

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
 федеральное государственное автономное  
 образовательное учреждение высшего образования  
 «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ТПУ)

Школа: Инженерная школа природных ресурсов  
 Направление подготовки (специальность): 21.03.01 Нефтегазовое дело  
 Отделение школы (НОЦ): Отделение нефтегазового дела

### БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

Тема работы
<b>АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ТЕХНОЛОГИИ ПОЛИМЕРНОГО ЗАВОДНЕНИЯ В РАЗЛИЧНЫХ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ НА МЕСТОРОЖДЕНИЯХ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ</b>

УДК 622.276.43:678.7(571.1)

#### Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
2Б6Г	Вендина Дарья Александровна		

#### Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Глызина Татьяна Святославовна	К.Х.Н.		

#### Консультант

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель	Максимова Юлия Анатольевна			

### КОНСУЛЬТАНТЫ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Якимова Татьяна Борисовна	К.Э.Н.		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент	Черемискина Мария Сергеевна			

### ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель	Максимова Юлия Анатольевна			

**Планируемые результаты обучения**

<b>Код результата</b>	<b>Результат обучения (выпускник должен быть готов)</b>	<b>Требования ФГОС, критериев и/или заинтересованных сторон</b>
<b>В соответствии с общекультурными, общепрофессиональными и профессиональными компетенциями</b>		
P1	Приобретение профессиональной эрудиции и широкого кругозора в области гуманитарных и естественных наук и использование их в профессиональной деятельности	Требования ФГОС ВО (ОК-1, ОК-2, ОК-3, ОК-4, ОК-5, ОК-7) (ЕАС-4.2а) (АВЕТ-3А)
P2	Уметь анализировать экологические последствия профессиональной деятельности в совокупности с правовыми, социальными и культурными аспектами и обеспечивать соблюдение безопасных условий труда	Требования ФГОС ВО (ОК-3, ОК-4, ОК-7, ОК-9) ПК-4, ПК-5, ПК-13, ПК-15.
P3	Уметь самостоятельно учиться и непрерывно повышать квалификацию в течение всего периода профессиональной деятельности	Требования ФГОС ВО (ОК-1, ОК-2, ОК-3, ОК-4, ОК-7, ОК-8, ОК-9) (АВЕТ-3и), ПК1, ПК-23, ОПК-6, ПК-23
P4	Грамотно решать профессиональные инженерные задачи с использованием современных образовательных и информационных технологий	Требования ФГОС ВО (ОПК-1, ОПК-2, ОПК-3, ОПК-4, ОПК-5, ОПК-6) (ЕАС-4.2d), (АВЕТ3е)
<b>в области производственно-технологической деятельности</b>		
P5	Управлять технологическими процессами, эксплуатировать и обслуживать оборудование нефтегазовых объектов	Требования ФГОС ВО (ПК-1, ПК-2, ПК-3, ПК-4, ПК-7, ПК-8, ПК-9, ПК-10, ПК-11, ПК-13, ПК-14, ПК-15)
P6	Внедрять в практическую деятельность инновационные подходы для достижения конкретных результатов	Требования ФГОС ВО (ПК-1, ПК-5, ПК-6, ПК-10, ПК-12)
<b>в области организационно-управленческой деятельности</b>		
P7	Эффективно работать индивидуально и в коллективе по междисциплинарной тематике, организовывать работу первичных производственных подразделений, обеспечивать корпоративные интересы и соблюдать корпоративную этику	Требования ФГОС ВО (ОК-5, ОК-6, ПК-16, ПК-18) (ЕАС-4.2-h), (АВЕТ-3d)
P8	Осуществлять маркетинговые исследования и участвовать в создании проектов, повышающих эффективность использования ресурсов	Требования ФГОС ВО (ПК-5, ПК-14, ПК17, ПК-19, ПК-22)
<b>в области экспериментально-исследовательской деятельности</b>		
P9	Определять, систематизировать и получать необходимые данные для экспериментально-исследовательской деятельности в нефтегазовой отрасли	Требования ФГОС ВО (ПК-21, ПК-23, ПК-24, ПК-25, ПК-26)
P10	Планировать, проводить, анализировать, обрабатывать экспериментальные исследования с интерпретацией полученных результатов с использованием современных методов моделирования и компьютерных технологий	Требования ФГОС ВО (ПК-22, ПК-23, ПК-24, ПК-25, ПК-26,) (АВЕТ-3b)
<b>в области проектной деятельности</b>		
P11	Способность применять знания, современные методы и программные средства проектирования для составления проектной и рабочей и технологической документации объектов бурения нефтяных и газовых скважин, добычи, сбора, подготовки, транспорта и хранения углеводородов	Требования ФГОС ВО (ПК-27, ПК-28, ПК-29, ПК-30) (АВЕТ-3с), (ЕАС-4.2-е)

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
 федеральное государственное автономное  
 образовательное учреждение высшего образования  
 «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ТПУ)

Школа: Инженерная школа природных ресурсов  
 Направление подготовки (специальность): 21.03.01 Нефтегазовое дело  
 Отделение школы (НОЦ): Отделение нефтегазового дела

УТВЕРЖДАЮ:  
 Руководитель ООП

\_\_\_\_\_  
 (Подпись)      (Дата)      (Ф.И.О.)

**ЗАДАНИЕ**  
**на выполнение выпускной квалификационной работы**

В форме:

Бакалаврской работы
<small>(бакалаврской работы, дипломного проекта/работы, магистерской диссертации)</small>

Студенту:

Группа	ФИО
2Б6Г	Вендина Дарья Александровна

Тема работы:

Анализ эффективности применения технологии полимерного заводнения в различных геологических условиях на месторождениях Западной Сибири	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	59-119/с от 28.02.2020

Срок сдачи студентом выполненной работы:	22.06.2020
--	------------

**ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:**

<b>Исходные данные к работе</b>	Тексты и графические материалы отчетов и исследовательских работ, фондовая и научная литература, технологические регламенты, нормативные документы.
<b>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов</b>	Обзор современных подходов к полимерному заводнению. Анализ геологических особенностей пластов для полимерного заводнения. Физико-химические процессы с полимерами. Критерии при выделении объекта для полимерного заводнения. Анализ технологии полимерного заводнения. Сравнительный анализ химических реагентов и рецептуры. Методика расчета полимерного заводнения.
<b>Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы</b> <small>(с указанием разделов)</small>	
<b>Раздел</b>	<b>Консультант</b>

Область применения полимерного заводнения	Старший преподаватель Максимова Юлия Анатольевна
Анализ технологического процесса полимерного заводнения	Старший преподаватель Максимова Юлия Анатольевна
Выводы и рекомендации по выбору оптимального состава для полимерного заводнения	Старший преподаватель Максимова Юлия Анатольевна
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Доцент, к.э.н. Якимова Татьяна Борисовна
Социальная ответственность	Ассистент, Черемискина Мария Сергеевна
<b>Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:</b>	
Область применения полимерного заводнения	
Анализ технологического процесса полимерного заводнения	
Выводы и рекомендации по выбору оптимального состава для полимерного заводнения	
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	
Социальная ответственность	

<b>Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику</b>	29.02.2020
---	------------

**Задание выдал руководитель / консультант:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Глызина Татьяна Святославовна	к.х.н.		29.02.2020
Старший преподаватель	Максимова Юлия Анатольевна			29.02.2020

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
2Б6Г	Вендина Дарья Александровна		29.02.2020

## ОБОЗНАЧЕНИЯ, ОПРЕДЕЛЕНИЯ, СОКРАЩЕНИЯ

**ПЗ** – полимерное заводнение;

**СПС** – сшитый полимерный состав;

**ПДС** – полимердисперсный состав;

**ПГС** – полимерно-гелевая система;

**ПЭЦ** – простой эфир целлюлозы;

**БП** – биополимеры;

**ГФУ** – геолого-физические условия;

**КИН** – коэффициент извлечения нефти;

**ПАВ** – поверхностно-активное вещество;

**КМЦ** – карбоксиметилцеллюлоза;

**ППД** – поддержание пластового давления;

**ПАА** – полиакриламид;

**АА** – акриламид;

**СВБ** – сульфатфосстанавливающие бактерии;

**ВНК** – водонефтяной контакт;

**КНС** – кустовые насосные станции;

**ВРБ** – водораспределительные батареи;

**МСПС** – модернизированный сшитый полимерный состав;

**МПДС** – модифицированный полимердисперсный состав;

**АМГ** – агент модифицирующий гелеобразующий;

**СИЗ** – средства индивидуальной защиты;

**ЧС** – чрезвычайные ситуации.

## РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа 93 страницы, в том числе 21 рисунок, 15 таблиц. Список литературы включает 30 источников. Работа содержит 1 приложение.

Ключевые слова: полимерное заводнение, коэффициент охвата пласта заводнением, полимер, увеличение нефтеотдачи, деструкция полимера.

Объектом исследования являются технологии полимерного заводнения.

Цель исследования – анализ технологий применения полимерного заводнения в различных геологических условиях на месторождениях Западной Сибири.

В процессе исследования были подробно рассмотрены реагенты, применяемые при полимерном заводнении, а также перспективы по применению более совершенных реагентов. Проведен анализ технологий и сопутствующих им химических реагентов, применяющихся для увеличения охвата пласта заводнением и уменьшения остаточной нефтенасыщенности. Проанализированы современные технологии полимерного заводнения.

В результате исследования выявлен положительный эффект полимерного заводнения. С помощью данной технологии можно увеличить охват пласта заводнением и добыть остаточную нефть.

Область применения: нагнетательные скважины.

Потенциальная экономическая эффективность связана с дополнительной добычей нефти за счет применения полимерного заводнения.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	9
1 ОБЛАСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ ПОЛИМЕРНОГО ЗАВОДНЕНИЯ.....	10
1.1 Обзор современных подходов к полимерному заводнению .....	13
1.2 Анализ геологических особенностей пластов для полимерного заводнения.....	18
1.3 Физико-химические процессы с полимерами.....	25
2 АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ПОЛИМЕРНОГО ЗАВОДНЕНИЯ.....	30
2.1 Критерии при выделении объекта для полимерного заводнения.....	31
2.2 Анализ технологии полимерного заводнения.....	33
2.2.1 Технология производства полимера .....	34
2.2.2 Технология подготовки воды .....	38
2.2.3 Технология приготовления раствора .....	44
2.2.4 Технология закачки в пласт .....	46
2.3 Сравнительный анализ химических реагентов и рецептуры .....	52
2.3.1 Сшитый полимерный состав.....	53
2.3.2 Полимер-дисперсный состав .....	54
2.3.3 Полимерно-гелевая система .....	55
2.3.4 Простой эфир целлюлозы .....	56
2.3.5 Биополимеры.....	57
2.3.6 АСП-заводнение.....	58
2.4 Методика расчета полимерного заводнения.....	59
3 ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ВЫБОРУ ОПТИМАЛЬНОГО СОСТАВА ДЛЯ ПОЛИМЕРНОГО ЗАВОДНЕНИЯ.....	64
4 ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ.....	69
4.1 Эффективность от применения различных составов.....	69
4.2 Анализ применения полимерного заводнения на месторождении «Х».....	70

4.3	Применение технологии полимерного заводнения.....	72
4.4	Технологическая эффективность технологии полимерного заводнения.....	73
4.5	Расчет экономической эффективности технологии полимерного заводнения.....	75
5 СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ.....		79
5.1	Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности.....	79
5.2	Производственная безопасность .....	80
5.2.1	Анализ вредных производственных факторов и обоснование мероприятий по снижению уровня воздействия .....	81
5.2.2	Анализ опасных производственных факторов и обоснование мероприятий по снижению уровня воздействия .....	84
5.3	Экологическая безопасность .....	85
5.4	Безопасность в чрезвычайных ситуациях .....	87
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....		89
СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ.....		90
Приложение А .....		93



## ВВЕДЕНИЕ

Большинство месторождений находятся на поздней стадии разработки. На таких месторождениях необходимо применять методы повышения нефтеотдачи. Основными задачами данных методов являются вовлечение слабодренируемых запасов, увеличение коэффициента извлечения нефти и коэффициента охвата пласта заводнением. Данные задачи можно решить, применяя на месторождениях технологию заводнения. Однако по сравнению с традиционным заводнением полимерное заводнение позволяет более эффективно воздействовать на пласт.

Полимерное заводнение является одной из современных технологий заводнения пластов. Основным свойством полимера является загущение воды, что делает технологию полимерного заводнения более эффективной. С помощью полимеров можно снизить динамическую неоднородность потоков флюида, тем самым увеличить охват пласта заводнением. Также полимерный раствор позволяет стабилизировать фронт вытеснения и предотвратить преждевременный прорыв воды к добывающим скважинам.

Актуальность данной работы: применение полимерного заводнения вместо традиционного заводнения.

Целью выпускной квалификационной работы является определение критериев эффективности применения технологии полимерного заводнения в различных геологических условиях на месторождениях Западной Сибири.

Для достижения цели поставлены следующие задачи:

1. Определить сущность полимерного заводнения;
2. Проанализировать геолого-физические условия применения;
3. Изучить процесс деструкции полимера;
4. Рассмотреть современные технологии полимерного заводнения.

## 1 ОБЛАСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ ПОЛИМЕРНОГО ЗАВОДНЕНИЯ

При разработке многопластовых месторождений не обеспечивается равномерное нефтевытеснение, в результате чего в малопроницаемых зонах остается нефть. Для уменьшения нефти в граничных слоях применяют реагенты, которые улучшают смачиваемость породы вытесняющей водой. Поэтому применение полимерного заводнения (ПЗ) является наиболее перспективным методом увеличения нефтеотдачи.

Полимерное заводнение – технология повышения нефтеотдачи путем увеличения коэффициента охвата пласта заводнением. Сущность данного метода заключается в том, что полимеры растворяют в воде, чтобы увеличить вязкость воды и снизить ее подвижность. Реагенты способны проникать вглубь пласта и создавать потокоотклоняющие экраны.

Существует несколько типов полимеров:

- Сшитый полимерный состав (СПС);
- Полимердисперсный состав (ПДС);
- Полимерно-гелевая система (ПГС);
- Простой эфир целлюлозы (ПЭЦ);
- Биополимеры (БП);
- АСП-заводнение.

Нефть, которая была удержана капиллярными силами или не была охвачена, остается в пласте. ПЗ способствует извлечению остаточной нефти. Полимерный раствор проникает в высокопроницаемые пропластки, в результате чего уменьшается динамическая неоднородность потоков жидкости, соответственно, увеличивается охват пласта заводнением.

При неэффективном вытеснении происходит прорыв воды к добывающим скважинам, что способствует увеличению обводнения. В данном случае соотношение подвижностей нефти и воды неблагоприятное, поэтому закачка полимера в пласт повысит коэффициент охвата. Причиной прорывов могут служить: зональная и слоистая неоднородности пласта, залегание

подошвенных вод, наличие высокопроницаемых трещин или каналов (особенно характерно для трещиновато-пористого коллектора), а также негерметичность эксплуатационной колонны. Если же пласт имеет некоторую неоднородность и благоприятное соотношение подвижностей, то при ПЗ возможно извлечь нефть из пластов, имеющих низкую проницаемость.

История ПЗ в мире началась в конце 1950-х годов, однако, на месторождениях начали применять данную технологию в 1960-х годах. ПЗ применялось на месторождениях, как один из методов увеличения нефтеотдачи. Такой тип заводнения использовался в различных геолого-физических условиях (ГФУ) в разных странах – США, Канада, Китай, Венесуэле, Индии и других. В настоящее время Китай остается лидирующей страной по применению ПЗ, которое реализуется с 1990-х годов. Многолетний опыт показал, что ПЗ эффективно применяется на месторождениях с обводненностью 95%, обеспечивая увеличение коэффициента извлечения нефти (КИН) примерно на 10%. В таблице 1 представлена таблица применения полимерного заводнения на наиболее крупных месторождениях России и мира.

Таблица 1 – Характеристики зарубежных и отечественных опытов по полимерному заводнению

Месторождение, страна, год	Температура, °С	Вязкость нефти, мПа·с	Проницаемость, мкм <sup>2</sup>	Полимер и его концентрация, %	Эффективность
Норс Хосвил, Техас, 1963	105	0,07-0,09	0,05	Pusher, 0,025-0,05	Увеличение КИН на 3,3%
Орлянокское, Россия, 1966	24,5	8,6	0,5	ПАА, 0,1	1800 т дополнительно добытой нефти на 1 т реагента
	24	12,2	0,4		

Продолжение таблицы 1

Месторождение, страна, год	Температура, °С	Вязкость нефти, мПа·с	Проницаемость, мкм <sup>2</sup>	Полимер и его концентрация, %	Эффективность
Тайбер, США, 1967	35	58	2,1	Pusher-500 и Pusher-700, 0,036 или 0,023	Разработка ведется с меньшим обводнением, чем прогнозировалось для традиционного заводнения, но преждевременный прорыв полимера свидетельствует о невысокой эффективности процесса
Тайбер Менвилл, Канада, 1971	33	120	1,92	Pusher-700, 0,025	Увеличение нефтеотдачи.
Арланское, Россия, 1975	24	19-29	0,66	CS-6, 0,075	-
Ист Коалинга, Калифорния, 1978	38	25	0,25	Келзан, 0,05	Увеличение КИН на 2,8%

В 1960-х годах в СССР изучали методы увеличения вытесняющей способности воды, которые заключались в добавлении различных химических реагентов для увеличения вытеснения нефти из малопроницаемых зон пласта. Полимерное заводнение было внедрено на месторождениях Северного моря в 1980-х годах, а именно биополимер на основе ксаната.

Биополимер «Симусан» был применен на Арланском месторождении в 1987 году. Полимер закачивали в 53 нагнетательные скважины с период 1987-1990 гг. Технологический эффект после применения БП был 400-800 тонн дополнительно добытой нефти на одну тонну закаченного реагента. Однако закачку полимера остановили по причине отсутствия биополимера.

Биополимер «Продукт БП-92» в 1999 году был внедрен на Покамасовском месторождении. Было произведено 69 операций по закачке

реагента в пласт. В пласт было закачено 50 тыс. м<sup>3</sup> реактива [1]. Технологический эффект от применения данного полимера составил более 500 тонн дополнительно добытой нефти на 1 тонну реагента.

Таким образом, чтобы увеличить нефтеотдачу пластов необходимо использовать ПЗ. С помощью данной технологии возможно уменьшить отношение подвижностей агента вытеснения и нефти за счет чего уменьшится количество остаточной нефти в зоне закачки. Также в результате применения ПЗ увеличится коэффициент охвата пласта вытеснением.

### **1.1 Обзор современных подходов к полимерному заводнению**

В последние годы часто используется щелочно-ПАВ-полимерное воздействие на пласт, которое получило название АСП-заводнение. Данный тип полимерного заводнения включается в свой состав несколько компонентов: полимер, поверхностно-активное вещество (ПАВ) и щелочной агент (сода). Данный вид полимера был разработан в 1980-х годах. Разработкой АСП-заводнения занимались в научно-исследовательском центре компании Shell в США.

АСП-заводнение наиболее эффективно, так как каждый компонент состава оказывает свое воздействие на пласт. ПАВ адсорбируется на границе раздела нефть-вода, в результате чего межфазное натяжение уменьшается. Это приводит к тому, что происходит мобилизация нефти, зацементированной между зернами породы. Полимер повышает вязкость раствора. Охват пласта процессом заводнения увеличивается при закачке в пласт более вязкого раствора. Все это в свою очередь делает возможным более эффективно вытеснять мобилизованную ПАВ нефть. Увеличивая подвижность нефти, сода уменьшает смачиваемость породы нефтью. При использовании щелочного агента уменьшается осаждение на породе ПАВ. Вступая в реакцию с кислой нефтью, имеющей большое содержание примеси серы, происходит образование дополнительного объема ПАВ.

При одновременном использовании соды и ПАВ повышается мобильность пластовой нефти. Применение полимера, в свою очередь, увеличивает коэффициент охвата пласта заводнением по сравнению с обычным заводнением. Эффективность нефтевытеснения увеличивается при совместном воздействии на нефть, поступающей в добывающие скважины. Однако количество добываемых флюидов не изменяется. Количество добываемой воды уменьшается, а количество нефти – увеличивается.

Компания «Салым Петролеум Девелопмент Н.В.», совместная компания с ПАО «Газпром нефть» и Shell, в 2008 году начала изучение оптимального состава АСП. При применении АСП-заводнения необходимо с помощью испытаний в лаборатории подобрать состав реагента, чтобы он удовлетворял геолого-техническим особенностям пласта. В ходе проведения полевых испытаний в 2009 году на одной из скважин было установлено, что с помощью данной технологии возможно выработать до 30% остаточной нефти.

На Западно-Салымском месторождении применяется технология АСП-заводнения. В 2014-2015 гг. было пробурено 5 скважин и было построено необходимое оборудование: трубопровод, блок разделения эмульсии и установка смешения АСП. С 2016 года начали закачку реагента в пласт.

