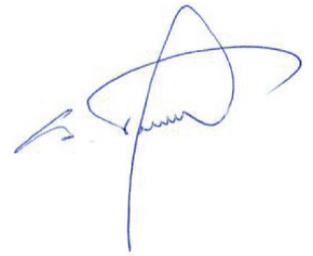


*На правах рукописи*

ТОКАРЕНКО АНДРЕЙ ВЛАДИМИРОВИЧ



**СТАНОВЛЕНИЕ И РАЗВИТИЕ СПЕЦИАЛЬНЫХ МЕТОДОВ  
ПЕРЕКАЧКИ НЕФТИ И НЕФТЕПРОДУКТОВ  
ПО ТРУБОПРОВОДАМ**

5.6.6. История науки и техники

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Уфа 2024

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: **Сощенко Анатолий Евгеньевич**  
доктор технических наук, профессор  
Публичное акционерное общество  
«Транснефть» / консультант  
управления инновационного  
и научно-технического развития

**Пшенин Владимир Викторович**  
кандидат технических наук, доцент  
Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего  
образования «Санкт-Петербургский горный  
университет императрицы Екатерины II» /  
доцент кафедры  
«Транспорт и хранение нефти и газа»

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

Защита диссертационной работы состоится «18» июня 2024 г. в 12:30 на заседании диссертационного совета 24.2.428.01 при ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет» по адресу: 450064, Республика Башкортостан, г. Уфа, ул. Космонавтов, 1.

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

Автореферат разослан « \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2024.

Ученый секретарь  
диссертационного совета

Удалова Елена Александровна

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### **Актуальность темы исследования.**

К концу 2010 года в мире был зафиксирован «пик» по добыче «нетрадиционной» нефти ввиду появления и замещения части рынка новыми «нетрадиционными» углеводородами. Это как обычные средневязкие легкие нефти низкопроницаемых коллекторов; аномально вязкие тяжелые и сверхтяжелые нефти с традиционных и сланцевых залежей; природные битумы, битуминозные нефти и нефтяные пески, так и сверхвязкие «синтетические» нефти из «нефтематеринских» керогеновых пород и легкие нефти, близкие к газоконденсатным, полученные из попутного нефтяного газа по GTL-технологии. Отличительные особенности реологических свойств вышеперечисленных нефтей, связанные с компонентным, природным составом или технологией их добычи и подготовки, в большинстве случаев не позволяют обеспечить их отдельную эффективную транспортировку без использования дорогостоящих специальных методов, включая получивший в системе магистральных нефтепроводов России метод совместной перекачки. При этом даже использование хорошо зарекомендовавших себя в нефтепромысловых системах термохимических методов не всегда позволяет обеспечить требуемый уровень надежности и энергоэффективности в магистральных нефтепроводах из-за высоких требований к сохранности показателей качества товарной нефти. Таким образом, в условиях постепенного ухудшения «транспортабельных» свойств перекачиваемой нефти актуальной становится задача поиска наиболее эффективных методов увеличения пропускной способности существующих нефтепроводов за счет использования специальных методов. Отсутствие унифицированной классификации и общепринятой методологии выбора наиболее подходящих технологий перекачки требует сформировать концепцию управления и прогнозирования долгосрочного развития нефтепроводного транспорта, перечень критических технологий и перспективных разработок.

**Степень разработанности темы.** Развитие специальных технологий перекачки нефти и нефтепродуктов по магистральному трубопроводному транспорту, связанных с изменением и/или управлением свойствами перекачиваемой среды, можно разделить на четыре большие группы.

Основополагающие научные разработки в области транспорта предварительно подогретой нефти/нефтепродукта представлены в трудах В.Г. Шухова, Л.С. Лейбензона, В.И. Черникина, В.С. Яблонского, Л.С. Абрамзона, П.И. Тугунова, В.Ф. Новоселова, Н.А. Гаррис, В.Е. Губина, В.В. Губина, В.Н. Дегтярева, К.Д. Фролова.

Совместной транспортировкой нефти с водой занимались Дж.Д. Айзекс, С.К. Роз, С.С. Марсен, В.Е. Губин, В.Н. Степанюгин, М.Дж. Лэмб, В.С. Симпсон и др. Получением эмпирических зависимостей реологических параметров от соотношения смешения различных нефтяных сред занимались С.А. Аррениус, Бингем, А.Б. Здановский, Гаррисон, Дж. Кендалл, К.П. Монрое, Молин, Л.Г. Гурвич, Р.А. Алиев, Э.М. Блейхер, В.Н. Дегтярев и т.д.

Первыми экспериментаторами последовательной перекачки разнотипных нефтяных продуктов по магистральным трубопроводам были А.А. Кашеев, В.М. Покровский, далее последовательно появлялись научные труды В.С. Яблонского, В.А. Юфина, М.В. Нечваля, К.Д. Фролова, В.Ф. Новоселова, В.И. Марона, М.В. Лурье и многих других.

Исследованиями в области развития методов анализа группового состава занимались Р. Залозецкий, С. Айзинман, К.В. Харичков, У. Ричардсон, Д. Гольде, И. Маркуссон, Л.Г. Гурвич, А.Н. Саханов и т.д. Первыми методами воздействия на дисперсное состояние парафинистой нефти и мазутов термообработкой занимались Н.Д. Граменицкий, И.О. Лучинский, Б.Г. Тычинин, В.С. Тверцын, Дж.Б. Рутер, Г.М. Андерсон, А.Н. Саханов, А.А. Кашеев. Первые химические полимерные добавки, позже названные депрессорными присадками появились благодаря трудам Х.Б. Девиса и А.И. Блеквуда, Орланда, М. Рейфа, Дарнина, Э. Баденчера, К.С. Рамайя. Вопросами управления дисперсным состоянием перекачиваемой среды с точки зрения добавления «активной» дисперсной фазы для изменения структуры турбулентного потока озаменовались открытиями зарубежных ученых Б.А. Томс, Ф. Форрест, Г.А. Гриерсон, Дж.Г. Савинс. Позднее эксперименты Е.Д. Бургера, В.Р. Мунка, Г. А. Вола подтвердили эффект снижения гидродинамического сопротивления турбулентного потока на промышленном трубопроводе. Объяснением эффекта Томса и разработкой методов прогнозирования эффекта в различных условиях занимались P.S. Virk, А.Х. Мирзаджанзаде, Ю.П. Белоусов, В.Н. Манжай, М.В. Лурье, М.М. Гареев, Г.В. Несын, Н.Н. Голунов, А.М. Нечваль и т.д.

Большой имеющийся российский и мировой исторический опыт в области развития специальных методов перекачки требует его тщательного анализа и обобщения с точки зрения развития способов управления свойствами перекачиваемой среды с целью повышения эффективности магистрального трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов.

**Соответствие паспорту заявленной специальности.** Тема работы и содержание исследований соответствуют п.3 «История исследований и открытий в конкретных областях научного знания» и п.5 «Обобщение историко-научного материала с целью воссоздания целостной картины становления и развития отдельных наук и отраслей научного знания» паспорта специальности 5.6.6. История науки и техники.

**Цель работы** – разработать на основе анализа историко-научных материалов в области специальных методов перекачки нефти и нефтепродуктов методологию рационального управления свойствами перекачиваемой среды в разветвленной системе магистральных трубопроводов за счет сочетания методов последовательной, совместной и специальной перекачки.

#### **Основные задачи исследования**

1. Ретроспективный анализ развития специальных технологий транспорта высоковязкой нефти и нефтепродуктов как первых методов управления свойствами перекачиваемой среды за счет температуры.
2. Исторический обзор становления технологии последовательной перекачки разнотипных нефтей и нефтепродуктов по одному трубопроводу,

развитие которой привело к усложнению простого представления внутреннего строения перекачиваемой нефтяной среды вплоть до понятия сложной многокомпонентной дисперсной системы.

3. Анализ поэтапного влияния группового состава высокомолекулярных соединений нефти и нефтепродуктов на появление способов управления дисперсионным состоянием перекачиваемой среды, а соответственно и новых специальных методов перекачки;

4. Определение перспективных направлений развития исследований в области управления свойствами перекачиваемой среды в условиях перекачки нефтей различных месторождений по разветвленной магистральной нефтепроводной системе.

#### **Научная новизна работы**

1. Установлены основные этапы технологического развития и становления технологий специальной перекачки нефти и нефтепродуктов на основе принципа управления свойствами и реологическим параметрами перекачиваемой среды.

