

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
НАУКИ ИНСТИТУТ ПРОБЛЕМ МЕХАНИКИ ИМ. А.Ю. ИШЛИНСКОГО
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

На правах рукописи

Барков Святослав Олегович

**ГЕОМЕХАНИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ И
ФИЛЬТРАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ В НИЗКОПРОНИЦАЕМЫХ
НЕФТЕГАЗОВЫХ ПЛАСТАХ В УСЛОВИЯХ СЛОЖНОГО
НАГРУЖЕНИЯ**

1.1.8. Механика деформируемого твердого тела

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук
Карев Владимир Иосифович

Москва – 2024

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
ГЛАВА 1. РАЗВИТИЕ ПОДХОДОВ К МОДЕЛИРОВАНИЮ МЕХАНИЧЕСКИХ И ФИЛЬТРАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ В ГОРНЫХ ПОРОДАХ.....	18
1.1 Аналитические и численные методы моделирования механических и фильтрационных процессов в нефтегазовых пластах.....	23
1.2 Физическое моделирование механических и фильтрационных процессов в нефтегазовых пластах.....	37
1.3 Выводы по Главе 1.....	50
ГЛАВА 2. НАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ПОРОД В ОКРЕСТНОСТИ СКВАЖИН ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ГЕОМЕТРИЯХ ЗАБОЯ И УСЛОВИЯХ ЗАЛЕГАНИЯ.....	52
2.1 Напряжения в окрестности открытого ствола скважины.....	53
2.2 Напряжения в окрестности кончика перфорационного отверстия...	57
2.3 Напряжения в окрестности стенок перфорационного отверстия в обсаженной и необсаженной скважине.....	59
2.4 Выводы по Главе 2.....	63
ГЛАВА 3. ГЕОМЕХАНИЧЕСКИЕ ИСПЫТАНИЯ.....	64
3.1 Объекты исследований.....	64
3.2 Экспериментальное оборудование.....	65
3.3 Подготовка кернового материала.....	69
3.4 Определение степени анизотропии упругих свойств пород по результатам ультразвукового прозвучивания.....	70
3.5 Определение упруго-прочностных характеристик пород по данным трехосных испытаний.....	72
3.5.1 Методика трехосных испытаний.....	72

3.5.2	О правомерности испытаний в эффективных напряжениях ..	74
3.5.3	Прямое сравнение ИСТНН и ГТ-1.3.9 при трехосных испытаниях	79
3.6	Программы нагружения образцов для физического моделирования механических и фильтрационных процессов в окрестности скважин	81
3.6.1	Программа нагружения образца, отвечающая напряжениям, действующим на контуре необсаженной скважины	82
3.6.2	Программа нагружения образца, отвечающая напряжениям, действующим в окрестности кончика перфорационного отверстия в обсаженной скважине	83
3.6.3	Программа нагружения образца, отвечающая напряжениям, действующим в верхней (нижней) точке на поверхности перфорационного отверстия в необсаженной скважине	85
3.7	Выводы по Главе 3	86
ГЛАВА 4. ИССЛЕДОВАНИЕ ПОРОД-КОЛЛЕКТОРОВ МЕТОДАМИ РЕНТГЕНОВСКОЙ КОМПЬЮТЕРНОЙ ТОМОГРАФИИ		88
4.1	Основные понятия и принципы рентгеновской компьютерной томографии	88
4.2	Экспериментальное оборудование	90
4.3	Методика проведения сканирования, обработки результатов и численного моделирования фильтрационных процессов	91
4.4	Выводы по Главе 4	96
ГЛАВА 5. РЕЗУЛЬТАТЫ КОМПЛЕКСНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ		98
5.1	Верхневилючанское месторождение	98
5.1.1	Ультразвуковое прозвучивание и трехосные испытания	98

5.1.2 Эксперименты по прямому физическому моделированию механических и фильтрационных процессов в окрестности скважины.....	101
5.1.3 Томографические исследования.....	108
5.2 Астраханское месторождение.....	111
5.2.1 Ультразвуковое прозвучивание и трехосные испытания.....	111
5.2.2 Эксперименты по прямому физическому моделированию механических и фильтрационных процессов в окрестности скважины.....	113
5.2.3 Томографические исследования.....	120
5.3 Выводы по Главе 5.....	126
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	129
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	132

ВВЕДЕНИЕ

Работа посвящена экспериментальным исследованиям механических и фильтрационных процессов в низкопроницаемых коллекторах нефтегазовых месторождений и научному обоснованию оптимальных способов геомеханического воздействия на них с целью увеличения продуктивности скважин и нефтегазоотдачи пластов. В настоящее время специалистам и руководству нефтегазовых компаний пришло понимание того, что геомеханические аспекты являются ключевыми в решении проблем увеличения добычи и полноты извлечения углеводородов экологически чистым, экономичным способом на основе использования огромной энергии, запасенной в массиве горных пород в результате действия горного давления и давления пластовых флюидов. Изменение напряженно-деформированного состояния пласта, обоснованное на основе знания деформационных, прочностных, фильтрационных свойств пород-коллекторов и их взаимовлияния, обеспечивает повышение проницаемости пород коллектора при сохранении устойчивости стволов скважин.

Геомеханика, возникшая во второй половине 19-го века на стыке геологии и механики, является теоретической и прикладной наукой о механических свойствах горных пород и породных массивов, и процессах, развивающихся в них в результате различных физических воздействий. Становление и последующие развитие данной науки было обусловлено началом активной разработки месторождений полезных ископаемых, интенсивным строительством зданий, сооружений, дорог и тоннелей, изучением процессов в земной коре, в том числе приводящих к землетрясениям. Основы современной геомеханики, включающей различные направления исследований и прежде всего связанными с проблемами нефтегазодобычи, были заложены в работах таких известных ученых, как D.C. Drucker, W. Prager, K. Terzaghi, M.A. Biot, M.D. Zoback, J.C. Jaeger, N.G.W. Cook, R.W. Zimmerman, R.E. Goodman, С.А. Христианович,

Р.Л. Салганик, Г.И. Баренблатт, С.Г. Лехницкий, М.В. Курленя, А.Г. Протосеня, В.Н. Николаевский, А.Н. Ставрогин, Ж.С. Ержанов и других.

Изучением движения флюидов в пористых и трещиноватых средах занимались такие исследователи, как М. Маскет, Н. Kazemi, J. Клерре, R.A. Morse, Л.С. Лейбензон, Ю.П. Желтов, Л.Г. Лойцянский, В.М. Ентов, К.С. Басниев, И.Н. Кочина, П.Я. Полубаринова-Кочина, Н.Н. Павловский, В.Н. Щелкачев, С.Н. Закиров и другие. Существенный вклад в развитие теории фильтрации также был внесен Г.И. Баренблаттом.

Актуальность работы. На сегодняшний день отечественные и зарубежные нефтегазовые компании проявляют все больший интерес к разработке месторождений с трудноизвлекаемыми запасами (ТРИЗ) нефти и газа в связи с истощением сырьевой базы углеводородного сырья. К ТРИЗ относятся нефтегазовые залежи, которые не могут эффективно разрабатываться с применением традиционных методов по геологическим и технологическим причинам. Одним из основных показателей «трудноизвлекаемости» запасов является низкая проницаемость коллекторов [1]. Примерно 2/3 всех мировых ТРИЗ находятся в низкопроницаемых породах, для которых характерна не только малая проницаемость, но и низкая пористость, что сильно осложняет движение углеводородов к забою скважины. По данным Минэнерго на 2023 год доля ТРИЗ в запасах углеводородного сырья Российской Федерации составляла 60% и, согласно прогнозам, может достигнуть 70% уже к 2030 году. При этом по данным Роснедр примерно 30% ТРИЗ в России сосредоточено именно в низкопроницаемых породах-коллекторах. Отмечается также, что большая часть всех ТРИЗ содержится в месторождениях, открытых более 20 лет назад, но так и не введенных в разработку в связи с отсутствием необходимых технологий разработки и экономической рентабельности [2].

Одним из наиболее перспективных направлений решения указанных проблем представляется использование геомеханического подхода. В его основе лежит тщательное изучение фильтрационных и механических свойств

пород, слагающих низкопроницаемые коллектора, создание адекватных механико-математических моделей, описывающих процессы деформирования и разрушения пород-коллекторов, а также физическое моделирование на установках истинно трехосного независимого нагружения реальных напряженно-деформированных состояний, возникающих в коллекторах нефтегазовых месторождений при их эксплуатации. Знание механических и фильтрационных характеристик продуктивного пласта необходимо для создания геомеханической модели месторождения, на основе которой создается проект его разработки, а также для разработки способов повышения продуктивности скважин, нефтеотдачи пластов и обеспечения устойчивости стволов скважин при бурении и эксплуатации. При этом важнейшим фактором, который необходимо учитывать при геомеханическом моделировании месторождений с ТРИЗ, является зависимость фильтрационных свойств низкопроницаемых пород-коллекторов от напряжений, возникающих в них в процессе эксплуатации скважин, а также при проведении различных технологических операций.

В настоящее время практически все российские компании взяли курс на использование разработанной в США технологии многостадийного гидроразрыва пласта (МГРП) [3, 4]. Но эта технология создана для разработки сланцевых месторождений нефти и газа, залегающих на небольших глубинах (до полутора-двух километров), и малопригодна для разработки пластов, залегающих на глубинах три и более км. При этом основной эффект данного подхода заключается в образовании в пласте магистральных трещин, что приводит к увеличению площади фильтрации, но не оказывает существенного влияния на проницаемость пород-коллекторов в целом. Кроме того, применение этой технологии связано с большими затратами энергии и материальных ресурсов, она имеет чрезвычайно экстенсивный характер, требует бурения все новых и новых скважин и представляет значительную экологическую опасность. Использование данного подхода в

низкопроницаемых коллекторах может привести и к негативным результатам из-за медленного выноса жидкости разрыва и блокированием ею трещины.

Создание новых низкзатратных экологически чистых технологий, обеспечивающих длительный эффект за счет формирования в пласте новой искусственной системы фильтрационных каналов с высокой проницаемостью, может стать ключом к решению проблем разработки месторождений с низкопроницаемыми коллекторами.

Влияние напряженно-деформированного состояния на фильтрационные свойства низкопроницаемых пород-коллекторов на сегодняшний день мало изучено. Это во многом объясняется тем, что определить данную зависимость можно только при прямом физическом моделировании процессов деформирования, разрушения и фильтрации в породах-коллекторах на установках истинно трехосного нагружения (УИТН), позволяющих нагружать исследуемые кубические образцы независимо и одновременно по каждой из трех осей и создавать тем самым в них реально возникающие в пластах при разработке и эксплуатации месторождений неравнокомпонентные поля напряжений [5, 6].

Геомеханический подход лежит в основе разработанной в Институте проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН (ИПМех РАН) новой технологии повышения продуктивности нефтяных и газовых скважин – метода направленной разгрузки пласта (НРП) [7, 8]. Отличие данной технологии от традиционных состоит в том, что эффект достигается не путем прочистки существующих в породе продуктивного пласта фильтрационных каналов (закачивания кислот, вибровоздействия и т.д.), что не всегда бывает возможно, а в результате создания новой искусственной системы фильтрационных каналов, обладающей значительной проницаемостью. Образование новой системы фильтрационных каналов происходит при растрескивании и разрушении породы за счет создания в пластах напряженных состояний необходимого вида и уровня, используя для этого внутренние силы, запасенные в них природой – горное давление

вышележащих пород и пластовое давление нефти и газа. Это огромный запас энергии, но использование его для месторождений разных типов и условий залегания имеет свои особенности, без учета которых можно не только не добиться увеличения дебита скважин, но даже ухудшить ситуацию. В связи с этим важным является проведение адаптации метода НРП к условиям конкретных месторождений и проведение экспериментальных исследований возможности его реализации.

Таким образом, идея данного подхода заключается в том, чтобы за счет создания необходимого напряженного состояния вызвать появление системы микро- и макротрещин в окрестности скважины, которые тем самым увеличат проницаемость породы и способствуют увеличению коэффициента извлечения углеводородов из пласта. Данное напряженное состояние может быть достигнуто путем понижения давления на забое скважины, а также изменением конструкции забоя скважины: снятием обсадки, дополнительной перфорацией определенного типа и плотности, нарезанием щелей определенной ориентации [9]. Выбор способа воздействия на пласт осуществляется на основе моделирования механических и фильтрационных процессов, протекающих в призабойной зоне скважины с использованием установок истинно трехосного нагружения, позволяющих измерять проницаемость в ходе нагружения, например на Испытательной системе трехосного независимого нагружения ИПМех РАН (ИСТНН) [10]. Данные экспериментальные исследования позволяют определить оптимальные конструкции забоя скважин для конкретных месторождений и величины депрессий, которые позволят увеличить проницаемость пород-коллекторов. Кроме того, испытания пород-коллекторов на установке ИСТНН позволяют изучить вопросы устойчивости стволов скважин и дать практические рекомендации о безопасных режимах их бурения и эксплуатации, не приводящих к негативным процессам в пласте. Важность экспериментальных исследований проведенных на установке ИСТНН трудно переоценить.

Особый научный интерес вызывает изучение изменений внутренней структуры низкопроницаемых пород-коллекторов после реализации метода НРП. Проведение подобных комплексных исследований возможно при помощи методов рентгеновской компьютерной томографии (РКТ). Применение методов РКТ для изучения кернового материала нефтегазовых месторождений является достаточно новым и перспективным направлением исследований. Данный подход позволяет «заглянуть» внутрь породы, не разрушая ее структуры. Рентгеновское излучение при прохождении сквозь горную породу теряет мощность пропорционально ее плотности и регистрируется матрицей приемника, формируя пиксельное изображение. По результатам сканирования формируется большой объем данных, включающий тысячи проекций изучаемого образца, которые в дальнейшем реконструируются в его трехмерную модель. Томография кернового материала позволяет детально изучать геометрию пустотного пространства породы (поры, каверны, трещины) [11, 12]. Применение современного программного обеспечения и новейших подходов численного моделирования позволяет на трехмерных структурах породы вычислять проницаемость и визуализировать фильтрационные потоки [13, 14]. В лаборатории геомеханики ИПМех РАН томографические исследования горных пород осуществляются при помощи высокоразрешающего рентгеновского микротомографа ProCon X-Ray CT-MINI [15].

В данной работе на установке истинно трехосного нагружения ИСТНН проведено физическое моделирование процессов деформирования, разрушения и фильтрации в низкопроницаемых породах-коллекторах Астраханского газоконденсатного месторождения (ГКМ) и Верхневиллючанского нефтегазоконденсатного месторождения (НГКМ). Изучено влияние напряженно-деформированного состояния на фильтрационные свойства исследуемых низкопроницаемых пород-коллекторов. Определены наиболее оптимальные конструкции забоя для скважин данных месторождений, при которых реализация метода НРП

позволит увеличить проницаемость пород, слагающих продуктивные пласты. Методами РКТ при помощи высокоразрешающего рентгеновского микротомографа ProCon X-Ray CT-MINI изучена внутренняя структура исследуемых пород, получены трехмерные цифровые модели образцов, изготовленных из кернового материала исследуемых месторождений, после испытаний на установке ИСТНН. При помощи методов численного моделирования на трехмерных цифровых структурах образцов породы визуализированы фильтрационные потоки и вычислена конечная трещинная проницаемость. Проведено сравнение конечной трещинной проницаемости образцов, определённой экспериментально на установке ИСТНН и при помощи методов численного моделирования.

Целями настоящей работы являются:

1. Экспериментальное исследование упруго-прочностных и фильтрационных характеристик низкопроницаемых пород-коллекторов в условиях реальных напряжений, возникающих в призабойной зоне вертикальных и горизонтальных скважин, имеющих различную конструкцию забоя.

2. Изучение процессов деформирования, разрушения и связанного с ними изменения проницаемости низкопроницаемых пород-коллекторов под действием неравномерного напряженно-деформированного состояния пласта методами геомеханического моделирования и рентгеновской компьютерной томографии.

3. Обоснование способов оптимального геомеханического воздействия на скважины, пробуренные на низкопроницаемые залежи, на примере конкретных месторождений.

Для достижения целей работы ставились и решались следующие **задачи**:

1. Обзор методов математического и физического моделирования механических и фильтрационных процессов в горных породах, анализ преимуществ и недостатков существующих подходов и оборудования.

2. Анализ напряженно-деформированного состояния в окрестности скважин для различных конструкций забоя и условий залегания.

3. Разработка программ нагружения, воспроизводящих реальные напряженные состояния в окрестности скважин исследуемых месторождений, возникающие при проведении различных технологических операций.

4. Физическое моделирование процессов деформирования, разрушения и фильтрации при геомеханическом воздействии на пласт.

5. Определение зависимости фильтрационных свойств исследуемых низкопроницаемых пород от вида и уровня напряженно-деформированного состояния.

6. Проведение сканирования исследуемых образцов при помощи высокоразрешающего рентгеновского микротомографа. Обработка данных рентгеновской компьютерной томографии.

7. Подготовка трехмерных цифровых структур образцов к проведению на них численного моделирования фильтрационных процессов в низкопроницаемых породах-коллекторах.

8. Разработка рекомендаций по оптимальному воздействию на пласт с целью повышения продуктивности скважин и нефтегазоотдачи пласта для условий конкретных месторождений.

Положения, выносимые на защиту:

1. Разработана методика физического моделирования реальных напряженно-деформированных состояний, возникающих в продуктивных пластах исследуемых нефтегазовых месторождений, сложенных низкопроницаемыми породами.

2. Экспериментально установлены закономерности деформирования, разрушения и изменения фильтрационных свойств низкопроницаемых пород-коллекторов исследуемых месторождений при моделировании процессов, происходящих при понижении забойного давления в окрестности вертикальных и горизонтальных скважин для различных конструкций забоя.

3. Разработана методика проведения томографических исследований пород-коллекторов, включающая подготовку образцов, подбор оптимальных параметров сканирования, обработку массива данных РКТ и их трехмерную реконструкцию, фильтрацию и сегментацию полученных изображений, проведение численного моделирования фильтрационных процессов на трехмерных цифровых структурах образцов. Разработанная методика реализована для низкопроницаемых пород-коллекторов исследуемых месторождений с целью изучения механизмов их деформирования и разрушения.

4. Определены параметры оптимального геомеханического воздействия на низкопроницаемые пласты исследуемых месторождений с целью повышения продуктивности скважин и нефтегазоотдачи пластов.

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций подтверждаются: корректностью постановки задач; использованием в ходе исследований фундаментальных законов механики сплошных сред; применением в экспериментах методического подхода, проверенного многолетней практикой; использованием испытательного и измерительного оборудования с высокими метрологическими характеристиками; строгой математической обработкой результатов экспериментальных исследований с применением хорошо апробированных методов.

Методы исследований включают: анализ научной литературы и накопленного опыта исследований по теме работы, применения классических моделей для соответствующих геомеханических расчетов; экспериментальные исследования на образцах пород-коллекторов с использованием различных методов и режимов их нагружения на установке истинно трехосного нагружения, последующие обработка и теоретический анализ результатов; экспериментальные исследования внутренней структуры образцов при помощи высокоразрешающего рентгеновского микротомографа,

включающие сканирование образцов, цифровую обработку и подготовку данных для проведения последующего численного моделирования.

Объектами исследований являются низкопроницаемые породы продуктивных горизонтов нефтегазовых месторождений.

Научная новизна исследований заключается: в разработке методики проведения прямого физического моделирования механических и фильтрационных процессов в окрестности скважины для условий исследуемых месторождений, сложенных низкопроницаемыми породами, на установке истинно трехосного нагружения; в определении упруго-прочностных и фильтрационных характеристик низкопроницаемых пород-коллекторов исследуемых месторождений по результатам лабораторного моделирования; в установлении характера деформирования и разрушения низкопроницаемых пород-коллекторов в условиях сложного нагружения; в установлении зависимости от времени и напряженно-деформированного состояния проницаемости исследуемых низкопроницаемых пород в условиях сложного трехосного нагружения; в определении оптимальных конструкций забоя скважин, которые при реализации метода НРП способны привести к повышению фильтрационных характеристик низкопроницаемых пород-коллекторов и увеличению продуктивности скважин соответственно; в разработке методики проведения томографических исследований низкопроницаемых пород-коллекторов, включающую подготовку образцов, подбор оптимальных параметров сканирования, обработку массива данных РКТ и их трехмерную реконструкцию, фильтрацию и сегментацию полученных изображений, проведение численного моделирования фильтрационных процессов на трехмерных цифровых структурах образцов; в изучении образования системы микро- и макротрещин в породах-коллекторах при реализации метода НРП на основе данных РКТ.

Практическая значимость. Результаты проведенных испытаний позволили сделать выводы об оптимальных для данных месторождений режимах эксплуатации скважин с целью поддержания устойчивости стенок

скважин и недопущения негативных процессов в пласте. На основе проведенных геомеханических исследований по разработанной методике определены условия, которые необходимо создать в низкопроницаемых породах исследуемых месторождений, чтобы значительно повысить их проницаемость и, тем самым, продуктивность скважин. Сделана предварительная оценка величин депрессий, необходимых для поддержания устойчивости стенок скважин либо для реализации явления увеличения проницаемости пород в призабойной зоне скважин с различными геометриями забоя. Экспериментально определенные упруго-прочностные характеристики пород, а также зависимости их проницаемости от напряженно-деформированного состояния при истинно трёхосном нагружении могут быть использованы для построения геомеханических моделей исследуемых месторождений, используемых для проектирования и установления оптимальных режимов эксплуатации скважин. На основе проведенных по разработанной методике томографических исследований определен наиболее эффективный подход к численному моделированию фильтрационных процессов на трехмерных структурах низкопроницаемых пород-коллекторов с целью оценки их трещинной проницаемости после геомеханического воздействия.

Апробация работы. Результаты диссертационной работы были представлены и обсуждались на российских и международных научных конференциях, таких как:

1. XV International Conference and School «Problems of Geocosmos – 2024», Section «Rock Mechanics and Mining Sciences», St. Petersburg University, St Petersburg, Russia, April 22-26, 2024.

2. XIII Всероссийский съезд по теоретической и прикладной механике, г. Санкт-Петербург, 21-25 августа 2023 г.

3. V Всероссийская молодежная научная конференция «Актуальные проблемы нефти и газа», ИПНГ РАН, Москва, Россия, 20-21 октября 2022 г.

4. International science and technology conference «Earth science», Far Eastern Federal University, Vladivostok, Russia, October 25-26, 2022.

5. Восьмая международная научная школа молодых ученых «Физическое и математическое моделирование процессов в геосредах», ИПМех РАН, Москва, Россия, 12-14 октября 2022 г.

6. Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых учёных «Ломоносов-2022», МГУ им. Ломоносова, Москва, Россия, 11-22 апреля 2022 г.

7. Седьмая международная научная конференция-школа молодых ученых «Физическое и математическое моделирование процессов в геосредах», ИПМех РАН, Москва Россия, 20-22 октября 2021 г.

Работы по теме диссертации отмечены наградами:

1. Диплом за лучший доклад среди молодых ученых на XIII Всероссийском съезде по теоретической и прикладной механике (Санкт-Петербург) в симпозиуме «Механика в нефтегазовой отрасли» (2023 г.).

2. Диплом с присуждением поощрительной премии за научную работу в конкурсе на лучшие научные работы среди молодых ученых и студентов ИПМех РАН за 2023 год.

3. Диплом 1-й степени. Первое место на V Всероссийской молодежной научной конференции «Актуальные проблемы нефти и газа» в секции «Экспериментальные и теоретические исследования керна и пластового флюида» (2022 г.).

Публикации. Список трудов по диссертационной работе составляет 21 публикацию, 4 из которых опубликованы в журналах из списка ВАК РФ, 5 – в научных сборниках, индексируемых в Scopus, 12 – в материалах и сборниках тезисов научных конференций.

Личный вклад автора. Автор принимал непосредственное участие в постановке научных задач, вошедших в диссертационную работу, их решении, анализе результатов и подготовке публикаций. Соискателем выполнены обзор и анализ литературы, проведены подготовка к испытаниям и предварительные

исследования образцов исследуемых пород. Анализ напряженного состояния в окрестности скважин для различных геометрий забоя и условий залегания, а также разработка программ нагружения образцов осуществлялись совместно с научным руководителем и соавторами публикаций. Проведение испытаний образцов на установке ИСТНН и их последующее сканирование на высокоразрешающем микротомографе ProCon X-Ray CT-MINI осуществлены автором лично. Обработка и анализ результатов геомеханических испытаний на установке ИСТНН, а также обработка массива данных РКТ и численное моделирование фильтрационных процессов на трехмерных цифровых структурах образцов осуществлены совместно с научным коллективом лаборатории геомеханики. Апробация основных результатов работы на конференциях и съездах осуществлена лично соискателем.

Структура и объём работы. Диссертационная работа состоит из введения, 5 глав, заключения и списка литературы. Общий объём работы составляет 150 страниц, включая 42 рисунка и 4 таблицы. Список литературы содержит 186 наименований.

ГЛАВА 1. РАЗВИТИЕ ПОДХОДОВ К МОДЕЛИРОВАНИЮ МЕХАНИЧЕСКИХ И ФИЛЬТРАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ В ГОРНЫХ ПОРОДАХ

До недавних пор в геомеханике выделяли всего два основных направления исследований – механику грунтов и механику горных пород [16]. В фокусе первого направления исследований находится изучение механических свойств грунтов и механических процессов, возникающих в них при проведении строительных работ на поверхности земли и вблизи нее. При этом основное внимание уделяется взаимодействию грунтов с фундаментами сооружений. Второе направление исследований изучает механические свойства горных пород и процессы, возникающие в горном массиве и связанные главным образом с проведением в нем горных работ. Таким образом, геомеханика изначально применялась только в горном строительстве при возведении наземных и подземных сооружений различного назначения, однако начиная со второй половины 20-го века методы геомеханики начали использоваться и в нефтегазовой отрасли для решения таких задач, как определение параметров безопасной и эффективной разработки и эксплуатации скважин, повышение нефтеотдачи пластов (ПНП), увеличение полноты выработки месторождений и оценка устойчивости стенок скважины. На сегодняшний день можно с уверенностью говорить об окончательном формировании третьего направления исследований геомеханики – нефтегазовой геомеханики [9, 17], которая находит все более широкое признание среди специалистов нефтегазовой промышленности и стремительно развивается, постоянно расширяя спектр решаемых задач. В дальнейшем роль нефтегазовой геомеханики в решении инженерных проблем, возникающих при добыче углеводородов, будет только возрастать ввиду активного вовлечения в разработку новых месторождений с трудноизвлекаемыми запасами и применения в связи с этим различных

дорогостоящих технологий, например, горизонтального бурения, гидроразрыва пластов и других методов воздействия на продуктивные пласты.

Отметим, что отставание в развитии геомеханики в нефтегазовой отрасли обусловлено тем, что для геомеханики в общем характерно изучение таких крупномасштабных объектов, как многокилометровые толщи, а нефтегазовая геомеханика изучает породные массивы во много меньшем масштабе, определяемом степенью влияния производственных процессов, происходящих в коллекторе или вокруг скважин в процессе бурения. К тому же следует отметить, что породы со слабыми прочностными характеристиками и обладающие свойствами сыпучих тел исследуются механикой грунтов. Для механики горных пород характерно изучение плотных высокопрочных пород, свойства которых резко отличаются от свойств грунтов. Нефтегазовая геомеханика в этом отношении находится на стыке данных двух направлений, поскольку породы-коллекторы зачастую представлены достаточно твердыми, но пористыми образованиями. Коллекторами нефтегазовых месторождений могут быть песчаники, известняки и некоторые глинистые породы, которые не испытывают уплотнения из-за наличия жидкости, заблокированной в порах и не покинувшей их даже на глубине в несколько километров [17].

Сегодня одним из самых распространенных методов, используемых в нефтегазовой геомеханике для описания механических и фильтрационных процессов в нефтеносных и газоносных пластах, является моделирование. В современном мире невозможно представить какую-либо область знания и деятельности человека без использования данного метода. Под моделированием понимают процесс замещения исследуемого объекта его условным представлением, т.е. моделью [18]. В нашем случае объектами являются месторождение, пласт-коллектор, скважина и т.д. Модель должна максимально точно отображать геологическое строение пласта-коллектора и движение флюида в нем, фильтрационные процессы, динамику работы скважины, прогнозные показатели добычи и коэффициента извлечения нефти

(КИН), разумеется, в пределах погрешности. Вся суть метода моделирования сводится к познанию свойств объекта и процессов, происходящих в нем, путем исследования не самого объекта, а его модели. Различают математическое и физическое моделирование, которые взаимодополняют друг друга. При этом каждый из подходов имеет свои достоинства и недостатки.

Математическое моделирование заключается в построении и изучении математической модели. Описание исследуемых процессов и явлений происходит с помощью совокупности математических соотношений, уравнений и неравенств, отображающих основные закономерности, присущие данным процессам и явлениям [19]. Чаще всего математические методы моделирования позволяют описать только идеальный объект или процесс. Осуществление связи математической модели и реального объекта происходит с помощью эмпирических законов, гипотез и упрощений. Среди всех методов математического моделирования можно выделить аналитические, статистические и численные [20].

Статистическое моделирование – это ничто иное, как многомерный регрессионный анализ, позволяющий установить статистическую связь изучаемого параметра с набором факторов, влияющих на него. Статистическая связь устанавливается на основе обобщения имеющегося опыта, в нашем случае за все время разработки месторождений. Главной задачей статистического моделирования является обработка накопленных данных, например, по объемам извлекаемой нефти, за прошедший период и их дальнейшая экстраполяция [21]. Статистические методы в нефтегазовой отрасли используются главным образом для прогнозирования объемов добычи нефти. Подробный обзор развития статистических методов в нефтегазовой отрасли представлен в работе [22].

Для моделирования механических и фильтрационных процессов в нефтегазовых пластах повсеместно применяются аналитические и численные методы. Аналитические модели используются в основном для описания достаточно простых систем, так как применение данного метода к сложным

системам вызывает ряд математических сложностей. Для построения аналитической модели при описании свойств и параметров изучаемого объекта приходится прибегать к существенным упрощениям, что сказывается на точности получаемых результатов. Несмотря на это, аналитические модели позволяют найти явные функциональные зависимости между искомыми величинами, а также определить численные решения для заданных начальных и граничных условий. С точки зрения математики такие модели способны корректно отражать связь между входными и выходными данными. Следует отметить, что структура аналитических моделей может не отражать внутреннюю составляющую изучаемого объекта. По сути, аналитические модели – это уравнения или системы уравнений, представленные в виде алгебраических, дифференциальных, интегральных или конечно-разностных соотношений с определенными начальными и граничными условиями [23].

Результатом аналитического моделирования являются аналитические выражения или уравнения для искомым величин. Постоянное улучшение электронно-вычислительной техники, увеличение вычислительной мощности компьютеров и появление специализированных программных комплексов способствовало активному развитию в нефтегазовой отрасли и численных методов моделирования. При их использовании исходные данные задачи и получаемые решения представляются в виде набора чисел. Численные методы применяются в том случае, когда аналитически решить поставленную задачу достаточно трудно ввиду отсутствия простых явных зависимостей для исследуемой системы. Основоположниками численных методов являются Д. Писман и Х. Рэчфорд [24].