По оценкам специалистов применение технологии АСП-заводнения в течение 15 лет позволит добыть дополнительно до 25 млн тонн нефти, что соответствует приросту КИН примерно на 10% в целом по месторождению. На тех участках, где непосредственно будет использоваться данная технология ожидается прирост КИН на 15-20%. Внедрение же данной технологии на территории Ханты-Мансийского автономного округа повысит объем добываемой нефти на 2,4 млрд тонн.

Также свое применение АСП-заводнение нашло на месторождении Моонеу Bluesky в Канаде. Залежь была введена в эксплуатацию в 1987 году. Однако в 1997 году разработка месторождения была остановлена из-за высокой обводненности продукции и низкого дебита. Причиной остановки были ограниченная мощность пласта и высокая вязкость нефти (0,3-1,5 Па·с).

Скважина повторно была введена в эксплуатацию в 2005 году. Дебит скважин увеличился. Тем не менее вода добывалась с самого начала из-за наличия в коллекторе подвижной воды. Данная ситуация привела к тому, что было решено применить на данном месторождении ПЗ, испытание которого начали в 2008 году. Концентрация полимера была 1500 мг/л и вязкость – 0,02-0,03 Па·с. Благодаря данной технологии удалось увеличить дебит и поддерживать его стабильный уровень в нескольких скважинах, расположенных близко к нагнетательным. Тем не менее в скважине с ограниченным отбором произошел прорыв воды в течение 4 месяцев, что видно из рисунка 1. Ожидаемый КИН после применения ПЗ ожидался примерно 18%.

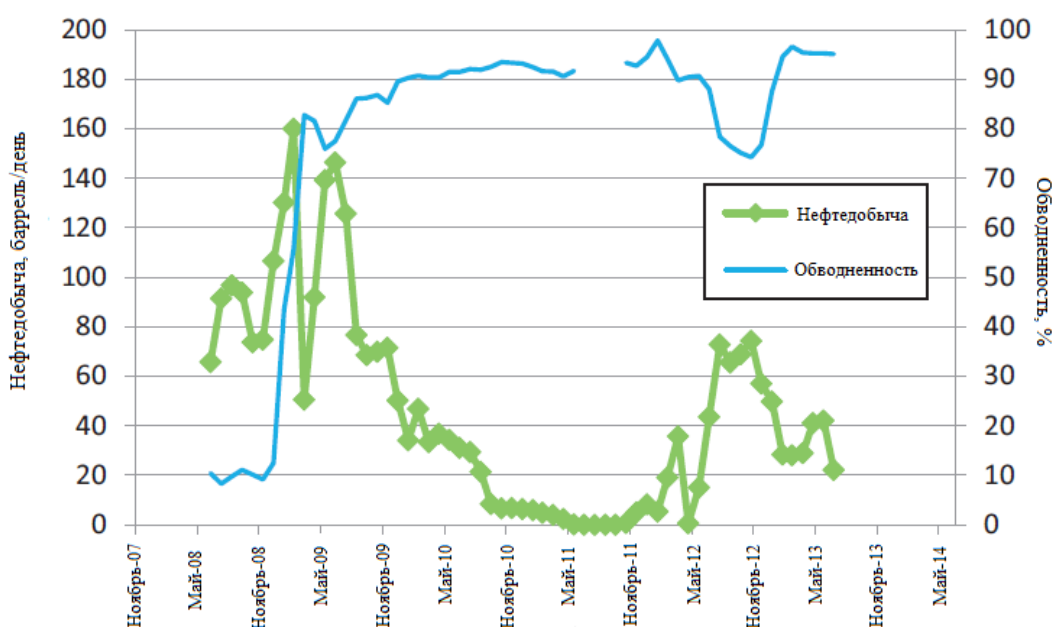


Рисунок 1 – График применения полимерного заводнения на месторождении Моопеу

Для того, чтобы еще увеличить КИН на месторождении провели технологию АСП-заводнения в 2011 году на 23 нагнетательных скважинах. Состав раствора, закачиваемого в пласт: карбонат натрия  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  концентрацией 1,5% масс., концентрация ПАВ – 0,15% масс. и полимер концентрацией 2200 мг/л. К концу 2013 года наблюдалось снижение дебита нефти. Обводненность сначала немного уменьшилась, затем снова начала увеличиваться.

В 2016 году из-за больших эксплуатационных затрат пришлось остановить вновь закачку раствора в пласт. Подсчитав суммарную добычу на исследуемом участке, было видно, что добыча нефти составила порядка 9%, что оказалось значительно меньше ожидаемого результата [2].

Таким образом, в последнее время все большую популярность набирает технология АСП-заводнения. В результате данной технологии возможно дополнительно добывать до 30% флюида. Однако необходимо для каждого объекта заводнения подбирать индивидуальный состав раствора. При применении АСП-заводнения нагрузка на окружающую среду заметно снижается. Для использования данной технологии не требуется строительства дополнительной инфраструктуры, соответственно, сокращается объем отходов. Сами же реагенты нетоксичны, также могут использоваться в бытовой химии, такие, как ПАВ и сода, и в водоочистке – полимер. При использовании АСП-заводнения средний срок нефтедобычи составляет примерно 3-5 лет, в то время как при использовании традиционного заводнения на извлечение нефти этот срок увеличивается до десятилетия.

На месторождении Биби-Эйбат в Азербайджане применяют полимерный раствор на основе натриевой соли карбоксиметилцеллюлозы (КМЦ). Данный вид полимера является водорастворимым. КМЦ имеет ряд преимуществ таких, как: небольшой расход, использование для высоковязкой нефти. Однако, как и остальные виды полимеров, данный тип полимера чувствителен к температуре и минерализации пластовой воды. Поэтому на данном месторождении к КМЦ добавляют наночастицы алюминия Al и меди Cu для более эффективного вытеснения трудноизвлекаемых запасов нефти за счет увеличения охвата пласта заводнением и снижения отношения подвижностей нефти и вытесняющего агента. Полученный раствор называют полимерным нанокомпозитом.

На месторождении было проведено испытание для подбора оптимальной концентрации полимерных нанокомпозитов. На рисунке 2 представлена диаграмма, которая отображает результаты влияния различной концентрации растворов на его динамическую вязкость.



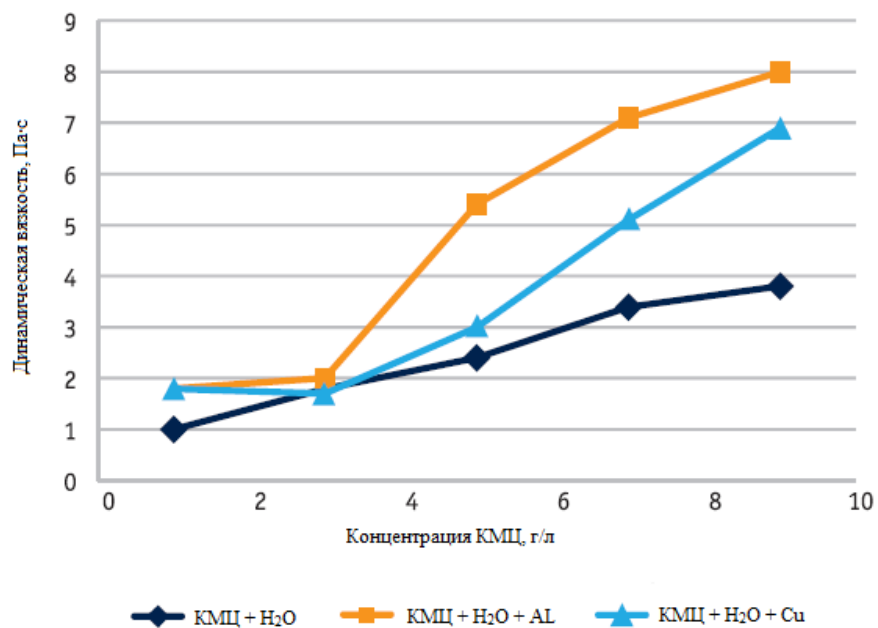


Рисунок 2 – Влияние концентрации и состава раствора на динамическую вязкость

Как видно из графика, при небольших концентрация раствора (1-3 г/л) нет большой разницы в том, какой состав композита использовать, так как динамическая вязкость практически не изменяется. Но при увеличении концентрации КМЦ наблюдается больший разрыв в значениях динамической вязкости. Однако при равных концентрациях КМЦ динамическая вязкость больше у полимерного раствора с наночастицами алюминия Al. Важным условием эффективного заводнения является соотношение динамической вязкости нефти и вытесняющего агента. Чем ближе значения вязкостей друг к другу, тем будет более эффективно происходить вытеснение и тем больше будет коэффициент охвата пласта заводнением. Подтверждение данного заключения можно проиллюстрировать рисунком 3. Из рисунка видно, что при концентрации КМЦ 5 г/л будет наибольший КИН. На месторождении применяли это значение концентрации, в результате которого получили КИН примерно 60% от текущего значения.

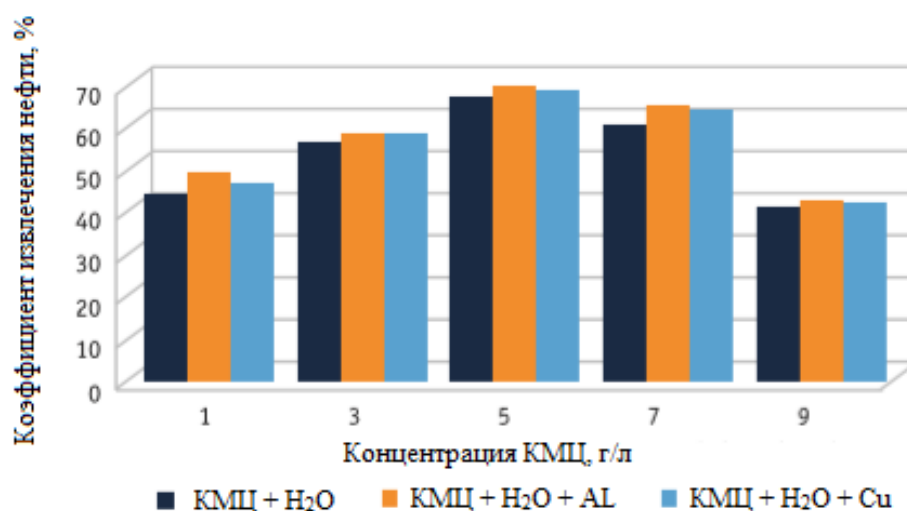


Рисунок 3 – Влияние концентрации карбоксиметилцеллюлозы на коэффициент извлечения нефти

Итак, полимерные композиты можно также использовать как вытесняющий агент для более эффективного заводнения. При добавлении к КМЦ наночастиц алюминия или меди можно добиться необходимой динамической вязкости. Данные элементы увеличивают вязкость раствора. Чем выше вязкость, тем выше нефтewытесняющая способность, а также охват пласта заводнением. Полимерные нанокомпозиты с алюминием более эффективно воздействуют на пласт [3].

## 1.2 Анализ геологических особенностей пластов для полимерного заводнения

При применении ПЗ происходит большее нефтewытеснение в сравнении с традиционным заводнением, что иллюстрирует рисунок 4. ПЗ заключается в смешивании воды и полимера и закачки данного раствора в пласт. Раствор необходимо закачивать до тех пор, пока полимер не заполнит  $\frac{1}{3}$ –  $\frac{1}{2}$  порового пространства коллектора. Обычно полимерные растворы представляют собой оторочку размером 40-50% от объема пор.

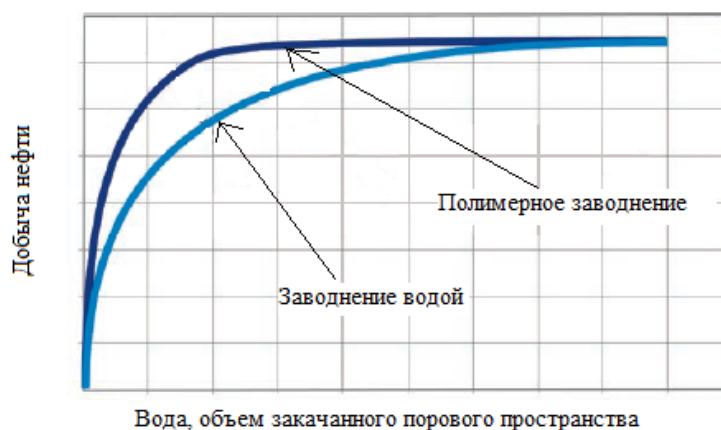


Рисунок 4 – Сравнение полимерного и традиционного заводнения

Вода, которая закачивается в пласт, стремится пройти путь меньшего сопротивления к соседним добывающим скважинам, т.е. попасть в область, где более высокая проницаемость и более низкое давление. Если вязкость нагнетаемой воды меньше вязкости нефти, то вода будет проходить через нефть или обходить ее. Все это приводит к уменьшению коэффициента охвата пласта заводнением, также будет наблюдаться уменьшение нефтеотдачи.

При выборе полимера необходимо рассмотреть геолого-физические условия применения для ПЗ. Диапазон ГФУ в последнее время значительно расширился. Это связано с тем, что разработки в нефтехимии позволили адаптировать полимеры и сделать их более устойчивыми к температуре пласта, минерализации пластовой воды и коэффициенту сдвига. Также добавляют специальные защитные добавки, чтобы полимеры были более устойчивы к жестким средам.

Новые исследования в области ПЗ, учитывая особенности закачки реагента в пласт, уменьшают риск разрушения полимера и повышают эффективность применения технологии. В настоящее время ПЗ осуществляется при больших значениях температур, минерализации и в пластах с тяжелой нефтью. В таблице 2 представлены контрольные параметры полимерного заводнения.

Таблица 2 – Параметры полимерного заводнения

Характеристики коллектора	Текущий диапазон применения
Проницаемость, мкм <sup>2</sup>	0,01 – 2
Температура, °С	80 – 120
Литологический состав	Песчаник
Вязкость нефти в пласте, Па·с	Менее 10
Плотность нефти, кг/м <sup>3</sup>	Более 965,9
Минерализация, г/л	Менее 270
Нефтенасыщенность, %	Более 20

Важную роль при применении ПЗ играют проницаемость пласта, пластовая температура и минерализация воды. Учитывая тот факт, что в карбонатных коллекторах присутствуют такие ионы, как кальций  $Ca^{2+}$  и магний  $Mg^{2+}$ , в данных коллекторах происходит осаждение полимера солями кальция и магния. Все это отрицательно сказывается на процессе заводнения.

Проницаемость породы воздействует на реологические свойства полимера при фильтрации в пористой среде. Снижение проницаемости влечет за собой увеличение показателей реологических свойств растворов. Особенно сильно это сказывается на остаточном факторе сопротивления. По данному параметру возможно оценить действие полимера. Фактор сопротивления связан с сорбцией полимера породами. Сорбция - процесс поглощения полимерами растворенных веществ из окружающей среды. Уменьшение проницаемости пласта для полимерного раствора происходит намного сильнее, чем изменение соотношения вязкости нефти и воды. Это называется фактор сопротивления. Остаточный фактор сопротивления заключается в том, что даже после полного разрушения полимера проницаемость пласта не восстанавливается полностью. Если проницаемость менее 0,01 мкм<sup>2</sup>, то процесс ПЗ практически невозможен, так как размеры полимера больше размеров пор. В результате этого происходит кольматация призабойной зоны пласта, т.е. ее засорение, или механическая деструкция.

Обладая высокой вязкостью, растворы полимера способны вытеснять нефть и связанную воду из пористой среды. В результате чего происходит

взаимодействие со скелетом пористой среды (с породой и цементирующим веществом). Этот процесс называется адсорбцией полимера (рисунок 5). В ходе процесса адсорбции происходит осаждение молекул полимера на поверхности среды и закупоривание каналов, т.е. происходит ухудшение фильтрации воды. Минерализация воды и минеральный состав породы влияют на величину адсорбции. Для снижения адсорбции существует необходимость создания оторочки из пресной воды.

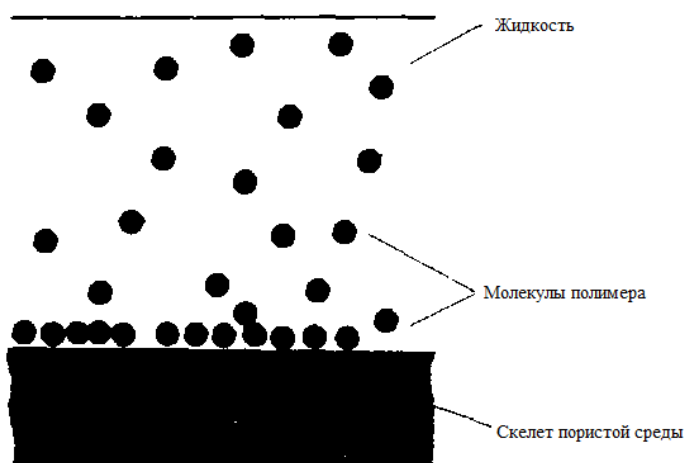


Рисунок 5 – Адсорбция полимера

Существует диапазон значений адсорбции, при которой процесс заводнения будет наиболее эффективен. Минимальный эффект заводнения будет наблюдаться при нулевой адсорбции, что видно из рисунка 6.

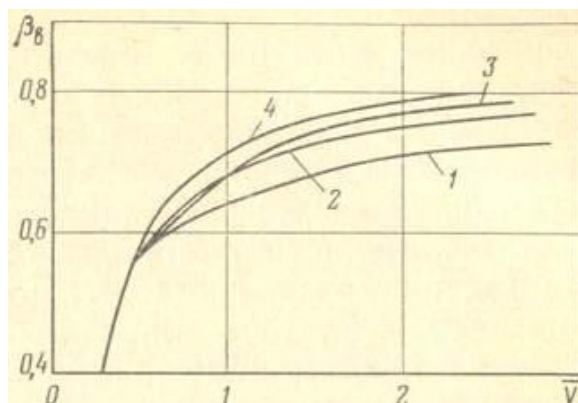


Рисунок 6 – Зависимость коэффициента вытеснения от относительного отбора при разной сорбируемости полимера

Вытеснение происходит: 1 – водой; 2, 3, 4 – полимерным раствором с разным коэффициентом десорбции 0; 1 и 0,5 соответственно

Данную зависимость можно объяснить тем, что полимерный раствор в пласте перемешивается с связанной водой и разрушается. Это приводит к снижению вязкости. В результате данного процесса происходит образование зоны неактивной воды. Однако задача полимерного раствора состоит в том, чтобы увеличить вязкость воды и понизить ее подвижность, а также увеличить фактор сопротивления при малой скорости фильтрации раствора, что может обеспечить процесс адсорбции полимера. Таким образом, снижение адсорбции снижает фактор сопротивления пласта для воды, а также снижает охват пласта заводнением, что делает процесс заводнения недостаточно эффективным.

С другой стороны, при большой адсорбции наблюдается снижение нефтеотдачи. Фронт вытеснения нефти полимером отстает от фронта вытеснения водой, соответственно, большая часть нефти вытесняется неактивной водой. В результате этого нефтеотдача пласта снижается. Поэтому для наиболее эффективного вытеснения необходимо подобрать оптимальную адсорбцию полимера.

Полимер при высоких пластовых температурах теряет устойчивость, поэтому необходимо добавлять стабилизаторы. Данные вещества способны повышать устойчивость полимера к температуре, а также не давать полимеру осаждаться из раствора. Из рисунка 7 видно, что при одинаковой температуре отношение вязкостей будет тем меньше, чем меньше концентрация раствора. Также данного графика видно, что чем больше концентрация раствора, тем больше будет влияние температуры на отношение вязкостей.

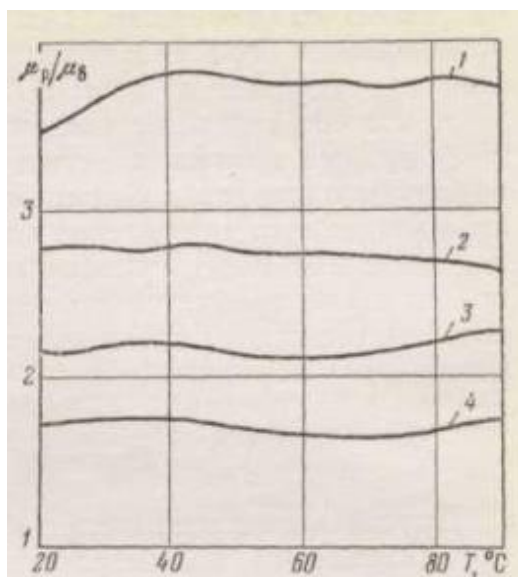


Рисунок 7 – Влияние температуры на отношение вязкостей полимерного раствора и воды при различных концентрациях

Концентрация, %: 1 – 0,1; 2- 0,05; 3 – 0,03; 4 – 0,015

Температурную обстановку в пласте можно отследить по геотермическому градиенту, т.е. приросту пластовой температуры на 1 м глубины, и геотермической ступени – величина, обратная геотермическому градиенту. В недрах существуют не только участки с нормальными значениями температур, а также наблюдаются участки с аномальными температурами. Величина геотермического градиента уменьшается в синклинальных зонах и возрастает в антиклинальных. Таким образом, синклинали являются зонами пониженной температуры. Это объясняется тем, что в районах синклинальных впадин и прогибов преобладают глинистые породы, которые, в свою очередь, обладают меньшей теплопроводностью. Антиклинали – зоны повышенной температуры (рисунок 8). Эти аномалии вызваны тем, что в пределах поднятий преобладает песчаный разрез, который обладает повышенной теплопроводностью. Повышенные температуры считаются температуры выше 95°C при градиенте выше 4°C/100м.



