе* проведен анализ современных технических решений и существующей практики транспортирования нефти в сложных природно-климатических условиях.

Вопросами обоснованных конструктивных технических решений для нефтепроводов, проложенных в сложных природно-климатических условиях занимались Ю.В. Лисин, В.И. Суриков, В.В. Павлов, М.Ю. Зотов, Н.Н. Скуридин, Ю.Д. Земенков, С.Н. Челинцев, Howard P. Thomas и др. Исследования по работе СКИН-систем в отечественной практике представлены в основном работами М.Л. Струпинского, Н.Н. Хренкова, А.Б. Кувалдина, в международной - R. Barth, F. Chakkalakal.

Обоснованием параметров перекачки высоковязких нефтей с

предварительным подогревом занимались Л.С. Абрамзон, П.И. Тугунов, Н.А. Гаррис, А.М. Шаммазов, В.Е. Губин, В.А. Юфин, Б.Л. Кривошеин, А.А. Коршак, А.К. Николаев, К.Ю. Штукатуров, В.Т. Федоров, В.В. Жолобов, J.K. Lervik, A. V. Metzner и др.

Особое внимание в работе уделено Тазовскому нефтегазоконденсатному месторождению, нефть с которого будет поступать в магистральный нефтепровод «Заполярье-Пурпе» по надземному нефтепроводу, проложенному на опорных конструкциях в зоне вечномерзлых грунтов протяженностью 40 км с системой электрообогрева. По физико-химическим характеристикам нефть Тазовского месторождения относится к типу высоковязких нефтей.

На основании физико-химических параметров, выполненных исследований реологических свойств планируемой к перекачке нефти Тазовского месторождения предусмотрена прокладка нефтепровода с системой электрического подогрева для поддержания заданной температуры перекачки нефти по трубопроводу. Определяющими критериями, по которым осуществляется выбор способа прокладки трубопровода является обеспечение надежности трубопровода при эксплуатации в этих условиях.

Выполнен анализ способов прокладки «горячих» трубопроводов, в результате которого был сделан вывод о несовершенстве метода подземной прокладки в вечномерзлых грунтах ввиду наличия риска смещения и деформации трубопровода. Опыт применения надземной прокладки нефтепроводов демонстрирует, что данное техническое решение позволяет избежать многих техногенных преобразований и нарушений грунтовой обстановки, которые возникают при подземной прокладке. При возведении опор под надземный нефтепровод возникают нарушения при контакте опор в вечномерзлых грунтах. Надземная прокладка сопровождается замораживанием грунта вокруг свай с целью увеличения его несущей способности.

В работе приведен сравнительный анализ применяемых в

настоящее время теплоизоляционных материалов, рассмотрено влияние толщины теплоизоляции на изменение значений тепловых потерь трубопровода.

Выполнен анализ технических решений по трубопроводному транспорту нефти в сложных природно-климатических условиях. Особое внимание уделено системам путевого электрообогрева – СКИН-системам. Исследования по работе СКИН-систем в отечественной практике представлены в основном работами М.Л. Струпинского, Н.Н. Хренкова, А.Б. Кувалдина.

Подробно рассмотрен принцип работы СКИН-систем. Исходя из уравнения теплового баланса, температура высоковязкой нефти в трубопроводе определяется по формуле (4):

$$T = \left( T_n - \left( T_{окр} + \frac{N}{K_T \pi D} \right) \right) e^{-\frac{K_T \pi D}{Gc} l} + T_{окр} + \frac{N}{K_T \pi D}, \quad (4)$$

где  $T_n$  – начальная температура нефти,  $T_{окр}$  – температура окружающей среды,  $K_T$  – коэффициент теплопередачи сырой нефти к окружающей среде,  $D$  – внутренний диаметр нефтепровода,  $N$  – удельная тепловая мощность системы электрообогрева,  $G$  – массовый расход нефти,  $c$  – удельная массовая теплоемкость нефти.

На распределение температуры в нефтепроводе в значительной степени влияют такие параметры, как тип трубопровода, глубина его заложения, начальная температура трубопровода, объем нефти, перекачиваемый за единицу времени, вязкость сырой нефти, температура окружающей среды. С учетом приведенного в работе примера расчета, сделан вывод, что при проектировании системы электрообогрева на основе скин-эффекта необходимо учитывать влияние количества подаваемой в нефтепровод нефти, поскольку чувствительность системы к этому параметру велика.

