

ДУРКИН СЕРГЕЙ МИХАЙЛОВИЧ

УДК 622.276.023.62:519.86

Д 84

**МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СКВАЖИНЫ, ДРЕНИРУЮЩЕЙ
ТРЕЩИНОВАТО-ПОРИСТЫЙ КОЛЛЕКТОР**

Специальность 25.00.17 –

Разработка и эксплуатация нефтяных и газовых месторождений

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Ухта – 2014

Диссертация выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Ухтинский государственный технический университет» на кафедре «Разработка и эксплуатация нефтяных и газовых месторождений и подземной гидромеханики»

Научный руководитель:

Доктор технических наук, доцент
Назаров Андрей Владимирович

Официальные оппоненты:

Доктор технических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории повышения компонентоотдачи Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт проблем нефти и газа (ИПНГ РАН)
Индрупский Илья Михайлович

Кандидат технических наук, начальник отдела по научному и техническому сопровождению комплексного освоения месторождений полуострова Ямал и прилегающих акваторий (филиал ООО «Газпром ВНИИГАЗ» в г. Салехард)
Юнусов Ринат Юрисович

Ведущая организация:

Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Российский государственный университет нефти и газа имени И.М. Губкина»

Защита состоится «05» июня 2014 г. в 10⁰⁰ на заседании диссертационного совета Д 212.291.01 в Ухтинском государственном техническом университете по адресу: 169300, Республика Коми, г. Ухта, ул. Первомайская, д. 13, ауд. Б/Ф.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Ухтинского государственного технического университета.

Автореферат размещен на интернет-сайте УГТУ www.ugtu.net в разделе «Диссертации».

Автореферат разослан « » апреля 2014 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
кандидат технических наук,
профессор

Н.М. Уляшева

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследований

Разработка газовых и нефтяных залежей с трещиновато-пористыми коллекторами характеризуется рядом специфических особенностей, связанных с течением флюида в среде с двойной пористостью и проницаемостью. Развитие методов математического моделирования течения флюида в данной среде является актуальной задачей. На сегодняшний день очевидна роль трещин при фильтрации углеводородов. Но определение трещиноватости связано с многочисленными проблемами. В частности, необходимо отметить, что определение трещинной проницаемости в образцах керна, разбитого системой трещин, в лабораторных условиях затруднительно. Изучение фильтрации жидкости и газов в трещиноватых коллекторах актуально по двум причинам: вследствие увеличения числа месторождений нефти и газа, приуроченных к трещиноватым коллекторам, и наличия особенностей фильтрации в них пластовых флюидов. К трещиноватым коллекторам в основном относят карбонатные породы. Карбонатные коллекторы занимают второе место после терригенных. Разработка трещиноватых коллекторов является актуальной задачей, так как по некоторым оценкам в карбонатных породах сосредоточено от 35% до 48% запасов нефти и от 23% до 28% газа в мире. Фильтрация нефти и газа в таких коллекторах обусловлена, в основном, трещинами и кавернами.

Данные промысловых и лабораторных исследований, анализа разработки месторождений показали, что трещиноватые породы имеют сложную систему строения порового пространства, а движение жидкости и газа в них отличается некоторыми особенностями по сравнению с движением в пористой среде. Таким образом, при изучении трещиноватых коллекторов особенно актуальными являются гидрогазодинамические исследования скважин. А именно интерпретация результатов промысловых исследований на основе современных математических моделей позволит точнее идентифицировать тип фильтрационного потока и прогнозировать технологические показатели разработки месторождений углеводородов.

Цель работы

Разработка и реализация математической модели скважины, дренирующей трещиновато-пористый коллектор в принципиально новой постановке задачи и совершенствование методики интерпретации промысловых результатов исследования скважин как на стационарных, так и на нестационарных режимах фильтрации.

Основные задачи исследований

1. Выполнить обзор предшествующих исследований и проанализировать существующие подходы к описанию и методам математического моделирования трещиновато-пористых коллекторов, их достоинства и недостатки.
2. Рассмотреть и изучить современные методы интерпретации гидрогазодинамических исследований скважин как на стационарных, так и на нестационарных режимах фильтрации, а также методы диагностирования основных режимов течения флюида в продуктивном пласте.
3. Разработать и реализовать с помощью современного языка программирования с# собственный программный код, позволяющий учитывать и моделировать специфические особенности движения в среде с двойной пористостью и двойной проницаемостью на основе принципиально новой постановки задачи трещиновато-пористого коллектора.
4. На основе разработанной математической модели скважины, дренирующей трещиновато-пористый коллектор, провести численные эксперименты по влиянию различных факторов на результаты интерпретации гидродинамических исследований нефтяных и газовых скважин.

Методы решения поставленных задач

Для проведения необходимых расчетов и математических экспериментов были разработаны и реализованы в виде программного комплекса следующие численные методики:

- фильтрационная модель скважины, дренирующей трещиновато-пористый коллектор, основанная на совместном решении уравнений неустановившейся фильтрации. Схема решения полностью неявная;
- решение системы алгебраических уравнений на каждом временном шаге осуществляется методом Ньютона, а на каждой ньютоновской итерации решение системы линейных уравнений – методом неполного гауссова исключения и красно-черного разбиения с применением процедуры ORTHOMIN;
- для выявления основных типов фильтрационных потоков использованы теоретический диагностический график и производная Бурде.

Научная новизна выполненных исследований

1. Выявлены закономерности механизма фильтрации в трещиновато-пористых коллекторах на основе новых подходов учета трещиноватости с помощью численного моделирования.
2. На основе реализованной модели и точных решений основных типов фильтрационных потоков установлено, что для трещиновато-пористых коллекторов характерен как линейный, так и билинейный режим фильтрации.
3. Установлено, что закон движения флюида в пласте оказывает существенное влияние на результаты интерпретации гидродинамических исследований скважин. Таким образом, учет различных законов течения положительно сказывается на результатах адаптации гидродинамических исследований скважин.
4. На основе численного моделирования и интерпретации гидродинамических исследований найдено, что горизонтальным скважинам соответствует линейный и билинейный режим течения.
5. На основе результатов воспроизведения промысловых исследований нефтяных и газовых скважин уточнены параметры вертикальной трещиноватости месторождений Тимано-Печорской нефтегазоносной провинции, а также выявлены характерные режимы течения к скважинам в трещиновато-пористых коллекторах.

Защищаемые научные положения

1. Принципиально новая постановка задачи трещиновато-пористого коллектора, реализованная с помощью современного языка программирования с#.
2. На результаты интерпретации гидродинамических исследований скважин влияет выбор того или иного закона фильтрации, механизм работы системы «матрица-трещина», влияние ствола скважины, а также технологический режим работы скважин.
3. Принципиальные отличия моделирования и интерпретации промысловых исследований как вертикальных, так и горизонтальных скважин.
4. Методика интерпретации гидродинамических исследований скважины, дренирующей трещиновато-пористый коллектор, как на стационарных, так и на нестационарных режимах фильтрации.

Практическая значимость результатов исследований

- получено свидетельство о государственной регистрации разработанной программы для ЭВМ;
- уточнение геологического строения продуктивных отложений в зоне дренирования скважины;
- прогнозирование поведения фильтрационных параметров в процессе разработки месторождений углеводородов;

- планирование решений по использованию методов улучшения фильтрационных характеристик приквацинной зоны;
- определение оптимальных режимов эксплуатации скважин на различных стадиях разработки месторождения;
- возможность оперировать конкретными параметрами трещиноватости (густота, раскрытость, протяженность) в отличие от концепции «вложенных сред», моделирующих трещиновато-пористые коллекторы.

Внедрение результатов исследований

Полученные результаты исследований в виде разработанного программного комплекса активно используется в лаборатории гидродинамического моделирования на базе кафедры РЭНГМиПГ ФГБОУ ВПО УГТУ, а также в учебном процессе при написании дипломных и курсовых работ.

