

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

Казахский национальный исследовательский технический
университет имени К.И.Сатпаева

Институт геологии и нефтегазового дела имени К. Турысова

Кафедра Нефтяной инженерии

Жақсыгереева Айгерім Абатқызы

Совершенствование методов повышения нефтеотдачи пластов применением азота

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Специальность 7М07202 – «Нефтяная инженерия»

Алматы 2021

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

Казахский национальный исследовательский технический университет
имени К.И.Сатпаева

Институт геологии и нефтегазового дела имени К. Турысова

Кафедра Нефтяной инженерии

УДК 665.622.43.046.6-52 (043)

На правах рукописи

Жақсыгереева Айгерім Абатқызы

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

На соискание академической степени магистра

Название диссертации	Совершенствование методов повышения нефтеотдачи пластов применением азота
Направление подготовки	7M07202 – «Нефтяная инженерия»

Научный руководитель

PhD, зав. кафедрой «Нефтегазовое дело»,

Университет Дулати

 А. А. Кабдушев

23.06.2021 г.

Рецензент

PhD, старший

преподаватель

 Байботаева С.Е.

23.06.2021 г.

Нормоконтроль

PhD, зав. кафедрой

«Нефтегазовое дело»,

Университет Дулати,

 А. А. Кабдушев

23.06.2021 г.

ДОПУЩЕН К ЗАЩИТЕ

Заведующий кафедрой

«Нефтяная инженерия»

 Дайров Ж.К.

«__» _____ 2021 г.

Алматы 2021 г.

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

Казахский национальный исследовательский технический
университет имени К.И. Сатпаева

Институт геологии, нефти и горного дела имени К. Турысова
Кафедра Нефтяной инженерии

7М07202 – «Нефтяная инженерия»

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой
«Нефтяная инженерия»

_____ Дайров Ж.К.

« ____ » _____ 2021 г

ЗАДАНИЕ

на выполнение магистерской диссертации

Магистранту Жаксыгереевой Айгерим Абатқызы

Тема: Совершенствование методов повышения нефтеотдачи пластов применением азота

Утверждена приказом Ректора Университета №330–М от "11" ноября 2019 г.

Срок сдачи законченной диссертации _____

Исходные данные к магистерской диссертации: результаты исследований
существующих АГРС

Перечень подлежащих разработке в магистерской диссертации вопросов

а) анализ применимости метода внедрения азота сравнивая с

углекислым газом для месторождений всего мира

б) теоретические расчеты влияния азота на пласт и флюида

с) экспериментальное(лабораторное) исследование применения азота

*д) составление математического расчета для применение азота по
лабораторным анализам*

*е) определить риски, точнее влияние на экологию и экономику страны и
на будущее нефтегазовой индустрий.*

Перечень графического материала: 18 слайдов

ГРАФИК
подготовки магистерской диссертации

Наименование разделов, перечень разрабатываемых вопросов	Сроки представления научному руководителю	Примечание
Теоретические расчеты влияния азота на пласт и флюида	22.11.2019-16.03.2020	
Экспериментальное исследование применения азота	17.03.2020-13.02.2021	
Анализ применимости метода внедрения азота при сравнений с углекислым газом для месторождений всего мира	15.02.2021-15.05.2021	

Подписи

консультантов и нормоконтролера на законченную магистерскую диссертацию с указанием относящихся к ним разделов диссертации

Наименования разделов	Консультанты, И.О.Ф. (уч. степень, звание)	Дата подписания	Подпись
Основная часть	А. А. Кабдушев, PhD, заведующий кафедрой «Нефтегазовое дело», Университет Дулати	23.06.2021	
Нормоконтролер	А. А. Кабдушев, PhD, заведующий кафедрой «Нефтегазовое дело», Университет Дулати	23.06.2021	

Научный руководитель  А. А. Кабдушев

Задание принял к исполнению обучающийся  Жақсыгерсева А.А.

**ОТЗЫВ
НАУЧНОГО РУКОВОДИТЕЛЯ**

на магистерскую диссертацию

Жаксыгереевой Айгерім Абатқызы

по специальности 7М07202 – «Нефтяная инженерия»

**На тему: «Совершенствование методов повышения нефтеотдачи пластов
применением азота»**

Диссертация посвящена научному обоснованию совершенствования методов повышения нефтеотдачи пластов применением азота, обеспечивающих повышение коэффициента извлечения нефти.

Практика показывает, что большую сложность при совершенствований методов увеличения нефтеотдачи (МУН) пластов представляют исследование и идентификация свойств остаточных после заводнения нефтей и характеристик техногенных изменений коллектора. Разнообразие, сложность и слабая изученность геолого-физических характеристик в межскважинных интервалах на объектах применения, а также невозможность точного моделирования совокупности внутрипластовых процессов в лабораторных условиях требуют обязательного включения в комплекс промысловых испытаний. Совершенствование технологий увеличения нефтеотдачи тесно связана и с проблемой технологической эффективности при промышленной реализации метода, т. к. эти результаты являются базой для экономической оценки и определения целесообразности промышленного применения технологий.

Одним из наиболее перспективных направлений повышения нефтеотдачи является закачка газообразных агентов в пласт. К сожалению, действие большинства применяемых газообразных агентов – в частности CO_2 связаны с большими затратами, что неизбежно снижает экономическую эффективность применения, также и азот имеет низкий коэффициент извлечения нефти, что ухудшает технологическую эффективность.

Несмотря на большой объем исследований в этой области, проблема остается нерешенной, поэтому совершенствование методов повышения нефтеотдачи за счет закачки газообразных агентов, а также технологии их применения, является актуальной и своевременной задачей.

В результате теоретических и экспериментальных исследований магистранта, проведенных в КазНТУ в академический период, обоснован и предложен комбинированный метод закачки газообразных агентов, обеспечивающий эффективное повышение нефтеотдачи и не оказывающий отрицательного влияния на остальные свойства коллектора.

При этом обосновано применение CO_2 и N_2 по отдельности и в комбинированном варианте и оценено влияние данного технологического приема на свойства коллектора. Важным является совместимость газообразных агентов.

Являясь научный руководителем, могу отметить, что при подготовке диссертационной работы, неоднократных встречах и переписке мы неоднократно обсуждали все разделы и ход выполнения диссертационной работы. Могу отметить, что магистранта А.А.Жаксыгереевой, как научного работника, отличает большой научный талант, самостоятельность, высокая требовательность к себе, глубокое знание современных методов научных исследований. Все эти качества она в полной мере проявила при работе над диссертацией.

Глубокая теоретическая проработка исследуемого вопроса, большой объем экспериментальных исследований выполненных в программе Eclipse, стендовые исследования, проверка полученных данных в производственных условиях позволили магистранту успешно решить поставленные задачи.

Считаю, что в диссертации правильно поставлена цель и корректно сформулированы задачи работы, а полученные результаты корректны и отличаются научной новизной.

Результаты исследований магистранта А.А.Жаксыгереевой прошли широкую апробацию на конференциях различного уровня, включая несколько международных за пределами Казахстана, что говорит о том, что научные работники специалисты с производства имели возможность ознакомиться с результатами его исследований. Материалы исследований, приведенные в диссертационной работе, хорошо представлены в материалах научной печати.

На основании вышеизложенного считаю, что А.А.Жаксыгереева сформировалась как научный работник, способный ставить и решать важные научные задачи, а самостоятельно выполненная диссертационная работа является завершенным научным трудом.

Представленная диссертация по актуальности и значимости, уровню достигнутых научных и практических результатов полностью соответствует требованиям, ГОСО Республики Казахстан, предъявляемым к магистерским диссертациям и рекомендуется к защите. Автор работы Жаксыгереева Айгерім Абатқызы достоин присуждения ему академической степени магистра по специальности 7М07202 – Нефтяная инженерия

**Научный руководитель,
и.о.доцента, заведующий
кафедрой «Нефтегазовое дело»
Таразского регионального университета
им. М.Х.Дулати**



Кабдушев А.А.

«23» мая 2021 г.

РЕЦЕНЗИЯ

на магистерскую диссертацию

Жаксыгереевой Айгерім Абатқызы

по специальности 7M07202 – «Нефтегазовое дело»

На магистерскую диссертацию Жаксыгереевой Айгерім Абатқызы по специальности 7M07202 – «Нефтегазовое дело» на тему: «Совершенствование методов повышения нефтеотдачи пластов применением азота».

Рецензируемая работа представлена на 18 слайдах и пояснительная записка на 35 страницах.

Рецензируемая работа посвящена совершенствованию методов повышения нефтеотдачи пластов применением азота в различных мировых месторождениях, что говорит об ее актуальности.

С целью решений поставленных задач был проведен анализ внедрения азота. В процессе исследований были найдены такие решения:

- Газ CO₂ имел наибольший коэффициент извлечения нефти, а газ N₂ имел самый низкий коэффициент извлечения нефти в том же диапазоне давления впрыска 1000-5000 фунтов на квадратный дюйм;
- Время прорыва газа уменьшалось по мере увеличения давления закачки;
- N₂ имел самое короткое время прорыва, а смесь N₂ и CO₂ 50:50 имела самое длительное время прорыва.

Для обоснования рекомендуемых решений с использованием специально разработанных экспериментов были произведены расчеты. Были проанализированы характеристики N₂, CO₂ и соотношение газа N₂ и CO₂ 50:50 по добыче нефти в плотных пластах песчаника, а также время их прорыва. В общей сложности было проведено 11 различных испытаний с различными газами с одинаковым давлением впрыска, давлением вскрыши на 400 фунтов на квадратный дюйм выше давления впрыска для каждого испытания и обратным давлением, установленным на 400 фунтов на квадратный дюйм.

По результатам исследований опубликована и доложена научная статья на конференции «Сатпаевские чтения – 2019, 2020» при университете Satbayev University в секторе «Современные технологии в процессах бурения, добычи, сбора и транспортировки нефти и газа» на тему: «Совершенствование методов повышения нефтеотдачи пластов применением азота».

К замечанию можно отнести неточность формулировок, касающиеся обоснования принимаемых решений.

В целом работа представляет собой самостоятельное, завершённое исследование теоретически и практически значимой проблемы, приобретающей в современных условиях особую актуальность, соответствует требованиям предъявляемым к магистерским диссертациям и заслуживает положительную оценку, а ее автор Жаксыгереева Айгерім Абатқызы присуждения степени магистра по специальности 7M07202 – Нефтегазовое дело.

Рецензент

Байботаева Салтанат Еликбаевна

Занимаемая должность: Доктор PhD, доцент кафедры «Нефтегазовое дело», Южно-Казахстанский университет имени М. Ауезова

Протокол анализа Отчета подобия

заведующего кафедрой / начальника структурного подразделения

Заведующий кафедрой / начальник структурного подразделения заявляет, что ознакомился(-ась) с Полным отчетом подобия, который был сгенерирован Системой выявления и предотвращения плагиата в отношении работы:

Автор: Жақсыгереева Айгерім Абатқызы

Название: Совершенствование методов повышения нефтеотдачи пластов применением азота

Координатор: Арман Кабдушев

Коэффициент подобия 1:0.8

Коэффициент подобия 2:0

Замена букв:3

Интервалы:0

Микропробелы:11

Белые знаки:0

После анализа отчета подобия заведующий кафедрой / начальник структурного подразделения констатирует следующее:

- обнаруженные в работе заимствования являются добросовестными и не обладают признаками плагиата. В связи с чем, работа признается самостоятельной и допускается к защите;
- обнаруженные в работе заимствования не обладают признаками плагиата, но их чрезмерное количество вызывает сомнения в отношении ценности работы по существу и отсутствием самостоятельности ее автора. В связи с чем, работа должна быть вновь отредактирована с целью ограничения заимствований;
- обнаруженные в работе заимствования являются недобросовестными и обладают признаками плагиата, или в ней содержатся преднамеренные искажения текста, указывающие на попытки сокрытия недобросовестных заимствований. В связи с чем, работа не допускается к защите.