В работе представлен анализ существующих на рынке предложений по электрообогреву трубопроводов на основе скин-эффекта. В настоящее время в Российской Федерации не существует государственного стандарта, регламентирующего требования по производству, монтажу и эксплуатации СКИН-систем электрообогрева. Роль СКИН-систем в электрообогреве

трубопроводов с каждым годом растет, с каждым годом увеличивается количество объектов, оборудованных данной системой. Особенно актуальным является ее использование на протяженных трубопроводах в сложных природно-климатических условиях.

С учетом вышесказанного для конкретных инженерно-геокриологических условий для рассматриваемого трубопровода принят надземный способ прокладки в ППУ-изоляции с использованием путевого электрообогрева

*Во второй главе* разработана математическая модель прокладки надземных нефтепроводов. В практике гидравлических расчетов применяются формулы Дарси-Вейсбаха (преимущественно для компьютерных расчетов) и Лейбензона (для аналитических выкладок). Основную сложность при расчете по формуле Дарси-Вейсбаха представляет определение коэффициента гидравлического сопротивления, для которого предложено большое количество расчетных формул. Наилучшую сходимость с экспериментальными данными и серьезное теоретическое обоснование имеют формулы Кольбрука-Уайта, Черчилля и Хааланда. В работе А.А. Коршака доказана универсальность формулы Лейбензона для широкой номенклатуры перекачиваемых продуктов и режимов течения. После анализа существующих формул, используемых при гидравлическом расчете неизотермических трубопроводов установлено, что существующие на сегодняшний день зависимости для расчета движения неньютоновских жидкостей (в том числе, подчиняющихся реологическому закону Освальда-де-Ваале) не совсем точно подходят для аналитической оценки процессов трубопроводного транспорта высоковязких нефтей. На основе выполненных экспериментов предложена модифицированная формула Лейбензона (1,2) для расчета потерь напора степенной жидкости.

На основании полученной зависимости представлено обоснование технических решений при отличии фактических объемов перекачки от проектных. При производительности больше проектной рекомендована прокладка лупинга или параллельной

нитки с целью увеличения пропускной способности трубопровода. При производительности меньше проектной целесообразно применять циклическую перекачку.

**В третьей главе** представлены экспериментальные исследования компонентного состава и реологических свойств нефти Тазовского месторождения.

Реологические исследования проводились с целью получения зависимостей, характеризующих реологические свойства нефти: зависимости коэффициента динамической вязкости от скорости сдвига и напряжения сдвига от скорости сдвига при различных температурах. Экспериментальные исследования проводились с использованием лабораторной базы Санкт-Петербургского горного университета с использованием ротационного вискозиметра Rheotest RN 4.1.

На основании проведенных экспериментов установлено, что в области температур от плюс 20...40 °С нефть проявляет ньютоновские свойства, а начиная с температуры 20 °С и ниже она приобретает свойства степенной жидкости, все более отклоняясь от зависимости Ньютона.

На рисунке 1 представлены графики зависимости коэффициентов динамической вязкости нефти Тазовского месторождения от скорости сдвига.

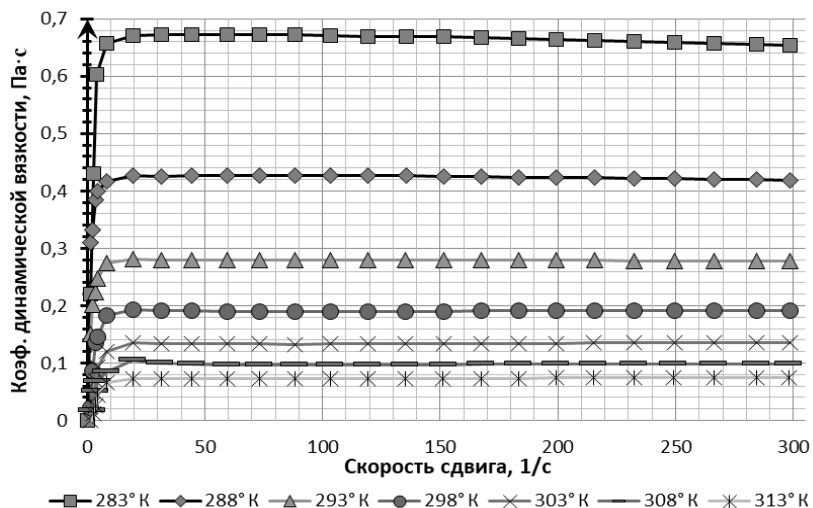


Рисунок 1 – Графики зависимости коэффициента динамической вязкости нефти Тазовского месторождения от скорости сдвига.