2. Сформирована единая хронологическая картина развития современных теорий и технико-технологических решений для гидротранспорта высоковязких нефтей и последовательной перекачки разноразных нефтепродуктов.

3. Выделены основные этапы и направления исследований высоковязких и застывающих нефтей и нефтепродуктов, определившие современные принципы и методы управления реологическими свойствами неньютоновских сред в условиях высокого содержания асфальтосмолопарафиновых веществ и низких температур эксплуатации трубопроводов.

4. На основании результатов исследования исторического развития впервые были сформированы современные задачи и концепция по управлению свойствами перекачиваемых сред в разветвленной системе магистральных трубопроводов за счет сочетания методов последовательной, совместной и специальной перекачки.

**Теоретическая значимость.** Исследования, проведенные в диссертации, позволяют взглянуть под иным углом к историческому развитию специальных технологий перекачки нефти и нефтепродуктов по магистральным трубопроводам, тем самым способствуя к развитию междисциплинарного, системного и комплексного подхода изучения данной области с привлечением знаний из области нефтехимии, коллоидной химии, реологии и механики сплошной среды. Представлены новые тенденции и направления развития технологий транспортировки различных сред по разветвленной системе магистральных нефтепроводов как оптимизации совместного и/или поэтапного действия управляющих свойствами перекачиваемого продукта факторов.

**Практическая значимость.** Материалы диссертационного исследования используются в учебном процессе ФГБОУ ВО «УГНТУ» при подготовке бакалавров и магистров по направлению 21.03.01 «Нефтегазовое дело», а также для аспирантов, обучающихся по специальности 5.6.6 «История науки и техники». Отдельные научные результаты работы, полученные в ходе исследований, используются на предприятиях трубопроводного транспорта

нефти для решения задач унификации проектных решений и актуализации перспективных тематик и разработок плана НИОКР (АО «Транснефть-Север», АО «Транснефть-Сибирь», АО «Каспийский трубопроводный консорциум - Р»).

**Методология и методы научного исследования.** Выбор методов исследований обусловлен междисциплинарным характером рассматриваемой области знаний. Для решения поставленных задач комбинировались методы историко-научного анализа трудов ученых в контексте современных им представлений о структуре состава перекачиваемой среды (антикваристский подход) и с позиций представлений о перекачиваемой среде в качестве нефтяных дисперсных систем сегодняшнего дня (презентистский подход). Анализ отдельных источников, установление достоверности, полноты и информационной ценности исследуемых объектов осуществлялся с учетом основных принципов изучения и представления материалов в диссертации – историзма и научной объективности.

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

1. Определяющее влияние уровня развития химико-аналитических методов исследований состава и реологических параметров углеводородных флюидов на прогресс в разработке эффективных технологий физико-химического воздействия и развитии теорий специальной перекачки нефтей и нефтепродуктов.

2. Хронологический анализ развития теорий и технико-технологических решений технологий гидротранспорта высоковязких нефтей и последовательной перекачки разнородных нефтепродуктов.

3. Перечень основных направлений исследований в области высоковязких и застывающих нефтей и нефтепродуктов, определивших современные принципы и методы управления реологическими свойствами неньютоновских.

4. Современные задачи, критические технологии и концепция управления реологическими свойствами совместно перекачиваемых нефтей в разветвленной системе магистральных трубопроводов.

**Степень достоверности и апробация результатов.** Степень достоверности исторических сведений подтверждается ссылками на архивные и литературные источники. Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на Международных научно-практических конференциях «Трубопроводный транспорт» (г. Уфа, 2019–2023 гг.); научно-технических конференциях студентов, аспирантов и молодых ученых УГНТУ (г. Уфа, 2021–2022 гг.); I Всероссийской научной конференции «Транспорт и хранение углеводородов-2022» (г. Санкт-Петербург, 2022 г.); Международной конференции «Россохинские чтения» (г. Ухта, 2023 г.).

**Публикации.** Основные результаты диссертационной работы опубликованы в 17 научных трудах, в том числе: 3 статьи в ведущих рецензируемых научных журналах, включенных в перечень ВАК при Минобрнауки РФ; 3 статьи в научных журналах, включенных в базы данных Scopus и WoS; 1 статья в прочих журналах, 10 работ в материалах международных, всероссийских конференций и в сборниках научных трудов.

**Объем работы.** Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав, заключения, списка литературы из 200 наименований; изложена на 141 странице машинописного текста и содержит 51 рисунок и 1 таблицу.

## 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 развития первых методов управления свойствами вязкой перекачиваемой среды за счет повышения температуры перекачки.

Вопрос о возможности транспортировки вязких нефтяных остатков возник в царской России еще в 1878 году с появлением трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. Представление о мазуте как о единой сплошной жидкой среде позволяет сформулировать вывод, что, как и любая жидкость, он должен «терять свою вязкость при нагревании», чем и воспользовался В.Г. Шухов. Первый в мире «горячий» мазутопровод был построен им уже через год после строительства им же первого трубопровода в России в 1879 году. В тот период для перекачки использовались прямодействующие паровые насосы Вортингтона (Рисунок 1), и для подогрева мазута В.Г. Шухов использовал отработавший в насосе «мятый» пар, который после выполнения работы по перемещению поршня направлялся к трубчатым подогревателям, установленным на всасывающем трубопроводе непосредственно перед насосом.

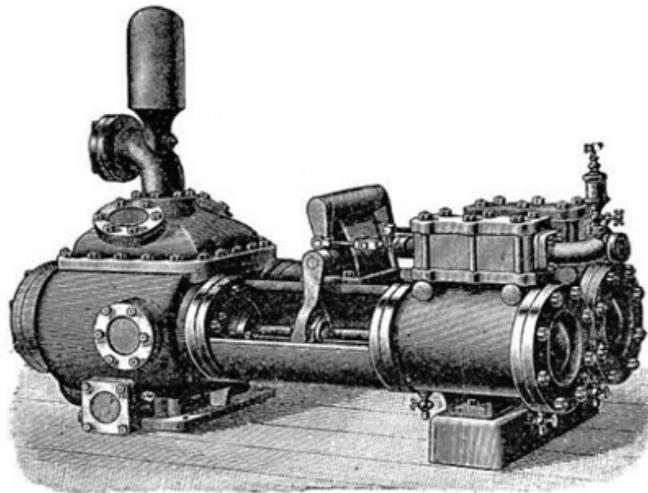


Рисунок 1 – Паровой горизонтальный насос Вортингтона системы «дуплекс» высокого давления

В.Г. Шухов также первым разработал приближенную теорию «горячей перекачки» и опубликовал ее в 1895 году. Помимо теоретических основ моделирования технологии горячей перекачки, В.Г. Шухов также разработал методы подбора оптимального диаметра трубопровода и оптимальной температуры подогрева мазута с точки зрения сокращения удельных затрат на

перекачку. Для определения расхода перекачки В.Г. Шухов пользовался коэффициентом расхода  $m$ , значение которого зависело от «природы перекачиваемой жидкости»:

$$Q = m \sqrt{\frac{d^5 h}{l}} \quad (1)$$

где  $Q$  – количество перекачиваемой жидкости м<sup>3</sup>/с;  
 $d$  – диаметр трубы, м;  
 $h$  – высота напора столба перекачиваемой жидкости, м;  
 $l$  – длина провода между станциями, м;  
 $m$  – числовой коэффициент, зависящий от природы жидкости.

Для нефтяных остатков им была предложена формула зависимости коэффициента расхода  $m$  от среднеарифметической температуры перекачиваемой среды в начале и в конце трубопровода:

$$m = 0,6 + 0,06 \cdot T_{\text{экр}}, \quad (2)$$

где  $T_{\text{экр}}$  – «эквивалентная» температура мазута, °С:

$$T_{\text{экр}} = (T_n + T_k) / 2$$

где  $T_n$ ,  $T_k$  – температура мазута в начале и конце трубопровода, соответственно, °С.

Формула (2) была получена на основании проведенных опытов на трубопроводах различных диаметров и длиной от 1000 до 1500 сажень и стала одной из первых попыток описания изменения свойств жидкости при повышении температуры.