Обоснование:

.....
.....
.....
.....
.....
.....
.....
.....

Дата

*Подпись заведующего кафедрой /
начальника структурного подразделения*

Окончательное решение в отношении допуска к защите, включая обоснование:

.....
.....
.....
.....
.....
.....
.....
.....

Дата

*Подпись заведующего кафедрой /
начальника структурного подразделения*

Протокол анализа Отчета подобия Научным руководителем

Заявляю, что я ознакомился(-ась) с Полным отчетом подобия, который был сгенерирован Системой выявления и предотвращения плагиата в отношении работы:

Автор: Жақсыгереева Айгерім Абатқызы

Название: Совершенствование методов повышения нефтеотдачи пластов применением азота

Координатор: Арман Кабдушев

Коэффициент подобия 1: 0.8

Коэффициент подобия 2: 0

Замена букв: 3

Интервалы: 0

Микропробелы: 11

Белые знаки: 0

После анализа Отчета подобия констатирую следующее:

- обнаруженные в работе заимствования являются добросовестными и не обладают признаками плагиата. В связи с чем, признаю работу самостоятельной и допускаю ее к защите;
- обнаруженные в работе заимствования не обладают признаками плагиата, но их чрезмерное количество вызывает сомнения в отношении ценности работы по существу и отсутствием самостоятельности ее автора. В связи с чем, работа должна быть вновь отредактирована с целью ограничения заимствований;
- обнаруженные в работе заимствования являются недобросовестными и обладают признаками плагиата, или в ней содержатся преднамеренные искажения текста, указывающие на попытки сокрытия недобросовестных заимствований. В связи с чем, не допускаю работу к защите.

Обоснование:

.....

20.06.2024
.....
Дата

.....
Подпись Научного руководителя

АҢДАТПА

Қазіргі уақытта оңай алынатын қорлары бар кен орындарын ашу екіталай болып отыр. Мұнай өндіруді арттыру әдістеріне көп көңіл бөлінеді.

Мұнай-газ саласы энергия тасымалдаушыларға әлемдік сұраныстың өсуіне байланысты көптеген проблемаларға тап болды. Бұдан басқа, мұнай-газ корпорациялары жаңа кен орындарын ашу бойынша геологиялық барлау жұмыстарына қомақты қаражат жұмсайды. Осыған байланысты сұраныстан қалыс қалмаудың және артық шығынсыз мұнай өндіруді ұлғайтудың ең жақсы нұсқаларының бірі мұнай өндіруді ұлғайту болып табылады. МҰН-дың осы әдістерін енгізу қойнауқаттық қысымды ұстап тұруға және өндіру қарқынын арттыруға мүмкіндік береді. Қолданылатын МҰН механизмінің түрін қарастырған кезде екі негізгі фактор ескеріледі. Бұл экономикалық факторлар мен техникалық орындылық. Қазіргі уақытта МҰН-дің ең көп таралған үш әдісі-химиялық, термиялық инъекция және газды айдау.

Мұнай мен конденсацияны көбейтудің бір әдісі-көмірсутекті емес газдарды айдау арқылы резервуардағы қысымды ұстап тұру. Көмірқышқыл газын айдау кезінде мұнайдың жоғары ығысуына қарамастан, CO₂ пайдалану оның қымбаттығына және ұңғымалық жабдыққа коррозиялық әсердің жоғары деңгейіне байланысты шектелген. Көмірсутекті емес газдар арасында метанға ең жақсы балама азот болып табылады.

Мақалада көмірсутектерді игерудегі табиғи және технологиялық факторларды ескере отырып, CO₂-мен салыстыра отырып, азотты қолдану арқылы мұнай өндіруді арттыру әдістерін зерттеу және дамыту қарастырылған.

АННОТАЦИЯ

В настоящее время открытие месторождений с легкоизвлекаемыми запасами становится все более маловероятным. Все большее внимание уделяется методам повышения нефтеотдачи.

Нефтегазовая отрасль столкнулась с большим количеством проблем, связанных с ростом мирового спроса на энергоносители. Кроме того, нефтегазовые корпорации тратят огромные деньги на геологоразведочные работы по открытию новых месторождений. В связи с этим одним из немногих лучших вариантов не отставать от спроса и увеличивать добычу нефти без чрезмерных затрат является увеличение добычи уже добывающих нефтяных пластов за счет использования методов увеличения нефтеотдачи (МУН) пластов. Внедрение этих методов МУН позволяет поддерживать пластовые давления и увеличивать темпы добычи. При рассмотрении типа используемого механизма МУН учитываются два основных фактора. Это экономические факторы и техническая целесообразность. Тремя наиболее распространенными методами МУН в настоящее время являются химическая, термическая инъеция и газовая закачка.

Одним из способов увеличения нефте и конденсатоотдачи пластов является поддержание пластового давления путем закачки неуглеводородных газов. Несмотря на высокие показатели вытеснения нефти при закачке углекислого газа, использование CO_2 ограничено ввиду его дороговизны и высокой степени коррозионного влияния на скважинное оборудование. Лучшей альтернативой метану среди неуглеводородных газов является азот.

В статье рассматривается исследование и разработка методов повышения нефтеотдачи пластов применением азота, сравнивая с CO_2 , делая анализ рентабельности метода учитывая природных и технологических факторов при разработке углеводородов.

ABSTRACT

At present, the discovery of deposits with easily recoverable reserves is becoming increasingly unlikely. Increasing attention is being paid to methods of increasing oil recovery.

The oil and gas industry is facing a large number of problems related to the growth of global energy demand. In addition, oil and gas corporations spend a lot of money on exploration work to discover new fields. In this regard, one of the few best options to keep up with demand and increase oil production without excessive costs is to increase the production of already producing oil reservoirs by using the enhanced oil recovery (EOR) method of reservoirs. The implementation of these EOR methods allows maintaining reservoir pressures and increasing production rates. When considering the type of EOR mechanism used, two main factors are taken into account. These are economic factors and technical feasibility. The three most common EOR methods currently used are chemical injection, thermal injection, and gas injection.

One way to increase oil and condensate recovery is to maintain reservoir pressure by injecting non-hydrocarbon gases. Despite the high rates of oil displacement during the injection of carbon dioxide, the use of CO₂ is limited due to its high cost and a high degree of corrosion on downhole equipment. The best alternative to methane among non-carbon gases is nitrogen.

The article discusses the research and development of methods for improving oil recovery using nitrogen, comparing it with CO₂, making an analysis of the profitability of the method taking into account natural and technological factors in the development of hydrocarbons.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	19
ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ	
1. Анализ применимости метода внедрения азота при сравнений с углекислым газом для месторождений всего мира	20
2. История применения закачки азота в мире	22
3. Теоретические расчеты влияния азота на пласт и флюида	24
4. Экспериментальное исследование применения азота	33
4.1. Экспериментальная установка	34
4.2. Материалы	36
4.3. Экспериментальная процедура	37
5. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЯ	38
6. РИСКИ, ВЛИЯНИЕ НА ЭКОЛОГИЮ И ЭКОНОМИКУ СТРАНЫ И НА БУДУЩЕЕ НЕФТЕГАЗОВОЙ ИНДУСТРИЙ	44
7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ	45
8. СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ	46

ВВЕДЕНИЕ

Нефтегазовая отрасль столкнулась с большим количеством проблем, связанных с ростом мирового спроса на энергоносители. Кроме того, нефтегазовые корпорации тратят огромные деньги на геологоразведочные работы по открытию новых месторождений. В связи с этим одним из немногих лучших вариантов не отставать от спроса и увеличивать добычу нефти без чрезмерных затрат является увеличение добычи уже добывающих нефтяных пластов за счет использования методов увеличения нефтеотдачи (МУН) пластов. Внедрение этих методов МУН позволяет поддерживать пластовые давления и увеличивать темпы добычи. Тремя наиболее распространенными методами МУН в настоящее время являются химическая, термическая инъеция и газовая закачка [1].

Среди этих трех методов закачка газа была определена как наиболее подходящая с точки зрения экономики и практичности. Могут быть закачены различные типы газов, включая дымовые газы, углеводороды, такие как метан, воздух, N_2 , CO_2 [2].

Из всех CO_2 был наиболее популярным из-за его свойств, например, высокая смешиваемость с маслом и, следовательно, более низкая вязкость и более низкое межфазное натяжение при подходящих условиях давления и температуры [1].

Альтернативой внедрению углекислого газа является использование газообразного азота. Газообразный азот гораздо дешевле, его легче получить, так как он в достаточном количестве содержится в воздухе (78%), а также гораздо менее агрессивен, чем углекислый газ. Было проведено множество экспериментальных исследований и успешных полевых исследований во многих частях мира.

На данной диссертационной работе будет исследовано применимость метода внедрения в пласт азота, сравнивая его с путем внедрения углекислого газа. А также в ходе работы будет проведено экспериментальная работа, в котором мы сможем анализировать исходя из теоритических навыков.

Цель работы исследовать и разработать методы повышения нефтеотдачи пластов применением азота, делая анализ рентабельности метода учитывая экономических, природных и технологических факторов при разработке углеводородов. Работа ставит такие задачи как:

- Анализ применимости метода внедрения азота сравнивая с углекислым газом для месторождений всего мира.
- Теоретические расчеты влияния азота на пласт и флюида.
- Экспериментальное(лабораторное) исследование применения азота.
- Составление математического расчета для применение азота по лабораторным анализам.
- Определить риски, точнее влияние на экологию и экономику страны и на будущее нефтегазовой индустрий.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

1.1. Анализ применимости метода внедрения азота при сравнений с углекислым газом для месторождений всего мира

В связи с недавними достижениями в области технологий, относящихся к нефтяной промышленности, сокращением добычи углеводородов из нетрадиционных ресурсов нефти и газа в сочетании с ростом спроса на сырую нефть, большое внимание было уделено исследованиям и разработкам в нетрадиционных коллекторах [3]. Нетрадиционные пласты, как правило, не способны добывать углеводороды с экономичными расходами и требуют передовых методов стимулирования или обработки для повышения нефтеотдачи пластов и передовых технологий. Эти методы стимуляции и обработки являются основными решениями для извлечения достаточного количества нефти и газа из этих пластов с экономической скоростью. Закачка газа в нефтяные пласты обычно начинается с закачки газа, обычно газа CO_2 , либо, как правило, в циклическом потоке в добывающую скважину.

Впрыск CO_2 является наиболее нетепловым из применяемых процессов EOR. Он имеет применение как в полевых условиях, так и в экспериментальных испытаниях [4], [5]. Метод закачки газа CO_2 был наиболее популярным из-за его свойств, например, высокая смешиваемость с маслом и, следовательно, более низкая вязкость и более низкое межфазное натяжение при подходящих условиях давления и температуры. Несколько исследований показали, что он может достичь постепенного восстановления 5-20% в резервуарах Баккена и Игл-Форда. Однако некоторые исследования также показали, что CO_2 имеет некоторые серьезные недостатки, включая очень быстрое снижение добычи нефти и пластового давления в течение первых нескольких лет [1].

CO_2 обеспечивает смешиваемость в нефти при низких давлениях, обладает высокой плотностью, что устраняет проблемы с преобладанием газа, и имеет преимущество в хранении выбросов парниковых газов. Основными проблемами для успешного процесса CO_2 являются наличие CO_2 , коррозия в скважине и поверхностных сооружениях, экологические ограничения и высокая стоимость CO_2 для использования на удаленных месторождениях [6]. Это высказывание подтверждается в исследованиях [3], что цена хранения достаточного количества углекислого газа, необходимого для проекта, настолько высока, что это делает проект неэкономичным.