Апробация работы

Основные результаты работы докладывались на следующих конференциях:

1. V открытая научно-практическая конференция молодых работников и специалистов инженерно-технического центра 26-28 июня 2013 г. г. Ухта.
2. Межрегиональная научно-техническая конференция «Проблемы разработки и эксплуатации месторождений высоковязких нефтей и битумов» 15-16 ноября 2012 г. г. Ухта.
3. Международный семинар «Рассохинские чтения» 8-9 февраля 2013 г. г. Ухта.
4. Международный нефтегазовый форум «Offshore. Dive in the Future» 13-14 апреля 2013 г., Казахстан, г. Алматы.
5. XIV Международная молодежная научная конференция «Севергеоэкотех-2013» 20-22 марта 2013 г. г. Ухта.
6. Межрегиональная научно-техническая конференция «Актуальные проблемы разработки нефтяных месторождений» 24-25 октября 2012 г. г. Ухта.
7. I Республиканский научно-практический форум «Инновационные технологии – основа развития национальной экономики» 18-19 октября 2012 г., г. Сыктывкар.
8. XIII Научно-техническая конференция молодежи 12-14 декабря 2012 г., г. Ухта.
9. Республиканский молодежный инновационный конвент «Молодежь – будущему Республики Коми» 23 апреля 2013 г., площадка №1, г. Ухта.
10. Всероссийский научно-технический семинар «Проблемы добычи, транспорта и переработки тяжелых нефтей» (В рамках XXI международной специализированной выставки «Газ.Нефть.Технологии – 2013») 27-28 мая 2013 г., г. Уфа.
11. XIII Конкурс молодых работников и специалистов ООО «Лукойл-Коми» на лучшую научно-техническую разработку 2012 года. 23-27 апреля 2013 г., г. Усинск.
12. VIII научно-техническая конференция молодых специалистов «ООО РН-Северная нефть», 14-15 марта 2013 г., г. Усинск.
13. 5-ая научно-практическая конференция «Исследования и практика: проблемы и результаты» 19 апреля 2013 г. г. Усинск.
14. II Всероссийская (XVII) Молодежная научная конференция «Молодежь и наука на севере», 22-26 апреля 2013 г., г. Ухта;
15. Конференция SPE Российский и Каспийский регион 16-17 октября 2012 г., г. Москва.
16. VIII Международный технологический симпозиум "Передовые технологии разработки, повышения нефтегазотдачи месторождений и исследования скважин", РАНХиГС при Президенте РФ, 20-21 марта 2013 г., г. Москва.
17. Научно-техническая конференция преподавателей и сотрудников УГТУ, 16-19 апреля 2013 г., г. Ухта.

18. 11-ая Международная выставка и конференция по освоению ресурсов нефти и газа Российской Арктики и континентального шельфа стран СНГ (RAO/CIS Offshore 2013), 12-13 сентября, г. Санкт-Петербург.
19. V Северный инвестиционный форум «Освоение минеральных ресурсов Европейского севера России», 19-20 сентября 2013 г., г. Сыктывкар.
20. Конференция SPE по проблемам разработки месторождений в осложненных условиях и Арктике, Российский и Каспийский регион, 2013, 15-16 октября 2013 г., г. Москва.
21. Межрегиональная научно-техническая конференция «Проблемы разработки и эксплуатации месторождений высоковязких нефтей и битумов» 14-15 ноября 2013 г., г. Ухта.
22. Международная научная конференция, посвященная 85-летию академика Азада Халил оглы Мирзаджанзаде, 21-22 ноября 2013 г., г. Баку.
23. V Международной молодежной научно-практической конференции «НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ГАЗОВОЙ ОТРАСЛИ: ОПЫТ И ПРЕЕМСТВЕННОСТЬ», п. Развилка, ООО «Газпром ВНИИГАЗ», 20-22 ноября, 2013 г., г. Москва.
24. Международный семинар «Рассохинские чтения» 6-7 февраля 2014 г., г. Ухта.
25. XV Международная молодежная научная конференция «Севергеоэкотех-2014» 26-28 марта 2014 г., г. Ухта.
26. IV Конференция молодых ученых и специалистов ООО «ЛУКОЙЛ-Инжиниринг», 27-28 марта 2014 г., г. Москва.

Публикации результатов работы

По теме диссертации опубликовано 15 печатных работ, в том числе четыре статьи опубликовано в изданиях, выпускаемых в РФ и рекомендуемых ВАК для публикации основных результатов диссертаций.

Структура и объем диссертационной работы

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав и заключения. Общий объем работы составляет 150 страниц, в том числе 20 таблиц, 82 рисунка и список литературы из 156 наименований.

Благодарности

Автор выражает искреннюю благодарность своему научному руководителю доктору технических наук А.В. Назарову за помощь на всех этапах подготовки диссертационной работы; сотрудникам кафедры РЭНГМиПГ УГТУ за помощь и ценные советы и рекомендации в процессе работы, а также сотрудникам отдела центра разработки и эксплуатации газовых и нефтегазовых месторождений филиала ООО «Газпром ВНИИГАЗ» в г. Ухта за практические советы и помощь при решении поставленных задач.

Автор благодарен ректору УГТУ, д.т.н., профессору Н.Д. Цхадая за внимание на каждом этапе работы и создание благоприятных условий для написания диссертационной работы.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении приводится общая характеристика работы, обосновывается ее актуальность, определяются цель работы, идея, задачи, излагаются защищаемые положения, научная новизна и практическая значимость работы.

В первой главе приводится обзор предшествующих исследований по теме диссертационной работы. Исследованиями закономерностей движения жидкости в единичных трещинах постоянной по длине раскрытостью занимались Буссинеск, Г.М. Ломизе, Е.С. Ромм, С.К. Гриннелл, С.Х. Бастоу, Ф.П. Боуден, В. Дж. Бейкер, А. Эгли. М. Маскет и П. Буазар изучали движение жидкости в трещиноватом пласте, моделируемом

одиночным мощным пористым блоком с одной трещиной правильной формы. Фильтрация в пористой среде с одной трещиной правильной формы изучалась также А.Э. Шейдеггером. Математические модели трещиноватых коллекторов основаны на континуальном подходе. Основные представления даны в работах Г.И. Баренблатта, Ю.П. Желтова, а также в работах А.Бана, К.С. Басниева, В.Н. Николаевского, П.П. Золотарева и др. Согласно этим работам трещиновато-пористую среду можно рассматривать как систему двух вложенных друг в друга разномасштабных «пористых» сред. Также близкий по смыслу подход используется и при моделировании трещиновато-пористых коллекторов зарубежными авторами. Это такие исследователи как Каземи, де Сваан, Наджуриет, Уоррен и Рут. Диагностировать к какому типу коллектора относится месторождение достаточно сложно. Таким образом, интерпретация промысловых результатов гидродинамических исследований трещиноватых коллекторов связана с проблемой выбора математической модели, позволяющей идентифицировать трещиноватость коллектора. В настоящее время, интерпретация ГДИС всецело отдана компьютерной технике. Способности диагностики шагнули далеко вперед с изобретением производной Бурде, активно применяющейся при идентификации типа фильтрационного потока. Каждый из потоков детально рассмотрен в данной главе. Для описанных потоков ранее уже были получены точные решения, которые могут установить, является ли коллектор трещиноватым и выявить механизм работы системы «трещина-матрица».

Вторая глава посвящена выводу основных уравнения изотермической фильтрации в принципиально новой постановке задачи описания скважины, вскрывающей трещиновато-пористый коллектор. Как правило, при исследовании скважин необходимо учитывать как влияние ствола скважины, так и движение флюида по внутрипромысловому оборудованию (рис. 1)

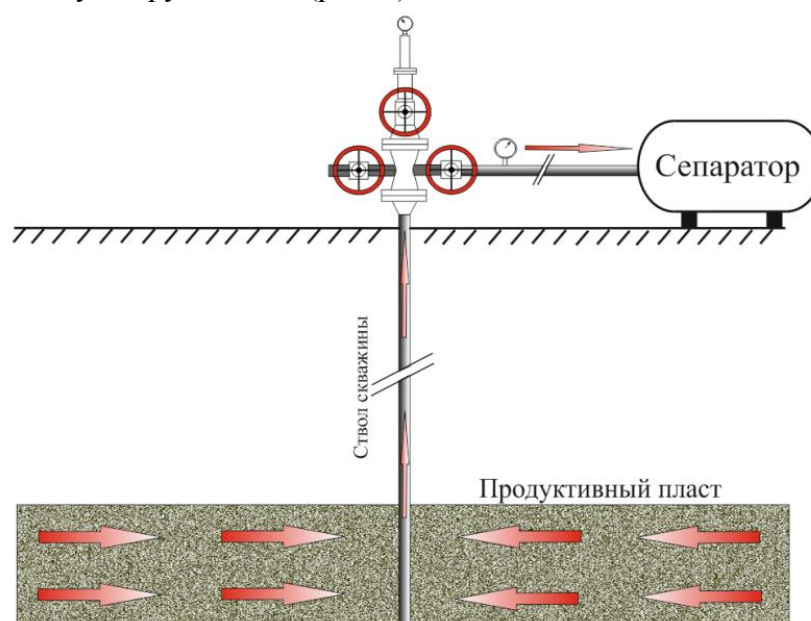


Рисунок 1 – Принципиальная схема «Пласт-скважина-шлейф»

При разработке месторождений нефти и газа практически всегда возникает вопрос, к какому типу коллектора отнести данную залежь. Более полную информацию о строении и его текущем состоянии возможно получить при гидродинамических исследованиях скважин. Таким образом, в данной работе предпринята попытка создания математической модели скважины, позволяющей идентифицировать тип фильтрационного потока.