В разработанной В.Г. Шуховым теории «горячей» перекачки использование свойств мазута учитывалось неявно. В формуле определения расхода не были учтены параметры вязкости перекачиваемой среды. Для определения коэффициента расхода использовалась средняя арифметическая температура в начале и в конце трубопровода и не учитывалось изменение коэффициента расхода по длине трубопровода. Изменение температуры среды по длине трубопровода учитывалось только для расчета оптимальной температуры подогрева. Похожую формулу для расчета горячих трубопроводов с учетом изменения температуры перекачки в 1902 году в США получил А.Ф. Белл на основе опытов с высоковязкой Калифорнийской нефтью. Таким образом, до начала 20 века при сооружении горячего трубопровода не учитывалось влияние свойств и состава перекачиваемой среды.

После 20-х годов XX века для усовершенствования теории «горячей» перекачки инженеры-трубопроводчики обратились к классическим трудам

Рейнольдса, Дарси, Вейсбаха по гидравлике, в которых определялось влияние вязкости на потери на трение в зависимости от скорости перекачки. Параллельно шло развитие средств измерения вязкости: кинематическая вязкость определялась методами Сейболта, Редвуда, Энглера, Освальда на разработанных ими вискозиметрах. Также была усовершенствована тепловая часть теории горячей перекачки, где следует отметить научные труды Л.С. Лейбензона. С учетом развития теории теплотехники и гидравлики в январе 1920 года Н.В. Crozier и в декабре 1920 года профессор Е.Ю. Пистолькорс одновременно предложили методы и алгоритмы расчета «горячих» трубопроводов, которые можно назвать теплогидравлическими, т.е. базирующимися как на закономерностях гидравлики, так и на теории передачи тепла от нефти к стенке и от стенки в окружающую среду. В работах учитывалось единство и взаимосвязанность гидравлических и тепловых процессов, а не определялась эквивалентная температура. Отличительной чертой указанных работ является то, что они базируются на экспериментальных исследованиях вязкостно-температурных зависимостей, полученных на капиллярных вискозиметрах для различных видов нефтей.

В.Ю. Пистолькорс предложил разделить горячий трубопровод на участки, в которых допускается принять среднюю вязкость и температуру. Применив для этих участков формулы гидравлики, и сложив получившиеся потери напора по всем участкам, можно получить достоверный способ оценки необходимого расстояния между станциями. В Америке Н.В. Crozier предложил графоаналитический метод определения необходимого расстояния между насосными станциями (Рисунок 2).

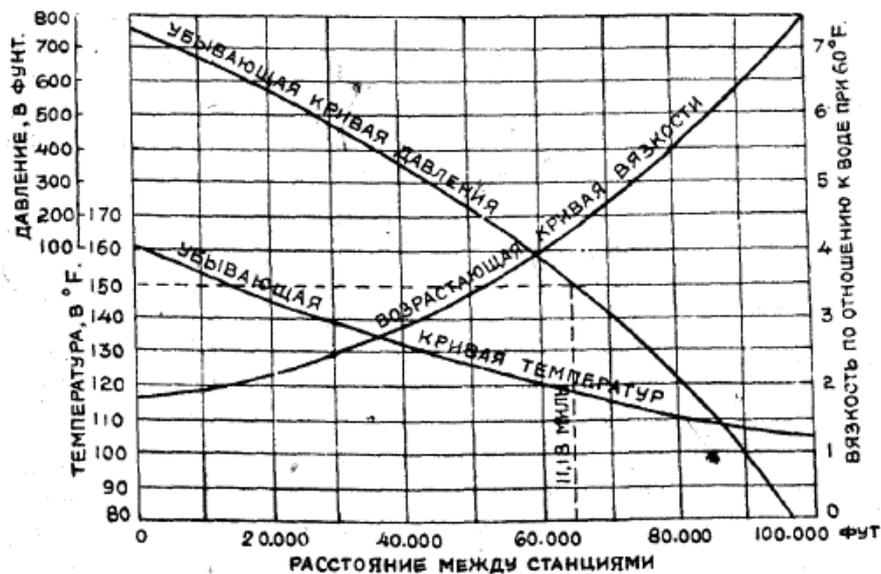


Рисунок 2 – Графоаналитический метод расчета горячего нефтепровода

Сначала прокладывается линия температуры по длине трубопровода, отдельные точки которой рассчитываются из предложенной им формулы изменения температуры по длине трубопровода. Затем на той же диаграмме

строится возрастающая линия вязкости в соответствии с температурой и линия необходимого давления. Точка, где кривая давления пересекает линию нулевого давления, принимается за место нахождения следующей станции.

Большой вклад в становление теории и практики горячей перекачки в 1940-х годах внес В.И. Черников, который разносторонне исследовал все аспекты проектирования и эксплуатации «горячих» трубопроводов. Используя обобщенное уравнение Л.С. Лейбензона для определения потерь напора и уравнение Рейнольдса-Филонова для изменения вязкости от температуры, ему удалось свести задачу интегрирования при определении потребного напора горячего трубопровода к известному интегралу ошибок, решения которого были представлены табличными значениями в справочниках теории вероятности. Исследование полученной функции потерь на трение от расхода позволило в 1949 году В.И. Черникову сформулировать закономерности неизотермического течения вязких жидкостей, согласно которым напорно-расходная характеристика трубопровода может иметь внутренние экстремумы (Рисунок 3). Это важнейшее научное открытие впервые позволило объяснить аномальные явления при эксплуатации некоторых отечественных «горячих» трубопроводов, что позднее было полностью подтверждено экспериментальными данными. Докторская диссертация В.И. Черникова стала «справочником» для проектирования «горячих» трубопроводов, первым из которых стал построенный в 1955 году магистральный нефтепровод «Азек–Суат–Грозный».

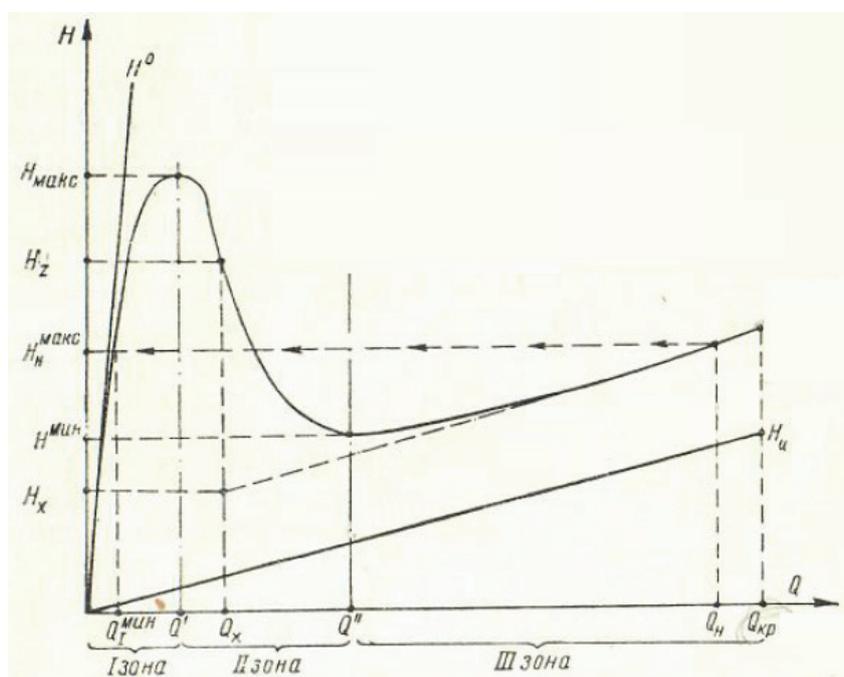


Рисунок 3 – Напорная характеристика горячего нефтепровода

Теория горячей перекачки становилась с развитием представлений о зависимости свойств перекачиваемой среды от внешних условий. С развитием горячей перекачки в трубопроводной отрасли прогнозированию свойств перекачиваемой среды стали уделять серьезное внимание. Поскольку свойства

зависят от состава нефтяной среды, начиная с начала XX века растет интерес к изучению внутреннего состава нефти. Появляется первая классификация – нефти разделили на парафинистые и беспарафинистые. Для парафинистых нефтей была характерна высокая температура застывания и резкое увеличение вязкости при снижении температуры.

**Во второй главе** представлены исторические аспекты становления и развития технологии совместной и последовательной перекачки разнотипных нефтей, нефтепродуктов и воды по одному трубопроводу. Когда стало ясно, что нефти различных месторождений отличаются по своим свойствам, возникла идея транспортировки высоковязких нефтяных сред совместно с маловязкими углеводородными жидкостями путем их смешения. При этом вязкость получаемой смеси оказывалась даже ниже теоретического значения, рассчитанного из предположения линейной аддитивности. Выведенные формулы расчета вязкости смеси были получены эмпирическим путем и не имели строгого теоретического обоснования. Следует отметить, что аддитивный параметр не найден до сих пор, и для определения вязкости смесей в настоящее время проводят дополнительные измерения вязкости для определения фактической крутизны наклона кривой вязкости.