Под физическим моделированием понимают создание лабораторной физической модели в количественно уменьшенном масштабе и последующее проведение эксперимента на определенных установках, воспроизводящих природу исследуемых явлений. Затем результаты, полученные в данных экспериментах, распространяются на реальные масштабы. Физическое моделирование применяется в основном в том случае, когда точного

математического описания исследуемого явления или процесса невозможно получить, или же когда требуется проведение достаточно большого объема вычислений, что труднореализуемо. Подобная ситуация возникает, например, при моделировании фильтрационных процессов, происходящих в породах с анизотропией упругих и прочностных свойств [25, 26]. Особая трудность построения математической модели появляется при работе со слоистыми породами и наклонно-направленными скважинами. Отметим, что для получения корректных результатов при физическом моделировании, необходимо соблюдение как геометрического, так и физического подобия модели и реального объекта. Физическое моделирование механических и фильтрационных процессов, реально протекающих в нефтеносных и газоносных пластах при разработке и эксплуатации скважин, а также проведения на них различных технологических операций, возможно только на установках истинно трехосного нагружения (УИТН), позволяющих нагружать исследуемые образы пород-коллекторов независимо по каждой из трех осей, поскольку после пробуривания скважины поле напряжений в ее окрестности становится существенно неравнокомпонентным.

Без использования методов математического и физического моделирования невозможно осуществить построение геомеханических, гидродинамических, а также гораздо более сложных 4D-геомеханических моделей нефтегазовых месторождений [27, 28]. Для построения последних используются 3D-геомеханическая и гидродинамическая модели месторождения, в связи с чем их также называют совмещенными геомеханико-гидродинамическими моделями. Под 3D-геомеханическим моделированием понимают решение трехмерной краевой задачи механики сплошной среды на структурной геологической модели среды, наделенной механическими свойствами [29]. Итогом моделирования являются рассчитанные поля напряжений и деформаций [30]. Внести временную составляющую в статическую 3D-геомеханическую модель позволяет использование гидродинамических расчетов, включающих распределение

порового давления по всему моделируемому объему [31]. Для построения трехмерной геомеханической модели месторождения необходимо осуществить построение одномерных 1D-геомеханических моделей по траекториям скважин месторождения [32]. При этом основную часть одномерной геомеханической модели составляет модель механических свойств (ММС), включающая такие упруго-прочностные характеристики породы, как E – модуль Юнга, ν – коэффициент Пуассона, G – модуль сдвига, K – модуль объемного сжатия, c – удельное сцепление, φ – угол внутреннего трения, а также пределы прочности на сжатие и растяжение. Для определения данных характеристик необходимо проведение ГИС и лабораторных испытаний кернового материала (трехосных испытаний). Особенно важной информацией при создании геомеханических моделей является знание зависимости проницаемости пород-коллекторов от их напряженно-деформированного состояния (НДС). Следует заметить, что изучить зависимость фильтрационных свойств пород-коллекторов от вида и уровня НДС можно только при прямом физическом моделировании. Таким образом, результаты исследований, проводимых в данной диссертационной работе, могут быть использованы в том числе для наполнения экспериментальными данными геомеханических моделей исследуемых месторождений.

Далее проводится обзор развития аналитических и численных методов моделирования механических и фильтрационных процессов в нефтегазовых пластах, а также обзор основных экспериментальных установок, используемых для прямого физического моделирования механических и фильтрационных процессов на образцах, изготовленных из кернового материала.

1.1 Аналитические и численные методы моделирования механических и фильтрационных процессов в нефтегазовых пластах

Развитие аналитических и численных методов моделирования механических и фильтрационных процессов в нефтегазовых пластах будем

рассматривать в контексте развития геомеханики как науки. Рассмотрим основные работы, которые послужили фундаментом при формировании геомеханики и ее основных направлений исследований.

Возникновение геомеханики во второй половине 19-го века связывают с началом активного изучения процессов, обусловленных сдвижением горных пород при подземных разработках. Под сдвижением горных пород обычно подразумевают перемещение и деформирование массива горных пород (потеря сплошности), а также любых объектов, находящихся выше проведения горных работ, в том числе и на земной поверхности. Обобщение опыта проведения горных работ позволило выдвинуть предположение о том, что горный массив, находящийся над очистной выработкой, перемещается вертикально вниз, на периферии же происходят смещения к границам выработки [33]. Таким образом над очистной выработкой наблюдаются деформации сжатия, а в краевых зонах – деформации растяжения.

В конце 19 – начале 20-го века многие инженеры и ученые начали изучение горного давления и его проявлений. Был предложен ряд гипотез, объясняющих механизмы явлений в массиве горных пород, происходящих в силу естественных причин и антропогенного воздействия. Возникновение данных гипотез было бы невозможным без инструментальных наблюдений за сдвижением горных пород (деформирование пород, развитие трещин, разломы), проводимых еще во второй половине 19-го века. Тогда же впервые возникло представление об «естественных напряжениях» (исходных) в породных массивах.

В первых представлениях вертикальные напряжения по порядку величины должны были совпадать с горизонтальными. Данная гипотеза была выдвинута швейцарским геотектоником А. Геймом в 1878 г. Немецкий же инженер В. Тромпетер в 1899 г. предположил существование в горных выработках трех зон с отличающимися напряженными состояниями. В то же время стали появляться работы, рассматривающие пласты горных пород в кровле выработки как изгибающуюся балку.

В 1907 году нашим соотечественником М.М. Протодяконовым была опубликована монография «Давление горных пород на рудничную крепь» [34], в которой получила развитие гипотеза «свода давления». Данная гипотеза основана на предположении, что любые горные породы рассматриваются, как несвязные тела, к которым можно применить законы сыпучих тел. Согласно этой гипотезе, горный массив давит на кровлю выработки только своим весом в пределах объема параболического свода. Протодяконов получил формулу расчета давления пород на рудничную крепь, а также впервые ввел понятие кажущегося коэффициента трения (коэффициента крепости). Данная работа положила начало развитию теории горного давления. Отметим, что на этом этапе развития геомеханики активно использовались методы расчета, в основе которых лежали положения теории сопротивления материалов. Следует заметить, что до работы Протодяконова для расчета горного давления на крепь согласно гипотезе Турнера [35] учитывали вес всего столба пород, находящегося над выработкой (вес толщи пород до земной поверхности), что приводило к неверным, завышенным результатам, например, в расчетном методе Л.Д. Шевякова [36].

В 1920 – 30-х годах для изучения горного давления стали использовать методы теории упругости. Применить теорию упругости для описания напряженно-деформированного состояния пород впервые предложил А.Н. Динник [37] в 1925-1926 гг. Им была решена задача теории упругости для полупространства при нулевых горизонтальных компонентах деформации, а также были рассмотрены условия равновесия единичного объема породы в виде кубика. При решении данной задачи Динник ввел понятие коэффициента исходного бокового давления. Главным отличием гипотезы Динника от гипотезы Гейма было несовпадение горизонтальных напряжений по величине с вертикальными, величина последних была больше. Появление теории Динника позволило определять напряжения в породном массиве до начала горных работ. Одновременно с этим в 1926 году связать напряжения с упругими свойствами пород попытался и немецкий ученый Р. Шмидт, что

позже отразилось в его работе [38]. Отметим, что знание истинных значений напряжений на различных глубинах представляет огромную практическую значимость. Подведя небольшой итог можно сказать, что в 1920 – 30-е годы при изучении горного давления впервые были использованы понятия об упругих средах, уравнения равновесия, а также закон Гука. Важно заметить, что использование методов теории упругости основывается на предположении, что породный массив является однородным и обладает свойством сплошности. В целом, аналитические исследования напряженно-деформированного состояния горных пород осуществляются с использованием методов механики сплошной и дискретной среды. При этом решение геомеханических задач аналитическими методами выполняется главным образом в плоской постановке в двумерном пространстве, что вызвано большими математическими трудностями, возникающими при решении данных задач в трехмерной постановке. К тому же большая протяженность пластов позволяет сводить большую часть задач к плоской постановке [39].

В последующих работах А.Н. Динник, а также А.Б. Моргаевский и Г.Н. Савин [40] начали активно развивать применение в горном деле методов решения задач теории упругости. Достаточно подробно были описаны распределения напряжений вокруг выработок с различными формами поперечного сечения. Особое внимание уделялось прямоугольным, круглым и эллиптическим формам сечений. В то же время чилийским геологом Р. Феннером была отмечена огромная важность учета пластичности горных пород, а также их неоднородности [41]. Экспериментальное подтверждение этому нашел Д.В. Филлипс, который показал, что при определенных нагрузках горные породы начинают проявлять свойства пластичности и ползучести.

В историческом контексте обязательно нужно отметить, что к концу 30-х годов широкое развитие получили натурные инструментальные измерения за сдвижением горных пород. Оборудование некоторых точек на поверхности горных выработок позволяло измерять их смещения не только в

пространстве, но и во времени. В 1935 году Д.Д. Головачевым был разработан и внедрен в повсеместное использование метод разгрузки, позволяющий определять действующие напряжения с измерением деформаций полного упругого восстановления [42], в первую очередь в скважинах. Суть данного метода заключается в измерении деформации керна во время выбуривания с определенным шагом по времени и после его извлечения. Полученная разница в деформациях является основой для расчётов главных напряжений на основе теории упругости. Данный метод позволяет определять не только значения, но и направления действия напряжений. Для измерения деформации керна используются тензодатчики, которые наклеивают на заранее подготовленную поверхность забоя скважины. Отметим, что к этому времени методы теории упругости и сопротивления материалов были достаточно развиты.

Наряду с развитием натуральных инструментальных измерений были начаты лабораторные исследования деформационно-прочностных характеристик горных пород, принимающие во внимание минералогический состав пород, а также их трещиноватость. В 1948 году начало лабораторным исследованиям положил Г.Н. Кузнецов, который занимался моделированием проявлений горного давления на образцах из эквивалентных материалов [43]. Суть метода эквивалентных материалов Г.Н. Кузнецова состоит в том, что на физических моделях с определенными допущениями при соблюдении условий механического подобия Ньютона, включающих кинематические, геометрические и динамические подобия, изучаются определенные физические процессы для разных горно-геологических условий.

Дальнейшее развитие геомеханики было связано с расширением применения аналитических методов решения геомеханических проблем. Профессором В.Д. Слесаревым были предложены формулы для вычисления предельных пролетов кровли выработки, а также для определения давления на крепь забоя очистной выработки [44]. В 1951 году А. Лабассом была сформулирована гипотеза «предельного растрескивания» [45], согласно которой кровля выработки при переходе в зону разгрузки из зоны опорного

давления начинает активно растрескиваться, что вызывается достаточно большой разницей между главными напряжениями. Значительных успехов в использовании аналитических методов в геомеханике, применительно к эллиптическим выработкам, добились С.Г. Михлин [46], Д.И. Шерман [47], С.Г. Лехницкий [48]. Задачи взаимодействия крепи с горными породами выработок кругового сечения были решены Г.Н. Савиным [49] и И.В. Родиным [50]. В их трудах впервые рудничная крепь была рассмотрена в виде упругого кольца, помещенного в круговой вырез. Ф.А. Белаенко применил эту же идею, но к вертикальному стволу с крепью [51]. При этом в его исследовании принимались во внимание упругопластические деформации.

Заметим, что для определения напряженно-деформированного состояния массива при заданных граничных условиях необходимо, чтобы в каждой точке рассматриваемой области выполнялись общие уравнения механики сплошной среды, включая уравнения равновесия и уравнения совместности деформаций, а также физические уравнения, связывающие напряжения и деформации (закон состояния материала). В зависимости от выбранного закона состояния применяется соответствующий метод: теории упругости, теории пластичности или теории предельного состояния [39]. Существенного прогресса в методах расчета напряженно-деформированного состояния массива горных пород удалось добиться непосредственно с внедрением подходов, основанных на теории пластичности и предельного равновесия [52].

Для решения упругопластической задачи применяются различные гипотезы. Так, например, в книге К.В. Руппенейта [53] при описании распределения напряжений вблизи выработки с круговым поперечным сечением вводилось предположение о несжимаемости пород в зоне пластических деформаций, а на границе упругой и пластической зон использовалось условие непрерывности перемещений. При этом в качестве условия пластичности принимался критерий Кулона-Мора. Решения упругопластических задач с учетом разрыхления (увеличения объема)

плотных пород в области пластического деформирования представлено в работах Н.П. Немчина [54] и Ю.М. Либермана [55].

Огромную роль в изучении проблем устойчивости границ горных выработок сыграли труды В.В. Соколовского [56] и С.С. Голушкевича [57]. Ими было предложено несколько инженерных методов расчета предельного состояния породного массива возле одиночных выработок, вертикальных скважин и кровли горных выработок. Согласно теории предельного равновесия, основы которой были заложены Соколовским и Голушкевичем, компоненты напряжений в областях предельного равновесия связаны не только уравнениями равновесия, но еще и уравнением предельного состояния, являющимся условием прочности массива. Развивая идеи данных работ Г.Л. Фисенко в 1955-1965 годах создал несколько расчетных методов, применяемых при открытой разработке месторождений [58, 59]. Большой вклад в развитие теории упругости анизотропного тела внес С.Г. Лехницкий. Отметим, что практически все горные породы являются анизотропными, а наибольшее влияние на их анизотропию оказывает трещиноватость. При работе с образцами пород выделяют три взаимно перпендикулярных направления, по которым изучаются свойства пород. Огромное внимание, как правило, уделяется направлению напластования. Именно С.Г. Лехницкий в 1950-м году смог поставить и решить задачу распределения смещений и напряжений в трансверсально-изотропном массиве вблизи вертикальной скважины [48].

Все фундаментальные исследования в области геомеханики, начатые в середине прошлого века, были вызваны резким увеличением объемов добычи полезных ископаемых, что повлекло за собой такие горно-технологические катастрофы, как обрушения горных пород, внезапные выбросы газа и угля в шахтах, разрушение скважин, горные удары. Этот исторический этап характеризуется активным развитием математических, а также физических моделей породных массивов блочного строения и трещиновато-пористых пород, обладающих упругими, пластическими и фильтрационными

свойствами. Применение методов математической теории упругости и пластичности в геомеханике получило широкое распространение после публикации работ С.А. Христиановича и Г.И. Баренблатта, [60] в 1955 году, в которых были подробно описаны закономерности распределения напряжений в породных массивах, образование зон опорного давления, разгрузки и расслоения при разработке пологих пластов. Большой вклад в развитие представлений о процессах деформирования и разрушения в материалах, в том числе в горных породах, внесли работы Р.Л. Салганика [61-64]. Для изучения развивающихся во времени упругих и пластических деформаций в горных породах используются методы вязкоупругости и вязкопластичности. Большой вклад в решение различных задач геомеханики в окрестности горных выработок на основе изучения ползучести горных пород внесли Ж.С. Ержанов [65], А.П. Максимов [66], Ю.Н. Работнов [67], В.Т. Глушко и А.З. Широков [68]. Отдельно стоит отметить работы К. Терцаги [69, 70] и М. Био [71, 72], которые легли в основу теории пороупругости, описывающей совместный механизм деформирования пористых сред и течения жидкости. Существенный вклад в развитие нефтегазовой геомеханики и изучение множества геомеханических проблем, возникающих на всех этапах разработки нефтяных и газовых месторождений, был внесен М.Д. Зобаком [73].

В нефтедобывающей промышленности главной задачей при разработке месторождений было и остается обеспечение устойчивости стволов скважин, а также поддержание и увеличение дебита скважин. В конце 1980 г. именно С.А. Христиановичем было высказано предположение о том, что главным фактором, оказывающим влияние на фильтрационные свойства пласта-коллектора, является процесс деформирования и последующего разрушения грунтового скелета пород под воздействием внутренних напряжений. Отметим, что С.А. Христианович занимался активным изучением фильтрации флюидов в горных породах и способов увеличения проницаемости пород-коллекторов, что позволяло влиять на дебит скважин [74]. Следует

обязательно упомянуть и разработку теории гидравлического разрыва пласта (ГРП), основы которой были заложены Ю.П. Желтовым и С.А. Христиановичем в 1955 году [75]. Под ГРП подразумевается процесс закачки в скважину жидкости с расходом, при котором скважина не успевает ее поглощать. В результате чего в скважине наблюдается рост давления, и при определенном критическом значении давления в пласте начинают образовываться трещины под действием потока газа или жидкости. ГРП является одним из самых эффективных методов интенсификации добычи углеводородов в нефтегазовой промышленности. В последующем теория ГРП получила развитие во многих странах мира, а ее результаты продолжают активно использоваться и по сей день. В дальнейшем С.А. Христиановичем была предложена идея более экономичной и экологически чистой технологии повышения продуктивности скважин нефтеотдачи пласта – метода направленной разгрузки пласта (НРП) или метода георыхления, развитие которого было продолжено исследователями лаборатории геомеханики ИПМех РАН В.И. Каревым, Ю.Ф. Коваленко, К.Б. Устиновым и др.

Последующее развитие геомеханики связано с развитием электронно-вычислительной техники, численных методов моделирования и разработкой метода конечных элементов (МКЭ) в частности. Большинство методов решения задач фильтрации, а также возникновения и распространения трещин основаны на МКЭ. В проведении расчетов появилась возможность учесть неоднородность, блочность и слоистость горных массивов, что сделало возможным детальное изучение полей напряжений в горных массивах при разработке месторождений и возведении сложных конструкций. Благодаря этому методу расчета стало возможным осуществление геомеханического моделирования. Отметим, что для решения задач фильтрации также часто используют метод конечных разностей (МКР).

Начало изучению фильтрационных процессов в горных породах было положено в середине 19 века французскими учеными А. Дарси и Ж. Дюпюи. В первых исследованиях рассматривалась фильтрация жидкостей через

фиктивный грунт, т.е. через однородную среду, состоящую из шаров одинакового размера, уложенных одинаковым образом по всему объёму пористой среды. В их работах были предложены эмпирические зависимости фильтрации жидкости под действием градиента давления. А. Дарси смог получить формулу, описывающую скорость фильтрации жидкости, подчиняющейся в своем движении закону Навье-Стокса (ньютоновская жидкость) [76]. Отметим, что для неньютоновских жидкостей зависимость между перепадом давления и скоростью фильтрации может быть или нелинейной, или вообще дифференциальной. Ж. Дююи смог рассчитать дебит скважин в условиях притока грунтовых вод [77]. Дальнейшая разработка общей задачи теории фильтрации пластовой жидкости к скважине была осуществлена Н.Е. Жуковским, который смог вывести из уравнения Лапласа дифференциальные уравнения фильтрации [78, 79]. В последующих работах Ч. Сликхтером было добавлено научное обоснование влияния структуры порового пространства на фильтрационные процессы, происходящие в однородных средах. Одновременно с этим Ф. Форхгеймером была отмечена огромная важность использования теории потенциалов при описании распределения фильтрационных потоков в пласте-коллекторе [80, 81]. В начале 20 века было открыто число Рейнольдса, которое определило границы применимости закона Дарси. Детально значимость данного параметра была разобрана Н.Н. Павловским [82, 83].

В 1934 г. Л.С. Лейбензон смог получить дифференциальные уравнения движения газа и так называемой «шипучей жидкости» (газированной жидкости) [84, 85]. Примерно в это же время эмпирическим путем отдельности Й. Козени и Ф.К. Карманом была получена формула, связывающая проницаемость, пористость и удельную поверхность в идеальной пористой среде [86, 87]. Данная формула, характеризующая фильтрационные особенности пластовой жидкости, в последующем стала называться формулой Козени-Кармана. В это же время Х. Адзуми публикует свою работу, в которой говорит о возможности представления любого

пористого тела в виде системы параллельных цилиндрических капилляров с различными диаметрами [88].

Все перечисленные выше работы послужили основой для формирования отдельной науки, получившей название «подземная гидромеханика». М. Маскет смог обобщить все предыдущие исследования в области фильтрации и впервые записал дифференциальные уравнения совместного движения нефти, воды и газа в нефтеносных и газоносных пластах. Следует отметить огромный вклад в развитие теории фильтрации П.Я. Кочиной, которая предложила расчетные методы определения дебита любых наклонно-направленных скважин [89].

С середины 20 века развитие теории фильтрации продолжается в двух направлениях. С одной стороны, описание движения жидкостей в пластах проводится на основе закона сохранения момента, массы и энергии, а с другой стороны, движение жидкостей в неоднородных пластах коллектора и призабойных зонах рассматривается с учетом задания граничных и начальных условий, а также установившегося или неуставившегося притока к месту выработки. В первом направлении развития теории фильтрации отметим научные работы А.С. Монины и А.М. Яглома [90], Х. Шлихтинга [91], а также Л.Г. Лойцянского [92]. Во втором направлении огромный вклад был внесен такими учеными, как Г.И. Баренблатт [93], Ю.П. Желтов [94], В.Н. Николаевский и К.С. Басниев [95], П.М. Огибалов и А.Х. Мирзанджанзаде [96], а также В.Н. Щелкачев [97, 98] и Ю.И. Стклянин совместно с А.П. Телковым [99].

На сегодняшний день в нефтегазовой науке численные методы позволяют решать дифференциальные уравнения как двухмерной, так и трехмерной многофазной фильтрации, под которой понимают совместное течение газов и жидкостей (эмульсии). Однако использование численных методов для решения задач нефтегазовой промышленности было начато еще в середине 20-го века. В первых работах использование данных методов позволило произвести расчёт дифференциальных уравнений одномерной

однофазной фильтрации. В данном направлении можно отметить работы Г. Смита [100] и А. Митчелла [101]. Появлению данных работ способствовало возникновение упрощенной модели пласта горной породы «песок-глина» («коллектор-неколлектор») в 60-х годах 20-го века. Развитию моделирования фильтрационных процессов в пласте-коллекторе способствовала также работа М. Маскета [102], в которой впервые пласт представлялся в виде совокупности трубок тока. Усовершенствование данного представления в дальнейшем послужило основой для модели Баклея-Левретта (БЛ-модель), в которой не принимаются во внимание капиллярные эффекты, а также модели Маскета-Левретта (МЛ-модель), в которой действия капиллярных сил учитываются. Первая из указанных моделей применяется к прискважинным зонам, а вторая – к основной части продуктивного пласта. Отметим, что большую значимость играет задача сопряжения данных двух моделей [103].

В середине 70-х годов начинаются попытки описания двумерной однофазной и многофазной фильтрации. В 1973 году Дж. Ричардсон и Г. Стоун [104] опубликовали работу, в которой представили подробный анализ статей, посвящённых моделированию многофазной фильтрации. Отметим, что на данном этапе почти все внимание уделялось систематизации, алгоритмизации и усовершенствованию методов расчета дифференциальных уравнений. Огромный вклад в двумерное моделирование однофазной фильтрации был внесен Д. Писманом, Г.Г. Вахитовым, Х. Рэчфордом и Р. Картером. Моделированием двумерной многофазовой фильтрации занимались Дж. Нолен, Р. Макдональд, К. Коутс и др. В решении полномасштабным трехмерных моделей значительных успехов добились М.М. Максимов и Л.П. Рыбицкая [105], С.Н. Закиров, Б.Е. Сомов и В.Я. Гордон [106], а также Р.М. Кац и А.Р. Андриасов [107]. В 1968 году Дж. Мартин получил соотношения, в которых было учтено вертикальное капиллярно-гравитационное равновесие в пласте. Выведенные им зависимости определялись начальным положением границ между флюидами и относительными проницаемостями пород. Под вертикальным равновесием

понимается состояние, при котором сумма всех сил, движущих флюид в направлении, перпендикулярном направлению основного потока, равна нулю. В это же время были созданы явные и неявные схемы расчета. В 1974 году были окончательно разработаны методы, в которых распределение по вертикали определяется в основном силами вязкого трения, а не гравитационно-капиллярными силами. Моделированием трещиноватых коллекторов занимались Х. Каземи, Р. Морзе и Дж. Клеппе. В их работах пластовая система трещин представляется в виде сплошной среды, а движения флюидов в трещинах определялось уравнением материального баланса, содержащим компоненты, описывающие процесс накопления жидкостей в трещинах и обмен между ними. [108, 109]. Каземи аппроксимировал трещиноватый коллектор слоистой системой, в которой высокопроницаемые слои (трещины) чередовались с низкопроницаемыми и высокопористыми слоями [110]. Для описания фильтрационных процессов в трещиноватых коллекторах использовались и другие упрощенные модели среды. Например, Дж. Уоррен и П. Рут [111, 112] представляли неоднородный коллектор в виде одинаковых прямоугольных параллелепипедов с высокой пористостью и низкой проницаемостью, которые разделялись системой высокопроницаемых трещин. А. де Сваан аппроксимировал матрицу породы сферическими блоками, пространство между которыми считал трещинами [113].

В последние десятилетия 20-го века в нефтегазовой науке преимущественно стали использовать стохастические методы моделирования коллекторов. Заметим, что переход от детерминированного моделирования к стохастическому был обусловлен необходимостью воспроизведения в моделях реальной изменчивости геологической среды. При отсутствии случайных величин среди параметров модели ее называют детерминированной, а при наличии таковых – стохастической. Методы стохастического моделирования в основном используются при геологическом моделировании для создания основы гидродинамических моделей, которые являются детерминированными. Главным преимуществом

гидродинамической модели на основе стохастического моделирования выступает корректное отображение геологической структуры (неоднородности, закономерности пространственного распределения фильтрационно-емкостных свойств и фаций). Главным недостатком таких моделей можно назвать их вариативность (неоднозначность). Важно заметить, что исходными данными для создания геологических моделей служат данные разведочной геофизики и ГИС. Поэтому геологическая модель не является полностью определенной, так как о строении и свойствах исследуемого пласта приходится судить на основе данных, полученных в отдельных точках, и их дальнейшей интерполяции. Геологические модели могут быть ретроспективными или статическими. Ретроспективные модели позволяют изучить геологического прошлое конкретного месторождения, что делает возможным исследование условий накопления углеводородов в природном пласте и их начального распределения. Построение статических моделей проводят для определения строения месторождения до начала его разработки (модель строят для конкретной даты). Отметим, что на сегодняшний день большинство ученых и инженеров используют именно стохастические модели, поскольку они приводят к более реалистичным показателям разработки.

На протяжении всей истории численных методов по мере того, как вычислительная техника становилась мощнее, ученые начинали строить все более сложные модели. Вскоре вычислительных мощностей опять не хватало. Как только совершенствовались компьютеры, начинали усложняться модели и т.д. Современный этап развития численных методов связан с разработкой специализированного программного обеспечения, позволяющего производить расчеты в кратчайшие сроки с минимальными ресурсными затратами. Новейшее программное обеспечение также позволяет соединять информацию из разнообразных источников данных и методы в одной модели. В начале 21-го века были разработаны параллельные вычисления на

многопроцессорных компьютерах, что ускорило развитие численных методов и позволило решать крупномасштабные задачи.

1.2 Физическое моделирование механических и фильтрационных процессов в нефтегазовых пластах

В современном мире основным источником получения информации о физико-механических свойствах горных пород, а также механических и фильтрационных процессах, происходящих в них, является эксперимент (прямое физическое моделирование). Создание и применение для описания геомеханических процессов математических моделей также является основным инструментом исследования и прогнозирования геомеханических процессов. Однако для реальных горных пород, обладающих анизотропией упругих и прочностных свойств, характеризующихся большим числом деформационных, прочностных и фильтрационных параметров, математическое моделирование связано с большими трудностями. К тому же изучить зависимость фильтрационных свойств пород от их напряженно-деформированного состояния, что является особо ценной информацией при построении геомеханических моделей нефтегазовых месторождений, возможно только при прямом физическом моделировании на специальных экспериментальных установках.

Наиболее распространенными установками, применяемыми для определения физико-механических свойств пород, являются установки осесимметричного трехосного сжатия (стабилометры). Поскольку принципиальная схема подобных установок впервые была предложена Теодором фон Карманом [114], их также называют установками кармановского типа. На рисунке 1.1 представлена принципиальная схема данных установок, с которой можно ознакомиться в Приложении «Д.1» ГОСТа 12248-2010 [115].

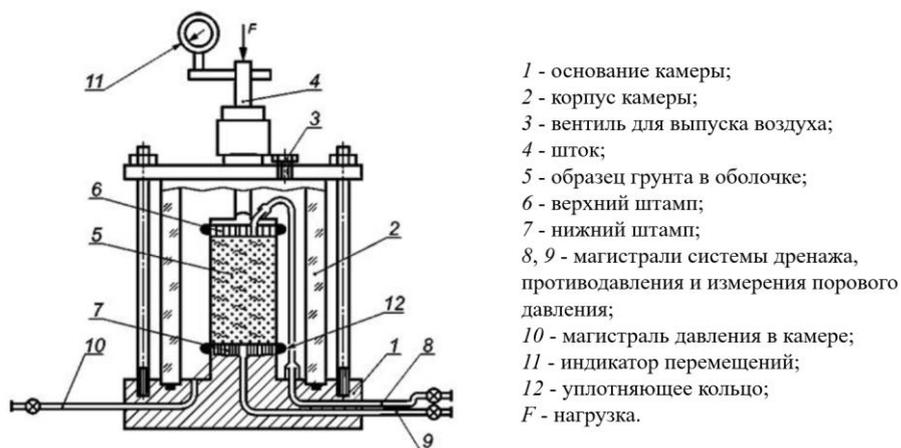


Рисунок 1.1 – Принципиальная схема установки для испытания грунта методом трехосного сжатия (ГОСТ 12248-2010, Приложение «Д.1»)

Установки кармановского типа предназначены для испытания цилиндрических образцов породы. Нагружение образцов осуществляется за счет всестороннего обжатия жидкостью в испытательной камере и приложения независимой девиаторной нагрузки вдоль оси образца. При этом испытываемые образцы обязательно помещаются в герметизирующую оболочку. В подобных установках реализована возможность создания в образцах порового давления и осуществления фильтрации через образец жидкости с определенным перепадом давлений, что при измерении объемного расхода фильтрующейся жидкости позволяет определять проницаемость образцов. Для измерения деформаций образцов могут использоваться датчики линейных перемещений (LVDT-датчики), которые устанавливаются на боковую поверхность образца для измерения локальных деформаций или монтируются непосредственно на штампы для измерения полных деформаций образца. Для более точных измерений малых деформаций образцов могут использоваться тензометрические датчики, однако их использование сопровождается рядом трудностей.

Установки кармановского типа активно используются исследователями по всему миру. Зарубежом наибольшее распространение получили установки осесимметричного трехосного сжатия компании MTS, в особенности модели

815 и 816 [116, 117]. Отечественным лидером в производстве широкой линейки различного, не уступающего зарубежным аналогам, оборудования для испытаний грунтов и горных пород, в том числе и установок осесимметричного трехосного сжатия, является ООО НПП «Геотек» [118].

Важно заметить, что установки кармановского типа позволяют нагружать образец лишь в двух независимых направлениях: вдоль оси образца и в радиальном направлении. В связи с этим данные установки не позволяют воспроизводить реальные напряженные состояния, возникающие в окрестности скважин в процессе бурения, эксплуатации и проведения на них различных технологических операций. При этом главным достоинством установок кармановского типа является возможность создания в образцах термобарических условий (порового давления и температуры), соответствующих пластовым, что позволяет проводить испытания образцов как в полных, так и в эффективных напряжениях.