Итак, для получения балансовых соотношений представим некоторую часть элемента пласта в следующем виде, для того чтобы детальнее рассмотреть механизм фильтрации углеводородов в трещиновато-пористом коллекторе (рис. 2).

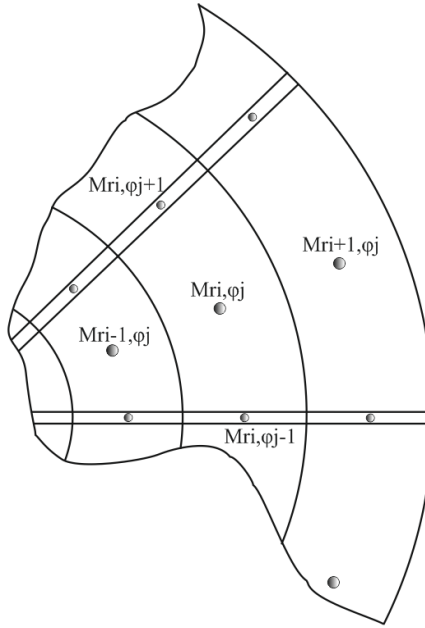


Рисунок 2 – Фрагмент элемента пласта

Согласно представленному рисунку баланс масс будет выглядеть следующим образом:

$$M_{ri-\frac{1}{2}, \varphi j} + M_{ri+\frac{1}{2}, \varphi j} + M_{ri, \varphi j-\frac{1}{2}} + M_{ri, \varphi j+\frac{1}{2}} = \Delta M_{ri, \varphi j} \pm M_w \quad (1)$$

где

$M_{ri-\frac{1}{2}, \varphi j}$ – масса флюида, поступившая из матричного блока $ri-\frac{1}{2}, \varphi j$ в матричный блок $ri, \varphi j$

$M_{ri+\frac{1}{2}, \varphi j}$ – масса флюида, поступившая из матричного блока $ri+\frac{1}{2}, \varphi j$ в матричный блок $ri, \varphi j$.

$M_{ri, \varphi j-\frac{1}{2}}$ – масса флюида, поступившая из трещинного блока $ri, \varphi j-\frac{1}{2}$ в матричный блок $ri, \varphi j$.

$M_{ri, \varphi j+\frac{1}{2}}$ – масса флюида, поступившая из трещинного блока $ri, \varphi j+\frac{1}{2}$ в матричный блок $ri, \varphi j$.

$\Delta M_{ri, \varphi j}$ – изменение массы в матричном блоке $ri, \varphi j$.

M_w – масса флюида, закачиваемая или отбираемая скважиной.

Представим более подробно, представленные выше слагаемые.

$$M_{ri-\frac{1}{2}, \varphi j} = v_{ri-\frac{1}{2}, \varphi j} \cdot \rho_{ri-\frac{1}{2}, \varphi j} \cdot \omega_{ri-\frac{1}{2}, \varphi j} \cdot \Delta t \quad (2)$$

где $v_{ri-\frac{1}{2}, \varphi j}$ – скорость фильтрации из матричного блока $ri-\frac{1}{2}, \varphi j$ в матричный блок $ri, \varphi j$

Выбор того или иного закона движения, как правило, определяется типом фильтруемой среды. В данной постановке задачи возможен выбор следующих законов фильтрации:

- закон фильтрации А. Дарси;

- закон фильтрации Е.М. Минского;
- закон фильтрации с предельным градиентом сдвига для газоконденсатных месторождений;
- закон фильтрации с предельным градиентом сдвига для неньютоновских систем.

Каждый из представленных законов движения использовался при воспроизведении результатов промысловых исследований нефтяных и газовых скважин.

$\rho_{ri-\frac{1}{2},\varphi j}$ – плотность флюида на границе ячеек, кг/м³;

Δt – временной шаг, с;

$\omega_{ri-\frac{1}{2},\varphi j}$ – площадь поперечного сечения ячеек, определяемая по следующей формуле:

$$\omega_{ri-\frac{1}{2},\varphi j} = \left(\varphi_j \cdot r_{i-\frac{1}{2}} - \frac{\delta_k}{2} - \frac{\delta_{k-1}}{2} \right) \cdot \Delta z \quad (3)$$

где δ_k – раскрытость трещин, м;

Δz – толщина пласта, м;

Δt – временной шаг, с;

φ_j – угол между секторами.

$$\Delta M_{ri,\varphi j} = m_{ri,\varphi j} \cdot V_{ri,\varphi j} \cdot (\rho_{ri,\varphi j}^{n+1} - \rho_{ri,\varphi j}^n) \quad (4)$$

$m_{ri,\varphi j}$ – коэффициент пористости матричных и трещинных блоков;

$V_{ri,\varphi j}$ – объем ячеек матричных и трещинных блоков, м³;

$\rho_{ri,\varphi j}^{n+1}$ – плотность флюида на новом временном шаге, кг/м³;

$\rho_{ri,\varphi j}^n$ – плотность флюида на предыдущем временном шаге, кг/м³;

Работа скважин задается следующим образом:

$$M_w = Q_{cm} \cdot \rho_{cm} \cdot \Delta t \quad (5)$$

где Q_{cm} – дебит, приведенный к стандартным условиям, м³/с;

ρ_{cm} – плотность при стандартных условиях, кг/м³;

Δt – промежуток времени, с.

Полученные соотношения выражают механизм фильтрации флюида в трещиновато-пористом коллекторе. Как видно, данные выражения основаны на принципиально новой постановке задачи подземной гидромеханики.

Так, например, при двумерном моделировании не учитывается очень важная составляющая – гравитационная. Данное обстоятельство толкает к расширению разработанной модели к трехмерному виду. Для рассмотрения принципиальных отличий представим следующую схему трехмерного элемента пласта (рис. 3).

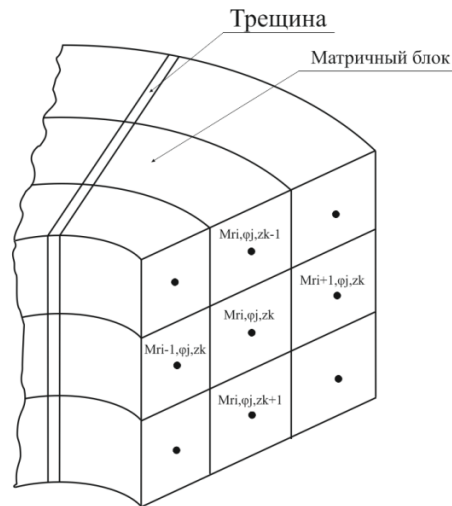


Рисунок 3 – Трехмерный вид элемента пласта

Разностные уравнения выводятся естественным образом из балансовых соотношений и геометризации пласта аналогично двумерному случаю.

Наличие третьего измерения позволяет усовершенствовать разработанную модель пласта, что является немаловажным обстоятельством при воспроизведении промысловых исследований. Также особенно важным при разработке трещиновато-пористых коллекторов является учет деформационных процессов, которые также заложены в разработанную математическую модель в виде определенных зависимостей.

Представленные соотношения были выведены впервые и для получения необходимых результатов расчета по данной математической модели описанная методика реализована в виде программного комплекса, не имеющего мировых аналогов, основанного на создании собственного программного кода с помощью современного объектно-ориентированного языка программирования `c#`.

Третья глава посвящена описанию разработанной компьютерной программы, основанной на численном решении дифференциальных уравнений. Приведена структура заполнения исходных данных, необходимых для моделирования процессов фильтрации углеводородов.

Разработанный программный комплекс представляет собой трехмерную численную математическую модель скважины, дренирующей трещиновато-пористый коллектор.

Сегодня численное гидродинамическое моделирование занимает ведущие позиции в области проектирования и контроля разработки месторождений и основывается на использовании трехмерных цифровых моделей. Для проведения необходимых расчетов и математических экспериментов были разработаны и реализованы с помощью современного языка программирования `c#` в виде программного комплекса следующие численные методики:

- реализована полностью неявная разностная схема, определяющая вид системы алгебраических уравнений;
- решение системы алгебраических уравнений на каждом временном шаге осуществляется методом Ньютона, а на каждой ньютоновской итерации решение системы линейных уравнений – методом неполного гауссова исключения с красно-черным разбиением с применением процедуры ORTHOMIN.

Реализованная математическая модель позволяет интерпретировать результаты гидродинамических исследований как вертикальных, так и горизонтальных скважин. В свою очередь, горизонтальный ствол может пересекать систему вертикальных трещин. Трещины могут иметь различный характер распространения.

В настоящее время разработанный программный комплекс прошел стадию государственной регистрации, было получено свидетельство о государственной регистрации.

Четвертая глава посвящена решению следующих задач, ориентированных на изучение механизма фильтрации трещиновато-пористых коллекторов.

