



РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК

Объединенный институт высоких температур

УДК 553.981+53.096

№ гос. регистрации

Инв. №



УТВЕРЖДАЮ:
Директор ОИВ РАН
академик
В.Е. Фортов

ОТЧЕТ

О НАУЧНО- ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

Государственный контракт

№ 02.515.11.5039

от 14 июня 2007 г.

ПО ТЕМЕ:

РАЗРАБОТКА ФИЗИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ПОВЫШЕНИЯ ПРОДУКТИВНОСТИ ГАЗОКОНДЕНСАТНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ (заключительный)

Руководитель работы

Заведующий лабораторией ОИВТ РАН, д.т.н.

В.М. Зайченко

Ответственный исполнитель

Старший научный сотрудник

В.М. Торчинский

Москва

октябрь 2007 г.

Список основных исполнителей, участвовавших в подготовке заключительного научно-исследовательского отчета:

Должность	Раздел отчета	Подпись	Ф.И.О.
Зав. лаб., д.т.н.	2.1, 3, Введение, Заключение		В.М. Зайченко
Зав. отделом, д.ф.-м.н.	4.2		В.В. Голуб
Вед. научн. сотр., к.т.н.	2.1, 2.2, 3.1		Л.Б. Директор
Ст. научн. сотр., к.ф.-м.н.	2.1, 2.2, 3.1		И.Л. Майков
Ст. научн. сотр.	1, 2.1, 2.2, 3.1, Введение, Заключение		В.М. Торчинский
Вед. инж.	1.1, 1.3		В.А. Суслов
Ст. научн. сотр., к.ф.-м.н	4.2		Д.И. Бакланов
Научн. сотр., к.ф.-м. н.	4.2		В.В. Володин
Аспирант	4.2		С.В. Головастов
Стажер-исследователь	4.2.1		А.С. Савельев
Стажер-исследователь	4.2.2		Н.И. Семин
Инженер	1.1, 1.2		А.А. Серeda

РЕФЕРАТ

Отчет 55 стр., 45 рис., 5 источников.

газоконденсат, газоконденсатные пласты, способы воздействия на газоконденсатные пласты, фильтрация в пористой среде.

Отчет подготовлен в рамках выполнения 2 этапа Государственного контракта № 02.515.11.5039 от 14 июня 2007 г. с Федеральным агентством по науке и инновациям. Конечной целью работ является создание научно-технического задела по разработке эффективной технологии повышения продуктивности газоконденсатных месторождений.

На 2-ом этапе работ выполнялись следующие задачи:

- 1.Внесение доработок в математическую модель по результатам экспериментальных исследований.
- 2.Подготовка рекомендаций по практическому использованию разрабатываемой технологии.
- 3.Разработка рекомендаций для постановки ОКР по определенным в рамках данного проекта параметрам оптимального воздействия на газоконденсатные пробки в ретроградной области.

Отчет содержит результаты экспериментов по тепловому и газодинамическому воздействию на модель газового пласта; расчетов, выполненных с целью определения оптимальных параметров воздействия и рекомендации по постановке ОКР, необходимых для разработки методики промышленного использования исследованных методов воздействия.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
1 УСТАНОВКА «ПЛАСТ»	9
1.1 Схема модернизированной установки	9
1.2 Схема измерения параметров эксперимента.....	11
1.3 Программное обеспечение (для работы с контроллером)	12
1.4 Методика эксперимента	14
1.5 Моделирование образования газоконденсатной пробки	14
2 МЕТОДЫ ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ГАЗОКОНДЕНСАТНЫЙ ПЛАСТ	17
3 ОБОСНОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ТЕРМИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ	19
3.1 Физические основы метода.....	19
3.2 Экспериментальное обоснование метода теплового воздействия.....	21
3.2.1 Методика экспериментов	21
3.2.2 Результаты экспериментов.....	21
3.3 Оценки параметров распространения тепловой волны.....	24
3.3.1 Нагрев скважинным нагревателем	24
3.3.2 Использование химического реагирования.....	28
Выводы.....	32
3.3.3 Рекомендации по практическому использованию методов теплового воздействия.....	32
4 ОБОСНОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ УДАРНО-ВОЛНОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ.....	34
4.1 Физические основы метода.....	34
4.2 Оценки параметров распространения ударной волны	35
4.2.1 Сферическая симметрия.....	35
4.2.2 Цилиндрическая симметрия (плоский случай)	40
4.2.3 Выводы.....	44
4.3 Экспериментальное обоснование метода ударно-волнового воздействия	44
4.3.1 Пульсационное воздействие	44
4.3.2 Детонационная камера сгорания как источник импульсного воздействия.....	45
Выводы.....	53
4.3.3 Рекомендации	53
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	54
Список использованных источников	55

ВВЕДЕНИЕ

Масштабы и темп освоения ресурсов природных углеводородных систем в значительной степени связаны с разработкой залежей газо- и нефтегазоконденсата. С увеличением глубины бурения и в результате освоения месторождений Севера России и морского шельфа их доля в балансе газонефтяных флюидов возрастает.

В то же время, коэффициент извлечения ресурсов из недр на действующих газоконденсатных скважинах намного меньше, чем на нефтяных. Лишь в наиболее благоприятных случаях он достигает 60%, в среднем оставаясь на уровне 45-50% [1].

Такое различие объясняется, кроме характерных для газоконденсатных месторождений сложных геологических условий, особенностью термодинамических свойств газоконденсата. Газовый конденсат представляет собой сложную смесь метана и высших производных метанового ряда. Фазовая диаграмма такой смеси содержит в себе область, в которой при понижении давления возможно образование ретроградной жидкости, испаряющейся с дальнейшим уменьшением давления, т. н. «ретроградную область». При отборе конденсата из продуктивного пласта происходит падение давления и изменение температуры вблизи забоя скважины. Газоконденсат в призабойной зоне частично конденсируется с образованием ретроградной жидкости, которая заполняет поровое пространство и препятствует выходу газовой фазы. Фильтрация многокомпонентной двухфазной смеси к забою скважины вызывает увеличение насыщенности конденсатом порового пространства по сравнению с процессом дифференциальной статической конденсации вплоть до образования «конденсатной пробки». При этом ухудшается и качество добываемого сырья – наиболее ценная его часть концентрируется в трудноизвлекаемой жидкой фракции [2].

В настоящее время в СНГ все газовые и газоконденсатные месторождения разрабатываются в режиме истощения, что обуславливает:

- низкие коэффициенты конденсатоотдачи из-за ретроградных потерь конденсата в пластах;
- большие затраты на подготовку газа к дальнейшему транспорту и необходимость строительства дожимных компрессорных станций;
- ограниченность периода постоянной добычи газового конденсата.

Потери конденсата при газовом режиме разработки увеличиваются с ростом его начального содержания и плотности. При прочих равных условиях коэффициенты конденсатоотдачи падают при уменьшении различия между начальным пластовым давлением и давлением начала конденсации и увеличиваются при повышенных температурах в пласте.

Газоконденсатные месторождения различаются между собой как условиями залегания углеводородов (внутрипластовой температурой и давлением, пористостью коллектора, свойствами и составом пластовой системы, наличием или отсутствием нефтяной и водной оторочки), так и составом пластовой смеси. Учет влияния всех факторов, определяющих поведение газоконденсатной системы, в условиях натурального эксперимента представляет практически неразрешимую задачу. Для прогнозирования разработки реальных месторождений и исследования закономерностей внутрипластовой фильтрации требуется создание моделей, основанных на теории многокомпонентной фильтрации с учетом теплофизических свойств углеводородных смесей, а также термодинамических и гидродинамических условий, при которых происходит процесс фильтрации.

К основной задаче моделирования относится качественная и, при возможности, количественная оценка зависимости динамики конденсатоотдачи от методов воздействия на продуктивный пласт. При этом моделирование усложняется вследствие необходимости учета гидродинамических, тепловых и физико-химических процессов.

Существуют два метода моделирования реальных процессов – математическое моделирование и построение физических моделей.

Математическая модель, как бы хорошо она ни была разработана, помимо неопределенности в описании геометрии месторождения, не учитывает должным образом все многообразие явлений и процессов, причем многие закономерности или не принимаются во внимание вовсе, или рассматриваются в условиях, не соответствующих реальности.

Существующие математические модели ([1], [2]) очень сложны, требуют больших затрат машинного времени и высококвалифицированного труда и зачастую не обеспечивают необходимую для практического использования точность. Основным методом проверки правильности подобных моделей являются промысловые испытания.

Метод построения физических моделей позволяет использовать результаты математического моделирования и исследований на промысловых испытаниях.

С помощью физических моделей можно проводить:

- проверки различных методов и сравнение результатов;
- исследование влияния различных факторов на показатели процесса;
- контроль применимости математических моделей для конкретных месторождений.

Однако, реализация этого метода весьма трудоемка и дорогостояща.

При всем разнообразии условий добычи углеводородного сырья для газоконденсата возможно выделить одно общее характерное физическое явление – образование «конденсатной пробки». Моделирование этого процесса как в эксперименте так и с помощью математических моделей можно проводить на двухкомпонентных смесях углеводородов с известными теплофизическими

свойствами. Подобное моделирование дает возможность выделить основные физические процессы, влияющие на фильтрацию смеси, оценить их численно, и, в конечном итоге, разработать методы воздействия на газоконденсатную систему для повышения эффективности эксплуатации месторождения.

Конечной целью настоящей работы является создание научно-технического задела по новым методам повышения конденсатоотдачи.

На первом этапе работ решались следующие задачи:

1. Обзор предлагаемых способов повышения конденсатоотдачи пласта.
2. Доработка экспериментального стенда для исследования процесса многофазной фильтрации газоконденсатного флюида при натуральных условиях залегания.
3. Пуско-наладочные работы и цикл экспериментальных исследований по определению оптимальных методов технологического воздействия на ретроградный конденсат.
4. Уточнение математической модели, описывающей процессы фильтрации при образовании ретроградного конденсата и восстановление фильтрационных характеристик при разрабатываемых методах воздействия.

Предлагаемые способы повышения конденсатоотдачи пласта весьма многообразны. Среди них – рациональная эксплуатация отдельной скважины или месторождения в целом, закачка газа или жидкости в продуктивные пласты, использование растворителей, воздействие взрывом, акустическими и упругими волнами, электромагнитное воздействие, тепловое воздействие. Обзор этих методов приведен в отчете о патентном поиске, представленном на первом этапе проведения настоящих исследований.

Для моделирования процессов воздействия установка «Пласт», входящая в состав экспериментального стенда ОИВТ РАН и предназначенная для исследования процессов фильтрации нефтяных и газоконденсатных смесей, была модернизирована с целью обеспечения необходимых параметров эксперимента. Установка была также дооснащена системой создания газодинамических ударных волн

Проведенные эксперименты показали возможность использования установки для моделирования процессов фильтрации газоконденсатной смеси и исследования методов разрушения конденсатной «пробки».

Для планирования экспериментов, а также анализа экспериментальных результатов разработан пакет программ, с помощью которого рассчитываются как гидродинамические, так и термодинамические характеристики двухфазных углеводородных смесей в процессе фильтрации через пористый коллектор.

Разработана программа визуализации, сбора и хранения информации, позволяющая управление экспериментом в режиме реального времени.

С помощью усовершенствованной математической модели проведена предварительная оценка величин параметров физического воздействия на внутрислоевую систему.

Задачами второго этапа работ являлись:

1. Внесение доработок в математическую модель по результатам экспериментальных исследований.

2. Подготовка рекомендаций по практическому использованию разрабатываемой технологии.

3. Разработка рекомендаций для постановки ОКР по определенным в рамках данного проекта параметрам оптимального воздействия на газоконденсатные пробки в ретроградной области.

В настоящем отчете приводятся результаты экспериментов по тепловому и ударно-волновому методам воздействия на модельную газоконденсатную пробку.

С помощью доработанной математической модели и результатов экспериментов получены предварительные результаты, необходимые для определения параметров оптимального воздействия на газоконденсатные пробки в ретроградной области.

Рассмотрена методология выбора оптимального метода воздействия на газоконденсатную пробку и приводятся рекомендации для постановки ОКР по разрабатываемым технологиям.

1 УСТАНОВКА «ПЛАСТ»

1.1 Схема модернизированной установки

Физическое моделирование методов воздействия на газоконденсатную пробку проводилось на экспериментальном стенде «Пласт», созданном в ОИВТ РАН. Стенд предназначен для исследования процессов фильтрации пластовых флюидов при термобарических условиях реальных пластов. Параметры, которые может обеспечить установка – давление до 40 МПа и температура до 400 °С – позволяют в широких пределах моделировать пластовые условия и проводить эксперименты с жидкостями и газами различного фракционного состава.

Задачи, решаемые на стенде:

–Исследование фундаментальных физико-химических процессов при фильтрации флюидов в пористых средах до давлений 40 МПа и температур 400 °С;

–Моделирование новых методов повышения отдачи нефтяных и газоконденсатных пластов;

–Исследование эффективности методов интенсификации добычи нефти и газового конденсата при пластовых термобарических условиях для конкретных продуктивных пластов.

Для проведения экспериментов по физическому моделированию методов воздействия на газоконденсатную пробку стенд был модифицирован, с тем, чтобы обеспечить необходимые термодинамические параметры в имитаторе пласта. Созданные в процессе модификации дополнительные системы терморегулирования и создания газодинамических ударных волн позволяли исследовать тепловой и волновой методы воздействия. Для проведения экспериментов построена система визуализации, сбора и хранения информации, использующая разработанную в ОИВТ программу контроля и управления экспериментом в режиме реального времени.

Газовый конденсат моделировался бинарной смесью метан – н-бутан, фазовая диаграмма которой содержит ретроградную область, расположенную в диапазоне температур и давлений, близкой к термобарическим условиям реальных газоконденсатных пластов ($P=10-12$ МПа, $T=270-330$ °С). В то же время, эти параметры возможно обеспечить в процессе моделирования образования конденсатной пробки.

На рисунках 1.1 и 1.2 представлены блок-схема и общий вид модифицированного стенда «Пласт».

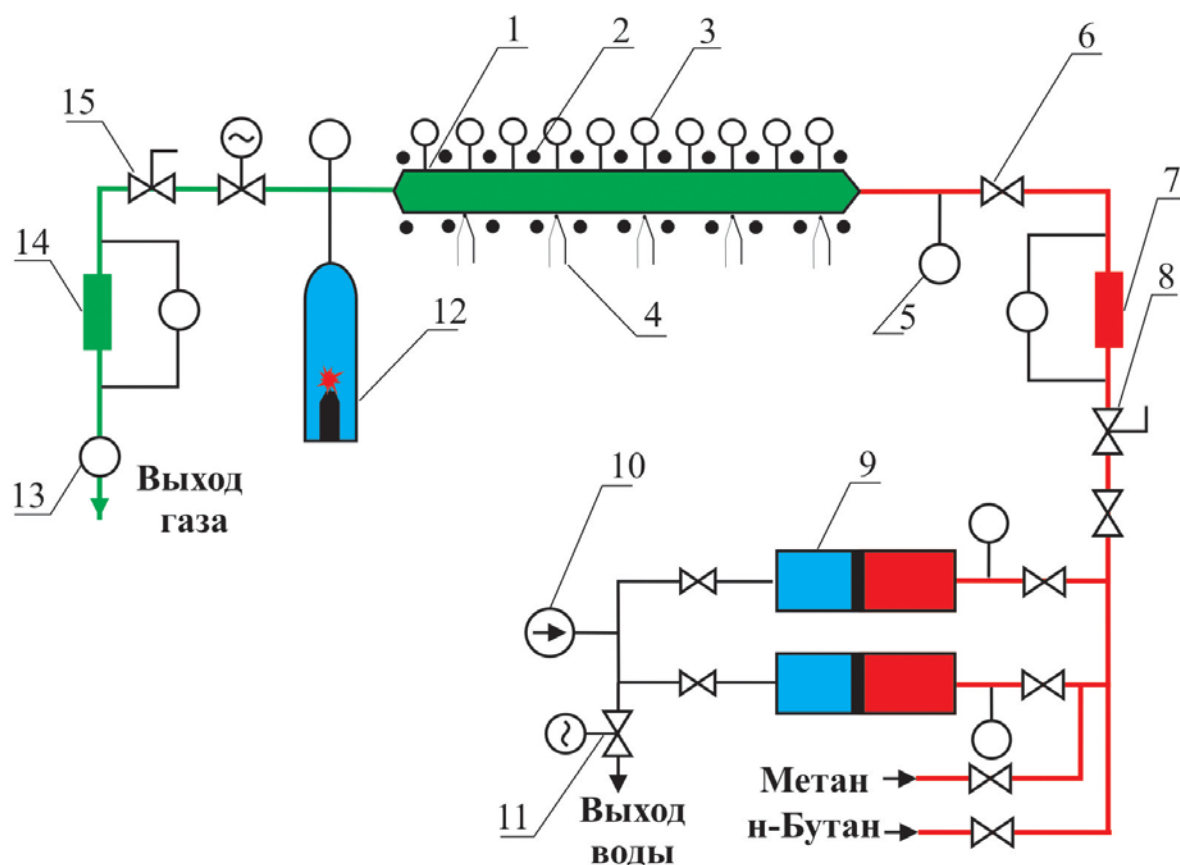


Рисунок 1.1 – Блок-схема модифицированного стенда «Пласт»

Основными блоками стенда являются:

1. Экспериментальный участок (труба $\text{Ø}_{\text{внутр}} = 10\text{ мм}$, $l = 2,2\text{ м}$, материал X18H10T);
2. Нагреватель (3 шт. x 1 кВт);
3. Тензодатчики (КУ-100, 10 шт.);
4. Термопары (10 шт., ХК);
5. Датчики давления («Сапфир» и «МС 2000», $0 \div 40\text{ МПа}$);
6. Кран («Swagelok», SS43GS 206 bar);
7. Расходомер («МС 2000», $0 \div 16\text{ кПа}$);
8. Редуктор (SS316 0-275 bar);
9. Разделительный цилиндр ($V=5\text{ л}$, $P=40\text{ МПа}$, материал X18H10T);
10. Насос – дозатор (НД-2.5-400);
11. Кран с электроприводом («Swagelok», SS43GS 206 bar);
12. Газодинамическая труба ($l=3\text{ м}$, $\text{Ø}_{\text{внутр}} = 18\text{ мм}$, $P_{\text{макс}}=25\text{ МПа}$);
13. Газовый счетчик («ГСБ-400», $V=0,4\text{ м}^3/\text{час}$);
14. Расходомер («МС 2000», $0 \div 100\text{ кПа}$);
15. Регулятор давления (АЖЦ 5.150.101, $P_{\text{макс}} = 32\text{ МПа}$).