На сегодняшний день при помощи экспериментальных установок, сконструированных по схеме Кармана, продолжаются исследования зависимости проницаемости пород от вида и уровня их напряженно-деформированного состояния. Так, например, У. Брейс проводил измерение проницаемости гранита при различных значениях всестороннего сжатия и порового давления [119]. В его исследовании всестороннее обжатие образца варьировалось от 25 до 444 МПа, а поровое давление – от 15 до 40 МПа. Согласно результатам проведенного исследования было установлено, что проницаемость гранита уменьшается с увеличением эффективного всестороннего сжатия, под которым понимается разница между всесторонним сжатием и поровым давлением. К аналогичным результатам пришли М. Патсулс и Дж. Гриппс при испытаниях йоркширского мела [120]. Изучением влияния порового давления и всестороннего сжатия, на проницаемость трещин занимался Дж. Уолш [121]. Им было показано, что проницаемость трещин увеличивается или уменьшается соответственно с увеличением или уменьшением эффективного всестороннего сжатия

(эффективного сжимающего напряжения). В работе Уолша была получена эмпирическая зависимость, согласно которой корень кубический из абсолютной проницаемости породы по жидкости k пропорционален эффективному сжимающему напряжению:

$$\sqrt[3]{k} \sim p_e = p_c - s \cdot p_p, \quad (1.1)$$

где p_e – эффективное сжимающее напряжение, p_c и p_p – всестороннее сжатие и поровое давление соответственно, а s – константа, меняющаяся от 0,5 до 1,0 в зависимости от топографии поверхностей трещин и типа породы. Китайскими учеными В. Чжу и Т. Вонгом проводились исследования проницаемости песчаников, которые подвергались всестороннему сжатию в диапазоне от 13 до 550 МПа при поровом давлении 10 МПа [122]. В данной работе наблюдалось уменьшение проницаемости образцов при уменьшении их деформаций, что противоречит результатам описанных выше исследований и подчеркивает важность проведения экспериментов по прямому физическому моделированию механических и фильтрационных процессов в горных породах. В общем случае было установлено, что проницаемость пород увеличивается с увеличением порового давления и уменьшается с увеличением всестороннего сжатия [123]. При этом величина всестороннего сжатия оказывает более существенное влияние на проницаемость, чем величина порового давления. В работе П. Конечны и А. Кожушниковой [124] при испытаниях осадочных пород и угля также было продемонстрировано, что увеличение всестороннего сжатия приводит к существенному уменьшению проницаемости всех исследуемых пород из-за закрытия пор и трещин. В работе [125] отмечается, что изменение проницаемости и пористости в зависимости от эффективного сжимающего напряжения имеет особенно сложный характер для низкопроницаемых пород. В частности, для низкопроницаемых пород обычно наблюдается значительное падение проницаемости именно в диапазоне низких эффективных напряжений, сопровождающееся небольшим снижением пористости. В работе А.Л. Хашпера [126] также экспериментально было установлено, что при

увеличении эффективного сжимающего напряжения (или снижении порового давления) происходит необратимое снижение проницаемости пород. В данной работе помимо прочего приводится краткий обзор основных отечественных работ, посвящённых исследованию напряженно-деформированного состояния пород на их фильтрационные характеристики, где отмечаются работы таких авторов, как О.Ю. Кашников, Ю.А. Кашников, В.В. Попов, С.П. Радионов, А.Т. Карманский, В.И. Карев и Ю.Ф. Коваленко.

Как ранее было отмечено, существенным недостатком установок кармановского типа является возможность создавать в цилиндрических образцах лишь псевдотрехмерные напряженные состояния, что не позволяет воссоздавать в образцах истинно трехмерные напряженные состояния, реально возникающие в пластах в окрестности скважин. Для проведения прямого физического моделирования механических и фильтрационных процессов, протекающих в призабойной зоне пласта в процессе разработки и эксплуатации скважин, используются конструктивно более сложные установки истинно трехосного нагружения (УИТН), которые позволяют нагружать исследуемые образцы независимо и одновременно вдоль трех взаимно перпендикулярных осей.

Проектирование и изготовление подобных установок является технологически сложной задачей, у которой не существует единого инженерно-конструкторского решения. Все представленные в мире УИТН являются уникальными в своем роде и не производятся серийно (в отличие от установок кармановского типа), поскольку разрабатывались для проведения определенных научных исследований конкретных типов пород. В зависимости от потребностей УИТН могут быть также оборудованы системами для создания порового (пластового) давления в образцах и измерения их проницаемости, регулирования температурного режима, определения скорости прохождения ультразвуковых волн и измерения параметров акустической эмиссии. Все это приводит к усложнению и удорожанию изготовления установок. К тому же использование тех или иных

измерительных систем может накладывать ограничения на программы нагружения, максимально допустимые нагрузки, размеры образцов и т.д. При этом труднореализуемо совместить все измерительные комплексы в рамках одной установки ввиду конструктивных особенностей различных видов нагружающих узлов.

В настоящее время существует общепринятая классификация УИТН, которая проводится по типу приложения нагрузки к граням образца (типу нажимных плит, применяемых в нагружающем узле) [6, 127]. Согласно данной классификации, выделяют три основных типа УИТН: установки с жесткими плитами, установки с гибкими плитами, установки смешанного типа.

В первом типе установок нагрузка на грани образца передается через жесткие (металлические) плиты, а для ее создания используются гидравлические поршни. Напряжения, создаваемые с помощью подобных установок, по величине значительно превышают напряжения, создаваемые в установках других типов. С помощью установок первого типа можно реализовать абсолютно любые траектории нагружения независимо по каждой из осей. Нагружающий узел данных установок обладает необходимой устойчивостью и позволяет испытывать достаточно большие образцы. В первом типе установок по возможности перемещения нажимных плит можно выделить два подтипа. В установках первого подтипа нажимные плиты перемещаются только по оси приложения нагрузки. В установках второго подтипа нажимные плиты способны перемещаться не только по оси приложения нагрузки, но и в перпендикулярном ей направлении. В установках первого подтипа для недопущения надавливания плит друг на друга их размеры должны быть меньше размеров граней нагружаемых образцов. При испытаниях образцов на подобных установках необходимо учитывать возникновение граничных и угловых эффектов. Установки второго подтипа лишены данного недостатка из-за возможности движения плит перпендикулярно оси приложения нагрузки. Однако для данных установок

необходимо решать проблему возникновения трения между образцом и плитами, что сказывается на точности проводимых измерений.

Второй тип УИТН установок на двух и более направлениях имеет гибкие плиты. Под гибкой плитой подразумевается оболочка из прочного эластичного материала, которая прижимается к поверхности образца и при наполнении жидкостью принимает форму поверхности образца, тем самым исключая возможные краевые эффекты. В некоторых установках давление жидкости может передаваться напрямую к грани образца, помещенного в изолирующий карман или мембрану. С помощью данных установок нельзя создавать большие напряжения из-за небольшой прочности материалов подушек, также нельзя добиться высокой устойчивости нагружающей системы. К тому же существуют ограничения в габаритах образцов. В связи с этим данный тип установок не подходит для моделирования реального напряженного состояния горных пород с глубоких горизонтов.

УИТН третьего (смешанного) типа представляют собой комбинацию двух предыдущих типов. В данных установках усилия в двух направлениях прикладываются жесткими плитами, а по третьей оси – жидкой средой. Впервые данная схема нагружения была предложена К. Mogi [128]. УИТН третьего типа не могут превзойти по величине напряжения, реализуемые в установках первого типа, или, как в установках второго типа, нивелировать краевые эффекты. Однако установки третьего типа позволяют на должном уровне сочетать в себе возможности первых двух типов УИТН. Далее при описании конкретных УИТН будет использоваться именно данная классификация.

В работе зарубежных исследователей [5] проводится обзор установок истинно трехосного нагружения. В своей классификации авторы выделяют тип установок с принципиально отличающимся от общепринятых способом создания неравнокомпонентного напряженного состояния. В качестве примера рассматривается установка, разработанная в Sandia National Laboratories [129]. Данная установка сконструирована на основе классической

установки осесимметричного трехосного сжатия, применяемой для испытания цилиндрических образцов, в связи с чем позволяет проводить фильтрационные испытания. Реализация истинно трехосного нагружения в установке возможна при испытаниях полых цилиндрических образцов. К торцам образца прикладывается девиаторная (осевая) нагрузка жесткими плитами, которыми дополнительно осуществляется кручение. При этом жидкостью снаружи образа и внутри его отверстия создаётся давление для сжатия породы в радиальном направлении. Важно заметить, что для этого образец покрывается герметизирующей оболочкой не только снаружи, но и внутри. Схема приложения нагрузки к полому цилиндрическому образцу в данной установке представлена на рисунке 1.2. Такой метод нагружения плохо подходит для испытаний большинства горных пород из-за их хрупкости. К тому же повторяемость результатов при испытаниях горных пород на кручение слишком низка. Описанная выше установка не подходит для изучения механического поведения твердых пород при больших напряжениях и используется главным образом в экспериментах с мягкими породами и грунтами. Реализовать установку с подобной схемой нагружения планирует ООО НПП «Геотек», о чем было заявлено на выставке по инженерным изысканиям и геотехническому проектированию «Геоинфо FORUM & EXPO 2024».

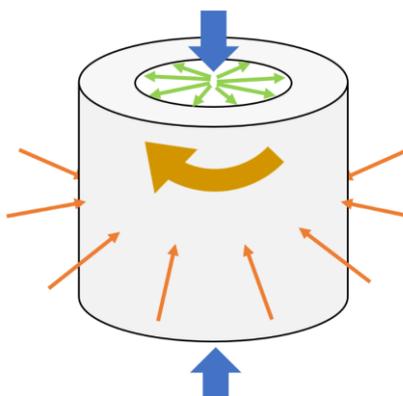


Рисунок 1.2 – Схема приложения нагрузки к полому цилиндрическому образцу в истинно трехосной установке, сконструированной Sandia National Laboratories

Провести классификацию УИТН можно также по скорости нагружения образцов [6]. Во всех перечисленных выше УИТН для создания нагрузки жесткими плитами используются гидравлические системы. Скорость движения гидравлических поршней ограничена, поэтому большинство УИТН предназначены для изучения свойства горных пород и моделирования механических и фильтрационных процессов только в условиях квазистатического нагружения. Однако в процессе разработки месторождений горные породы, изначально находящиеся в трехосном неравнокомпонентном статическом нагружении, могут испытывать динамические (ударные или импульсные) нагрузки из-за проведения взрывных работ и резкого разрушения горного массива, что часто наблюдается в горнодобывающей промышленности. На сегодняшний день для изучения механического поведения горных пород в условиях истинно трехосного нагружения и многократно повторяющихся ударных нагрузок разрабатываются установки с динамическим типом нагружения. В подобных установках к независимому трехосному нагружению вдоль одной или нескольких осей дополнительно прикладывается ударная нагрузка. При этом из-за резкого (импульсного) увеличения напряжений необходимо использование высокоточных и высокочувствительных измерительных систем. На рисунке 1.3 представлена истинно трехосная установка для динамических испытаний пород, разработанная и сконструированная в университете Монаша (Monash University) [130]. Данная установка позволяет прикладывать дополнительную динамическую нагрузку вдоль одной из осей за счет выстрела металлическим штифтом из пневматической пушки. При этом скорость штифта в момент удара может достигать 50 м/с. Приложение квазистатической нагрузки к кубическим образцам с ребром 50 мм осуществляется при помощи гидравлических поршней. Максимальное напряжение по каждой из осей при квазистатическом нагружении может достигать 100 МПа.



Рисунок 1.3 – Истинно трехосная установка, сконструированная в австралийском университете Монаша, для динамических (ударных) испытаний горных пород [130]

В Шэньчжэньском университете (Shenzhen University) была разработана технологически более сложная установка, позволяющая прикладывать импульсную нагрузку вдоль каждой из осей при помощи электромагнитных импульсных генераторов [131]. Для испытаний используют кубические образцы с ребром 50 мм. Максимальное напряжение по каждой из осей при квазистатическом нагружении, также осуществляемом гидравлическими поршнями, может достигать 300 МПа. Преимуществом данной установки является возможность нагрева образцов при нагружении вплоть до 400 °С. Для этого поверх нагружающего узла дополнительно устанавливается нагревательная печь. Отметим, что в данной установке приложение динамической нагрузки вдоль одной оси оказывает существенное влияние на квазистатическое нагружение по двум другим осям, что является серьезным недостатком, существенно осложняющим интерпретацию получаемых данных. На текущий момент продолжаются поиски решения данной проблемы. Описанные выше установки с возможностью динамического нагружения можно отнести к первому типу (первому подтипу) УИТН.

Подробный обзор УИТН с квазистатическим типом нагружения, используемых различными научными коллективами по всему миру,

проводится в работе [132]. Далее, в качестве примера, рассмотрим лишь несколько конкретных УИТН, относящихся к различным типам общепринятой классификации. К первому типу (первому подтипу) УИТН относится установка, используемая в университете Colorado School of Mines [133], которая позволяет нагружать кубические образцы с ребром 30 см. Данная установка используется для моделирования гидроразрыва геотермальных коллекторов. Она позволяет создавать высокие температуры (до 180 °С) и непрерывно нагнетать жидкость в образец (давление жидкости в образце может достигать 70 МПа). В установке дополнительно реализована возможность измерения параметров акустической эмиссии. При этом из-за больших размер образца максимально создаваемое напряжение по каждой из осей не превышает 13 МПа.

Установка, относящаяся к третьему типу, была разработана и сконструирована в Северо-Восточном университете (Northeastern University) под руководством профессора Фенга [134]. Данная установка предназначена для испытания образцов с размерами 50x50x100 мм. Максимальная нагрузка, прикладываемая жесткими плитами к граням образца 50x50 мм и 50x100 мм, составляет 3000 кН и 6000 кН соответственно. Таким образом, максимальные напряжения, создаваемые вдоль данных направлений, составляют 1200 МПа. Сжатие образца вдоль третьего направления осуществляется жидкостью и не превышает 100 МПа. Для недопущения угловых эффектов в данной установке используются перекрывающиеся нагрузочные плиты, т.е. перемещающиеся в направлении перпендикулярном направлению приложения нагрузки. Подобный подход используется в УИТН первого типа (второго подтипа). В нагружающем узле данной УИТН предусмотрена возможность для определения параметров акустической эмиссии. Недостатком установки является отсутствие возможности проведения фильтрационных испытаний.

В Colorado School of Mines на основе классической установки осесимметричного трехосного сжатия также была разработана установка, относящаяся ко второму типу УИТН [135]. При помощи данной установки

проводят испытания цилиндрических образцов породы. Реализация истинно трехосного нагружения осуществляется следующим образом: в осевом направлении образец сжимается жесткими плитами, перпендикулярно осевому направлению с двух сторон сжимается гибкими плитами, которые покрывают 50% его боковой поверхности, свободная часть боковой поверхности обжимается жидкостью. Конструкция гибкой плиты схематическая изображена на рисунке 1.4.

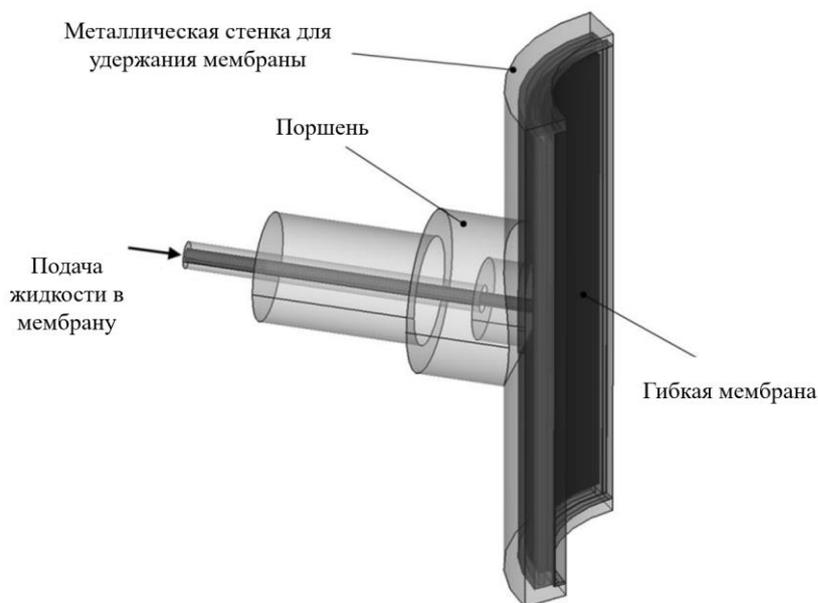


Рисунок 1.4 – Схематическое изображение конструкции гибкой плиты, применяемой в УИТН второго типа Colorado School of Mines [135]

Для приложения нагрузки жесткими и гибкими плитами в осевом направлении и перпендикулярно ему используются гидравлические поршни. Итоговое давление, создаваемое в мембране, соответствует среднему главному давлению σ_2 , а давление жидкости, обжимающей свободную поверхность образца – минимальному главному давлению σ_3 . В установке реализована возможность определения параметров акустической эмиссии, измерения скорости прохождения продольных и поперечных ультразвуковых волн, создания порового давления в образце и определения его проницаемости по жидкости.

При помощи данной установки проводились испытания насыщенных и ненасыщенных песчаников, в которых в том числе изучалось влияние неравнокомпонентного напряжённого состояния на проницаемость образцов [135]. В работе было показано, что проницаемость испытуемых образцов, измеряемая в осевом направлении, уменьшается значительно сильнее при увеличении среднего главного напряжения, чем при увеличении максимального главного напряжения, что может быть связано с закрытием микротрещин, ориентированных в направлении фильтрующейся жидкости. Проведенные исследования указывают на важность изучения фильтрационных характеристик пород в условиях сложного нагружения.

На текущий момент УИТН различных типов активно используются для изучения влияния промежуточного главного напряжения на упруго-прочностные и фильтрационные характеристики пород. Особенно активно изучается вопрос анизотропии проницаемости пород-коллекторов при истинно трехосном нагружении.

В работе [136] на установке, относящейся к первому типу (первому подтипу) УИТН [137], проводились исследования анизотропии проницаемости сланцев в условиях неравнокомпонентного трехосного сжатия. Отмечено, что проницаемость образцов всегда уменьшалась при увеличении главного напряжения, однако при увеличении каждого главного напряжения ее уменьшение было различным. Наибольшее снижение проницаемости наблюдалось при увеличении главного напряжения, нормального к плоскостям напластования. Полученные экспериментальные данные были использованы для построения модели проницаемости сланца в условиях неравнокомпонентного нагружения. Авторы отмечают недостаточность экспериментальных исследований проницаемости сланцев в условиях сложного нагружения.

В работе [138] при помощи УИТН первого типа (первого подтипа) проводилось моделирование истощения газового месторождения (уменьшения пластового давления). Особенностью используемой установки

является возможность измерения проницаемости образцов вдоль трех осей во время одного испытания. Перед испытаниями в некоторых образцах создавали искусственную сквозную трещину в определенном направлении (вдоль одной из осей приложения нагрузки, под углом 15° или 30° к ней) для изучения влияния направления простирания и угла наклона трещины на проницаемости по каждой из осей. В результате проведенных исследований была установлена анизотропия проницаемости как ненарушенных (без трещин) образцов, так и образцов с трещинами в условиях неравнокомпонентного трехосного сжатия. Для последних были изучены зависимости проницаемости не только от эффективных напряжений, но и от направления простирания и угла наклона трещины к каждой из осей. Авторы отмечают важность проведения на УИТН экспериментальных исследований зависимости проницаемости пород-коллекторов от напряженных состояний, реально возникающих в пласте в процессе эксплуатации месторождений.

В лаборатории геомеханики ИПМех РАН для исследования физико-механических свойств пород-коллекторов, а также моделирования механических и фильтрационных процессов, протекающих в продуктивных пластах, используются как классическая установка осесимметричного трехосного сжатия ГТ1.3.9 [118], сконструированная по схеме Кармана, так и установка истинно трехосного нагружения – уникальная Испытательная система трехосного независимого нагружения (ИСТНН) [10], которая относится к первому типу (второму подтипу) УИТН. Подробное описание данных установок будет представлено в разделах 3.2 и 3.5.2 данной диссертационной работы.

1.3 Выводы по Главе 1

В современном мире основным источником получения информации о физических свойствах горных пород и процессах, происходящих в них при разработке, последующей эксплуатации скважин и проведении на них различных технологических операциях, является эксперимент (прямое

физическое моделирование). Создание и применение для описания геомеханических процессов математических моделей также является основным инструментом исследования и прогнозирования геомеханических процессов. Однако для реальных горных пород, обладающих анизотропией упругих и прочностных свойств, характеризующихся большим числом деформационных, прочностных и фильтрационных параметров, математическое моделирование связано с большими трудностями. К тому же изучить влияние напряженно-деформированного состояния на фильтрационные свойства пород-коллекторов можно только при прямом физическом моделировании на специальных экспериментальных установках. Однозначного мнения о влиянии неравнокомпонентного поля напряжений на фильтрационные характеристики низкопроницаемых до сих пор не существует.

На сегодняшний день продолжается активное изучение деформационно-прочностных свойств горных пород, слагающих пласты нефтегазовых месторождений. Исследуется вопрос изменения проницаемости пород при сложном нагружении (неравнокомпонентное трехосное сжатие).

В данной главе рассмотрено развитие подходов к моделированию механических и фильтрационных процессов в нефтегазовых пластах. В контексте развития геомеханики проведен обзор основных работ по аналитическому и численному моделированию механических и фильтрационных процессов в горных породах. Представлен обзор экспериментальных установок, используемых для прямого физического моделирования механических и фильтрационных процессов, протекающих в горных породах в условиях сложного (неравнокомпонентного) нагружения.

ГЛАВА 2. НАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ПОРОД В ОКРЕСТНОСТИ СКВАЖИН ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ГЕОМЕТРИЯХ ЗАБОЯ И УСЛОВИЯХ ЗАЛЕГАНИЯ

Во время разработки нефтегазовых месторождений пробуривание скважин изменяет естественное напряженное состояние в окрестности скважин, приводя к перераспределению напряжений в этой области. При этом напряжения, возникающие в призабойной зоне пласта (ПЗП), могут оказывать существенное влияние на фильтрационные свойства пород-коллекторов и, как следствие, на производительность скважин. Даже незначительное ухудшение проницаемости в окрестности скважины может негативно сказаться на величине ее дебита [139]. Неравнокомпонентное поле напряжений, образующееся в околоскважинной зоне, определяется глубиной залегания, геометрией забоя скважины, режимом эксплуатации, а также зависит от физико-механических свойств массива пород [140].

При различных технологических операциях и режимах эксплуатации скважин в ПЗП могут возникать значительные сжимающие напряжения, способные приводить как к понижению, так и к увеличению проницаемости горных пород [141]. При этом увеличение проницаемости связано главным образом с растрескиванием и разрушением пород в ПЗП под действием возникающих в ней напряжений, а ее уменьшение – с уменьшением поперечных размеров фильтрационных каналов и их затеканием под действием пластического деформирования содержащихся в пласте глинистых пород. Следует также отметить, что на поздних стадиях эксплуатации скважин для сохранения их дебита возникает необходимость дополнительно снижать давление на забое [142]. Данный процесс вызывает увеличение напряжений в призабойной зоне скважины, что также может приводить к существенным деформациям породы вплоть до ее разрушения.

Теоретически невозможно заранее рассчитать каким будет изменение фильтрационных свойств пород-коллекторов в результате изменения поля

напряжений в околоскважинной зоне. Определить влияние напряженно-деформированного состояния на проницаемость пород-коллекторов можно только по результатам прямого физического моделирования на установках истинно трехосного нагружения процессов деформирования и разрушения экспериментальных образцов, изготовленных из кернового материала конкретных месторождений. На сегодняшний день, несмотря на достаточное число экспериментальных исследований кернового материала, влияние неравнокомпонентного поля напряжений на проницаемость пород изучено недостаточно. Определение зависимости проницаемости от напряженно-деформированного состояния является особенно важным для низкопроницаемых пород-коллекторов, поскольку одним из наиболее перспективных подходов к повышению эффективности разработки таких месторождений является геомеханический подход, основанный на управлении напряженным состоянием в окрестности скважины с целью увеличения проницаемости пород-коллекторов.

В данной главе проведен теоретический анализ распределения напряжений в окрестности скважин для различных геометрий забоя и условий залегания. Полученные соотношения будут использованы в Главе 3 для построения программ нагружения, используемых для проведения экспериментов по прямому физическому моделированию механических и фильтрационных процессов, происходящих в продуктивных пластах исследуемых месторождений при реализации метода направленной разгрузки пласта.

2.1 Напряжения в окрестности открытого ствола скважины

В исходном естественном состоянии горные породы, слагающие продуктивные пласты нефтяных и газовых месторождений, находятся в состоянии всестороннего сжатия горным давлением, которое равно весу вышележащих горных пород, т.е. $q = -\gamma h$, где $\gamma = \rho g$ – средний удельный вес горных пород, ρ – средняя плотность пород, а h – глубина залегания

пласта. В общем случае начальное напряженное состояние пласта может быть неравнокомпонентным, поскольку на естественное напряженное состояние пласта помимо веса вышележащих слоев породы оказывают влияние и другие факторы, например, тектонические процессы. Однако если породы пласта коллектора достаточно пластичны, то за геологические времена в результате релаксации касательных напряжений все напряжения в пласте должны были выровняться, так что можно считать, что горное давление в ненарушенном пласте одинаково во всех направлениях, т.е. каждый элемент породы равномерно сжат со всех сторон. Важно заметить, что в таком случае распределение напряжений в окрестности как вертикальной, так и горизонтальной скважин будет идентичным.

Согласно результатам предварительных геофизических исследований скважин Астраханского ГКМ и Верхневиллючанского НГКМ, из которых был отобран керновый материал для проведения исследований в данной работе, породы продуктивного горизонта находятся в состоянии близком к равномерному всестороннему сжатию, а по своим деформационным свойствам являются однородными и изотропными. Изотропность упругих свойств исследуемых пород также была подтверждена по результатам трехосных испытаний и ультразвукового прозвучивания (см. разделы 5.1.1 и 5.2.1). В связи с этим в дальнейшем при проведении анализа распределения напряжений в окрестности скважины исходное природное напряженное состояние пласта будет считаться состоянием всестороннего равномерного сжатия горным давлением.

Проанализируем распределение напряжений, действующих на глубине h в окрестности вертикальной необсаженной скважины радиуса R_c , пробуренной в пласт, который будем считать однородным и изотропным. На рисунке 2.1 в цилиндрической системе координат r, θ, z схематично изображен рассматриваемый элемент породы, находящийся под действием радиального σ_r , окружного σ_θ и вертикального σ_z напряжений. Ось Z направлена вдоль оси скважины.

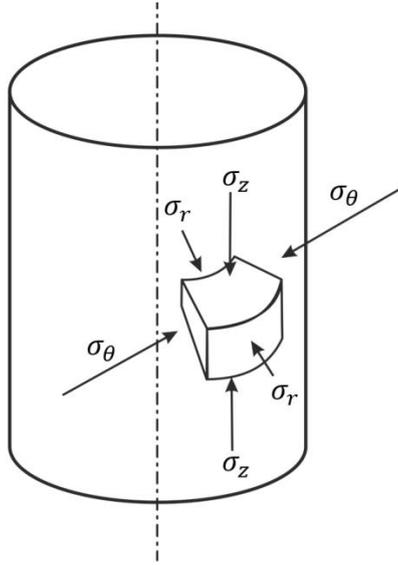


Рисунок 2.1 – Напряжения, действующие в окрестности вертикальной скважины

Напряжения $\sigma_r, \sigma_\theta, \sigma_z$ являются полными напряжениями, действующими в пласте, каждое из которых представляется как сумма эффективного напряжения S_r, S_θ, S_z (скелетные напряжения) и давления флюида $p(r)(1 - \delta)$:

$$\begin{aligned} \sigma_r &= S_r - p(r) \cdot (1 - \delta) \\ \sigma_\theta &= S_\theta - p(r) \cdot (1 - \delta) \\ \sigma_z &= S_z - p(r) \cdot (1 - \delta) \end{aligned} \quad (2.1)$$

где $p(r) > 0$, $\sigma_i < 0$, (здесь и ниже сжимающие напряжения считаются отрицательными), $p(r \leq R_c) = p_c$ – давление на забое скважины, $p(r \gg R_c) = p_0$ – пластовое давление, δ – доля площадок контактов относительно всей поверхности зерна грунтового скелета [75], которая для большинства горных пород находится в интервале от 0 до 0,2. В формализме теории Био $(1 - \delta) = \alpha$ – коэффициент Био [71, 72]. Если в начальном состоянии горные породы находятся в состоянии равномерного всестороннего сжатия, то $\sigma_r = \sigma_\theta = \sigma_z = q$ и соотношения (2.1) можно представить в виде:

$$\begin{aligned} S_r &= q + p_0(1 - \delta) \\ S_\theta &= q + p_0(1 - \delta) \\ S_z &= q + p_0(1 - \delta) \end{aligned} \quad (2.2)$$

После пробуривания скважины, как ранее было отмечено, поле напряжений в окрестности скважины становится неравнокомпонентным, возникают касательные напряжения.

Поскольку диаметр скважины много меньше мощности пласта, можно считать, что при пробуривании скважины пласт испытывает плоскую деформацию. При этом скважину можно рассматривать как толстостенный цилиндр, внешний диаметр которого стремится к бесконечности. Задача определения напряжений и перемещений в толстостенных цилиндрах известна как задача Ламе [143]. Используя решение данной задачи, распределение полных напряжений, обусловленных действием горного давления, в окрестности необсаженной скважины можно представить в виде:

$$\begin{aligned}\sigma_r &= -(q + p_c) \cdot \left(\frac{R_c}{r}\right)^2 + q, \\ \sigma_\theta &= (q + p_c) \cdot \left(\frac{R_c}{r}\right)^2 + q, \\ \sigma_z &= q.\end{aligned}\tag{2.3}$$

При этом максимальные касательные напряжения $\tau = (\sigma_r - \sigma_\theta)/2$ равны:

$$\tau = -(q + p_c) \cdot \left(\frac{R_c}{r}\right)^2.\tag{2.4}$$

В терминах эффективных напряжений, действующих на грунтовый скелет породы с учетом (2.1), получим:

$$\begin{aligned}S_r &= -(q + p_c) \cdot \left(\frac{R_c}{r}\right)^2 + q + p(r) \cdot (1 - \delta), \\ S_\theta &= (q + p_c) \cdot \left(\frac{R_c}{r}\right)^2 + q + p(r) \cdot (1 - \delta), \\ S_z &= q + p(r) \cdot (1 - \delta).\end{aligned}\tag{2.5}$$

Заметим, что объемное сжатие в каждой точке пласта при его упругом деформировании сохраняется:

$$\frac{(S_r + S_\theta + S_z)}{3} = q + p(r) \cdot (1 - \delta).\tag{2.6}$$

Из (2.4) и (2.5) следует, что на стенке скважины, т.е. при $r = R_c$, учитывая, что $p(r = R_c) = p_c$, эффективные напряжения равны:

$$\begin{aligned} S_r &= -\delta \cdot p_c, \\ S_\theta &= 2(q + p_c) - \delta \cdot p_c, \\ S_z &= q + p_c(1 - \delta), \\ \tau &= -(q + p_c). \end{aligned} \quad (2.7)$$

Тогда для величины депрессии на забое скважины $\Delta p = p_0 - p_c$ из (2.7) имеем:

$$\Delta p_c = p_0 - \frac{(s_\theta - 2q)}{(2 - \delta)}. \quad (2.8)$$

Следует отметить, что при определенной разности между горным давлением и давлением в скважине касательные напряжения в некоторой области в окрестности ствола скважины возрастают настолько, что под их действием в данной области порода начинает неупруго деформироваться, растрескиваться и разрушаться. Таким образом, поведение породы перестает быть упругим и уже не может быть описано приведенными выше соотношениями.