Помимо образца нефти, отобранного из действующей первой нитки, исследованы перспективные нефтесмеси (далее – НС) с учетом планируемых к транспорту запасов.

Согласно алгоритму, представленному в работе, были получены реологические модели для различных НС, планируемых к перекачке по нефтепроводу. В таблице 1 приведены параметры реологических моделей для этих НС.

Таблица 1– Параметры реологической модели для различных НС, планируемых к перекачке по нефтепроводу

НС	Диапазон скорости сдвига, 1/с	Реологическая модель	Параметры модели
1	3	4	5
НС-1	1...300	Оствальда-де Вааля (Ostwald de Waele model or power-law) $\tau = k\gamma^n$	при 10 °С: $k = 0,896; n = 0,943$ при 20 °С: $k = 0,324; n = 0,972$ при 30 °С: $k = 0,144; n = 0,988$ при 40 °С: $k = 0,0765; n = 0,994$

Продолжение таблицы 1

НС-2	1...300	Оствальда-де Вааля ( <i>Ostwald de Waele model or power-law</i> ) $\tau = k\gamma^n$	при 10 °C: $k = 0,874; n = 0,853$ при 20 °C: $k = 0,432; n = 0,883$ при 30 °C: $k = 0,157; n = 0,951$ при 40 °C: $k = 0,0643; n = 0,985$
НС-3	1...300	Оствальда-де Вааля ( <i>Ostwald de Waele model or power-law</i> ) $\tau = k\gamma^n$	при 10 °C: $k = 0,974; n = 0,801$ при 20 °C: $k = 0,482; n = 0,871$ при 30 °C: $k = 0,194; n = 0,926$ при 40 °C: $k = 0,0783; n = 0,991$
НС-4	1...300	Оствальда-де Вааля ( <i>Ostwald de Waele model or power-law</i> ) $\tau = k\gamma^n$	при 10 °C: $k = 1,204; n = 0,832$ при 20 °C: $k = 0,682; n = 0,901$ при 30 °C: $k = 0,308; n = 0,976$ при 40 °C: $k = 0,0823; n = 0,994$
НС-5	1...300	Оствальда-де Вааля ( <i>Ostwald de Waele model or power-law</i> ) $\tau = k\gamma^n$	при 10 °C: $k = 1,017; n = 0,812$ при 20 °C: $k = 0,573; n = 0,841$ при 30 °C: $k = 0,264; n = 0,905$ при 40 °C: $k = 0,0742; n = 0,993$

В ходе работы были проведены спектрометрические исследования состава нефти. Отмечено практически полное отсутствие класса парафинов, что является нетипичным для нефтей.

Кроме того, были выполнены исследования образца методом ИК-спектроскопии с использованием Фурье спектрометра IRAffinity-1.

Полученные результаты ГХМС анализа и ИК-спектрометрии согласуются с данными натуральных испытаний. Для более точного определения состава исследуемых образцов в будущих исследованиях рекомендованы методы ВЭЖХ-МС (LC-MS), а также МАЛДИ масс-спектрометрию (MALDI MS). Данные спектрометрии необходимы для сопоставления компонентного состава и реологических свойств. Исследования компонентного состава помогут оценить применимость результатов работы при транспортировке подобных нефтей.

Проведенные эксперименты применения противотурбулентной присадки на участке нефтепровода «Пурпе-

Самотлор» со свойствами нефти, похожими на нефть Тазовского месторождения показали возможность ее использования при дальнейшем развитии месторождения.

**В четвертой главе** разработаны рекомендации по повышению эффективности эксплуатации систем надземных нефтепроводов, оборудованных электрообогревом.

В процессе эксплуатации нефтепроводов неизбежна потеря части продукта вследствие утечек. Система обнаружения утечек должна обеспечивать определение в режиме реального времени координату возникновения утечки и время возникновения утечки нефтепровода. Стоит отметить, что во избежание остановки трубопровода должна быть предусмотрена возможность маскирования функции обнаружения утечки на период возникновения особых событий, к которым можно отнести отбор нефти на собственные нужды и др.