На результаты интерпретации и прогноз технологических показателей разработки чаще всего влияют следующие параметры: ствол скважины, неоднородность коллектора, состояние призабойной зоны, деформационные свойства пласта, тип и физико-химические свойства фильтруемого флюида.

Чаще всего тип коллектора определяется по результатам гидродинамических исследований. Ранее было рассмотрено достаточно большое количество классификаций, характеризующих преобладающую роль либо трещин, либо совместную работу как матричных блоков, так и трещин. Как правило, линейный фильтрационный поток определяет преобладающую роль трещин при фильтрации углеводородов.

Но как уже отмечалось ранее, постановка задачи «вложенных сред» не позволяет выявить билинейный фильтрационный поток, характерный для трещиновато-пористых коллекторов, когда приток к скважине одновременно идет как по трещинам, так и из матричных блоков. Разработанная же нами математическая модель позволяет выявить как линейный, так и билинейный фильтрационные потоки. Схематично представим следующие модели пластов (рис. 4 – 5).

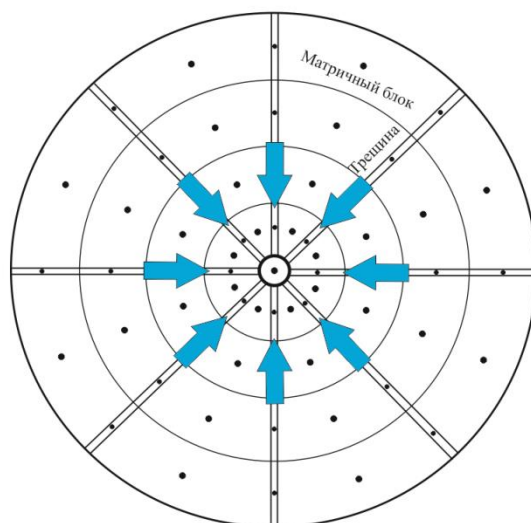


Рисунок 4 – Выявление линейного фильтрационного потока

Как видно из представленного рисунка 4, движение флюида идет только по трещинам. Подпитка трещин осуществляется на контуре пласта. Для выявления данного типа фильтрационного потока построим следующие диагностические кривые (рис. 5).

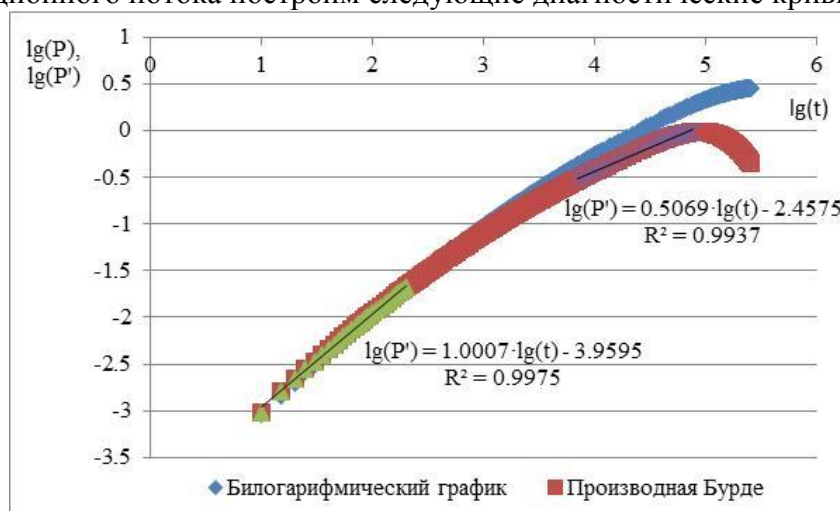


Рисунок 5 – Диагностический график

Аналогично представим результаты численного расчета без учета влияния ствола скважины (рис. 6)

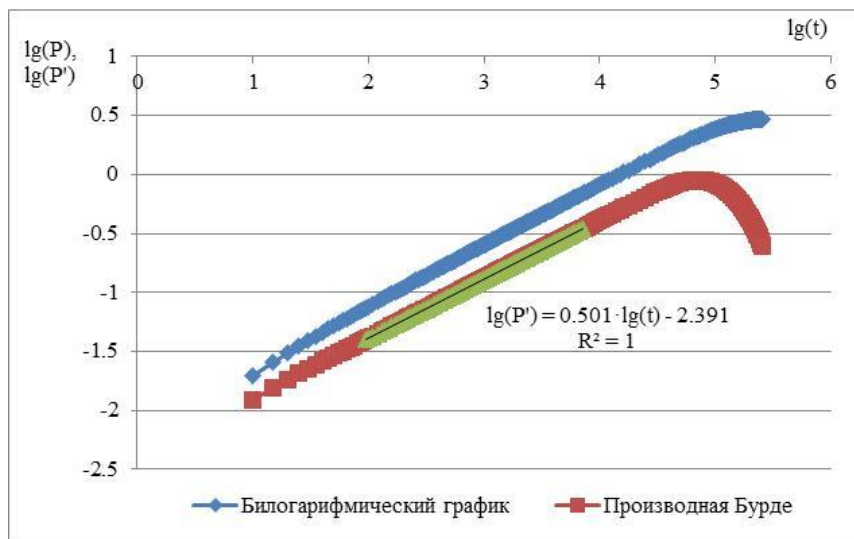


Рисунок 6 – Диагностический график

Проанализировав полученные кривые, приходим к выводу, что фильтрация преимущественно идет по трещинам, что подтверждает коэффициент угла наклона производной Бурде, равной 0,5, характеризующий линейный фильтрационный поток.

Для билинейного же режима фильтрации характерно движение к скважине как по матричным блокам, так и по трещинам. Подпитка трещин из матриц происходит на всем протяжении трещин. Разработанная модель позволяет выявить и билинейный поток, характерный для трещиновато-пористых коллекторов (рис. 7).

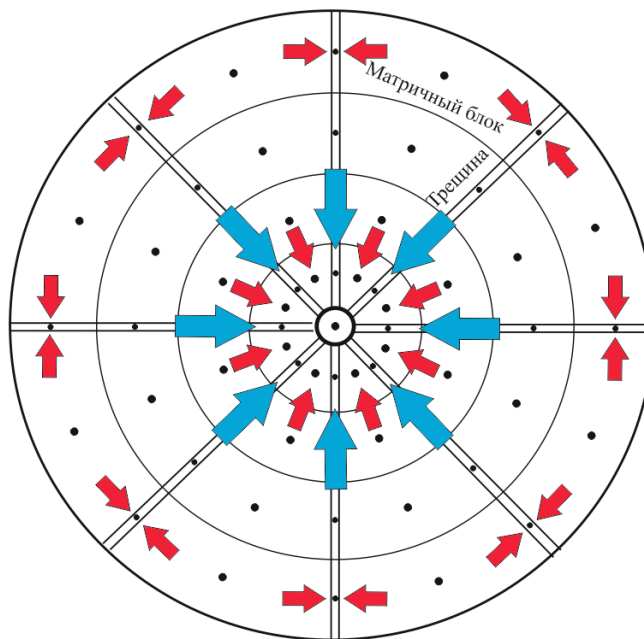


Рисунок 7 – Выявление билинейного фильтрационного потока

Как видно из рисунка, при данном фильтрационном потоке приток к скважине идет как по трещинам, так и по матричным блокам. Трещины подпитываются из матричных блоков. Для того чтобы выявить описанные выше фильтрационные потоки, проведены численные эксперименты (рис. 8).

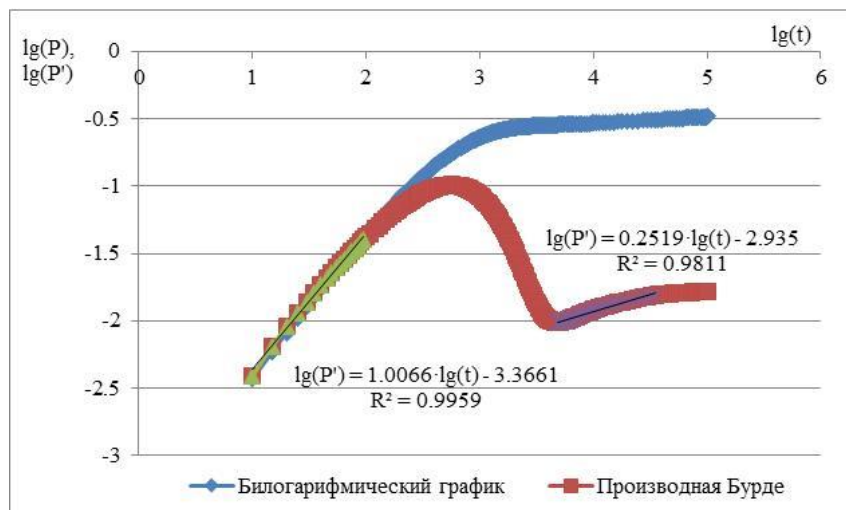


Рисунок 8 – Диагностический график

Аналогично представим результаты численных экспериментов без учета влияния ствола скважины на результаты нестационарных исследований (рис. 9).