В качестве одномерной модели пласта использовалась термостатированная труба длиной 2,2 м и внутренним диаметром 10 мм, изготовленная из нержавеющей стали X18H10T и заполненная предварительно промытым кварцевым песком фракции 0,09–0,125 мм.



Рисунок 1.2 – Общий вид стенда с ударной газодинамической трубой

1.2 Схема измерения параметров эксперимента

Для измерения параметров экспериментов была разработана система, схема которой представлена на рисунке 1.3.

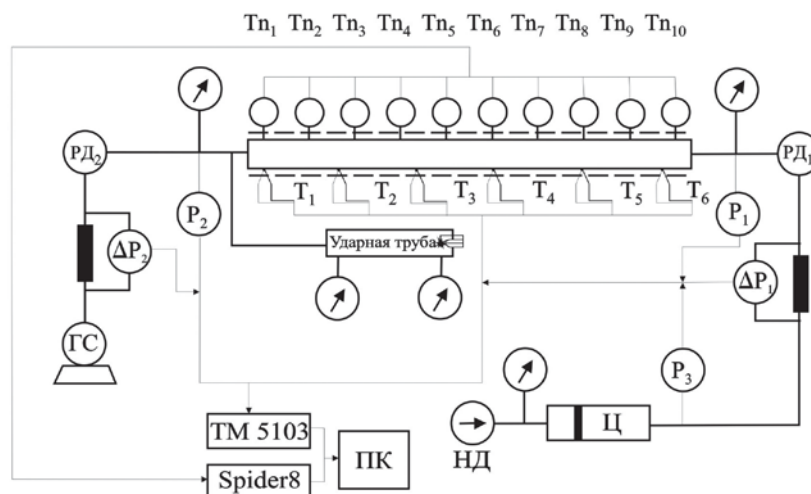


Рисунок 1.3 – Схема основных измерений:

T_{1-6} – термопарные датчики, T_{n1-10} – тензодатчики, P_{1-3} – датчики давления, ΔP_{1-2} – датчики расхода, TM 5103, Spider8 – АЦП-преобразователи, НД – насос-дозатор, ГС – газовый счетчик, Ц – блок цилиндров высокого давления

Измеряются давления на входе и выходе экспериментального участка, температура термостата, расход смеси на входе и расходы жидкой и газовой фаз на выходе экспериментального участка. Проводятся измерения составов смеси на входе и газовой и жидкой фаз на выходе из экспериментального участка. Для автоматизации измерений и регулирования параметров эксперимента данные выводятся на контроллер.

1.3 Программное обеспечение (для работы с контроллером)

Программа обработки и визуализации параметров режимов установки предназначена для работы на персональной ЭВМ с оперативной памятью не менее 64 Мб, свободное место на жестком диске не менее 10 Мб, видеоконтроллером PCI или AGP с памятью не менее 1 Мб, поддерживающего режим не менее 800 x 600 точек при числе цветов не менее 16, манипулятор типа «мышь», один свободный порт RS 232.

Программный комплекс работает под управлением операционной системы Windows XP и является модификацией программы, поставляемой с приборами производства НПП «Элемер». При разработке программы использовалась среда Delphi 6.

Назначение программы:

1. Считывание результатов измерений с датчиков TM51.
2. Запись результатов измерений в текстовый файл.
3. Выдача на экран в виде мнемосхемы с параметрами.

Описание программы

Для работы программы необходимы файлы Pr_file.exe, TM5103.xls, irt1730.exe, и irt1730.ini. На компьютере должна быть установлена офисная программа Excel. Файлы irt1730.exe и irt1730.ini должны быть скопированы в каталог, где находится программа Excel. Основным режимом работы программы является ее использование в качестве DDE-сервера в программе Excel. В этом режиме программа позволяет непрерывно показывать измеренное значение в ячейке электронной таблицы. Pr_file.exe – исполняемый файл. При запуске программы Pr_file.exe появляется окно (рисунок. 1.4).

Программа имеет кнопки

1. **Загрузка TM5103.xls** – запуск программы irt1730.exe.
2. **Старт** – запуск программы
3. **Стоп** – останов программы
4. **Выход** – выход из программы

Программа имеет панель **Архивация**. Запуск записи в файл результатов **result.txt** осуществляется кнопкой **Пуск** панели **Архивация**. Программа позволяет проводить отсечку результатов и вносить комментарии, которые записываются в файл результатов.

Формат файла **result.txt** представлен на рисунке 1.5.

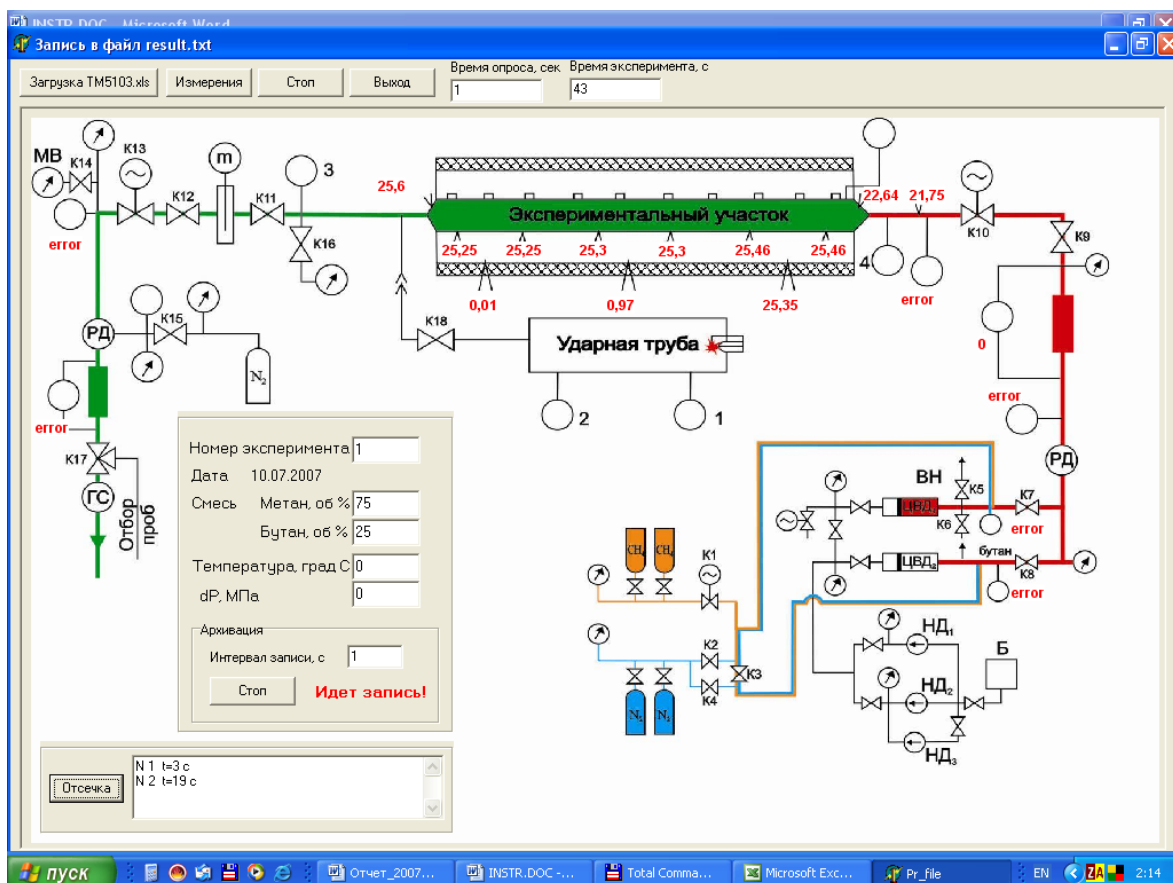


Рисунок 1.4 – Главное окно программы

```

Номер эксперимента: 1
Дата: 10.07.2007
Метан, об %: 75
Бутан, об %: 25
Температура, град С: 0
dP, МПа: 0

t, сек    1.1  1.2  1.3  1.4  1.5  1.6  1.7  1.8  2.1  2.2  2.3  2.4  3.1  3.2  3.3  3.5  3.6  3.7  3.8
4         4,18 4,57 4,77 4,74 4,72 4,2  4,51 4,31 4,53 4,29 4,95 4,29 4,95 4,29 4,95 4,29 4,95 4,29
8         4,18 4,57 4,77 4,74 4,72 4,2  4,51 4,31 4,53 4,29 4,95 4,29 4,95 4,29 4,95 4,29 4,95 4,29
12        4,18 4,57 4,77 4,74 4,72 4,2  4,51 4,31 4,53 4,29 4,95 4,29 4,95 4,29 4,95 4,29 4,95 4,29

N 1  t=6 c
N 2  t=12 c
    
```

Рисунок 1.5 – Формат файла **result.txt**

Ввод новых каналов в TM5103.xls

Для этого необходимо запустить программу Excel, выбрать нужную ячейку и ввести в нее следующую формулу

Irt1730|Elemervv0

Последняя часть формулы – Vv0 – состоит из двух частей - обязательного заголовка Vv и номера канала программы. Например, Vv1, Vv2..

После ввода формулы Excel запрашивает согласие на запуск программы irt1730.exe и после утвердительного ответа запускает ее. На экране появляется главное окно программы. После этого

надо завершить ввод формулы, и в ячейке появляется текст «No data», свидетельствующий об успешном установлении DDE связи. Фрагмент файла **TM5103.xls** представлен на рисунке 1.6.

Irt1730 Elemex!Vv0			
C	E	F	G
Номер канала	Прибор №1	Прибор №2	Прибор №3
1	4,85828927	4,30537715	354,1274314
2	4,18469296	4,52553202	354,3502844
3	4,56633363	354,805526	354,5337683
4	4,7741248	354,910354	354,2073355
5	4,73944321	354,726067	354,9900525
6	4,71650754	354,392408	4,294965783
7	4,19770046	354,784386	4,949334244
8	4,51393892	354,197667	4,976715334

Рисунок 1.6 – Фрагмент файла **TM51**

1.4 Методика эксперимента

Смесь метан–н-бутан готовилась в цилиндре высокого давления (ЦВД) при давлении 13 МПа, массовая концентрация метана составляла в среднем для разных экспериментов около 45%, н-бутана – 55%. Температура термостатирования изменялась в диапазоне 290–350 К. Эти параметры обеспечивают нахождение смеси в ретроградной области фазовой диаграммы при проведении эксперимента. Экспериментальный участок (ЭУ) заполнялся промытым кварцевым песком фракции 0,09 – 0,125 мм. Измеренный коэффициент проницаемости участка составил $3,8 \cdot 10^{-11} \text{ м}^2$. После заполнения ЭУ смесью при давлении 12 МПа открывался кран на выходе ЭУ и в течение эксперимента поддерживался постоянный перепад давления на ЭУ. Давление на входе составляло для различных экспериментов 10–12 МПа, на выходе – 9–5 МПа. В ходе экспериментов измерялись также расход газовой фазы на выходе из ЭУ, температуры входящей и выходящей смеси, поле температур в термостате и давления в магистралях установки. Проводился отбор проб на хроматографический анализ состава исходной смеси и состава смеси на выходе из ЭУ в течение эксперимента. В экспериментах по газодинамическому воздействию на модельную систему измерялись импульсные давления в детонационной камере, а также давления на входе и выходе ЭУ.

1.5 Моделирование образования газоконденсатной пробки

Для проверки адекватности физической и математической модели явления условиям реальных пластов были проведена серия предварительных экспериментов по получению газоконденсатной пробки в процессе фильтрации модельной смеси при заданных термобарических условиях.

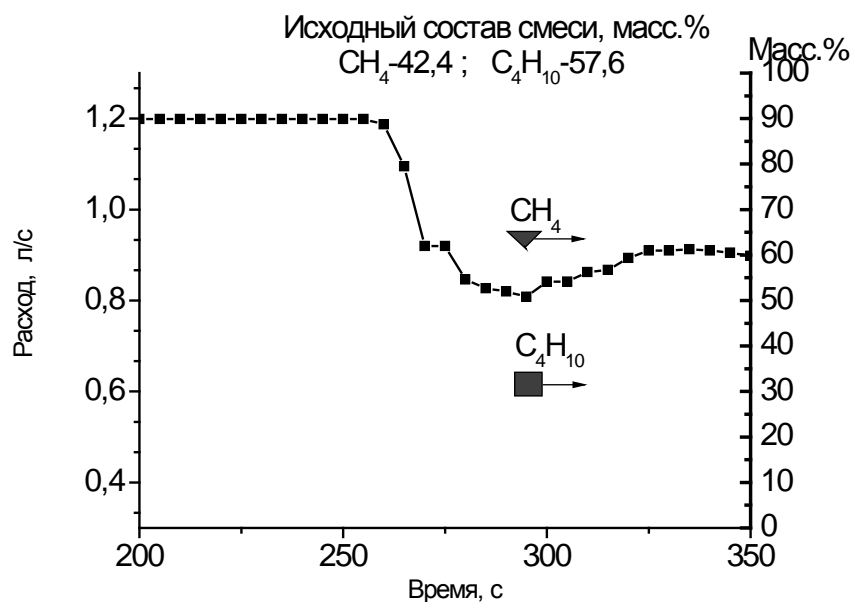


Рисунок 1.7 – Расход газовой фазы на выходе из ЭУ:
 Давление на входе в ЭУ – 12 МПа, на выходе – 9 МПа;
 температура входящей смеси – 303 К, термостата – 310 К

На рисунке 1.7 представлены результаты одного из экспериментов этой серии – зависимость расхода газовой фазы на выходе из ЭУ от времени и данные по составу исходной и выходящей смеси. После 250 секунд с начала эксперимента расход смеси резко падает и ее состав изменяется в сторону уменьшения содержания н-бутана. Это свидетельствует об образовании в поровом пространстве газоконденсатной «пробки» и перераспределении содержания компонентов в жидкой и паровой фазах – массовая концентрация метана от исходной 42,4% увеличивается до 66,4%.

При повышении температуры термостата до 330 К образования «пробки» не наблюдается и состав выходящей газовой фазы соответствует исходному. Это объясняется сдвигом ретроградной области при увеличении температуры в сторону меньших концентраций метана. Следует отметить, что, согласно расчетам по разработанной в ОИВТ программе PLAST, образование газоконденсатной «пробки» в смеси с концентрацией метана 42% масс. при температурах выше 330 К в условиях эксперимента не происходит.

Образования конденсатной пробки не происходит также при составе смеси 70% масс. метана и 30% масс. бутана. и температуре термостата 293 К. При такой концентрации метана смесь при понижении давления не проходит через ретроградную область фазовой диаграммы и выпадения конденсированной фазы не происходит.

Во всей серии экспериментов, проведенных со смесью, находящейся в термодинамических условиях, которые соответствуют ретроградной области, при постоянном перепаде давления на

экспериментальном участке получено уменьшение расхода конденсата в результате образования конденсатной пробки.

Таким образом, показана возможность физического моделирования образования газоконденсатной «пробки» и адекватность математической модели, описывающей это явление.

2 МЕТОДЫ ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ГАЗОКОНДЕНСАТНЫЙ ПЛАСТ

Выбор метода воздействия на продуктивные пласты осуществляется преимущественно на основе общих физических представлений и практического опыта в виде рекомендаций [3].

Предлагаемые способы повышения конденсатоотдачи пласта весьма многообразны. Среди них – рациональная эксплуатация отдельной скважины или месторождения в целом, закачка газа или жидкости в продуктивные пласты, использование растворителей, воздействие взрывом, акустическими и упругими волнами, электромагнитное воздействие, тепловое воздействие.

Полевые испытания не всегда способны выявить эффективные способы воздействия на пласт, а проведение таких испытаний с целью набора минимально необходимой статистики связано с неоправданно большими затратами. Результативность полевых испытаний можно повысить путем предварительного математического и физического моделирования. Решение о выборе того или иного метода зачастую принимается в условиях, когда невозможно одновременно удовлетворить нескольким критериям. Обычно, выбор приходится делать из ряда имеющихся возможностей, и получать при этом определенное компромиссное решение. Принципиальным является и то обстоятельство, что это решение принимается в условиях недостаточной информации об объекте (в данном случае – о свойствах и параметрах призабойной зоны пласта, свойствах флюида в пласте и т.п.) Таким образом, термин «оптимальный способ воздействия» требует уточнения и конкретизации применительно к реальным условиям действующего месторождения.

Когда принято решение об интенсификации добычи на действующей газоконденсатной скважине с помощью какого-либо типа воздействия, в первую очередь проводятся эксперименты на лабораторных стендах для проверки возможностей данной технологии на интересующем объекте и определения основных параметров воздействия. Определяются также состав добываемого конденсата и его теплофизические свойства. Если полученные результаты удовлетворительны, они используются для определения характеристик более крупномасштабных экспериментов уже в промысловых условиях. На этом этапе окончательно решается вопрос о применимости выбранной технологии, выбранной по результатам лабораторных исследований. После этого в процессе эксплуатации скважины накапливаются технологические и экономические сведения о пилотном эксперименте. На основании этих сведений принимается решение о масштабах промышленного применения данного метода.

Из множества методов, предлагаемых для интенсификации добычи газового конденсата, практическое применение нашел метод закачки сухого газа в действующую скважину [3]. При этом происходит частичная газификация и оттеснение жидкостной пробки от забоя скважины и дебит на некоторое время возрастает. Применение этого метода требует больших затрат газа, наличия мощных высокопроизводительных компрессоров и дает кратковременный эффект в

случае, если газовый конденсат в пласте находится в термобарических условиях, соответствующих закритической области фазовой диаграммы.