Рисунок 8 – Геотермический градиент в различных складках горных пород

Изменение температуры в пласте приводит к изменению объемов жидкости, газа и вмещающих пород. В результате повышения температуры происходит снижение вязкости нефти и воды и повышение вязкости газа. Пластовое давление повышается при увеличении температуры в замкнутом резервуаре. Изменение фазовых соотношений в залежах и растворимости газов в воде и нефти, а также солей в воде связано с пластовой температурой. Снижение пластовой температуры влечет за собой осложнение добычи углеводородов и приводит к потере ценных продуктов (вязкой нефти, конденсата и парафина), поэтому разработка нефтяных месторождений ведется с увеличением пластовой температуры [4].

Давление для закачки полимерных растворов в пласт должно быть выше давления обычного заводнения. Соответственно, оптимальное давление должно быть 20-22 МПа. Такое давление необходимо, чтобы поддерживать пластовое давление из-за повышения вязкости вытесняющего агента, появления дополнительного сопротивления среды, а также из-за проявления кажущейся вязкости раствора. По этим причинам ПЗ окажется малоэффективным в слабопроницаемых пластах. В ходе фильтрации через пористую среду в растворе проявляется кажущая вязкость, как уже говорилось выше. Вязкость оказывается в 10-20 раз выше вязкости, измеренной вискозиметром. В результате этого ПЗ более эффективно применять для нефти, обладающей высокой вязкостью, чтобы увеличить коэффициент охвата пласта заводнением.

При перемешивании полимера и пластовой воды наблюдается разрушение молекул и, соответственно, снижение вязкости. Если пластовая вода



обладает высокой минерализацией, то концентрация полимера должна быть в 2-3 раза выше. Однако для эффективного ПЗ лучше использовать слабоминерализованную воду с небольшим содержанием кальция и магния.

Действующая система поддержания пластового давления (ППД) – внутриконтурное заводнение. Также следует учесть, что при обводненности продукции более 80% применение ПЗ становится неэффективно. Это объясняется тем, что при данных условиях фильтрационное сопротивление пористой среды практически не меняется при применении полимера.

Таким образом, выбор полимера и/или защиты полимера является важным звеном в процессе ПЗ. Наиболее главные параметры, которым должны удовлетворять полимеры: пластовая температура, проницаемость пласта и минерализация закачиваемой воды. Необходимо уделять должное внимание такому геолого-физическому параметру, как пластовая температура. Для повышения нефтеотдачи стабильность реагентов определяет продолжительность эффекта заводнения, соответственно реагент должен быть устойчив к повышенной пластовой температуре.

### **1.3 Физико-химические процессы с полимерами**

При применении ПЗ полимеры с большой молекулярной массой подвержены различным деструкциям, т.е. разрушениям молекул полимера. Процесс деструкции приводит к ухудшению заводнения и уменьшению нефтеотдачи. Существует несколько типов деструкции полимера:

- Химическая деструкция – образование свободных радикалов;
- Механическая деструкция – происходит при воздействии на основную цепь полимера большого сдвигового напряжения;
- Термическая деструкция – воздействие температуры на полимер;
- Биологическое разложение полимера.

Химическая деструкция является следствием взаимодействия молекул полимера и кислорода. Полимер перед закачкой в пласт растворяют в «воде для растворения», а затем в «воде для разбавления». После раствор закачивают в

пласт. Вода, с помощью которой получают необходимый раствор для заводнения, содержит в своем составе элементы, способные вступать в реакцию: растворенный кислород  $O_2$ , сероводород  $H_2S$ , железо  $Fe^{2+}$  и пр. Благодаря взаимодействию окислителя и восстановителя образуются свободные радикалы. При контакте с полиакриламидом (ПАА) происходит разрушение полимера. В следствие того, что один свободный радикал способен разрушить большое количество молекул, данную реакцию считают цепной.

Чтобы уменьшить вероятность наступления химической деструкции необходимо либо подобрать молекулярную массу, либо использовать методы, позволяющие снизить чувствительность к данному типу деструкции. Например, можно использовать акцепторы свободных радикалов. Данный метод заключается в применении поглотителей кислорода (например, бисульфита аммония  $NH_4HSO_3$ ), с помощью которых возможно снизить содержание в воде, используемой для закачки кислорода до 0-20 частей на миллиард (0-20 ppb). Еще одним способом борьбы с химической деструкцией является удаление кислорода. Важно, чтобы полученный раствор содержал небольшое количество кислорода и ограниченное количество поглотителей кислорода.

Таким образом, раствор, подлежащий закачке в пласт при ПЗ, должен быть бескислородным. Данный раствор необходимо защищать от взаимодействия и попадания кислорода. Решение данной проблемы заключается в азотной защите оборудования, которое используется при приготовлении раствора закачки. Однако попутный газ для защиты от химической деструкции использовать не рекомендуется.

Сдвиговое напряжение или сдвиг – фактор, который влияет на наличие механической деструкции полимера. Разделение полимера на отдельные части происходит под действием сдвига. В результате данного процесса образуются свободные радикалы, которые так же, как и при химической деструкции, способны разрушать полимерные молекулы в ходе цепной реакции.

Основной сдвиг наблюдается в нагнетательной линии. Это объясняется тем, что в данном месте происходит затор или уменьшение внутреннего

диаметра (наличие дросселей и клапанов). Также сдвиг можно наблюдать при прохождении жидкости по насосам или в призабойной зоне пласта. Сдвиг может происходить и при совместном действии нескольких факторов:

- Тип полимера – средняя молекулярная масса и полидисперсность;
- Исполнение скважины – перфорирование, глубина скважины.
- Проницаемость пласта;
- Наземное оборудование – клапаны, насосы, дроссели и оборудование для растворения.

Таким образом, механическая деструкция будет наблюдаться при высоких скоростях движения. В трубах и оборудовании скорость потока жидкости рекомендуется не более 5 м/с. При одинаковом значении сдвигового напряжения степень механической деструкции будет тем выше, чем выше молекулярная масса полимера.

Термическая деструкция наступает при воздействии высокой пластовой температуры на полимер. Реакции осаждения взаимодействующих между собой гидролизированным ПАА и двухвалентными ионами пластовой воды (кальций  $\text{Ca}^{2+}$ , магний  $\text{Mg}^{2+}$ ) происходят при определенных температурах. Эти реакции ведут к потере вязкости раствора закачки. Это негативно сказывается на процессе ПЗ, так как не будет достигнуто необходимое отношение подвижности (должно быть меньше 1).

При температуре, не превышающей  $80^{\circ}\text{C}$ , сополимеры акриламида (АА) и акриловой кислоты остаются стабильными. Однако при температурах выше  $80^{\circ}\text{C}$  они теряют свою стабильность. Для сохранения стабильности при высоких температурах ( $90\text{-}100^{\circ}\text{C}$ ) необходимо использовать стабилизаторы, например, сульфонируемые мономеры (АТБС). Их подбирают в зависимости от состава раствора и количества стабилизатора.

Гидролиз полимера также может происходить и при низких температурах ( $50^{\circ}\text{C}$ ) при определенных значениях рН раствора. Данный процесс приведет к повышенной анионности полимера, в результате чего соли кальция и магния будут осаждать полимер. Такой процесс характерен для карбонатных

коллекторов. Поэтому при высоких температурах следует выбирать полимер с низкой анионностью или с низкой кажущейся вязкостью. В результате будет наблюдаться повышение вязкости. Если будет правильно выбран полимер для ПЗ, то в ходе гидролиза не будет происходить осаждение полимера.

Итак, термическая деструкция наблюдается при высоких значениях пластовой температуры. Если раствор, в который добавляется полимер, содержит ионы двухвалентных металлов, то вязкость раствора уменьшится и произойдет осаждение полимера из раствора. Поэтому в раствор целесообразно добавлять стабилизатор, который повысит стойкость полимера не только к высокой температуре, но и не даст полимеру осесть в результате гидролиза.

ПАА менее чувствителен к биологическому воздействию. Однако встречаются случаи, когда происходит биологическая деструкция под воздействием аэробных бактерий. При закачке их с водой происходит окисление нефти в результате чего образуются бактерии. Также в результате образования сероводорода  $H_2S$  сульфатовосстанавливающими бактериями (СВБ) получается низкое значение уровня рН. В результате возможна коррозия оборудования или окислительно-восстановительная реакция, в ходе которой будет наблюдаться разрушение полимера. Тем не менее данные процессы встречаются редко и на ограниченных участках, поэтому данный вид деструкции не особо влияет на вязкость полимера [5].

Стоит отметить, что важно подобрать тип полимера и его молекулярную массу таким образом, чтобы не допустить наступления деструкции. В результате деструкции снижается молекулярная масса и загущающая способность, которая является важной характеристикой полимера, как агента вытеснения.

Вязкость полимера – результат, полученный в ходе взаимодействия гидродинамического объема растворителя с молекулами полимера. Ухудшение ПЗ произойдет при разрушении молекул полимера, которое проводят с целью уменьшения частиц и которое повлечет за собой снижение вязкости полимера. Чтобы не произошла деструкция полимера:

1. Раствор, в который добавляется полимер, должен быть бескислородным;
2. Скорость потока жидкости должна быть не более 5 м/с;
3. Полимер должен быть низкой анионности;
4. Полимер должен быть малочувствительным к воздействию солей;
5. Полимер должен быть устойчив к деструкции, путем добавления к нему стабилизаторов.

## 2 АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ПОЛИМЕРНОГО ЗАВОДНЕНИЯ

В основном разработку технологии ПЗ начинают с выбора объекта-кандидата. Далее начинается стадия производства полимеров и полимерного раствора. Раствор проходит предварительный и подробный анализ. После чего полученный полимерный раствор подвергается полевым испытаниям. Затем производят закачку раствора в пласт. На рисунке 9 представлена схема исследований полимерных растворов.

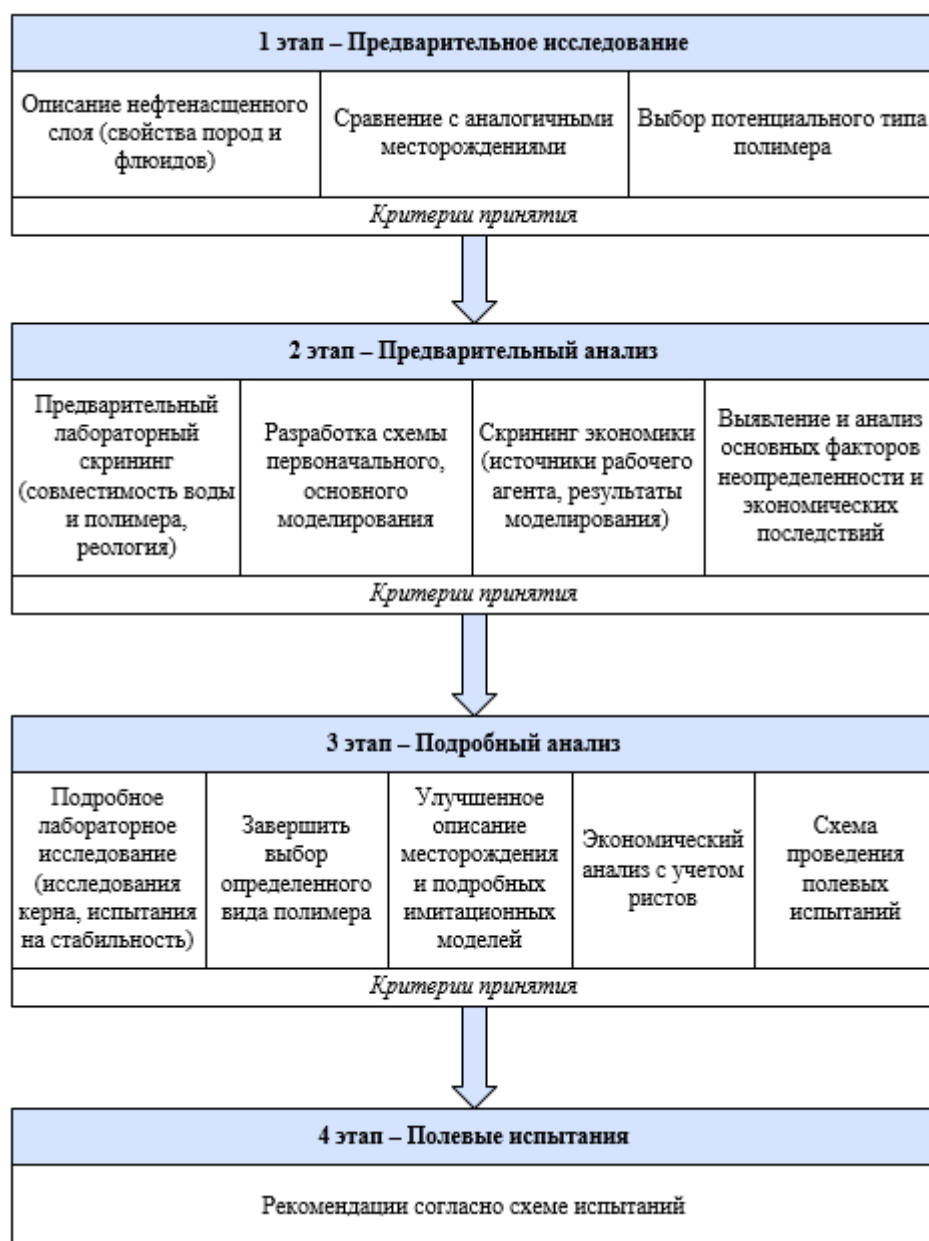


Рисунок 9 – Программа исследования

На 1 этапе осуществляют предварительный анализ пластов-кандидатов. Необходимо собрать информацию о нефтенасыщенном слое, т.е. свойства пород и флюидов. Далее необходимо провести сравнение с аналогичными месторождениями и выбрать потенциальный тип полимера.

На 2 этапе проводят предварительный анализ. Он включает в себя лабораторный скрининг, т.е. проводят исследования на совместимость полимера и воды, разработку схемы моделирования (первоначального и основного), а также экономическую проверку эффективности.

На 3 этапе осуществляется подробный анализ. Проводят лабораторные исследования на насыпных моделях и кернах, а также испытания на термостабильность. На этой стадии окончательно выбирают тип полимера. Также необходимо провести экономический анализ с учетом рисков и составить схему проведения полевых испытаний.

На 4 этапе проводят полевые испытания выбранного состава. Проводят испытания на приемистость, т.е. смотрят на устойчивый объем закачки и как полимер ведет себя в пористой среде. Необходимо оценить эффективность пилотного проекта, а также анализ полученных данных [6].

## **2.1 Критерии при выделении объекта для полимерного заводнения**

При выборе объекта для полимерного заводнения необходимо провести эксперимент на небольшом участке с меньшими затратами прежде чем внедрять данную технологию на всем месторождении. Выбор такого объекта в основном зависит от минимизации времени отклика пласта для получения информации для решения о применении ПЗ на всем месторождении.

Время отклика зависит от многих факторов, таких как: толщина пласта, скорость закачки реагента, история разработки и др. В основном, общие принципы выбора объекта для ПЗ следующие:

1. Сначала необходимо выбрать такой участок, на котором можно отделить и изолировать добычу нефти от закачки полимера. Это можно осуществить для вертикальных скважин, используя пятиточечную систему

разработки с центральной добывающей скважиной, и для горизонтальных – используют 1 добывающую скважину и 2 нагнетательные.

2. Подобрать оптимальный интервал для максимизации эффекта. Для вертикальных скважин данное расстояние составляет 100-150 м, для горизонтальных – 100 м. Максимальная длина для горизонтальных скважин 1 км. Если же расстояние будет меньше возможен прорыв воды, что отрицательно скажется на эффективности технологии ПЗ.

3. С помощью трассерных исследований установить, есть ли гидродинамическая связь между добывающей и нагнетательной скважинами.

4. Если пласт, на котором собираются проводить ПЗ, многопластовый, то следует изолировать зону закачки реагента. Если зона закачки расположена вблизи водонефтяного контакта (ВНК), то также следует изолировать эту зону.

5. Также необходимо проверить состояние и чистоту скважины. В вертикальных скважинах должно быть минимум 12 перфорационных отверстий на 31 см, чтобы свести сдвиг к минимуму. [7]

Можно выделить несколько стадий подготовки ПЗ. В первую очередь произвести отбор объекта для ПЗ, который должен удовлетворять 3 основным ГФУ: пластовой температуре, проницаемости пласта и минерализации пластовой воды. Выбрать тип полимера, который характеризуется некоторыми свойствами такими, как хорошая загущающая способность, устойчивость к сдвигу, низкая степень удерживания, термоустойчивость, а также химическая и биологическая устойчивость. Рассчитать концентрацию и количество полимера. Разработать оборудование, которое будет использовано для смешивания, фильтрации и закачки полимера в пласт. Можно сформулировать некоторые шаги для эффективного применения ПЗ:

- Детально изучить ГФУ пласта;
- Провести исследования для определения концентрации полимера;
- Произвести моделирование процесса для определения оптимального объема закачиваемого реагента;



- Постоянно отслеживать процесс, а именно следить за фронтом вытеснения, качеством закачиваемого агента и воды.

Однако, как и многие процессы, ПЗ имеет свои недостатки. Основным недостатком данной технологии является потеря приемистости нагнетательной скважины. Происходит это в результате того, что при ПЗ повышается вязкость, которую не всегда возможно компенсировать увеличением давления нагнетания из-за деструкции полимера. Из-за различных факторов (например, сдвиг, температура, минерализация воды) полимер может разрушаться. Данный процесс приводит к снижению молекулярной массы и, как следствие, загущающей способности, которая является основой процесса ПЗ. Также возможны потери полимера из-за адсорбции или реакции с солями в пласте.

Таким образом можно выделить три категории для выбора объекта для ПЗ:

- Геолого-физические – свойства пластовой жидкости и особенности коллектора;
- Технологические – концентрация полимера в растворе, давление нагнетания, объем оторочки и т.д.;
- Материально-технические – обеспеченность месторождения нужным оборудованием и химическими реагентами.

## **2.2 Анализ технологии полимерного заводнения**

Технологию полимерного заводнения можно разделить на несколько стадий: производство полимера, подготовка воды и непосредственно закачка раствора в пласт. Как уже говорилось выше, ПЗ применяют с целью увеличения охвата пласта заводнением.

Основное свойство, которое позволяет применять полимеры для заводнения – загущение воды. Например, при концентрации полимера 0,1 % масс вязкость воды увеличится до 3-4 мПа·с. Данное свойство способствует стабилизации фронта вытеснения и предотвращению преждевременного прорыва воды к добывающим скважинам.

## 2.2.1 Технология производства полимера

Полимеры — вещества, которые состоят из «мономерных звеньев» и соединены в длинные макромолекулы химическими или координационными связями. В настоящее время существует множество полимеров. Однако при ПЗ наиболее часто в качестве полимера применяют ПАА.

Полиакриламид – полимер, состоящий из акриламида ( $-\text{CH}_2\text{CHCONH}_2-$ ) и его производных (рисунок 10). Радикальная полимеризация является основным методом синтеза полимеров на основе АА. Данный тип полимеризации представляет собой процесс, при котором свободные радикалы являются активными центрами роста макромолекул.

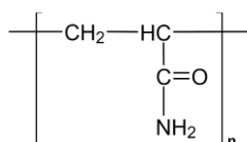


Рисунок 10 – Элементарное звено макромолекулы полиакриламида

Сырье, которое используют при синтезе ПАА, является пропилен. Данный реагент получают из сырой нефти. Акрилонитрил является производным пропилена. АА, который является основным звеном полимера, получают из акрилонитрила. В ходе окислительной реакции можно получить акриловую кислоту из пропилена. На рисунке 11 представлена схема получения АА и акриловой кислоты из нефти [8].