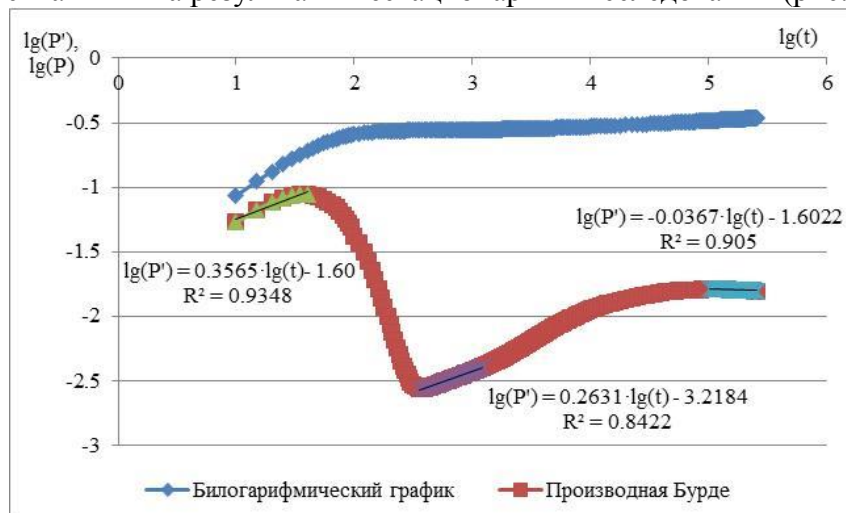


Рисунок 9 – Диагностический график без учета влияния ствола скважины

Как видно из представленных рисунков, ствол скважины скрывает начальный участок работы продуктивного пласта. Установка же пакера на забое скважины позволяет установить начальный тип фильтрационного потока. Анализируя рисунок 9, приходим к выводу, что в начальный момент активнее работают трещины и по мере их истощения подключается матричная зона пласта, подпитывая трещины. Таким образом, реализованная модель скважины легко позволяет выявить как линейный, так и билинейный фильтрационные потоки, характерные для трещиновато-пористых коллекторов.

Разработанные подходы описания трещиновато-пористых коллекторов были использованы при адаптации математической модели скважины по результатам исследований скважины №70 Печорокожвинского месторождения.

Печорокожвинское нефтегазоконденсатное месторождение находится на территории Печорского района Республики Коми в 14 км к северу от г. Печоры. Скважиной №70 была открыта газовая залежь в карбонатных отложениях башкирско-серпуховского возраста (C_{1s} - C_{2b}). При опробовании данной скважины был получен промышленный приток газа дебитом $299,4 \text{ м}^3/\text{сут}$ через 22 мм диафрагму.

Пористость пород определялась по керну. Подняты в основном плотные разности карбонатных пород. Также был произведен комплекс ГИС. Результаты представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Данные по исследованиям скважины

Методы исследования	Наименование характеристик	Параметры пласта	
		Проницаемость, 10^{-3} мкм ²	Открытая пористость, %
Лабораторные исследования	Количество скважин	2	3
	Количество определений	35	58
	Среднее значение	68,6	15,7
	Интервал изменения	0,145-324,5	6-28
Геофизические исследования	Количество скважин	1	6
	Количество определений	-	101
	Среднее значение		15,4
	Интервал изменения		6,32-33,6

По геофизическим исследованиям была определена только пористость. Таким образом, для более полного изучения параметров пласта были проведены гидродинамические исследования как на стационарных, так и на нестационарных режимах фильтрации.

Испытания проводились на трех режимах с возрастанием. Как видно из рисунка происходит отклонение от линейного закона фильтрации, что характерно для газовых скважин. Интерпретация таких кривых производится с помощью двучленного закона фильтрации Е.М. Минского

$$\frac{\partial p}{\partial r} = -\left(\frac{\mu}{k}v + \frac{\rho}{l}v|v|\right), \quad (6)$$

где p – давление, МПа;

r – координата по радиусу, м;

μ – вязкость флюида, мПа·с;

k – проницаемость, мкм²;

ρ – плотность флюида, кг/м³;

v – скорость фильтрации, м/с;

l – коэффициент макрошероховатости породы, м.

Для того чтобы создать численную математическую модель скважины, потребовались следующие исходные данные (табл. 2).

Таблица 2 – Исходные данные для моделирования скважины № 70 в залежи C₁S-C₂b

Параметр	Единицы измерения	Значение
Количество ячеек по радиусу		30
Количество ячеек по углу		6
Количество трещин		6
Количество ячеек по вертикали		2
Радиус контура питания	м	2000
Раскрытость трещин	мм	1
Высота ячейки по вертикали	м	10
Начальное давление в пласте	МПа	7,02
Начальное давление на устье скважины	МПа	6,5
Давление в шлейфе	МПа	3
Радиус шлейфа	м	0.1
Длина шлейфа	м	500
Ограничение по дебиту	тыс. м ³ /сут	400
Радиус скважины	м	0.1
Время эксплуатации скважины	сут	25
Шаг по времени	сут	1

При интерпретации на установившихся режимах фильтрации модельная кривая достаточно близко описывает фактическую индикаторную кривую (рис. 10).

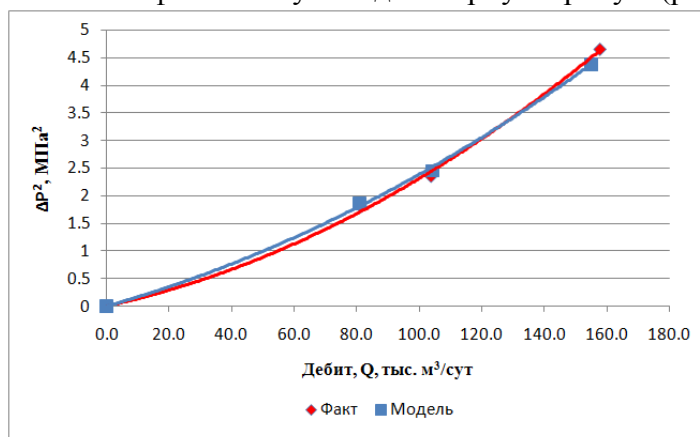


Рисунок 10 – Воспроизведение результатов исследований на установившихся режимах фильтрации

Также по данной скважине Печорокожвинского месторождения были проведены исследования на нестационарных режимах фильтрации. В частности, по рассматриваемой скважине также была проведена адаптация численной математической модели скважины по фактической кривой восстановления давления. Как видно, разработанная численная модель также адекватно описывает фактическую кривую (рис. 11).

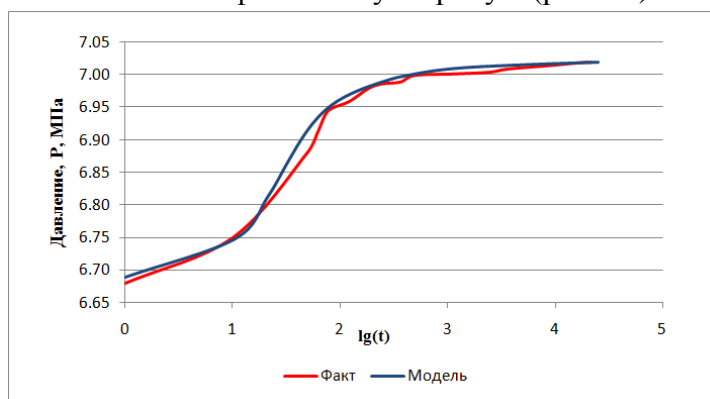


Рисунок 11 – Сопоставление фактической и модельной кривой

При адаптации численной математической модели проницаемость матричных блоков принималась по результатам лабораторных исследований при изучении образцов керна. Но при воспроизведении результатов исследования скважины на стационарных режимах оказалось, что модель хорошо воспроизводит исследования при учете трещинной составляющей.

Таким образом, исходя из адаптированной модели скважины по результатам фактических исследований на стационарных и нестационарных режимах фильтрации были уточнены следующие характеристики пласта (табл. 3):

Таблица 3 – Результаты расчета

Параметр	Единицы измерения	Значение
Проницаемость матричных блоков	мкм ²	0,069
Проницаемость трещин	мкм ²	0,759
Раскрытость трещин	мм	1,2
Пористость матричных блоков	%	15
Коэффициент макрошероховатости породы	м	10 ⁻⁹
Проницаемость призабойной зоны для матричных блоков	мкм ²	0,045
Проницаемость призабойной зоны для трещинных блоков	мкм ²	0,625

Как видно по результатам расчета, воспроизвести гидродинамические исследования с помощью модели удалось лишь с учетом моделирования вертикальных трещин. В ходе адаптации было рассчитано несколько десятков вариантов. В результате необходимо сделать вывод, что коллектор Печорокожвинского месторождения является неоднородным, что характерно для карбонатных пород. Поэтому совершенствование методов интерпретации гидродинамических исследований является очень важной задачей и позволит в дальнейшем на стадии проектирования более достоверно прогнозировать технологические показатели разработки месторождения.