2.2 Напряжения в окрестности кончика перфорационного отверстия

Во многих случаях для обеспечения безопасной эксплуатации скважины проводят укрепление ее стенок при помощи обсадных колонн. При этом для осуществления гидродинамической связи с коллектором в обсаженном стволе скважины создают систему перфорационных отверстий. В качестве наиболее распространенной аппроксимации для данного случая выступает модель полусферического кончика перфорационного отверстия. В этом случае для определения напряжений, возникающих в окрестности кончика перфорационного отверстия, можно воспользоваться решением задачи Ламе для сферической полости, находящейся под действием внутреннего и внешнего давлений [144]. Тогда для полных напряжений в окрестности

кончика перфорационного отверстия в сферической системе координат r, θ, φ (рисунок 2.2) можем записать:

$$\begin{aligned} \sigma_r &= -(q + p_c) \cdot \left(\frac{r_c}{r}\right)^3 + q \\ \sigma_\theta = \sigma_\varphi &= \frac{(q + p_c) \cdot \left(\frac{r_c}{r}\right)^3}{2} + q \end{aligned}, \quad (2.9)$$

где r_c – радиус сферической полости, а r – расстояние, измеряемое от центра данной полости.

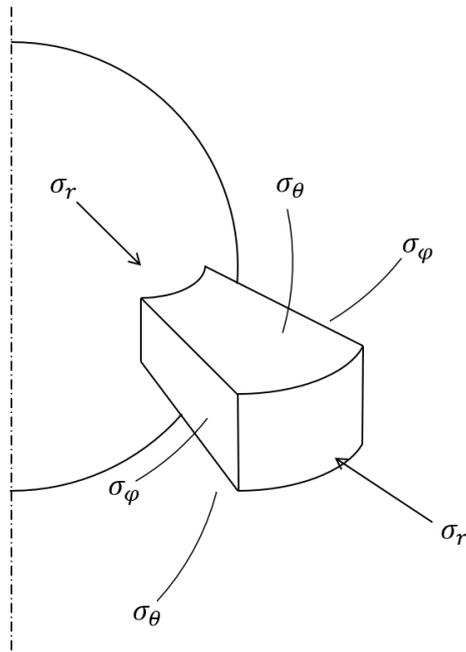


Рисунок 2.2 – Напряжения, действующие в окрестности сферической полости (перфорационного отверстия)

Для эффективных напряжений, действующих в грунтовом скелете в окрестности перфорационного отверстия, получим:

$$\begin{aligned} S_r &= -(q + p_c) \cdot \left(\frac{r_c}{r}\right)^3 + q + p(r) \cdot (1 - \delta) \\ S_\theta = S_\varphi &= \frac{(q + p_c)}{2} \cdot \left(\frac{r_c}{r}\right)^3 + q + p(r) \cdot (1 - \delta) \end{aligned}. \quad (2.10)$$

При этом объемное сжатие в каждой точке пласта при его упругом деформировании также сохраняется:

$$\frac{(S_r + S_\theta + S_\varphi)}{3} = q + p(r) \cdot (1 - \delta). \quad (2.11)$$

Из (2.10) для напряжений на стенках перфорационного отверстия, когда $r = r_c$ и $p(r = r_c) = p_c$, получим:

$$\begin{aligned} S_r &= -\delta \cdot p_c \\ S_\theta = S_\varphi &= \frac{3}{2}(q + p_c) - \delta \cdot p_c \end{aligned} \quad (2.12)$$

2.3 Напряжения в окрестности стенок перфорационного отверстия в обсаженной и необсаженной скважине

Модель полусферического перфорационного отверстия, как было отмечено в разделе 2.2, является наиболее простым и распространенным приближением, используемым для описания перфорационных отверстий в стволе скважины. В действительности перфорационные отверстия являются протяженными и для наиболее точного описания распределения напряжений в их окрестности можно использовать приближение протяженной толстостенной трубы, внешний диаметр которой стремиться к бесконечности. Введем новую цилиндрическую систему r', φ', z' связанную с перфорационным отверстием и укажем напряжения, действующие в окрестности поперечного сечения перфорационного отверстия, отстоящего от оси скважины на расстояние r (рисунок 2.3).

Напряженное состояние в окрестности перфорационного отверстия в обсаженной скважине определяется внешним напряжением от горного давления в глубине пласта q , противодействием на породу со стороны цементного камня и давлением флюида внутри перфорационного отверстия, равным давлению в скважине p_c . Принято считать, что на контуре обсаженной скважины после затвердевания цементного раствора давление восстанавливается полностью до значения горного давления. Поэтому напряжения в окрестности перфорационного отверстия определяются соотношениями, аналогичными соотношениям для необсаженной скважины без перфорационных отверстий (2.5), в которых радиус скважины надо заменить на радиус перфорационного отверстия, а расстояние от оси скважины – на расстояние от оси перфорационного отверстия.

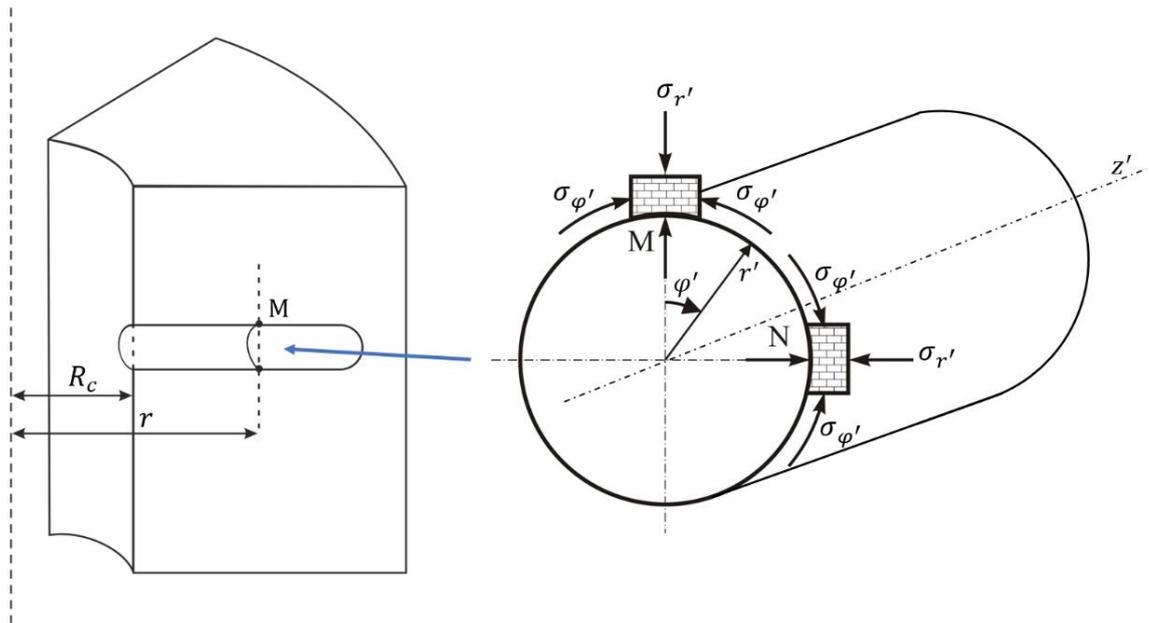


Рисунок 2.3 – Фрагмент стенки скважины с перфорационным отверстием и напряжения, действующие в окрестности поперечного сечения перфорационного отверстия, отстоящего от оси скважины на расстояние r

Таким образом, из решения задачи Ламе [143] для эффективных напряжений, действующих в грунтовом скелете в окрестности перфорационного отверстия в обсаженной скважине, имеем:

$$\begin{aligned}
 S_{r'} &= -(q + p_c) \cdot \left(\frac{R_h}{r'}\right)^2 + q + p(r') \cdot (1 - \delta), \\
 S_{\varphi'} &= (q + p_c) \cdot \left(\frac{R_h}{r'}\right)^2 + q + p(r') \cdot (1 - \delta), \\
 S_{z'} &= q + p(r') \cdot (1 - \delta).
 \end{aligned}
 \tag{2.13}$$

где R_h – радиус перфорационного отверстия, r' – расстояние от центра перфорационного отверстия. Согласно (2.13) в обсаженной скважине напряжения вдоль поверхности перфорационного отверстия постоянны и, полагая $r' = R_h$ и $p(r' = R_h) = p_c$, равны:

$$S_{r'} = -\delta \cdot p_c, \quad S_{z'} = q + p_c(1 - \delta), \quad S_{\varphi'} = 2(q + p_c) - \delta \cdot p_c. \tag{2.14}$$

Для увеличения продуктивности необсаженных скважин, особенно на месторождениях с низкопроницаемыми коллекторами, нередко прибегают к предварительному внесению в пласт концентраторов напряжений –

перфорации определенного вида и плотности, что необходимо для инициации процесса растрескивания породы в ПЗП, приводящего к росту проницаемости пласта.

В этом случае при определении напряжений в окрестности перфорационного отверстия следует учитывать, что оно находится уже не во внешнем поле напряжений от горного давления в глубине пласта q , а в неравномерном поле напряжений от необсаженной скважины $\sigma_r, \sigma_\theta, \sigma_z$, в которой прострелено перфорационное отверстие. В свою очередь поле напряжений вокруг необсаженной скважины определяется горным давлением в глубине пласта q и давлением в скважине p_c согласно (2.3). В связи с этим распределение напряжений в окрестности перфорационного отверстия в необсаженной скважине можно определить, используя суперпозицию решений задачи Ламе [143] и задачи Кирша [144] (рисунок 2.4). При этом, как следует из решения классической задачи Кирша, верхняя точка М (рисунок 2.3) на контуре перфорационного отверстия является наиболее опасной, так как именно в этой области действуют максимальные сжимающие напряжения $\sigma_{\varphi'}$ и максимальные касательные напряжения. Поэтому далее будем рассматривать именно данную точку. Отметим, что в нижней точке на контуре перфорационного отверстия будут действовать такие же напряжения, как и в верхней точке согласно симметрии.

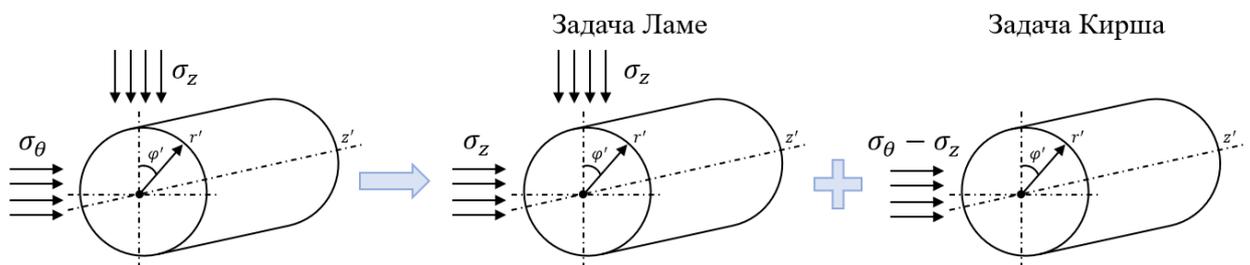


Рисунок 2.4 – Принцип суперпозиции решений задачи Ламе и задачи Кирша, используемый при определении напряжений, действующих в окрестности перфорационного отверстия в необсаженной скважине

В верхней точке М вертикального сечения перфорационного отверстия в системе отсчета r', φ', z' при $r' = R_h$ согласно решению задачи Ламе для полных напряжений можем записать:

$$\sigma_{r'} = -p_c, \quad \sigma_{z'} = \sigma_r(r), \quad \sigma_{\varphi'} = 2\sigma_z + p_c. \quad (2.15)$$

При этом из решения задачи Кирша при $r' = R_h$ следует:

$$\sigma_{r'} = 0, \quad \sigma_{z'} = 0, \quad \sigma_{\varphi'} = 3(\sigma_\theta(r) - \sigma_z). \quad (2.16)$$

Тогда сумма компонент из (2.15) и (2.16) при суперпозиции полей напряжений в верхней точке перфорационного отверстия при $r' = R_h$:

$$\sigma_{r'} = -p_c, \quad \sigma_{z'} = \sigma_r(r), \quad \sigma_{\varphi'} = 3\sigma_\theta(r) - \sigma_z + p_c. \quad (2.17)$$

Тогда в верхней точке М вертикального сечения перфорационного отверстия для изменения эффективных напряжений в зависимости о расстояния от оси скважины имеем:

$$\begin{aligned} S_{r'}(r) &= -\delta \cdot p_c, \\ S_{\varphi'}(r) &= 3(q + p_c) \cdot \left(\frac{R_c}{r}\right)^2 + 2(q + p_c) - \delta \cdot p_c, \\ S_{z'}(r) &= -(q + p_c) \cdot \left(\frac{R_c}{r}\right)^2 + q + p_c(1 - \delta). \end{aligned} \quad (2.18)$$

Из (2.18) видно, что напряжения вдоль поверхности перфорационного отверстия меняются в зависимости от расстояния от скважины (для простоты расчетов рассмотрим случай, когда $\delta = 0$):

$$\begin{aligned} \text{при } r = R_c \quad S_{r'} = S_{z'} = 0, \quad S_{\varphi'} &= 5(q + p_c); \\ \text{при } r = 1,25R_c \quad S_{r'} = 0, \quad S_{z'} = 0,36(q + p_c), \quad S_{\varphi'} &= 3,92(q + p_c); \\ \text{при } r = 2R_c \quad S_{r'} = 0, \quad S_{z'} = 0,75(q + p_c), \quad S_{\varphi'} &= 2,75(q + p_c). \end{aligned} \quad (2.19)$$

Таким образом, из (2.19) видно, что в необсаженной скважине максимальное главное эффективное напряжение на поверхности перфорационного отверстия максимально у стенки скважины и равно $5q$ при полном осушении скважины, а при удалении от скважины постепенно уменьшается.

2.4 Выводы по Главе 2

В Главе 2 представлены результаты теоретического анализа распределения напряжений в окрестности скважины для различных конструкций забоя и условий залегания. Рассмотрены три возможные конструкции забоя: необсаженная скважина (открытый ствол), необсаженная и обсаженная скважина с перфорационными отверстиями. При этом для описания перфорационных отверстий использованы два возможных приближения: полусферическая поверхность (для обсаженного ствола скважины) и протяженная толстостенная труба (для обсаженного и необсаженного ствола скважины). Распределение напряжений в окрестности необсаженного (открытого) ствола скважины, на кончике полусферического перфорационного отверстия в обсаженной скважине и в верхней (нижней) точке на поверхности перфорационного отверстия в обсаженной и необсаженной скважине в приближении толстостенной трубы получено для однородного и изотропного пласта, находящегося в исходном равнокомпонентном напряженном состоянии. Полученные в Главе 2 соотношения будут использованы для построения программ нагружения образцов горных пород в Главе 3.

ГЛАВА 3. ГЕОМЕХАНИЧЕСКИЕ ИСПЫТАНИЯ

Работа посвящена исследованиям механических и фильтрационных процессов в низкопроницаемых породах залежей углеводородов и направлена на создание научных основ технологий разработки таких месторождений. Создана методика исследований, которая была применена для двух конкретных месторождений: Астраханского газоконденсатного месторождения (ГКМ) и Верхневиллючанского нефтегазоконденсатного месторождения (НГКМ).

3.1 Объекты исследований

Объектами исследования в данной работе являются низкопроницаемые породы продуктивных горизонтов Астраханского газоконденсатного месторождения (ГКМ) и Верхневиллючанского нефтегазоконденсатного месторождения (НГКМ).

Верхневиллючанское НГКМ расположено в 110 км северо-восточнее г. Ленска и 120 км юго-восточнее г. Мирный в Ленском районе Якутии и относится к разведываемым. Размеры залежи Верхневиллючанского НГКМ составляют 35×40 км. Месторождение относится к Лено-Тунгусской НПП. Разработкой месторождения также занимается ООО «Газпром бурение». Нефтегазоносными являются песчаники верхневиллючанского, хатыстынского и карбонаты юрхского горизонтов. Залежь юрхского горизонта относится к низам кембрийского галогенно-карбонатного комплекса, сложенного преимущественно доломитами. Проницаемость пород-коллекторов юрхской свиты, к которой относится керновый материал, отобранный для проведения исследований в данной работе, не превышает 115 мД [145, 146].

Астраханское ГКМ расположено в юго-западной части Прикаспийской впадины в 60 км к северо-востоку от г. Астрахани, относится к Прикаспийской нефтегазоносной провинции (НПП). Размеры залежи Астраханского ГКМ составляют 40×100 км. Запасы оцениваются в 2,5 трлн м³ газа и 400 млн т

газового конденсата. Особенностью месторождения является сложное геологическое строение разреза, обусловленное соляно-купольной тектоникой, с наличием в составе пластовой смеси значительного содержания агрессивных компонентов – сероводорода (26%) и углекислого газа (16%). Добыча ведется в среднем с глубины 4,1 тыс. м. Разработкой месторождения занимается ООО «Газпром бурение», которое на сегодняшний день построило более 270 скважин. Проницаемость отложений филипповского горизонта Астраханского ГКМ, с которого был отобран керновый материал для проведения исследований в данной работе, не превышает 33 мД [147].

3.2 Экспериментальное оборудование

Геомеханические испытания пород-коллекторов исследуемых месторождений выполнялись на уникальной Испытательной системы трехосного независимого нагружения (ИСТНН), разработанной и сконструированной в Институте проблем механики им. Ишлинского РАН. Данная установка (рисунок 3.1) предназначена для изучения прочностных, деформационных и фильтрационных свойств горных пород в условиях истинно трехосного независимого нагружения.

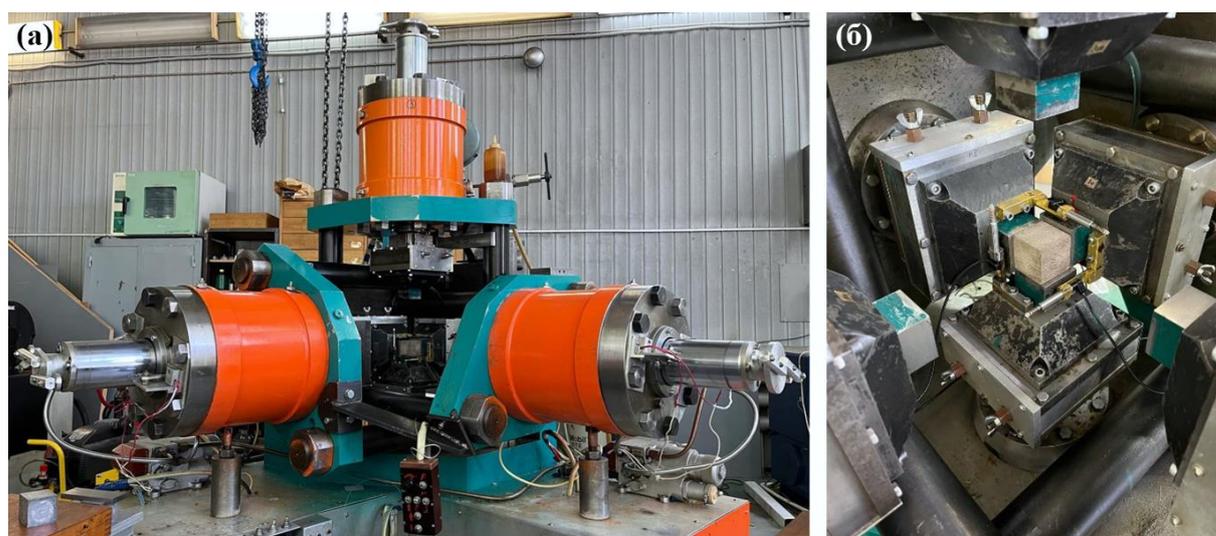


Рисунок 3.1 – Испытательная система трехосного независимого нагружения (а),
Образец в нагружающем узле ИСТНН перед проведением испытаний (б)

ИСТНН позволяет нагружать кубические образцы пород с ребром 40 мм или 50 мм независимо по трем осям [10], благодаря чему в образцах можно воссоздавать любые напряженные состояния, возникающие в коллекторах нефтяных и газовых месторождений при бурении скважин, освоении и последующей эксплуатации. При этом в процессе испытания образцов по различным траекториям нагружения ИСТНН позволяет непрерывно измерять деформации по каждой из осей образца и проницаемость вдоль одной из осей. Таким образом, одной из главных особенностей данной установки является возможность изучения влияния напряженно-деформированного состояния пород на их фильтрационные свойства [148].

ИСТНН – электрогидравлическая испытательная машина, в состав которой входят трехосный силовой агрегат, маслососная станция (гидростанция), цифровая система автоматизированного управления (САУ) и сбора данных, а также система автоматического измерения проницаемости образцов. Силовой агрегат представляет собой конструкцию из трех взаимно перпендикулярных силовых рам, размещенных на специальной платформе. Для приложения нагрузки используются двухштоковые гидроцилиндры, на штоке которых для измерения развиваемого усилия установлены электронные динамометры (тензометрические датчики). Наибольшее усилие, развиваемое каждым гидроцилиндром, составляет 500 кН, при этом давление рабочей жидкости в гидроцилиндре достигает 200 МПа. Нагрузка передается на образец жесткими (стальными) плитами, а уникальная кинематическая схема нагружающего узла ИСТНН позволяет полностью покрывать всю поверхность образца, обеспечивая при этом равномерное приложение нагрузки к граням образца в течение всего испытания, включая стадию разрушения. Нагружающий узел установки состоит из трех опорных и трех нажимных плит со сменными наконечниками для испытаний образцов с ребром 40 мм или 50 мм. Рабочий ход каждой нажимной плиты составляет 12 мм. Для обеспечения равномерного приложения нагрузки к граням образца рабочая поверхность наконечников нажимных и опорных плит имеют размер несколько больший,

чем размер грани образца, а сами плиты установлены с заходом относительно друг друга. При этом во всех плитах при помощи плоских роликовых подшипников прецизионного исполнения реализован механизм перемещения в направлениях перпендикулярных направлению приложения нагрузки (осевому направлению). Таким образом, нажимная плита, перемещаясь в осевом направлении и сжимая образец, сдвигает в том же направлении две соседние плиты: одну опорную и одну нажимную. Для минимизации трения между плитой и поверхностью образца используется смазка и полимерная пленка. Данная конструкционная особенность нагружающего узла ИСТНН позволяет существенно упростить анализ результатов экспериментов, поскольку отпадает необходимость учета возможных концентраций напряжений вблизи ребер образца.

При помощи гидростанции ИСТНН осуществляется подача рабочей жидкости к агрегатам управления силовыми гидроцилиндрами. Наибольшее давление в системе гидропривода составляет 20 МПа, при этом максимальная скорость перемещения штока силового гидроцилиндра достигает 3 мм/сек.

В ИСТНН реализована четырехканальная система управления с сервоклапанами, где один канал является резервным, а остальные используются для управления гидроцилиндрами. В качестве обратной связи в системе управления используются показания динамометров, расположенных в штоках гидроцилиндров, или датчиков линейных перемещений (LVDT-датчиков), установленных на концы опорных плит нагружающего узла ИСТНН и используемых для измерения полных деформаций образца вдоль каждой из осей на протяжении всего испытания. Относительная погрешность при измерении усилий, развиваемых гидроцилиндрами, и перемещений плит при деформировании образцов не превышает 0,3%. Таким образом, в ИСТНН по каждой из осей реализована возможность управления нагружением образца как по силе, так и по перемещениям, что позволяет реализовать практически любые траектории нагружения. При этом наименьший шаг при управлении по силе составляет 50 Н, а при управлении по перемещению – 200 нм. Сигналы с

датчиков перемещений и динамометров поступают на тензометрические усилители, после чего преобразовываются в код, выводятся на экран монитора и записываются в память ЭВМ.

В ИСТНН реализована возможность измерения проницаемости образца по воздуху вдоль одной из осей на протяжении всего испытания. Для этого используются специальная пара плит, в которых имеются каналы для подачи сжатого воздуха в образец через одну грань и его отвода через противоположную грань, при этом для равномерного подвода и отвода воздуха используются специальные наконечники с перфорацией (перфорированные венты) для плит. Для подачи воздуха к образцу используется поршневой компрессор. Измерение проницаемости образцов во время нагружения осуществляется непрерывно при помощи системы автоматического измерения проницаемости (САИП), оборудованной двумя цифровыми манометрами, измеряющими давление на входе и выходе из образца, двумя расходомерами, позволяющими производить измерения в интервале от 0,5 мл/мин до 5 л/мин, и фильтрами-осушителями, которые удаляют пары воды и масла из фильтрующего воздуха. Сигналы с расходомеров и манометров передаются в контроллер САУ, обрабатываются, выводятся на экран монитора и записываются в память ЭВМ.

Для проведения испытаний с измерением проницаемости четыре грани образца покрываются специальной оболочкой из полимеризующегося при комнатной температуре раствора на водном растворе поливинилацетата или на латексной основе. Две противоположные грани по оси, вдоль которой осуществляется измерение проницаемости образца, остаются открытыми. Толщина оболочки после высушивания при комнатной температуре не превышает 50 мкм, что не оказывает существенного влияния на точность измерения деформаций образца. При этом оболочка является достаточно эластичной и прочной, чтобы обеспечить герметичность образца вплоть до разрушения. Следует отметить, что перед установкой образца в нагружающий узел ИСТНН по периметру открытых граней наносится дополнительный слой

раствора, который позволяет избежать утечек воздуха в месте контакта данных граней образца с плитами установки.

Давление воздуха на входе в образец p_1 устанавливается таким образом, чтобы расход воздуха Q являлся линейной функцией разности квадратов давления на входе и на выходе из образца ($p_1^2 - p_2^2$). В таком случае для описания течения газа в образце можно использовать закон Дарси, согласно которому абсолютная проницаемость k определяется формулой:

$$k = \frac{2Q \cdot p_a \cdot \mu \cdot L}{F \cdot (p_1^2 - p_2^2)}, \quad (3.1)$$

где L – длина образца, μ – динамическая вязкость воздуха, p_a – атмосферное давление, а F – площадь поперечного сечения образца. Учитывая, что в ИСТНН давление воздуха на выходе из образца всегда равно атмосферному, т.е. полагая в (3.1) $p_2 = p_a$, запишем итоговую формулу для расчета абсолютной проницаемости образца:

$$k = \frac{2Q \cdot \mu \cdot L}{F \cdot p_a \left(\frac{p_1^2}{p_a^2} - 1 \right)}. \quad (3.2)$$

Для расчётов используется табличное значение μ при заданной температуре. Поскольку ИСТНН располагается в лабораторном помещении со стабильным температурным режимом, подвод воздуха к образцу осуществляется по медным трубам большой протяжённости, а объёмный расход воздуха не превышает 20 л/мин, можно с достаточной степенью точности считать, что температура фильтруемого воздуха постоянна и равна температуре воздуха в помещении.

3.3 Подготовка кернового материала

Изготовление образцов кубической формы с ребром 40 мм из кернового материала скважин исследуемых месторождений осуществлялось при помощи специального обрабатывающего комплекса, который состоит из камнерезного и шлифовального станков (рисунок 3.2). Этот комплекс позволяет изготавливать кубические образцы высокой точности и любой

ориентации относительно оси скважины. После осуществленной обработки непараллельность граней образца и отклонение от перпендикулярности не превышает 20 мкм.



Рисунок 3.2 – Обрабатывающий комплекс для изготовления кубических образцов из керна материала

После изготовления образцы маркируются следующим образом: ось 1 образца совпадает с осью керна, ориентация осей 2 и 3 в горизонтальной плоскости остается произвольной.

3.4 Определение степени анизотропии упругих свойств пород по результатам ультразвукового прозвучивания

Для определения типа и степени анизотропии упругих свойств исследуемых пород до проведения испытаний на установке ИСТНН в образцах были измерены скорости распространения продольных ультразвуковых волн в трех взаимно ортогональных направлениях. Как известно, скорость распространения упругих волн в горных породах определяется их упругими свойствами и плотностью [149]. Так, скорость продольной волны в изотропном массиве определяется соотношением:

$$V_p = \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{1 - \nu}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)}}, \quad (3.3)$$

где E – модуль Юнга, ρ – плотность породы, ν – коэффициент Пуассона.

Скорости измерялись в трех направлениях: по оси 1, т.е. по оси керна, и по осям 2 и 3 в двух взаимно перпендикулярных направлениях в горизонтальной плоскости. На рисунке 3.3 показана принципиальная схема установки. Установка состоит из двух датчиков-генераторов ультразвуковых волн, между которыми устанавливался исследуемый образец. Для визуализации результатов измерений электрические сигналы с обоих датчиков выводятся на осциллограф. Между датчиками-генераторами пропускались волны с длиной 5 мм и частотой 1,25 МГц, и определялось время прохождения волн через образец и затухание амплитуды колебаний.

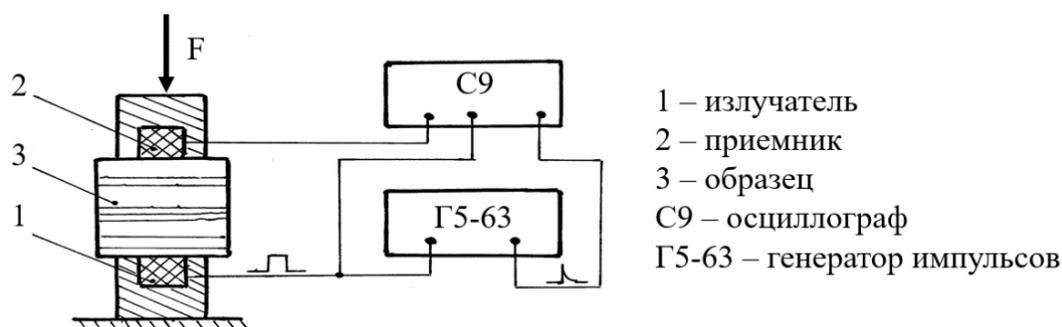


Рисунок 3.3 – Схема установки для измерения скоростей продольных волн в образце

На основании результатов измерения скоростей прохождения продольных волн через образцы выбирается упругая деформационная модель для залежи. Если скорости по всем трем осям образца примерно одинаковы, выбирается упруго изотропная модель. Если скорости по осям 2 и 3 близки, а по оси 1 (оси керна) она заметно меньше – трансверсально-изотропная модель (наличие напластования).

3.5 Определение упруго-прочностных характеристик пород по данным трехосных испытаний

Данные о физико-механических свойствах горных пород, основными из которых являются деформационные и прочностные характеристики, необходимы для расчета напряжений в призабойной зоне пласта и геомеханического моделирования различных технологических операций на скважине, оценки риска пескопроявления, обеспечения стабильности бурения и устойчивости стволов скважин [150]. При этом качество проводимых расчетов напрямую зависит от точности определения физико-механических свойств горных пород при лабораторных испытаниях кернового материала.

Основным типом испытаний, направленных на определение упругих и прочностных свойств горных пород, в настоящее время являются так называемые трехосные испытания образцов горных пород.