Азот уже давно успешно используется в качестве нагнетательной жидкости для МУН и широко используется в нефтепромысловых операциях для газа рециркуляция, поддержание пластового давления и газлифт. Затраты и ограничения на доступность природного газа и CO_2 сделали азот экономической альтернативой для добычи нефти путем вытеснения

смешивающегося газа [7], [8]. Азот обычно дешевле, чем CO_2 или газ, и имеет дополнительное преимущество в том, что он не вызывает коррозии, но давление, необходимое для смешивания азота с сырой нефтью, непрактично велико.

В большинстве случаев минимальное давление смешиваемости (МДПС) газообразного азота выше давления разрыва пласта, в который должен быть закачан газ. У него есть некоторые другие преимущества, такие как более дешевый газ, поскольку он гораздо более распространен в воздухе (78%), а также гораздо менее агрессивен, чем углекислый газ; это делает его очень подходящим кандидатом для впрыска газа [8].

В низкопроницаемых пластах с очень низкой проницаемостью были проведены несколько испытаний. Был проведен эксперимент с внедрением CO_2 в трещиноватом сланцевом пласт с диапазоном проницаемости от 0,02–1,3 мД. По результатам было видно, что CO_2 обладает хорошим индикатором для повышения нефтеотдачи. Однако CO_2 был дорогим в использовании для инъекций и разъедал нефтяное оборудование, внося огромный вклад в парниковый эффект [9].

Было проведено множество экспериментальных и успешных полевых исследований во многих частях мира. Имитационные исследования также показали, что N_2 может быть эффективно использован в качестве нагнетательного газа для повышения нефтеотдачи пластов на месторождениях Тринидада [10] и месторождениях на Юго-Востоке [11]. Однако газообразный азот имеет относительно высокое давление смешиваемости (9300 фунтов на квадратный дюйм) по сравнению с большинством других газов. В большинстве случаев минимальное давление смешиваемости (МДС) газообразного азота выше давления разрыва пласта, в который должен быть закачан газ; в результате этого обычно лучше использовать его при более низких давлениях для несмешивающегося смещения [12].

2. История применения закачки азота в мире

Использование закачки азота для повышения нефтеотдачи пластов успешно используется во всем мире с середины 1960-х годов, и его использование становится все более популярным из-за более низких производственных затрат и доступности по сравнению с обычными углеводородными газами, что делает его популярным выбором среди небольших местных операторов месторождений [13, 14].

Следует отметить, что самое первое сообщение об использовании закачки азота в резервуары также совпало с появлением МУН в США. Истоки закачки азота и, следовательно, МУН в США можно проследить до плодovitого пермского бассейна в Западном Техасе.

В 1945 году Ричфилд обнаружил необычное поле, которое они назвали блоком 31. Блок 31 содержал около 300 миллионов долларов бочки с легкой, газообразной жидкостью и имели начальное пластовое давление около 4000 фунтов на квадратный дюйм. Разработка блока 31 оказалась сложной задачей из-за его низкой проницаемости (1 миллиард). Это привело к очень низким показателям добычи на скважинах. В попытке преодолеть эту проблему были проведены исследования движения жидкости внутри резервуара. Эти результаты этих исследований показали, что закачка природного газа при достаточно высоком давлении, чтобы он смешивался с нефтью, создавала нефтегазовую фазу, которая была гораздо более подвижной, чем только масляная фаза. Таким образом, нефтегазовая фаза может легче проникать через пласт в стволы скважин.

В 1949 году компания Атлантик-Риджфилд начала сжимать и закачивать природный газ из близлежащего источника в блок 31. Месторождение начало производить, сначала медленно, но постепенно производство неуклонно росло. К 1965 году совокупная добыча с блока 31 приблизилась к 90 миллионам баррелей. Промышленность приветствовала успех на блоке 31, признав, что закачка смешивающегося газа может извлечь нефть, которая останется в грунте обычными методами. При такой плохой проницаемости нефть не добывалась ни первичными, ни вторичными методами: вся добыча была третичной и повышала нефтеотдачу.

В 1966 году, чтобы избежать использования товарного природного газа, все Ричфилд разработал систему для закачки дымовых газов (дефицитных по кислороду, но богатых азотом и углекислым газом) с близлежащего перерабатывающего завода. Производство постепенно увеличивалось до пика в 20 000 человек к 1978 году. Однако после этого производство неуклонно снижалось до 2500 Баррелей в сутки в 1998 году, при средней добыче 15 баррелей в сутки на скважину [15]. Успех блока 31 привел к появлению ряда других проектов по повышению нефтеотдачи пластов с использованием азота в Техасе, Луизиане, Вайоминге, Юте, Оклахоме и Калифорнии. В Таблице 1 показана добыча нефти по некоторым азотным проектам, перечисленным выше.

Добыча нефти из азотных проектов		
Месторождение	Метод МУН	Извлечение нефти(% ООИР)
Хокинс*	Гравитационный Дренаж	20%
Чунчула	Поддержание давления	30%
Блок 31	Смешиваемое Смещение	60% (Всего, Без Вторичного)
Сегед Мораварош	Поддержание давления	12%
Джей(ЭЛЕК)	Смешиваемое Смещение	13%
Озеро Барре	Поддержание давления	19%
Фордоше Уилкоккс 8 и 12	Смешиваемое Смещение	19.5%
Фордош Уилкоккс 5	Поддержание давления	19% - 46%
Поле В*	Несмешивающееся Смещение	36%
Ранчо Аншук На Востоке	Поддержание давления	45% - 53%

Таблица 1- Добыча нефти в результате прошлых проектов закачки азота[16]

В более поздние времена сообщались о новых проектах по азоту, как показано в Таблице 2 и началась в 2001 году, а также в Мексике. Залив Кампече, в котором находится месторождение Кантарелл-Акал. Это месторождение является одним из крупнейших нефтяных месторождений в мире и в настоящее время имеет крупнейший в мире проект по закачке азота.

Тип	Оператор	Пористость(%)	Глубина(ft)	Удельная плотность(API)	Вязкость нефти(cP)	Полная добыча(бар/день)	Добыча МУН (бар/день)
Несмешивающийся	ExxonMobil	28	4600	16	25	1500	1000
Несмешивающийся	ExxonMobil	28	4600	24	4	9000	3000
Несмешивающийся	Occidental	28	2500	25	20	20000	5000

Таблица 2: Проекты по Закачке Азота[16]

3. Теоретические расчеты влияния азота на пласт и флюида

Несмешивающееся вытеснение нефти газом включает закачку газа при давлениях, ниже которых происходит смешивание, в нефтяной пласт, в газовую шапку, если таковая существует, или непосредственно в нефтяную зону [17]. Это процесс, в котором отсутствует смешивание закачиваемого газа и вытесненной нефтяной фазы на уровне пор за счет массопереноса компонентов.

В процессах впрыска несмешивающегося газа выделяемый газ помогает улучшить подвижность, а также помогает снизить межфазное натяжение. Однако степень, в которой эти явления происходят, зависит от нескольких факторов, включая давление, температуру и составы как пластовых флюидов, так и закачиваемого газа. Для описания и прогнозирования поведения процессов закачки несмешивающегося газа было использовано несколько методов, включая аналитические и эмпирические методы, а также троичные графики.

Полученное вытеснение может быть либо смешиваемым, либо несмешиваемым, в зависимости от давления, температуры и состава масла. Из-за его низкой стоимости могут вводиться большие объемы азота. Азот также может быть рассмотрен для использования в качестве газа погони в смешиваемые углеводороды или потоки углекислого газа. Азот уступает углеводородным газам (и значительно уступает углекислому газу) с точки зрения извлечения нефти для смешиваемого процесса. Азот имеет более низкую вязкость, плохую растворимость в масле и требует гораздо более высокого давления для создания или развития смешиваемости.

Азот восстанавливает масло, выполняя следующие действия:

- Испарение более легких компонентов сырой нефти и создание смешиваемости при достаточном давлении.
- Обеспечение газового привода, при котором значительная часть объема резервуара заполняется недорогими газами.

Ограничения процесса включают следующее:

- Развитая смешиваемость может быть достигнута только с легким нефтью и при высоком давлении, поэтому необходимы резервуары для просачивания. Это не относится к существующим скважинам и резервуарам на суше.
- Желателен резервуар с крутым погружением, чтобы обеспечить гравитационную стабилизацию смещения, которое имеет неблагоприятный коэффициент подвижности

Проблемы, связанные с этим процессом, включают следующее:

- Вязкая аппликатура приводит к низкой эффективности вертикальной и горизонтальной развертки.

- Азот должен быть отделен от товарного добываемого газа [14].

В этой секции я бы хотела представить анализ нескольких экспериментальных работ других ученых со всего мира связанных именно с

закачкой азота. Это делается для того, чтобы сделать симуляцию с моей предстоящему лабораторному эксперименту.

Первым я бы хотела проанализировать работу Джеймс Дж. Шенг и Ке Шенг, кто являются главой Нефтяного департамента в Техасском Техническом университете(США).

В данной работе он использует имитационный подход для оценки потенциала МУН в пластах сланцевой нефти при затоплении и обводнении газом. Проведено сравнение результатов моделирования первичной добычи, закачки азота и закачки воды. Результаты показывают, что закачка смешивающегося газа имеет более высокий потенциал для повышения нефтеотдачи пластов сланцевой нефти, чем закачка воды. Закачка азота выше минимального давления смешивания(МДС) может быть полностью смешан с нефтью, что значительно снижает вязкость нефти в дополнение к механизму поддержания давления. Результаты моделирования показывают, что коэффициент извлечения нефти может быть увеличен до 15,1% при закачке азота в сланцевый пласт с гидравлическим разрывом, в то время как коэффициент извлечения нефти из первичного истощения составляет всего 6,5%. Добыча нефти при закачке воды составляет около 11,9%, что ниже, чем при газовой закачке [18].

Предположив, что поток между любыми двумя боковыми трещинами одинаков, такая модель может быть использована для моделирования потока через часть горизонтальной скважины. Данные о свойствах коллектора, используемые в этой модели, приведены ниже:

- Начальное пластовое давление: 6425 psi
- Пористость сланцевой матрицы: 0,06
- Начальная водонасыщенность: 0,3
- Сжимаемость сланца: $5 \cdot 10^{-6} \text{ psi}^{-1}$
- Проницаемость сланцевой матрицы: 0,0001 мД
- Температура резервуара: 255 F
- Удельный вес газа: 0,8
- Толщина резервуара: 200 ft
- Точка насыщения нефти: 2398 psi

Целью данного исследования был оценка потенциала закачки газа и воды для улучшения добычи нефти из пластов сланцевой нефти. Моделирование всего пласта требует большого количества блоков сетки, и, конечно, моделирование этих сложных сетей трещин занимает много времени. Поэтому они построили небольшую модель длиной 200 футов, шириной 1000 футов и толщиной 200 футов (Рис. 1). Эта небольшая модель производится с двумя полувертикальными скважинами, соединенными соответственно двумя полуразломами. Таким образом, каждая трещина имеет ширину 1 фут и имеет проводимость 46,65 мкм-фут. Такая

простая модель, была смоделирована потоком между двумя боковыми гидроразрывами.