Терригенные коллекторы нефти и газа занимают первое место по сравнению с карбонатными по объемам запасов углеводородов. Песчаники также могут обладать высокой трещиноватостью. В работе была проведена интерпретация результатов пластоиспытания в открытом стволе скважины №1 Ермоловской площади.

Ермоловская площадь расположена в Тимано-Печорской нефтегазоносной провинции и приурочена к сакмарскому геологическому горизонту. Тип коллектора – терригенный. Вязкость нефти в пластовых условиях составляет 4,3 мПа·с. Интервал испытания 1002 – 1015 м. Для испытания скважины применялось испытательное оборудование – ЗПКМ2М «Уралец». Процесс испытания фиксировался скважинными электронными и геликсными манометрами. Полная компоновка испытательного инструмента представлена на рис. 12.

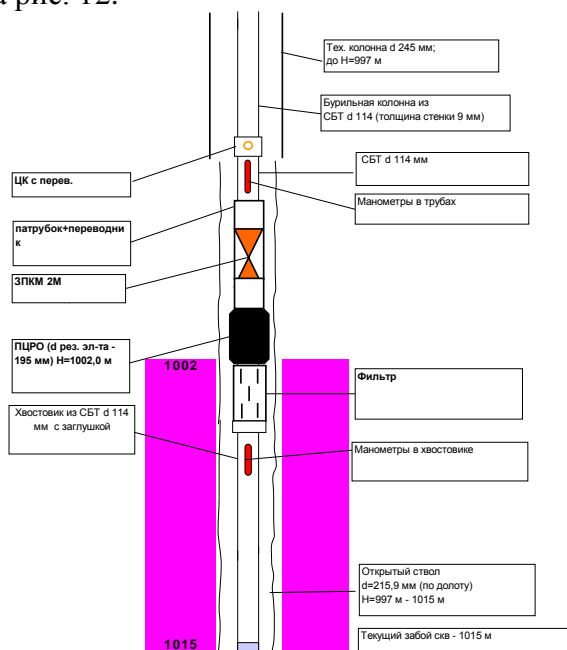


Рисунок 12 – Компоновка испытательного инструмента

Испытание было проведено в 2 цикла:

- продолжительность первого открытого периода (ОП1)–33 мин (по записи манометров);
- продолжительность первого закрытого периода (ЗП1)– 30 мин (по записи манометров);
- продолжительность второго открытого периода (ОП2)–135мин (по записи манометров);
- продолжительность второго закрытого периода (ЗП2)–108 мин (по записи манометров).

Объем притока, начальная и средняя депрессии рассчитаны по показаниям манометра, расположенного над пакером в трубах (МТГ-20М № 10 Н=986,7 м) и их значения (начальной и средней депрессии) пересчитаны на глубину манометра, расположенного под пакером (МС-107 № 1305 Н=1005,5 м); значение пластового давления и параметры пласта рассчитаны по показаниям манометра, установленного под пакером.

В качестве закона фильтрации был выбран линейный закон фильтрации А. Дарси. Адаптация математической модели проводилась по кривой восстановления давления по второму закрытому периоду. Результаты расчета представлены на следующем графике (рис. 13).

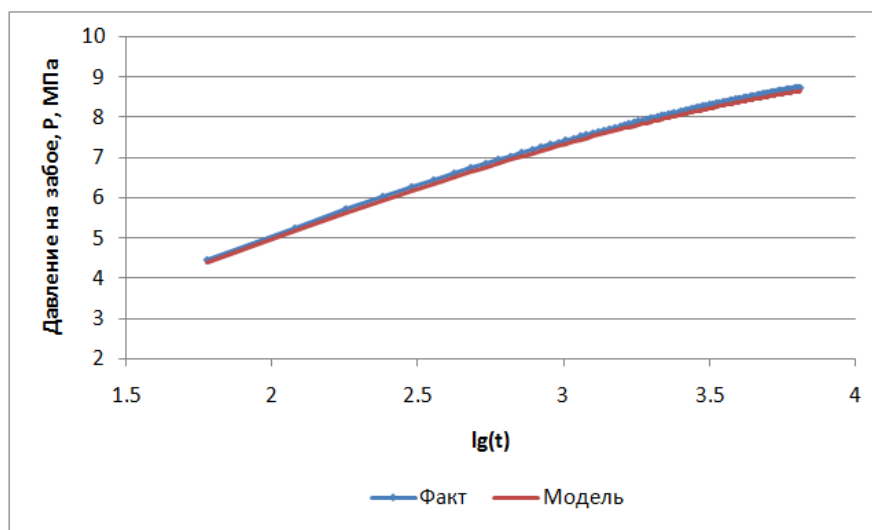


Рисунок 13 – Воспроизведение результатов исследований

Как видно из рисунка модельная кривая достаточно адекватно описывает фактическую кривую. Фактическая кривая имеет нестандартный вид для кривых восстановления давления. В ходе воспроизведения результатов исследования было проведено несколько десятков численных экспериментов. Таким образом, были уточнены коллекторские свойства продуктивного пласта Ермоловской площади. Адаптация проводилась путем подбора коэффициента абсолютной проницаемости и раскрытости трещин.

Наилучшим образом адаптировать модель удалось при помощи учета трещинной составляющей. Трещиновато-пористым коллекторам в течение последних двух десятилетий уделяется достаточно большое внимание, так доля запасов углеводородов в данных коллекторах достаточно высока. В свою очередь это дает толчок для развития привлекательных методов обработки гидродинамических исследований скважин, позволяющих идентифицировать тип фильтрационного потока, характерный для трещиноватых коллекторов.

Таким образом, результаты адаптации представлены в следующей таблице (табл. 4).

Таблица 4 – Результаты адаптации

Параметр	Единицы измерения	Значение
Проницаемость матричных блоков	мкм ²	0,0039
Проницаемость трещин	мкм ²	0,8
Раскрытость трещин	мм	0,13
Пористость матричных блоков	%	30

Как видно, проницаемость трещин намного выше проницаемости матричных блоков. Таким образом, нестандартный вид кривой восстановления давления связан со слабой проницаемостью матричных зон коллектора Ермоловской площади.

Также разработанная численная математическая модель скважины позволила выявить линейный фильтрационный поток, характерный для трещиноватых коллекторов (рис. 14).

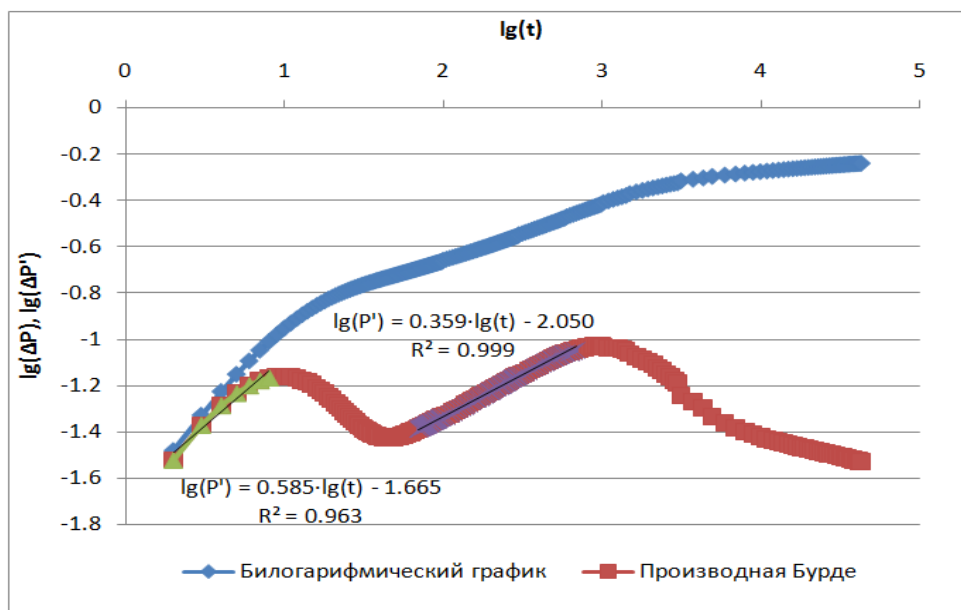


Рисунок 14 – Диагностический график

Как видно из рисунка коэффициент угла наклона кривой близок к 0,5, что соответствует линейному фильтрационному потоку. Данный тип фильтрационного потока связан с наличием трещин в продуктивном пласте Ермоловской площади. Производная билогарифмической кривой имеет определенные перегибы, что соответствует конкретному типу фильтрационного потока. В начальный момент времени существенна роль трещин, которые служат основными путями фильтрации. В дальнейшем матричные блоки вовлекаются в процесс фильтрации и начинают подпитку трещин.