В рамках настоящей темы проведены теоретические и экспериментальные работы, в которых исследуются тепловые методы воздействия на газоконденсатные системы в пластах и метод воздействия детонационными волнами с целью повышения конденсатоотдачи. В отличие от способа, используемого в настоящее время, эти методы предполагают меньшие затраты энергии и ресурсов. Применение таких воздействий возможно при закритическом состоянии газового конденсата. Принципиальным при выборе явился и тот факт, что как тепловое, так и ударно-волновое воздействие, приводят к устранению первопричины снижения производительности газоконденсатной скважины — конденсатной пробки.

3 ОБОСНОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ТЕРМИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

3.1 Физические основы метода

Физическую сущность влияния повышения температуры пласта на увеличение выхода газоконденсата можно проиллюстрировать на фазовой диаграмме бинарной углеводородной смеси метан–н-бутан, имеющей характерную ретроградную область (рисунок 3.1).

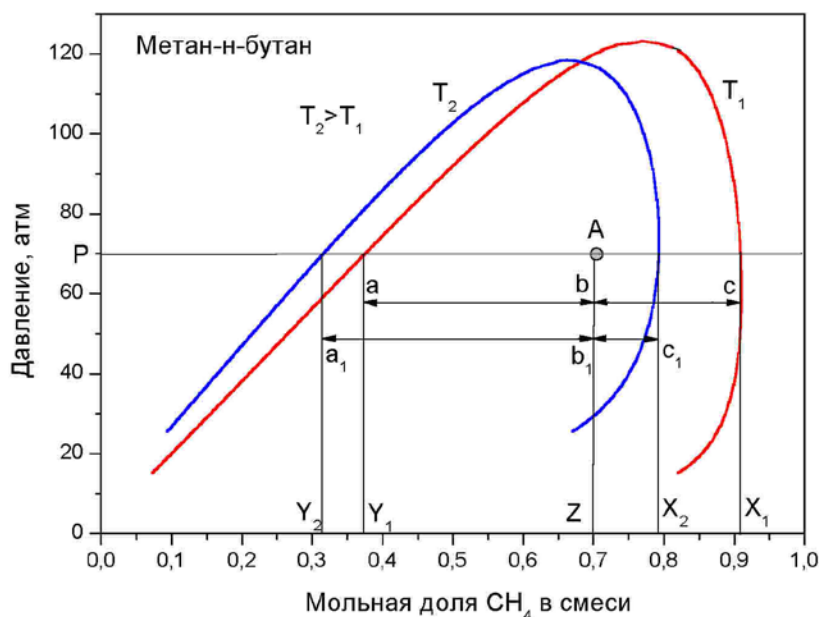


Рисунок 3.1 – Фазовая диаграмма бинарной углеводородной смеси метан–н-бутан (пограничные кривые – расчет по уравнению состояния)

Пусть А – равновесное состояние углеводородной системы при давлении Р, температуре T_1 и концентрации метана в смеси Z. При этом концентрация н-бутана в паровой фазе $1-X_1$, в жидкой фазе $1-Y_1$; мольная концентрация жидкой фазы в смеси $C_1=bc/ac$. При увеличении температуры системы до T_2 равновесная концентрация высококипящего компонента (н-бутана) в газовой фазе возрастает ($1-X_2$). В тоже время уменьшается мольная концентрация жидкой фазы в смеси ($C_2=b_1c_1/a_1c_1$).

Предварительный анализ процесса проводился с использованием одномерной нестационарной модели двухфазной фильтрации газоконденсатной смеси, реализованной в компьютерной программе PLAST. В модели реализован расчет гидродинамических и термодинамических характеристик процесса фильтрации бинарной углеводородной смеси в изотермических условиях при наличии фазовых переходов. Гидродинамика процесса двухфазной фильтрации в пористой среде рассчитывалась в приближении линейного закона Дарси, термодинамические

характеристики рассчитывались с помощью обобщенного кубического четырехкоэффициентного уравнения состояния Ван-дер-Ваальсового типа и условий фазового равновесия.

Результаты расчетов представлены на рисунке 3.2.

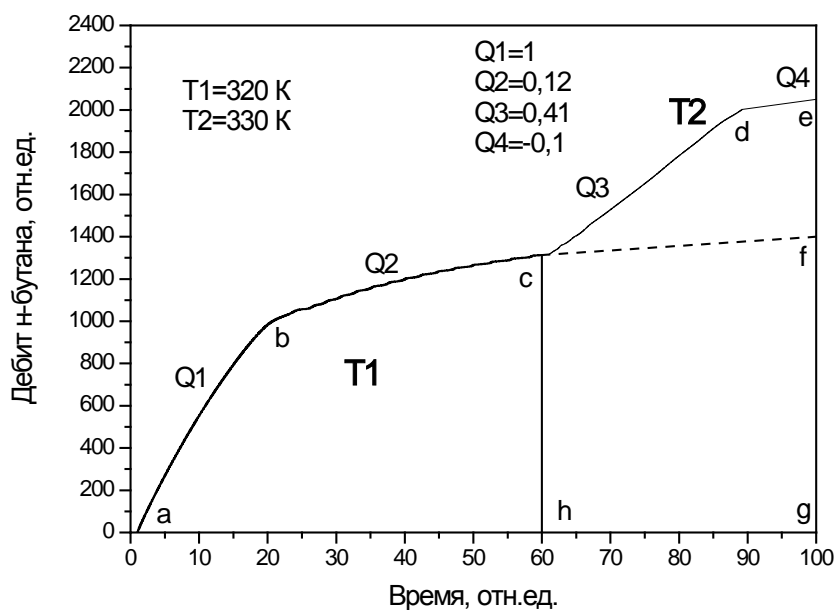


Рисунок 3.2 – Результаты расчетов

Если принять начальный выход (расход) высококипящего компонента Q_1 за 1, то в период истощения (участок кривой **bc**) выход н-бутана Q_2 составит 0,12. После увеличения температуры внутрипластовой системы на 10^0 C (точка **c** на кривой) выход н-бутана Q_3 увеличится до 0,41, а в период истощения (участок кривой **de**)– снизится до 0,1. Относительное увеличение дебита высококипящего углеводорода (отношение площади **cdef** к площади **cfgh**) составило 26 %.

Значительное увеличение выхода высококипящего компонента обусловлено действием трех факторов: увеличением концентрации н-бутана в газовой фазе (рисунок 3.1), уменьшением вязкости жидкой фазы и влагонасыщенности. Последние два фактора приводят к увеличению фазовых проницаемостей и расхода газовой фазы.

В результате термического воздействия на пласт изменяются условия фазового равновесия и часть высококипящих углеводородов из жидкой фазы переходит в газовую. Помимо роста концентрации высококипящего компонента в газовой фазе увеличиваются фазовые проницаемости.

3.2 Экспериментальное обоснование метода теплового воздействия

3.2.1 Методика экспериментов

Смесь метан–н-бутан готовилась в цилиндре высокого давления (ЦВД) при давлении 13 МПа, массовая концентрация метана составляла в среднем для разных экспериментов около 45%, Н-бутана – 55%. Температура термостатирования изменялась в диапазоне 290–350 К. Эти параметры обеспечивают нахождение смеси в ретроградной области фазовой диаграммы при проведении эксперимента. Экспериментальный участок (ЭУ) заполнялся промытым кварцевым песком фракции 0,09 – 0,125 мм. Измеренный коэффициент проницаемости участка составил $3,8 \cdot 10^{-11}$ м². После заполнения ЭУ смесью при давлении 12 МПа открывался кран на выходе ЭУ и в течение эксперимента поддерживался постоянный перепад давления на ЭУ. Давление на входе составляло для различных экспериментов 10–12 МПа, на выходе – 9–5 МПа. В ходе экспериментов измерялись также расход газовой фазы на выходе из ЭУ, температуры входящей и выходящей смеси, поле температур в термостате и давления в магистралях установки. Проводился отбор проб на хроматографический анализ состава исходной смеси и состава смеси на выходе из ЭУ в течение эксперимента.

Эксперименты по тепловому воздействию проводились по двум методикам – увеличивалась температура либо термостата, либо входящей смеси путем подогрева участка трубопровода перед входом в экспериментальный участок (ЭУ). В первом случае моделируется нагрев пласта в целом вместе с находящимся в нем флюидом, во втором – движение горячего конденсата в порах более холодного пласта.

3.2.2 Результаты экспериментов

Результаты экспериментов иллюстрируют рисунки 3.3 и 3.4.

В эксперименте давление на входе в ЭУ составляло 12 МПа, на выходе – 9,3 МПа, перепад давлений 2,7 МПа, исходная концентрация метана в смеси – 43% масс. После образования на 270-й секунде конденсатной пробки на 325-й секунде был включен обогреватель термостата. На рисунке представлены зависимости температуры наружной трубы обогревателя $T_{\text{обогр.}}$ и концентрации компонентов в смеси от времени. Через 150 с после включения обогревателя расход смеси и концентрация компонентов вернулись к исходным значениям.

При увеличении перепада давления на ЭУ и, соответственно, увеличении расхода время, необходимое для образования пробки, уменьшается и при перепаде давления 4 МПа составляет 110 секунд.

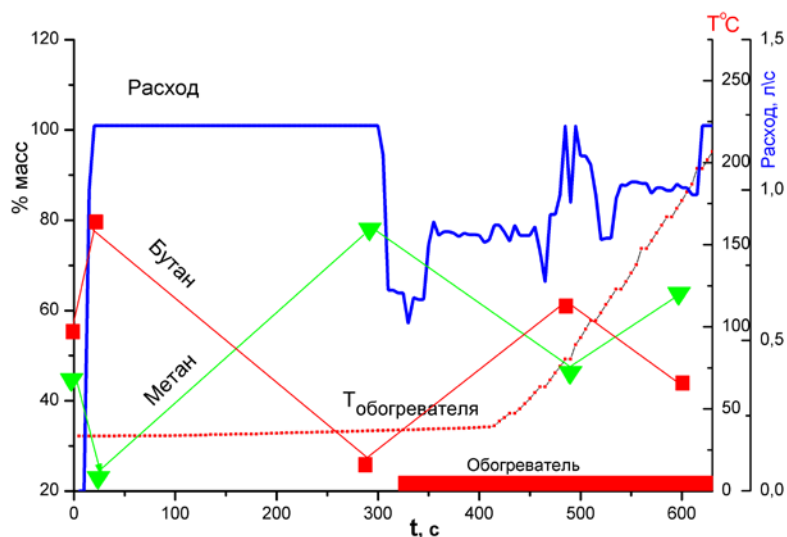


Рисунок 3.3 – Результаты эксперимента при повышении температуры термостата

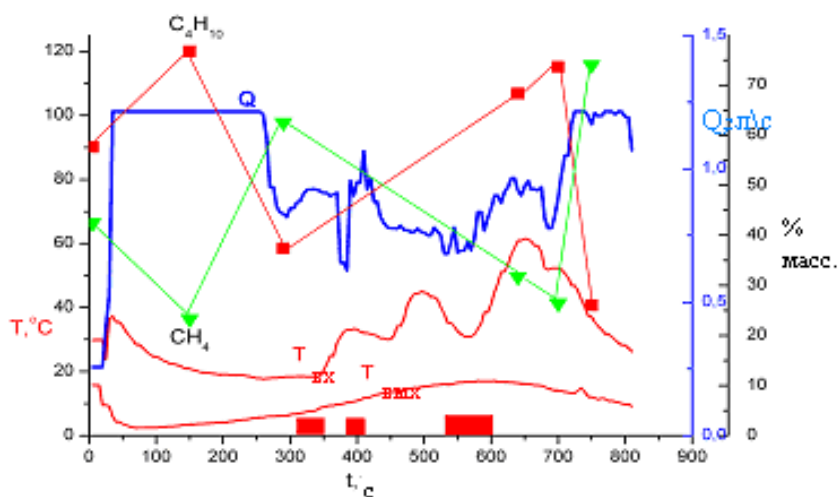


Рисунок 3.4 – Результаты эксперимента при повышении температуры входящей смеси

$T_{вх}, T_{вых}$ – температура входящей и выходящей смеси; Q – расход смеси;

██████████ – включен нагреватель входящей смеси

В следующей серии экспериментов (рисунок 3.4) контролировались температура входящей в ЭУ и выходящей из него смеси с помощью помещенных непосредственно в поток термопар. Зафиксировано снижение температуры смеси в процессе фильтрации через ЭУ. Аналогичное снижение температуры характерно для газового конденсата при фильтрации из глубины пласта в призабойную зону вблизи скважины [2]. После включения обогревателя произошло восстановление расхода и состава смеси при увеличении температуры смеси на 10–15 °С. Этот результат находится в согласии с данными, полученными в экспериментах со стационарным тепловым режимом. Установить порог температуры, при котором восстанавливается исходный расход, с большей точностью не удастся в связи с ограничениями по количеству исходной смеси.

Эксперимент длится 600–800 секунд и система за это время не успевает выйти на стационарный тепловой режим. Однако, с достаточной для практических расчетов точностью можно принять 10^0C как величину перегрева, необходимую для восстановления исходных значений состава и расхода исследуемого газоконденсата.

Результаты математического моделирования процесса с помощью программы PLAST представлены на рисунках 3.5 и 3.6. Исходные данные для расчета соответствуют условиям проведенных экспериментов.

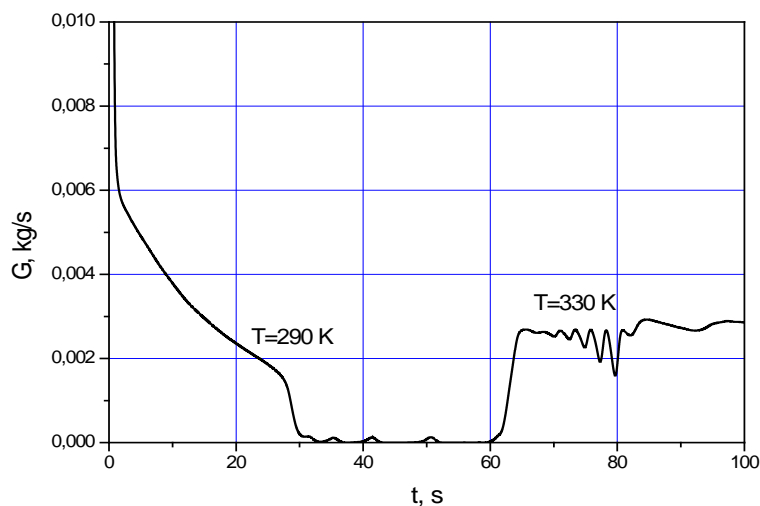


Рисунок 3.5 – Зависимость расхода смеси метан–н-бутан от времени

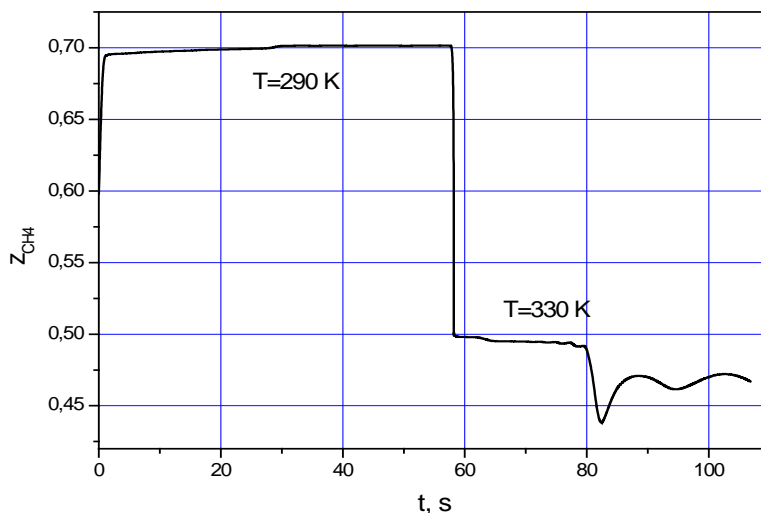


Рисунок 3.6 – Зависимость массовой доли метана на выходе из ЭУ от времени

Из результатов математического моделирования следует, что образование газоконденсатной пробки при температуре 330 К не происходит. При температуре 290 К в интервале времени между 25-й и 30-й секундами происходит резкое падение расхода смеси, массовая концентрация метана при этом составляет 70%. Повышение температуры до 330 К приводит к росту расхода и уменьшению концентрации метана до исходной.

Таким образом, имеется качественное соответствие результатов экспериментов и расчетных зависимостей, а для значений состава смеси – и количественное совпадение. Различие в величинах расхода и времени образования пробки объясняется непостоянством температуры смеси в процессе эксперимента и неопределенностью физических параметров, которые использованы для расчета фазовых проницаемостей.

3.3 Оценки параметров распространения тепловой волны

В промежуточном отчете приведены результаты расчетов по нагреву призабойной зоны пласта скважинным нагревателем с целью смещения фазового равновесия смеси в сторону большего содержания газовой фазы и увеличения фазовых проницаемостей. В настоящей работе дополнительно рассматривается вариант нагрева методом внутривпластового горения.

3.3.1 Нагрев скважинным нагревателем

Постановка задачи

Рассмотрим нагрев среды в условиях пласта нагревателем длины L , помещенным в скважину (рисунок 3.7).

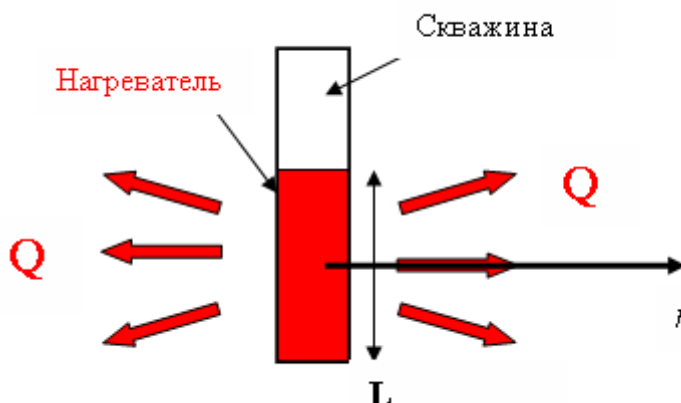


Рисунок 3.7 – Постановка задачи

Рассмотрим сферически симметричную задачу с постоянными свойствами среды. Граничные условия задаются следующим образом:

на бесконечности задается нулевой тепловой поток,

на расстоянии r_0 поддерживается постоянная температура T_1 .