Разбавление нефтей не всегда приводило к желаемым результатам. Например, в мае 1929 года на нефтепроводе «Грозный–Туапсе», предполагалось уменьшить вязкость грозненской парафинистой нефти за счет смешения ее с бензиновым и керосиновым дистиллятами. Однако дистилляты бензиновых фракций способствовали выпадению в осадок асфальтенов, служащих в свою очередь центрами кристаллизации парафинов, поэтому на начальном участке трубопровода произошло выпадение отложений нефти (Рисунок 4).

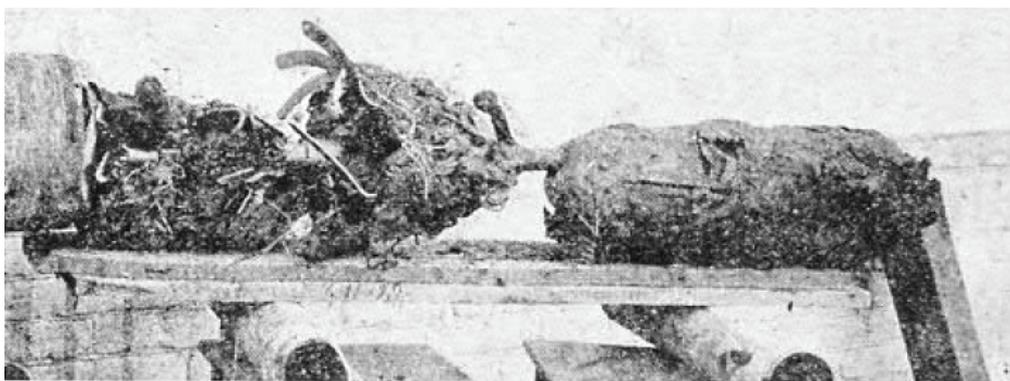


Рисунок 4 – Состояние нефтепровода после смешения парафинистой нефти с керосиновыми дистиллятами

Несмотря на возможные проявления нестабильности при смешении (усадка объема, выпадение отложений), технология разбавления вязкой нефти маловязкими углеводородными разбавителями применяется до сих пор. Например, перед отправкой в трубопроводную систему «Восточная Сибирь–Тихий океан» нефть Чаяндынского месторождения смешивается с конденсатом, выделяемым из добываемого на этом же месторождении газа.

Другим способом перекачки высоковязкой нефти по трубопроводу стал ее совместный транспорт с водой. Впервые такая технология была предложена в 1906 году Дж.Д. Айзексом для перекачки нефти с месторождения Керн Ривер. При нагреве этой нефти для снижения вязкости при ее перекачке начинали обильно выпадать отложения на стенках трубопровода. Разбавить эту нефть маловязкими нефтями было невозможно из-за их отсутствия поблизости, а обычное разбавление водой приводило к образованию стойких вязких эмульсий. В 1908 году «Ассошиэйтед Пайп Лайн Ко» проложила нефтепровод из «рифленых» труб от Керн-Ривер до Порт-Коста длиной 272 мили диаметром 8 дюймов с 12 перекачивающими станциями. На трубах с помощью специальной установки делались спиральные нарезки, которые закручивали поток. При перекачке на больших скоростях из-за центробежной силы более тяжелая, но при этом менее вязкая вода прижималась к стенке трубопровода и образовывала внешнее кольцо, а высоковязкая нефть находилась в ядре потока и скользила по подвижному водяному кольцу, а не по стенке трубопровода, благодаря чему снижалось гидравлическое сопротивление. Данная технология была применима только для тяжелых нефтей с удельным весом более 0,966, при перекачке более легких нефтей образовывались прочные эмульсии, что приводило к трудностям эксплуатации и удорожанию процесса. Поэтому в 1916 году после изменения состава перекачиваемой нефти за счет обнаружения иных залежей нефти технология была изменена на горячую перекачку. Число станций пришлось увеличить вдвое.

В 1962 году положительным стал опыт транспортировки нефти совместно с водой в Индонезии от месторождения Тэндьюн до нефтеперерабатывающего завода Балик Папан по 500 мм трубопроводу длиной 238 км и пропускной способностью 2 млн т/год (Рисунок 5). Нефть при перекачке находилась в твердом состоянии, а перекачиваемая среда представляла собой суспензию.

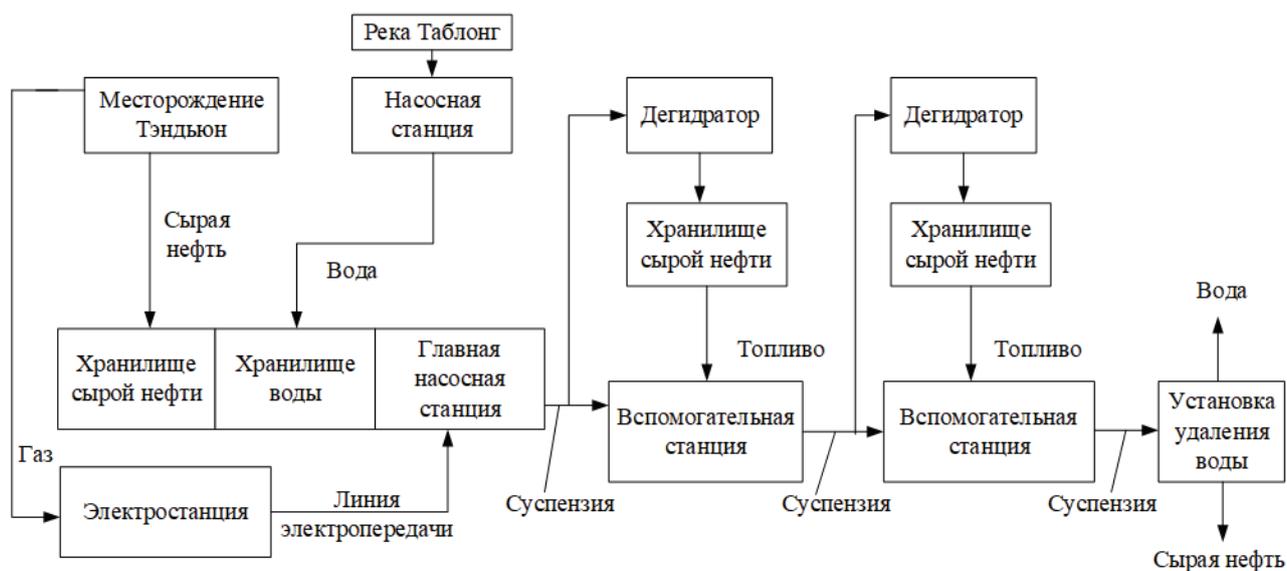


Рисунок 5 – Технология перекачки высоковязкой нефти по нефтепроводу «Тэндьюн– Балик Папан» в Индонезии

С развитием химической промышленности начали разрабатываться специальные химические добавки – поверхностно-активные вещества (ПАВ), которые стабилизовали водонефтяные эмульсии и позволяли значительно снижать вязкость. Однако использование ПАВ для снижения вязкости и солевых растворов для снижения температуры замерзания создавали проблемы в части экологических ограничений по объемам сбросов и чистоте воды в конечном пункте трубопровода. Эти трудности приводили к отказу от гидротранспорта нефти, например по Трансаляскинскому нефтепроводу, хотя исследования в этом направлении велись интенсивно в течение нескольких лет.

Вопрос о возможности последовательной перекачки разноразных нефтей и нефтепродуктов по одному трубопроводу, при которой существует риск образования смеси, отличающейся ухудшенными качественными характеристиками от исходных перекачиваемых продуктов, появился после наращивания объема производства нефтепродуктов с различным назначением. Каждый сорт или вид нефтепродуктов характеризовался индивидуальным набором качественных характеристик (например, температура конца кипения для бензинов или температура вспышки для дизельных топлив), и любая добавка иного нефтепродукта к данному сорту ухудшала бы его качество, регламентированное соответствующими стандартами при его производстве и необходимое для выполнения своего назначения в качестве моторного топлива.