Как уже было сказано ранее, в разработанной программе опционально возможен выбор нелинейного закона фильтрации. Данное направление моделирования особенно актуально для месторождений высоковязких нефтей и битумов. В Тимано-Печорской нефтегазоносной провинции доля таких месторождений неуклонно растет. Запасы высоковязких нефтей по некоторым оценкам превышают 1,5 млрд. т. В работе была рассмотрена одна из скважин пермо-карбоневой залежи Усинского месторождения.

Крупнейшее на севере Европейской части Усинское месторождение приурочено к одноименной асимметричной антиклинальной структуре, осложняющей южную оконечность Колвинского мегавала Тимано-Печорской нефтегазоносной провинции и расположено в нижнем течении р. Усы и р. Колвы.

К характерным особенностям геолого-физической характеристики пермо-карбоневой залежи относятся:

- высокая вязкость пластовой нефти (710 мПа·с);
- большая глубина залегания для залежей с таким типом нефтей (в интервале глубин 1000 – 1500 м);
- крайне неоднородное строение карбонатного коллектора, проявляющееся в высокой расчлененности разреза. По описанию керна для пород пермо-карбонového резервуара, кроме межзерновых пор, характерно наличие большого числа трещин, каверн, карстовых полостей и стилолитов.

Средняя пористость (по керну) – 18,2 %, коэффициент гранулярности – 0,394. Начальные балансовые запасы нефти – 733,5 млн.т. Геолого-физическая характеристика Усинского месторождения представлена в следующей таблице (табл. 5).

Таблица 5 – Геолого-физическая характеристика месторождения

Параметры	Единицы измерения	Объекты разработки			в целом
		I	II	III	
Средняя глубина залегания	м	1382,1	1260	1197,7	1260,0
Тип залежи		Сводовая массивная			
Тип коллектора		Трещинно-кавернозно-поровый			
Средняя общая толщина	м	167,14	77,09	47,45	285,2
Средняя нефтенасыщенная толщина	м	28,73	28,05	18,07	51,32
Пористость	%	21	19	20	19,8
Средняя нефтенасыщенность	%	74	79	78	77
Проницаемость по керну	мкм ²	0,044	0,032	0,027	0,034
Начальное пластовое давление	МПа	13,5	12,4	11,9	12,4
Вязкость нефти в пластовых условиях	мПа·с	860	710	607	710
Плотность нефти в пластовых условиях	кг/м ³	945	933	923	933

В работе представляются результаты промысловых исследований одной из скважин пермо-карбонной залежи Усинского месторождения. Данная скважина была исследована на нестационарных режимах фильтрации (табл. 6).

Таблица 6 – Основные параметры исследования

Скважина №1988	
Продолжительность работы, ч	34
Глубина установки манометра, м	1384
Дебит, м ³ /сут	4,7

Исследование скважины проводилось с помощью эжекторного устройства (УЭГИС), предназначенного для освоения и проведения технологических операций в скважинах при регулируемом забойном давлении, в частности для исследования скважин на стационарных и нестационарных режимах фильтрации. При данном виде исследования ствол скважины изолируется путем установки пакера для предотвращения влияния ствола скважины на результаты интерпретации гидродинамических исследований скважины.

В разработанной модели учитывается нелинейный закон фильтрации, характерный для месторождений высоковязкой нефти (рис. 15).

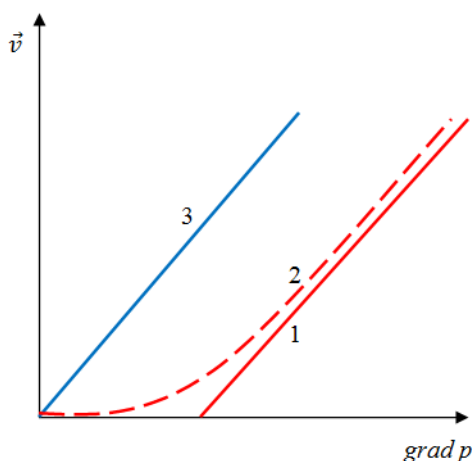


Рисунок 15 – Закон Дарси и закон фильтрации с начальным градиентом сдвига сопротивлений.

$$v = -\frac{k}{\mu} \left(\frac{\partial p}{\partial r} - G \right), \quad (7)$$

где p – давление; μ – вязкость нефти; k – абсолютная проницаемость, G – предельный градиент сдвига. Данный закон впервые был обоснован А.Х. Мирзаджанзаде.

При адаптации численной математической модели проницаемость матричных блоков принималась по результатам лабораторных исследований при изучении образцов керна. Но при воспроизведении результатов исследования скважины на нестационарных режимах оказалось, что модель хорошо воспроизводит исследования при учете трещинной составляющей (рис. 16 – 17).

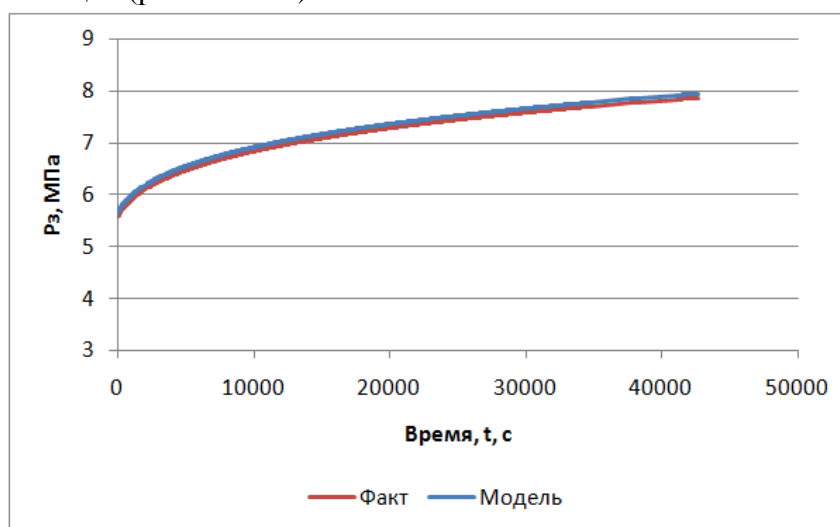


Рисунок 16 – Воспроизведение результатов гидродинамических исследований скважины

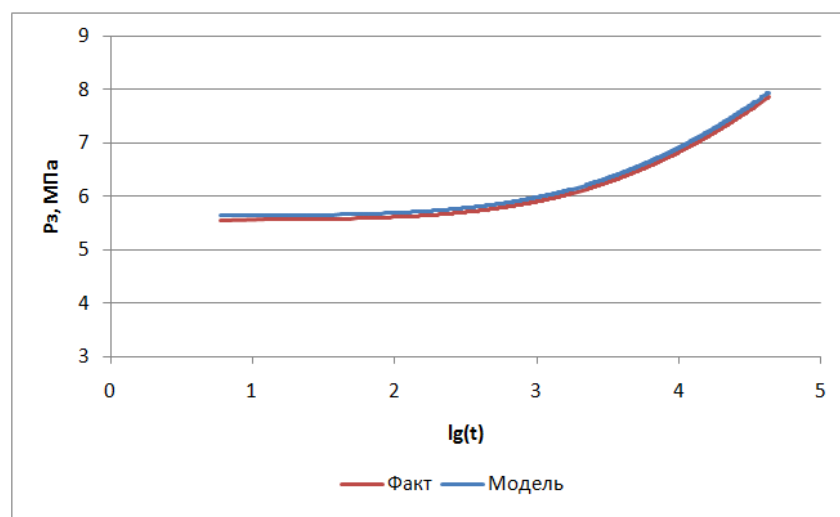


Рисунок 17 – Сопоставление промысловых исследований с модельной кривой в полулогарифмических координатах

Таким образом, исходя из адаптированной модели скважины по результатам фактических исследований на нестационарных режимах фильтрации (КВД) были уточнены следующие характеристики пласта (табл. 7):

Таблица 7 – Результаты адаптации

Параметр	Единицы измерения	Значение
Проницаемость матричных блоков	мкм ²	0,044
Проницаемость трещин	мкм ²	1,6
Раскрытость трещин	мм	1,5
Пористость матричных блоков	%	25
Предельный градиент сдвига	МПа/м	0,005

При решении обратной задачи подземной гидромеханики немаловажным обстоятельством является правильный выбор математической модели, описывающей фильтрацию в неоднородном пласте. В данной работе предпринята попытка создания принципиально новой разностной схемы, учитывающей трещиноватость коллектора, что

позволило выявить принципиальные особенности фильтрации в данных коллекторах. Таким образом, появляется возможность определить вид фильтрационного потока, тип коллектора с помощью диагностического графика (рис. 18).