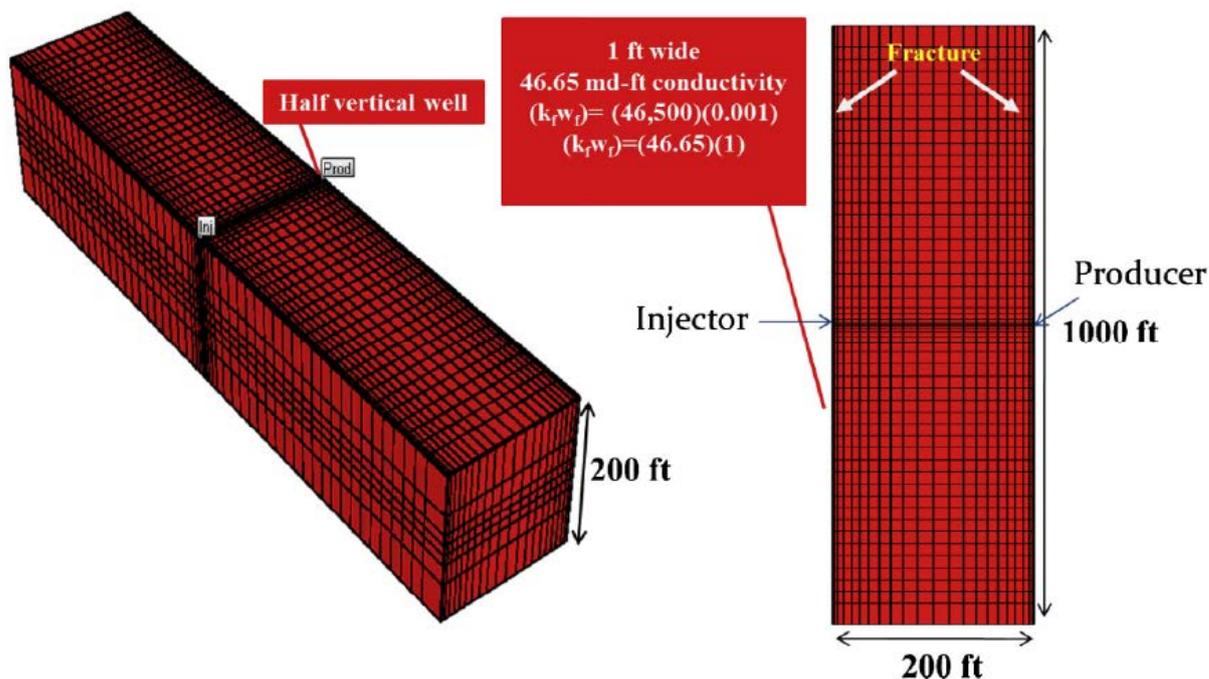


Рисунок 1- Модель резервуара[18]

В заключений этого исследования, было понятно что из-за сверхнизкой проницаемости сланцевых коллекторов закачиваемый азот может смешиваться с нефтью только вблизи области трещины. Основным механизмом закачки газа является поддержание давления. А также близкое расстояние между трещинами окажет значительное влияние на добыча сланцевой нефти. Это приводит к более высокой начальной производительности и гораздо лучшей эффективности очистки при заливке смешивающимся газом. А также в отличие от закачки смешивающегося газа, который может снизить вязкость нефти, впрыск воды может обеспечить только ограниченное поддержание давления из-за высоких потерь давления от инжектора к производителю. Сверхнизкая проницаемость приводит к низкой производительности и низкой закачиваемости. Сравнивая результаты моделирования газового заводнения с заводнением, закачка смешивающегося газа оказывает лучшее влияние на повышение нефтеотдачи пластов в сланцевых коллекторах [18].

Последующий я бы хотела проанализировать работу ученого, который изучал процесс закачки азота в месторождение Тринидад. Общие результаты показывают, что закачка азота является реальной альтернативой и гораздо более практичной и экономичной, чем предполагалось ранее инвесторами. Сухопутные площади Тринидада и Тобаго прошли много этапов развития с тех пор, как более ста лет назад началась нефтяная промышленность этой страны. В результате многие наземные месторождения Тринидада находятся на зрелой стадии разработки, и многие из них работают в различных формах

искусственного подъема. Некоторые из этих зрелых месторождений были сданы в аренду частным инвесторам/операторам государством, поскольку продолжение добычи на этих месторождениях было признано неэкономичным. Многие из этих месторождений потенциально могут вновь стать экономически жизнеспособными, как только будут внедрены подходящие стратегии и методы оптимизации производства. Стратегии оптимизации, хотя и необходимые, стали неэффективными для увеличения значительных запасов и увеличения темпов добычи; необходимо рассмотреть более надежный подход, такой как повышение нефтеотдачи пластов (МУН), для полной эксплуатации огромных количеств углеводородов, все еще удерживаемых на этих зрелых месторождениях [18].

В период с 1973 по 2003 год Нефтяная компания Тринидада и Тобаго (Petrotrin) осуществила четыре пилотных наводнения с несмешивающимся диоксидом углерода (CO₂) в Лесном заповеднике и на месторождениях Оропуш. Три наводнения были проведены в лесу

Заповедник нацелен на Верхние Крузовые пески, Нижние Лесные Пески и Верхние Лесные пески. Одно наводнение было проведено в Оропуш нацелился на песок АО 08. Несмотря на увеличение добычи нефти, проекты вновь столкнулись с рядом проблем.

Некоторые из них включали:

- Ненадежная подача CO₂. (Наиболее значимые)
- Ненадежное оборудование
- Прорыв CO₂
- Низкая эффективность развертки (проблемы с шаблоном)
- Ограниченные измерения давления и газа
- Коррозия.

Один метод, который имеет значительное внимание со стороны некоторых местных операторов привлекло использование впрыска азота.

В этой работе были исследованы четыре сценария: закачка в кресталь или газовую шапку, закачка в нефтяную зону, закачка в водную зону и одновременная закачка в кресталь или газовую шапку и водную зону, а также влияние нескольких параметров, включая количество нагнетательных скважин, скорость закачки, извлечение газа и добываемый азот. Результаты обобщены ниже в Рисунок 2. Можно увидеть, что закачка азота вверх во вторичную газовую шапку приведет к максимальной добыче нефти. Результаты исследования также показали, что более высокие темпы закачки азота привели к более высоким начальным темпам добычи нефти и кумулятивной добыче нефти, но более низкой добыче, в том числе из-за более быстрого времени закачки азота

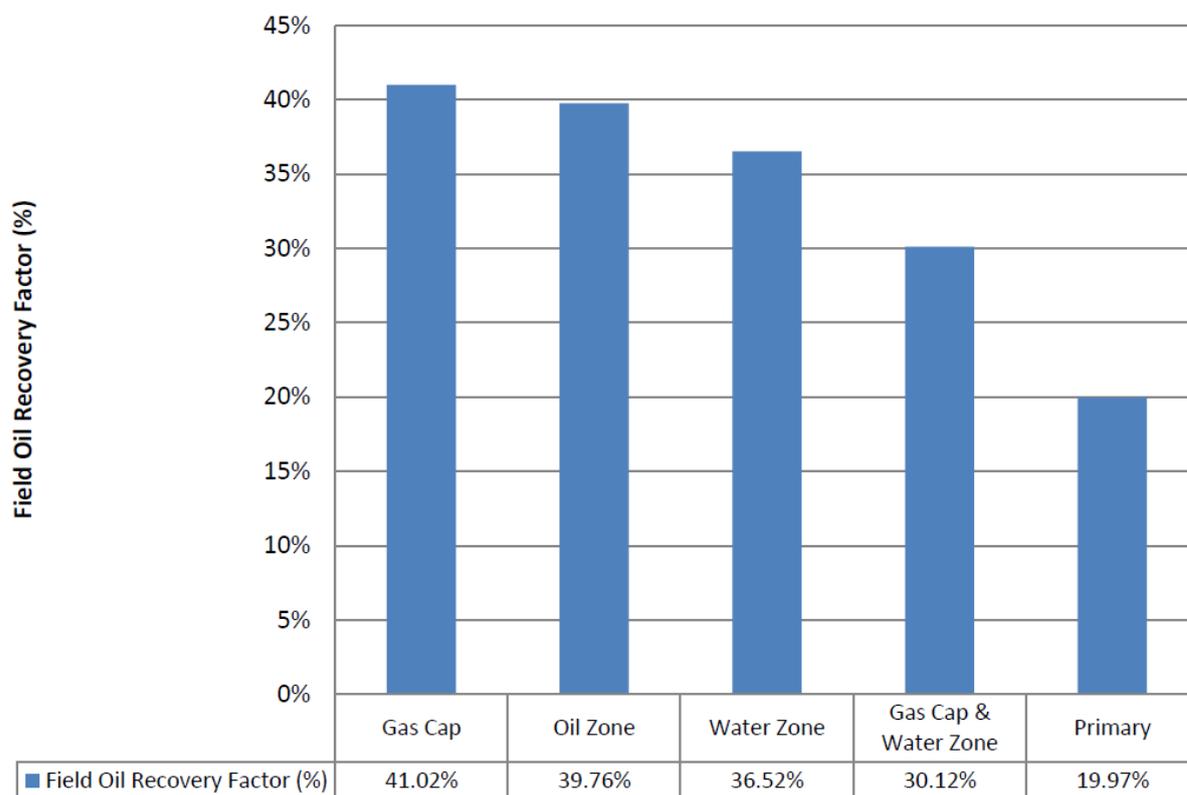


Рисунок 2- Результаты для реального модели, Тринидад [14]

Исследование показал, что закачка азота во вторичную газовую шапку является оптимальной стратегией закачки для повышения нефтеотдачи пластов. Основными физическими механизмами, возникшими в результате впрыска азота, были:

- Частичное поддержание пластового давления.

Закачка газообразного азота в пласт помогает обеспечить энергию для поддержания пластового давления до поддерживать добычу нефти. При поддержании пластового давления разница давлений между пластом и добывающими скважинами остается высокой, и, следовательно, добыча нефти также будет увеличиваться, как указано в законе Дарси. Закон Дарси гласит, что скорость потока прямо пропорциональна перепаду давления. В исследовании моделирования использованные низкие скорости закачки позволили поддерживать пластовое давление на уровне около 700 фунтов на квадратный дюйм.

- Вытеснение нефти азотом как по горизонтали, так и по вертикали.

Для впрыска азота в кресталь или газовый колпачок сила тяжести пытается стабилизировать нисходящий азот/масло процесс вытеснения путем удержания азота поверх масла и противодействия процессу вязкого вытеснения нестабильного азота/нефти. Нефть стекает вертикально вниз через область, заполненную азотом, и образует тонкий слой с высокой нефтенасыщенностью, который стекает вдоль основания интервала пласта к

оставшейся нисходящей нефтяной колонне.

- Испарение жидких углеводородных компонентов из нефтяной колонны и, возможно, из газовой шапки азотом.

Впрыск азота связан с композиционными эффектами массопереноса. Взаимодействие закачиваемого азота с нефтяной композицией включает эффекты удаления, т. е. различные легкие компоненты из масляной фазы переносятся в закачиваемый азот [20].

По данным [21] изучалась добыча нефти и газа с помощью азота и по результатам лабораторных экспериментов было установлено, что азот не приводит к повышению нефтеотдачи. Однако по другим исследованиям, [12] полученные результаты показали, что N_2 более эффективен, когда проницаемость пласта ниже 0,03 мД.

Одно из успешных полевых применений циклической газоотдачи легкой нефти с использованием углекислого газа и азота было зарегистрировано на Большом тонушем месторождении в западном Кентукки [22]. Этот метод был признан одним из активных и экономичных методов повышения нефтеотдачи пластов из обычных пластов. Большинство результатов, полученных в ходе лабораторных или полевых испытаний, ограничены обычными резервуарами [23].

Существует недостаток в изучении потенциала и эффективности процесса пыхтения в нетрадиционных резервуарах в частности, сланцевые нефтяные резервуары, использующие различные газы, такие как CO_2 и азот. Однако численные исследования показали, что циклическая закачка газа может быть эффективным методом повышения нефтеотдачи пластов сланцевой нефти [24].