В работе представлен алгоритм расчета падения давления в остановленном трубопроводе, пригодный для определения утечек. В остановленном нефтепроводе сложной для анализа задачей является определение причин падения давления, которые могут состоять как в падении температуры продукта, так и в незаконном отборе жидкости.

Следующим предложенным решением является «Программа для изучения режимов работы неизотермического нефтепровода» программа зарегистрирована в Государственном реестре программ для ЭВМ, свидетельство о регистрации № 2020666058), предполагающая построение совмещенной характеристики насосной станции и нефтепровода, транспортирующего высоковязкую нефть. Программа позволяет решить важную при проектировании и эксплуатации объектов транспорта высоковязкой нефти задачу расчета возможных режимов перекачки в зависимости от определяющих процесс параметров. Программа включает в себя модуль ввода исходных данных, решение сопряженной задачи трубной гидродинамики, теплообмена и упрощенный подсчет основных технико-экономических показателей перекачки, обеспечивает решение следующих задач: построение трехмерной

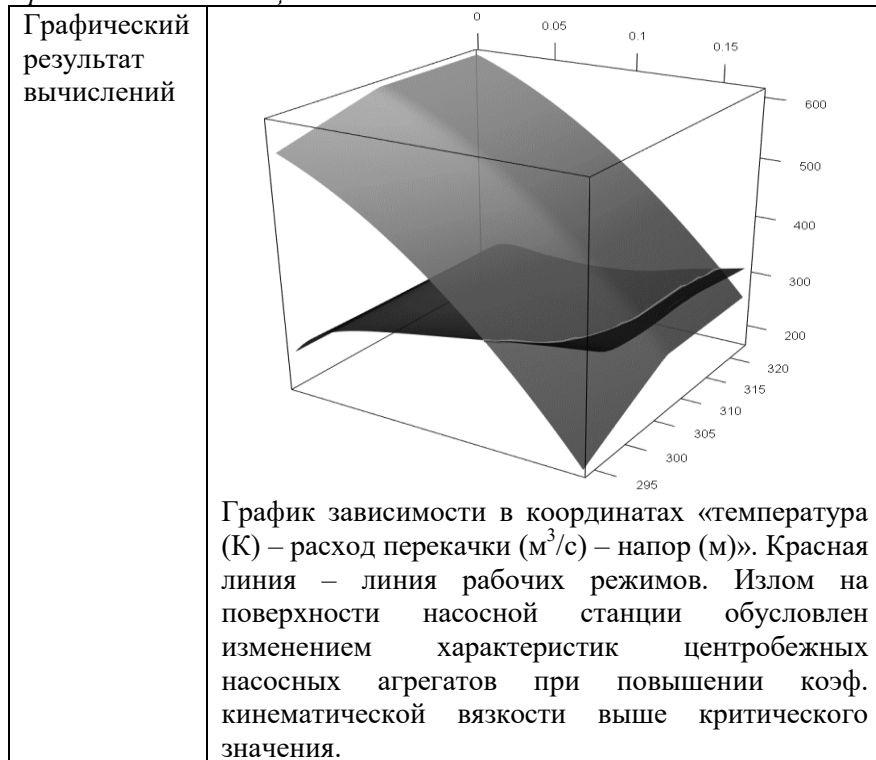


поверхности, отображающей возможные режимы «горячего» нефтепровода, в координатах «расход-температура-напор»; поиск оптимальных значений начальной температуры подогрева и расхода перекачки. Характеристики представленного программного обеспечения представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Характеристики разработанного программного обеспечения

Исходные данные	В соответствии с нормативным документом РД 75.180.00-КТН-198-09, дополнительно учитываются: параметры насосных агрегатов, параметры электрообогрева.
Модель насосной	В расчетах предусмотрены центробежные насосные агрегаты, с известными напорными характеристиками. В программе учтена деградация характеристик насосов при повышении вязкости транспортируемого продукта.
Модель трубопровода	Модель трубопровода представлена в качестве линейного объекта, без учета сброса и подкачек. Решение задачи ведется в квазистационарной постановке. Дополнительные потери тепла на участках сопряжения теплоизоляции, трубопроводной арматуре и т.д. учитываются путем введения поправочных коэффициентов.
Численный результат вычислений	Результатом вычислений являются потери напора на участке, протяженность турбулентного и ламинарного участков, затраты на перекачку, затрачиваемая мощность, оптимальная температура подогрева.