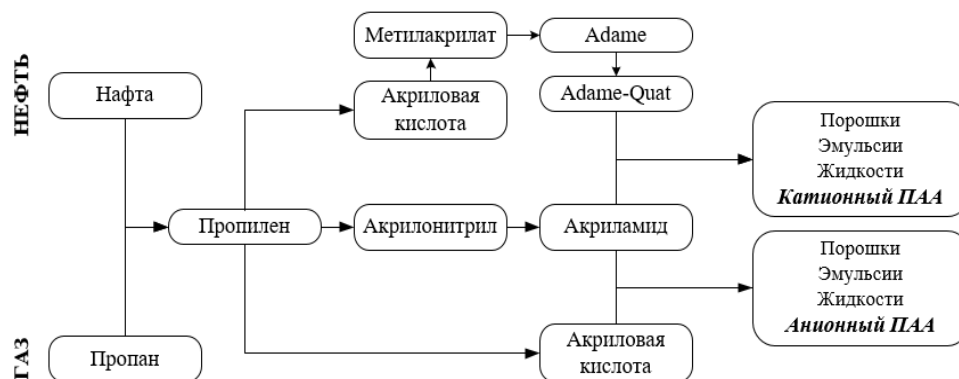


Рисунок 11 – Схема получения акриламида и акриловой кислоты

Технология производства полимера позволяет получить реагенты с разными характеристиками. Существует несколько процессов производства: сополимеризация, согидролиз и постгидролиз. Применяя данные технологии, возможно получать в составе полимера частицы геля.

Сополимеризация – процесс, при котором происходит совместная полимеризация АА и акриловой кислоты. Согидролиз – процесс, при котором происходит гомополимеризация АА в присутствии основания, т.е. происходит гидролиз. Постгидролиз заключается в том, что гомополимер АА, который находится в состоянии геля, подвергается гидролизу в присутствии основания и затем высушивается. В таблице 3 представлены реакции каждого процесса.

Таблица 3 – Реакции, происходящие при производстве полимера

Название процесса	Реакция процесса
Сополимеризация	$x \text{CH}_2=\underset{\text{O} \parallel \text{NH}_2}{\text{CH}} + y \text{CH}_2=\underset{\text{C} \equiv \text{N}}{\text{CH}} \rightarrow \left[ \text{CH}_2-\underset{\text{O} \parallel \text{NH}_2}{\text{CH}} \right]_x \left[ \text{CH}_2-\underset{\text{C} \equiv \text{N}}{\text{CH}} \right]_y$
Согидролиз	$\left[ \text{CH}_2-\underset{\text{CONH}_2}{\text{CH}} \right]_n + m \text{NaOH} \longrightarrow \left[ \text{CH}_2-\underset{\text{CONH}_2}{\text{CH}} \right]_{n-m} \left[ \text{CH}_2-\underset{\text{COONa}^+}{\text{CH}} \right]_m + m \text{NH}_3$
Постгидролиз	$\left[ \text{CH}_2-\underset{\text{O} \parallel \text{NH}_2}{\text{CH}} \right]_n + 2m \text{H}_2\text{O} \xrightarrow{\text{H}^+} \left[ \text{CH}_2-\underset{\text{O} \parallel \text{NH}_2}{\text{CH}} \right]_{n-m} \left[ \text{CH}_2-\underset{\text{O} \parallel \text{OH}}{\text{CH}} \right]_m + m \text{NH}_3$

Одной из важных характеристик полимера является его анионность. В карбонатных породах при протекании реакции гидролиза полимера возможно его осаждение солями магния и кальция. Это возможно, если полимер обладает повышенной анионностью. Все это негативно сказывается на процессе ПЗ и будет наблюдаться закупорка пор. Поэтому при высоких пластовых температурах следует выбирать процесс, при котором образуется полимер с низкой анионностью, в результате чего будет увеличиваться вязкость раствора, что делает процесс ПЗ более эффективным.

На рисунке 12 представлен график, на котором видно распределение анионной активности полимера, получаемого различными технологиями. Из данного графика также видно, что при технологии сополимеризация можно получить наибольшее количество частиц полимера, чем при технологии постгидролиза. Однако при постгидролизе будет наибольшее распределение анионности, что отрицательно сказывается на процессе ПЗ.

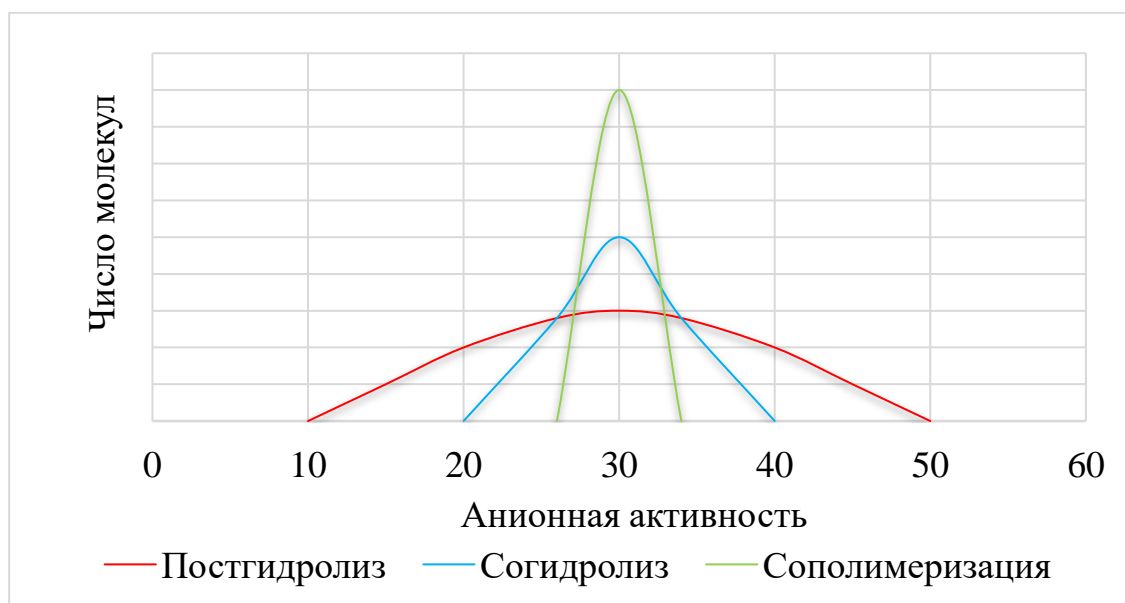


Рисунок 12 – График зависимости полидисперсности от технологии полимеризации

Процесс производства полимера сопровождается образованием нерастворимых частиц геля. Различают мягкие и жесткие частицы геля. Под воздействием сдвига частицы мягкого геля могут деформироваться и разрушаться, т.е. может наступать механическая деструкция. В свою очередь, частицы жесткого геля не деформируются и могут закупоривать поры в коллекторе.

При разных технологиях производства образуется полимер с разной молекулярной массой, которая играет немаловажную роль. Чем выше молекулярная масса полимера, тем больше проблем будет при ПЗ с растворимостью и фильтрующей способностью реагента, что негативно скажется на начальном этапе ПЗ, т.е. на смешении полимера с водой. Обладая

высокой молекулярной массой, для полимера характерно большое содержание частиц жесткого геля.

Количество нерастворимых частиц, получаемых при изготовлении полимера, зависит от некоторых факторов:

- Качества мономеров и химических реагентов, используемых при производстве;
- Типа технологического процесса;
- Молекулярной массы получаемого полимера;
- Оборудования, используемое при производстве;
- Контроля за температурой процесса.

Таким образом, можно составить сравнительную характеристику технологий производства полимера (таблица 4). Из данной таблицы можно сделать вывод, что наиболее оптимальной технологией производства полимера является процесс сополимеризации.

Таблица 4 – Технологии производства полимера

<b>Технология производства</b>	<b>Сополимеризация</b>	<b>Согидролиз</b>	<b>Постгидролиз</b>
Молекулярная масса, млн г/моль	20	18	22
Растворимость	Очень хорошая	Хорошая	Плохая
Распределение анионности	Узкое	Широкое	Очень широкое
Нерастворимые частицы геля	Мягкие частицы	Мягкие и жесткие частицы	Жесткие частицы

Как упоминалось ранее, полимеры подвержены наступлению процесса деструкции, поэтому необходимо добавлять различные стабилизаторы. Например, добавление сульфонированных мономеров (AMPS/ATBS) способно повысить термическую устойчивость полимера. 2-акриламидо-2-метилпропан сульфокислота  $C_7H_{13}NO_4S$  – мономер, используемый для изменения свойств анионных полимеров. Высокую степень гидрофильности и анионный характер придает сульфонатная группа ( $RSO_2O-M^+$  и  $RSO_2OR_1$ , где R,  $R_1$  — органический

радикал,  $M^+$  - катион). Также данный стабилизатор позволяет полимерам лучше поглощать воду и придает улучшенные транспортные характеристики. В случаях, когда минеральные соли осаждают полимер, что негативно сказывается на процессе ПЗ, добавление в полимерный раствор даже небольшого количества стабилизатора способно препятствовать осаждению двухвалентных катионов. В результате снижается количество осадков минеральных солей (кальций  $Ca^{2+}$ , магний  $Mg^{2+}$ , железо  $Fe^{2+}$  и  $Fe^{3+}$ , алюминий  $Al^{3+}$ , цинк  $Zn^{2+}$  и барий  $Ba^{2+}$ ).

### **2.2.2 Технология подготовки воды**

Вода является основным агентом, закачиваемым в пласт при заводнении, поэтому качество закачиваемой воды играет главную роль. В пласт можно закачивать природные воды, которые отделяют от нефти в процессе сбора и подготовки. Данный тип воды сильно минерализован. Поэтому чтобы не допустить гибели пресноводных их используют для заводнения, а не сбрасывают в водоемы. Также в пласт закачивают пресные воды, которые используют в технологическом процессе, и ливневые воды, которые попадают в промышленную систему канализации. Все эти воды относятся к сточным водам: пластовые (85-88%), пресные (10-12%) и ливневые (2-3%). Закачка в пласт сточных вод является техническим мероприятием, позволяющим циклично использовать воду по схеме:

Нагнетательная скважина → пласт → добывающая скважина → система сбора и подготовки нефти и газа с блоком подготовки воды → система ППД

В сточных водах содержатся растворенные газы такие, как кислород  $O_2$ , сероводород  $H_2S$  и углекислый газ  $CO_2$ . Для данных газов характерна коррозионная активность, которая, в свою очередь, способствует быстрому износу нефтепромыслового оборудования и трубопроводов, что влечет за собой загрязнение сточных вод продуктами коррозии. Содержание закиси железа  $FeO$  (до 0,2 г/л) приводит к образованию углекислого газа и осадка.

В сточных водах могут содержаться СВБ, из-за которых возможно наступление биологического разложения полимера. Их содержание можно

объяснить поступление их с ливневыми водами. Благодаря данным бактериям возможно выпадение сульфида железа  $\text{FeS}$  и карбоната кальция  $\text{CaCO}_3$  [9].

В сточной воде присутствуют также механические примеси и капельки нефти. Их наличие способствует снижению приемистости пласта. Поэтому перед закачкой в пласт необходимо очистить воду. Некачественно подготовленная вода может негативно сказаться на процессе заводнения.

Подготовка воды для закачки включает в себя:

- Коагулирование;
- Декарбонизацию (подщелачивание);
- Обезжелезивание;
- Хлорирование;
- Фильтрацию;
- Ингибирование.

Процесс коагулирования применяют с целью укрупнения мельчайших взвешенных части, которые под действием силы тяжести не осаждаются. Поэтому следует добавить в воду коагулянты, например, сульфат алюминия  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ , хлорид железа  $\text{FeCl}_3$ , железный купорос  $\text{FeSO}_4$  и другие. В результате этого процесса взвешенные частицы укрупняются, образуя хлопьевидные частицы, и оседают в воде. Фильтрацию проводят с целью очистки воды от взвешенных частиц.

Декарбонизация осуществляется с целью удаления бикарбонатов магния и кальция из воды. Данные компоненты, попадая в пласт, осаждаются и затрудняют фильтрацию флюида. Декарбонизация – процесс, который заключается в смягчении воды, т.е. в ее подщелачивании гашеной известью  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ . В результате этого процесса происходит коагуляция примесей и доводят рН воды до 7-8.

Обезжелезивание – процесс удаления солей железа из воды. Данный процесс позволяет избежать загрязнения железистыми осадками призабойной зоны пласта. Обезжелезивание можно осуществить путем аэрации или известкования. Сущность аэрации состоит в том, что воду обогащают

кислородом. Образующийся из солей железа гидрат окиси железа  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  выпадает в осадок в виде хлопьев. Однако данный процесс имеет недостатки: удаляются не все соли железа, повышается коррозионная активность воды и для проведения процесса нужно сложное оборудование. При ингибировании воду обрабатывают ингибиторами, которые замедляют коррозионные процессы. Различают ингибиторы сероводородной  $\text{H}_2\text{S}$ , кислородной и углекислотной  $\text{H}_2\text{CO}_3$  кислоты.

Процесс фильтрации используют для очистки воды от взвешенных частиц. Для удаления микроорганизмов и бактерий воду обрабатывают хлором, т.е. производят хлорирование воды. Иногда для удавления СВБ применяют реагенты-бактерициды. Наиболее эффективным реагентом является формалин [10].

Существует 2 типа установок для очистки воды: открытого и закрытого типа. Установки закрытого типа применяют с целью исключения контакта воды с кислородом, чтобы не допустить окислительной реакции.

Рассмотри установку открытого типа (рисунок 13). С установки по подготовке нефти сточные воды поступают в песколовку (1), где происходит осаждение крупных механических примесей. Далее сточная вода самотеком поступает в нефтеловушку (3). В ней отделяются основная масса нефти и механических примесей. Принцип действия нефтеловушки основан на гравитационном разделении сточной воды при малой скорости движения (менее 0,03 м/с). Данный диапазон скорости можно объяснить тем, что капли нефти, у которых диаметр больше 0,5 мм, успеют всплыть на поверхность. По нефтесборной трубке скопившаяся нефть в ловушке поступает с помощью насоса (2) для повторной обработки на установку подготовки нефти.

С целью доочистки воды от нефти и мехпримесей воду отправляют в пруды-отстойники (4). Отстаивание на данном этапе осуществляется от нескольких часов до двух суток. Иногда добавляют специальные реагенты с целью ускорения процесса доочистки: аммиак  $\text{NH}_3$ , известь (состоит в основном из  $\text{CaO}$  и  $\text{MgO}$ ), сульфат алюминия  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$  и другие. После данного процесса



содержание в воде нефти составляет 30-40 мг/л, механических примесей – 20-30 мг/л. Такой тип подготовки воды достаточен для закачки в поглощающие пласты, поэтому, проходя через камеры (5 и 6), через насос (7) осуществляется непосредственная закачка.

Однако для нагнетательной скважины необходима более тщательная очистка воды. Поэтому после камеры (5) вода поступает с помощью насоса в фильтры (9 и 10), которые работают попеременно. Зачастую фильтрующим материалом является кварцевый песок размером 0,5-1,5 мм, графит и другие материалы. После прохождения фильтров содержание нефти и мехпримесей заметно снижается и составляет 2-10 мг/л. Далее очищенная вода, поступая в емкость (11), через насос высокого давления (14) отправляется для закачки в пласт. Однако спустя 12-16 часов фильтр загрязняется и вода поступает в другой фильтр, а загрязнённый фильтр промывают. Промывку осуществляют очищенной водой. Её забирают из емкости (11) насосом (13) и пропускают в обратном направлении через фильтр. Промывка осуществляется примерно 15-18 минут. После промывки воды с грязью отправляется в илонакопитель (12).

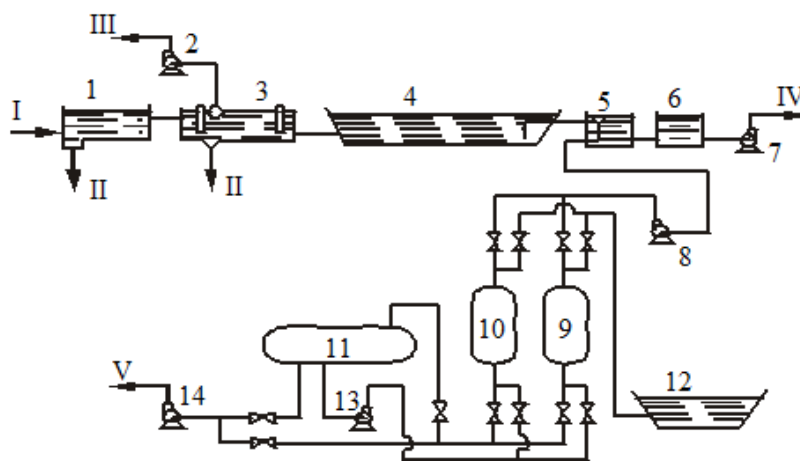


Рисунок 13 – Технологическая схема установки по подготовке сточных вод открытого типа

I – сточные воды; II – механические примеси; III – нефть;

IV – очищенная вода для поглощающих пластов; V – очищенная вода.

1 – песколовка; 2, 7, 8, 13, 14 – насосы; 3 – нефтеловушка; 4 – пруды-отстойники; 5, 6 – камеры; 9, 10 – фильтры; 11 – емкость; 12 – илонакопитель.

Теперь рассмотрим установку закрытого типа (рисунок 14). С промысла поступает водонефтяная эмульсия. Происходит турбулентное перемешивание эмульсии с горячей пластовой водой и реагентом-деэмульгатором. Полученная смесь проходит каплеобразователь (1). Происходит изменение типа эмульсии с обратного на прямой. Далее полученная эмульсия подается в резервуар-отстойник с жидкостным гидрофильным фильтром (2) через растворитель под слой воды. На данном этапе осуществляется предварительный сброс воды. Гидрофильный фильтр выполнен по типу вертикального резервуара и имеет в своём составе сифонное устройство. Данное устройство позволяет поддерживать необходимый слой воды под слоем нефти.

После резервуара-отстойника (2) обезвоженная нефть выводится через верхнюю часть и подается в резервуар-отстойник с жидкостным гидрофобным фильтром (3). Выполнение данного фильтра такое же, как и у гидрофильного фильтра и он также имеет сифонное устройство. Вода вводится через лучевой перфорированный распределитель в нефтяной слой, после чего капли воды осаждаются из нефти. Уловленная нефть через верхнюю часть резервуара подается на установку подготовки нефти. Вода, освободившаяся от нефти, отправляется для отстоя. Очищенная вода после резервуара, подается в емкость (4) и насосом (5) закачивается в пласт.

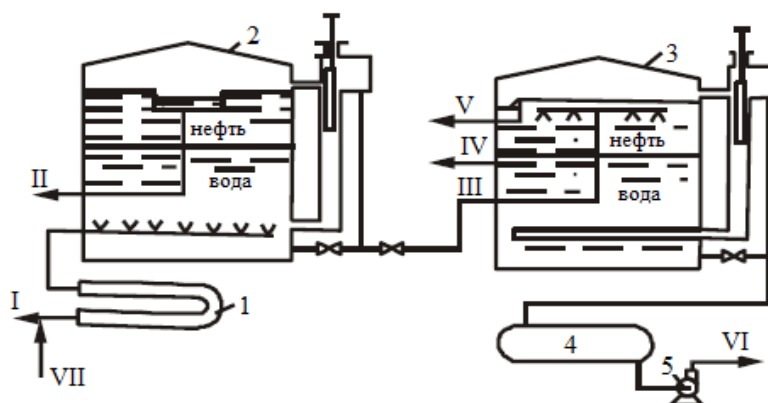


Рисунок 14 – Технологическая схема установки по подготовке сточных вод закрытого типа, основанная на принцип отстоя

I – водонефтяная эмульсия; II – обезвоженная нефть; III – сточная вода;  
 IV – неразрушаемая эмульсия; V – уловленная нефть; VI – очищенная вода;  
 VII – горячая пластовая вода.

1 – каплеобразователь; 2 – гидрофильный фильтр; 3 – гидрофобный жидкостный фильтр; 4 – емкость; 5 – насос.

Требования, применяемые к сточным водам, как к агенту для заводнения сводятся к трем показателям:

- Содержание нефти в воде;
- Содержание механических примесей;
- Совместимость сточной и пластовой воды и породой-коллектором.

Требования к воде для закачки в пласт в процессе заводнения сформулированы в ОСТ 39-225-810 «Вода для заводнения нефтяных пластов. Требования к качеству» [11]:

1. Водородный показатель (рН);
2. Фильтрационная характеристика;
3. Совместимость с пластовой водой и породой;
4. Размер частиц механических примесей и эмульгированной нефти;
5. Содержание нефти и механических примесей (таблица 5);

Таблица 5 – Допустимое содержание механических примесей и нефти

Проницаемость пористой среды коллектора, мкм <sup>2</sup>	Коэффициент относительной трещиноватости коллектора	Допустимое содержание в воде, мг/л	
		Механических примесей	Нефти
до 0,1 вкл.	-	до 3	до 5
свыше 0,1	-	до 5	до 10
до 0,35 вкл.	от 6,5 до 2 вкл.	до 15	до 15
свыше 0,35	менее 2	до 30	до 30
до 0,6 вкл.	от 35 до 3,6 вкл.	до 40	до 40
свыше 0,6	менее 3,6	до 50	до 50

6. Содержание растворенного кислорода;
7. Набухаемость пластовых глин;

8. Коррозионная активность;
9. Содержание сероводорода;
10. Наличие СВБ;
11. Содержание ионов трехвалентного железа.