В целях изучения целесообразности использования методов повышения нефтеотдачи пластов сланцевой нефти были проведены экспериментальные работы по изучению возможности реализации метода хаффа-н-пуффа и выяснению роли ключевых параметров в отношении успех или неудача этого метода в применении к пластам сланцевой нефти. Начальный производственный потенциал циклических различных газов был изучен с помощью лабораторных экспериментов [25].

По результатам исследований этих работ с целью оценки возможности циклической закачки газа в сланцевые керны было исследовано влияние рабочего давления на производительность процесса восстановления сланцевых кернов. Впрыск азота при низком давлении, т. е. в несмешивающихся условиях, сравнивался с почти смешивающимися случаями.

Влияние рабочего давления

В таблицах 3 и 4 приведены коэффициенты извлечения азота в процессе хаффа-н-пуффа для сланцевых кернов Барнетта и Маркос при различных рабочих давлениях. Керны контактировали с азотом при 1000, 2000, 3000 и 3500 фунтов на квадратный дюйм в течение одного дня, затем следовал

период производства[26]. Процесс был повторен с теми же давлениями, но период отключения был изменен на два дня и три дня, чтобы исследовать влияние периода отключения на производительность рабочего давления в циклическом процессе.

Сравнение коэффициентов извлечения при различных давлениях ясно показывает, что добыча нефти резко возросла, когда рабочее давление было изменено с 1000 фунтов на квадратный дюйм, т. е. несмешиваемых условий, до того, что мы считаем почти смешиваемым при рабочем давлении 3000 фунтов на квадратный дюйм[27].

Результаты показывают, что коэффициент извлечения сланцевых кернов Барнетта увеличился примерно с 6,5% при 1000 фунтов на квадратный дюйм до почти 14,91% при 3000 фунтов на квадратный дюйм при использовании однодневного периода закрытия и от 7,53% при 1000 фунтов на квадратный дюйм до 20,65% при использовании трехдневного периода закрытия. Кроме того, результаты использования сланцевых кернов Маркос показывают, что коэффициент восстановления увеличился примерно с 8,38% при 1000 фунтов на квадратный дюйм до почти 13,5 % при 3000 фунтов на квадратный дюйм при использовании однодневных периодов отключения и от 9% при 1000 фунтов на квадратный дюйм до 19,59% при 3000 фунтов на квадратный дюйм при использовании трехдневного периода отключения. Подавление давления, по-видимому, является важным механизмом извлечения нефти в процессе азотного пыхтения.

Таблица 3- Влияние давления на КИН в месторождении Барнетт

Сланцевые керны Барнетт	1-день	2-день	3-день
Давление	КИН %	КИН %	КИН %
1000	6,5	7,08	7,53
2000	11,23	13,14	17,24
3000	14,91	16,152	19,625
4000	17,79	-	-

Таблица 4- Влияние давления на КИН в месторождении Маркос

Сланцевые породы Маркос	1-день	2-день	3-день
Давление psig	КИН %	КИН %	КИН %
1000	8.38	8.57	9.05
2000	12.28	12.55	14.66
3000	13.5	16.96	19.59
4000	15.00	-	-

- Влияние периода замачивания (время отключения)

Чтобы исследовать влияние периода остановки на процесс хафф-н-

пуффа, сердечники были помещены под различные рабочие давления; эти давления были фиксированы, а время остановки было изменено. В таблицах 3 и 4 приведены результаты влияния периода замачивания на коэффициент восстановления. При несмешивающемся состоянии 1000 фунтов на квадратный дюйм период замачивания не влиял на коэффициент восстановления, даже если период замачивания был изменен с двух до трех или четырех дней. Когда давление достигло почти смешиваемого условия, незначительное влияние периода отключения не наблюдалось. Когда период замачивания был изменен с одного дня на три дня при 3000 фунтов на квадратный дюйм, коэффициент восстановления увеличился примерно до 5 % [28].

Также КИН увеличился с 13,5% с однодневным периодом закрытия до 22,46 % через 5 дней. Это означает, что период замачивания действительно повлиял на коэффициент восстановления, когда рабочее давление достигло смешиваемых условий, когда требовалось больше времени на остановку. Результаты также показывают, что коэффициент восстановления стабилизировался через 5 дней периода отключения в условиях, близких к смешиваемым. Аналогичные результаты наблюдались при использовании сланцевых кернов Барнетта и Маркос. Таблица 5 и 6 иллюстрируют влияние периода замачивания на коэффициент восстановления при различных рабочих давлениях.

Таблица 5 -Влияние периода замачивания на восстановление стержней Барнетта при различных рабочих давлениях

Керн Маркос	Давление		
	1000 psig	2000 psig	3000 psig
Время (час)	КИН %	КИН %	КИН %
24	4,00	11,23	13,5
72	6,5	13,14	16,96
96	7,08	17,24	19,59
120	7,53	20,43	22,46
144	-	21,98	23,91
168	-	22,24	24,47

Таблица 6 -Влияние периода замачивания на восстановление стержней Барнетта при различных рабочих давлениях

Керн Барнетта	Давление		
	1000 psig	2000 psig	3000 psig
Время (час)	КИН %	КИН %	КИН %
3	6,56	6,52	14,908
6	8,10	7,72	16,960
12	8,38	9,05	19,592
24	8,57	13,28	21,256
48	9,05	15,55	22,412

72	-	15,625	22,86
----	---	--------	-------

Хочется привести результаты исследования этой работы:

1. Процесс закачки циклического газа азота может быть использован в качестве эффективного средства повышения нефтеотдачи пластов трещиноватой сланцевой нефти.

2. Средние лабораторные коэффициенты восстановления были высокими, когда давление впрыска было близко к условиям смешивания азота.

3. В условиях, близких к смешиваемым, коэффициенты извлечения нефти достигли максимума в первом и втором циклах и незначительно увеличились на 2% или менее после 2-го цикла, пока не стабилизировались после 6-го цикла.

4. Понижение давления, по-видимому, является важным механизмом извлечения нефти для процесса хафф-н-пуфф в пластах сланцевой нефти [29].

Также на последок представить исследование, в котором [19] изучалась добыча нефти и газа с помощью азота и по результатам лабораторных экспериментов было установлено, что азот не приводит к повышению нефтеотдачи [30]. Однако по другим исследованиям, [12] полученные результаты показали, что N_2 более эффективен, когда проницаемость пласта ниже 0,03 мД.

По результатам проведенного тестирования [1] были проанализированы характеристики N_2 , CO_2 и соотношения газа N_2 и CO_2 50:50 на добычу нефти в плотных пластах песчаника. В общей сложности было проведено 12 различных испытаний с различными газами с одинаковыми давлениями впрыска, давление вскрыши на 500 фунтов на квадратный дюйм выше давления впрыска для каждого испытания и обратное давление, установленное на 500 фунтов на квадратный дюйм. Извлечение нефти для газа N_2 представлено на Рис.1. Впрыск газа производился с давлением впрыска 3000 фунтов на квадратный дюйм и выше, так как МДС газа N_2 обычно превышает 4000 фунтов на квадратный дюйм. Извлечение нефти увеличивалось по мере увеличения давления впрыска.

4. Экспериментальное исследование применения азота

В ходе работы было проведено экспериментальное исследование. Анализируя положительные и отрицательные стороны азотного газа, была разработана лабораторная работа.

Одним из возможных решений проблемы использования отдельных газов в качестве нагнетательного газа является смешивание этих газов в соотношении, которое может полностью устранить или резко уменьшить большинство из этих ограничений [1]. Ссылаясь на то, что смесь углекислого газа и газообразного азота в правильном соотношении может служить для уменьшения необходимого количества углекислого газа, снижения высокого минимального давления смешиваемости чистого газообразного азота до меньшего минимального пластового давления, а также служить средством уменьшения коррозии оборудования, эксперимент берет основа от этой теорий. Газовая смесь углекислого газа и газа азота также может уменьшить количество CO_2 , которое потребовалось бы, если бы оно вводилось индивидуально, но сможет поддерживать низкий ММП.

4.1. Экспериментальная установка

Эксперимент состоял из двух основных этапов: насыщение образца керна сырой нефтью и закачка газа в керн. Керн помещался в сосуд, к которому был подключен вакуумный насос. Затем для процесса насыщения были использованы насос Quiz ix, сосуд и аккумулятор. Испытание на газовое затопление проводилось с использованием системы затопления активной зоны AFS 300, которая имела максимальное рабочее давление 10 000 фунтов на квадратный дюйм и максимальную температуру 300°F. Газы, подлежащие впрыску, подавались из баллона со сжатым газом, который затем впрыскивался в сосуд и нагнетался до требуемого давления. Давление вскрыши было установлено на 500 фунтов на квадратный дюйм выше, чем давление впрыска для каждого испытания. Это было сделано для того, чтобы обеспечить осевое давление больше, чем внутреннее давление, а также для того, чтобы резиновая втулка сохраняла свою целостность. Обратное давление принято за поровое давление резервуара, и было использовано значение 1000 фунтов на квадратный дюйм (рис. 4).

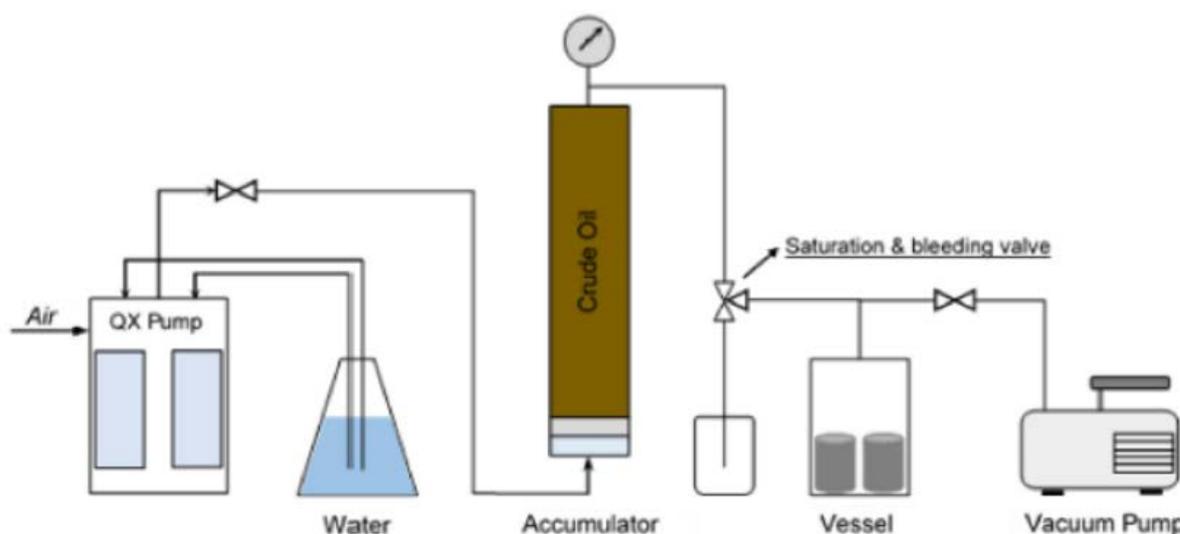


Рисунок 4- Принципиальная схема экспериментальной установки, используемой для нефтенасыщения[30]