Величина r_0 определяется из эквивалентной поверхности сферы

$$4\pi r_0^2 = 2\pi RL, \quad (1)$$

где R – радиус скважины.

Уравнение теплопроводности в сферической системе координат имеет вид

$$\frac{\partial T}{\partial t} - \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(kr^2 \frac{\partial T}{\partial r} \right) = 0 \quad (2)$$

где k – коэффициент температуропроводности, $k = \frac{\lambda}{c\rho}$, λ – эффективный коэффициент теплопроводности породы и газоконденсата (в дальнейшем смеси), ρ – плотность смеси, c – теплоемкость смеси. Уравнение (2) дополняется начальным и граничными условиями:

$$\begin{aligned} T(t=0, r) &= T_0, \\ T(t, r=r_0) &= T_1, \\ \frac{\partial T(t, r \rightarrow \infty)}{\partial r} &= 0. \end{aligned} \quad (3)$$

Результаты

При решении уравнения (2) задавались следующие значения параметров:

$$R = 0,16 \text{ м}, k = 2 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}, T_0 = 310 \text{ К}, T_1 = 1310 \text{ К}.$$

Определялось время прогрева пласта на расстоянии 7 м от скважины на 9 градусов. Зависимость времени прогрева пласта от длины нагревателя представлена на рисунке.3.8. При увеличении длины от 1 до 4 м время прогрева уменьшается от 100 до 60 суток. Дальнейшее увеличение длины нагревателя приводит только к небольшому уменьшению времени прогрева (кривая имеет асимптоту на уровне 50 суток).

Зависимость полезной мощности, обеспечивающей заданный уровень температуры и прогрев пласта, от длины нагревателя представлена на рисунке 3.9. Зависимость имеет линейный характер.

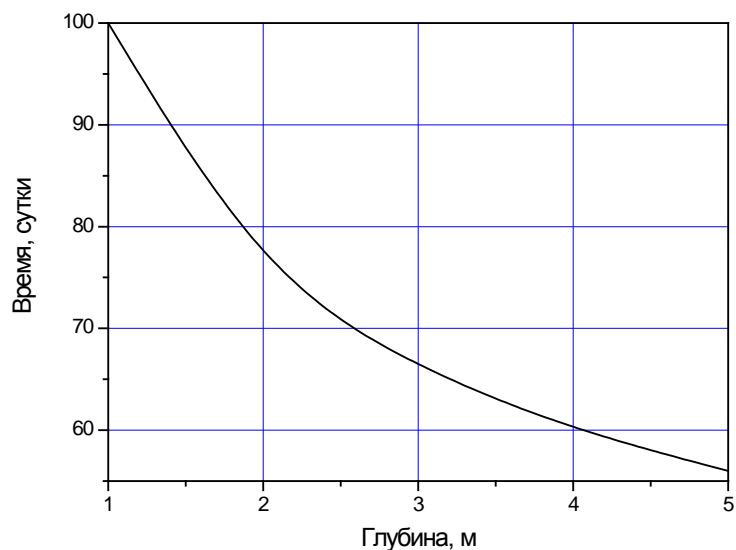


Рисунок 3.8 – Время прогрева пласта на расстоянии 7 м в зависимости от длины нагревателя

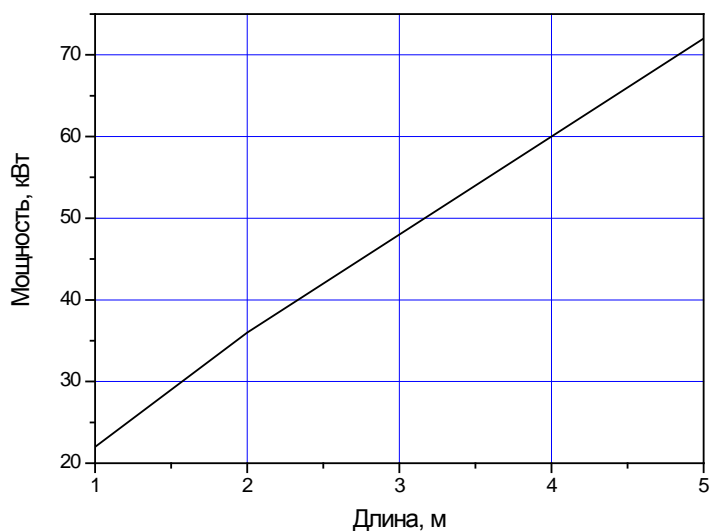


Рисунок. 3.9 – Зависимость мощности от длины нагревателя

Временные зависимости температуры пласта на расстоянии 7 м от скважины представлены на рисунке 3.10. Нагрев проводится до достижения $\Delta T = T - T_0 = 9$ град, затем выключается. При уменьшении ΔT ниже 9 град нагрев снова включается. Все кривые имеют периодический характер, отличающиеся цикличностью: 120/20 – кривая 3, 90/30 – кривая 2, 60/40 – кривая 1. В знаменателе – время нагрева в цикле, в числителе – время остывания. Уменьшение температуры за один цикл не превосходит одного градуса, но средняя температура на кривой 3 выше.

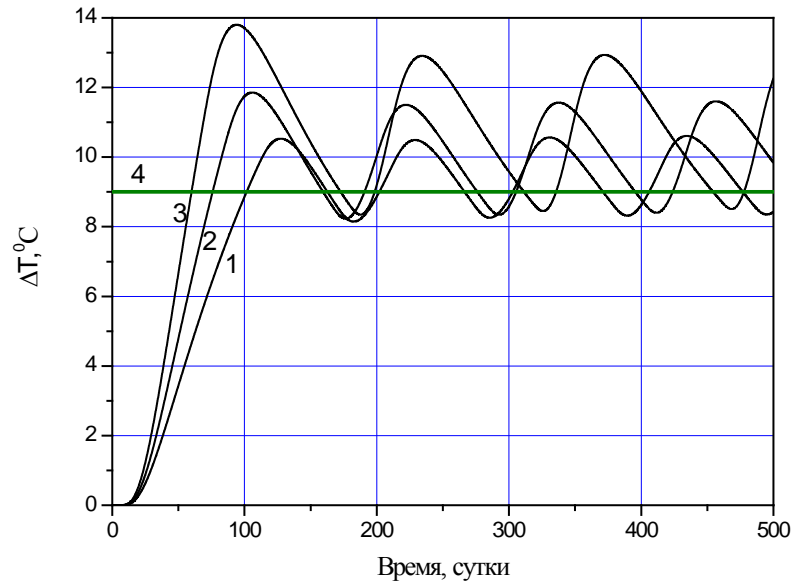


Рисунок 3.10 – Временные зависимости температуры пласта при различных длинах нагревателя: 1 – 1 м, 2 – 2 м, 3 – 4 м. Уровень 9 град – прямая 4

С учетом результатов, представленных на рисунках 3.7 и 3.10 можно построить зависимости дебита скважины от времени. Характерное время тепловых процессов t_T составляет 10^{-6} – 10^{-9} с в зависимости от принятой характерной длины. Характерное время t_G гидродинамических процессов лежит в пределах от 10^{-4} – 10^{-7} с для тех же характерных длин. Примем линейную зависимость расхода углеводорода от температуры. Зависимости дебита скважины от времени представлены на рисунке 3.11 в предположении $t_T = t_G$.

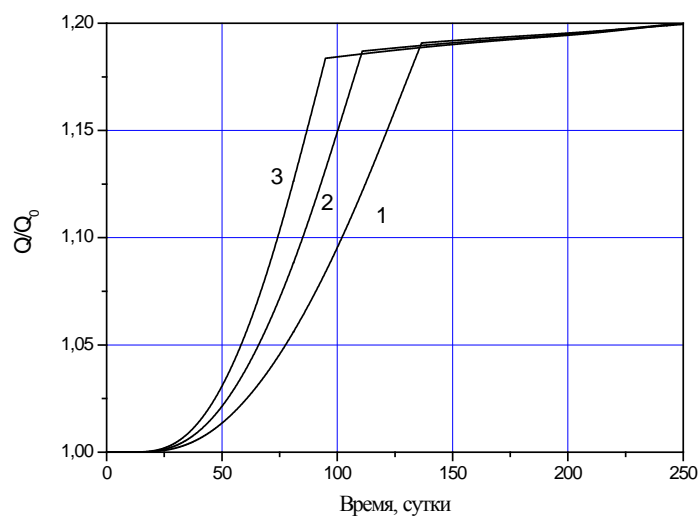


Рисунок 3.11 – Относительный выход углеводородов при различных длинах нагревателя
1 – 1 м, 2 – 2 м, 3 – 4 м

Относительное увеличение дебита углеводорода составляет 17 – 19%, что соответствует и предварительным оценкам, где рассматривалось скачкообразное увеличение температуры. Предполагалось, что во всех случаях время образования новой газоконденсатной пробки одинаково и масштабировалось в соответствии с данными предварительных расчетов. Использование больших мощностей (кривая 3) приводит к более быстрому выходу на новую температуру и более быстрому завершению процесса. Уменьшение характерного гидродинамического времени t_G будет приводить к растягиванию процесса во времени (аналогично уменьшению мощности – кривые 2 и 1).

3.3.2 Использование химического реагирования

Постановка задачи

Рассмотрим нагрев среды в условиях пласта за счет химической реакции части углеводородов с кислородом, закачиваемым в скважину (рисунок 3.12).

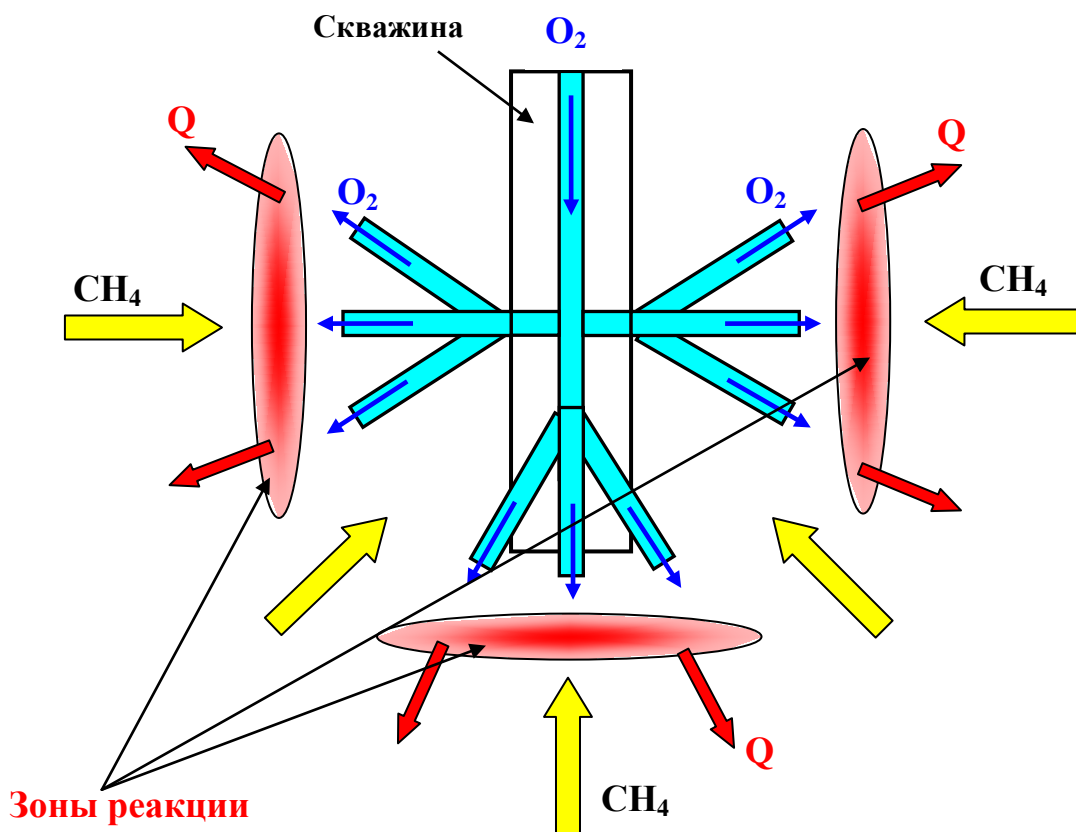


Рисунок 3.12 – Постановка задачи

Основные предположения:

Кислород подается на расстояние r_0 от скважины через эффективную поверхность S , доля которой составляет $\alpha = \frac{S}{4\pi r_0^2 m}$.

Топливо доставляется в зону реакции фильтрацией. Доля сгоревших углеводородов составляет α , дошедших до скважины – $(1 - \alpha)$.

Необходимое количество кислорода определяется из количества сгоревших углеводородов на расстоянии r_0 (положение фронта горения).

Выделяющееся тепло нагревает пласт.

Процесс описывается уравнением (2) с начальным и граничными условиями

$$\begin{aligned} T(t=0, r) &= T_0, \\ -\lambda \frac{\partial T(t, r=r_0)}{\partial r} &= q, \\ \frac{\partial T(t, r \rightarrow \infty)}{\partial r} &= 0. \end{aligned} \quad (11)$$

Тепловой поток определяется по формуле

$$q = \alpha m \rho U \Delta H, \quad (12)$$

где m – пористость, ρ – плотность топлива (углеводородов) в пласте, U – скорость фильтрации, ΔH – теплота сгорания.

Параметрами задачи являются α (доля активной площади) и r_0 (расстояние до фронта горения).

Результаты

В расчетах принимались следующие значения параметров:

$$m = 0.35, \rho = 150 \text{ кг/м}^3, U = 5 \cdot 10^{-5} \text{ м/с}, \Delta H = 40 \text{ МДж/кг}.$$

Зависимости времени прогрева пласта от расстояния до фронта горения при различных α представлены на рисунке 3.13. Из зависимостей следует, что при $\alpha = 0,1$ минимальное время прогрева составляет 80 суток при горении на расстоянии 0,6 м. Для $\alpha = 0,15$ временам прогрева менее 90 суток соответствуют расстояния от 0,45 м до фронта реакции, для $\alpha = 0,2$ времена прогрева менее 90 суток на расстояниях от 0,37 м.

Зависимости перепада температур от расстояния до фронта горения при различных α представлены на рисунке 3.14. Перепад температур $1000 \text{ }^\circ\text{C}$

- 1) при $\alpha = 0,1$ не достигается,
- 2) при $\alpha = 0,15$ достигается при $r_0 > 0,55$ м,
- 3) при $\alpha = 0,2$ достигается при $r_0 > 0,4$ м.

Зависимости расхода окислителя от расстояния до фронта горения при различных α представлены на рисунке 3.15.

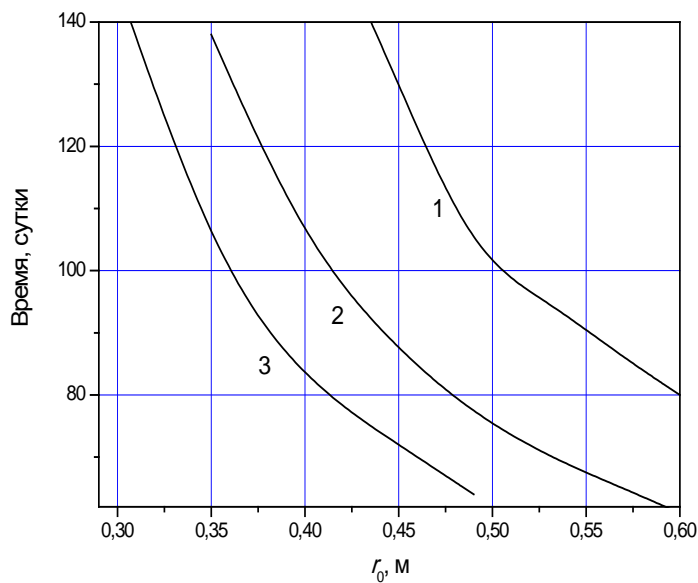


Рисунок 3.13 – Зависимость времени прогрева пласта на расстоянии 7 м от расстояния до фронта горения при различных α :

1 – $\alpha = 0,1$; 2 – $\alpha = 0,15$; 3 – $\alpha = 0,2$

Максимальный перепад давления для окислителя составляет около 10 атм при коэффициенте сопротивления 10^{11} , что соответствует коэффициенту проницаемости 10 Дарси.

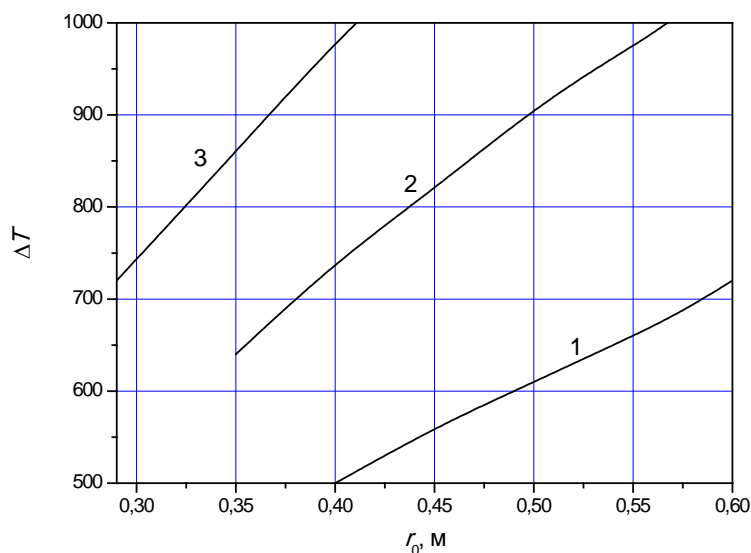


Рисунок 3.14 – Перепад температур на расстоянии 7 м в зависимости от расстояния до фронта горения при различных α :

1 – $\alpha = 0,1$; 2 – $\alpha = 0,15$; 3 – $\alpha = 0,2$

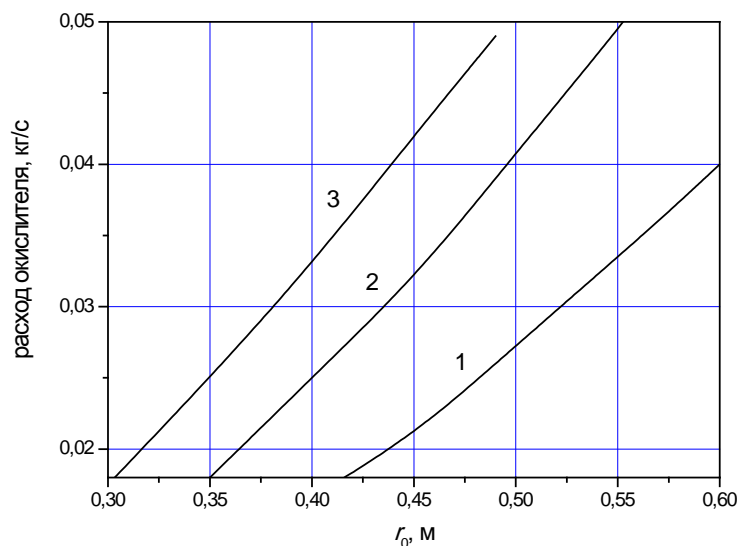


Рисунок 3.15 – Зависимости расхода окислителя от расстояния до фронта горения при различных α :

1 – $\alpha = 0,1$; 2 – $\alpha = 0,15$; 3 – $\alpha = 0,2$

Из анализа представленных зависимостей следует, что процессы нагрева пласта с использованием нагревателя и химического реагирования подобны.