Первая последовательная перекачка нефтепродуктов по одному трубопроводу была применена в США, так как к началу XX века в штате Пенсильвания имелось большое количество нефтеперегонных заводов, расположенных в различных населенных пунктах и производящих большой ассортимент нефтепродуктов. Компания United States Pipe Line Co в 1892 году построила 2 линии из 4-х и 5-ти дюймовых трубопроводов от Titusville до Wilkesbarre в штате Пенсильвания длиной 260 миль, которые эксплуатировались с перерывами до 1926 года. Одна линия была предназначена для перекачки сырой нефти, а вторая – для перекачки нефтепродуктов. По второй линии перекачивались последовательно три сорта керосина: 110° prime white; 120° standard white; and 120° water white. При этом количество образующейся смеси на трубопроводе ограничивалось длиной всего лишь в 50 футов. Несмотря на столь ранние опыты последовательной перекачки, система нефтепродуктопроводов в США начала разрастаться только с начала 1930 годов, и, соответственно, вопрос экономической эффективности последовательной перекачки был оценен лишь только к началу 1940-х годов, после чего и началось дальнейшее бурное развитие данной технологии. Основные опыты последовательной перекачки нефтепродуктов в США проводились с конца 1920-х до начала 1940-х годов.

В СССР вопрос последовательной перекачки разноразных нефтепродуктов по одному трубопроводу назрел к началу 1930-х годов. К этому времени были введены в эксплуатацию новые нефтеперерабатывающие заводы в Туапсе, Батуме, Грозном и Баку, сооружены новые магистральные трубопроводы «Баку–Батум», «Грозный–Туапсе». Увеличение числа нефтеперегонных заводов и начало развития сети магистральных

трубопроводов приводило к необходимости применения технологии последовательной перекачки различных видов топлив по одному трубопроводу. Однако по итогам промышленных экспериментов последовательной перекачки в СССР к концу 1930-х годов сложилась обстановка объективной необходимости теоретического разъяснения процесса смесеобразования для обоснования полученных противоречивых результатов по определению объемов получаемых некондиционных смесей на действующих магистральных трубопроводах. С этого времени появляются первые теоретические модели процесса смесеобразования. Первая теория смесеобразования разрабатывалась В.С. Яблонским на основе задачи вытеснения одного продукта другим (Рисунок 6). Он разделил процесс смесеобразования на две фазы: фаза замещения и фаза вымывания. Объем смеси формировался фазой вымывания. Получив теоретические зависимости объема смеси для ламинарного и турбулентного режима, было доказано, что при турбулентном режиме объем смеси получался меньше почти в семь раз.

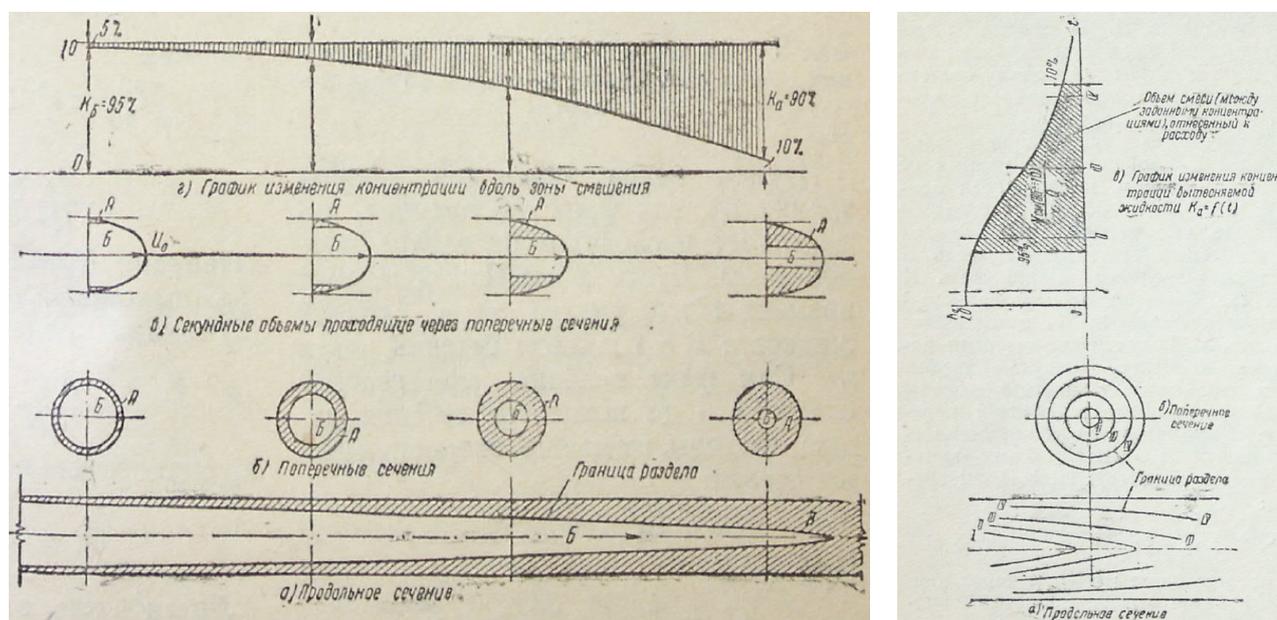


Рисунок 6 – Упрощенная схема вытеснения нефтепродуктов при их последовательной перекачке по теории В.С. Яблонского

В действительности разница между объемами смеси при ламинарном и турбулентном течении была более существенна. Первая теория не учитывала явление турбулентного перемешивания, которое в дальнейшем учел Г. Тейлор, а также и ученик В.С. Яблонского – В.А. Юфин. Эта теория базируется на том, что смесь образуется за счет турбулентного перемешивания на границе раздела жидкости. Предыдущая теория «вклинивания одной жидкости в другую» этим явлением пренебрегала. Используя законы турбулентной диффузии, Г. Тейлору и В.А. Юфину удалось свести решение к функции интеграла ошибок. Решив, что настоящая смесь принимает математическую концентрацию от 0,01 до 0,99, было получено уравнение объема получаемой смеси (Рисунок 7).

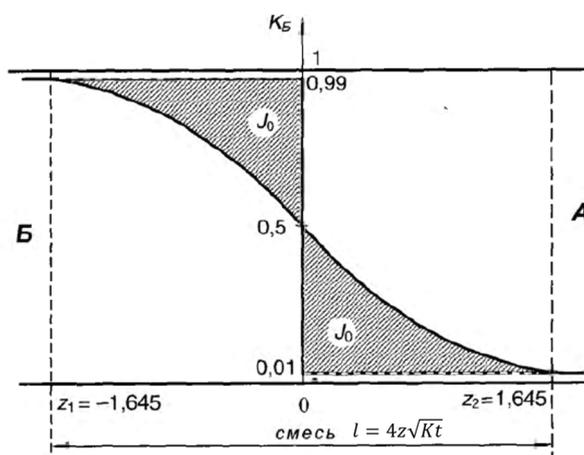


Рисунок 7 – График функции концентрации в смеси, сведенная к интегралу ошибок: *A* – вытесняемая жидкость; *B* – вытесняющая жидкость

Таким образом, в трубопроводном транспорте для решения задачи снижения объема смеси в качестве управляющего фактора было использовано турбулизация потока и увеличение его скорости, что позволяло снизить поверхность соприкосновения жидкостей друг с другом.

Развитие теории смесеобразования, предназначенной для управления свойствами перекачиваемой среды за счет изменения ее состава, еще более закрепило исследовательский интерес к анализу внутреннего строения нефтяных сред. Определение коэффициента диффузии для смешиваемых жидкостей приводило к заключению, что сами исходные смешиваемые нефтяные среды также можно представляют собой смесь различных углеводородных соединений.

Анализ содержания высокомолекулярных соединений в нефтяных средах и развитие управляющих методов воздействия на них для получения необходимых физико-химических свойств представлены **в третьей главе**.

К началу 1920-х годов века благодаря развитию коллоидной химии и работам зарубежных нефтехимиков Р. Залозецкого, Д. Гольде, С. Айзинмана и других, а также трудам советских ученых Л.Г. Гурвича и А.Н. Саханова, в научной среде сформировались новые представления о внутренней структуре и способах анализа и определения содержания в нефтяных средах высокомолекулярных соединений. Именно эти вещества являются во многом источником проявления аномалий различных свойств, например, выпадения в осадок отложений при смешении нефти с бензиновыми дистиллятами, как отмечалось ранее, или проявления аномалий течения жидкости, которое не может быть описано моделью вязкого течения Ньютона.