3.5.1 Методика трехосных испытаний

Несущая способность горных пород, как известно, обусловлена в основном сопротивлением сдвигу и отрыву. Критическую величину сопротивления сдвигу в среде, которую в среднем считают однородной по всем направлениям, на данной ориентированной площадке, т.е. критерий местного разрушения, в основном представляют в виде критерия Кулона-Мора:

$$\tau \geq [\tau] = c - \sigma_n \operatorname{tg} \varphi, \quad (3.4)$$

где $[\tau]$ – предел прочности, σ_n – нормальное напряжение на площадке, а c – удельное сцепление и φ – угол внутреннего трения – прочностные характеристики породы [151]. Здесь, как и ранее, сжимающие напряжения считаются отрицательными. Если в породе имеются площадки ослабления, которыми по сути являются плоскости напластования, то разрушение может начинаться в первую очередь по ним, поскольку предел прочности $[\tau]$ на них значительно ниже, чем в других направлениях. В этом случае под c и φ следует понимать удельное сцепление и угол трения на плоскостях напластования.

Для определения прочностных характеристик c и φ и построения паспорта прочности породы соответственно необходимо проведение специальных экспериментов, позволяющих построить круги Мора при различных уровнях нагружения образца. Классические трехосные испытания грунтов и горных пород проводятся согласно ГОСТ 12248.3-2020 и ГОСТ 21153.8-88 на цилиндрических образцах в основном при помощи стабилометров. Реализовать трехосные испытания можно в том числе на конструктивно более сложных установках истинно трехосного нагружения. Методика проведения трехосных испытаний на ИСТНН полностью совпадает с описанной ниже.

Итак, в типовом трёхосном испытании на стабилометре при различных фиксированных значениях бокового обжатия (гидростатического давления) образцы доводятся до разрушения за счет увеличения независимой нагрузки, прикладываемой вдоль оси образца (девиаторной нагрузки) [152]. Таким образом во время трехосного испытания $\sigma_1 \geq \sigma_2 = \sigma_3$, где σ_1 – наибольшее главное напряжение (вертикальное), а σ_2 и σ_3 – наименьшее и промежуточное главные напряжения (горизонтальные). Для построения паспорта прочности используют результаты определения пределов прочности не менее чем при трех различных значениях бокового обжатия. При этом все три испытания можно провести на одном образце, если используемое оборудование позволяет управлять нагружением образца не по силе, а по перемещению, так как в противном случае вовремя остановить нагружение образца в пластической области, не доводя его до разрушения, практически невозможно. Отметим, что проведение подобных работ возможно и постоянно реализуется на ИСТНН. В таком случае образец при переходе к пластическому деформированию сразу же разгружается до значения бокового обжатия, т.е. $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$. Затем происходит увеличение бокового давления, и при новом значении обжатия цикл нагружения повторяется. При проведении трехосных испытаний на ИСТНН приложение девиаторной нагрузки на каждом цикле прекращается и начинается разгрузка до значения бокового обжатия, когда величина

касательного модуля E на пластическом участке деформирования уменьшается до 25-30 % от модуля E на линейном участке кривой деформирования ($\sigma - \varepsilon$). Касательный модуль E вычисляется путем линейной аппроксимации по 21 экспериментальной точке на кривой деформирования (10 точек до рассматриваемой точки и 10 точек после нее).

3.5.2 О правомерности испытаний в эффективных напряжениях

В связи с конструктивными особенностями нагружающего узла установки ИСТНН проведение испытаний образцов в пластовых (термобарических) условиях не представляется возможным. Поэтому построение программ нагружения и непосредственно испытания образцов проводятся в эффективных (скелетных) напряжениях. В связи с этим для обоснования правомерности такой постановки опытов на имеющейся в лаборатории геомеханики ИПМех РАН установке трехосного осесимметричного сжатия (установке Кармановского типа) ГТ-1.3.9 (рисунок 3.4), позволяющей проводить испытания цилиндрических образцов горных пород как при наличии, так и при отсутствии порового давления, было выполнено моделирование первого цикла трехосных испытаний в эффективных и полных напряжениях на одном и том же образце.

Установка ГТ-1.3.9, позволяет нагружать цилиндрические образцы, диаметр которых составляет 25, 30 и 42 мм, а высота – 50, 60 и 84 мм соответственно. Максимальная вертикальная нагрузка составляет 500 кН и прикладывается независимо от всестороннего обжатия, которое создается в испытательной камере за счет силиконового масла ПМС при помощи внешнего нагнетателя (поршневого насоса с электромеханическим приводом) и может достигать 70 МПа.

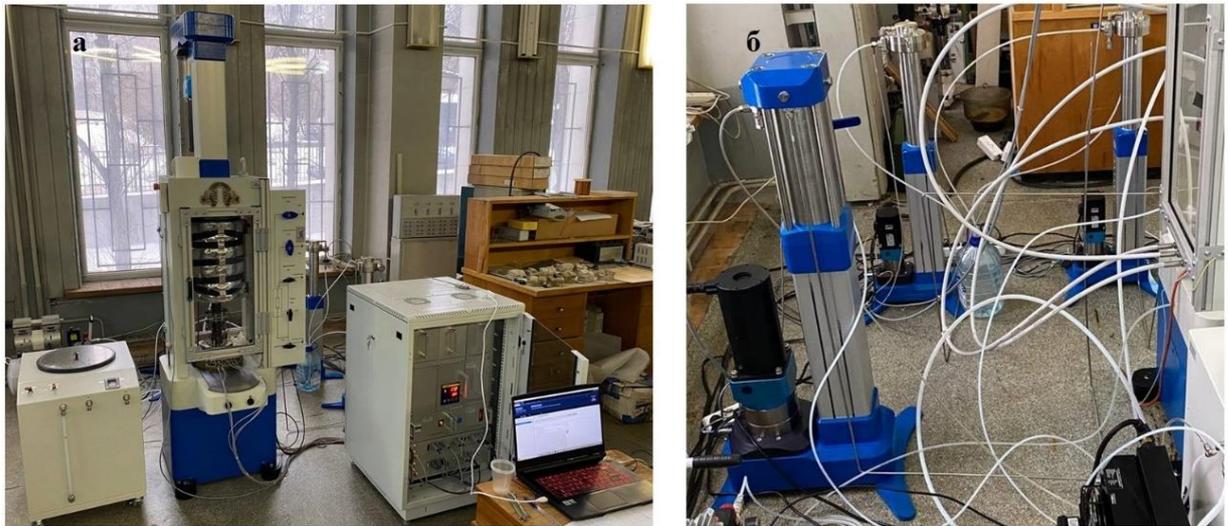
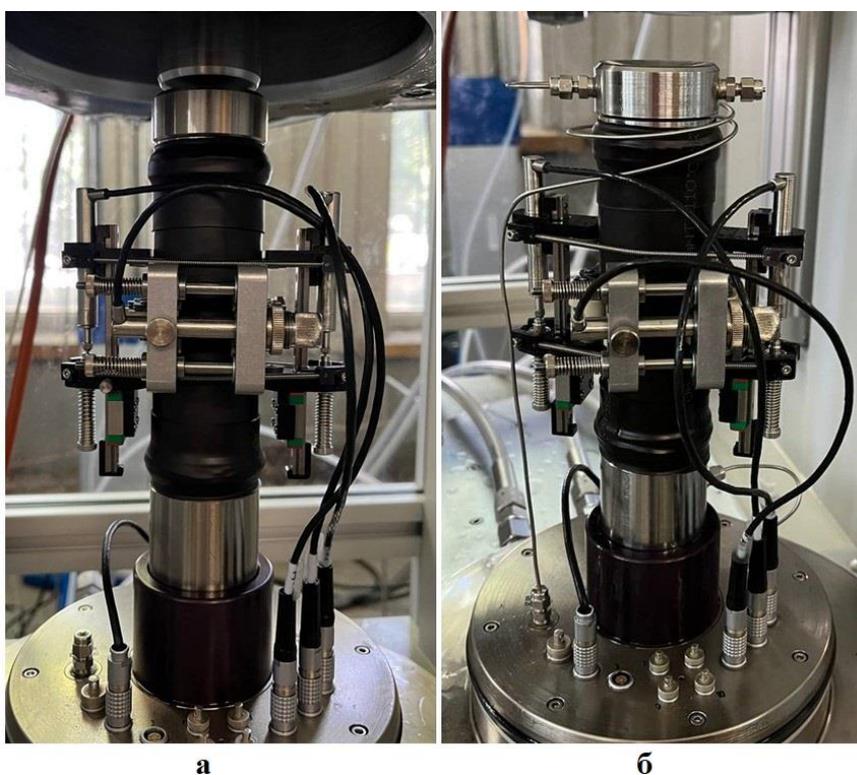


Рисунок 3.4 – Установка псевдо-трехосного осесимметричного сжатия ГТ-1.3.9 (а), Система внешних нагнетателей установки ГТ-1.3.9 (б)

В корпус камеры встроен нагревательный элемент, позволяющий управлять температурой в диапазоне от +25 до +110 °С. Для создания в образце порового давления и проведения фильтрационных испытаний дополнительно применяются два внешних нагнетателя с максимальным давлением 40 МПа, заполняемые водой. Данные нагнетатели подключаются к верхнему и нижнему штампу нагружающего узла и соответственно позволяют создавать давление жидкостью у верхней и нижней части образца. На выходе из нагнетателей установлены расходомеры, которые позволяют определять объем вытекающей или втекающей в нагнетатель жидкости. Для обеспечения герметичности испытуемый образец помещается в эластичную полиолефиновую оболочку. Измерение локальных продольных и поперечных деформаций образца во время испытания осуществляется при помощи LVDT-датчиков линейных перемещений, которые устанавливаются поверх оболочки. При этом для корректного измерения продольной деформации рассчитывается среднее значение по двум датчикам, прикрепляемых к боковой поверхности образца напротив друг друга. Использование двух датчиков необходимо для учета продольного изгиба, который может возникнуть в результате несоосного приложения нагрузки или малейшей кривизны торцов образца. Для измерения

поперечных деформаций образца LVDT-датчик устанавливается на роликовую цепь, которая крепится к середине образца.

Для проведения испытаний в эффективных и полных напряжениях из сильно сцементированного песчаника с низкой начальной проницаемостью, для которого естественно положить $\delta = 0$, был изготовлен цилиндр с диаметром 42 мм и высотой 84 мм. Фото образца перед началом испытаний в эффективных и полных напряжениях с установленными на них LVDT-датчиками представлены на рисунке 3.5.



*Рисунок 3.5 – Образец перед испытанием в эффективных напряжениях (а),
Образец перед испытанием в полных напряжениях с подключенными внешними
нагнетателями для создания порового давления (б)*

Для сохранения свойств испытуемой породы и возможности проведения на данном образце повторного испытания был выполнен только первый цикл нагружения трехосного испытания. Вначале было проведено испытание в эффективных напряжениях, а затем – в полных. В двух опытах образец в процессе всего нагружения деформировался упруго, не доходя до

пластического состояния. Программы нагружения образца представлены на рисунке 3.6, где $\sigma_1 = \sigma_3 + \Delta\sigma$ – полное вертикальное напряжение, $\sigma_3 = \sigma_2$ – всестороннее давление, $\Delta\sigma$ – девиаторное напряжение. При испытаниях в полных напряжениях для насыщения образца был создан градиент давления на его торцах. Фильтрация воды через образец осуществлялась до тех пор, пока расход воды, исходящей из одного нагнетателя (нижний), не выровнялся с расходом воды, входящей в другой нагнетатель (верхний).

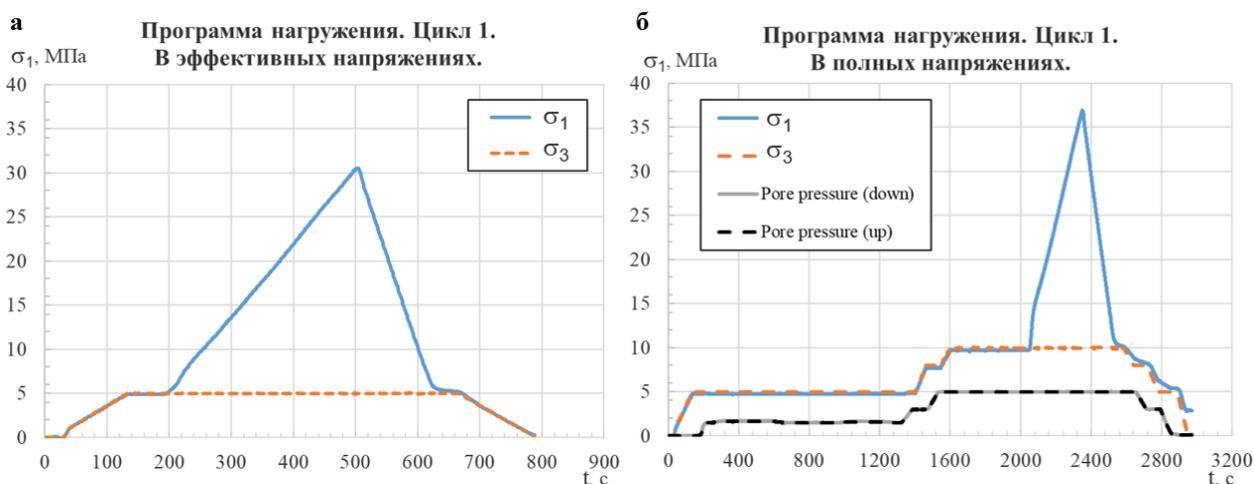


Рисунок 3.6 – Программа нагружения образца в эффективных напряжениях (а),
Программа нагружения образца в полных напряжениях (б)

При испытаниях в эффективных напряжениях на первом этапе нагружения осуществлялось всесторонне сжатие до 5 МПа, а на втором – увеличение девиаторной нагрузки примерно до 26 МПа и ее последующее снятие. При испытаниях в полных напряжениях на первом этапе нагружения осуществлялось всесторонне сжатия до 10 МПа и увеличение порового давления до 5 МПа, при этом нагружение носило ступенчатый характер. На втором этапе нагружения происходило увеличение девиаторной нагрузки примерно до 27 МПа и ее последующее снятие. На рисунке 3.7 представлены кривые $\sigma - \varepsilon$ для продольной деформации образца в испытаниях, а на рисунке 3.8 – зависимость касательного модуля E от прикладываемой полной вертикальной нагрузки при увеличении девиаторной нагрузки.

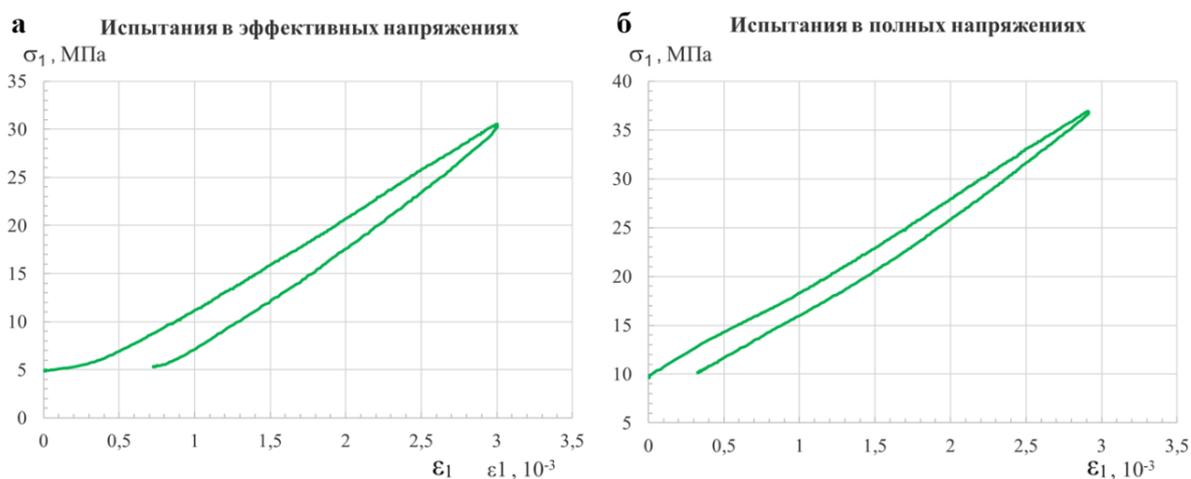


Рисунок 3.7 – Кривые $\sigma - \varepsilon$ для продольной деформации образца при испытаниях в эффективных напряжениях (а), при испытаниях в полных напряжениях (б)

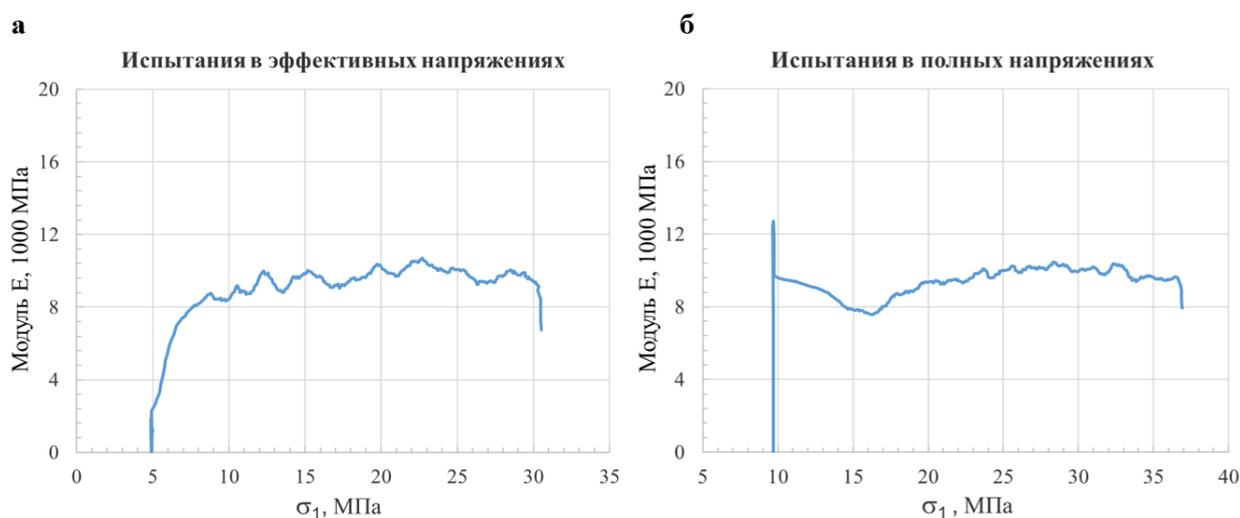


Рисунок 3.8 – Зависимость модуля E от полного вертикального напряжения при испытаниях в эффективных напряжениях (а), при испытаниях в полных напряжениях (б)

Из приведенных графиков видно, что результаты испытания образца на установке ГТ-1.3.9 при наличии и отсутствии порового давления практически совпадают, что говорит о правомерности моделирования на установках трехосного нагружения деформационных процессов, происходящих в пластах нефтегазовых месторождений, на «сухих» образцах по программам, отвечающих действующим в породе эффективным напряжениям [153]. Данные результаты указывают на правомерность проведения испытаний образцов в эффективных напряжениях на установке ИСТНН.

3.5.3 Прямое сравнение ИСТНН и ГТ-1.3.9 при трехосных испытаниях

Для подтверждения корректности результатов, получаемых при трехосных испытаниях на ИСТНН, на кубическом и цилиндрическом образцах, изготовленных из одного и того же карьерного песчаника, добытого с глубины 40 м, были проведены трехосные испытания на установках ИСТНН и ГТ-1.3.9 соответственно [154]. Испытуемые модельные образцы представлены на рисунке 3.9. Диаметр цилиндрического образца был равен 42 мм, а высота – 84 мм. Длина ребра кубического образца была равна 40 мм.

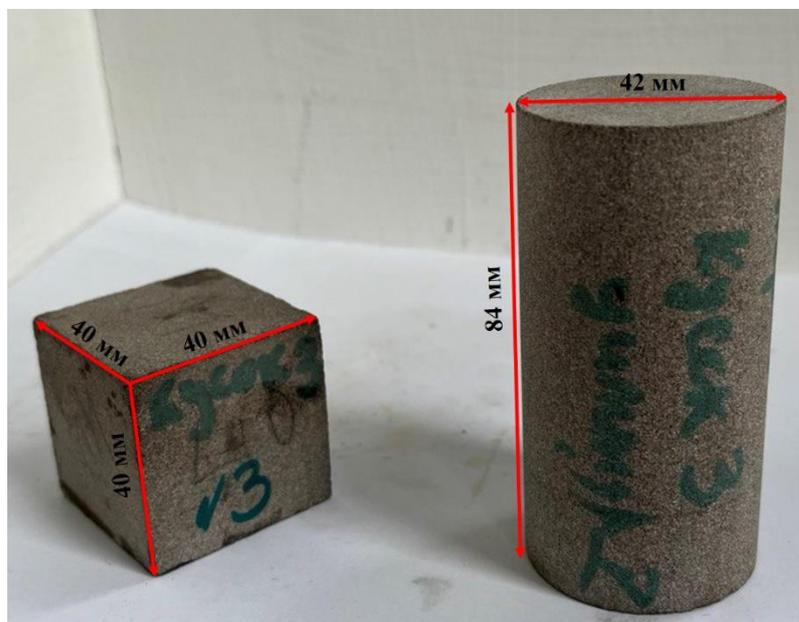


Рисунок 3.9 – Фото образцов, подготовленных из песчаника для проведения трехосных испытаний на установках ИСТНН и ГТ 1.3.9

Трехосные испытания проводились по программам нагружения, построенным в эффективных напряжениях. Таким образом, испытания на установке ГТ 1.3.9 осуществлялись без порового давления. Боковое обжатие образцов в циклах трехосного испытания составляло 2, 10 и 20 МПа. По результатам экспериментов для каждого цикла испытания были построены кривые деформирования и зависимость касательного модуля E от полного вертикального напряжения. На рисунке 3.10 представлены кривые $\sigma - \varepsilon$ для

вертикальной (осевой) деформации испытуемых образцов в первом цикле трехосного испытания, а на рисунке 3.11 – зависимость касательного модуля E от полного вертикального напряжения σ_1 для этапа приложения независимой вертикальной нагрузки в первом цикле трехосного испытания.

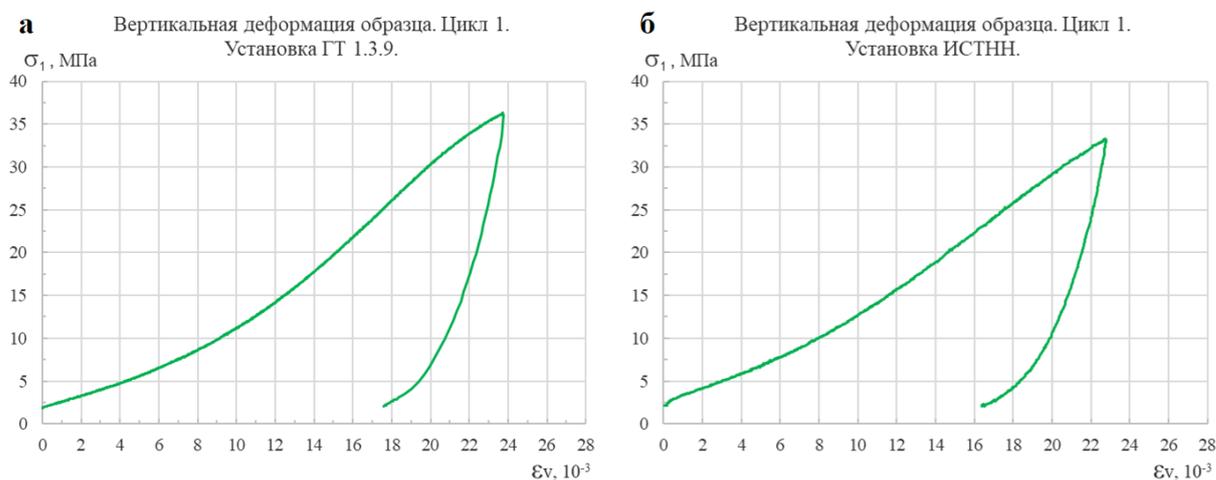


Рисунок 3.10 – Кривые $\sigma - \epsilon$ для вертикальной (осевой) деформации испытуемых образцов в первом цикле трехосного испытания на установках ГТ-1.3.9 (а) и ИСТНН (б)

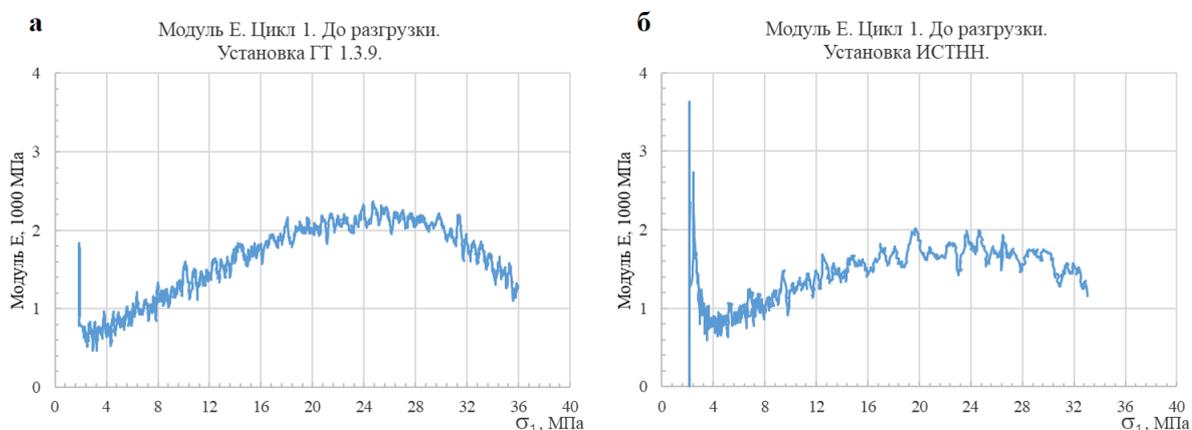


Рисунок 3.11 – Зависимость касательного модуля E от полного вертикального напряжения σ_1 для этапа приложения независимой вертикальной нагрузки в первом цикле трехосного испытания на установках ГТ-1.3.9 (а) и ИСТНН (б)

Видно, что результаты испытаний, проведённых на установках ИСТНН и ГТ-1.3.9, достаточно хорошо совпадают. Это говорит о возможности корректного определения упругих и прочностных свойств пород при помощи данных установок. Для остальных циклов трехосного испытания наблюдается

схожая картина: максимальная разница в определяемых значениях модуля E не превышает 15%. Такая разница является приемлемой, поскольку даже у двух образцов, изготовленных из соседних частей одного куска породы, свойства могут значительно отличаться.

3.6 Программы нагружения образцов для физического моделирования механических и фильтрационных процессов в окрестности скважин

Для проведения прямого физического моделирования на установке ИСТНН механических и фильтрационных процессов, происходящих в окрестности скважин с различной геометрией забоя при реализации на них метода НРП, необходимо составить программы нагружения испытуемых образцов. Величины напряжений, которые необходимо прикладывать к граням образца, определяются на основании теоретического анализа распределения напряжений в окрестности скважин с различными конструкциями забоя с учетом условий залегания пород – горного и пластового давлений. В данном разделе при составлении программ нагружения для всех случаев, рассмотренных в Главе 2, на основании предварительных данных ГИС, проведённого ультразвукового прозвучивания и трехосных испытаний образцов (см. разделы 5.1.1 и 5.2.1) была принята изотропная модель среды. Далее будут приведены основные программы нагружения, по которым были испытаны образцы пород-коллекторов, изготовленные из керна материала Астраханского ГКМ и Верхневиллючанского НГКМ. Следует отметить, что построение программ нагружения и последующие испытания образцов на установке ИСТНН осуществляются в эффективных напряжениях. Поскольку исследуемые породы представлены карбонатными отложениями с низкой начальной проницаемостью, при построении программ нагружения для всех образцов было положено $\delta = 0$. Далее для напряжений, прикладываемым к граням образца по осям 1,2,3 нагружающего узла ИСТНН, будут использованы обозначения S_1, S_2, S_3 . Эти напряжения считаются положительными. Если по

завершению программы испытания образец не разрушается, для его сохранения осуществляется медленная разгрузка. При этом разгрузка образца протекает по тем же траекториям, что и нагружение, но в противоположном направлении.

3.6.1 Программа нагружения образца, отвечающая напряжениям, действующим на контуре необсаженной скважины

На основании анализа, проведённого в разделе 2.1, для образцов исследуемых месторождений с учетом глубины отбора и условий залегания были построены программы нагружения, отвечающие напряжениям, действующим на контуре необсаженной скважины. Общий вид данной программы представлен на рисунке 3.12.

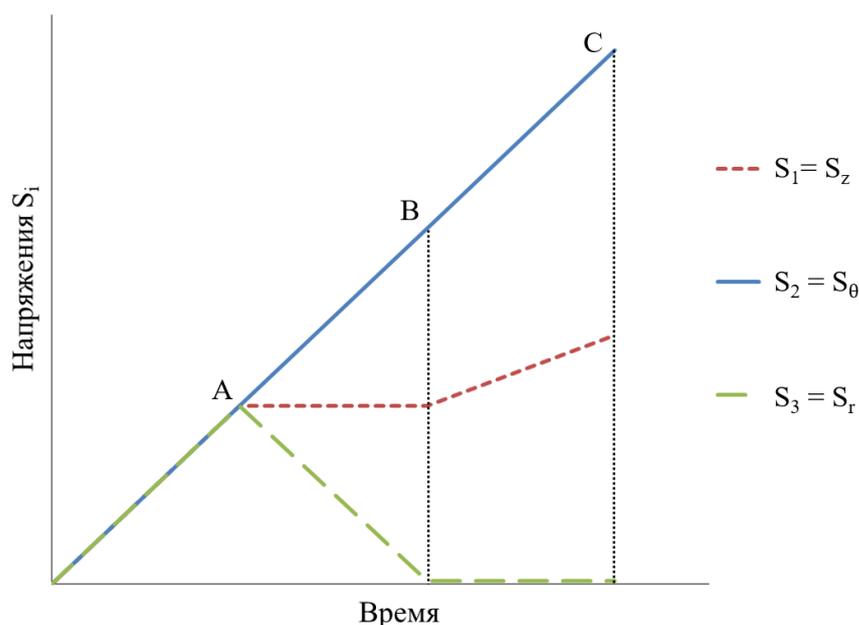


Рисунок 3.12 – Общий вид программы нагружения образца, отвечающей напряжениям, действующим на контуре необсаженной скважины

Программа нагружения состоит из трех этапов:

Этап 1. Образец сжимается равномерно со всех сторон до напряжения, определяемого из соотношений (2.2) и равного разнице между значением горного давления q на заданной глубине и значением пластового давления p_0 :

$$S_1 = S_2 = S_3 = |q| - p_0. \quad (3.4)$$

Таким образом точка А соответствует напряжениям, действующим на грунтовый скелет до пробуривания скважины.

Этап 2. На отрезке АВ компонента напряжения S_2 , соответствующая окружной компоненте S_θ , продолжает расти; S_1 , соответствующая вертикальной компоненте S_z , остается постоянной, а S_3 , соответствующая радиальной компоненте S_r , уменьшается. Точка В соответствует состоянию, когда скважина пробурена и давление на ее забое равно пластовому. При этом объемное сжатие рассматриваемого элемента породы на стенке скважины $(S_1 + S_2 + S_3)/3$ сохраняется постоянным на протяжении всего этапа 2. Значения напряжений на данном этапе определяются согласно соотношениям (2.7).