На рисунке 3.16 представлены зависимости температуры от времени: 1 – модель с нагревателем ($L = 4$ м), 2 – модель с химическим реагированием ($r_0 = 0,56$ м). Относительное увеличение выхода углеводородов (рисунок 3.17) составляет 19 % при использовании нагревателя и 17 % – при химическом реагировании. Разница возникает за счет использования части углеводородов в качестве топлива во втором случае.

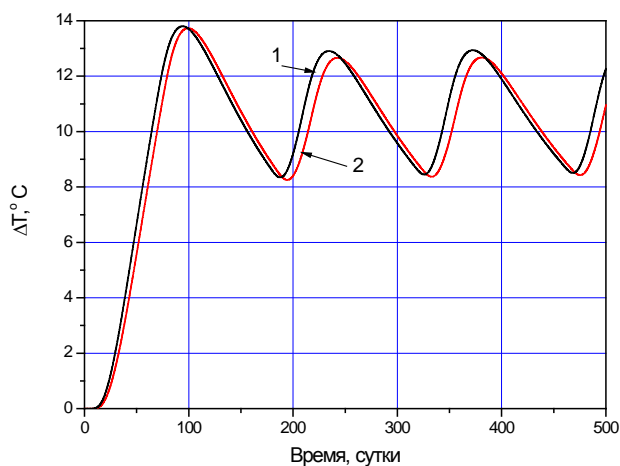


Рисунок 3.16 – Временные зависимости температуры:

1 – модель с нагревателем, 2 – модель с химическим реагированием

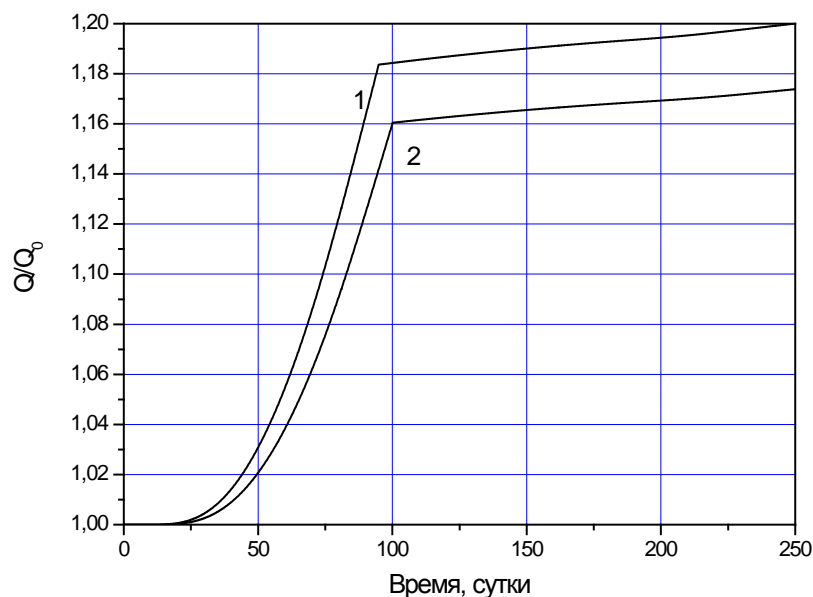


Рисунок 3.17 – Относительный выход углеводородов:

1 – модель с нагревателем, 2 – модель с химическим реагированием

Выводы

1. Показана принципиальная возможность повышения дебита скважины за счет нагрева пласта.
2. Рассмотрены два способа теплового воздействия:
 - А. Нагрев внешним нагревателем.
 - В. Использование тепла химической реакции за счет сжигания части углеводородов в пласте.
3. Получены основные характеристики процессов: времена нагрева, тепловые потоки
4. Результаты моделирования показали, что процессы нагрева пласта с использованием нагревателя и химического реагирования подобны.

3.3.3 Рекомендации по практическому использованию методов теплового воздействия

Программа работ по добыче конденсата с помощью одного из термических методов разрабатывается на основе данных о характеристиках месторождения и результатов экспериментов в лабораторных условиях с помощью эмпирических исследований или при использовании аналитических моделей, учитывающих распределение в пласте вытесняемых жидкостей и газов, а также термодинамические и гидродинамические свойства пласта.

Прогрев скважин – давно известный метод, широко использовавшийся, в частности, в СССР и Канаде для улучшения нефтеотдачи малодебитных скважин при разработке месторождений вязкой нефти или для очистки скважин от отложений парафинов [4]. Повышения дебита скважины при ее прогреве можно достичь установкой в скважине в интервале пласта электронагревателя. Если при прогреве призабойной зоны приходится останавливать добычу, длительность периода прогрева должна выбираться исходя из необходимости достижения максимальной добычи в каждом цикле прогрев-добыча.

При прогреве скважины нагревателем радиус воздействия и эффективность нагрева существенным образом зависят от передачи тепла теплопроводностью, протекающей достаточно медленно.

Для получения тепла непосредственно в призабойной зоне может быть использована способность углеводородов вступать в экзотермические реакции с кислородом. В основу метода внутрипластового горения положен процесс горения части нефти, содержащейся в пористой среде, для увеличения подвижности несгоревшей фракции. Идея этого метода возникла в 1923 г., а в период с 1950 по 1965 г. в США было осуществлено более ста крупных экспериментальных работ [5]. Подобные эксперименты проводились и на месторождениях Канады, Венесуэлы и Европы. Горение обычно инициируется с помощью специального оборудования, в дальнейшем процесс протекает в автономном режиме при постоянной подаче окислителя в скважину. Выделение тепловой энергии внутри пласта позволяет снизить тепловые потери в скважинах. Теплота горения используется для повышения температуры не только нефти, но и коллектора.

Применяется этот метод в основном на месторождениях тяжелой нефти. Однако, в ряде случаев этот метод используют и в качестве метода теплового воздействия на прискважинную область, причем периоды нефтедобычи чередуются с периодами горения, поддерживающегося при помощи нагнетания воздуха.

В 80-х годах объем добычи нефти методом внутрипластового горения в США составлял около 3% от всего объема нефти, полученной при использовании различных методов повышения нефтеотдачи пластов.

Возможность использования данного метода для повышения отдачи газоконденсатных пластов должна быть предметом специальных исследований, поскольку реализация внутрипластового горения значительно сложнее, чем прогрев внешними нагревателями. Однако, все работы по внутрипластовому горению, проводимые в промышленных масштабах, указывают на интерес к данной технологии. Одним из перспективных направлений исследований в этой области может быть процесс каталитического горения, в значительной мере снижающий риски, связанные с повышенными температурами при стандартном применении метода внутрипластового горения.

4 ОБОСНОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ УДАРНО-ВОЛНОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

Нефтяные компании проявляют все возрастающий интерес к воздействию на нефтяные пласты с помощью знакопеременных давлений различной частоты и интенсивности. Объектом воздействия могут быть как пласт в целом, так и призабойная зона пласта. Физика явлений, возникающих при таких воздействиях, изучена недостаточно. В случае снижения дебита газоконденсатной скважины объектом воздействия, очевидно, должна быть зона, расположенная в первых метрах от забоя, поскольку именно здесь происходит накопление ретроградного конденсата.

4.1 Физические основы метода

Одним из перспективных методов технологического воздействия на призабойную зону газоконденсатного пласта является использование для разрушения конденсатных пробок детонационных и ударных волн. Падение давления от внутрислоевого до давления на коллекторе происходит в достаточно узкой области (порядка нескольких метров). При снижении дебита для разрушения конденсатной пробки в зоне продуктивной скважины предлагается осуществлять кратковременное воздействие на углеводородную внутрислоевую систему детонационными волнами, которые генерируются химическим путем в устье скважины. Предварительные оценки в приближении одномерной задачи распада произвольного разрыва (плоская и цилиндрическая ударная волна) и модельной бинарной углеводородной смеси метан–н-бутан показали, что давление, создаваемое ударной волной, убывает обратно пропорционально расстоянию. При начальном десятикратном перепаде давления (80 МПа на фронте ударной волны) падение давления до 16 МПа происходит на расстояниях несколько десятков метров, что показывает принципиальную возможность использования воздействия пакетов импульсов детонационных волн на углеводородную систему с целью разрушения конденсатной пробки и возвращения системы в исходное однофазное состояние.

Предварительные оценки показали, что при кратковременном воздействии пакетами импульсов детонационных волн углеводородная система из состояния с практически нулевым дебитом газа снова возвращается в исходное однофазное состояние (рисунок 4.1), причем характерные времена воздействия на несколько порядков меньше, чем время образования конденсатной пробки.

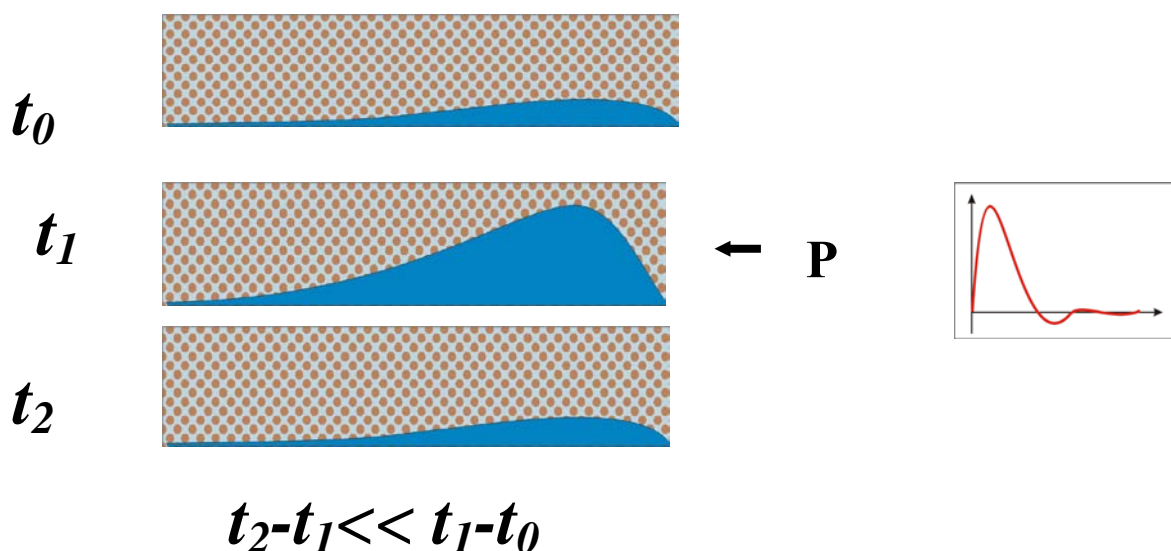


Рисунок 4.1 – Схема газодинамического воздействия

Источником импульсного воздействия на газоконденсатный слой может служить детонационная камера сгорания, генерирующая ударные волны различной интенсивности. Возможно использовать в качестве горючего углеводороды, которые могут добываться непосредственно в процессе эксплуатации скважины, а окислителя – кислород или воздух. В зависимости от интенсивности ударной волны заметное воздействие на газоконденсатную пробку будет наблюдаться предположительно на расстоянии 5-20 м от устья скважины, при этом температура пористой среды может повышаться на 15-30 градусов. Ожидается, что воздействие последующих ударных волн будет усиливаться, поэтому разрушение газоконденсатной пробки может достигаться как за счет интенсивности, так и количества генерируемых ударных волн.

4.2 Оценки параметров распространения ударной волны

4.2.1 Сферическая симметрия

Для оценок распространения ударной волны используем решение, полученное в [6]. Рассмотрим сферическую ударную волну большой мощности, возникшую в результате сильного взрыва, т. е. мгновенного выделения в некотором объеме большого количества энергии E . Газ, в котором волна распространяется, будем считать политропным.

Будем рассматривать волну на расстояниях, не слишком далеких от источника, в той области, где волна еще обладает большой интенсивностью. В то же время эти расстояния предполагаются

большими по сравнению с размерами источника: это дает возможность считать, что выделение энергии E произошло в одной точке (в начале координат).

Большая интенсивность ударной волны означает, что скачок давления в ней очень велик. Мы будем считать, что давление p_2 позади разрыва настолько велико по сравнению с давлением p_1 невозмущенного газа впереди него, что

$$\frac{p_2}{p_1} \gg \frac{\gamma + 1}{\gamma - 1}. \quad (13)$$

Это дает возможность везде пренебрегать p_1 по сравнению с p_2 , причем отношение плотностей будет равно своему предельному значению

$$\frac{\rho_2}{\rho_1} = \frac{\gamma + 1}{\gamma - 1}. \quad (14)$$

Таким образом, вся картина движения газа будет определяться всего двумя параметрами: начальной плотностью газа ρ_1 и выделяющейся при взрыве энергией E . Из этих параметров и двух независимых переменных – времени t и координаты r (расстояние от центра) – можно составить всего одну независимую безразмерную переменную

$$r \left(\frac{\rho_1}{Et^2} \right)^{1/5}. \quad (15)$$

В результате все движение будет автомодельным.

Прежде всего, можно утверждать, что положение самой ударной волны в каждый момент времени должно соответствовать определенному постоянному значению указанной безразмерной комбинации. Тогда уравнение перемещения ударной волны со временем

$$R = \beta \left(\frac{Et^2}{\rho_1} \right)^{1/5}. \quad (16)$$

где R – расстояние волны от центра, β – численная постоянная, зависящая от показателя адиабаты.

Скорость распространения ударной волны (скорость относительно невозмущенного газа, т. е. относительно неподвижной системы координат)

$$u_1 = \frac{dR}{dt} = \frac{2\beta E^{1/5}}{5\rho_1^{1/5} t^{3/5}}. \quad (17)$$

Давление p_1 , плотность ρ_2 и скорость $v_2 = u_2 - u_1$ газа (относительно неподвижной системы координат) на «задней» стороне разрыва могут быть выражены через u_1

$$\begin{aligned} v_2 &= \frac{2}{\gamma + 1}, \\ p_2 &= \frac{2}{\gamma + 1} \rho_1 u_1^2. \end{aligned} \quad (18)$$

Были проведены расчеты с использованием предложенной выше модели. Так как пористость модельного участка составляет 0,35, можно предположить, что треть энергии взрыва диссипирует в газовой фазе, остальная – в твердой. В качестве исходных параметров принимались следующие значения: начальное давление $p_1=60$ атм, пороговое давление $p_0=100$ атм, энергия взрыва $E_0 = 200$ кДж.

Зависимость перемещения ударной волны от времени представлена на рисунке 4.2, зависимость относительного давления ударной волны от времени – на рисунке 4.3. Как видно из рисунка 4.3, резкое падение уровня давления за времена порядка 0,0015 с до порогового давления $p_0=100$ атм, соответствующего критическому давлению фазовой диаграммы, происходит на расстоянии 6 м от источника волн, что соответствует характерному размеру зоны депрессии газоконденсатной скважины (см. также рисунок 4.4).