После детального описания процесса образования кристаллической решетки из частиц парафина при снижении температуры А.Н. Саханов переключил свое внимание на течение таких нефтей при температурах, близких и даже ниже температуры застывания. Совместно с А.А. Кашеевым им были организованы наблюдения за перекачкой нефти с температурой застывания от 12 до 20 °С по нефтепроводу Грозный–Петровск в апреле–мае 1925 года, когда

температура грунта на глубине заложения нефтепровода составляла 9–11 °С. Обратным пересчетом из гидравлических формул было получено, что вязкость вблизи температуры застывания зависит от скорости перекачки. Чем больше скорость, тем меньше получалась расчетная вязкость.

Этой особенностью течения парафинистых нефтей вблизи температуры застывания заинтересовался Л.С. Лейбензон. Он предположил, что при течении вязких сред тепло трения слоев друг о друга повышает температуру подвижной жидкости и тем самым вызывает снижение вязкости (Рисунок 8), но А.Н. Саханов показал, что даже с учетом его поправки количественная часть недостаточна для объяснения снижения расчетной вязкости нефти в трубопроводе.

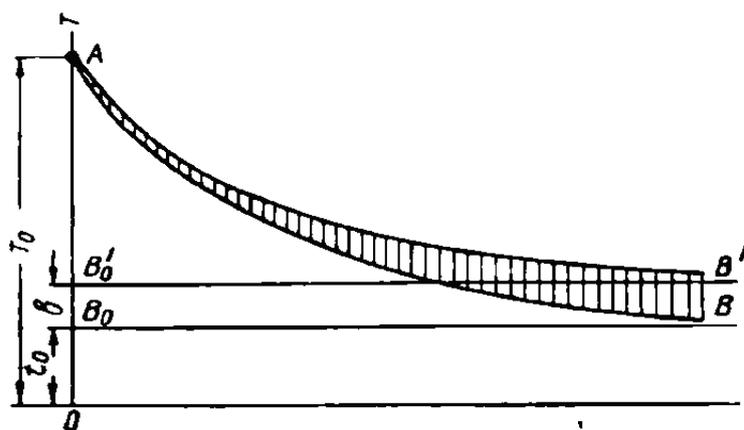


Рисунок 8 – Увеличение температуры потока по длине трубопровода с учетом поправки Л.С. Лейбензона

С целью изучения данного явления Л.С. Лейбензон совместно со своими сотрудниками Б.Я. Стародубом и А.В. Гермогеновым экспериментально проверяли теорию течения нефти в трубопроводе при температуре, близкой к температуре застывания, на основе предположения о наличии близ стенки подвижного расплавленного слоя и сформулировали новую пластико-динамическую теорию движения неньютоновской жидкости (Рисунок 9).

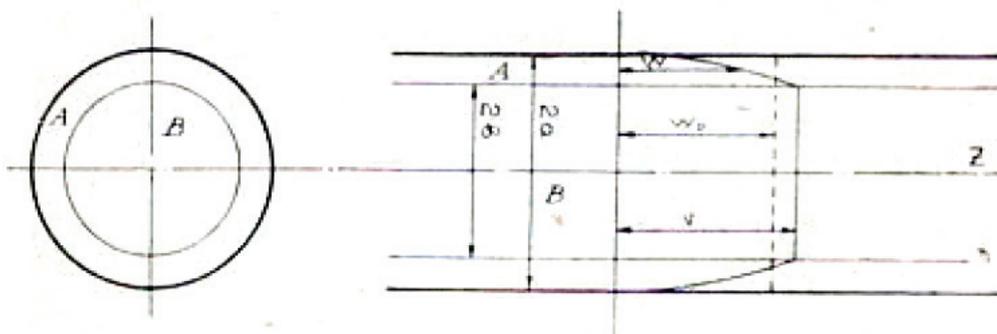


Рисунок 9 – Схема пластико-динамического неньютоновского течения по Л.С. Лейбензону

Таким образом, предположение о зависимости вязкости от скорости потока оказалось верным и, таким образом, впервые в трубопроводном транспорте столкнулись с течением неньютоновских сред, несмотря на уже имеющееся изобретение первого в мире ротационного вискозиметра Ф.Н. Шведова (Рисунок 10) и разработкой им первых теорий течения вязкопластичных тел в 1889 году.

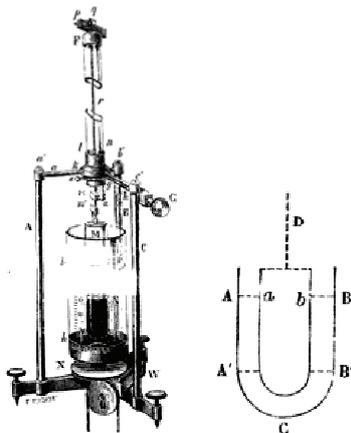


Рисунок 10 – Первый в мире ротационный вискозиметр Ф.Н. Шведова

Таким образом, в 1920–1930-х годах в отрасли трубопроводного транспорта появляется новое представление о нефти как о сложной дисперсной системе, дисперсной фазой которой являются высокомолекулярные парафины, смолы и асфальтены. Их взаимное влияние друг на друга в различных условиях формирует то или иное дисперсное состояние жидкости, характеризующееся набором параметров ее течения.

Высокое содержание высокомолекулярных соединений в нефтяной среде особенно влияло на температуру ее застывания. Еще в конце XIX века Д. Гольде обнаружил, что температура застывания нефтяных масел изменяется в зависимости от температуры предварительного подогрева. Слегка подогретые масла застывали при более высоких температурах, чем масла, которые не подвергались предварительному нагреву. Подобное явление наблюдалось для только приготовленного горячего грозненского парафинистого мазута. По мере его хранения температура застывания мазута повышалась.

Н.Д. Граменицкий в 1922 году, исследуя влияние предварительного подогрева нефти на ее температуру застывания, получил следующие выводы. Температура застывания увеличивается при небольшом предварительном нагреве, образуя максимум в диапазоне температур подогрева от 30–70 °С в зависимости от вида и состава нефти. При более сильном подогреве от 100 °С и выше происходит значительное понижение температуры застывания. Последний факт говорил о возможности использования предварительной термообработки парафинистых нефтей и мазутов для повышения их текучести перед их транспортировкой по трубопроводам. Н.Д. Граменицкий отмечал о влиянии смол на выявленные закономерности изменения температуры застывания в зависимости от предыдущего теплового состояния. Годом ранее Л.Г. Гурвич также отмечал влияние смол на процесс кристаллизации

парафинов. Удаляя смолы из парафинистой нефти, он обнаружил значительно больше крупных кристаллов парафинов. Наиболее ясную физическую картину этого явления описал Б.Г. Тычинин, который представил результаты исследований влияния предварительной термообработки мазутов на внутреннюю структурную форму нахождения кристаллов парафина в них с помощью поляризационного микроскопа (Рисунок 11).

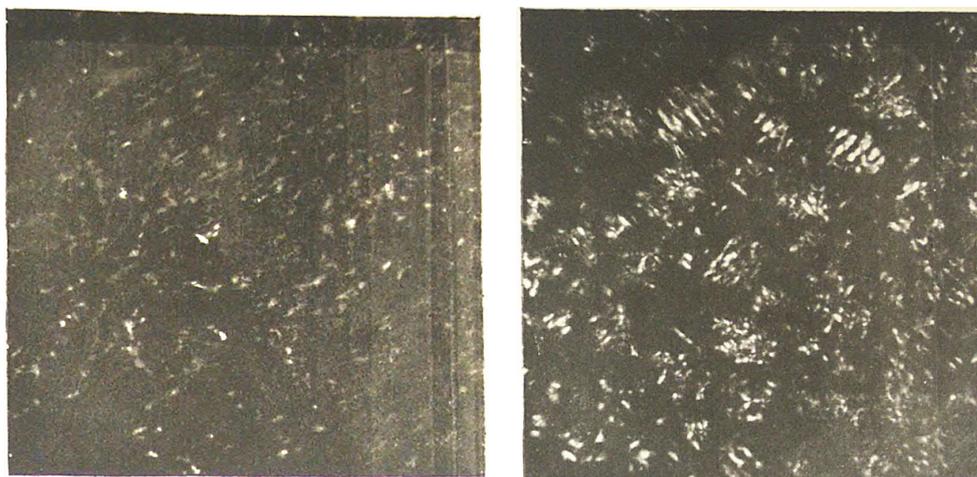


Рисунок 11 – Влияние предварительной температурной обработки на внутреннюю структуру высокомолекулярных соединений в нефти по Б.Г. Тычинину

В трубопроводном транспорте впервые с этим явлением столкнулись А.Н. Саханов и А.А. Кашеев при исследовании перекачки мазутов и парафинистых нефтей на нефтепроводе Грозный–Петровск в 1925–1926 годах. Они обнаружили, что перекачиваемый мазут в остывшем холодном состоянии тек гораздо легче, чем в теплом состоянии с остыванием по мере движения по трубопроводу.