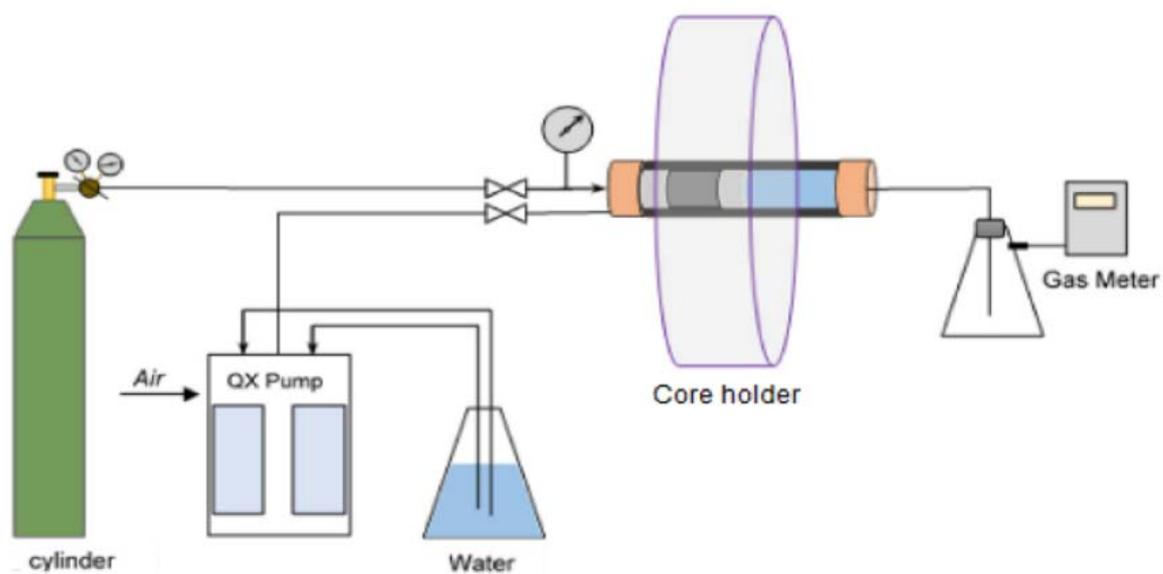


Рисунок 5- Принципиальная схема экспериментальной установки, используемой для заводнения газа[30]

4.2. Материалы

Стержневая пробка, которая использовалась для этого эксперимента, была получена из месторождения Тенгизского месторождения. Стержневая пробка имела размер 2 дюйма в диаметре и 4 дюйма в длину. Средняя пористость, измеренная пористостью, составила 6,76%, а проницаемость по азоту-0,07 мкД. Для измерения проницаемости использовался газопроницаемый прибор Ultra K 500 +. Образец нефти, используемый для насыщения кернов, представлял собой живую сырую нефть плотностью 0,899 г/куб. см (рис. 6).



Рисунок 6- Вид керна

4.3. Экспериментальная процедура

Образец керна сначала очищали с помощью дистилляционного аппарата с толуолом в течение 7 дней. Это было сделано для того, чтобы любой остаточный нефть было полностью растворено до начала эксперимента. После очистки керн оставляли в аппарате на несколько часов, чтобы он остыл. Затем керн помещали в духовку при температуре 212 °F, чтобы полностью высушить керн. Затем была измерена пористость ядра, а также проницаемость с использованием газа азота. Для процесса насыщения ядро сначала взвешивали на аналитических весах, чтобы получить измерение сухого веса. Затем ядро помещали в сосуд и вакуумировали в течение 24 часов. Вакуум был остановлен, и сырая нефть закачивалась в сосуд при постоянном давлении 1200 фунтов на квадратный дюйм в течение 24 часов с помощью насоса Quizix.

Давление сбрасывалось из сосуда с интервалом в 30 минут путем постепенного снижения давления на 100 фунтов на квадратный дюйм каждые 30 минут до достижения атмосферного давления. Вес сердечника был взят после извлечения сердечника из сосуда. Сердечник был помещен в держатель сердечника оборудования для затопления газом, чтобы начать испытание на затопление газом. Один и тот же образец керна использовался для каждого испытания газового заводнения в одних и тех же условиях для повторного насыщения нефти, чтобы свести к минимуму ошибки из-за разницы в условиях отбора проб и испытаний. Кроме того, каждое измерение веса производилось трижды, чтобы обеспечить высокую степень точности и точности.

На выходе была установлена пробирка для сбора извлекаемой нефти, но поскольку пористость и проницаемость образца были низкими, извлечение нефти рассчитывалось путем взятия веса образца керна до и после затопления газом, чтобы вычислить вес собранной нефти и, следовательно, определить объем извлеченной нефти. В таблице 7 показаны давление закачки, давление вскрыши и обратное давление, которые использовались в каждом испытании.

Таблица 7- Время прорыва газа при различных давлениях для образца керна

N ₂			CO ₂			N ₂ / CO ₂		
Рзакачки	КИН	Ошибки (%)	Рзакачки	КИН	Ошибки(%)	Рзакачки	КИН	Ошибки (%)
2000	-	-	2000	7,73	(±) 0,5	2000	6,12	(±) 0,5
3000	8,37	(±) 0,4	3000	14,78	(±) 0,3	3000	10,47	(±) 0,4
4000	11,45	(±) 0,4	4000	17,35	(±) 0,4	4000	14,36	(±) 0,5
5000	15.6	(±) 0,5	5000	19,34	(±) 0,3	5000	17,96	(±) 0,5

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЯ

В этой лабораторной работе были проанализированы характеристики N_2 , CO_2 и соотношение газа N_2 и CO_2 50:50 по добыче нефти в плотных пластах песчаника, а также время их прорыва. В общей сложности было проведено 11 различных испытаний с различными газами с одинаковым давлением впрыска, давлением вскрыши на 400 фунтов на квадратный дюйм выше давления впрыска для каждого испытания и обратным давлением, установленным на 400 фунтов на квадратный дюйм.

Извлечение нефти для газа N_2 представлено на Рисунок 7. Закачка газа производилась при давлении впрыска 3000 фунтов на квадратный дюйм и выше, поскольку давление газа N_2 обычно превышает 4000 фунтов на квадратный дюйм из обзора литературы. Извлечение нефти увеличивалось по мере увеличения давления впрыска. Увеличение коэффициента увеличения нефти было значительным при 3000 и 4000 фунтов на квадратный дюйм, но уменьшилось с 4000 до 5000 фунтов на квадратный дюйм из-за достижения условия смешиваемости при давлениях выше 4000 фунтов на квадратный дюйм. В Таблице 8 показано время коэффициент извлечения нефти и время закачки 11 различных испытаний при различных давлениях с 3 различными газами.



Рисунок 7- Коэффициент извлечения нефти при различных давлениях закачки газа N_2

Таблица 8 Время прорыва ВЧ и газа при различных давлениях для образца керна

Nitrogen gas (N2)				Carbon dioxide gas (CO2)				N2/CO2 50:50			
Давление закачки	КИН	Ошибка (%)	Прорыв (S)	Давление закачки	КИН	Ошибка (%)	Прорыв (S)	Давление закачки	КИН	Ошибка (%)	Прорыв (S)
2000				2000	7.73	(+)05	2167	2000	6.12	(+)0.5	3678
3000	8.37	(+)0.4	924	3000	14.78	(+)03	1876	3000	10.47	(+)0.4	2564
4000	11.45	(+)0.4	678	4000	17.35	(+)0.4	1438	4000	14.36	(+)0.5	1678
5000	15.6	(+)0.5	454	5000	19.34	(+)0.5	1146	5000	17.96	(+)0.5	1456

Газ CO₂ впрыскивался под тем же давлением, что и газ N₂, но также под давлением 2000 фунтов на квадратный дюйм. Это связано с тем, что ММП CO₂, как известно, находится в диапазоне 1500-2000 фунтов на квадратный дюйм. Аналогичная тенденция наблюдалась с увеличением КИН по мере увеличения давления впрыска. На Рисунок 7 показаны результаты измерения концентрации CO₂ с давлением закачки. Однако радиочастотный диапазон впрыска CO₂ был больше, чем у N₂ при всех давлениях, но добавочный радиочастотный диапазон уменьшился между 4000 и 5000 фунтов на квадратный дюйм.

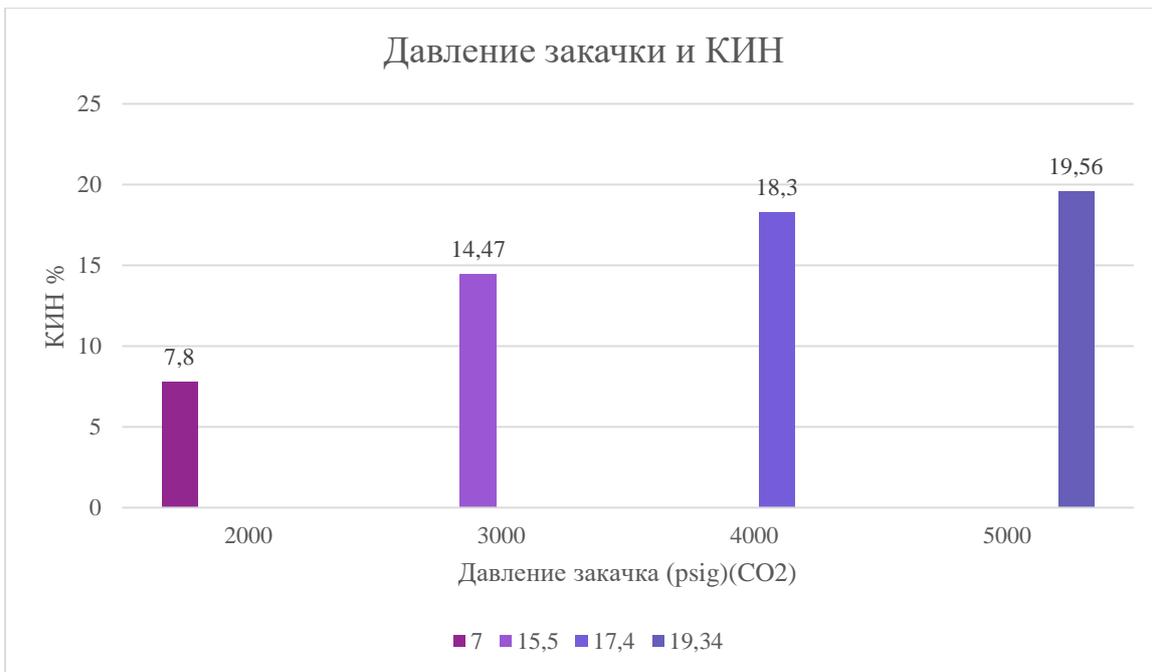


Рисунок 8-Коэффициент извлечения нефти при различных давлениях закачки газа CO2

Газовая смесь N₂/CO₂ была выполнена в том же диапазоне давлений 2000-5000 фунтов на квадратный дюйм. КИН в случае газовой смеси N₂/CO₂ был выше, чем у чистого N₂, но ниже, чем у CO₂. Аналогичная тенденция увеличения КИН с увеличением давления закачки также была замечена. Это связано с тем, что 50% CO₂ впрыскивается в газовую смесь, которая помогла достичь условий смешиваемости. На Рисунке 8 показана КИН газовой смеси N₂/CO₂, а на Рисунке 9 показано сравнение КИН всех трех газов с давлением впрыска.