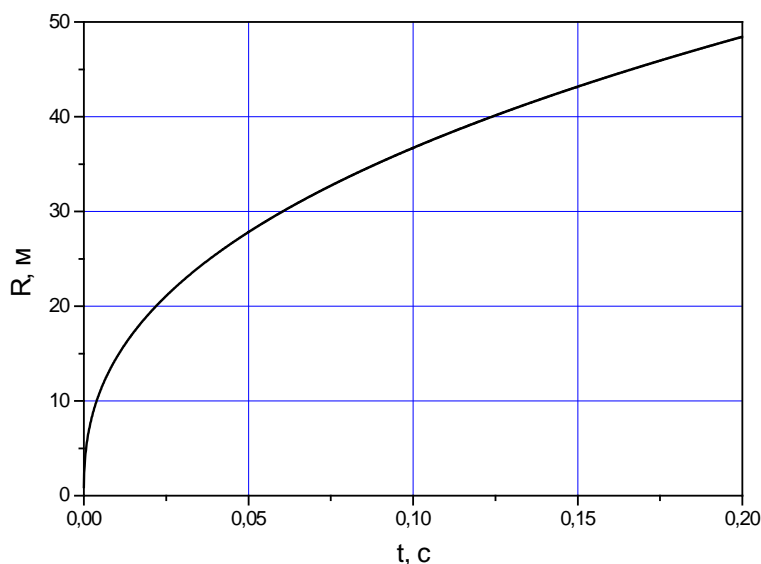


Рисунок 4.2 – Зависимость перемещения ударной волны от времени ($E_0 = 200$ кДж)

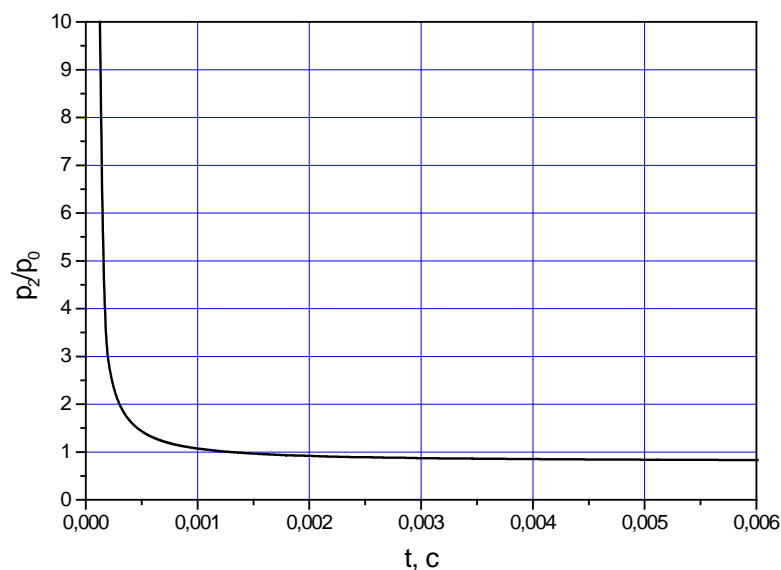


Рисунок 4.3 – Зависимость относительного давления на фронте ударной волны от времени ($p_0 = 100$ атм)

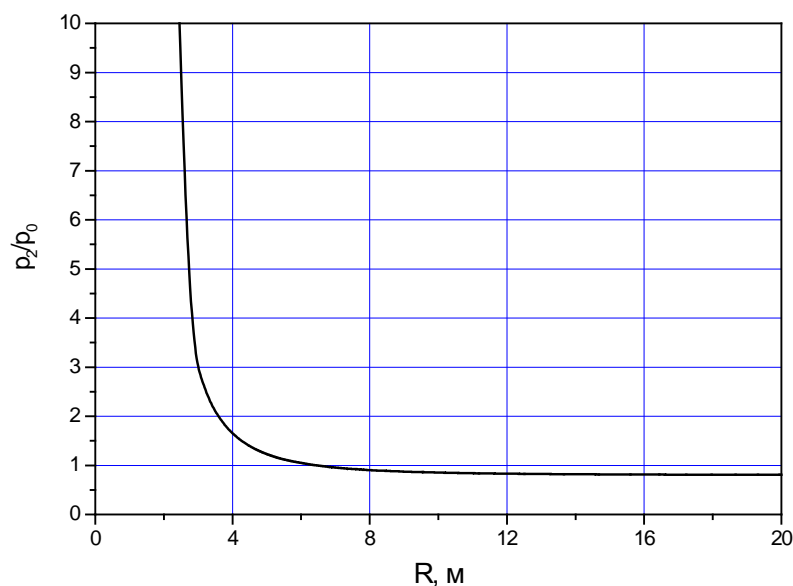


Рисунок 4.4 – Зависимость относительного давления на фронте ударной волны от перемещения ударной волны ($p_0 = 100$ атм)

Зависимость перемещения ударной волны (достижение уровня $p_0=100$ атм) от относительной интенсивности взрыва представлена на рисунке 4.5. Рассматривался интервал относительной интенсивности взрыва от 0,5 до 5 по отношению к базовой энергии взрыва $E_0=200$ кДж. Увеличение энергии взрыва в 10 раз приводит к увеличению прохождения ударной волны (падения давления до порогового значения) расстояния от 5 до 11 м, т.е. примерно в два раза.

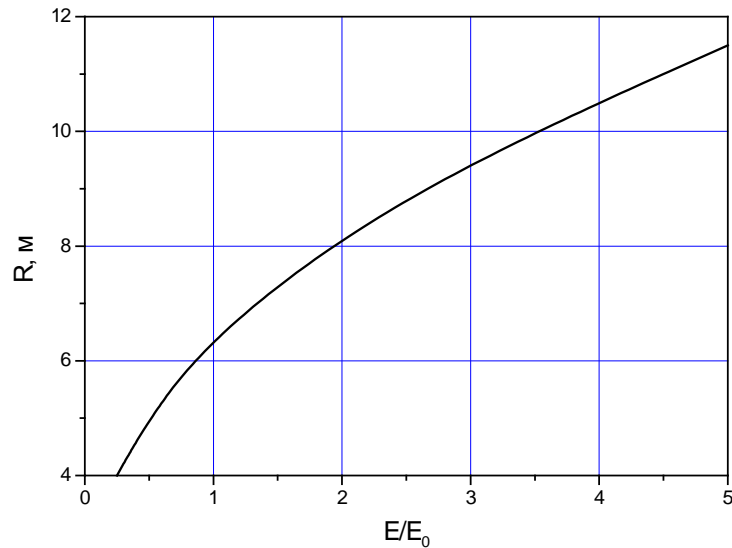


Рисунок 4.5 – Зависимость перемещения ударной волны (уровня $p_0 = 100$ атм) от относительной интенсивности взрыва ($E_0 = 200$ кДж)

На рисунке 4.6 представлена зависимость времени достижения уровня $p_0 = 100$ атм от относительной интенсивности взрыва ($E_0 = 200$ кДж), из которой можно получить частоту непрерывной генерации ударных волн в среде (рисунок 4.7). Как видно из рисунка, необходимая частота следования импульсов составляет порядка нескольких десятков Гц. Увеличение мощности заряда в 10 раз приводит примерно к трехкратному уменьшению частоты.

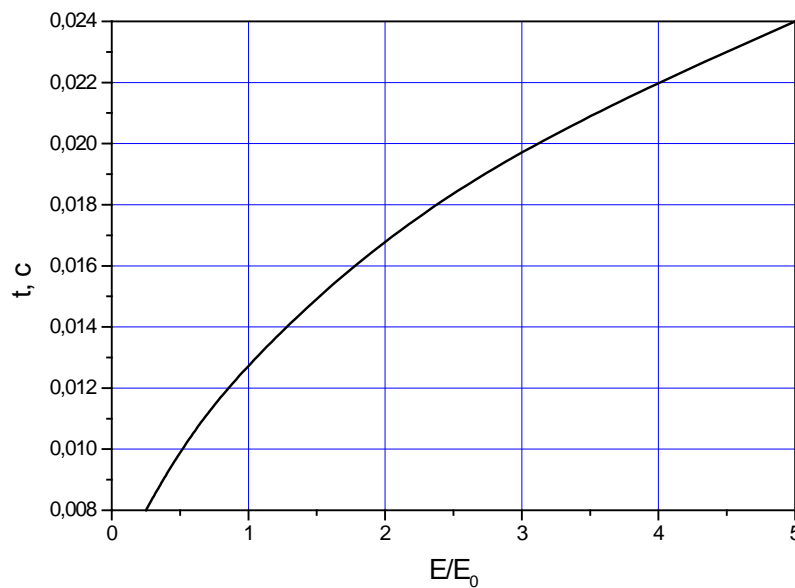


Рисунок 4.6 – Зависимость времени достижения уровня $p_0 = 100$ атм от относительной интенсивности взрыва ($E_0 = 200$ кДж)

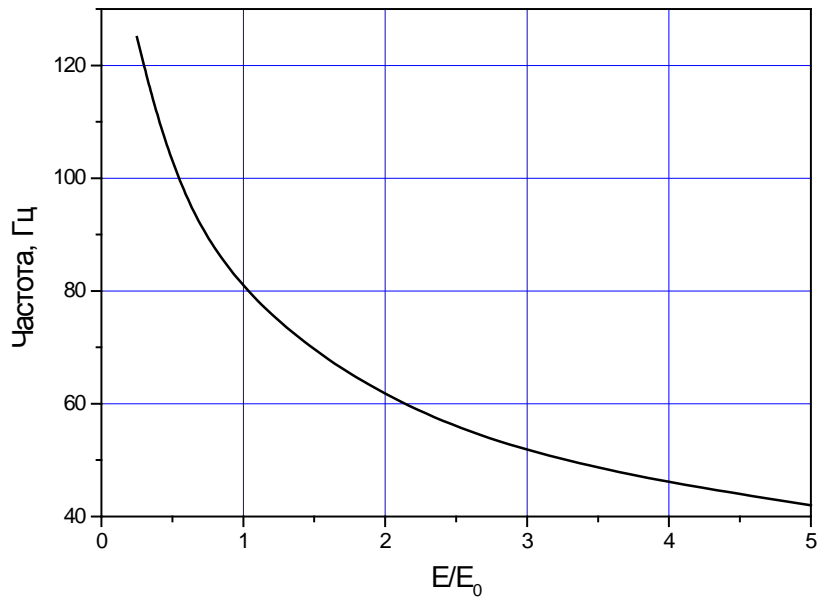


Рисунок 4.7 - Зависимость частоты ударных волн от относительной интенсивности взрыва ($E_0 = 200$ кДж)

4.2.2 Цилиндрическая симметрия (плоский случай)

В этом случае задача также является автомодельной и будет определяться двумя переменными: начальной плотностью газа ρ_1 и выделяющейся при взрыве энергией с линейной плотностью ε . Связь с полной энергией E определится формулой

$$E = \int \varepsilon dh, \quad (7)$$

где h – высота рассматриваемого цилиндра.

Из этих параметров и двух независимых переменных – времени t и координаты r (расстояние от центра) – можно составить всего одну независимую безразмерную переменную

$$r \left(\frac{\rho_1}{\varepsilon t^2} \right)^{1/4}. \quad (8)$$

Уравнение перемещения ударной волны со временем

$$R = \beta \left(\frac{\varepsilon t^2}{\rho_1} \right)^{1/4}, \quad (9)$$

где R – расстояние фронта ударной волны от центра, β – численная постоянная.

Скорость распространения ударной волны (скорость относительно невозмущенного газа, т. е. относительно неподвижной системы координат)

$$u_1 = \frac{dR}{dt} = \frac{\beta \varepsilon^{1/4}}{2\rho_1^{1/4} t^{1/2}}. \quad (10)$$

Скорость и давление определяются по формуле (6).

При вычислениях по формулам (7) – (10) и (6) проинтегрируем (10) по бесконечно малой высоте. В этом случае линейная плотность представляется дельта-функцией. Остальные параметры – как и в случае сферической системы.

На рисунке 4.8 представлена зависимость перемещения ударной волны от времени. По сравнению со сферической симметрией (рисунок 4.2) величина перемещения увеличилась в 1,5 раза. Зависимость относительного давления ударной волны от времени представлена на рисунке 4.9. Как видно из рисунка падение уровня давления до порогового происходит за времена порядка 0,0018 с, что соответствует расстояниям порядка 6,5 м (см. рисунок 4.10).

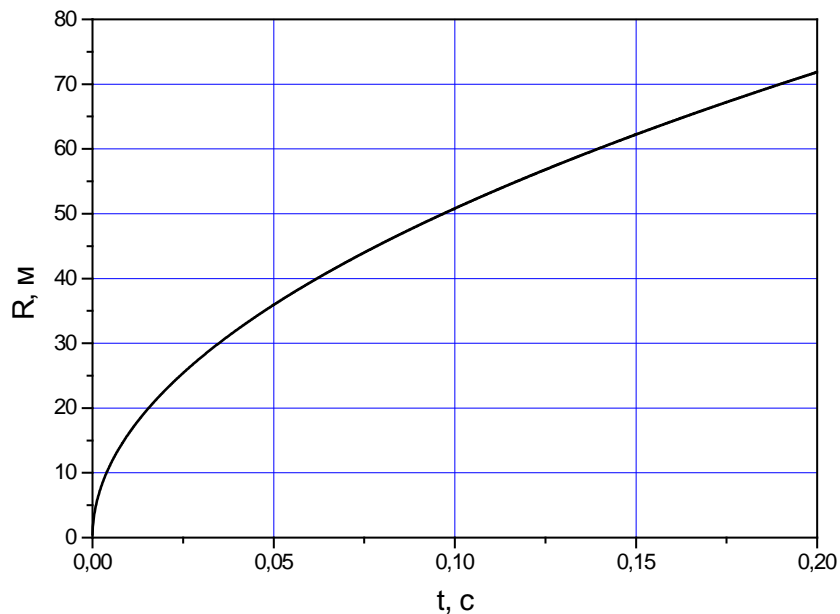


Рисунок 4.8 - Зависимость перемещения фронта ударной волны от времени ($E_0 = 200$ кДж)

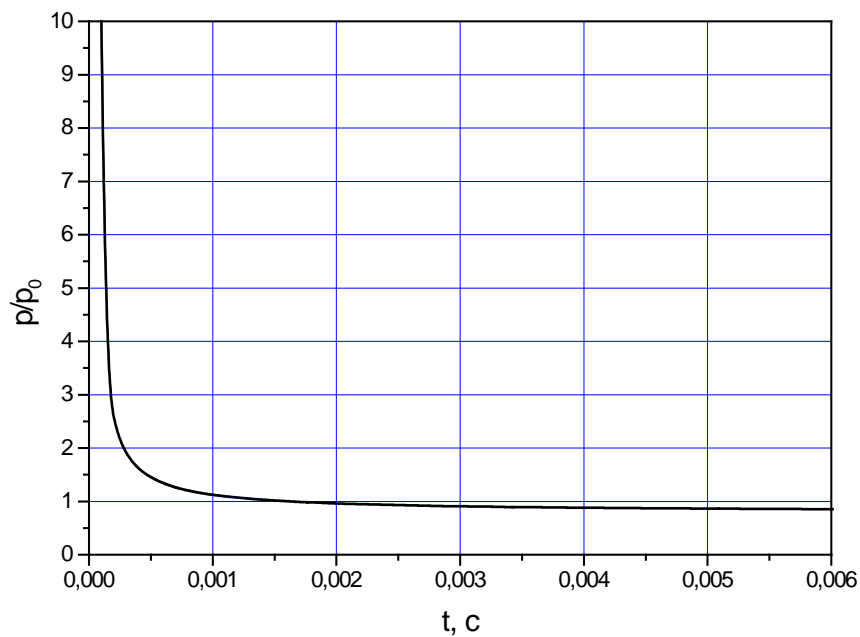


Рисунок 4.9 - Зависимость относительного давления на фронте ударной волны от времени ($p_0 = 100$ атм)

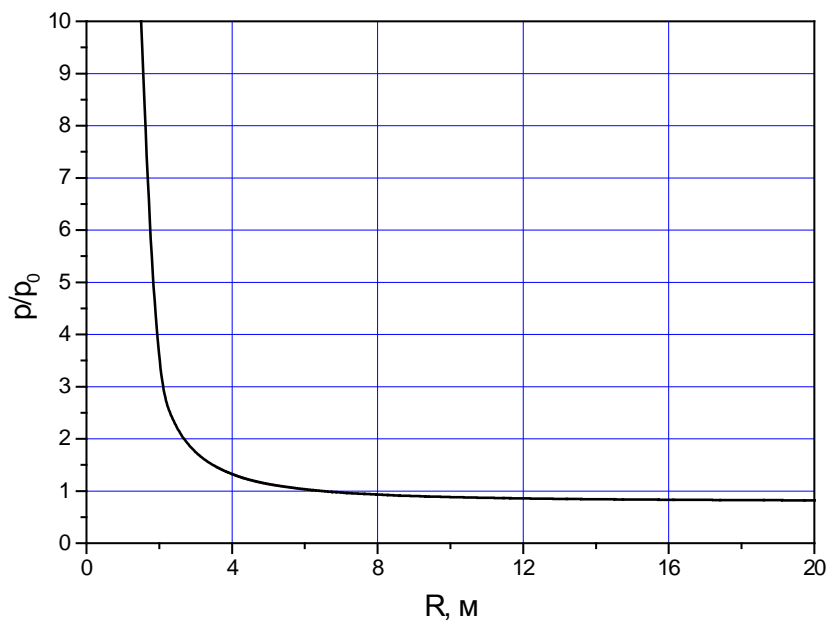


Рисунок 4.10 - Зависимость относительного давления на фронте ударной волны от перемещения ударной волны ($p_0 = 100$ атм)

Зависимость перемещения ударной волны (достижение уровня $p_0=100$ атм) от относительной интенсивности взрыва представлена на рисунке 4.11. Увеличение энергии взрыва в 10 раз приводит к увеличению прохождения ударной волны (падения давления до порогового значения) расстояния от 4 до 14 м, т.е. примерно в три раза.

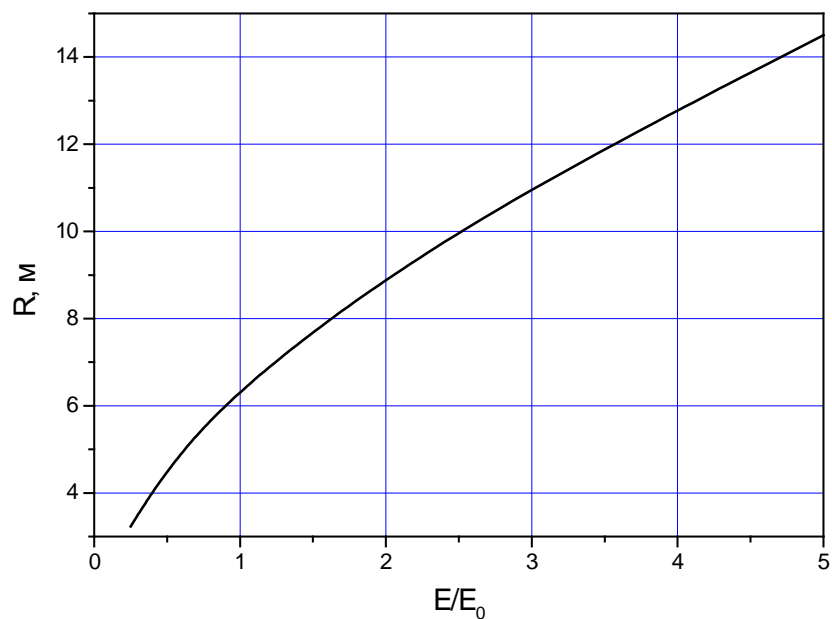


Рисунок 4.11 - Зависимость перемещения фронта ударной волны (уровня $p_0 = 100$ атм) от относительной интенсивности взрыва ($E_0 = 200$ кДж)

На рисунке 4.12 представлена зависимость времени достижения уровня $p_0 = 100$ атм от относительной интенсивности взрыва ($E_0 = 200$ кДж), из которой можно получить частоту непрерывной генерации ударных волн в среде (рисунок 4.13). Необходимая частота следования импульсов составляет несколько десятков Гц. Увеличение мощности заряда в 10 раз приводит примерно к трехкратному уменьшению частоты.