Впервые термообработку в промышленных масштабах применили в Индии в начале 1960-х годов на месторождений Нахократия.

Обнаружение необходимости наличия асфальто-смолистых соединений для проявления эффекта термообработки парафинистых нефтей и мазутов в 1920-х годах дали импульс развитию нового метода снижения температуры застывания путем добавки веществ, не позволяющих образоваться кристаллам парафинов. Добавление асфальто-смолистых веществ, содержащих в своем составе кислород, серу, азот и некоторые металлы, в нефти и мазуты не могло быть использовано, так как при их сжигании образуется едкий дым, возрастает нагарообразование, а их наличие в смазочных материалах приводит к ускорению их окисления на воздухе и высокотемпературной коррозии в смазывающих устройствах.

Наиболее актуальным стал вопрос снижения температуры застывания при производстве смазок из парафинистых нефтей. Разработанные к тому времени методы депарафинизации были дорогостоящими и малоэффективными. К тому же сильное обеспарафинивание ухудшало смазывающую способность

получаемых масел. В 1931 году Х.Б. Девис и А.И. Блеквуд разрабатывают для американской компании «Стандарт ойл Девелопмент» новое синтетическое масло на основе конденсации нафталина с хлорированным парафином в присутствии хлористого алюминия по реакции Фриделя-Крафтса. Добавление его небольшого количества в парафинистые масла значительно снижало ее температуру застывания (Рисунок 12). В 1934 году советский нефтехимик индийского происхождения К.С. Рамайя в качестве присадок использовал металлические мыла, и наилучший эффект снижения температуры застывания давал стеарат алюминия. В 1936 году сотрудниками американской компаний «Сакони-Вейкум Ойл Ко» Орландом М. Рейфом и Дарнином Э. Баденчером было синтезировано соединение, названное «сантопур», представляющее собой продукт конденсации хлорированного парафина с фенолом. Сегодня широко используются в качестве присадок различные виды сополимеров этилвинилацетата. Начиная с 1950-х годов, появляются присадки, которые воздействуют на структуру турбулентного потока, не меняя свойства жидкости.



Рисунок 12 – Микроструктура кристаллов *n*-тетраэтилоктана из 2%-го раствора в *n*-гептане без присадки и в ее присутствии (0,5%)

Использование деперессорных присадок в трубопроводном транспорте началось в 1970-х годах в странах Западной Европы в связи с необходимостью больших объемов перекачки высокозастывающих нефтей северной Африки, а противотурбулентные присадки начали использоваться в 1980-х годах.

В **четвертой главе** подведены итоги влияния развития способов управления свойствами и дисперсным состоянием нефтяных сред на появление в различные периоды тех или иных методов «специальной перекачки» (Рисунок 13). В качестве дальнейшего развития трубопроводного транспорта предложен концепт комплексного управления свойствами перекачиваемой среды с учетом перекачки нефтей различных месторождений по разветвленной трубопроводной системе. Важной задачей такого управления является формирование таких смесей, перекачка которых будет эффективной за счет снижения энергопотребления насосных станций. При этом нефтепровод можно заполнять одной смесью непрерывно или разными смесями последовательно.

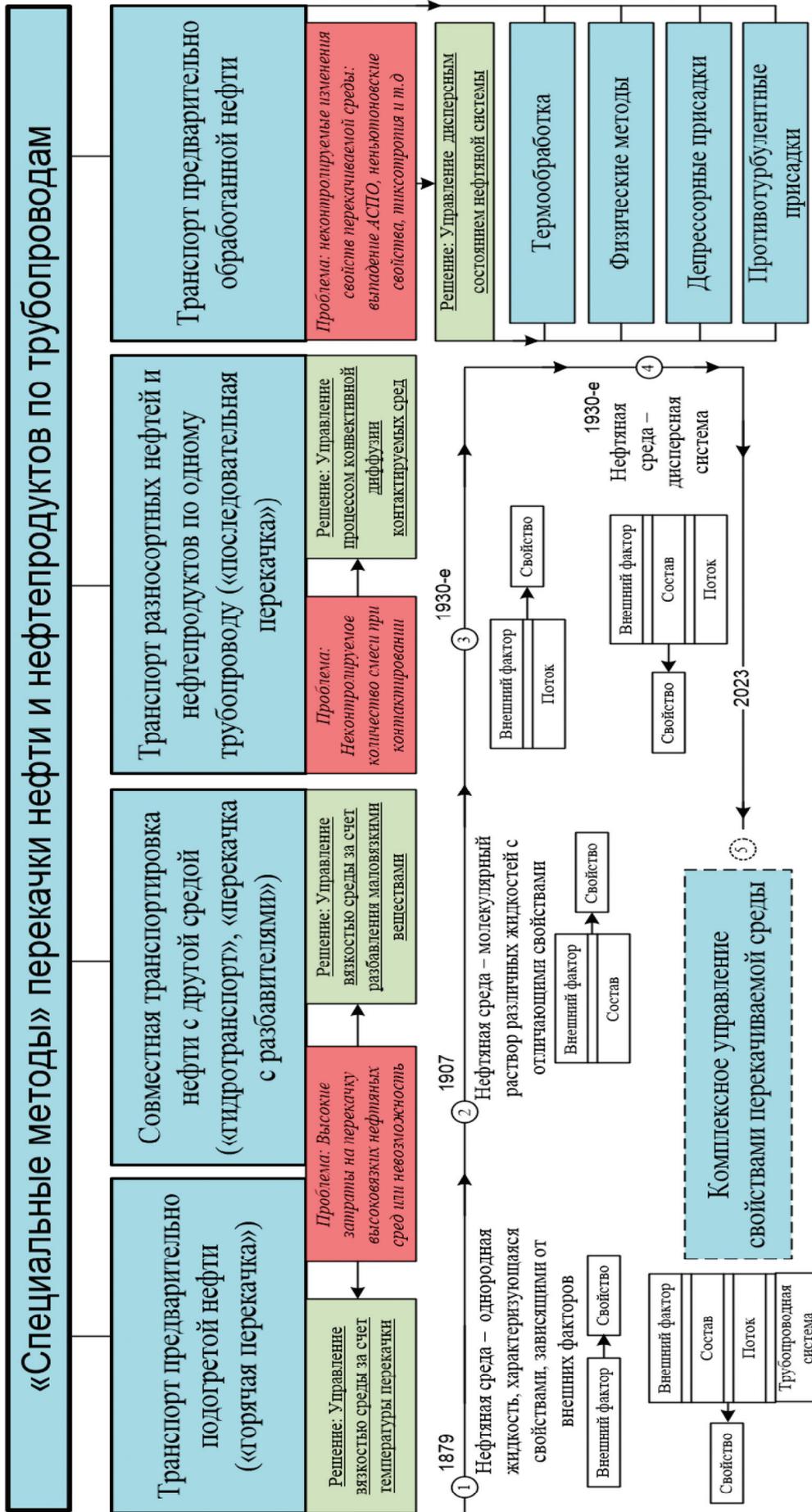


Рисунок 13 – Влияние развития знаний о внутренней структуре и строении нефтяных сред на появление новых технологий трубопроводного транспорта

Следует отметить, что даже в том случае, если невыгодно перекачивать последовательно нефти или их специально подобранные смеси с различающейся вязкостью в пределах одного технологического участка, то в рамках решения более общей задачи формирования грузопотоков нефти для системы магистральных нефтепроводов в целом вполне может сложиться ситуация, когда наиболее эффективной будет доставка вязких компонентов нефти без смешения на одном узле смешения, то есть ее перекачка отдельной партией на следующий по потоку узел смешения нефти, где можно ее разбавить маловязкими компонентами. Таким образом, возможна прямая доставка вязких компонентов на ту часть разветвленной системы магистральных нефтепроводов, которая менее чувствительна к повышению вязкости с точки зрения энергопотребления. Чтобы дополнить задачу формирования грузопотоков нефтей возможностью последовательной перекачкой вязких компонентов нефти, необходимо решить вопрос оптимального выбора концентраций смешения специально подготовленных партий нефти для их последовательной перекачки в пределах одного технологического участка магистрального нефтепровода. В общем варианте смешения двух исходных нефтей формируются две партии нефтей с отличающимися от исходных нефтей вязкостями (Рисунок 14).