Рисунок 9- Коэффициент извлечения нефти при различных давлениях закачки для газовой смеси 50:50/N2: CO2

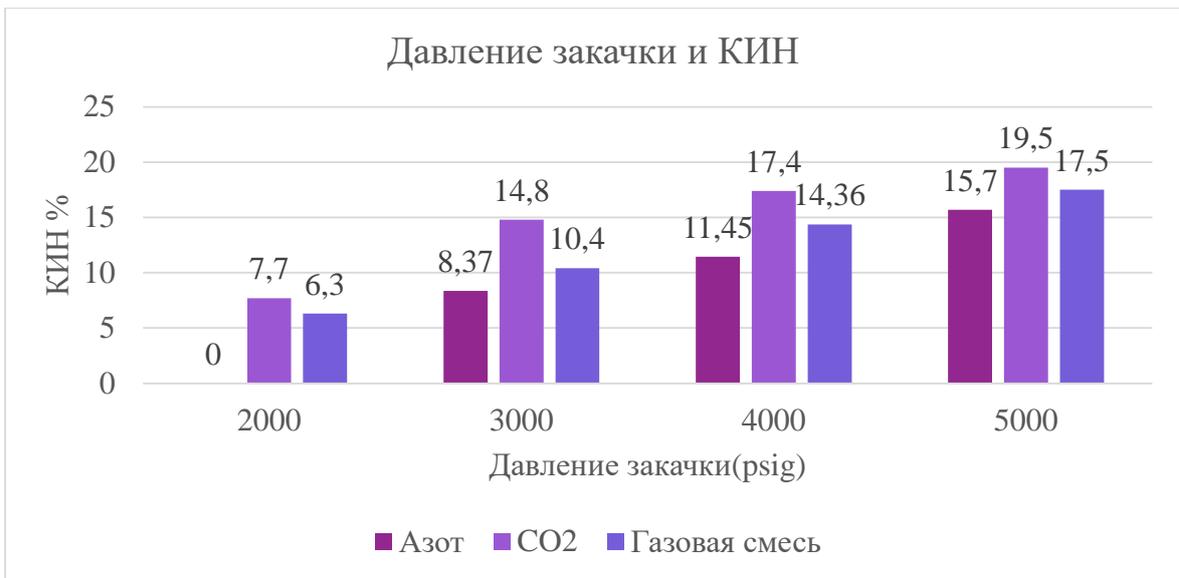


Рисунок 10- Коэффициенты извлечения нефти при различных давлениях закачки для случаев газовых смесей N_2 , CO_2 и N_2/CO_2

На Рисунке 11 показано время закачки N_2 , когда газ впрыскивается через пробку керна при различных давлениях. Замечено, что время, необходимое газу для закачки выходного отверстия активной зоны, уменьшается с увеличением давления. Время прорыва N_2 было самым низким по сравнению с CO_2 и смесью N_2/CO_2 при тех же давлениях. Это связано с тем, что N_2 не формирует смещающий шриффт (несмешивающиеся условия). Кроме того, поскольку адсорбционная способность N_2 намного ниже, чем у CO_2 , в результате этого N_2 быстрее всего проходит через пробку керна.

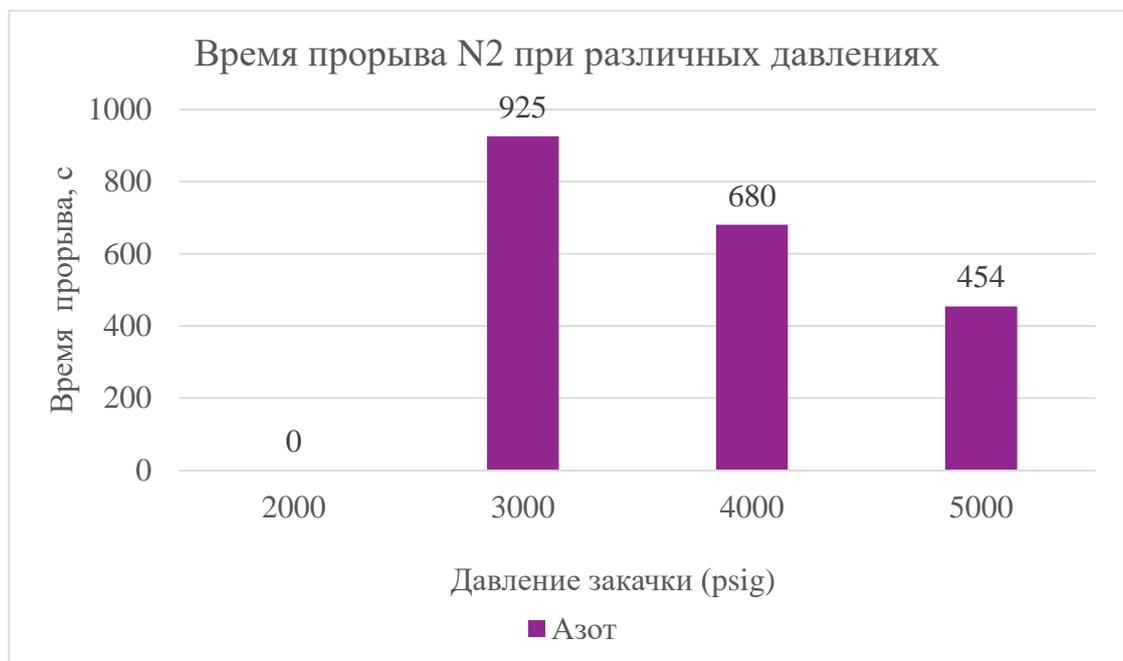


Рисунок 11-Время прорыва N_2 при различных давлениях впрыска

Газ CO_2 имел более высокое время прорыва при том же давлении впрыска, которое использовалось для впрыска N_2 . Это связано с тем, что адсорбционная способность газа CO_2 выше, чем у N_2 , и это делает газ CO_2

более легко адсорбируемым в системе пор и, следовательно, требует значительно большего времени для выхода газа через выходное отверстие активной зоны. Время прорыва газа также уменьшилось по мере увеличения давления впрыска в диапазоне от 2000 до 5000 фунтов на квадратный дюйм. Результаты для случая CO₂ показаны на Рисунке 12.

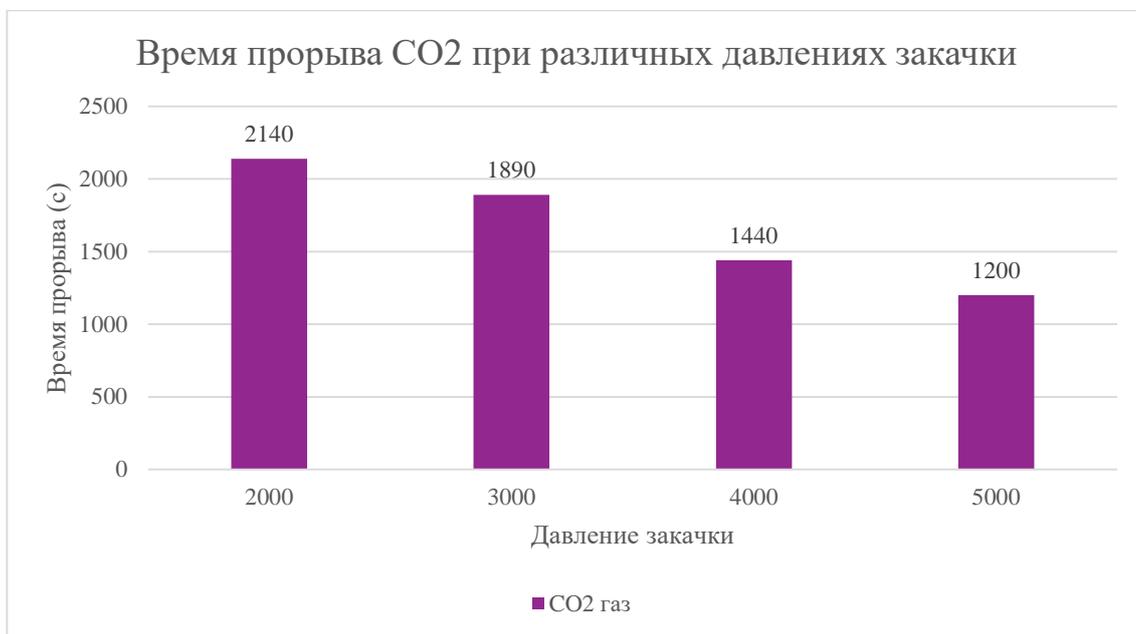


Рисунок 12- Время прорыва CO₂ при различных давлениях закачки

В случае газовой смеси N₂/CO₂ наблюдалось самое длительное время прорыва в том же диапазоне давления впрыска, и также наблюдалась та же тенденция уменьшения времени прорыва по мере увеличения давления впрыска. Результаты случая газовой смеси 50:50 N₂/CO₂ показаны на Рисунок 11, а сравнение времени прорыва всех трех случаев показано на Рисунок 12. 2016 году Янг провели аналогичный эксперимент с образцами керн из пласта Игл-Форд с закачкой газа N₂ в диапазоне давления закачки от 1000 до 5000 фунтов на квадратный дюйм [31]. Было обнаружено, что увеличение давления закачки приводит к увеличению нефте отдачи пластов, а прорыв газа из пробки происходит раньше, когда скорость потока стабилизируется. При давлении впрыска газа 5000 фунтов на квадратный дюйм газ проходил через пробку менее чем за два часа, и достигнутая КИН составила 33,6% [31].



Рисунок 11- Время прорыва газовой смеси 50:50/N₂: CO₂ при различных давлениях впрыска

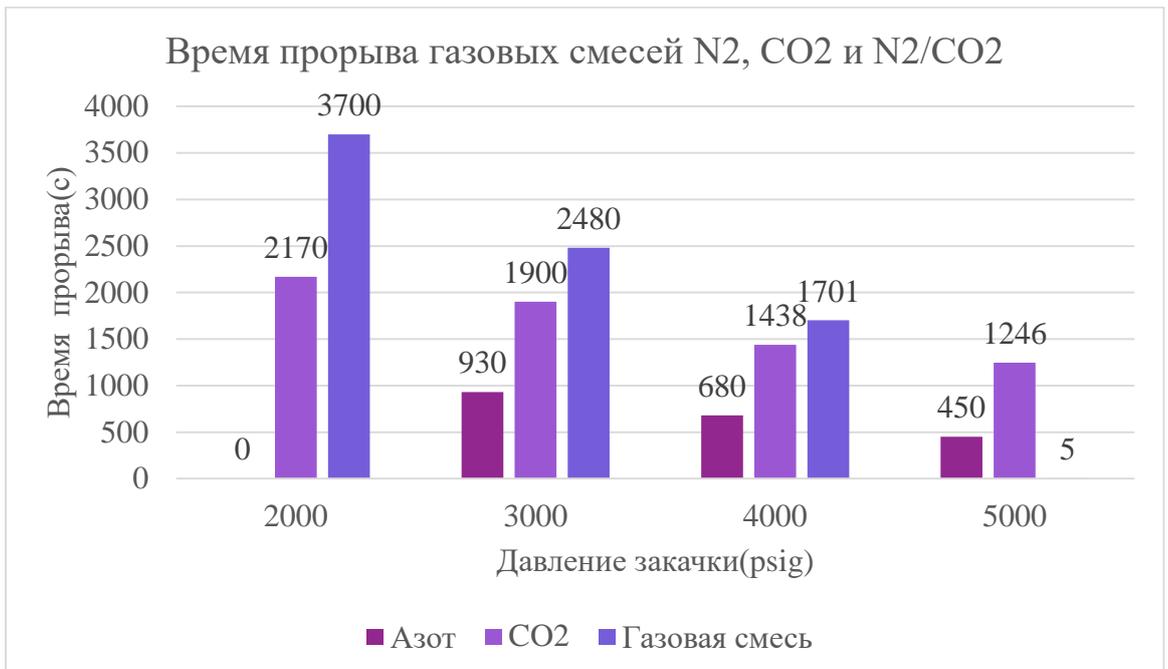


Рисунок 12- Время прорыва газовых смесей N₂, CO₂ и N₂/CO₂

РИСКИ, ВЛИЯНИЕ НА ЭКОЛОГИЮ И ЭКОНОМИКУ СТРАНЫ И НА БУДУЩЕЕ НЕФТЕГАЗОВОЙ ИНДУСТРИИ

Перспективы применения азота и дымовых газов в связи с малым числом ограничивающих факторов и явными экономическими преимуществами по сравнению с углеводородным и углекислым газами можно считать весьма широкими. В Западной Сибири со значительными ресурсами углеводородного газа некоторую его долю можно использовать для получения больших объемов дымовых газов или азота с целью увеличения нефтеотдачи на многих месторождениях.