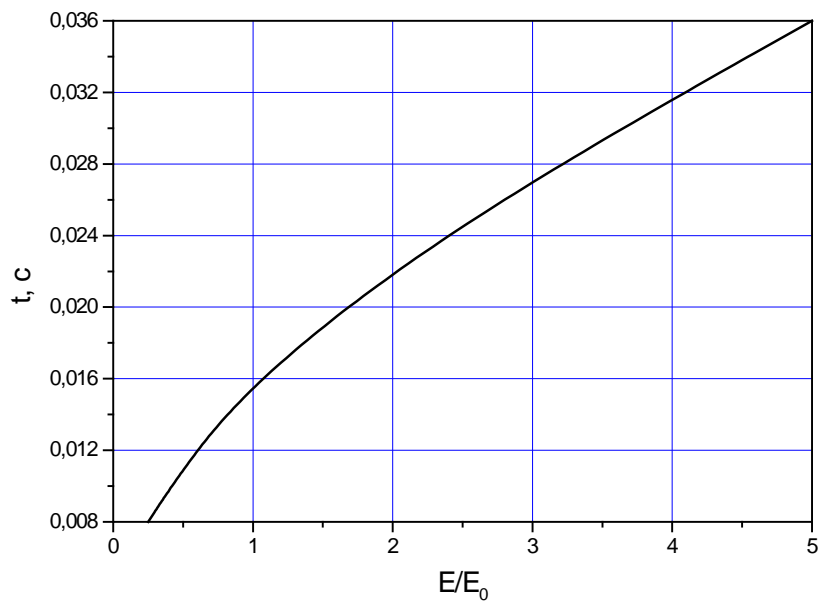


Рисунок 4.12 - Зависимость времени достижения уровня $p_0 = 100$ атм от относительной интенсивности взрыва ($E_0 = 200$ кДж)

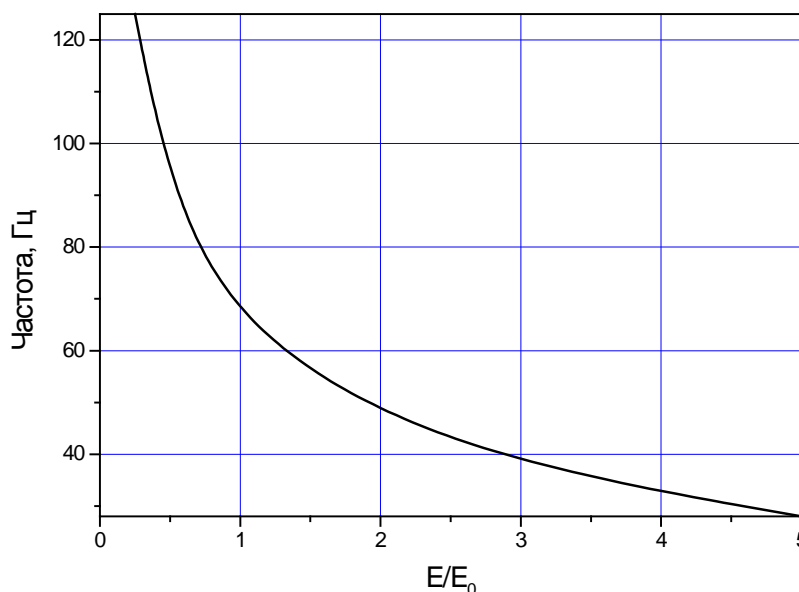


Рисунок 4.13 - Зависимость частоты ударных волн от относительной интенсивности взрыва ($E_0 = 200$ кДж)

4.2.3 Выводы

Получены основные характеристики ударных волн от точечного источника в двух приближениях: сферическая и цилиндрическая геометрия. Количественные оценки для этих приближений отличаются в 1,5 раза. Увеличение интенсивности ударной волны в 5 раз (по сравнению с базовым режимом) приводит к увеличению длины прохождения ударной волны от 4,5 до 11 м в случае сферической симметрии и от 6,5 до 15 м – в плоском случае. Частоты составляют порядка 50 Гц.

4.3 Экспериментальное обоснование метода ударно-волнового воздействия

4.3.1 Пульсационное воздействие

С целью проверки возможности применения метода для разрушения конденсатной пробки было проведено физическое моделирование пульсационного воздействия на газовый конденсат на модели пласта.

Эксперименты проводились на установке «Пласт», газовый конденсат моделировался бинарной смесью метан–н-бутан с содержанием бутана 55% масс. Давление смеси на входе в экспериментальный участок (ЭУ) составляло 12 МПа, на выходе – 8 МПа. С целью имитации пульсационного воздействия давление на входе в ЭУ изменялось с периодом около 40 секунд в

диапазоне от 12-ти до 10-ти МПа, с тем, чтобы при нижнем давлении смесь попадала в ретроградную область (рисунок 4.14).

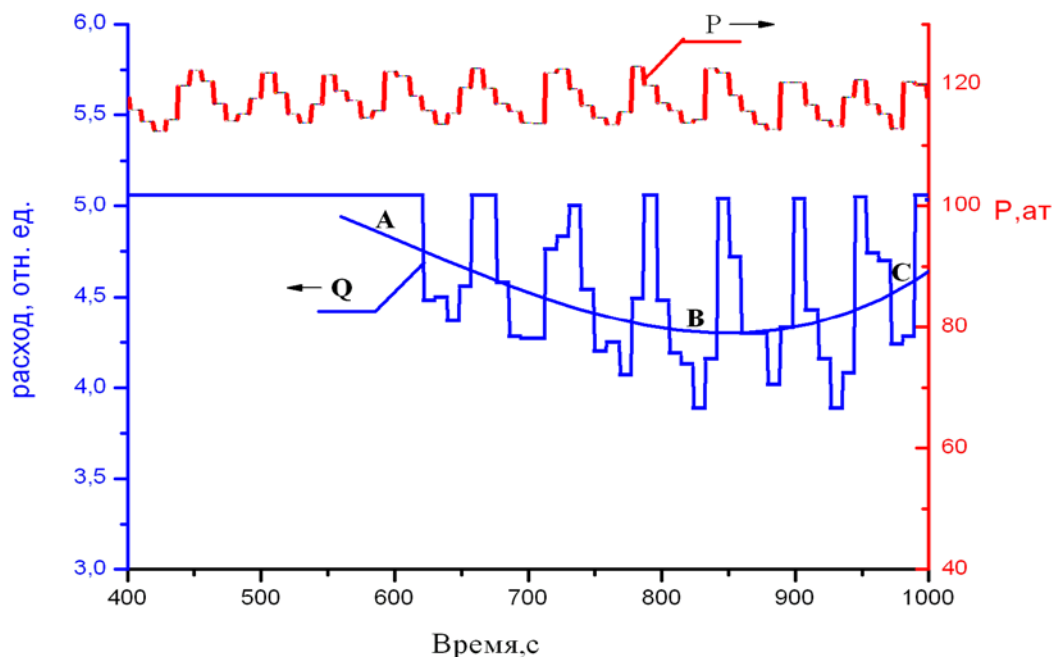


Рисунок 4.14 – Пульсационное воздействие

Мгновенный расход смеси изменялся в течении эксперимента синхронно с изменением давления, однако, осредненный во времени расход (кривая **ABC**) во временном диапазон 600-850 с падает и содержание н-бутана в пробе, взятой на выходе из ЭУ, также уменьшается. В дальнейшем расход вновь увеличивается практически до исходного и также восстанавливается близкий к исходному состав смеси. Такое изменения расхода и состава смеси свидетельствуют о том, что после образования конденсатных пробок в ЭУ происходит их разрушение в результате периодического изменения давления на входном участке.

4.3.2 Детонационная камера сгорания как источник импульсного воздействия

Осуществлять кратковременное воздействие на углеводородную внутрипластовую систему возможно детонационными волнами, которые генерируются химическим путем в устье скважины. Источником импульсного воздействия на газоконденсатный слой может служить детонационная камера сгорания (ДКС), генерирующая ударные волны различной интенсивности. Эксперименты с

использованием ДКС проводились на установке «Пласт» с целью исследования возможности единичных волн или пакетов детонационных волн проходить достаточно глубоко в пористую среду пласта.

Для проведения экспериментов был произведен монтаж комплексной установки «детонационная камера сгорания – ПЛАСТ» и проведены предварительные эксперименты по импульсному воздействию на газоконденсатную систему на стенде. Схема установки представлена на рисунке 4.15.

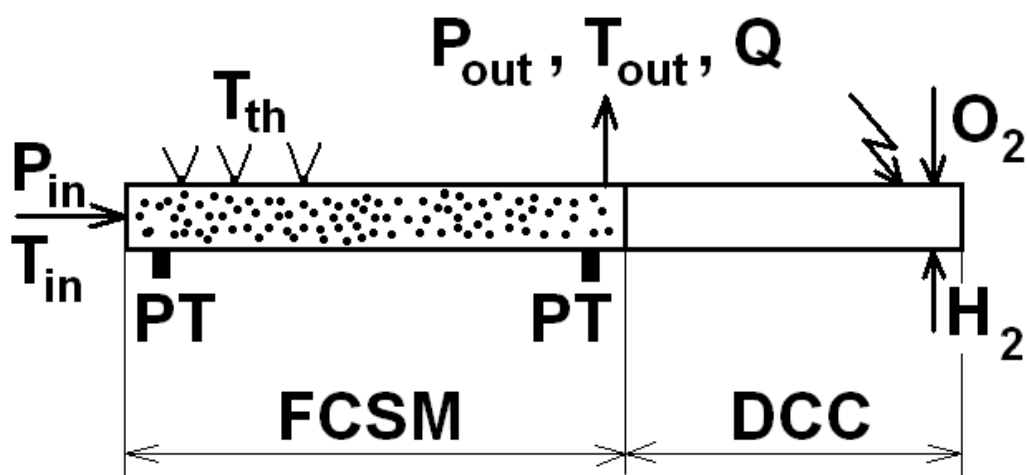


Рисунок 4.15 – Схема эксперимента по газодинамическому воздействию на модель пласта:

FCSM–экспериментальный участок (ЭУ); DCC–детонационная камера; PT– датчики импульсного давления; P_{IN} , P_{OUT} – датчики давления смеси на входе и выходе ЭУ; T_{IN} , T_{OUT} , T_{TH} – датчики температуры на входе и выходе ЭУ и температуры термостата

На предварительной стадии были проведены следующие работы :

-Изготовление и сборка модернизируемой установки для получения детонационных волн высокой интенсивности в газовых смесях с повышенным начальным давлением.

-Получение детонационных волн в водород-кислородной и метан-кислородной смесях при повышенном начальном давлении в цилиндрической камере сгорания с отдельной подачей реагентов.

-Исследование параметров детонационных волн высокой интенсивности в водород-кислородной и метан-кислородной смесях при повышенном начальном давлении. Рассмотрение возможности перехода к пульсирующей детонации, возможности получения серии детонационных волн высокой интенсивности.

Исследования проводились на установке, принципиальная схема которой изображена на рисунке 4.16.

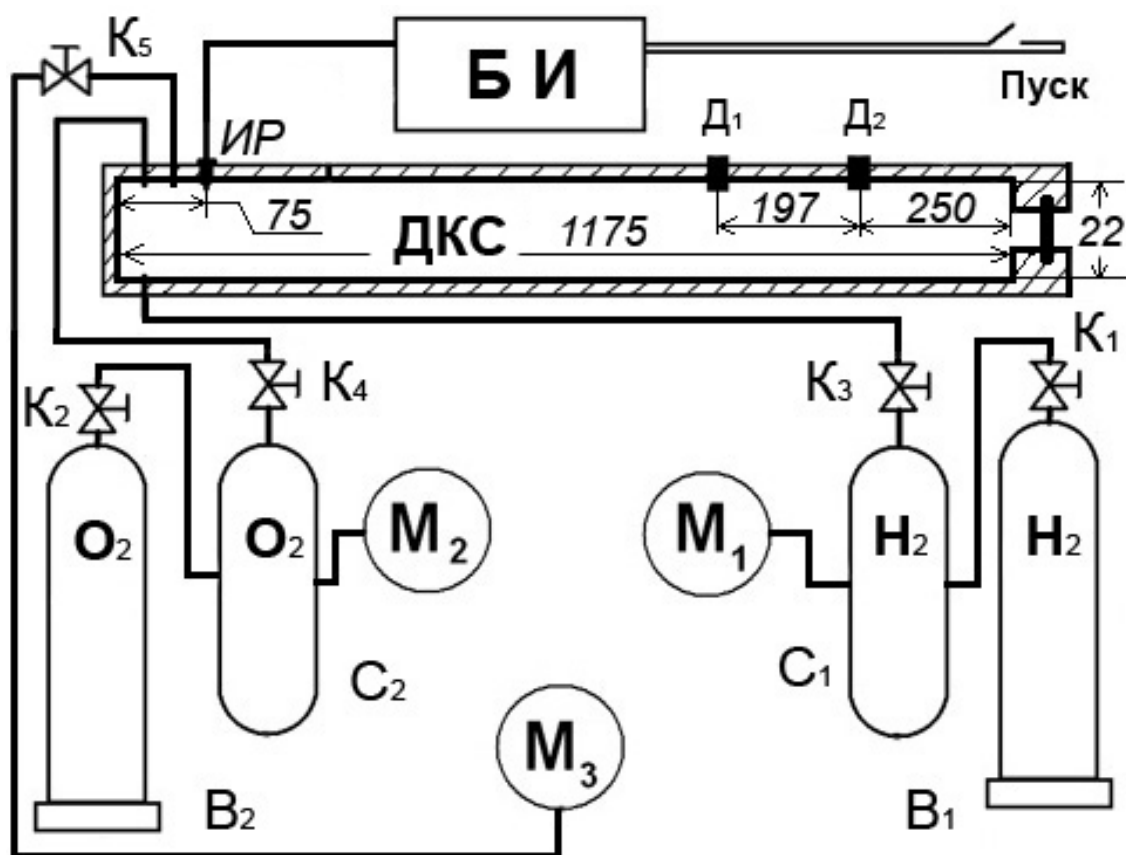


Рисунок 4.16 – Схема экспериментальной установки (все размеры в мм):

ДКС – детонационная камера сгорания; ИР – искровой разрядник; БИ – блок инициирования; С1, С2 – буферные емкости; В1, В2 – баллоны с реагентами; Д1, Д2 – датчики давления; Пуск – кнопка включения разряда; К1, К2, К3, К4, К5 – краны; М1, М2, М3 – манометры

Исследования проводились в водород-кислородной и метан-кислородной смесях. Подача реагентов осуществлялась отдельно, и горючая смесь образовывалась внутри камеры. Заполнение ДКС горючей смесью происходило следующим образом: из соответствующих баллонов В₁ и В₂ с помощью кранов К₁ и К₂ наполнялись мерные сосуды С₁ и С₂ до расчетного давления, которое регистрировалось манометрами М₁ и М₂. После закрытия кранов К₁ и К₂ одновременно открывались краны К₃ и К₄, так, что за равные промежутки времени давление в мерном сосуде с горючим и сосуде с кислородом снижалось соответствующим образом для получения стехиометрической смеси. Одновременное открытие кранов К₃ и К₄ обеспечивало равномерное перемешивание компонентов детонационной смеси внутри трубы и отменяло необходимость предварительного приготовления смеси, что способствовало повышению безопасности работы. Давление в ДКС регистрировалось манометром М₃ при открытом кране К₅. При достижении необходимого давления в камере сгорания, краны К₃, К₄ и К₅ закрывались, и подавалось напряжение на автомобильную свечу.

Основным элементом экспериментальной установки являлась ДКС.

Длина ДКС составляла 3000 мм, а внутренний диаметр – 18 мм (рисунок 4.17). Автомобильная свеча, служившая для поджига горючей смеси, располагалась на расстоянии 64 мм от закрытого конца трубы.

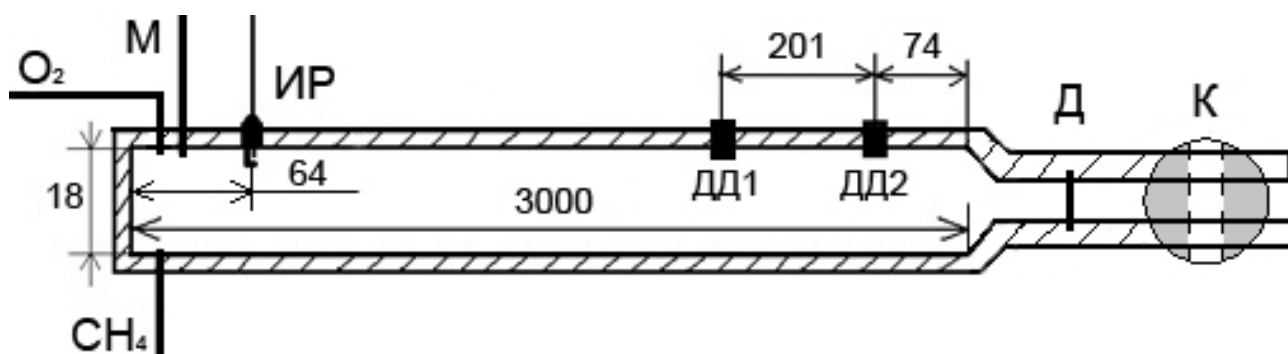


Рисунок 4.17 – Ударная труба 3000 мм:

O₂, CH₄, М – трубки к буферным емкостям с кислородом и метаном и манометру соответственно; ДД1, ДД2 – датчики давления; Д – диафрагма; К – шаровой кран

Регистрация давления осуществлялась с помощью двух датчиков давления (ДД1, ДД2, рисунок 4.17), расположенных на расстоянии 201 мм друг от друга и 74 мм от сужения трубы. Сигналы от датчиков регистрировались и записывались осциллографом Tektronix TDS3014В.

Для того, чтобы использовать ДКС для генерации детонационных волн совместно с фильтрационным стендом «Пласт», после диафрагмы (Д) располагался шаровой кран (К), дополнительно усиленный, чтобы выдерживать прохождение детонационной волны высокой интенсивности. Наличие такого шарового крана позволит при монтаже ударной трубы на стенд «Пласт» менять диафрагму, сохраняя герметичность экспериментального участка стенда (рисунок 4.18). Давление на выходе ЭУ стенда «Пласт» составляет 0,1 – 1,2 МПа. В закрытом состоянии кран (К) выдерживает давление несколько десятков атмосфер.