Контроль за качеством воды необходимо осуществлять дважды: на выходе из водоочистой установки и на устье наиболее удаленной нагнетательной скважины. Исходя из всего вышесказанного можно выделить основные параметры, требуемые для закачиваемой в пласт воды. Данные параметры представлены в таблице 6. Также наиболее важно минимизировать содержание в воде кислорода  $O_2$ , сероводорода  $H_2S$  и железа  $Fe$  для избегания наступления химической деструкции.

Таблица 6 – Основные требования к качеству закачиваемой воды

Параметр	Значение
Содержание нефти в воде	Менее 50 мг/л

Продолжение таблицы 6

Содержание кислорода	<b>Менее 0,5 мг/л</b>
Содержание твердых частиц	Менее 50 мг/л
Размер твердых частиц	Менее 5 мкм
Водородный показатель pH	4,5 – 8,5

### 2.2.3 Технология приготовления раствора

Схема установки зависит от того, в каком виде используется полимер. Так как полимер в основном применяется в виде порошка, поэтому сначала его необходимо растворить в воде. Схема установки для приготовления полимерного раствора представлена на рисунке 15.

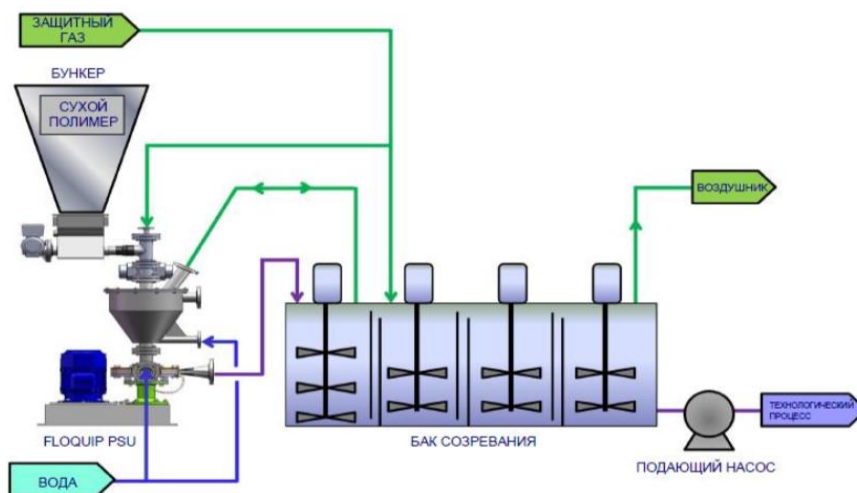


Рисунок 15 – Схема установки для растворения порошка полимера

Установку условно можно разделить на несколько отсеков:

1) Отсек хранения полимера: полимер хранится в больших мешках по 750 кг в сухом и отапливаемом месте.

2) Отсек приготовления полимерного раствора. Данный отсек можно разделить на несколько модулей:

- Модуль разгрузки полимера. В данном модуле происходит автоматизированная разгрузка полимера из мешков в бункер-накопитель.

- Модуль измельчения полимера и поточного дозирования. Французским холдингом SNF была запатентована установка FLOQUIP PSU, которая называется ПИМ. С помощью данной установки возможно минимизировать время растворения полимера в воде при этом, не потеряв качества растворения. Установка ПИМ позволяет подготовить маточный полимерный раствор; полностью растворить полимер, не допустив образования комков; снизить время растворения на 50% по сравнению с обычным растворением; не допустить снижения молекулярной массы полимера; уменьшить вязкость раствора и остаточный фактор сопротивления по сравнению с обычным растворением.

- Бак созревания. После полного растворения в воде полимерный раствор подаётся в бак созревания, который состоит из четырех секций, объёмом 1,1 м<sup>3</sup> каждая. Полимерный раствора путем переливания перемещается по секциям. В

каждой секции установлены мешалки мощностью 0,75 кВт, при помощи которых осуществляется гомогенизация раствора. Время нахождения раствора в баке составляет 40 минут.

3) Отсек закачки полимерного раствора в скважину. В данном отсеке расположены плунжерные насосы высокого давления. Они позволяют избежать наступления механической деструкции полимера.

4) Отсек генерации азота. В состав данного отсека входит система подачи воздуха (воздушный компрессор или воздушник). Генерация азота происходит путем прокачки воздуха через углеродное молекулярное сито, на котором абсорбируется кислород. Азот позволяет минимизировать риски наступления химической деструкции полимера.

5) Помещение МСС (центр управления электроприводами), аппаратная. Данные помещения позволяют электрически обеспечивать работу установки.

6) Лаборатория и диспетчерская. Необходимы для проведения анализов полимерных растворов на вязкость [12].

Таким образом, приготовление раствора происходит следующим образом. Полимер в виде порошка находится в бункере. При помощи дозирующего винта полимер подается в установку измельчения, которая заполнена азотом. На данном этапе происходит разрезание частиц полимера, их постепенное смачивание и смешивание. При просеивании порошка образуется пыль, которую удаляют с помощью воздушника, который установлен за пределами основного помещения. Далее раствор подается в бак дозревания, где осуществляется гидратация и растворение в воде. Полученный маточный раствор разбавляют до целевой концентрации. Через фильтры раствор подается в блок нагнетания на прием трехвинтового насоса. С помощью данного насоса раствор подается на прием насоса кустовой насосной станции (КНС).

#### **2.2.4 Технология закачки в пласт**

Кустовые насосные станции (КНС), водораспределительные батареи (ВРБ), высоконапорные водоводы и нагнетательные скважины относятся к

сооружениям для закачки воды в пласт. С помощью КНС происходит закачка воды в пласты через нагнетательные скважины для поддержания ППД. Вода, поступающая в нагнетательные скважины из КНС, проходит ВРБ, где она распределяется по скважинам. Транспортируется вода по высоконапорным водоводам. Протяженность водоводов зависит от числа нагнетательных скважин в системе ППД и расстояния между ними, и числа КНС. Чем меньше диаметр высоконапорного водовода, тем большей толщиной должны они обладать. На рисунке 16 представлена принципиальная схема расположения сооружений для осуществления заводнения [13].

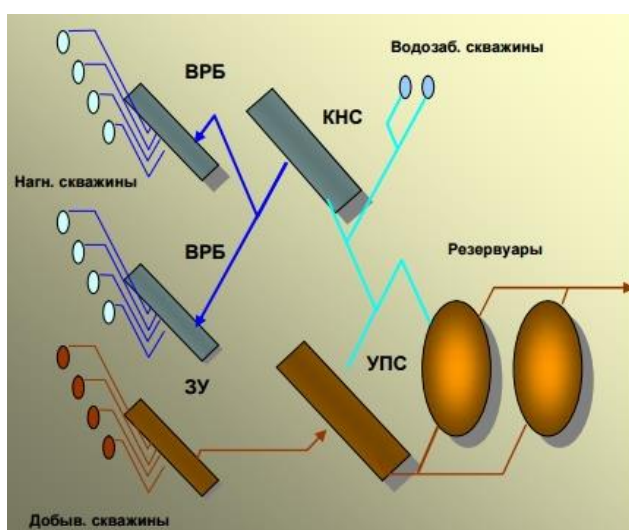


Рисунок 16 – Принципиальная схема системы ППД

ВРБ – водораспределительная батарея; КНС – кустовая насосная станция; ЗУ – замерная установка; УПС – установка предварительного сброса воды

Подземное оборудование нагнетательной скважины включает в себя эксплуатационную колонну, насосно-компрессорную трубу и пакер. Наземное оборудование состоит из обвязки устья скважины и нагнетательной арматуры. Оборудование для обслуживания нагнетательной скважины представлено на рисунке 17.



Рисунок 17 – Схема оборудования нагнетательной скважины

Перед началом работ по закачке полимерного раствора необходимо убедиться в чистоте призабойной зоны, чтобы обеспечить хорошую приемистость. Скорость закачки раствора не должна превышать 5 м/с, чтобы не допустить наступления механической деструкции. Оптимальным давлением закачки является 20-22 МПа.

Полимерный раствор закачивают небольшими оторочками. Общий объем оторочки полимерного раствора не должен превышать 40-50% от объема порового пространства. Закачка раствора осуществляется из расчета 1-1,5 м<sup>3</sup> на 1 м перфорированной толщины. Для более вязких растворов следует применять следующие объемы растворов на 1 м перфорированной толщины скважины в зависимости от приемистости:

- До 100 м<sup>3</sup>/сут – 1,5-2,5 м<sup>3</sup>;
- 100 – 300 м<sup>3</sup>/сут – 2,5-4 м<sup>3</sup>;
- 300 – 600 м<sup>3</sup>/сут – 4-5 м<sup>3</sup>;
- Более 600 м<sup>3</sup>/сут – 6-7 м<sup>3</sup>.



Закачку полимерного раствора следует начинать с половины рассчитанной вязкости и в течение нескольких дней закачать половину необходимого объема до тех пор, пока давление не стабилизируется. Далее необходимо увеличить вязкость полимерного раствора до нужного значения, поддерживая закачку половины объема в течение еще нескольких дней. После этого объем закачки раствора увеличивают до нужного значения.

Проблемы с приемистостью, возникающие при закачке раствора, связаны с тем, что в пласт закачивается вязкий раствор. Мобилизация остаточной нефти приводит к увеличению давления, поэтому необходимо снизить объем закачки полимера и скорость закачки, чтобы не допустить нарушения целостности коллектора. Тем не менее в начальный период закачки приемистость оказывается выше ожидаемой, что связано с наличием микротрещин в пласте, которые образуются в результате бурения или закачки воды, особенно при закачке холодной воды в пласт с высокой пластовой температурой. Закаченный полимерный раствор, попав в существующие микротрещины, продлит их, тем самым уменьшит скорость сдвига и сведет к минимуму риск наступления механической деструкции.

Через нагнетательные скважины полученный полимерный раствор необходимой концентрации закачивают в пласт в жидком состоянии (рисунок 18). Вступая во взаимодействие с породой, растворы цементируются в пористой среде, т.е. затвердевают. Этот процесс называется адсорбцией полимеров. Адсорбция приводит к сужению каналов, что ухудшает фильтрацию воды и благодаря чему образуется вал «неактивной» воды на фронте вытеснения.

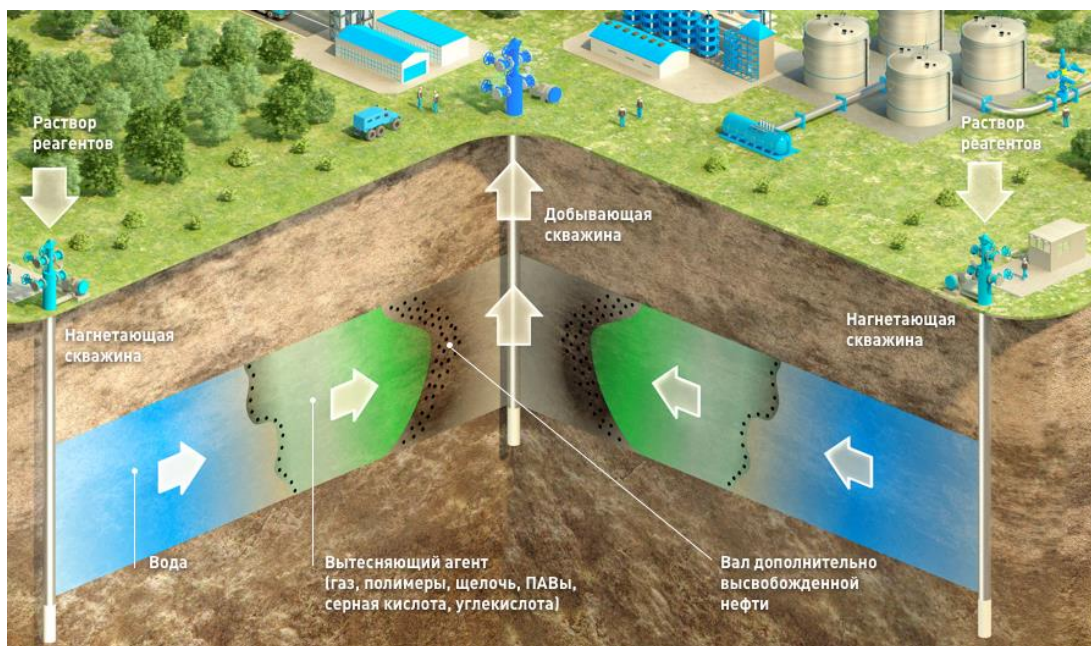


Рисунок 18 – Схема закачки в пласт полимерного раствора

Проникая в пласт, полимер поступает в высокопроницаемые пропластки. Поэтому прохождение воды по предыдущим каналам уже невозможно, и она вынуждена проходить по дополнительным каналам, которые ранее в эксплуатацию не вовлекались. В результате всех этих процессов уменьшается динамическая неоднородность потоков жидкости, т.е. увеличивается охват пласта заводнением. На рисунке 19 можно наглядно увидеть, как происходит стабилизация фронта вытеснения и увеличение охвата пласта заводнением.

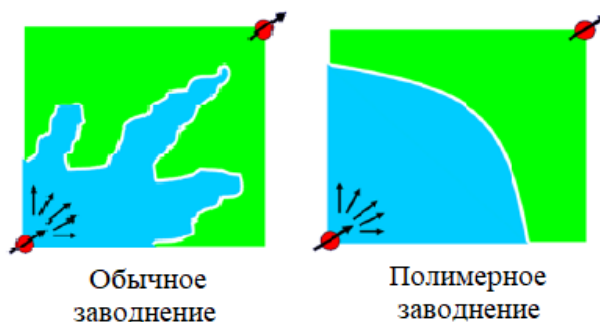


Рисунок 19 – Принцип действия полимерного раствора

При осуществлении полимерного заводнения необходимо следить за следующими параметрами:

- Пластовая температура;
- Проницаемость пласта;
- Приемистость скважин;
- Давление нагнетания и пластовой давление;
- Объём добытой нефти;
- Объём закаченного реагента;
- Скорость нагнетания реагента в пласт.

Также следует контролировать продвижение контура нефтеносности.

Оценить работу нагнетательной скважины возможно при использовании графика Холла, метод построения которого основывается на использовании данных по нагнетанию агента в пласт через некоторое время после установления режима работы. График Холла (рисунок 20) – зависимость интеграла изменения давления от накопленной закачки. График должен представлять прямую линию, т.е. должна быть линейная зависимость величин. Как видно из графика прямая линия соответствует хорошему процессу заводнения. По углу наклона кривой можно оценить скин-фактор и предположить, загрязнена призабойная зона или нет.

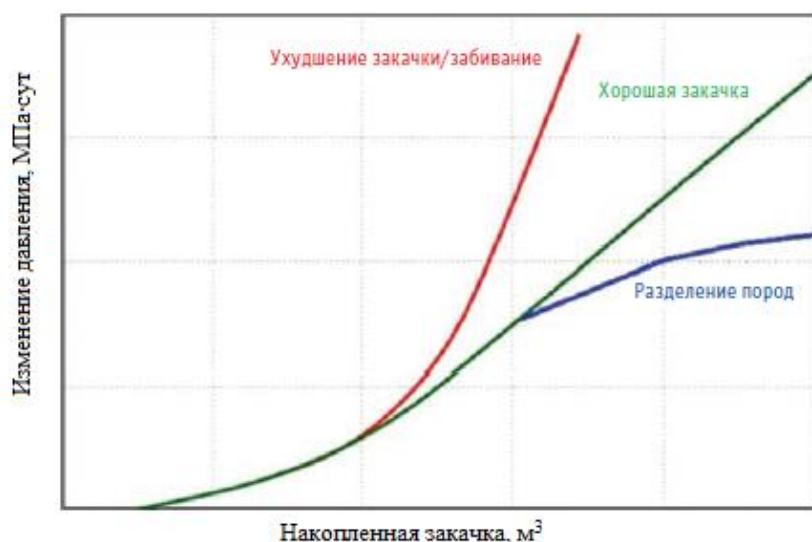


Рисунок 20 – График Холла

### 2.3 Сравнительный анализ химических реагентов и рецептуры

Для наибольшей эффективности от применения ПЗ необходимо тщательно изучить ГФУ и исходя из этих условий подобрать оптимальный состав реагента. У полимеров, как и многих других реагентов, есть свои свойства. Эти свойства определяют промышленные характеристики применения полимеров:

1. Вязкость – анионные ПАА обладают загущающей способностью, которая связана с взаимодействием макромолекул с высокой молекулярной массой. Данный параметр зависит от концентрации и молекулярной массы полимера в растворе.

2. Реологические свойства – растворы на основе ПАА характеризуются неньютоновским поведением, т.е. от приложенного сдвигового напряжения зависит вязкость раствора. У раствора наблюдается псевдопластическое поведение, при котором вязкость уменьшается при увеличении сдвигового напряжения.

3. Растворимость – проблемы с растворимостью и фильтрующей способностью будут наблюдаться при применении полимеров с высокой (более 1 млн г/моль) или сверхвысокой (около 18 млн г/моль) молекулярной массой.

Таким образом, выделяют следующие требования при выборе полимера:

- Высокая вязкость;
- Хорошая растворимость;
- Пониженная степень удерживания полимера в пласте;
- Устойчивость к механической деструкции, т.е. сдвиговая стойкость;
- Устойчивость к химической деструкции, т.е. использование защитных систем для минимизации количества примесей в воде;
- Устойчивость к термической деструкции, т.е. добавление к раствору стабилизаторов;
- Устойчивость к биологической деструкции, использование биоцидов (вещества, способные бороться с вредными организмами);

- Хорошая фильтруемость, т.е. хороший перенос полимера в проницаемой среде.

Полимеры, попадая в пласт уменьшают проницаемость пласта, поэтому оптимальной концентрацией полимера считается 0,1-0,15% масс. Использование большей концентрации нерентабельно, так как будет наблюдаться значительное уменьшение проницаемости.

В настоящее время из-за большого разнообразия реагентов в нефтехимии выделяют следующие типы полимеров: сшитый полимерный состав; полимердисперсный состав; полимерно-гелевая система; простой эфир целлюлозы; биополимеры и АСП-заводнение.

### **2.3.1 Сшитый полимерный состав**

Сшитый полимерный состав (СПС) – водные гели на основе водорастворимых полимеров, с помощью которых можно увеличить охват пласта заводнением. Чаще всего в качестве водорастворимого полимера используют ПАА. СПС наиболее эффективен на третьей стадии разработки. На данной стадии происходит снижение добычи нефти и рост обводненности продукции.

При закачке в пласт ПАА можно снизить подвижность воды и повысить ее вязкость, а также можно повысить охват пласта заводнением. Образование СПС является результатом химической сшивки макромолекул полимера (сшиватели) с молекулами растворителя (воды). В качестве сшивателя в основном используют ацетат хрома ( $\text{Cr}(\text{CH}_3\text{COO})_3$ ) или цитрат алюминия ( $[\text{C}_3\text{H}_4\text{OH}(\text{COO})_3]\text{Al}$ ). Образование геля, состоящего из сшитых полимерных цепей в растворителе, происходит в ходе реакции. Время гелеобразования может быть больше или равно времени закачки композиции в пласт. Вязкость раствора увеличивается на стадии сшивания.

Сшитый полимерный состав способен глубоко проникать в пласт на значительные расстояния, что способствует эффективному регулированию фильтрационных потоков. Данный состав обладает высокой кажущейся вязкостью, а также вязкопластичными и вязкоупругими свойствами. Все эти

свойства обеспечивают более эффективное применение данной технологии по сравнению с остальными составами. Результат применения СПС:

- Перераспределение фильтрационных потоков;
- Сдерживание прорывов воды;
- Введение трудноизвлекаемых запасов в разработку;
- Увеличение добычи нефти.

На Приобском месторождении был применён модернизированный СПС (МСПС) с термостабильным полимером. В 2012-2013 годах 28 скважин были обработаны МСПС. В результате закачки состава в пласт удалось дополнительно добыть 62,4 тыс. т нефти. В 2014 году данным составом были обработаны 43 скважины. Объем дополнительно добытой нефти составил 95,3 тыс. т. Удельный технологический эффект при этом составил 2,2 тыс. т нефти на скважинообработку [14].

### **2.3.2 Полимер-дисперсный состав**

Полимердисперсный состав (ПДС) представляет собой комплекс, состоящий из раствора полимера (чаще ПАА) и суспензии минеральных частиц (глин). Данный полидисперсный комплекс позволяет блокировать водонасыщенные прослойки, в результате чего возможно воздействовать на низкопроницаемые участки пласта и вовлекать их в разработку.