Продолжение таблицы 2.



### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация является законченной научно-квалификационной работой, в которой содержится решение актуальной научно-технической задачи по повышению эффективности перекачки высоковязкой нефти в сложных природно-климатических условиях.

1. Анализ трубопроводного транспорта высоковязкой нефти, в условиях, характерных для Западно-Сибирской нефтегазоносной провинции показал, что вопросы обеспечения рациональных режимов транспорта нефти с промысла до точки сдачи в систему магистральных нефтепроводов исследованы

недостаточно в части работы в условиях изменяющегося объема добычи. Существующие решения применяются исходя из сложившейся практики проектирования, а не научно-обоснованного подхода.

2. Выполненные экспериментальные исследования нефти Тазовского месторождения позволили получить графические зависимости напряжения сдвига от скорости сдвига, на основе которых сделан вывод, что поведение исследуемой нефти описывается степенным законом Оствальда-де-Ваале, который характеризует эффективную вязкость.

3. Теоретические исследования зависимостей для гидравлического расчета трубопроводов, транспортирующих неньютоновские нефти, в частности подчиняющиеся закону Оствальда-де-Ваале, позволили получить новое соотношение для потерь напора в виде обобщенной формулы Лейбензона для степенной жидкости. С учетом полученных зависимостей, обоснованы формулы для лупинга, а также представлено обоснование целесообразности эксплуатации нефтепровода при пониженной загрузке способом циклической перекачки.

4. Использование противотурбулентных присадок возможно на рассматриваемом в работе трубопроводе при дальнейшем развитии месторождения.

5. На основании проведенных исследований, разработаны рекомендации по повышению эффективности эксплуатации нефтепроводов, оборудованных СКИН-системами и работающих с периодическими остановками. В силу важности вопроса периодических остановок при циклической перекачке, была предложена последовательность расчетных зависимостей, позволяющая установить утечки.

Перспективы дальнейшего развития темы заключаются в разработке совершенствовании существующих и разработке новых технических решений по эксплуатации надземных нефтепроводов, транспортирующих высоковязкую нефть, оснащенных СКИН-системами электрообогрева, которые учитывают реологические свойства транспортируемой нефти.

## СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

### *Публикации в изданиях из Перечня ВАК*

1. Николаев А.К. Рекомендации по повышению эффективности эксплуатации трубопроводов, транспортирующих высоковязкую нефть / Николаев А.К., Зарипова Н.А., Пшенин В.В. // Международный научно-исследовательский журнал – 2021. – № 9 (111) – С. 138-143.

2. Ямилев М.З. Модифицированные формулы гидравлического расчета нефтепровода для условий изотермического течения степенной жидкости / Ямилев М.З., Масагутов А.М., Николаев А.К., Пшенин В.В., Зарипова Н.А., Плутникова К.И. // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов – 2021. Т. 11. № 4. – С. 388-395.

3. Николаев А.К. Исследование эффективности использования суспензионной противотурбулентной присадки M-FLOWTREAT на напорном нефтепроводе / А.К. Николаев, Н.А. Зарипова, Ю.Г. Матвеева // Территория Нефтегаз – 2019. – № 1-2. – С. 102-110.

4. Деменин Е.С. Исследование применения депрессорных присадок зарубежными компаниями в трубопроводном транспорте высоковязких нефтей / Е.С. Деменин, А.К. Николаев, Н.А. Зарипова // Международный научно-исследовательский журнал – 2020. – № 5-1 (95). – С. 94-96.

*Публикация в издании, входящем в международную базу данных и систему цитирования Scopus:*

5. A.K. Nikolaev. Investigation of application of anti-turbulent additive "M-FLOWTREAT" brand C on oil pipeline / A.K. Nikolaev, N.A. Zaripova, A.A. Erashov, E.S. Demenin // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science (IPDME 2018). – November 2018. – Volume 194, Issue 8. – P. 082029.

### *Свидетельство:*

6. Программа для ЭВМ. Программа для изучения режимов работы неизотермического нефтепровода. Свидетельство № 2020666058 Российская Федерация: № 2020666058: заявл. 02.12.2020: опубл. 04.12.2020 / Зарипова Н.А., Пшенин В.А., Борисов А.В. – 13 Кб.