На нефтегазовых месторождениях это позволит одновременно разрабатывать нефтяные и газовые части залежей, возвращая в газовые шапки лишь 10-12 % извлекаемого газа. Особенно перспективно применение азота и дымовых газов на месторождениях с крутым падением пластов и большими этажами нефтеносности, когда возможна реализация гравитационного дренирования даже при значительной вязкости нефти. Практически на всех месторождениях с маловязкими нефтями, на которых применяется или запланировано обычное водогазовое воздействие на пласт, могут найти применение азот или дымовые газы вне зависимости от давления нагнетания. Разработка залежей легких, летучих нефтей и газоконденсатных месторождений может быть также эффективна за счет нагнетания в них азота или дымовых газов.

Выбор между азотом и дымовыми газами на каждом конкретном месторождении нужно проводить на основе анализа свойств, газогидродинамических расчетов и расходов на их получение и нагнетание в пласт.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В заключении, был проведен анализ внедрения азота, как закачиваемый газ как один из методов нефтеотдачи. В процессе исследований было сравнение азота с углекислым газом.

Эксперимент с керн с использованием N_2 , CO_2 и газов в соотношение N_2 и CO_2 50:50 проводились на пробке керн в контролируемых условиях из керн Тенгизского месторождения. Это было сделано для анализа коэффициента извлечения и времени прорыва газа с использованием одной и той же заглушки активной зоны при различных давлениях закачки. Основные выводы, которые были сделаны из этого эксперимента, заключаются в следующем:

- Газ CO_2 имел наибольший коэффициент извлечения нефти, а газ N_2 имел самый низкий коэффициент извлечения нефти в том же диапазоне давления впрыска 1000-5000 фунтов на квадратный дюйм;
- Коэффициент извлечения нефти(КИН) значительно увеличился со всеми тремя газами между 2000 и 4000 фунтов на квадратный дюйм, но КИН между 4000 и 5000 фунтов на квадратный дюйм уменьшился;
- Время прорыва газа уменьшалось по мере увеличения давления закачки.
- N_2 имел самое короткое время прорыва, а смесь N_2 и CO_2 50:50 имела самое длительное время прорыва. Это связано с тем, что N_2 имеет очень низкую адсорбционную способность и, следовательно, быстро перемещается через керн, в то время как CO_2 имеет более высокую адсорбционную способность и, следовательно, занимает больше времени, чтобы пройти через керн;
- Таким образом, впрыскивание смеси CO_2 и N_2 обеспечивает некоторые основные преимущества, такие как дальнейшее замедление прорыва газа CO_2 , а также использование меньших объемов газа CO_2 для впрыска. Это поможет сократить выбросы парниковых газов и сэкономить затраты, связанные с получением газа CO_2 . Впрыск газа также может быть выполнен при гораздо более низком давлении по сравнению с впрыском чистого газа N_2 , который обычно выполняется при гораздо более высоком давлении, если требуется смешиваемость

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сирегар С, Уилайа Б (2007) Лабораторные эксперименты по повышению нефтеотдачи пластов при закачке азота. ITB <https://doi.org/10.5614/itbj.eng.sci.2007.39.1.2>
2. Баугре Е, Гамади Т (2021) Повышение нефтеотдачи пластов в низкопроницаемых пластах за счет закачки газов смеси CO₂, N₂ и CO₂/N₂. Журнал разведки и добычи нефти (2021) <https://link.springer.com/article/10.1007/s13202-021-01113-5>
3. EIA (2015) Добыча сырой нефти в США до 2025 года: обновленный прогноз по видам сырой нефти. <https://www.eia.gov/analysis/petroleum/crudetypes/pdf/crudetypes.pdf>
4. Gesan, S. G., 2009, "Глобальный лабораторный опыт затопления CO₂-EOR", Характеристики резервуара SPE/EAGE и конференция по моделированию, SPE 164774 Потенциал смешиваемой закачки газа азота в Юго-Восточных активах, Абу Даби, ОАЭ
5. Shi, R., and Kantzas, A., 2008, "Повышение добычи тяжелой нефти в истощенной системе с длинным сердечником за счет CH₄ и CO₂", "Международный симпозиум по тепловым операциям и тяжелой нефти, 2008, SPE/PS/CHOA, International Thermal Operations and Симпозиум по тяжелой нефти, Калгари Альберта, Канада
6. Хади Белхадж, SPE, Хадиль Абу Халифе, Потенциал закачки смешиваемого газа азота в Юго-Восточные активы, Абу Даби Институт нефти и Халид Джавид, 2013
7. Woersma, D. M., and Nagoort, J., 1994, "Характеристики смещения затопления азотом по сравнению с Наводнение метаном в резервуарах с летучими нефтями", SPE Reservoir Engineering(4), стр. 261-265.
8. Висенсио, О. А. и Сепехрноори, К., 2006, "Моделирование закачки азота в естественные трещиноватые коллекторы
9. Вега Б, О'Браян, Ковчек AP(2010) Экспериментальное исследование извлечения нефти из кремнистых сланцев путем смешиваемой закачки CO₂. Представлен на ежегодной технической конференции и выставке SPE, Флоренция, Италия, 19-22 сентября. SPE-135627-CP. <https://www.onepetro.org/conference-paper/SPE-135627-MS>
10. Синанан BS, Бад М (2012) Применение закачки азота для добычи нефти в Тринидаде. Представлен на энергетической конференции и выставке SPETT 2012, Порт-оф-Спейн, Тринидад, 11-13 июня. SPE-156924-MS. <https://doi.org/10.2118/156924-MS>
11. Gesan, S. G., 2009, "Глобальный лабораторный опыт затопления CO₂-EOR", Характеристики резервуара SPE/EAGE и конференция по моделированию, SPE 164774 Потенциал смешиваемой закачки газа азота в Юго-Восточных активах, Абу Даби, ОАЭ

12. Шоута У, Зао Мин Л (2019) Исследование закачки CO₂/N₂ в герметичные нефтяные резервуары с эффектом конфайнмента. Энергетическая наука. <https://doi.org/10.1002/ese3.578>
13. Clancy, J. P., Gilchrist, R. E., Cheng, L. H. K., & Bywater, D. R. "Анализ проектов закачки азота для разработки руководств по скринингу и критериев проектирования на шельфе". SPE 11902, 1985: Journal of Petroleum Technology/ 1985, стр 1097-1104.
14. Синанан BS, Бад М (2012) Применение закачки азота для добычи нефти в Тринидаде. Представлен на энергетической конференции и выставке SPETT 2012, Порт-оф-Спейн, Тринидад, 11-13 июня. SPE-156924-MS. <https://doi.org/10.2118/156924-MS>
15. Budri, M. & Sinanan, B. "Планирование, выполнение и надзор за проектами по повышению нефтеотдачи пластов." SPE 132704, 2010 года, Порт-оф-Спейн, Тринидад.
16. Б. Синанан, Применение закачки азота для добычи нефти в Тринидаде; SPE 156924, 2012, Общество инженеров-нефтяников, Тринидад, 2012 года.
17. Латил, М. Повышение нефтеотдачи Пластов. Париж, Франция: Technip, 1980
18. Джеймс Дж. Шен, Ке Чен, Боб Л. Оценка потенциала EOR закачки газа и воды в пласты сланцевой нефти/ Херд Факультет нефтяной инженерии, Техасский технический университет, Техас, Журнал нетрадиционных ресурсов нефти и газа 5 (2014), 1-9 стр
19. Сирегар С, Уилайа Б (2007) Лабораторные эксперименты по повышению нефтеотдачи пластов при закачке азота. ITB <https://doi.org/10.5614/itbj.eng.sci.2007.39.1.2>
20. Clancy, J. P., Gilchrist, R. E., Cheng, L. H. K., & Bywater, D. R. "Анализ проектов закачки азота для разработки руководств по скринингу и критериев проектирования на шельфе". SPE 11902, 1985: Journal of Petroleum Technology/ 1985, стр 1097-1104.
21. Voersma, D. M., and Hagoort, J., 1994, "Характеристики смещения затопления азотом по сравнению с Наводнение метаном в резервуарах с летучими нефтями", SPE Reservoir Engineering(4), стр. 261-265.
22. Bernard, J, and Miller, G. P. 1998, Полевой случай: Циклическая добыча газа для легкой нефти с использованием диоксида углерода/ Азота/ природного газа, SPE 49169, Представленный на Ежегодной технической конференции и выставке 1998/ SPE, Новый Орлеан, Луизиана, США
23. Атана С, Аджайи А, Хонарпур М, Турек Е, Дилленбек Е, Мок С, Ахмади М, Перейра С (2018) Жизнеспособность закачки газа в сланцевые пласты Игл-Форда. Представлен на ежегодной технической конференции и выставке SPE, Даллас, Техас, США, 24-26 сентября. SPE-191673-сп. <https://doi.org/10.2118/191673-MS>

24. Wasn, T., Sheng, J. J., and Soliman, M. Y. 2013. Оценка потенциала ЭОР в пластах сланцевой нефти путем циклической закачки газа. Новая Орлеана, штат Луизиана
 25. Чен, К., Балхофф, Б., Моханти, К. К., 2013. Влияние неоднородности коллектора на повышение добычи сланцевой нефти за счет CO₂ Huff-n-Puff, SPE 164553-MS, представленный на конференции SPE по нетрадиционным ресурсам 2013 года, Вудлендс, Техас, США
 26. Jia B, Tsai J-S, Varati R (2019) Обзор текущего прогресса в области закачки CO₂ и хранения углерода в резервуарах сланцевой нефти. Топливо 236:404-427. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.08.103>
 27. Чжан Джей Джей (2015) Повышение добычи нефти в сланцевых коллекторах путем закачки газа. J Nat Gas Sci Англ.
 28. Shouta W, Zhao min L (2019) Исследование закачки CO₂/N₂ в плотные нефтяные пласты с эффектом удержания. Энергетическая наука. <https://doi.org/10.1002/ese3.578>
 29. Чен, К., Балхофф, Б., Моханти, К. К., 2013. Влияние неоднородности коллектора на повышение добычи сланцевой нефти за счет CO₂ Huff-n-Puff, SPE 164553-MS, представленный на конференции SPE по нетрадиционным ресурсам 2013 года, Вудлендс, Техас, США
 30. Sinanan BS, Bud riM (2012) Применение закачки азота для добычи нефти в Тринидаде. Представлен на энергетической конференции и выставке SPETT 2012, Порт-оф-Спейн, Тринидад, 11-13 июня. SPE-156924-Ср. <https://doi.org/10.2118/156924-MS>
 31. Ян У, Чжан Дж. Экспериментальная оценка извлечения сланцевой нефти из образцов Игл-Форда путем затопления газообразным азотом/Талса, Оклахома, SPE-179547-Ср, 2016 <https://doi.org/10.2118/179547-MS>
 32. Vega B, O'Brien WJ, Kovscek AR (2010) Экспериментальное исследование извлечения нефти из кремнистых сланцев путем смешивающейся закачки CO₂. Представлен на ежегодной технической конференции и выставке SPE, Флоренция, Италия, 19-22 сентября. SPE-135627-Ср. <https://www.onepetro.org/conference-paper/SPE-135627-MS>
-