Процесс образования ПДС сложен и включает в себя несколько стадий: адсорбция полимера и глинистых частиц на поверхности породы, флокуляция и фильтрация. В данном составе молекулы ПАА выступают и стабилизатором, и флокулянтom. Молекулы полимера попадают в пласт до глинистых частиц и адсорбируются и удерживаются на поверхности породы, поэтому концентрация полимера в растворе снижается. Стабилизация глинистой суспензии происходит при высоких концентрациях полимера в растворе. При увеличении концентрации полимера в растворе замедляется выпадение частиц из раствора. При снижении концентрации полимера увеличивается скорость осаждения частиц глины. При действии ПДС происходит флокуляция суспензии глинистых частиц, которая протекает при смешивании с раствором ПАА. Молекулы ПАА

образуют флоккулы, закрепляясь между частицами глин. При этих процессах глинистые частицы удерживаются в поровом пространстве и блокируют высокопроницаемые пропластки. Таким образом, с помощью ПАА можно регулировать осаждение глинистой суспензии в пласте.

Действие данной системы заключается в увеличении фильтрационного сопротивления зон обводненных зон, увеличении охвата пласта заводнением и увеличением нефтедобычи.

В настоящее время также используют модифицированный полимердисперсный состав (МПДС). Обладающий структурно-механическими свойствами МПДС состоит из полимера, сшивающего агента (АМГ) и глинистых частиц. Данное свойство позволяет повысить добычу нефти из неоднородных пластов с большими промытыми зонами.

Закачку осуществляют последовательным чередованием оторочки ПАА и глинистой суспензии. Также одновременно закачивают сшивающий агент. В частицы глины и полимера внедряется АМГ. Частицы глинистой суспензии вступают во взаимодействие с ПАА.

На Хохряковском месторождении производили закачку МПДС – водный раствор ПАА со специальным сшивателем АМГ и глинистой суспензией. Объем закачанного реагента составлял 600-3000 м<sup>3</sup>. В результате применения данного состава произошло перераспределение фильтрационных потоков и, как следствие, увеличение охвата пласта заводнением и снижение обводненности продукции. За 2007-2008 гг. удалось дополнительно добыть 48,4 тыс. т нефти, за 2009 г. – 24,1 тыс. т. Технологический эффект от применения данной технологии составил 1583 т на скважинооперацию. Эффект продолжался на протяжении 6-7 месяцев. После этого необходимо снова повторять обработку с учетом остаточной нефтенасыщенности [15].

### **2.3.3 Полимерно-гелевая система**

Полимерно-гелевая система (ПГС) состоит из однокомпонентной гелевой системы, в основу которой входит ПАА, следовательно, ПГС основано на внутримолекулярном сшивании молекул. Данная система устойчива к

механической деструкции, также система обладает стабильностью в водах с высокой минерализацией и термоокислительной устойчивостью.

ПГС за счет высокой вязкоэластичности способен снизить количество остаточной нефти в пласте. Также за счет того, что ПГС обладает маленькими размерами частиц, данная система способна проникать вглубь пласта, тем самым увеличивать охват пласта заводнением.

ПГС обладает высокой термостабильностью и солестойкостью, которые увеличивают время эффективности применения данного состава. За счет возможности деформирования в тонкие нити из сферы и наоборот использование ПГС позволяет замедлить движение оторочки состава по пласту.

Заводнение с использованием ПГС было применено на Комсомольском месторождении. Применённый состав назывался «Темпоскрин». Технология были использована на 3 нагнетательных скважинах. За год удалось дополнительно добыть 6 тыс. т нефти. Технологический эффект от применения данного состава составил 2015 т на скважинооперацию [16].

#### **2.3.4 Простой эфир целлюлозы**

Простой эфир целлюлозы (ПЭЦ) также можно использовать совместно с полимером для более эффективного применения технологии ПЗ. Данный состав можно использовать на поздней стадии разработки. Если применять полимерный раствор с ПЭЦ без сшивателя на ранней стадии разработки, то будет наблюдаться загущение воды, но без образования геля. Из-за снижения подвижности вытесняющего агента происходит выравнивание фронта вытеснения, т.е. увеличивается охват пласта заводнением.

При высокой обводненности продукции, которая характерна для поздней стадии разработки, добавление металлов влечет за собой образование геля. В результате образования геля блокируется поступление воды в промытые зоны и вытесняющий агент направляется в зоны, которые ранее не были охвачены заводнением. При закачке больших объемов полимерных растворов ПЭЦ (2000 м<sup>3</sup> и более) перераспределение фильтрационных потоков происходит не только в призабойной зоне, но и в более удаленных частях пласта.



Для лучшего сшивания в полимерный раствор ПЭЦ добавляют поливалентные металлы (хром Cr, марганец Mn, железо Fe). Подвижность образованного геля снижается при закачке в пласт пластовой воды, а также при смешивании полимерного раствора ПЭЦ с сильно минерализованной водой.

Для заводнения применяют следующие простые эфиры целлюлозы:

- Карбоксиметилцеллюлоза (целлюлозогликолевая кислота) –  $[C_6H_7O_2(OH)_2(OCH_2COOH)]_n$ ;
- Метилцеллюлоза –  $[C_6H_7O_2(OH)(OCH_3)]_n$ ;
- Этилцеллюлоза –  $[C_6H_7O_2(OH)(OCH_2CH_3)]_n$ ;
- Оксиэтилцеллюлоза –  $[C_6H_7O_2(OH)_2(OCH_2CH_2)OH]_n$  и другие.

Компания ООО «Лукойл-Западная Сибирь» применяла композицию «МЕТКА» на нескольких месторождениях. Одним из таких месторождений было Покачевское месторождение. Маловязкий водный раствор закачивали в пласт. При температуре 40-120°C раствор образует гель в пластовых условиях. В 2003 году было проведено 46 скважиноопераций. Дополнительно за счет применения данной технологии удалось добыть 75,4 тыс. т нефти. Удельный эффект составил 1093 т на скважинооперацию. В результате применения композиции «МЕТКА» удалось выровнять профиль приемистости, также снизили обводненность продукции и увеличили дебит нефти [17].

### 2.3.5 Биополимеры

Развитие биотехнологий позволило использовать в нефтяной отрасли биополимеры (БП). Данный вид полимеров является полисахаридами растительного и микробного происхождения.

Возможность использования такого вида полимера заключается в том, что при малых концентрациях биополимер способен изменять реологические свойства водных систем, а именно: повышать вязкость и образовывать гели. Биополимеры можно применять в жестких условиях, где применение синтетических полимеров неэффективно.

Выделяют несколько видов биополимеров: растительные и микробные. Растительные полисахариды обладают существенным недостатком –

невозможность получения реагента в нужном объеме в различные времена года и в различных климатических условиях. Полимеры устойчивы к различным рН среды (в кислой и щелочной). Биополимеры обладают важным свойством – устойчивостью к деструкции. Однако биологическая деструкция препятствует эффективному применению данного состава, так как они могут быть разрушены микроорганизмами при хранении и непосредственном применении [18].

Существует несколько видов биополимеров: «Ксанат», продукт БП-92, «Симусан» и другие. Продукт БП-92 является результатом жизнедеятельности микроорганизмов и представляет собой полисахарид. Данный БП был применен на различных месторождениях Западной Сибири. Например, на Покамасовском месторождении удалось дополнительно добыть 8,8 тыс. т нефти. Через 1-3 месяца после закачки полимера в пласт наблюдалась эффективность от применения технологии, а именно снижение обводненности и увеличение добычи. Средний технологический эффект от применения данного состава составил более 500 т на скважинооперацию.

### **2.3.6 АСП-заводнение**

В последние годы часто используется щелочно-ПАВ-полимерное воздействие на пласт, которое получило название АСП-заводнение. Данный тип полимерного заводнения включает в свой состав несколько компонентов: полимер, анионный ПАВ и соду.

При использовании данного ПЗ происходит двойное воздействие на пласт: сода и ПАВ уменьшает межфазное натяжение за счет образования микроэмульсии, полимер же, в свою очередь, увеличивает подвижность нефти. ПАВ снижают капиллярные силы, которые удерживают нефть в мелких порах породы. С помощью полимера увеличивается охват пласта заводнением. Данный вид ПЗ наиболее эффективен, так как каждый компонент состава оказывает свое воздействие на пласт. Использование АСП-заводнения позволяет увеличивать количество нефти и снизить количество добываемой воды, однако, количество добываемых флюидов не изменяется. Как говорилось ранее, данный вид ПЗ применялся на Западно-Салымском месторождении. В рамках пилотного

проекта технологию использовали на 7 скважинах. При этом удалось добыть дополнительно 3 тыс. т нефти. Применение данной технологии позволит увеличить КИН на 10% по месторождению [19].

## 2.4 Методика расчета полимерного заводнения

В данном разделе будет предложена методика расчета некоторых показателей полимера и его деструкции. Для оптимальной концентрации полимера необходимо рассчитать соотношение подвижности воды и нефти по формуле (1). Коэффициент подвижности считается благоприятным, когда значение данного показателя стремится к 1.

$$M = \frac{\lambda_n}{\lambda_v} = \frac{\mu_n/k_n}{\mu_v/k_v}, \quad (1)$$

где  $\lambda$  – подвижность;

$\mu$  – вязкость, мПа·с;

$k$  – эффективная проницаемость, мкм<sup>2</sup>;

$v$  – вода;

$n$  – нефть.

Если неоднородный пласт с перекрестным потоком между слоями, то расчет по закону Дарси демонстрирует, что идеальную вязкость полимера можно найти из формулы (2):

$$\mu_{\text{полимера}} = \mu_v \cdot M \cdot \frac{k_{\text{выс}}}{k_{\text{низ}}}, \quad [\text{Па} \cdot \text{с}], \quad (2)$$

где  $\mu_v$  – вязкость воды, мПа·с;

$k_{\text{выс}}$  – более высокий коэффициент проницаемости для смежных слоев, мкм<sup>2</sup>;

$k_{\text{низ}}$  – более низкий коэффициент проницаемости для смежных слоев, мкм<sup>2</sup>.

Если перекрестный поток отсутствует, то последним множителем можно пренебречь.

Полимерный состав может содержать несколько компонентов, поэтому массовую долю основного вещества рассчитывают по формуле (3):

$$W = \frac{m_1 - m_2}{m} \cdot 100, [\%], \quad (3)$$

где  $m_1$  – масса бюкса с полимером до высушивания, г;

$m_2$  – масса бюкса с полимером после высушивания, г;

$m$  – масса навески полимера, г.

Массовая концентрация полимерного раствора рассчитывается по формуле (4):

$$C = \frac{m \cdot W}{V \cdot 100}, [\text{г/дл}], \quad (4)$$

где  $m$  – масса навески полимера, г;

$W$  – массовая доля основного вещества в полимере, %;

$V$  – объем хлористого натрия NaCl, взятого для растворения полимера, дл.

С помощью уравнения (5) можно рассчитать адсорбция раствора. Чем больше концентрация раствора, тем больше величина адсорбции.

$$A = \frac{W_e \cdot (C_i - C_f)}{W_s} [\text{мг/г}], \quad (5)$$

где  $W_s$  – масса сухого полимера, г;

$W_e$  – масса раствора полимера, г;

$C_i$  – исходная концентрация полимера, %;

$C_f$  – окончательная концентрация полимера, %.

Характерным свойством для молекул полимера является способность к сорбции большого объёма жидкости. Так равновесную степень набухания, т.е. равновесное водопоглощение, полимеров в г воды на г полимера можно рассчитать по формуле (6):

$$X_1 = \frac{m_1 - m_2}{m}, [\text{г/г}], \quad (6)$$

где  $m_1$  – масса полимера и фильтровальной ткани после контакта с водой, г;

$m_2$  – масса фильтровальной ткани после контакта с водой, г;

$m$  – масса навески полимера, взятой для измерений, г.

Массовую долю растворимой части полимеров рассчитывают по формуле (7):

$$X_2 = \frac{m_1 \cdot V_{\phi}}{m \cdot V}, [\%], \quad (7)$$

где  $m_1$  – масса сухого остатка после испарения фильтрата, г;

$m$  – масса навески полимера, взятой на изменение равновесного водопоглощения, г;

$V_{\phi}$  – общий объем фильтрата, см<sup>3</sup>;

$V$  – объем фильтрата, взятый для определения сухого остатка, 100 см<sup>3</sup>.

Степень гидролиза полимера рассчитывается по формуле (8):

$$\alpha = \frac{(V - V_0) \cdot C \cdot 71 \cdot 10^{-3}}{m - (V - V_0) \cdot C \cdot 23 \cdot 10^{-3}} \cdot 100, [\%], \quad (8)$$

где  $V$  и  $V_0$  – объемы раствора NaOH, израсходованные на титрование рабочей и холостой пробы соответственно, мл;

$m$  – масса навески полимера, содержащаяся в растворе, взятом на титрование, г;

$C$  – точная молярная концентрация раствора NaOH, моль/л;

71 – молярная масса акриламидного звена, г/моль;

23 – грамм-молекулярная масса натрия, г/моль.

Чтобы проанализировать степень изменения проницаемости коллектора после применения ПЗ на керновой модели в направлении скважина-пласт производят фильтрацию воды. После чего определяют коэффициент проницаемости по воде. Для расчета остаточного фактора сопротивления по воде используют формулу (9):

$$RRF_w = \frac{k_1/\mu}{k_2/\mu}, \quad (9)$$

где  $\mu$  – вязкость воды, мПа·с;

$k_1$  – фазовая проницаемость воды до закачки полимерного раствора при остаточной нефтенасыщенности, мД;

$k_2$  – фазовая проницаемость воды после закачки полимерного раствора при остаточной нефтенасыщенности, мД.

Как говорилось ранее, полимер используют в качестве вытесняющего агента. Поэтому для оптимальной концентрации полимера пользуются расчетом соотношения подвижности нефти и полимерного раствора для каждой концентрации по формуле (10):

$$M = \frac{\lambda_n}{\lambda_{в.а}} = \frac{q_n \cdot \Delta P_{в.а}}{q_{в.а} \cdot \Delta P_n}, \quad (10)$$

где  $\lambda_n$  – подвижность нефти, мкм<sup>2</sup>/мПа·с;

$\lambda_{в.а}$  – подвижность вытесняющего агента, мкм<sup>2</sup>/мПа·с;

$q_n$  – расход при определении проницаемости по нефти, см<sup>3</sup>/мин;

$q_{в.а}$  – расход при прокачке полимерного раствора, см<sup>3</sup>/мин;

$\Delta P_n$  – установившийся перепад давления при определении проницаемости по нефти, кПа;

$\Delta P_{в.а}$  – установившийся перепад давления при фильтрации полимерного раствора, кПа.

Концентрация полимерного раствора определяется по формуле (11):

$$\omega = \frac{m_{в-ва}}{m_{р-ля}} \cdot 100, [\%], \quad (11)$$

где  $m_{в-ва}$  – масса растворенного вещества (полимера), г;

$m_{р-ля}$  – масса растворителя (воды), г.

По формуле (12) можно рассчитать коэффициент деструкции полимерного раствора:

$$K_{дестр} = \frac{C_{исх} - C_{дестр}}{C_{исх}} \cdot 100, [\%] \quad (12)$$

где  $C_{исх}$  – концентрация исходного полимерного раствора, %;

$C_{дестр}$  – концентрация полимерного раствора после исследований, %.

Для оценки стабильности полимерного раствора необходимо определить коэффициент стабильности по формуле (13):

$$K_C = \frac{\mu}{\mu_0}, \quad (13)$$

где  $\mu$  и  $\mu_0$  – динамическая вязкость до и после деструкции, мПа·с.

Также необходимо определить коэффициент скорости деструкции по формуле (14):

$$K_t = \frac{\mu_0 - \mu}{\mu_0 \cdot t}, [\text{ч}^{-1}], \quad (14)$$

где  $\mu$  и  $\mu_0$  – динамическая вязкость до и после деструкции, мПа·с;

$t$  – время деструкции, ч.

Оптимальная концентрация полимера определяется следующими критериями:

1. Соотношение подвижности  $M \leq 1$ ;
2. Минимальное значение адсорбции и деструкции полимера.

### **3 ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ВЫБОРУ ОПТИМАЛЬНОГО СОСТАВА ДЛЯ ПОЛИМЕРНОГО ЗАВОДНЕНИЯ**

Одним из методов повышения нефтеотдачи является полимерное заводнение. С помощью данной технологии можно увеличить охват пласта заводнением. Основными требованиями к пластам кандидатам являются характеристика пласта и высокая вязкость нефти.

Технологию полимерного заводнения можно разделить на несколько стадий. Сначала производят подробный анализ геологических характеристик с целью отбора пласта-кандидата. На следующей стадии производят полимер и подготавливают воду для заводнения. Следующая стадия включает в себя приготовление полимерного раствора, после чего раствор подвергается предварительному, а затем подробному анализу. На завершающей стадии происходит непосредственно закачка полимерного раствора в пласт и его полевые испытания.

Для достижения наибольшей эффективности важен комплексный подход к применению полимерного заводнения. Необходимо тщательно изучить геолого-физические условия, в которых будет применена технология. Наиболее важными параметрами пласта являются температура (80-120°C), проницаемость (0,01-2 мкм<sup>2</sup>) и минерализация пластовой воды (менее 270 мг/л). Также немаловажную роль играет вязкость нефти – чем выше вязкость нефти в пластовых условиях, тем более эффективно будет воздействие на пласт. В карбонатных коллекторах применение полимерного заводнения осложнено наличием в коллекторе ионов кальция Ca<sup>2+</sup> и магния Mg<sup>2+</sup>. Ионы способны вступать в реакцию с полимерами, в результате чего будет происходить осаждение полимера на поверхности породы.

Наиболее эффективной технологией производства полимера является сополимеризация. Оптимальная концентрация полимера в растворе составляет 0,1-0,15% масс. При подготовке воды необходимо поддерживать её качество согласно ОСТ 39-225-88. Наиболее важный параметр, определяющий качество



подготовленной воды, является содержание кислорода. Чтобы не допустить контакта воды с кислородом воду необходимо подготавливать на установках закрытого типа.

Технологический режим закачки полимерного раствора в пласт играет важную роль. Необходимо доставить полимер до нужного места в пласте и не допустить его разрушения. Оптимальным давлением закачки считается давление равное 20-22 МПа. Система ППД – внутриконтурное заводнение. При обводненности более 80% нецелесообразно применять полимерное заводнение. Использование графика Холла позволяет оценить работу нагнетательной скважины. Метод построения графика основан на использовании данных по нагнетанию агента в пласт через некоторое время после установления режима работы.

Отрицательным процессом, который может сопровождать полимерное заводнение, является деструкция полимера. Важно не допустить преждевременного наступления данного процесса. Для этого необходимо добавлять термические стабилизаторы в полимерный раствор, чтобы не допустить наступления термической деструкции. Для предотвращения химической деструкции необходимо применять высококачественную воду для заводнения, т.е. вода для заводнения должна быть бескислородной или с минимальным содержанием кислорода (менее 0,5 мг/л). Минимизировать риск наступления механической деструкции можно, поддерживая скорость потока жидкости не более 5 м/с. Биологическая деструкция встречается крайне редко. Также этот тип деструкции не оказывает влияния на вязкость раствора.

В настоящее время набирают популярность технологии полимерного раствора с использованием АСП-заводнения или простого эфира целлюлозы. Были рассмотрены примеры месторождений, на которых были применены данные технологии. Состав для АСП-заводнения включает в себя 3 компонента: полимер, щелочь и ПАВ. Каждый компонент по-своему воздействует на остаточную нефть. Данный состав эффективнее, так как благодаря воздействию состава на пласт увеличивается добыча нефти и уменьшается количество

добываемой воды. Полимерное заводнение с добавлением простого эфира целлюлозы также достаточно эффективно. Это объясняется тем, что эфир целлюлозы увеличивает вязкость в водных растворах, что положительно сказывается на процессе заводнения.

Разнообразие исследований в нефтехимии обуславливает большое количество составов для полимерного заводнения. Разработки позволяют адаптировать полимеры для их применения в аномальных пластовых условиях. Выделяют следующие типы полимерных составов: сшитый полимерный состав; полимердисперсный состав; полимерно-гелевая система; простой эфир целлюлозы; биополимеры; АСП-заводнение. В таблице 7 (приложение А) дана сравнительная характеристика различных типов полимеров по составу и по основным параметрам применения – температуре и проницаемости. Также выделены особенности применения каждого состава.

В таблице 8 отражена эффективность от применения полимерного заводнения с использованием различных составов, ранее описанных в работе, на месторождениях Западной Сибири.

Таблица 8 – Сравнительная таблица эффективности полимерного заводнения

<b>Параметр</b> <b>Тип полимера</b>	<b>Месторождение</b>	<b>Название полимера</b>	<b>Дополнительная добыча нефти, тыс. т</b>	<b>Средний технологический эффект, т нефти на 1 скважинно-операцию</b>
СПС	Приобское	МСПС	95,3	2200
ПДС	Хохряковское	МПДС	24,1	1583
ПГС	Комсомольское	«Темпоскрин»	6	2015
ПЭЦ	Покачевское	«МЕТКА»	75,4	1093
АСП	Западно-Салымское	АСП	3	-
БП	Покамасовское	Продукт БП-92	8,8	Более 500
СПС	Х	Superpusher K129	12,1	1200

Как видно из таблицы наиболее эффективным является сшитый полимерный состав для заводнения. Данный состав был применен на Приобском месторождении. Сшитый полимерный состав имеет наибольший средний технологический эффект (2200 т нефти на одну скважинооперацию). Также с помощью данного состава можно больше дополнительно добыть нефти (95,3 тыс. т).