Этап 3. На участке ВС моделируется понижение давления на забое скважины, где точка С соответствует полному «осушению» скважины ($p_c = 0$). Третий этап длится до тех пор, пока образец не будет разрушен или напряжения не достигнут значений, соответствующих максимально возможной депрессии. Значения напряжений на данном этапе также определяются согласно соотношениям (2.7).

3.6.2 Программа нагружения образца, отвечающая напряжениям, действующим в окрестности кончика перфорационного отверстия в обсаженной скважине

На основании анализа, проведенного в разделе 2.2, для нескольких образцов исследуемых месторождений с учетом условий залегания были построены программы нагружения, отвечающие напряжениям, действующим в обсаженной скважине в кончике перфорационного отверстия, форма которого моделируется полусферой. Общий вид данной программы представлен на рисунке 3.13.

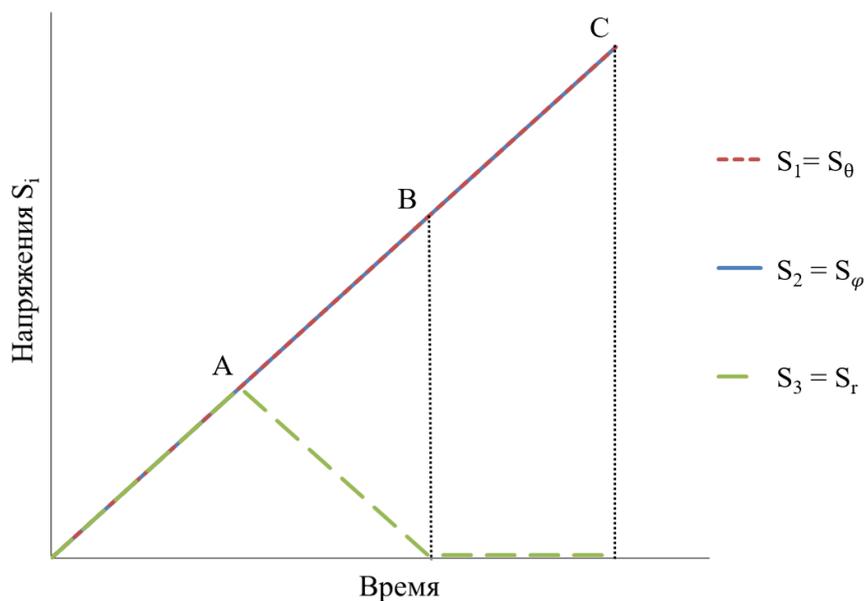


Рисунок 3.13 – Общий вид программы нагружения образца, отвечающей напряжениям, действующим на кончике перфорационного отверстия в приближении полусферы на контуре обсаженной скважины

Программа нагружения также включает в себя три этапа, аналогичных ранее описанным, однако распределение напряжений меняется. На первом этапе, как и в предыдущем случае, осуществляется равномерное всестороннее сжатие образца до точки А, которая соответствует напряжениям, действующим на грунтовый скелет до пробуривания скважины. Компоненты напряжений S_1, S_2, S_3 в точке А определяются соотношениями (3.4). На втором этапе компоненты напряжения S_1 и S_2 , соответствующие компонентам напряжения S_θ и S_φ , действующим в окрестности полусферического кончика перфорационного отверстия, продолжают расти до значения $3/2(|q| - p_0)$, а компонента напряжения S_3 , соответствующее радиальной компоненте S_r , убывает до нуля. Значения напряжений на втором и третьем этапе определяются согласно соотношениям (2.12). Таким образом, точка В соответствует напряженному состоянию в кончике перфорационного отверстия, моделируемого полусферой, когда скважина пробурена и давление на ее забое равно пластовому. При этом объемное сжатие рассматриваемого элемента породы на кончике полусферического перфорационного отверстия

$(S_1 + S_2 + S_3)/3$ сохраняется постоянным на протяжении всего второго этапа. На третьем этапе моделируется понижение давления на забое скважины, где точка С соответствует полному «осушению» скважины.

3.6.3 Программа нагружения образца, отвечающая напряжениям, действующим в верхней (нижней) точке на поверхности перфорационного отверстия в необсаженной скважине

На основании анализа, проведённого в разделе 2.3, для нескольких образцов исследуемых месторождений с учетом условий залегания были построены программы нагружения, отвечающие напряжениям, действующим в верхней (нижней) точке на поверхности перфорационного отверстия (приближение протяженной толстостенной трубы), отстоящей от оси необсаженной скважины на расстояния $r = 1,25R_c$ и $r = 2R_c$. Общий вид программы нагружения для случая $r = 1,25R_c$ представлен на рисунке 3.14.

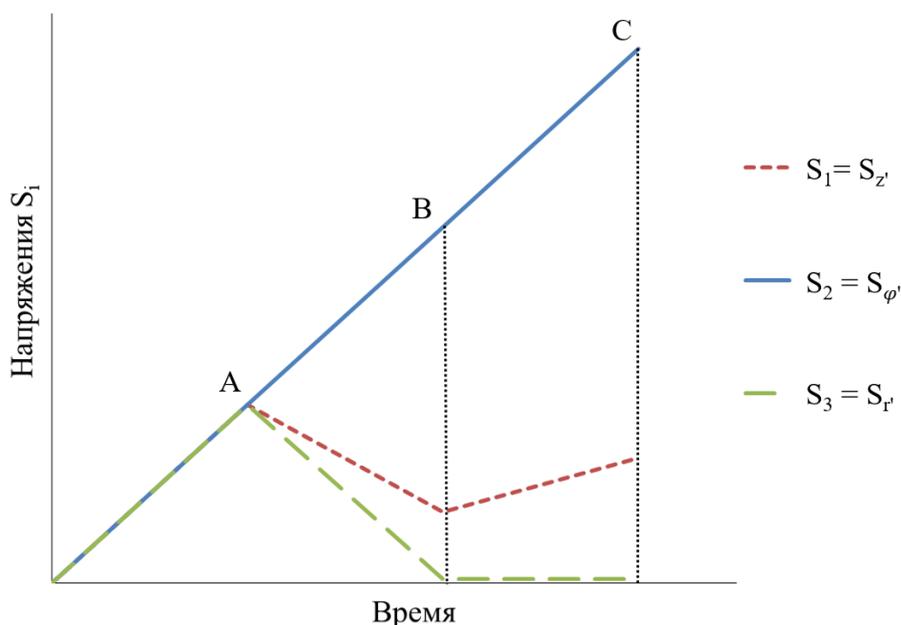


Рисунок 3.14 – Общий вид программы нагружения образца, отвечающей напряжениям, действующим в верхней точке перфорационного отверстия, отстоящей от оси необсаженной скважины на расстояние $r = 1,25R_c$

Программа нагружения также состоит из трех этапов. На первом этапе, как и в предыдущих случаях, осуществляется равномерное всестороннее сжатие образца до точки А, которая соответствует напряжениям, действующим на грунтовый скелет до пробуривания скважины. Значения компонент напряжений в точке А также определяются соотношениями (3.4). На втором этапе компонента напряжения S_2 , соответствующая окружной компоненте $S_{\varphi'}$, продолжает расти до значения $3,92(q + p_c)$, а компонента напряжения S_1 , соответствующая в цилиндрической системе координат, связанной с перфорационным отверстием, осевой компоненте $S_{z'}$, уменьшается до значения $0,36(q + p_c)$. Компонента напряжения S_3 , соответствующая радиальной компоненте $S_{r'}$, уменьшается до нуля. Значения напряжений на втором и третьем этапе определяются согласно соотношениям (2.19). Точка В соответствует состоянию, когда скважина с протяженными перфорационными отверстиями пробурена и давление на ее забое равно пластовому. При этом объемное сжатие рассматриваемого элемента породы в вертикальной точке протяженного перфорационного отверстия $(S_1 + S_2 + S_3)/3$ сохраняется постоянным на протяжении всего второго этапа. На третьем этапе моделируется понижение давления на забое скважины, где точка С соответствует полному «осушению» скважины.

Программа нагружения, соответствующая случаю $r = 2R_c$, имеет аналогичный вид, но есть отличия на втором и третьем этапе нагружения. Так на втором этапе нагружения, согласно соотношениям (2.19), компонента напряжения $S_{\varphi'}$ растет до значения $2,75(q + p_c)$, а компонента $S_{z'}$ уменьшается до значения $0,75(q + p_c)$.

3.7 Выводы по Главе 3

В Главе 3 представлено краткое описание Астраханского ГКМ и Верхневелиючанского НГКМ, характеризующихся низкой проницаемостью коллекторов, образцы из которых были использованы при проведении исследований в данной работе. Представлено описание уникальной установки

ИСТНН, при помощи которой на кубических образцах породы осуществляется прямое физическое моделирование механических и фильтрационных процессов, протекающих в окрестности скважин с различной геометрией забоя при реализации на них метода НРП. Описаны методики проведения трехосных испытаний на установке ИСТНН и ультразвукового прозвучивания образцов с целью определения степени анизотропии упругих свойств породы. Проведено сравнение результатов трехосных испытаний в эффективных напряжениях, проводимых на ИСТНН и установке трехосного осесимметричного сжатия (установке Кармановского типа) ГТ-1.3.9. На установке ГТ-1.3.9 проведено сравнение результатов трехосных испытаний в эффективных и полных напряжениях, на основании чего подтверждена правомерность испытаний в эффективных напряжениях на установке ИСТНН. Для испытаний пород-коллекторов на установке ИСТНН проведено построение программ нагружения, отвечающих напряжениям, действующим на контуре необсаженной скважины, в окрестности кончика перфорационного отверстия в обсаженной скважине, а также в верхней точке на контуре протяженного перфорационного отверстия в необсаженной скважине при понижении давления на ее забое.

ГЛАВА 4. ИССЛЕДОВАНИЕ ПОРОД-КОЛЛЕКТОРОВ МЕТОДАМИ РЕНТГЕНОВСКОЙ КОМПЬЮТЕРНОЙ ТОМОГРАФИИ

4.1 Основные понятия и принципы рентгеновской компьютерной томографии

Применение методов рентгеновской компьютерной томографии (РКТ) для изучения кернового материала нефтегазовых месторождений является достаточно молодым и очень перспективным направлением исследований. Данный подход позволяет «заглянуть» внутрь породы, не разрушая ее структуры. Исследования горных пород при помощи методов РКТ основано на различии в плотности горных пород, пластовых флюидов, минеральных включений и пустот (трещин) [155]. Рентгеновское излучение при прохождении сквозь горную породу теряет мощность пропорционально ее плотности и регистрируется матрицей приемника, формируя пиксельное изображение. Таким образом рентгеновская томография неоднородных сред основана на реконструкции пространственного распределения линейного коэффициента ослабления рентгеновских лучей с помощью компьютерной обработки теневых проекций, полученных при сканировании. В процессе сканирования либо исследуемый объект вращается вокруг своей оси, либо источник рентгеновского излучения (рентгеновская трубка) и детектор вращаются вокруг исследуемого объекта с определенным шагом. При этом источник, исследуемый объект и детектор все время находятся на одной оси. По результатам сканирования формируется большой объем данных, состоящий из тысячи проекций (снимков под различными углами) изучаемого объекта, представляющих собой полутоновые изображения, яркость которых соответствует степени поглощения рентгеновского излучения. В дальнейшем из полученных проекций при помощи специализированного программного обеспечения реконструируется трехмерная модель сканируемого образца, состоящая из вокселей, которые являются аналогами двумерных пикселей для трёхмерного пространства. Таким образом, формируется трехмерная картина

поглощения рентгеновского излучения внутри исследуемого образца, что позволяет говорить о трехмерном распределении плотности в объеме и тем самым судить о наличии в образце пустот и минеральных включений [156]. При этом чем больше проекций удастся получить, т.е. чем мельче шаг вращения при сканировании образца, тем более точно осуществляется реконструкция трехмерной модели.

Томография образцов горных пород позволяет детально изучать структурноморфологические признаки, геометрию пустотного пространства (поры, каверны, трещины) [157]. Применение современного программного обеспечения и новейших подходов численного моделирования позволяет на трехмерных структурах породы вычислять проницаемость и визуализировать фильтрационные потоки [14, 158]. Для численного моделирования процессов и количественного анализа материала предварительно необходимо осуществить сегментацию изображения [159]. Сегментация является методом анализа изображений, позволяющим переходить в пространстве образца от рентгеновского поглощения к пространственному распределению компонентов, составляющих образец [160]. Сегментацию можно также определить, как процесс разделения цифрового изображения материала на составляющие этот материал вещества (фазы). Сегментация может быть бинарной (двухфазной) или многофазной. Следует отметить, что неоднозначность сегментации полученных изображений, т.е. присвоение вокселям изображения ярлыков различных материалов (например, разделение на породу и воздух) является одним из основных недостатков томографии в целом. В зависимости от выбранного метода сегментации и предварительной работы с изображением, распределение пор, трещин и их границ может отличаться, влияя на конечный вид получаемой структуры (в некоторых случаях весьма существенно).

Эксперименты по визуализации внутреннего пространства в сочетании с моделированием фильтрационных процессов являются ценными инструментами, используемыми в промышленности для прогнозирования

таких геолого-физических свойств, как пористость и проницаемость [161, 162]. Расчеты выполняются на сегментированном изображении, полученном в основном для макропорового пространства [163], то есть для пор с хорошо разрешенными границами, которые могут быть сегментированы на жидкость и зерна на воксельной основе [164].

4.2 Экспериментальное оборудование

Для проведения компьютерной томографии и получения изображений образцов после геомеханических испытаний на установке ИСТНН использовался высокоразрешающий рентгеновский микротомограф ProCon X-Ray CT-MINI [15] ИПМех РАН, расположенный в лабораторном помещении с постоянным температурным режимом.

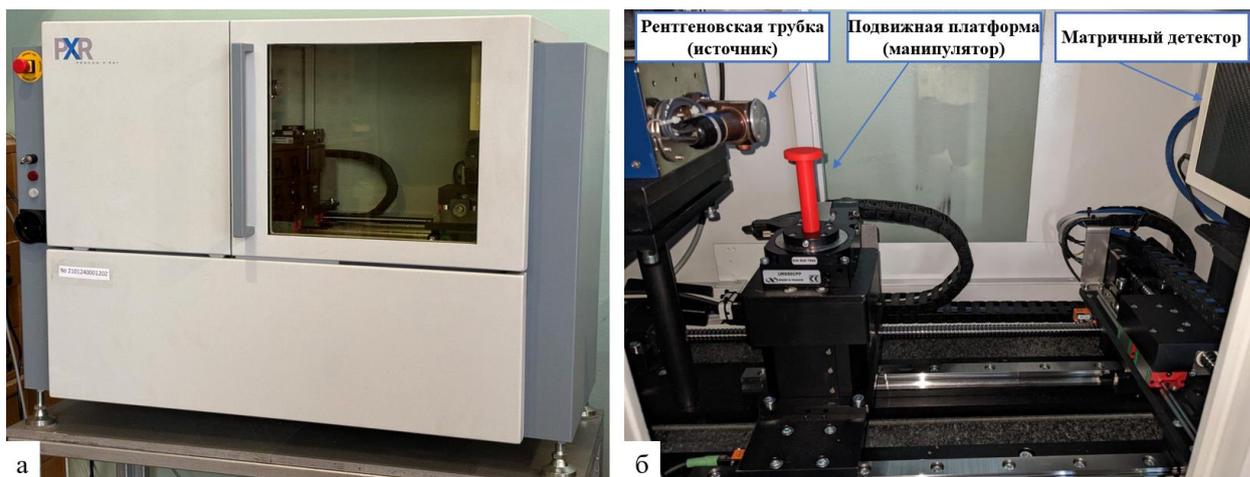


Рисунок 4.1 – Высокоразаещающий рентгеновский микротомограф ProCon X-Ray CT-MINI ИПМех РАН (а) и основные конструкционные элементы его камеры (б)

Данный прибор является достаточно компактным решением, его габариты составляют 1300x850x600 мм. При этом он оснащен массивным основанием, состоящим из монолитной гранитной плиты, что обеспечивает практическое исключение влияния температурного дрейфа. Не смотря на малые размеры томографа (рисунок 4.1а), конструкционные особенности его камеры (рисунок 4.1б) позволяют проводить точную установку и юстировку рентгенооптических и других компонентов системы, гарантируя точность и

стабильность измерений во всем диапазоне рабочего пространства. В камере томографа реализована схема вертикального размещения керна для проведения исследований, позволяющая устанавливать образцы высотой и диаметром до 200 мм и массой до 5 кг. Для обеспечения точности измерений в конструкцию встроена система прецизионного позиционирования (манипулятор), позволяющая устанавливать образец на расстоянии до 335 мм от рентгеновской трубки до объекта. Матричный детектор может перемещаться перпендикулярно главной оси системы в диапазоне +/-25 мм. Манипулятор позволяет поворачивать образец вокруг своей оси на 360° градусов с минимальным шагом вращения 0,125°, что позволяет получать при сканировании образца 2880 различных его проекций. Микрофокусная рентгеновская трубка с замкнутым контуром имеет регулируемое выходное напряжение в диапазоне от 20 кВ до 90 кВ и регулируемый ток в диапазоне от 10 мкА до 160 мкА. Максимальная выходная мощность трубки составляет 8 Вт, а наименьший размер фокусного пятна составляет 5 мкм. Рентгеновский матричный детектор отличается высокой чувствительностью и низким уровнем шума: количество пикселей составляет 2940 x 2304, а размер пикселя – 49,5 мкм. Размер активной (чувствительной) области детектора составляет 146 x 114 мм.

4.3 Методика проведения сканирования, обработки результатов и численного моделирования фильтрационных процессов

Методика исследований образцов горных пород при помощи микротомографа ProCon X-Ray CT-MINI включает в себя три этапа:

1. подготовка и сканирование образца;
2. создание трехмерной модели образца (реконструкция);
3. обработка данных и моделирование фильтрационных процессов на трехмерной цифровой структуре в специализированном программном обеспечении с последующим анализом результатов.

На первом этапе образец закрепляется на специальном держателе и помещается на подвижную платформу (манипулятор) внутри камеры между источником и детектором. При этом необходимо обеспечить жесткую фиксацию образца на держателе, поскольку мельчайшее изменение положения образца относительно держателя при вращении во время сканирования приводит к существенному ухудшению качества съемки и затрудняет второй этап исследований – реконструкцию. Для надежного закрепления образца на платформе используется контактная лента на клеевой основе. Далее осуществляется калибровка детектора на воздух и подбор оптимальных параметров сканирования для достижения наилучшего качества съемки исследуемого материала: значения напряжения и силы тока на рентгеновской трубке, разрешения съёмки, фильтров, времени экспозиции и числа осреднений для каждой получаемой проекции. Для достижения необходимого разрешения образец перемещается на определенное расстояние между источником и детектором, которые в процессе сканирования остаются неподвижными. При этом образец вместе с держателем вращается вокруг своей оси. В зависимости от требуемых скорости и качества сканирования выбирается необходимый шаг вращения. Результатом сканирования является набор снимков двумерных проекции образца – полутоновых изображений, где интенсивность окрашивания каждого пикселя зависит от коэффициента ослабления материала. Чем ярче пиксель, тем более плотному веществу он соответствует.

На втором этапе исследований в специализированном ПО VGSTUDIO осуществляется реконструкция массива проекций образца в его трехмерную цифровую модель. При этом осуществляется первичная коррекция различных искажений и артефактов, которые могли возникнуть в процессе сканирования, например, из-за несоосной установки образца на платформу. На рисунке 4.2 представлена реконструированная в VGSTUDIO трехмерная модель одного из образцов после геомеханических испытаний, а также различные «разрезы» трехмерной модели образца.

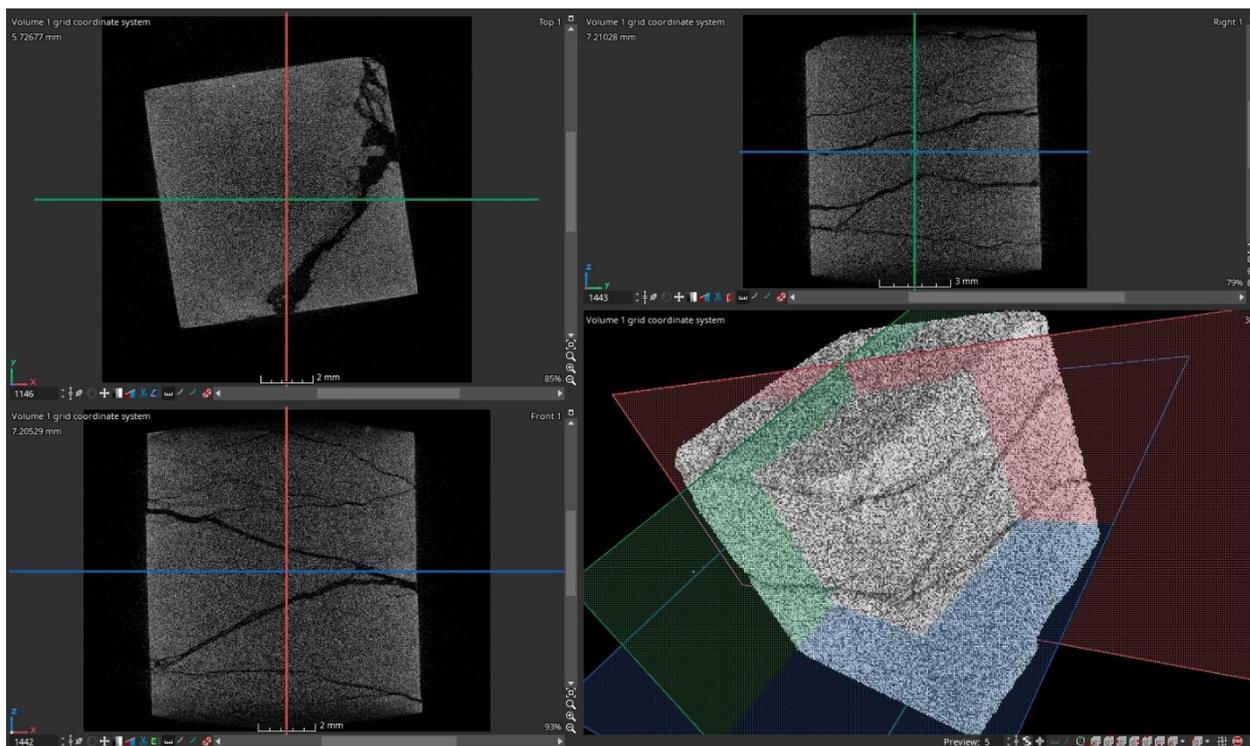


Рисунок 4.2 – Реконструированная в VGSTUDIO трехмерная модель одного из образцов после геомеханических испытаний на ИСТНН

После реконструкции трехмерной модели в VGSTUDIO можно провести первичный анализ внутренней структуры испытанного образца, изучить ориентацию крупных трещин, определить их характерные размеры.

Третий этап является наиболее технически сложным и трудоемким. Цифровая модель образца загружается в специализированное ПО GeoDict Math2Market GmbH, которое позволяет на основе методов численного моделирования проводить многомасштабную обработку трехмерной структуры, визуализировать физико-механические процессы и определять свойства материалов [165]. Первичная обработка трехмерной модели в GeoDict включает в себя: корректировку яркости (устранение засветов по краям образца), разворот и обрезку модели (привязка осей системы координат модели к осям кубического образца), фильтрацию изображения для удаления оставшихся артефактов и сглаживания. В дополнение к основным возможностям обработки изображений, GeoDict предлагает различные методы

сегментации изображений и способы моделирования однофазного и двухфазного потока жидкости в пористых средах. Процесс сегментации может быть выполнен на основе порогового метода [166], метода Otsu [167], а также при помощи метода AI Segmentation, основанном на использовании нейросети [160]. По результатам предварительного сравнения данных подходов для сегментации трехмерных моделей низкопроницаемых пород, исследуемых в данной работе, был выбран пороговый метод.

Для моделирования фильтрационных процессов на трехмерных цифровых структурах в GeoDict используется специальный программный модуль FlowDict [168]. Данный модуль позволяет определять проницаемость пористой структуры на основе закона Дарси, проводя моделирование несжимаемых стационарных ньютоновских потоков и прогнозируя среднюю физическую скорость потока для заданного перепада давления, используя различные приближения уравнений Навье-Стокса. FlowDict прост в освоении и активно используется исследователями по всему миру для моделирования фильтрационных потоков в широком спектре материалов, включая уголь [169], кокс [170], волокнистые среды [171] и нетканые материалы [172]. Для численного моделирования фильтрационных процессов используется решатель LIR [173], в основе которого лежит применение метода конечных разностей с использованием адаптивных сеток. Этот решатель рассчитывает не только проницаемость, но и поля скоростей и давления в объемных трехмерных структурах. При этом на скорость сходимости оказывает влияние сложность и неоднородность порового пространства. Следует заметить, что данный решатель имеет ряд ограничений, в том числе при моделировании быстрых потоков, характеризующихся высокими числами Рейнольдса, что приводит к возникновению турбулентности и сложностей, связанных с возникновением пограничного слоя. Кроме того, особой задачей оказывается моделирование условий проскальзывания на границе. Однако эти ограничения характерны для всех методов, работающих на воксельных сетках.

Во время растрескивания и разрушения образца при испытаниях на ИСТНН нарушается герметичность полимерной оболочки, из-за чего не удается точно измерить конечное значение проницаемости. В связи с этим для оценки конечной трещинной проницаемости образцов были использованы методы РКТ. Для моделирования фильтрационных процессов на трехмерных цифровых структурах образцов в GeoDict были задействованы две доступные в модуле FlowDict модели фильтрации: Стокса и Навье-Стокса [168]. Для воссоздания условий лабораторного измерения проницаемости были выбраны следующие параметры течения: рабочий флюид – воздух, перепад давления 0,1 атм, температура 20°C, в направлении фильтрации были выбраны периодические граничные условия [174], а по боковым стенкам образца – условия непротекания. Для периодических граничных условий анализируемая структура периодически повторяется в направлении движения потока. Области входа и выхода флюида в 10 вокселей каждая добавлялись до и после расчетной области для гомогенизации потока между периодическими структурами [175]. Направление моделируемого потока совпадало с направлением лабораторно измеренной проницаемости в образце. В качестве критерия остановки процесса моделирования потока был выбран критерий error bound, который обнаруживает осцилляции сходимости и предотвращает преждевременное завершение процесса на локальных минимумах или максимумах [176]. В частности, для решателя LIR порог error bound был установлен равным 0,1, что приводит к остановке процесса, как только относительная разница по сравнению с прогнозируемым значением становится меньше 0,1. В расчетах также использовался метод Multigrid, принцип которого заключается в использовании нескольких более грубых адаптивных сеток для ускорения сходимости при минимальных затратах дополнительной памяти [177]. В качестве одного из способов упрощения структуры для оптимизации вычислений был использован бининг 2x2, т.е. объединение соседних пар вокселей трехмерного изображения для уменьшения общего числа точек. При этом происходит осреднение оттенков

серого, однако общее число вокселей трехмерного изображения уменьшается в 8 раз.

Дополнительно было проведено сравнение значений конечной трещинной проницаемости образцов, определенной при физическом моделировании на установке ИСТНН и по результатам численного моделирования на трехмерных цифровых структурах образцов. Для корректного сравнения испытанные образцы повторно помещались в герметизирующую полимерную оболочку и всесторонне обжимались в ИСТНН в пределах 1-2 МПа, после чего проводилось измерение проницаемости. Такое измерение позволяет приблизительно оценить проницаемость уже испытанного ненагруженного образца.

В GeoDict также доступны специальные программные модули MatDict [178] и PoroDict [179] для определения пористости пород. Однако для исследования пористости низкопроницаемых пород-коллекторов Астраханского ГКМ и Верхневиллючанского НГКМ по результатам компьютерной томографии разрешающей способности микротомографа ProCon X-Ray CT-MINI оказалось недостаточно для обнаружения пор с диаметром менее 20 мкм, в связи с чем связность между порами не наблюдалась.

4.4 Выводы по Главе 4

В Главе 4 рассмотрены основные понятия и принципы рентгеновской компьютерной томографии. Представлено описание основных характеристик и возможностей высокоразрешающего рентгеновского микротомографа ProCon X-Ray CT-MINI ИПМех РАН, используемого в данной работе для исследования внутренней структуры низкопроницаемых пород-коллекторов Астраханского ГКМ и Верхневиллючанского НГКМ и проведения на трехмерных цифровых моделях образцов после геомеханических испытаний на ИСТНН численного моделирования фильтрационных процессов с целью оценки конечной трещинной проницаемости. Подробно описана методика

проведения исследований горных пород при помощи микротомографа ProCon X-Ray CT-MINI, включающая подготовку и сканированию образца, реконструкцию трехмерной модели образца по результатам сканирования, обработку данных и последующее численное моделирование фильтрационных процессов на трехмерной цифровой модели образца.

ГЛАВА 5. РЕЗУЛЬТАТЫ КОМПЛЕКСНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

5.1 Верхневилючанское месторождение

Для проведения исследований в данной работе из разведывательной скважины № 125-12 Верхневилючанского НГКМ с интервала глубин 1750,5-1757 м был отобран керновый материал, представленный карбонатными отложениями юрхской свиты с низкой проницаемостью. В общей сложности было изготовлено и испытано 6 образцов. Для прямого физического моделирования механических и фильтрационных процессов, протекающих в прискважинной зоне пласта (ПЗП) при реализации метода направленной разгрузки пласта на скважинах с различными конструкциями забоя и изучения влияния действующих в окрестности скважины напряжений на фильтрационные свойства пород-коллекторов было использовано четыре образца. Оставшиеся два образца были использованы для определения упругих и прочностных свойств породы по результатам трехосных испытаний.

5.1.1 Ультразвуковое прозвучивание и трехосные испытания

В таблице 5.1 приведены результаты измерений скоростей распространения продольных ультразвуковых волн по трем осям для некоторых образцов Верхневилючанского НГКМ, проведенных согласно методике, описанной в разделе 3.4. Из таблицы 5.1 видно, что скорости распространения продольных волн по трем осям в представленных образцах одинаковы или практически совпадают, что свидетельствует об изотропии упругих свойств исследуемых пород и согласуется с предварительно полученными данными ГИС по скважине № 125-12 Верхневилючанского НГКМ.

Таблица 5.1.

Данные по ультразвуковому прозвучиванию
некоторых образцов Верхневилючанского НГКМ

№ образца	Глубина, м	№ оси	v , м/с
BB3.1	1750,50	1	4166
		2	4166
		3	4166
BB5.2	1756,60	1	4652
		2	4761
		3	4706
BB6	1756,90	1	4761
		2	4761
		3	4761

Проведение трехосных испытаний на установке ИСТНН согласно методике, описанной в разделе 3.5.1, было выполнено на образцах BB2.1 и BB2.2, изготовленных из одного куска керна с глубиной залегания 1753,70 м [180]. Для наиболее точного построения касательной к кругам Мора приложение девиаторной нагрузки к образцам осуществлялось при обжатиях 2, 10 и 20 МПа. Девиаторное нагружение образцов осуществлялось по второй оси установки ИСТНН. Образец BB2.1 был расположен в нагружающем узле ИСТНН таким образом, что девиаторная нагрузка прикладывалась вдоль первой оси образца, соответствующей оси керна. Для образца BB2.2 девиаторное нагружение осуществлялось в направлении, перпендикулярном оси керна. В таблице 5.2 представлены результаты трехосных испытаний пород-коллекторов из скважины № 125-12 Верхневилючанского НГКМ, где ν – коэффициент Пуассона, E – модуль Юнга, S_2 – напряжение, при котором образец перешел к пластическому деформированию под действием девиаторной нагрузки, c и φ – удельное сцепление и угол внутреннего трения соответственно.