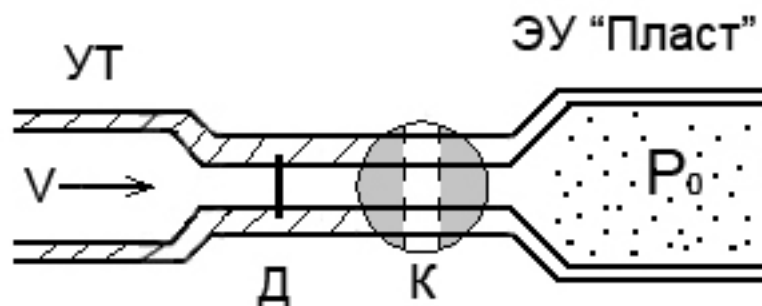


Рисунок 4.18 – Схема соединения ударной трубы со стендом «Пласт»:

УТ – ударная труба; Д – диафрагма; К – шаровой кран; ЭУ «Пласт» – экспериментальный участок стенда «Пласт»

В момент замены диафрагмы кран закрывается, и секция с диафрагмой (Д) может быть безопасно демонтирована с ударной трубы для замены диафрагмы. После этого детонационная камера снова наполняется горючей смесью. Перед подачей напряжения на искровой разрядник кран К снова открывается, и детонационная волна после разрушения диафрагмы беспрепятственно может пройти через него в стенд «Пласт».

Проведена серия экспериментов по исследованию влияния ударных волн на газоконденсатный слой одиночными импульсами. На стенде «Пласт» создавалось давление около 120 атм и открывался шаровой кран. В детонационную камеру сгорания (ДКС), отделяющуюся от стенда «Пласт» металлической диафрагмой (рисунок 4.17), подавались метан и кислород до достижения давления 9 атм. ДКС представляла собой трубу диаметром 18 мм и длиной 3 м, которая заполнялась стехиометрической метано-воздушной смесью. Внутренний объем ДКС составлял $763 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3$. На долю метана приходится третья часть этого объема, т.е. $254 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3$. При начальном давлении смеси $P_0 = 10$ атм за один цикл работы ДКС расходуется $2,54 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$ метана. За один цикл выделяется энергия, равная $E = 93$ кДж. При начальном давлении $P_0 = 9$ атм $E = 84$ кДж, а при $P_0 = 11$ атм $E = 102$ кДж.

Для заполнения ДКС компонентами топлива применялся пульт управления (рисунок 4.19), который включал в себя три манометра M_1, M_2, M_3 , семь кранов $K_1 - K_7$ и две бустерные емкости B_1 и B_2 . Вначале от стандартных баллонов (объемом 40 л., давление до 150 атм.) путем открытия кранов K_1 и K_2 бустерные емкости наполнялись кислородом и метаном до давления 1,4 МПа. Краны K_1 и K_2 закрывались. Открывался кран K_7 , который соединял манометр M_2 с ДКС. По этому манометру контролировалось давление в ДКС. Краны K_5 и K_6 предварительно регулировались так, что при открытых кранах K_3 и K_4 в ДКС поступали кислород и метан в стехиометрическом соотношении. Открывались одновременно краны K_3 и K_4 и происходило заполнение ДКС горючей смесью. По достижении заданного уровня начального давления горючей смеси в ДКС краны K_3, K_4 и K_7 закрывались.

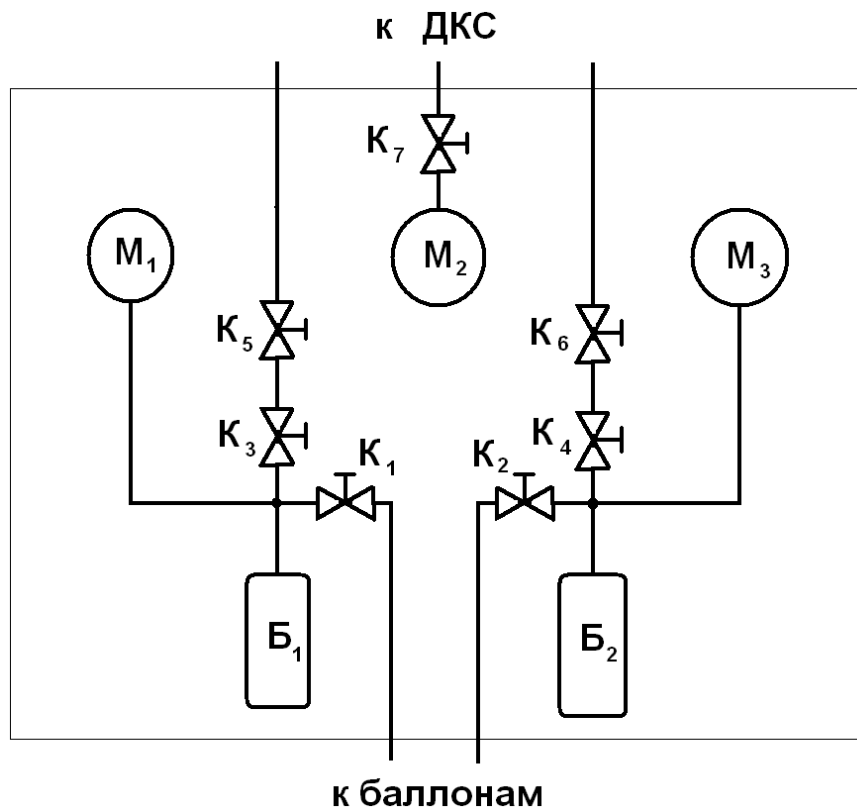


Рисунок 4.19 – Пульт управления расходами:

$K_1 - K_7$ – газовые краны, B_1, B_2 – бустерные емкости, M_1, M_2 – манометры.

В результате смешения компонентов топлива образовывалась детонационноспособная смесь, которая поджигалась искрой. Горение переходило в детонацию, параметры которой регистрировали датчики давления, установленные перед диафрагмой. Скорость распространения детонационной волны составляла 2200 м/с. В районе первого датчика давление составляло 272 атм (рисунок 4.20), а в районе 2-го датчика – 300 атм

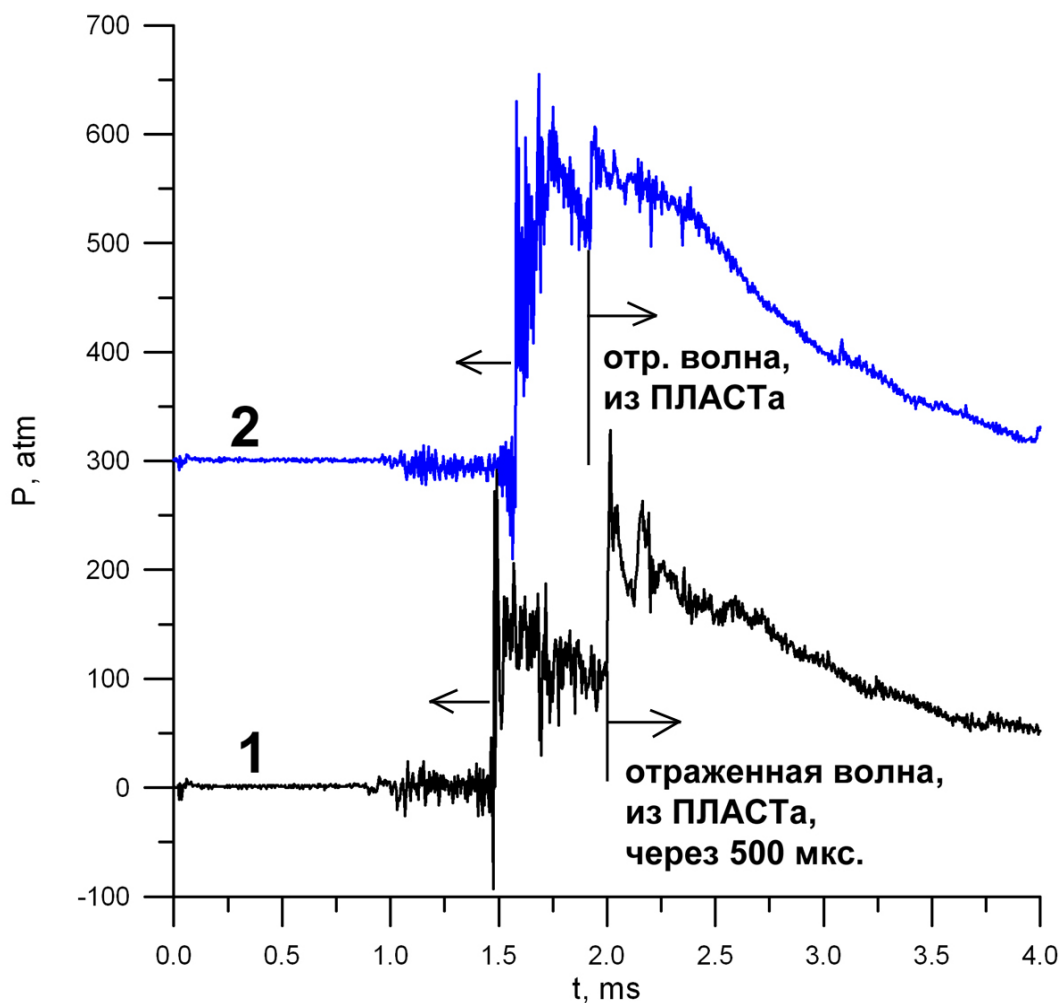


Рисунок 4.20 – Осциллограмма детонации в ДКС с начальным давлением 12 атм:
 1 – осциллограмма с датчика давления ДД1, 2 – осциллограмма с датчика давления ДД2

Происходит разрушение диафрагмы на входе в установку «Пласт», датчик давления фиксирует ударную волну, которая повышает давление со 120 атм до 257 атм (рисунок 4.21). Установленный датчик давления не чувствует статического давления, поэтому осциллограмма показывает превышение над уровнем 120 атм.

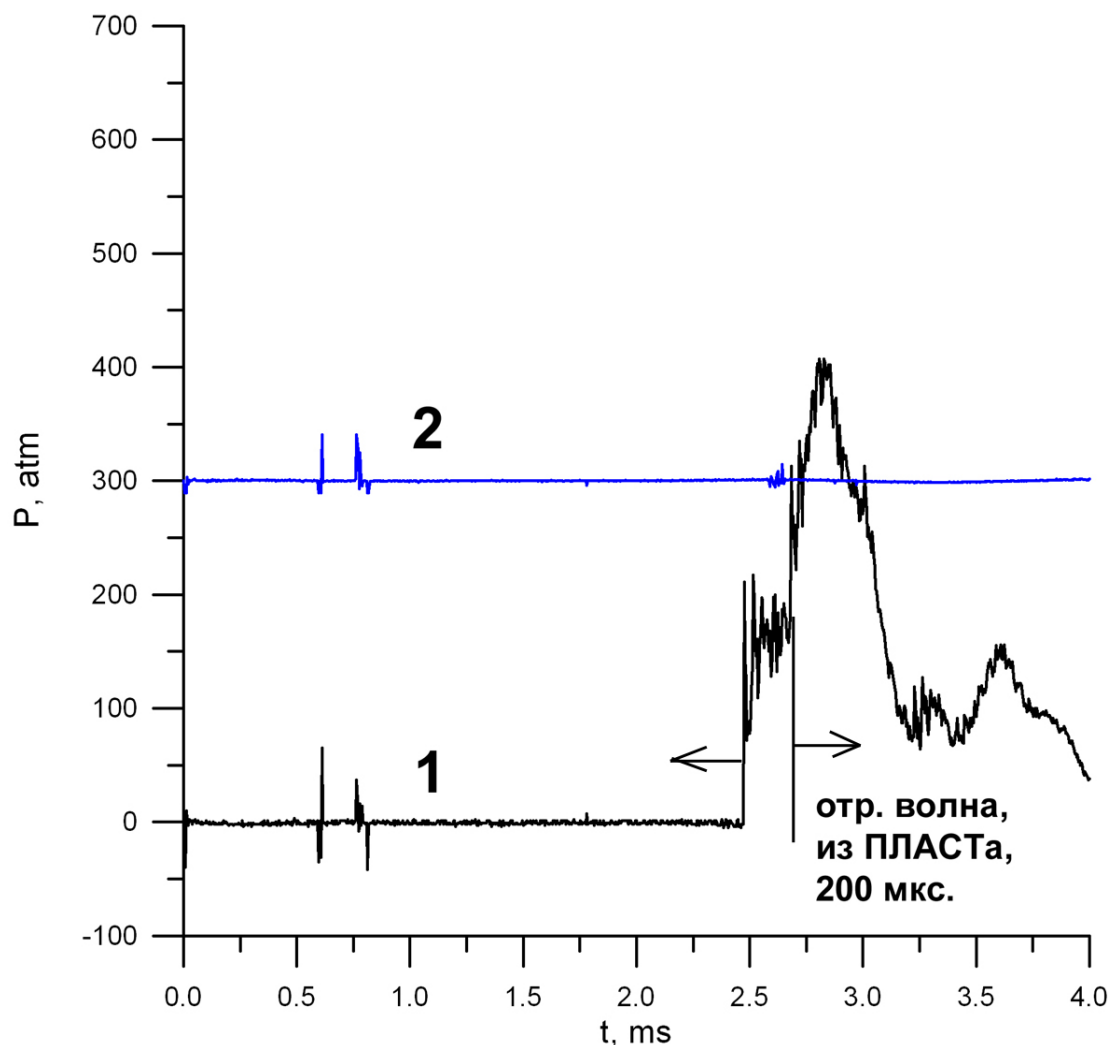


Рисунок 4.21 – Осциллограмма детонации в стенде ПЛАСТ с начальным давлением 120 атм:
 1 – осциллограмма с датчика давления, установленного на входе в «Пласт», 2 – осциллограмма с датчика давления, установленного на выходе из стенда «Пласт»

В дальнейшем, при своем движении ударная волна встречается с пористой набивкой из кварцевого песка, в результате чего происходит отражение ударной волны, что и фиксирует датчик давления как вторичное повышение давления до 457 атм, которое достигается через 392 мкс после прихода в это место ударной волны. Отраженная ударная волна движется в сторону ДКС и последовательно фиксируется датчиками, установленными на ней. При этом как первый, так и второй датчики показывают уровень давления в отраженной волне, равный 330 атм. Вследствие того, что переходник, соединяющий установку «Пласт» с ДКС, имеет уступы, на осциллограммах давления можно видеть систему переотраженных волн. То, что это отраженная волна, которая движется вглубь ДКС, можно судить исходя из того, что вначале она приходит на датчик, установленный ближе к диафрагме, а затем на датчик, установленный дальше.

При распространении ударной волны по пористой набивке происходит ее ослабление. Датчик давления, расположенный с другой стороны трубы, заполненной кварцевым песком, показывает возрастание давления на ~6 атм. Средняя скорость движения ударной волны в экспериментальном участке составляла около 700 м/с.

При увеличении начального давления горючей смеси до 11 атм интенсивность ударной волны возросла и составляла на входе в установку «Пласт» 330 атм. Через 370 мкс давление повышалось до 560 атм за счет отражения ударной волны от пористой преграды в виде кварцевого песка.

Выводы

Проведенные исследования показали возможность создания импульсных воздействий на газоконденсатную пробку. Давление на выходном участке модели пласта повышается более, чем два раза, со 120 до 272 атм. Имеется возможность путем увеличения начального давления горючей смеси усилить это воздействие. В газоконденсатной пробке интенсивность этого воздействия заметно уменьшается.

4.3.3 Рекомендации

С учетом большого положительного опыта, накопленного при применении волновых и импульсных воздействий для повышения проницаемости нефтяных пластов, можно ожидать, что метод ударно-волнового воздействия может быть реализован на практике для разрушения газоконденсатной пробки.

Проведение работ на реальной скважине требует постановки ОКР по существенной модификации ДКС. Выходной диаметр ДКС необходимо увеличить, что влечет за собой изменение конструкции, т.е. применение форкамеры. Требуется разработать диафрагменный узел, способный самостоятельно заменить диафрагму, например, по методу лентопротяжного механизма, или применять быстроходные отсечные клапаны (подобно применяемым в авиации). Необходимо разработать электронный блок задержек для согласования времени срабатывания диафрагменного узла или клапана с моментом заполнения горючей смесью и поджигом.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Настоящий отчет отражает результаты работ по госконтракту № 02.515.11.5039 от 14 июня 2007 г., конечной целью которого является создание научно-технического задела по новым методам повышения конденсатоотдачи. На втором этапе решались следующие задачи:

1. Внесение доработок в математическую модель по результатам экспериментальных исследований.

2. Подготовка рекомендаций по практическому использованию разрабатываемой технологии.

3. Разработка рекомендаций для постановки ОКР по определенным в рамках данного проекта параметрам оптимального воздействия на газоконденсатные пробки в ретроградной области.

В настоящем отчете приведены результаты экспериментов по тепловому и ударно-волновому методам воздействия на модельную газоконденсатную пробку.

С помощью доработанной математической модели и результатов экспериментов получены предварительные результаты, необходимые для определения параметров оптимального воздействия на газоконденсатные пробки в ретроградной области.

Рассмотрена методология выбора оптимального метода воздействия на газоконденсатную пробку и приводятся рекомендации для постановки ОКР по разрабатываемым технологиям.

Из результатов физического и математического моделирования теплового и ударно-волнового воздействия на газоконденсатную пробку можно сделать вывод о возможности применения этих методов на практике с ожидаемым увеличением коэффициента конденсатоотдачи на 15-20%.

Необходимым условием для практического использования данных методов является проведение более детальных исследований и опытно-конструкторских работ на их базе.

Список использованных источников

1. Р.И. Вяхирев, А.И. Гриценко, Р.М. Тер-Саркисов. Разработка и эксплуатация газовых месторождений. – М.: Недра, 2002. – 880 с.
2. Брусиловский А.И. Многокомпонентная фильтрация газоконденсатных систем в глубоководных залежах // OIL AND GAS GEOLOGY. 1997. N.7. P. 31-38.
3. Руководство по восстановлению продуктивности газоконденсатных скважин/ А.И. Гриценко и др. – М.: ВНИИГАЗ, 1995. – 65 с.
4. Ж. Бурже, П. Сурио, М. Комбарну. Термические методы повышения нефтеотдачи пластов. – М.: Недра, 1989. 422 с.
5. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Гидродинамика. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. 736 с.