Сшитый полимерный состав имеет несколько преимуществ по сравнению с другими составами. Данный состав можно применять и на поздних стадиях разработки. Также сшитый полимерный состав способен проникать вглубь пласта на большие расстояния. Это позволяет более эффективно воздействовать на фильтрационные потоки.

Таким образом, с помощью технологии полимерного заводнения можно увеличить охват пласта заводнением и добыть остаточную нефть из пласта. Данная технология позволяет выровнять фронт вытеснения нефти и продлить безводный период эксплуатации месторождения. При этом важно правильно подобрать состав полимерного раствора. Также необходимо соблюдать технологический режим закачки раствора в пласт, чтобы не допустить преждевременного разрушения полимера и добиться наибольшего эффекта от полимерного заводнения.

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА  
«ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И  
РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»**

Студенту:

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>
2Б6Г	Вендина Дарья Александровна

<b>Школа</b>	<b>Инженерная школа природных ресурсов</b>	<b>Отделение школы (НОЦ)</b>	<b>Отделение нефтегазового дела</b>
<b>Уровень образования</b>	Бакалавриат	<b>Направление/специальность</b>	21.03.01 «Нефтегазовое дело», профиль: «Эксплуатация и обслуживание объектов добычи нефти»

**Исходные данные к разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:**

1. Стоимость ресурсов исследования: материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих	Стоимость выполняемых работ, материальных ресурсов, согласно применяемой техники и технологии, в соответствии с рыночными ценами
2. Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования	Общая система налогообложения

**Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:**

1. Оценка коммерческого потенциала, перспективности и альтернатив проведения исследования с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения	Анализ потенциальных потребителей, оценка готовности проекта к коммерциализации
2. Планирование и формирование бюджета исследований	Определение этапов работ; определение трудоемкости работ. Определение затрат
3. Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования	Оценка технологической и экономической эффективности

**Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):**

1. Оценка ресурсной, и экономической эффективности
--

<b>Дата выдачи задания для раздела по линейному графику</b>	29.02.2020
---	------------

**Задание выдал консультант:**

<b>Должность</b>	<b>ФИО</b>	<b>Ученая степень, звание</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
Доцент	Якимова Татьяна Борисовна	к.э.н.		29.02.2020

**Задание принял к исполнению студент:**

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
2Б6Г	Вендина Дарья Александровна		29.02.2020

## 4                                      **ФИНАНСОВЫЙ**                                      **МЕНЕДЖМЕНТ,** **РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ**

В выпускной квалификационной работе рассмотрен более эффективный метод заводнения, а именно полимерное заводнение. Данная технология позволяет увеличить охват пласта заводнением и как результат увеличить нефтеотдачу.

Полимерный раствор состоит из полимера, воды и в некоторых случаях из сшивающего агента. Перед закачкой в пласт необходимо изучить ГФУ применения. В соответствии с параметрами пласта с помощью лабораторных исследований подбирают оптимальный состав реагентов. Далее необходимо провести полевые испытания.

В данном разделе будет отражена экономическая эффективность применения всех ранее рассмотренных составов. Также будет рассчитана дополнительная выручка от применения ПДС на месторождениях Западной Сибири. Сравним дополнительную добычу нефти по проектным данным и по фактическим и рассчитаем эффективность СПС (марка Superpusher K129) на месторождении «X».

### **4.1 Эффективность от применения различных составов**

В последние годы для полимерного заводнения используют различные составы. Рассчитаем экономическую эффективность от применения рассмотренных ранее составов.

Для расчетов возьмем нефть марки Urals. Стоимость данной нефти составляет 21,87 \$/баррель. Курс доллара составил 73,53 руб. 1 баррель равен 0,1373 т. Таким образом, стоимость нефти составит 11 711,51 руб./т. Данные взяты на 29.04.2020 года.

В таблице 9 отразили дополнительную добычу нефти и дополнительную выручку от применения полимерного заводнения.

Таблица 9 – Экономическая эффективность от применения различных составов

Параметр Тип полимера	Месторождение	Название полимера	Дополнительная добыча нефти, тыс. т	Дополнительная выручка, руб.
СПС	Приобское	МСПС	95,3	1 116 106 903
ПДС	Хохряковское	МПДС	24,1	282 247 391
ПГС	Комсомольское	«Темпоскрин»	6	70 269 060
ПЭЦ	Покачевское	«МЕТКА»	75,4	883 047 854
АСП	Западно-Салымское	АСП	3	35 134 530
БП	Покамасовское	Продукт БП-92	8,8	103 061 288
СПС	Х	Superpusher K129	12,1	141 709 271

Таким образом, наибольшую эффективность можно получить от применения МПДС (1 116 106 903 руб.) и полимера «МЕТКА» (883 047 854 руб.). От применения АСП-заводнения получаем наименьшую эффективность (35 134 530 руб.).

#### **4.2 Анализ применения полимерного заводнения на месторождении «Х»**

В качестве примера рассмотрим проведение полимерного заводнения с использованием полимера марки Superpusher K129 на месторождении «Х». Закачка полимерного раствора производилась на 2 скважинах. За весь период испытаний, который составил 44 месяца, был закачен полимер объёмом 1655 т. Продолжительность эффекта составила 80 месяцев. В таблице 10 отражены данные по фактической и проектной дополнительной добычи нефти.

Таблица 10 – Сопоставление фактической и проектной доп. добычи нефти по прямому счёту на основе отчетных данных

Месяц. Год	Накопленная дополнительная добыча нефти факт, т	Накопленная дополнительная добыча нефти по проекту, т	Дополнительная добыча нефти факт, т	Дополнительная добыча нефти по проекту, т
окт.14	372,6	341,0	372,6	341,0
ноя.14	905,9	682,0	533,3	404,5
дек.14	1341,2	1086,5	435,3	452,4
январ.15	2383,5	1538,9	1042,3	531,1
фев.15	3259,4	2070,0	875,9	574,9
мар.15	4281,6	2645,0	1022,2	657,6
апр.15	5154,2	3302,6	872,6	721,1
май.15	6124,3	4023,7	970,0	707,2
июн.15	7136,4	4730,9	1012,1	846,3
июл.15	8560,4	5577,2	1424,0	879,8
авг.15		6457,0		972,3
сен.15		7429,3		1001,5
окт.15		8430,9		1098,0
ноя.15		9528,8		1160,9
дек.15		10689,8		1183,8

Проанализировав таблицу, делаем вывод, что фактическая дополнительная добыча нефти больше проектной. Соответственно, проведенные работы по закачке полимерного раствора прошли успешно и целесообразно дальше использовать данную технологию на месторождении «Х». Также построили график, на котором наглядно представили сравнение дополнительной добычи по проекту и по факту (рисунок 21). Из графика также видно, что фактическая дополнительная добыча нефти была больше проектной.

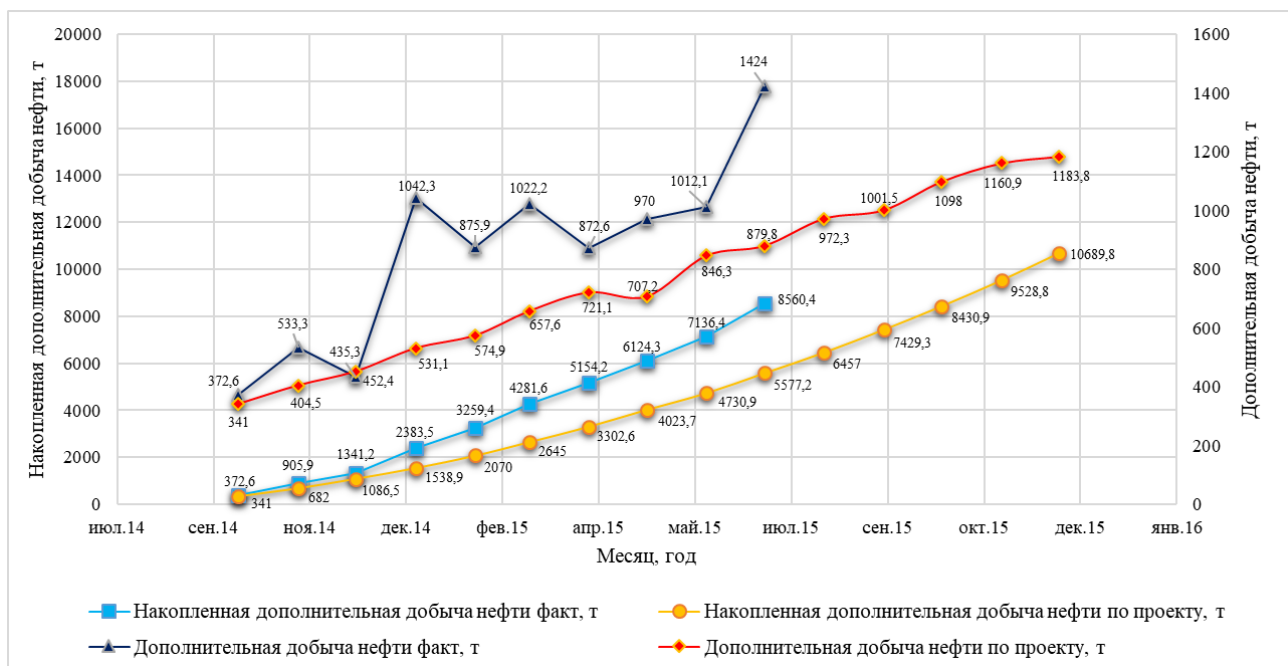


Рисунок 21 – График сопоставления фактической и проектной дополнительной добычи нефти

### 4.3 Применение технологии полимерного заводнения

Рассмотрим ещё примеры применения технологии полимерного заводнения. Регулировать прочностные и реологические свойства можно, изменяя концентрацию полимера или добавляя к основному составу различные сшиватели. Для более эффективного применения ПДС был разработан модифицированный ПДС (МПДС). К ПДС добавляют сшивающий агент, соли многовалентных металлов, ПАВ и другие реагенты.

Применение МПДС позволяет повысить эффективность от применения данной технологии на 20-50 %. На 1 скважинооперацию в среднем приходится около 1500 м<sup>3</sup> состава.

В таблице 11 представлены результаты применения МПДС на месторождениях Западной Сибири. Как видно из таблицы ТПП «Лангепаснефтегаз» и ОАО «Нижевартовскнефтегаз» применили большее количество операций по сравнению с остальными компаниями. Всего на



месторождениях Западной Сибири было проведено 655 скважинообработок [20].

В компаниях продолжается применение технологии и в настоящее время.

Таблица 11 – Применение МПДС

<b>Компания</b>	<b>Год начала внедрения</b>	<b>Количество скважинообработок</b>
АО «Газпромнефть-Ноябрьскнефтегаз»	1989	9
ПАО «Сургутнефтегаз»	1988	95
ТПП «Лангепаснефтегаз»	1986	254
ОАО «Нижневартовскнефтегаз»	1986	134
ПАО «Приобьнефть»	1998	20
АО «Самотлорнефть»	1998	32
АО «Томскнефть» ВНК	2006	76
АО «Нижневартовское нефтегазодобывающее предприятие»	2007	11
ООО «Нефтяная компания Красноленинскнефтегаз»	1990	13
ТПП «Когалымнефтегаз»	1990	8
ПАО «Варьеганнефть»	1989	3
<b>ИТОГО</b>		<b>655</b>

#### **4.4 Технологическая эффективность технологии полимерного заводнения**

Чтобы оценить экономическую эффективность от применения полимерного заводнения необходимо знать сколько составила дополнительная добыча нефти. Так в таблице 12 отражена технологическая эффективность от проведения полимерного заводнения с использованием МПДС [20].

Таблица 12 – Результаты применения МПДС

<b>Компания</b>	<b>Дополнительная добыча нефти, т</b>	<b>Средняя удельная эффективность, т нефти на скважинооперацию</b>
АО «Газпромнефть-Ноябрьскнефтегаз»	20 700	2 300
ПАО «Сургутнефтегаз»	253 805	2 672
ТПП «Лангепаснефтегаз»	944 058	3 717
ОАО «Нижневартовскнефтегаз»	795 300	5 935
ПАО «Приобьнефть»	45 671	2 284
АО «Самотлорнефть»	84 980	2 656
АО «Томскнефть» ВНК	129 200	1 700
АО «Нижневартовское нефтегазодобывающее предприятие»	39 759	3 614
ООО «Нефтяная компания Красноленинскнефтегаз»	32 200	2 477
ТПП «Когалымнефтегаз»	6 280	785
ПАО «Варьеганнефть»	5 880	1 960
<b>ИТОГО</b>	<b>2 297 944</b>	

Еще одним показателем успешного применения технологии является удельная эффективность. Данный параметр показывает сколько тонн нефти получено на одну скважинооперацию.

Как видно из таблицы 12 компанией ТПП «Лангепаснефтегаз» добыто дополнительно 944 058 т нефти, что значительно больше, чем у остальных компаний. Однако наибольшей средней удельной эффективности удалось добиться компании ОАО «Нижневартовскнефтегаз». Средняя удельная эффективность составила 5 935 т нефти на одну скважинооперацию. Всего по

Западной Сибири добыли дополнительно 2 297 944 т нефти с помощью технологии МПДС.

#### **4.5 Расчет экономической эффективности технологии полимерного заводнения**

Для расчета экономической эффективности необходимо определить стоимость нефти и определить сколько компания получит дополнительной выручки.

Для расчетов возьмем нефть марки Urals. Стоимость данной нефти составляет 21,87 \$/баррель. Курс доллара составил 73,53 руб. 1 баррель равен 0,1373 т. Таким образом, стоимость нефти составит 11 711,51 руб./т. Данные взяты на 29.04.2020 года.

В таблице 13 представлена экономическая эффективность от применения технологии МПДС.

Таблица 13 – Экономическая эффективность от применения МПДС

<b>Компания</b>	<b>Дополнительная добыча нефти, т</b>	<b>Стоимость дополнительно добытой нефти, руб.</b>
АО «Газпромнефть-Ноябрьскнефтегаз»	20 700	242 428 257,00
ПАО «Сургутнефтегаз»	253 805	2 972 439 795,55
ТПП «Лангепаснефтегаз»	944 058	11 056 344 707,58
ОАО «Нижневартовскнефтегаз»	795 300	9 314 163 903,00
ПАО «Приобьнефть»	45 671	534 876 373,21
АО «Самотлорнефть»	84 980	995 244 119,80
АО «Томскнефть» ВНК	129 200	1 513 127 092,00
АО «Нижневартовское нефтегазодобывающее предприятие»	39 759	465 637 926,09
ООО «Нефтяная компания Краснотуркменскнефтегаз»	32 200	377 110 622,00
ТПП «Когалымнефтегаз»	6 280	73 548 282,80
ПАО «Варьеганнефть»	5 880	68 863 678,80
<b>ИТОГО</b>	<b>2 297 944</b>	<b>26 912 394 135,44</b>

Проанализировав данную таблицу, видно, что наибольшую выручку от применения МПДС получит компания ТПП «Лангепаснефтегаз». Дополнительная выручка составит 11 056 344 707,58 руб. В целом по месторождениям Западной Сибири от применения технологии возможно получить дополнительно 26 912 394 135,44 руб.

### **Вывод**

В данном разделе была оценена технологическая и экономическая эффективность от применения технологии полимерного заводнения. Благодаря данной технологии можно увеличить охват пласта заводнением и соответственно увеличить нефтеотдачу.

По произведенным расчетам наибольшую эффективность можно получить от применения МПДС (1 116 106 903 руб.) и полимера «МЕТКА» (883 047 854 руб.). От применения АСП-заводнения получаем наименьшую эффективность (35 134 530 руб.).

Компанией ТПП «Лангепаснефтегаз» удалось за счет применения технологии МПДС дополнительно добыть 944 058 т нефти. Наибольшая средняя удельная эффективность от применения технологии наблюдалась у компании ОАО «Нишневартовскнефтегаз» (5 935 т нефти на одну скважинооперацию). Стоит отметить, что с помощью технологии МПДС на месторождениях Западной Сибири дополнительно добыли 2 297 944 т нефти, что составляет 26 912 394 135,44 руб.

## ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа	ФИО
2Б6Г	Вендина Дарья Александровна

Школа	Инженерная школа природных ресурсов	Отделение (НОЦ)	Отделение нефтегазового дела
Уровень образования	Бакалавриат	Направление/специальность	21.03.01 «Нефтегазовое дело», профиль: «Эксплуатация и обслуживание объектов добычи нефти»

Тема ВКР:

<b>Анализ эффективности применения технологии полимерного заводнения в различных геологических условиях на месторождениях Западной Сибири</b>	
<b>Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:</b>	
1. Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика, рабочая зона) и области его применения	Объект исследования: технологии применения полимерного заводнения Область применения: нагнетательные скважины
Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:	
<b>1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>– специальные (характерные при эксплуатации объекта исследования, проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства;</li> <li>– организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны.</li> </ul>	Трудовой кодекс Российской Федерации от 30.12.2001 N 197-ФЗ (ред. от 27.12.2018) – ТК РФ – Глава 47. Особенности регулирования труда лиц, работающих вахтовым методом
<b>2. Производственная безопасность:</b> 2.1. Анализ выявленных вредных и опасных факторов 2.2. Обоснование мероприятий по снижению воздействия	Вредные факторы: - отклонение показателей климата на открытом воздухе; - превышение уровней шума и вибрации; - повышенная запыленность рабочей зоны; - недостаточная освещенность. Опасные факторы: - химические реагенты; - высокое давление; - механические опасности.
<b>3. Экологическая безопасность:</b>	Атмосфера: загрязнение атмосферного воздуха. Гидросфера: загрязнение подземных вод. Литосфера: загрязнение почвы химическими веществами.
<b>4. Безопасность в чрезвычайных ситуациях:</b>	Возможные ЧС: - разрушение элементов, находящихся под высоким давлением;

	- разрыв трубопроводов, подающих реагенты в скважину; - нарушение электроснабжения. Наиболее типичная ЧС: разрушение элементов, находящихся под высоким давлением.
--	---

<b>Дата выдачи задания для раздела по линейному графику</b>	29.02.2020
---	------------

**Задание выдал консультант:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент	Черемискина Мария Сергеевна	-		29.02.2020

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
2Б6Г	Вендина Дарья Александровна		29.02.2020

## **5 СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ**

Все производственные объекты сопровождаются воздействием опасных и вредных факторов на сотрудника предприятия. Поэтому важно соблюдать безопасные условия труда. Социальная ответственность – ответственность организации за воздействие её решений и деятельности на общество и окружающую среду через прозрачное и этическое поведение. Соблюдая правила безопасности, можно избежать наступления чрезвычайной ситуации.

Полимерное заводнение является одним из наиболее перспективных методов увеличения нефтеотдачи, при котором происходит равномерное вытеснение нефти из пласта. За счет этого происходит увеличение охвата пласта заводнением. ПЗ способствует извлечению остаточной нефти, проникая в высокопроницаемые пропластки.

Сущность работ заключается в выполнении следующих технологических операций: осуществление работ по заданному режиму закачки полимерного раствора; контроль за системами работы агрегата; обслуживание, монтаж и демонтаж оборудования, используемого при закачке жидкости. Работы выполняются круглогодично. Работы по закачке полимерного раствора в пласт производят на кустовых площадках, на открытых площадках.

### **5.1 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности**

Так как полимерное заводнение осуществляется непосредственно на месторождении, то для работников преобладает вахтовый метод работы. Это объясняется тем, что месторождения значительно удалены от места постоянного проживания работников или места нахождения работодателя. Особенности работы вахтовым методом прописаны в Главе 7 ТК РФ [21]. К работам, выполняемым вахтовым методом, не допускаются беременные женщины и женщины, имеющие детей в возрасте до трех лет; работники в возрасте до восемнадцати лет. Также не допускаются лица, имеющие противопоказания по медицинским заключениям.

Продолжительность вахты не должна превышать одного месяца. В редких случаях продолжительность может быть увеличена до трех месяцев. Период вахты включает в себя время выполнения работ и время междуменного отдыха.

Лицам, выполняющим работы вахтовым методом, за каждый календарный день пребывания в местах производства работ в период вахты, а также за фактические дни нахождения в пути от места нахождения работодателя (пункта сбора) до места выполнения работы и обратно выплачивается взамен суточных надбавка за вахтовый метод работы.