Таблица 5.2.

Результаты трехосных испытаний пород-коллекторов
из скважины № 125-12 Верхневилучанского НГКМ

№ образца	Цикл	Обжатие, МПа	E , ГПа	ν	S_2 , МПа	c , МПа	φ , град
ВВ2.1	1	2	14,5	0,29	87,8	22	32
	2	10	19,2	0,32	128		
	3	20	21,8	0,32	167,1		
ВВ2.2	1	2	16,1	0,39	87,4	25	27
	2	10	19,1	0,36	117,1		
	3	20	19,7	0,33	145,4		

Помимо определения упруго-прочностных характеристик породы, знание которых необходимо для построения геомеханических моделей месторождений и проведения математического моделирования механических и фильтрационных процессов в пласте при различных режимах эксплуатации скважин, по результатам трехосных испытаний можно оценить степень анизотропии упругих свойств породы. На рисунке 5.1 представлены кривые деформирования образцов ВВ2.1 и ВВ 2.2 для второго цикла трехосного испытания.

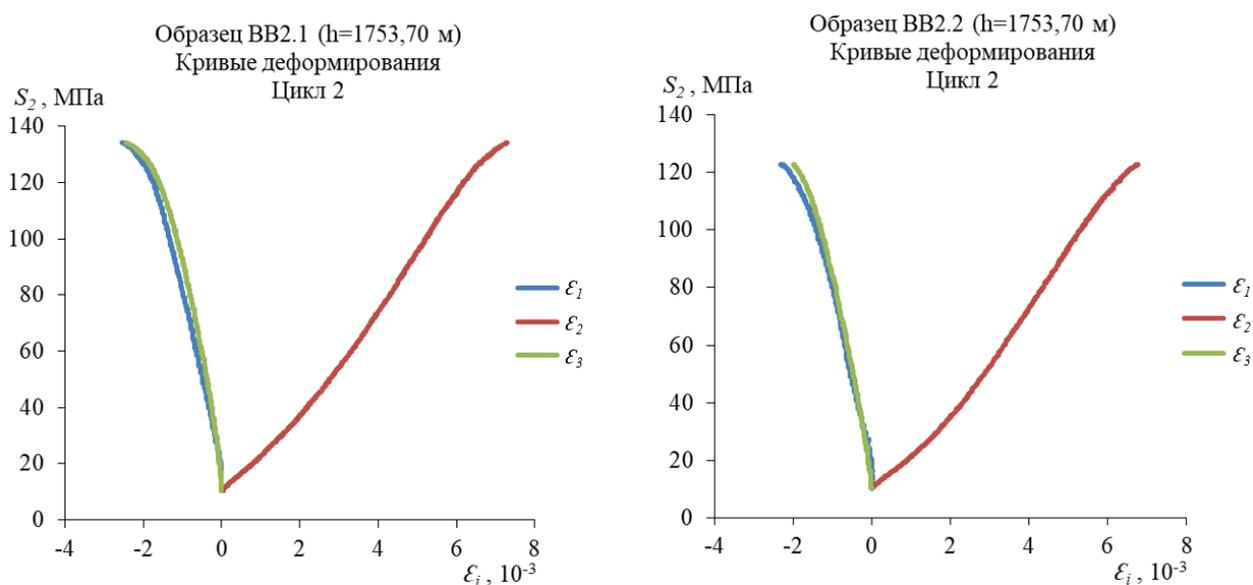


Рисунок 5.1 – Кривые деформирования образцов ВВ2.1 и ВВ 2.2 для второго цикла трехосного испытания

Видно, что деформации образцов ε_1 и ε_2 в плоскости, перпендикулярной направлению приложения девиаторной нагрузки, совпадают между собой несмотря на то, что приложение нагрузки при фиксированном обжатии происходит вдоль (ВВ2.1) и перпендикулярно (ВВ2.2) оси керна. Данные результаты подтверждают изотропность исследуемых пород-коллекторов Верхневилючанского НГКМ по упругим свойствам.

Таким образом, по результатам ГИС, ультразвукового прозвучивания и трехосных испытаний при проведении в Главе 2 теоретического анализа распределения напряжений в окрестности скважин для различных геометрий забоя и условий залегания, а также при составлении программ нагружения в Главе 3 была принята изотропная модель среды.

5.1.2 Эксперименты по прямому физическому моделированию механических и фильтрационных процессов в окрестности скважины

На установке ИСТНН по программе нагружения, отвечающей напряжениям, действующим на контуре необсаженной скважины (см. раздел 3.6.1), на образцах ВВ1 и ВВ4 было выполнено физическое моделирование реализации метода НРП.

Глубина залегания куска керна, из которого был изготовлен образец ВВ1, составляет 1752,68 м, что было учтено при построении программы нагружения. Во время проведения испытания данный образец располагался в нагружающем узле ИСТНН таким образом, что проницаемость измерялась в направлении, перпендикулярном оси керна, т.е. в плоскости горизонтального залегания. Начальное значение проницаемости, измеренное при всестороннем сжатии образца, равном 1 МПа, составило 11,5 мД. На рисунке 5.2 представлены программа нагружения образца, изменение проницаемости (а) и кривые деформирования (б) образца в ходе опыта. При резком росте деформаций образца нагружение останавливалось для наблюдения возможной ползучести (деформации образца при постоянном напряжении), в результате

которой могло произойти разрушение образца. При отсутствии ползучести или ее быстром затухании нагружение образца возобновлялось.

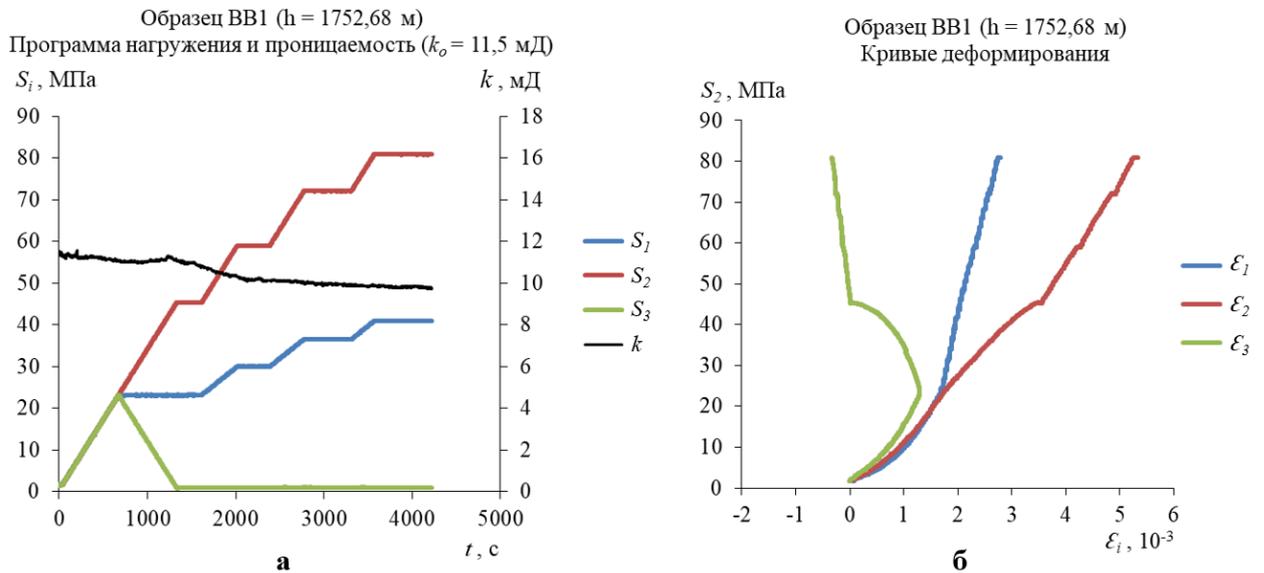


Рисунок 5.2 – Результаты физического моделирования на образце ВВ1: программа нагружения и кривая проницаемости (а), кривые деформирования (б)

Из рисунка 5.2 видно, что образец ВВ1 деформировался упруго на протяжении всего испытания и не разрушился даже при напряженном состоянии, соответствующем полному «осушению» ($p_c = 0$) необсаженной скважины. Проницаемость образца в процессе испытания изменялась незначительно, а ее конечное значение составило 9,7 мД. Таким образом, проницаемость образца уменьшилась на 15,7%. При этом основное уменьшение проницаемости произошло на этапе создания депрессии в скважине.

Образец ВВ4, глубина залегания которого равна 1750,90 м, был испытан по аналогичной программе нагружения. Однако его расположение в нагружающем узле ИСТНН было отличным от образца ВВ1: проницаемость образца ВВ4 измерялась в направлении, соответствующем направлению оси зерна. Начальная проницаемость образца при всестороннем сжатии, равном 1 МПа, составила 83,5 мД. На рисунке 5.3 представлены программа

нагружения, изменение проницаемости (а) и кривые деформирования (б) образца ВВ4 в ходе опыта.

Проницаемость образца на протяжении всего испытания менялась незначительно, однако наблюдалось небольшое ее увеличение в конце второго этапа программы, который соответствует состоянию, когда скважина пробурена и ее давление на забое равно пластовому. При этом рост проницаемости в конце второго этапа программы нагружения сопровождался существенными пластическими деформациями образца. При остановках во время нагружения наблюдалась ползучесть, которая достаточно быстро затухала. Несмотря на это образец не разрушился даже по завершении третьего этапа, соответствующего полному «осушению» скважины. При этом на этапе создания депрессии в скважине проницаемость образца оставалась практически постоянной. Конечное значение проницаемости составило 94,3 мД, что соответствует ее увеличению на 12,9%.

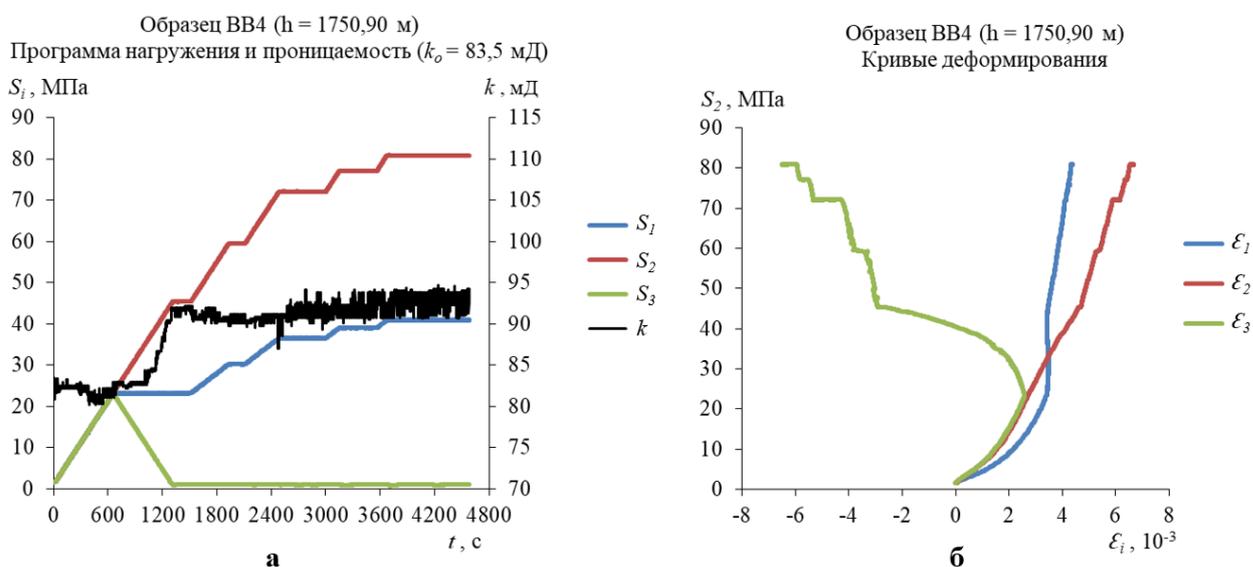


Рисунок 5.3 – Результаты физического моделирования на образце ВВ4: программа нагружения и кривая проницаемости (а), кривые деформирования (б)

Таким образом, применение метода НРП на скважине № 125-12 Верхневилючанского НГКМ в случае необсаженного ствола при отсутствии

перфорации не будет эффективным, так как не приведет к существенному росту проницаемости пород-коллекторов в призабойной зоне.

По программе нагружения, соответствующей напряжениям, действующим в окрестности кончика перфорационного отверстия в обсаженной скважине (см раздел 3.6.2), был испытан образец ВВ5.2, глубина залегания которого составляет 1756,60 м. Форма кончика перфорационного отверстия рассматривалась в наиболее распространенном приближении полусферы. Проницаемость образца измерялась вдоль направления, соответствующего оси керна. Начальное значение проницаемости при всестороннем обжати 1 МПа составило 1,4 мД. На рисунке 5.4 представлены программа нагружения образца, изменение проницаемости (а) и кривые деформирования (б) образца ВВ5.2 в ходе опыта.

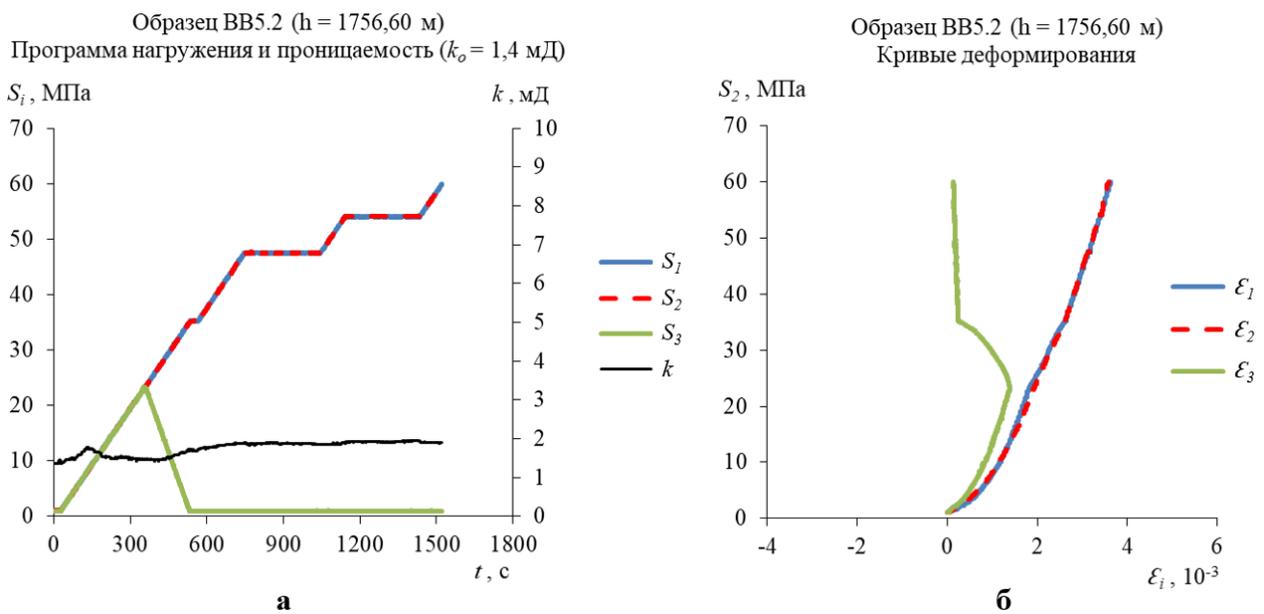


Рисунок 5.4 – Результаты физического моделирования на образце ВВ5.2: программа нагружения и кривая проницаемости (а), кривые деформирования (б)

Образец ВВ5.2 деформировался упруго на протяжении всех трех этапов нагружения и не разрушился при напряженном состоянии, отвечающего полному осушению скважины. При этом проницаемость образца менялась не существенно, а на этапе моделирования понижения давления оставалась

постоянной. Конечное значение проницаемости составило 1,9 мД. Таким образом, прирост проницаемости составил 36%, однако ее абсолютное значение осталось ничтожно малым, что не позволяет говорить об эффективности применения метода НРП на скважине № 125-12 Верхневилючанского НГКМ в случае обсаженного ствола скважины и его перфорации.

По программе нагружения, соответствующей напряжениям, действующим в верхней (нижней) точке на поверхности перфорационного отверстия в необсаженной скважине (см. раздел 3.6.2), отстоящей от ее оси на расстояние $r = 2R_c$ при реализации метода НРП, был испытан образец ВВ6, глубина залегания которого составляет 1756,90 м. Проницаемость образца измерялась вдоль направления, соответствующего оси керна. Начальное значение проницаемости при всестороннем обжатии 1 МПа составило 0,1 мД. На рисунке 5.5 представлены программа нагружения и кривая проницаемости (а), а также кривые деформирования (б) образца ВВ6.

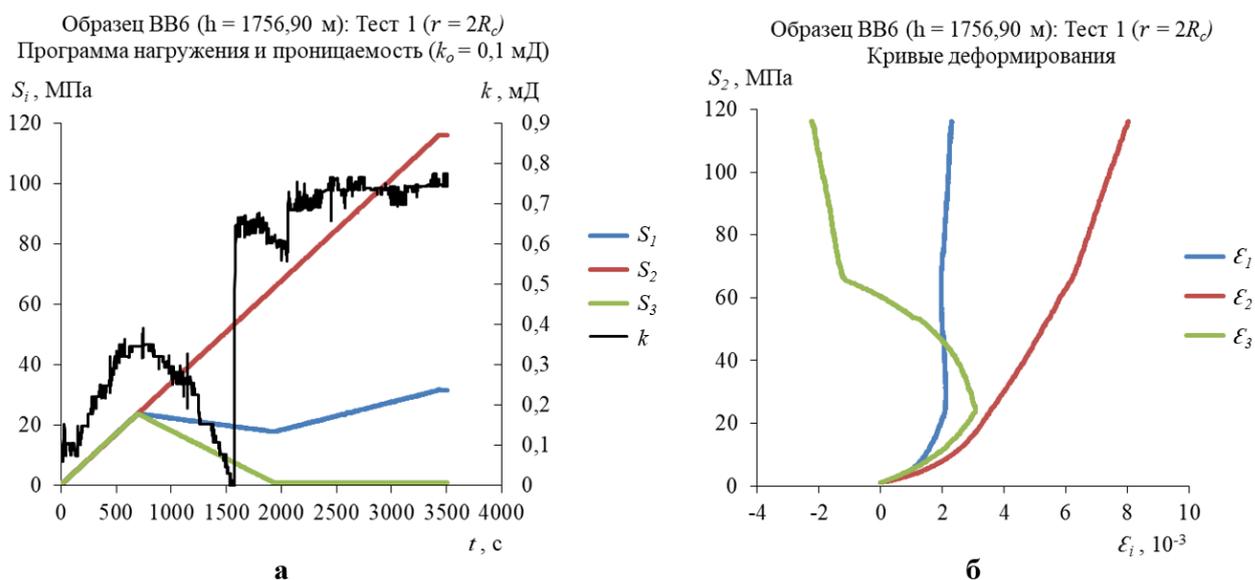


Рисунок 5.5 – Результаты физического моделирования на образце ВВ6 (тест 1): программа нагружения и кривая проницаемости (а), кривые деформирования (б)

Образец ВВ6 деформировался упруго на протяжении всего испытания, за исключением небольшого промежутка времени при моделировании второго

этапа программы. Так при $S_2 = 53$ МПа наблюдался скачок проницаемости, сопровождающийся небольшим, но быстрым изменением деформации образца по третьей оси – ε_3 . В дальнейшем поведение образца под нагрузками оставалось упругим вплоть до состояния, соответствующего полному «осушению» скважины. Образец ВВ6 не разрушился, проницаемость возросла до 0,8 мД, что говорит о кратном росте проницаемости. Однако, абсолютное значение проницаемости все еще осталось ничтожно малым.

Поскольку образец ВВ6 не разрушился и деформировался упруго за исключением небольшого промежутка времени, а также ввиду ограниченности кернового материала, данный образец был испытан повторно по аналогичной программе, рассчитанной для $r = 1,25R_c$. Проницаемость образца измерялась вдоль направления, соответствующего оси керна. Начальное значение проницаемости при всестороннем обжати 1 МПа составило 0,4 мД. На рисунке 5.6 представлены программа нагружения и кривая проницаемости (а), а также кривые деформирования (б) образца ВВ6 во время второго испытания.

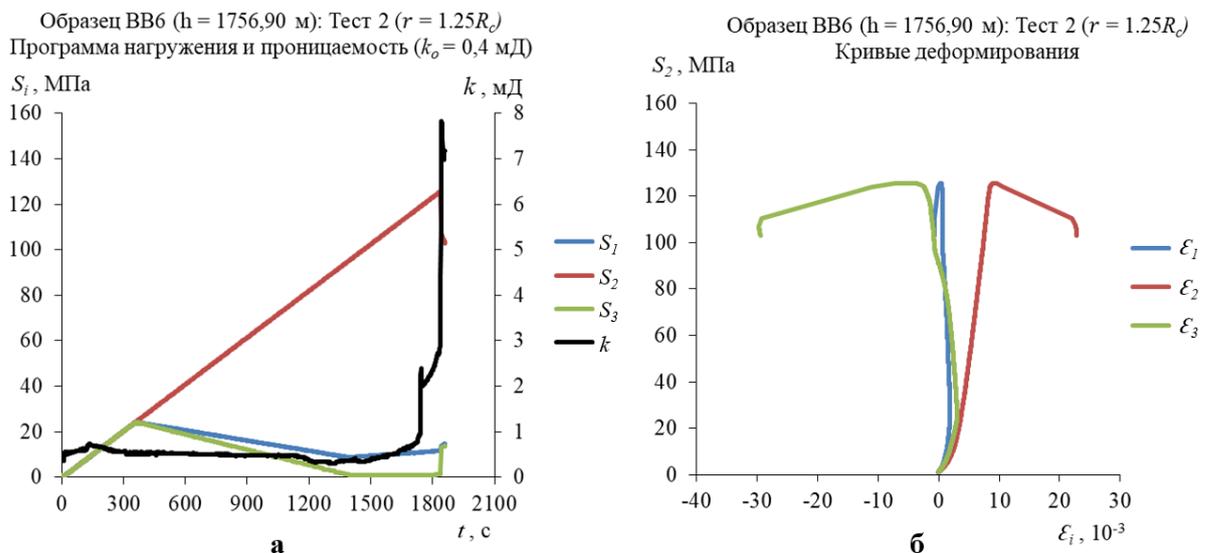


Рисунок 5.6 – Результаты физического моделирования на образце ВВ6 (тест 2): программа нагружения и кривая проницаемости (а), кривые деформирования (б)

Образец ВВ6 при повторном испытании деформировался упруго до середины третьего этапа нагружения, соответствующего понижению давления в необсаженной скважине с перфорационными отверстиями. При напряжении $S_2 = 120$ МПа началось неупругое деформирование образца, сопровождающееся первым резким увеличением проницаемости до 2,4 мД, что может говорить о возникновении первых трещин в образце. При $S_2 = 126$ МПа образец разрушился, что сопровождалось резким и неограниченным увеличением проницаемости. Конечное значение проницаемости кратно увеличилось и составило 7,8 мД. Поскольку прикладываемое к образцу в нагружающем узле установки ИСТНН напряжение S_2 соответствует абсолютному значению кольцевого напряжения $|S_{\varphi'}|$ в окрестности перфорационного отверстия, то из соотношений (2.19) для давления на забое скважины имеем $p_c = |q| - \frac{S_2}{3,92}$. Соответственно, начало неупругого деформирования образца отвечает давлению на забое скважины $p_c = 9,6$ МПа, а разрушение образца – давлению $p_c = 8,1$ МПа. Пластовое давление p_0 на глубине залегания данного образца составляет 17,5 МПа. Таким образом, разрушение образца произошло при депрессии $\Delta p = p_0 - p_c = 9,4$ МПа.

На рисунке 5.7 приведена фотография образца после испытания. На ней отчетливо видна образовавшаяся в образце система трещин, которая привела к увеличению его проницаемости.

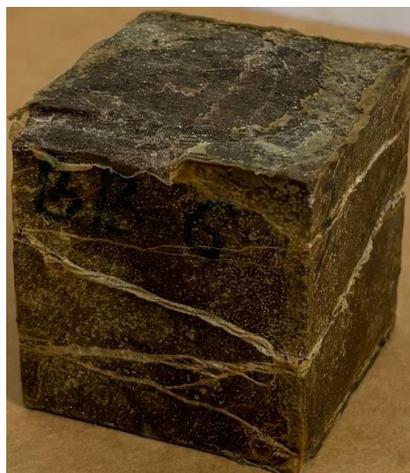


Рисунок 5.7 – Фотография образца ВВ6 после испытаний на ИСТНН

Результаты проведенных исследований демонстрируют возможность успешной реализации метода НРП на скважине № 125-12 Верхневиллючанского НГКМ в случае перфорирования открытого ствола скважины [181].

Следует заметить, что при разрушении образца необходимо вовремя остановить нагружение, чтобы не допустить повреждения нажимных плит ИСТНН. К тому же при разрушении образца нарушается целостность герметизирующей оболочки. В связи с этим точно измерить конечную проницаемость образца при помощи САИП установки ИСТНН не представляется возможным. Для оценки конечной трещинной проницаемости образца ВВ6 в разделе 5.1.3 будут использованы методы РКТ и численного моделирования.

5.1.3 Томографические исследования

После проведения геомеханических испытаний образца ВВ6 на установке ИСТНН для оценки его конечной трещиной проницаемости согласно методике описанной в разделе 4.3 были проведены томографические исследования при помощи высокоразрешающего рентгеновского микротомографа ProCon X-Ray CT-MINI и специализированного программного обеспечения VGSTUDIO и GeoDict Math2Market GmbH.

Сканирование образца ВВ6 было проведено со следующими параметрами: напряжение источника рентгеновского излучения 90 кВ, ток 89 мкА, время экспозиции 0,12 с, количество усреднений для каждой проекции 1, размер вокселя 21,048 мкм, шаг поворота образца при вращении на подвижной платформе 0,125°. После успешной реконструкции и устранения первичных артефактов сканирования в VGSTUDIO, связанных с несоосной установкой образца на подвижной платформе, обработка полученной трехмерной цифровой модели образца осуществлялась в ПО GeoDict. Трехмерная модель образца была обрезана и повернута для привязки осей системы координат модели к осям кубического образца. Итоговый размер

трехмерной цифровой структуры составил 1859 x 1846 x 1940 вокселей. Осуществлена корректировка яркости изображения методом Гаусса (Gaussian brightness correction). Для сглаживания изображения и упрощения процедуры сегментации была проведена фильтрация изображения при помощи алгоритма нелокального усреднения (Non-Local Means). Сегментация трехмерной модели (разделение изображения на фазы) осуществлялась пороговым методом. Численное моделирование фильтрационных процессов осуществлялось при помощи модуля FlowDict пакета GeoDict с использованием решателя LIR. Для моделирования фильтрационного потока на трехмерной структуре образца ВВ6 с помощью модуля FlowDict использовались две модели фильтрации: Навье-Стокса и Стокса. При этом для численного моделирования, как было описано в разделе 4.3, воссоздавались условия, соответствующие лабораторным измерениям проницаемости: рабочий флюид – воздух, перепад давления 0,1 атм, температура 20°C, в направлении фильтрации были выбраны периодические граничные условия, а по боковым стенкам образца – условия непротекания. Для решателя LIR порог error bound (критерий остановки процесса моделирования потока) был установлен равным 0,1.

Осуществить моделирование в рамках модели Навье-Стокса на первичной трехмерной структуре образца ВВ6 не удалось, наблюдалась нестабильность расчета: циклическое возрастание точности на итерациях и расхождение промежуточных результатов. Варьирование параметров решателя LIR было безуспешным. Моделирование в рамках модели Стокса на первичной структуре прошло успешно и заняло примерно 22 часа. По результатам численного моделирования фильтрационных потоков в приближении Стокса на первичной трехмерной цифровой структуре образца ВВ6 конечная трещинная проницаемость была оценена в 5,6 Д. Осуществить успешное моделирование фильтрационных потоков в рамках модели Навье-Стокса удалось только при упрощении первичной трехмерной структуры образца. Для этого был использован бининг 2x2 - объединение соседних пар

вокселей трехмерного изображения с осреднением оттенков серого, в результате которого общее число вокселей уменьшается в 8 раз. По результатам моделирования проницаемость образца была оценена в 1,1 Д, а сами расчеты заняли чуть менее 4-х часов. На рисунке 5.8 представлена система трещин, визуализированная в первичной внутренней структуре образца и визуализация поля распределения скоростей, рассчитанного по модели Навье-Стокса, на упрощенной структуре.

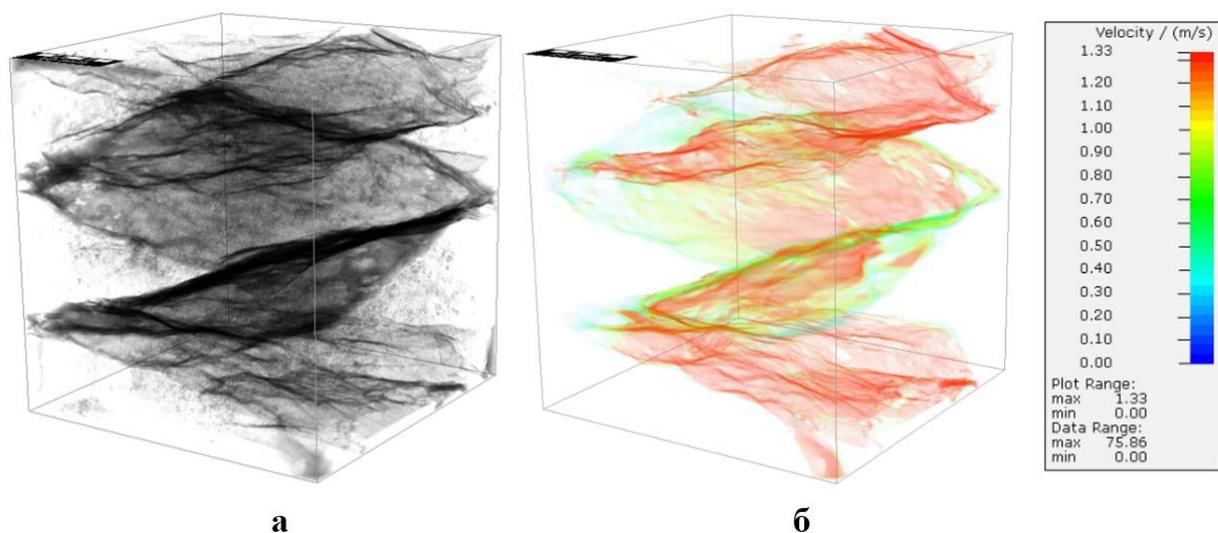


Рисунок 5.8 – Система трещин, визуализированная в первичной трехмерной цифровой структуре образца ВВ6 (а), и визуализированное на упрощенной структуре образца поле распределения скоростей, рассчитанное в рамках модели Навье-Стокса (б)

Моделирование в рамках модели Стокса на упрощенной внутренней структуре образца заняло чуть менее 2-х часов. При этом конечная трещинная проницаемость была оценена в 5,4 Д. Провести измерение проницаемости уже разрушенного образца ВВ6 на установке ИСТНН при всестороннем сжатии в 1 МПа после его повторной герметизации для сравнения с результатами численного моделирования не удалось из-за сложностей с осуществлением повторной герметизацией. Данное сравнение будет проведено для пород-коллекторов Астраханского ГКМ в разделе 5.2.3.