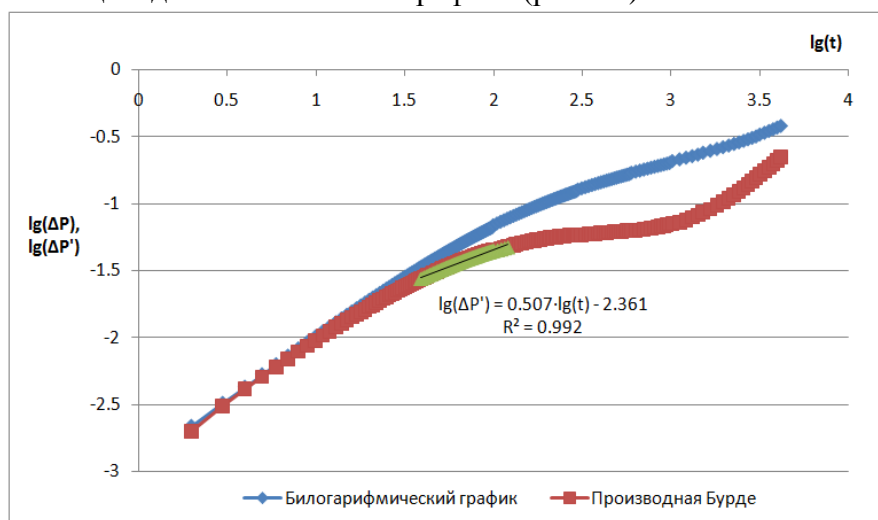


Рисунок 18 – Диагностический билигарифмический график

Как видно из рисунка для данного типа коллектора характерен линейный фильтрационный поток, так как для теоретической диагностической кривой коэффициент угла наклона равен 0,5.

На основе разработанной модели скважины был выявлен линейный фильтрационный поток, уточнены фильтрационно-емкостные свойства продуктивного пласта пермо-карбоневой залежи Усинского месторождения. Таким образом, наличие собственного программного кода позволяет решать широкий спектр научных задач путем учета дополнительных механизмов и особенностей фильтрации уникальных месторождений.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

При выполнении исследований, содержащихся в настоящей работе, получены следующие результаты:

- создана трехмерная математическая модель скважины, дренирующей трещиновато-пористый коллектор в принципиально новой постановке задачи для изучения процессов дренирования флюида в залежи круговой формы, позволяющая более точно рассчитывать фильтрационно-емкостные параметры неоднородных пластов. Оформлено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ;
- на основе разработанной модели выявлены все основные типы фильтрационных потоков, в частности, это линейный и билинейный фильтрационный поток, характерные для трещиновато-пористых коллекторов;
- с помощью разработанной математической модели были воспроизведены результаты промысловых гидродинамических исследований реальных скважин;
- в работе показано, что выбор того или иного закона фильтрации положительно сказывается на результатах адаптации гидродинамических исследований скважин;
- на основе численных экспериментов выявлено, что ствол скважины накладывает определенное влияние, а порой затрудняет идентифицировать режим течения пластового флюида;
- разработанная модель также позволяет проводить интерпретацию результатов гидропрослушивания, таким образом, учитывается интерференция скважин. На основе численных экспериментов выявлено, что реакция от соседних скважин напрямую зависит от фильтрационно-емкостных свойств межскважинного пространства;

- гибкость собственного программного кода позволяет учитывать дополнительные механизмы фильтрации, присущие конкретному, а в некоторых случаях уникальному месторождению углеводородов;
- в работе также установлено, что существуют принципиальные отличия притока углеводородов к стволу вертикальной и горизонтальной скважин. Для горизонтальных скважин, как правило, характерны линейный и билинейный фильтрационные потоки, что подтверждается результатами численных экспериментов;
- представленная постановка фильтрации в трещиновато-пористом коллекторе позволила также спрогнозировать гидроразрыв пласта. Установлено, что протяженность образованных трещин напрямую влияет на продуктивность скважины.
- реализованная математическая модель основана на современных численных методиках и наравне с коммерческими гидродинамическими симуляторами позволяет прогнозировать технологические показатели разработки залежей с трещиновато-пористыми коллекторами.

Основные результаты диссертационных исследований опубликованы в следующих работах:

Статьи в изданиях, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией Министерства образования и науки Российской Федерации:

1. Дуркин С.М. Адаптация математической модели скважины №70 Печорокожвинского месторождения по данным гидродинамических исследований // «Газовая промышленность» № 12/699/2013. – С. 17-19.
2. Дуркин С.М. Совершенствование методов интерпретации гидрогазодинамических исследований скважин путем численного моделирования // «Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море» №2/2014. – С. 38-41.
3. Дуркин С.М., Морозюк О.А., Рузин Л.М. Особенности и инновационные направления освоения ресурсов высоковязких нефтей // «Нефтяное хозяйство» № 8 2013. – С. 51-53 .
4. Дуркин С.М., Морозюк О.А., Рузин Л.М. Механизм нефтеотдачи неоднородных пластов, содержащих высоковязкую нефть // «Нефтяное хозяйство» № 8 2013. – С. 54-57.

Статьи в научно-технических сборниках и других изданиях:

1. Дуркин С.М. Математическая модель скважины, дренирующей трещиновато-пористый коллектор // Рассохинские чтения: материалы международного семинара (8-9 февраля 2013 года). В 2 ч. Ч.1 / под ред. Н.Д. Цхадая. – Ухта : УГТУ, 2013. – С. 128-134.
2. Дуркин С.М. Влияние закона фильтрации на результаты гидродинамических исследований скважины // Рассохинские чтения: материалы международного семинара (8-9 февраля 2013 года). В 2 ч. Ч.1 / под ред. Н.Д. Цхадая. – Ухта : УГТУ, 2013. – С. 124-128.
3. Дуркин С.М. Исследование скважин на нестационарных режимах фильтрации // II Всероссийской (XVII) Молодежной научной конференции «Молодежь и наука на севере», Сыктывкар, Ухта 22-26 апреля 2013 г – С. 98-99.
4. Дуркин С.М. Математическая модель скважины // Проблемы разработки и эксплуатации месторождений высоковязких нефтей и битумов: материалы межрегиональной научно-технической конференции (15-16 ноября 2012 г.) / под ред. Н.Д. Цхадая. – Ухта: УГТУ, 2013. – С. 42-48.
5. Дуркин С.М. Разработка программного комплекса для расчета технологических показателей разработки месторождений нефти и газа // Проблемы разработки и эксплуатации месторождений высоковязких нефтей и битумов: материалы межрегиональной научно-технической конференции (15-16 ноября 2012 г.) / под ред. Н.Д. Цхадая. – Ухта: УГТУ, 2013. – С. 48-54.

6. Дуркин С.М. Совершенствование методов интерпретации гидродинамических исследований скважин // XIV Международная молодежная научная конференция «Севергеоэкотех–2013»: материалы конференции (20-22 марта 2013 г.): в 5 ч.; ч. 2. – Ухта: УГТУ, 2013. – С. 251-255.
7. Дуркин С.М. Математическая модель скважины, дренирующей трещиновато-пористый коллектор // XIV Международная молодежная научная конференция «Севергеоэкотех–2013»: материалы конференции (20-22 марта 2013 г.): в 5 ч.; ч. 2. – Ухта: УГТУ, 2013. – С. 246-250.
8. Durkin S.M. Interpretation of Hydrodynamic Well Investigation by Numerical Simulation // X-th International Youth Oil & Gas Forum: Abstracts, Almaty, 2013. – p. 73-74.
9. Дуркин С.М. Интерпретация гидродинамических исследований скважин на нестационарных режимах фильтрации путем численного моделирования // Сборник научных трудов: материалы научно-технической конференции (16-19 апреля 2013 г.) : в 3 ч.; ч. 1 / под ред. Н.Д.Цхадая. – Ухта : УГТУ, 2013. – С. 161-166.
10. Дуркин С.М., Морозюк О.А. Воспроизведение результатов гидродинамических исследований скважины № 2856 Усинского месторождения высоковязкой нефти путем численного моделирования // Материалы международной научной конференции, посвященной 85-летию юбилею академика Азада Халил оглы Мирзаджанзаде (21-22 ноября 2013 г.). – Баку, – С. 109-111.
11. Гильфанов М.А., Дуркин С.М., Назаров А.В. Математическая модель скважины, дренирующей трещиновато-пористый коллектор // VIII Международный технологический симпозиум "Передовые технологии разработки, повышения нефтегазотдачи месторождений и исследования скважин" Москва, РАНХиГС при Президенте РФ, 20-21 марта 2013. – С. 112-121.

Свидетельства и патенты:

1. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ, №2013619167, Гидрогазодинамический комплекс-симулятор «Ekaterina», Правообладатель: Дуркин Сергей Михайлович, дата государственной регистрации в Реестре программ для ЭВМ 26 сентября 2013 г.