Рабочее время и время отдыха в пределах учетного периода регламентируется графиком работы на вахте, который утверждается работодателем. Северные районы Западной Сибири в большинстве приурочены к районам Крайнего Севера. Работникам, выезжающим для выполнения работ вахтовым методом на местности, приравненные к районам Крайнего Севера:

- выплачиваются процентные надбавки к заработной плате в порядке и размерах, которые предусмотрены для лиц, постоянно работающих в местностях, приравненным к районам Крайнего Севера. Процентные надбавки в Западной Сибири: по истечении первого года работы – 10%, за каждый последующий год работы – увеличение на 10% по достижении 50% заработка;
- предоставляется ежегодный дополнительный оплачиваемый отпуск в порядке и на условиях, которые предусмотрены для лиц, постоянно работающих: в местностях, приравненных к районам Крайнего Севера, - 16 календарных дней.

## **5.2 Производственная безопасность**

Закачка полимерных растворов осуществляется через нагнетательные скважины, обслуживание которых производит оператор ППД. Его рабочее место состоит из скважин, кустовой площадки, блоков автоматики.

Работая на производственных объектах, работник подвергается вредному воздействию опасных и вредных факторов. Классификация факторов представлена в нормативном документе ГОСТ 12.0.003-2015 [22] (таблица 14).



Таблица 14 – Основные элементы производственного процесса, формирующие опасные и вредные факторы при выполнении работ на кустовых площадках

Факторы (ГОСТ 12.0.003-2015)	Этапы работ			Нормативные документы
	Разработка	Приготовление раствора	Эксплуатация	
1) Отклонение показателей климата на открытом воздухе;	+		+	ГОСТ 12.1.003-2014 ССБТ. Шум. Общие требования безопасности [23]; ГОСТ 12.1.012-90 ССБТ. Вибрационная безопасность. Общие требования [24]; СП 52.13330.2016 Естественное и искусственное освещение. Актуализированная редакция СНиП 23-05-95* [25]; ГОСТ 12.2.003-91 ССБТ. Оборудование производное. Общие требования безопасности [26]; ГОСТ 12.1.007-76 ССБТ. Вредные вещества. Классификация и общие требования безопасности [27].
2) Превышение уровней шума и вибрации;		+	+	
3) Повышенная запыленность рабочей зоны;	+	+	+	
4) Недостаточная освещенность;	+	+	+	
5) Химические реагенты;		+	+	
6) Высокое давление;		+	+	
7) Механические опасности.	+	+	+	

### 5.2.1 Анализ вредных производственных факторов и обоснование мероприятий по снижению уровня воздействия

#### Отклонение показателей климата на открытом воздухе

Работы по закачке полимерного раствора в пласт производятся на открытом воздухе. Неблагоприятные метеорологические условия (температура,

скорость ветра, влажность воздуха) могут негативно сказаться на производственном процессе и привести к несчастному случаю. При определенной температуре воздуха и скорости ветра в холодное время работы приостанавливаются (таблица 15).

Таблица 15 – Погодные условия, при которых работы на открытом воздухе приостанавливаются

Скорость ветра, м/с	Температура воздуха, °С
Безветренная погода	-40
Менее 5,0	-35
5,1 – 10,0	-25
10,1 – 15,0	-15
15,1 – 20,0	-5
Более 20,0	0

При высокой температуре снижается концентрация внимания, появляются неосмотрительность и торопливость, при низкой – вследствие интенсивной теплоотдачи организма. Если влажность больше 35-70% воздух считается влажным, если меньше данного диапазона – сухой. Сухой воздух влечет за собой повышенное испарение, которое приводит к ощущению сухости слизистых оболочек и кожи. В свою очередь, влажный воздух осложняет испарение.

При отклонении показателей климата предусмотрены средства индивидуальной защиты (СИЗ). СИЗ должны предотвращать или уменьшать риск действия производственных факторов. Они выбираются согласно ГОСТ 12.4.011-89 [28]. Для защиты головы от теплового облучения алюминиевые, фибровые каски. Также каска поможет избежать травм головы. Для исключения попадания песка в глаза или в носовую полость необходимо применять очки и респираторы. Так как при приготовлении полимерного раствора сотрудник работает с химическими реагентами необходимо использовать перчатки или

рукавицы, которые также в холодный период года помогут избежать обморожения рук. Защитой от пониженной температуры служит теплая спецодежда, а при осадках – плащи. Также сооружают помещения для обогрева сотрудников в холодное время года.

### **Превышение уровней шума и вибрации**

Вблизи работы оператора ППД может производиться капитальный ремонт скважины. Данный вид работ создает уровень шума, не превышающий допустимый согласно ГОСТ 12.1.003-2014 [23]. Значение уровня звука на рабочем месте не должен превышать 40-45 дБ, а на открытой местности – не более 80 дБ. Для снижения уровня шума работникам следует применять СИЗ. Из-за удаленности месторождений от места проживания работников их доставляют на вахту на вертолетах. Они создают уровень шума 95-100 дБ, что превышает норму. Поэтому необходимо выбрать средства защиты согласно СП 51.13330.2011 [29]: противозумные вкладыши или наушники.

Технологическая норма уровня вибрации составляет 92 дБ согласно ГОСТ 12.1.012-90 [24]. При значении уровня вибрации 92дБ частота составляет 63 Гц. Уровень вибрации на рабочем месте оператора ППД объясняется работой насосного агрегата по закачке реагента в скважину. При работе с оборудованием при вибрации производительность работника снижается, а также растет число травм. Для защиты от вибрации рекомендуется применять резиновые перчатки.

### **Повышенная запыленность рабочей зоны**

В большинстве случаев насыпные кустовые площадки состоят из песка и глинистого материала. При сильном ветре наблюдается повышенная запыленность рабочей зоны и песок попадает в носовую полость рабочего. Чтобы предотвратить попадание песка необходимо использовать респираторы.

### **Недостаточная освещенность**

Часто приходится работать в темное время суток и необходимо обеспечить достаточную освещенность зоны работ. Норма освещенности

должна быть не ниже 10 люксов согласно СП 52.13330.2016 [25]. Если норма освещенности соответствует нужному диапазону, то мероприятия по улучшению освещенности не требуется.

## **5.2.2 Анализ опасных производственных факторов и обоснование мероприятий по снижению уровня воздействия**

### **Химические реагенты**

При полимерном заводнении (ПЗ) наиболее часто используют полиакриламид (ПАА). При нарушении герметизации емкости для хранения химических реагентов в установке дозирования реагентов (УДХ) происходит разлив реагента в помещении. При контакте может вызывать раздражение глаз; при повторном контакте с кожей вызывает ее раздражение, а при длительной или чрезмерной ингаляции – раздражение дыхательных путей. Поэтому необходимо соблюдать меры осторожности при работе с реагентами при приготовлении раствора. Требования безопасности при работе с химическими реагентами прописаны в ГОСТ 12.1.007-76, при соблюдении которых можно избежать воздействия опасного фактора на здоровье работника [30].

### **Высокое давление**

Аппараты, работающие под давлением – оборудование, в котором жидкость или газ находятся под давлением, превышающем атмосферное. Закачка полимерного раствора осуществляется под давлением 20-22 МПа. Насосы на кустовой насосной станции создают такое высокое давление и производят подачу подающих воды с реагентом в нагнетательную скважину, а из нее в пласт. Чтобы не допустить чрезвычайных ситуаций разработаны Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Правила промышленной безопасности опасных производственных объектов, на которых используется оборудование, работающее под избыточным давлением», утверждённые Приказом Ростехнадзора №116 от 25.03.2014 г.

Нарушение герметичности оборудования может произойти при взрыве сосуда, работающего под избыточным давлением. При взрыве может произойти разрушение взрывной волной близкорасположенного оборудования, а также нанесение травм работнику, в том числе не совместимых с жизнью.

Также нарушение герметичности может быть вызвано дефектами (трещины, вмятины и т.д.), полученные при изготовлении, хранении и транспортировке сосудов, работающих под давлением. Для обнаружения дефектов необходим ежедневный внешний осмотр оборудования, применение средств измерений КИП, а также испытания сосудов и материалов, из которых они изготовлены.

### **Механические опасности**

При осуществлении процесса заводнения необходимо использовать высоконапорные насосы, которые могут создавать давление 200-500 атм. Насос имеет вращающиеся части, которые могут представлять опасность для жизни сотрудника. Поэтому очень важно использовать кожухи и заградительные ограждения, чтобы исключить вероятность соприкосновения человека с вращающимся механизмом.

Необходимо систематически проверять целостность защитных ограждений на движущихся и вращающихся механизмах, плановую и внеплановую проверку пусковых и тормозных устройств, а также проверку состояния оборудования согласно ГОСТ 12.2.003-91 [26]. Также необходимо соблюдать технику безопасности и форму одежды (все пуговицы застегнуты).

### **5.3 Экологическая безопасность**

Процесс закачки полимерного раствора в пласт сопровождается техногенным воздействием на окружающую среду. Поэтому для минимизации вредного воздействия необходимо применять комплекс мероприятий по охране окружающей среды.

### **Защита атмосферы**

Атмосферный воздух может загрязняться вследствие выброса газа и сопутствующих вредных веществ на кустовой площадке. Мероприятиями по охране атмосферы являются поддержание герметичности системы ППД и контроль за воздушной средой на КНС для определения опасной концентрации газа. Мероприятия по защите атмосферы от загрязнения:

- проверка оборудования на герметичность;
- контроль выхлопных газов автотранспорта, находящегося на кустовой площадке, на содержание окиси углерода  $CO_2$ ;
- контроль источников выброса на содержание окиси углерода  $CO_2$ , окислов азота для подбора оптимального режима сжигания газа и уменьшения концентрации вредных веществ.

### **Защита гидросферы**

Вторичное вскрытие пласта скважин при определённых условиях сопровождается:

- Загрязнением подземных вод химическим реагентами или нефтью при разливе;
- Бытовыми или твердыми отходами;
- Перетоками флюида в заколонном пространстве из-за нарушения целостности обсадной колонны.

Мероприятия по защите гидросферы заключаются в том, что при эксплуатации скважин продукты освоения (нефть, отработанная вода) необходимо собирать в передвижные металлические емкости по 25 м<sup>3</sup> с последующей откачкой нефти и пластовой воды в нефтесборный коллектор. После закачки химических реагентов через нагнетательную скважину ее необходимо промыть достаточным объемом инертной жидкости. Сброс жидкости производится в сборную емкость. Остатки реагентов собираются и доставляются в места утилизации или уничтожения.

### **Защита литосферы**

В процессе закачки полимерного раствора происходит цементирование каналов, по которым он подавался в пласт. В результате происходит снижение проницаемости высокопроницаемых участков пласта. Поэтому следует выбирать полимер, который после выполнения своей функции разрушится, а не загрязнит почву. Также при повреждении или коррозировании подземного оборудования скважины возможна утечка нефти, которая приведет к загрязнению почвы. Мероприятия по защите литосферы:

- рекультивация земель: при разливе нефти необходимо ее собрать, внести удобрения и высадить растения;
- подбор оптимального типа полимера;
- контроль за герметичностью оборудования.

#### **5.4 Безопасность в чрезвычайных ситуациях**

Чрезвычайные ситуации (ЧС), которые могут возникнуть на кустовой площадке при закачке полимерного раствора в пласт, следующие:

- разрушение элементов, содержащие жидкости и газы, находящиеся под высоким давлением;
- разрыв трубопроводов, подающих реагенты в скважину;
- нарушение электроснабжения или полное отключение подачи электроэнергии.

Наибольшую опасность для работников представляют собой процессы, идущие под высоким давлением. При этом существует вероятность нарушения герметичности оборудования, т.е. может произойти взрыв. В результате работник может получить травмы, в том числе не совместимые с жизнью.

В случае возникновения ЧС необходимо оградить опасную зону, сообщить о ситуации руководству и начать мероприятия по спасению людей, если есть пострадавшие. Действия при ЧС регламентированы инструкцией, с которой должен быть ознакомлен каждый сотрудник.

Основные мероприятия по предотвращению опасностей, обусловленных повышением давления и нагрузками, включают в себя: осмотр и испытание

установок, оборудования, механизмов; применение различных средств блокировки, исключающих аварии при неправильных действиях рабочих; автоматизация производственных процессов, позволяющая вывести людей из опасных зон, и осуществлять контроль показаний приборов дистанционно.

### **Вывод**

В данном разделе были проанализированы вредные и опасные факторы, влияющие на здоровье работников. Выполнение мер безопасности и мер по предупреждению опасных факторов позволит избежать наступления ЧС и сократить вредное воздействие на работников предприятия. При полимерном заводнении происходит загрязнение окружающей среды, поэтому также нужно уделять должное внимание экологической безопасности.



## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В выпускной квалификационной работе были рассмотрены технологии полимерного заводнения и геолого-физические условия применения. С помощью данной технологии снижается динамическая неоднородность потоков жидкости. Как следствие, увеличивается коэффициент охвата пласта заводнением, соответственно, и коэффициент нефтеотдачи.

Для максимального эффекта от технологии необходимо подбирать состав полимерного раствора для конкретных условий. Также важно соблюдать технологический режим подготовки раствора и режим закачки в пласт. Эффективность применения полимерного заводнения зависит от нескольких факторов: высокая вязкость нефти в пластовых условиях; характеристики пласта – температура, проницаемость и минерализация воды; минимизация наступления деструкции.

В последнее время набирают популярность технологии АСП-заводнения и полимерного заводнения с использованием простого эфира целлюлозы. Однако наиболее эффективной технологией является заводнение с использованием сшитого полимерного состава. Средняя технологическая эффективность составляет 2200 т нефти на одну скважинооперацию.

Также были рассчитана дополнительная выручка, полученная компаниями за счет применения технологии МПДС. На месторождениях Западной Сибири с помощью данной технологии удалось дополнительно добыть 2 297 944 т нефти, что составляет 26 912 394 135,44 руб.

Были рассмотрены меры производственной безопасности при выполнении работ по закачке полимерного раствора в пласт, которые позволяют избежать наступления вредных и опасных производственных факторов. Также были рекомендованы мероприятия по их устранению. При полимерном заводнении происходит загрязнение окружающей среды, поэтому также нужно уделять должное внимание экологической безопасности.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Билинчук А.В. Биополимерное заводнение – основа прироста извлекаемых запасов нефти на разрабатываемых месторождениях Западной Сибири / А.В. Билинчук [и др.] // Геология нефти и газа. – 2007. – №3. – С. 49-54.
2. Деламаид Э. Химические методы увеличения нефтеотдачи с использованием горизонтальных скважин: промышленные методы / Э. Деламаид // Георесурсы. – 2017. – Т.19, №3, Ч.1. – С. 166-175.
3. Шамилов В.М. Полимерные нанокомпозиты на основе карбоксиметилцеллюлозы и наночастиц Al и Si для увеличения добычи нефти / В.М. Шамилов, Э.Р. Бабаев, Н.Ф. Алиева // Территория Нефтегаз. – 2017. – №3. – С. 34-38.
4. Вендина Д.А. Анализ эффективности потокоотклоняющих технологий в условиях повышенных значений пластовых температур // Проблемы геологии и освоения недр: Труды XXIII Международного симпозиума имени академика М.А. Усова студентов и молодых ученых, Томск, 8-12 апреля 2019 г. – Томск, 2019. – Т.2 – С. 72-74.
5. Повышение эффективности полимерного заводнения [Электронный ресурс]. – URL: [https://snf-group.ru/wp-content/uploads/2015/05/Oil-30\\_Years\\_of\\_EOR.pdf](https://snf-group.ru/wp-content/uploads/2015/05/Oil-30_Years_of_EOR.pdf)
6. Химченко П.В. Обоснование выбора полимера и композиции на основе полиакриламида для полимерного заводнения на месторождениях с высокой температурой и минерализацией: диссертация кандидата технических наук. – Москва, 2018. – С. 73-75.
7. Тома А. Полимерные нанокомпозиты на основе карбоксиметилцеллюлозы и наночастиц Al и Si для увеличения добычи нефти / А. Тома [и др.] // Территория Нефтегаз. – 2017. – №7-8. – С. 58-67.

8. Повышение эффективности полимерного заводнения [Электронный ресурс]. – URL: [https://snf-group.ru/wp-content/uploads/2015/05/Oil-30\\_Years\\_of\\_EOR.pdf](https://snf-group.ru/wp-content/uploads/2015/05/Oil-30_Years_of_EOR.pdf)
9. Шишмина Л.В. Сбор и подготовка продукции нефтяных скважин / Л.В. Шишмина. – Томск: ТПУ, 2011. – С. 123-126.
10. Коршак А.А. Основы нефтегазового дела / А.А. Коршак, А.М. Шаммазов. – Уфа: ООО «ДизайнПолиграфСервис», 2002. – С. 162-163.
11. ОСТ 39-225-88 Вода для заводнения нефтяных пластов. Требования к качеству.
12. Химченко П.В. Новые принципы в применении технологии полимерного заводнения, как одного из методов повышения нефтеотдачи пластов / П.В. Химченко // Концепт. – 2014. – Т.20. – С. 1366-1370.
13. Коршак А.А. Основы нефтегазового дела / А.А. Коршак, А.М. Шаммазов. – Уфа: ООО «ДизайнПолиграфСервис», 2002. – С. 165-166.
14. Абдулов М.А. Применение потокоотклоняющих технологий на Приобском месторождении / М.А. Абдулов // Академический журнал Западной Сибири. – 2018. – Т.19, №6(77). – С. 94-95.
15. Апасов Т.К. Анализ применения комплексных методов повышения нефтеотдачи на Хохряковском месторождении / Т.К. Апасов [и др.] // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. – 2011. – №1. – С. 31-36.
16. Каушанский Д.А. Многофункциональная инновационная технология повышения нефтеотдачи пластов на поздней стадии разработки «Темпоскрин-Люкс» // Теория и практика применения методов увеличения нефтеотдачи пластов: Материалы IV Международного научного симпозиума, Москва, 18-19 сентября 2013 г. – Москва, 2013. – Т.1 – С. 168-172.
17. Методы и технологии повышения нефтеотдачи для коллекторов Западной Сибири: Учебное пособие / Г.Ф. Ильина, Л.К. Алтунина. – Томск: ТПУ, 2006. – С. 76-83.

18. Гимазова Г.К. Обзор методов увеличения нефтеотдачи пласта путем потокоотклонения и выравнивания профиля приемистости / Г.К. Гимазова [и др.] // Вестник Казанского технологического университета. – 2014. – Т.17, №4. – С. 257-262.
19. Никитина А. Салым Петролеум: Технология АСП как решение проблемы истощения традиционных запасов / А. Никитина // Нефтегазовая Вертикаль. – 2014. – №10. – С. 24-26.
20. Газизов А.Ш. Повышение нефтеотдачи карбонатных коллекторов / А.Ш. Газизов [и др.] // Нефтепромысловое дело. – 2012. – №6. – С. 18-22.
21. Трудовой Кодекс – ТК РФ – Глава 47. Особенности регулирования труда лиц, работающих вахтовым методом.
22. ГОСТ 12.0.003-2015 ССБТ. Опасные и вредные производственные факторы. Классификация.
23. ГОСТ 12.1.003-2014 ССБТ. Шум. Общие требования безопасности.
24. ГОСТ 12.1.012-90 ССБТ. Вибрационная безопасность. Общие требования.
25. СП 52.13330.2016 Естественное и искусственное освещение. Актуализированная редакция СНиП 23-05-95\*.
26. ГОСТ 12.2.003-91 ССБТ. Оборудование производственное. Общие требования безопасности.
27. ГОСТ 12.1.007-76 ССБТ. Вредные вещества. Классификация и общие требования безопасности.
28. ГОСТ 12.4.011-89 ССБТ. Средства защиты работающих. Общие требования и классификация.
29. СП 51.13330.2011. Защита от шума. Актуализированная редакция СНиП 23-03-2003\*.
30. ГОСТ 12.1.007-76 ССБТ. Вредные вещества. Классификация и общие требования безопасности.

## Приложение А

Таблица 7 – Сравнительная таблица полимеров

	СПС	ПДС	ПГС	ПЭЦ	АСП	БП
Состав	ПАА + Сшиватель	ПАА + Глинистый раствор	ПАА + Сшиватель	Полимер + Простые эфиры целлюлозы	Полимер + Щелочь + ПАВ	Полимеры природного происхождения (полисахариды)
Температура, °С	≤ 80	≤ 80	≤ 90	≤ 100	-	≤ 130
Проницаемость, мкм <sup>2</sup>	0,03 – 0,5	0,2 – 2	0,03 – 0,5	0,03 – 0,5	-	0,01 – 0,2
Применение	На поздней стадии разработки	Неоднородные пласты в большими промытыми зонами	Воды с высокой минерализацией	На поздней стадии разработки	Высокая обводненность	Аномальные пластовые условия
Особенности	- Глубоко проникает в пласт; - Высокая кажущая вязкость	Структурно- механические свойства	- Устойчивость к механической деструкции; - Термкоокислительная и термостабильная устойчивость; - Солестойкость; - Глубоко проникает в пласт	- Хорошая связывающая, смачивающая и адгезионная способность; - Перераспределение потоков в ПЗП и удаленной части пласта	- Двойное воздействие на пласт; - Нетоксичен	- Устойчивость к деструкции; - Устойчивость к различным рН среды