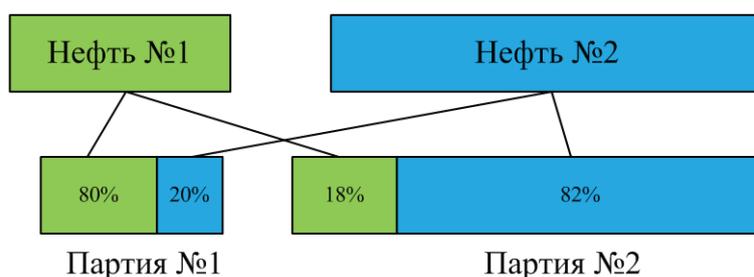


Рисунок 14 – Пример формирования партий нефти для перекачки по одному трубопроводу (общий вариант)

В работе решалась задача формирования двух партий, представляющих собой две смеси вышеуказанных исходных нефтей в различных пропорциях смешения, которые перекачиваются последовательно по одному технологическому участку магистрального нефтепровода. При этом учитывалось изменение расхода перекачки при изменении вязкости перекачиваемого продукта, а также ограничения по допустимому смешению для необходимости исполнения планового задания по перекачке нефтей в течение фиксированного времени. Было доказано, что решение поставленной задачи сводится только к двум вариантам энергоэффективного формирования смесей: перекачка нефтей в единой смеси или последовательная перекачка исходных нефтей без подмешивания друг с другом.

Выбор того или иного решения зависит от вида изменения вязкости бинарной смеси. Чем ближе вязкость смеси к линейной аддитивности, тем энергоэффективнее перекачивать нефти последовательно. В процессе

разработки способа расчета эквивалентной приведенной энергии для перекачки нефтей партиями (Рисунок 15) был предложен критерий выбора того или иного варианта, для расчета которого необходимы лабораторные замеры вязкостей и плотностей исходных нефтей и вязкости смеси в соотношении 1:1.

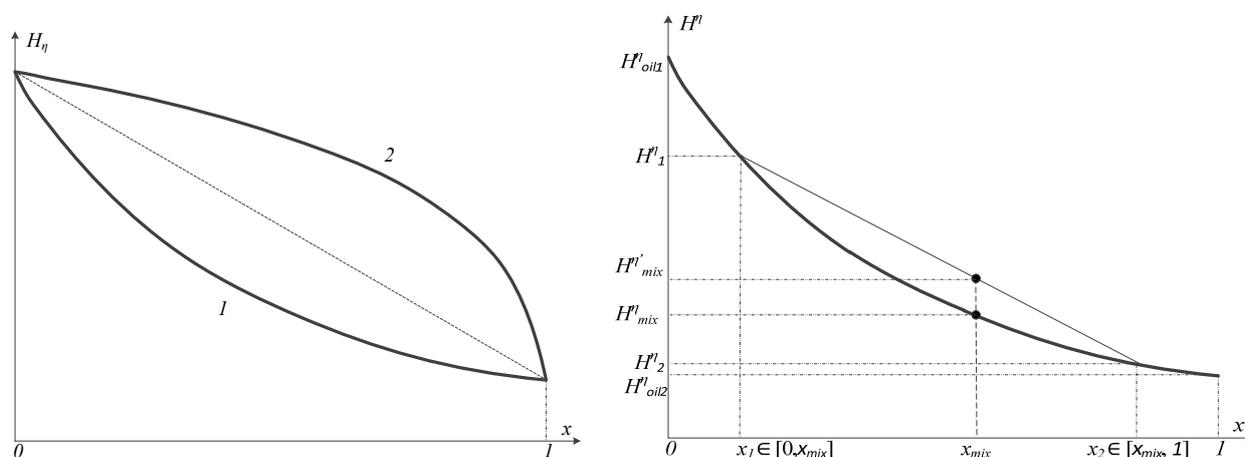


Рисунок 15 – Кривая энергопотребления перекачки для различных пар нефтей (слева) и способ графического определения эквивалентной приведенной энергии для перекачки нефтей партиями: 1 – нефти с большой кривизной изменения вязкости их смеси; 2 – нефти с малой кривизной вязкости их смеси

## ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

В диссертации сформирован новый исторический взгляд на появление в различные периоды тех или иных методов «специальной перекачки» как отражение развития способов управления свойствами, дисперсным состоянием нефтяных сред и способов адаптации «традиционного способа перекачки жидкости по трубопроводу с помощью насосов» к стабилизации этого состояния по всей длине трубопровода.

1. Первоначальное представление о нефти и нефтепродуктах в качестве единой сплошной среды, свойства которой зависят только от внешних факторов, обусловило появление технологии горячей перекачки в 1879 году. Подогрев перекачиваемой среды с помощью отработанного пара поршневых насосов того времени позволял транспортировать высоковязкие нефтяные среды и существенно уменьшить затраты на транспортировку.

2. Развитие представлений о нефтяной среде в качестве молекулярного раствора различных жидкостей с различающимися свойствами позволило сформировать соответствующие теории совместной и последовательной перекачки разноразных нефтей и нефтепродуктов по одному трубопроводу. Качественная теоретическая проработка позволила внедрять, начиная с 1930-х годов, последовательную перекачку нефтепродуктов, перекачку высоковязких нефтей с разбавителями и водой.

3. Становление представлений о нефтяной среде в качестве дисперсной системы позволило разработать технологии управления ее дисперсным состоянием. Начиная с 1960-х годов, в промышленных масштабах появляются технологии воздействия на дисперсную фазу – термообработка, воздействие депрессорными (1970-е годы) и противотурбулентными присадками (1980-е годы).

4. Предложена методология энергоэффективного управления свойствами перекачиваемой среды в разветвленной системе магистральных трубопроводов за счет формирования товарных партий из смесей различающихся по свойствам нефтей.

**Полнота изложения материалов диссертации в работах, опубликованных соискателем**

Основные результаты диссертационной работы опубликованы в 17 научных трудах, в том числе:

– *3 статьи в рецензируемых журналах, включенных в базы данных Scopus и WoS:*

1. Ташбулатов Р.Р., Каримов Р.М., Токаренко А.В., Сунагатуллин Р.З., Мастобаев Б.Н. Методология формирования товарных партий разнотипных нефтей и их смесей для последовательной перекачки по технологическому участку магистрального нефтепровода // Нефтяное хозяйство.– 2022.– №10.– С.98-103.

2. Токаренко А.В., Ташбулатов Р.Р., Мастобаев Б.Н., Макаренко О.А. Становление технологии последовательной перекачки разнотипных нефтепродуктов по одному трубопроводу // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов.– 2023.– №2.– С.174-183.

3. Токаренко А.В., Ташбулатов Р.Р., Каримов Р.М., Валеев А.Р., Мастобаев Б.Н. Становление технологии горячей перекачки нефти и нефтепродуктов по трубопроводу // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов.– 2023.– №5.– С.466-477.

– *3 статьи в ведущих рецензируемых научных журналах, включенных в перечень ВАК при Министерстве науки и высшего образования РФ:*

4. Токаренко А.В., Валеев А.Р., Мастобаев Б.Н. Развитие трубопроводного транспорта нефтепродуктов методом последовательной перекачки // История и педагогика естествознания.– 2021.– №1-2.– С.45-48.

5. Ташбулатов Р.Р., Токаренко А.В., Мастобаев Б.Н., Атрощенко Н.А. Становление и развитие методов анализа группового состава высокомолекулярных соединений нефти и нефтепродуктов // История и педагогика естествознания.– 2024.– №1.– С.16-20.

6. Ташбулатов Р.Р., Токаренко А.В., Шилов А.С., Барабанщикова Т.А. Становление методов термообработки и применения депрессорных присадок для управления дисперсным состоянием перекачиваемой нефтяной среды // История и педагогика естествознания.– 2024.– №1.– С. 10-15.

***– 1 статья в прочих журналах:***

7. Токаренко А.В., Дмитриева Т.В., Бахтизин Р.Н. Первый опыт последовательной перекачки нефтепродуктов по трубопроводам США // Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья.– 2019.– №5-6.– С.43-46.

***– 10 работ в материалах международных, всероссийских конференций и в сборниках научных трудов.***