5.2 Астраханское месторождение

Для проведения исследований в данной работе из скважины № 630 Астраханского ГКМ с интервала глубин 3784,5-3792,8 м был отобран керновый материал, относящийся к отложениям филипповского горизонта и представленный карбонатными низкопроницаемыми породами. В общей сложности было изготовлено и испытано 8 образцов. Для прямого физического моделирования механических и фильтрационных процессов, протекающих в ПЗП при реализации метода направленной разгрузки пласта на скважинах с различными конструкциями забоя, и изучения влияния действующих в окрестности скважины напряжений на фильтрационные свойства пород-коллекторов было использовано шесть образцов. Два образца были использованы для определения упругих и прочностных свойств породы по результатам трехосных испытаний.

5.2.1 Ультразвуковое прозвучивание и трехосные испытания

В таблице 5.3 приведены результаты измерений скоростей распространения продольных ультразвуковых волн по трем осям для некоторых образцов Астраханского ГКМ, проведенных согласно методике, описанной в разделе 3.4. Из таблицы 5.3 видно, что скорости распространения продольных волн по трем осям в представленных образцах одинаковы или практически совпадают, что свидетельствует об изотропии упругих свойств исследуемых пород и согласуется с предварительно полученными данными ГИС по скважине № 630 Астраханского ГКМ.

Таблица 5.3.

Данные по ультразвуковому прозвучиванию
некоторых образцов Астраханского ГКМ

№ образца	Глубина, м	№ оси	v, м/с
A9	3787,50	1	5405
		2	5555
		3	5555
A11	3790,55	1	4494
		2	4545
		3	4469
A13	3791,56	1	4545
		2	4545
		3	4545

Для проведения трехосных испытаний на установке ИСТНН согласно методике, описанной в разделе 3.5.1, были выбраны образцы A15.1 и A15.2, изготовленные из одного куска керна, глубина залегания которого 3792,74 м. Девиаторная нагрузка аналогично испытаниям пород Верхневеличчанского НГКМ прикладывалась к образцам вдоль второй оси установки ИСТНН при обжатиях 2, 10 и 20 МПа. При это девиаторное нагружение образца A15.1 осуществлялось вдоль первой оси образца, соответствующей оси керна, а образца A15.2 – в перпендикулярном оси керна направлении. К сожалению, образец A15.2 разрушился в начале первого цикла трехосного испытания, что может быть связано с наличием в образце трещин или неточностью при изготовлении на камнерезном и шлифовальном оборудовании. В связи с отсутствием достаточного количества кернового материала было принято решение ограничиться только одним трехосным испытанием образца A15.1. Данный образец разрушился при девиаторном нагружении на втором цикле трехосного испытания, в связи с чем определение c и φ осуществлялось по касательной к двум кругам Мора. В таблице 5.4 представлены результаты трехосных испытаний образца A15.1.

Таблица 5.4.

Результаты трехосных испытаний образца А15.1 Астраханского ГКМ

№ образца	Цикл	Обжатие, МПа	E , ГПа	ν	S_2 , МПа	c , МПа	φ , град
А15.1	1	2	28,3	0,14	110,2	20	45
	2	10	32,5	0,17	157,4		

На рисунке 5.9 представлены кривые деформирования образцов А15.1 для второго цикла трехосного испытания. Видно, что деформации образца ε_1 и ε_2 в плоскости, перпендикулярной направлению приложения девиаторной нагрузки, совпадают между собой, что может служить подтверждением изотропности упругих свойств пород-коллекторов Астраханского ГКМ. По результатам ГИС, ультразвукового прозвучивания и трехосных испытаний для данного месторождения также была выбрана изотропная модель среды.

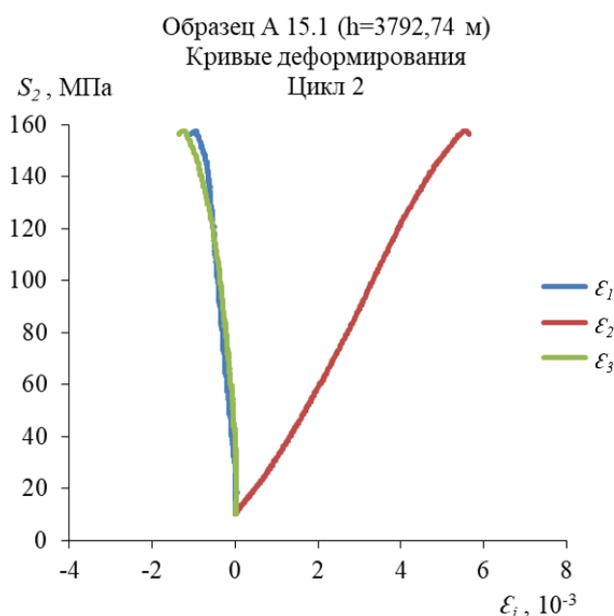


Рисунок 5.9 – Кривые деформирования образца А15.1 для второго цикла трехосного испытания

5.2.2 Эксперименты по прямому физическому моделированию механических и фильтрационных процессов в окрестности скважины

На установке ИСТНН по программе нагружения, отвечающей напряжениям, действующим на контуре необсаженной скважины (см. раздел

3.6.1), был испытан образец А13, глубина залегания которого составляет 3791,56 м. Во время проведения испытания данный образец располагался в нагружающем узле ИСТНН таким образом, что проницаемость измерялась в направлении, перпендикулярном оси керна, т.е. в плоскости горизонтального залегания, что соответствует направлению фильтрации углеводородов в скважину. Проницаемость образца, измеренная при всестороннем сжатии 1 МПа, составила менее 0,1 мД, что является минимальным значением, которое можно измерить при помощи САИП установки ИСТНН (см. раздел 3.2). На рисунке 5.10 представлены программа нагружения, изменение проницаемости (а) и кривые деформирования (б) образца А13 в ходе опыта.

Из рисунка 5.10 видно, что образец А13 деформировался упруго на протяжении первого и второго этапа нагружения. В конце третьего этапа нагружения, соответствующего понижению давления в необсаженной скважине, при $S_2 = 125$ МПа поведение образца под нагрузками перестало быть упругим, наблюдались пластические деформации. При $S_2 = 141$ МПа образец разрушился, но зафиксировать изменение его проницаемости не удалось из-за нарушения целостности герметизирующей оболочки.

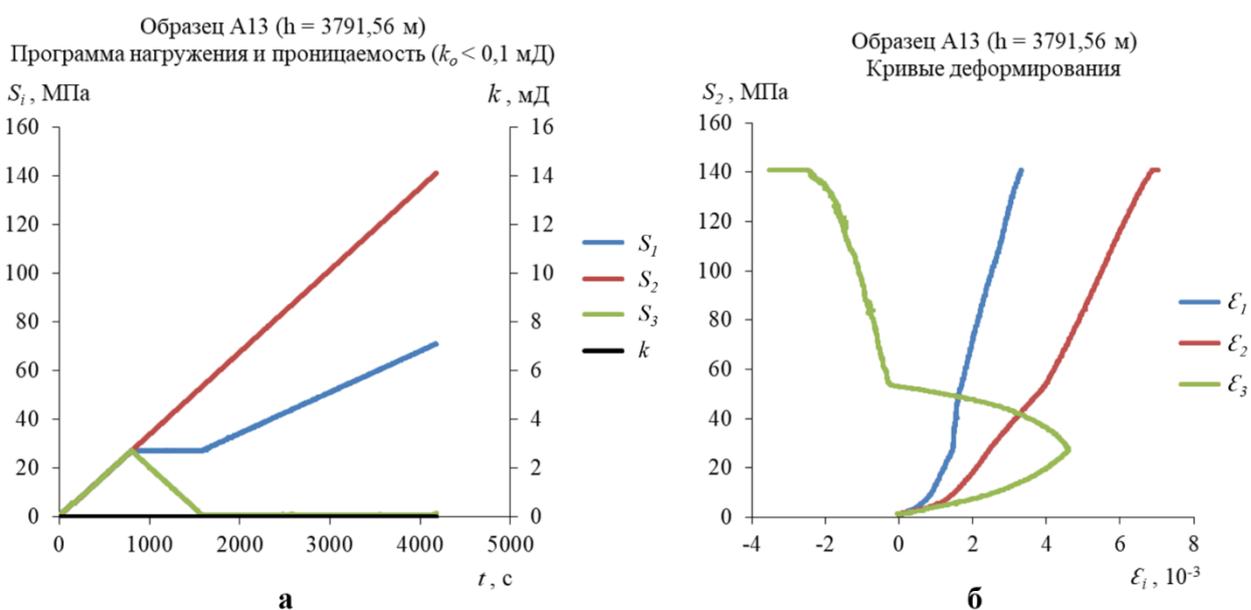


Рисунок 5.10 – Результаты физического моделирования на образце А13: программа нагружения и кривая проницаемости (а), кривые деформирования (б)

При этом сам факт растрескивания образца говорит о возможности успешного применения метода НРП на скважине № 630 Астраханского ГКМ в случае необсаженного ствола при отсутствии перфорации.

По программе нагружения, соответствующей напряжениям, действующим в окрестности кончика перфорационного отверстия в обсаженной скважине (см раздел 3.6.2), был испытан образец А9, глубина залегания которого составляет 3787,5 м. Форма кончика перфорационного отверстия, как и при экспериментах на породах Верхневеличчанского НГКМ, рассматривалась в наиболее распространенном приближении полусферы. Проницаемость образца измерялась в направлении, перпендикулярном оси зерна. Проницаемость образца при всестороннем сжатии 1 МПа не превышала 0,1 мД. На рисунке 5.11 представлены программа нагружения, изменение проницаемости (а) и кривые деформирования (б) образца А9 в ходе опыта.

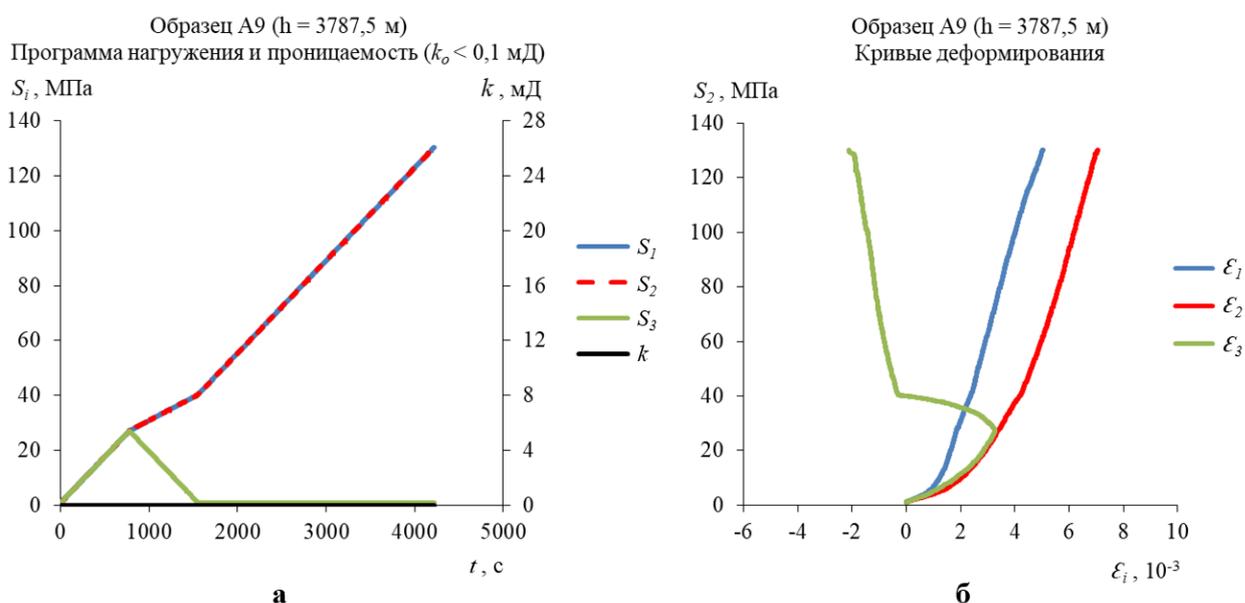


Рисунок 5.11 – Результаты физического моделирования на образце А9: программа нагружения и кривая проницаемости (а), кривые деформирования (б)

Из рисунка 5.11 видно, что образец А9 деформировался упруго на протяжении всего испытания и не разрушился даже при состоянии, соответствующем полному «осушению» обсаженной скважины с перфорационными отверстиями. Проницаемость образца не изменилась, что

говорит о неэффективности применения метода НРП на скважине № 630 Астраханского ГКМ в случае обсаженного ствола скважины и его перфорации.

По программе нагружения, соответствующей напряжениям, действующим в верхней (нижней) точке на поверхности перфорационного отверстия в необсаженной скважине (см. раздел 3.6.2), отстоящей от ее оси на расстояние $r = 2R_c$ при реализации метода НРП, были испытаны образцы А4.2 и А11, глубина залегания которых составляет 3785,2 м и 3790,5 м соответственно. Проницаемость данных образцов измерялась в направлении, перпендикулярном оси керна, а ее начальное значение при всестороннем сжатии 1 МПа не превышало 0,1 мД. На рисунках 5.12 и 5.13 представлены программы нагружения и кривые проницаемости (а), а также кривые деформирования (б) образцов А4.2 и А11 в ходе опытов соответственно.

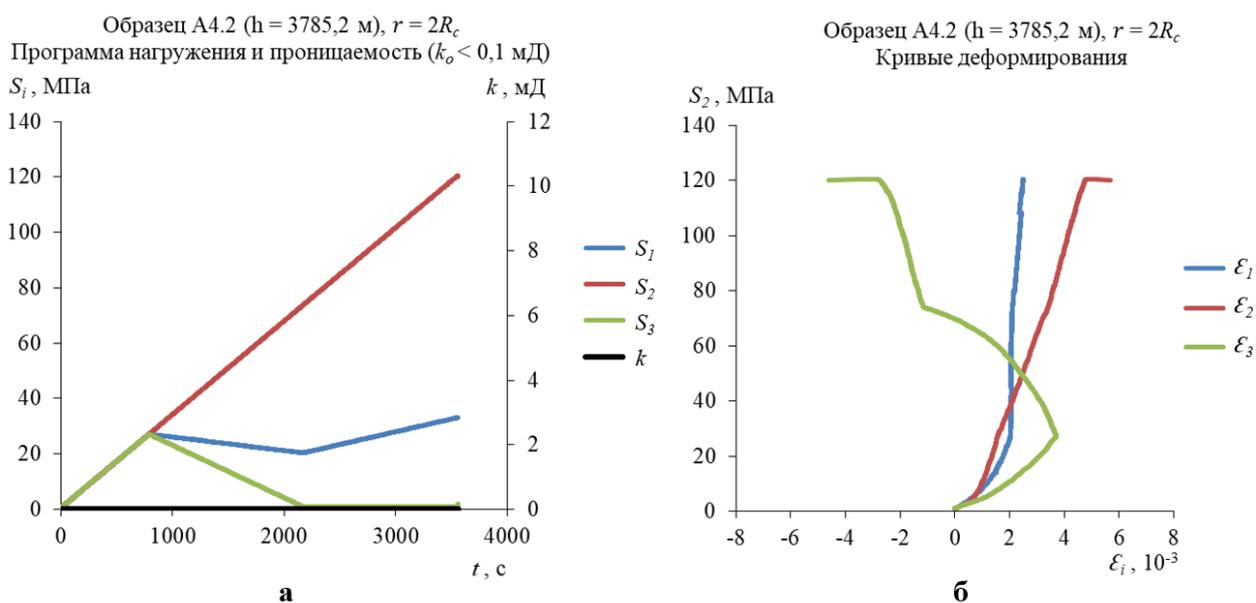
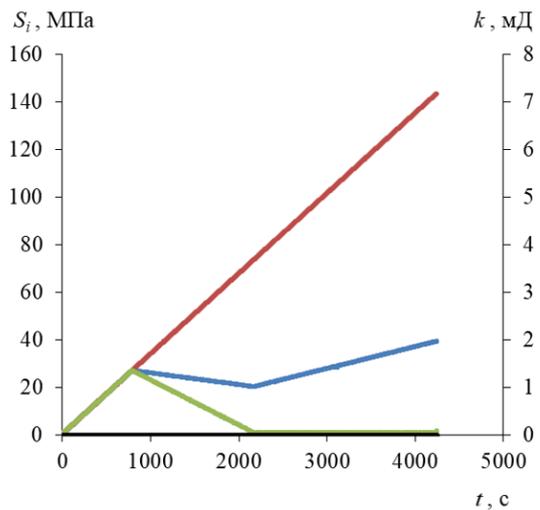


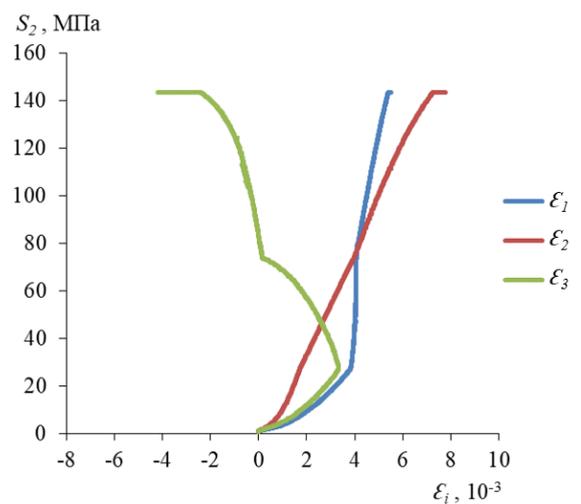
Рисунок 5.12 – Результаты физического моделирования на образце А4.2: программа нагружения и кривая проницаемости (а), кривые деформирования (б)

Образец А11 ($h = 3790,5$ м), $r = 2R_c$
 Программа нагружения и проницаемость ($k_0 < 0,1$ мД)



а

Образец А11 ($h = 3790,5$ м), $r = 2R_c$
 Кривые деформирования



б

Рисунок 5.13 – Результаты физического моделирования на образце А11: программа нагружения и кривая проницаемости (а), кривые деформирования (б)

Из рисунков 5.12 и 5.13 видно, что образцы А4.2 и А11 деформировались упруго на протяжении первых двух этапов нагружения. Примерно в середине третьего этапа нагружения, соответствующего созданию депрессии в скважине, в образцах возникали пластические деформации, приводящие к их разрушению. При этом проницаемость образцов не менялась на протяжении всего испытания, зафиксировать ее изменение не удалось даже при их разрушении (растрескивании).

Иная картина наблюдалась при испытании образцов А2.1 и А4.1 по аналогичной программе, в которой моделировалось напряженное состояние в верхней точке на поверхности перфорационного отверстия в необсаженной скважине, отстоящей от оси скважины на расстояние $r = 1,25R_c$. Глубина залегания образца А2.1 составляет 3784,5 м, а образца А4.1 – 3785,2 м. Данные образцы располагались в нагружающем узле ИСТНН таким образом, что их проницаемость измерялась в направлении, перпендикулярном оси керна. Как и для других образцов, изготовленных из керна скважины №630 Астраханского ГКМ, начальная проницаемость образцов А2.1 и А4.1 при всестороннем сжатии 1 МПа не превышала 0,1 мД. На рисунках 5.14 и 5.15 представлены программы нагружения и кривые проницаемости (а), а также

кривые деформирования (б) образцов А2.1 и А4.1 в ходе опытов соответственно.

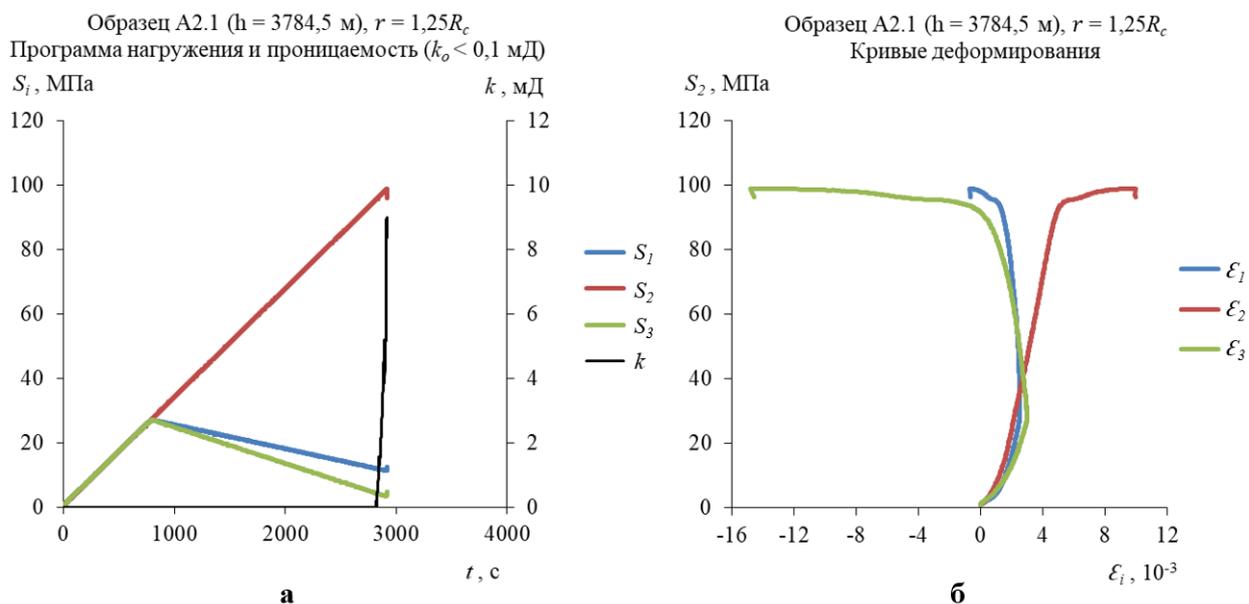


Рисунок 5.14 – Результаты физического моделирования на образце А2.1: программа нагружения и кривая проницаемости (а), кривые деформирования (б)

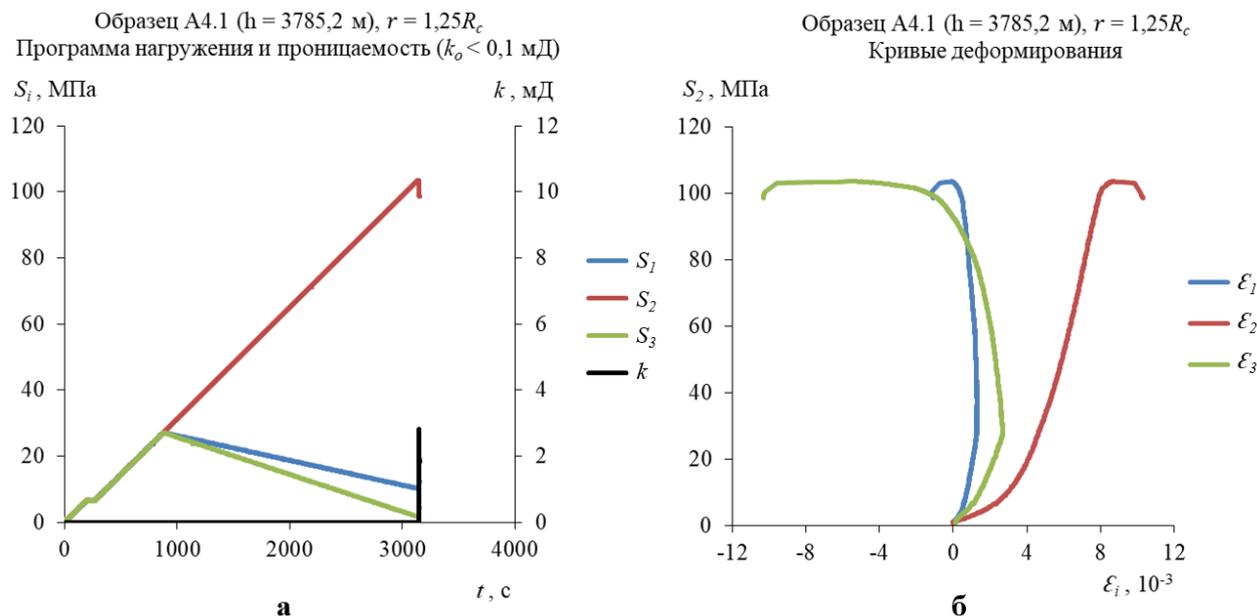


Рисунок 5.15 – Результаты физического моделирования на образце А4.1: программа нагружения и кривая проницаемости (а), кривые деформирования (б)

Из рисунков 5.14 и 5.15 видно, что образцы на протяжении первого этапа деформировались упруго, однако уже на втором этапе нагружения в образцах

возникали существенные пластические деформации, приводящие к разрушению образцов и резкому скачкообразному росту проницаемости. Конечная проницаемость А2.1, которую удалось измерить при помощи САИП установки ИСТНН, составила 9 мД, а образца А4.1 – 2,8 мД. При этом оба образца разрушились, так и не дойдя до точки В второго этапа нагружения, которая соответствует напряженному состоянию в верхней точке перфорационного отверстия, когда давление на забое скважины равно пластовому. Образец А2.1 перешел к неупругому деформированию при $S_2 = 88$ МПа, а его разрушение произошло при $S_2 = 98,9$ МПа, что соответствует, согласно соотношениям (2.19), давлению на забое скважины $p_c = 61,81$ МПа. Образец А4.1 перешел к неупругому деформированию при $S_2 = 94$ МПа, а его разрушение произошло при $S_2 = 103,6$ МПа, что соответствует, согласно соотношениям (2.19), давлению на забое скважины $p_c = 60,75$ МПа. При этом пластовое давление p_0 в исследуемой скважине на глубине залегания испытываемых образцов составляет 60 МПа.

На рисунке 5.16 приведены фотографии образцов А2.1 (а) и А4.1 (б) после испытания, на которых отчетливо видна образовавшаяся в образцах разветвленная сеть макротрещин, выполняющая роль новых фильтрационных каналов и вызвавшая увеличение их проницаемости.

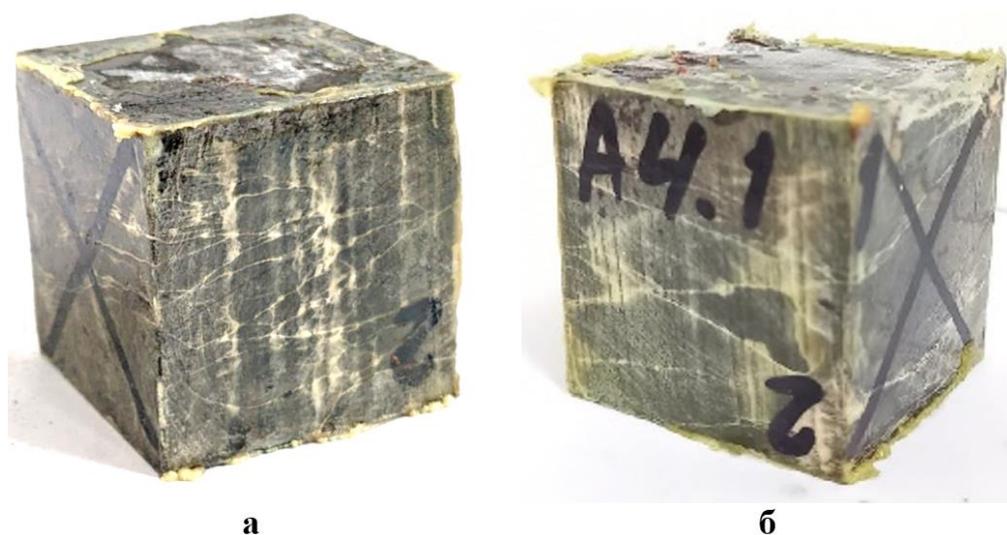


Рисунок 5.16 – Фотографии образцов А2.1 (а) и А4.1 (б) после испытаний на ИСТНН

Таким образом, для увеличения проницаемости пород-коллекторов в ПЗП скважины № 630 Астраханского ГКМ необходимо осуществить перфорацию необсаженного ствола скважины. При этом разрушение пород-коллекторов и образование в ПЗП системы микро- и макротрещин, что приведет к росту проницаемости пород-коллекторов в ПЗП и увеличению продуктивности скважины, произойдет примерно при пластовом давлении, т.е. $p_c = p_0$. Таким образом, нет необходимости дополнительно понижать давление на забое скважины [182, 183].

Аналогично разделу 5.1.3 в разделе 5.2.3 для оценки конечной трещинной проницаемости образцов А2.1 и А4.1, которую из-за нарушения целостности герметизирующей оболочки невозможно точно измерить при помощи САИП установки ИСТНН, будут использованы методы РКТ и численного моделирования.

5.2.3 Томографические исследования

После проведения геомеханических испытаний на установке ИСТНН для оценки его конечной трещиной проницаемости образцов А2.1 и А4.1 согласно методике описанной в разделе 4.3 были проведены томографические исследования при помощи высокоразрешающего рентгеновского микротомографа ProCon X-Ray CT-MINI и специализированного программного обеспечения VGSTUDIO и GeoDict Math2Market GmbH.

Сканирование образца А2.1 было проведено со следующими параметрами: напряжение источника рентгеновского излучения 90 кВ, ток 89 мкА, время экспозиции 0,9 с, количество усреднений для каждой проекции 5, размер вокселя 22,059 мкм, шаг поворота образца при вращении на подвижной платформе 0,125°. После успешной реконструкции и устранения первичных артефактов сканирования в VGSTUDIO, связанных с несоосной установкой образца на подвижной платформе, обработка полученной трехмерной цифровой модели образца осуществлялась в ПО GeoDict. Трехмерная модель образца была обрезана и повернута для привязки

осей системы координат модели к осям кубического образца. Итоговый размер трехмерной цифровой структуры составил 1370 x 1434 x 1378 вокселей. Корректировка яркости, фильтрация изображения, а также сегментация трехмерной модели образца A2.1 были выполнены аналогично образцу ВВ6. Численное моделирование фильтрационных процессов также осуществлялось при помощи модуля FlowDict пакета GeoDict с использованием решателя LIR. Были задействованы две доступные модели фильтрации: Стокса и Навье-Стокса. Условия моделирования полностью соответствовали условиям лабораторного измерения проницаемости при помощи САИП установки ИСТНН. Однако, параметры решателя LIR могли различаться для корректировки стабильности вычислений.

Моделирование в рамках модели Стокса продемонстрировало итоговый результат расчета трещинной проницаемости образца A2.1 в 2 Д. При этом вычисление заняло всего 1,4 часа, а условием выхода из цикла вычислений (точностью) было условие $\text{error bound } 0,1$. Моделирование в рамках модели Навье-Стокса не дало результата для данной точности вычислений при стандартных параметрах решателя. При этом наблюдалась нестабильность расчета: циклическое возрастание точности на итерациях, расхождение промежуточных результатов. При этом для вычислений, которые так и не окончились спустя 14 часов, требовались большие вычислительные мощности. Первичную оценку проницаемости в 849 мД в рамках модели Навье-Стокса удалось получить на данных масштабах структуры при выставлении более грубого условия окончания цикла $\text{error bound } 0,2$, а также подбором параметров оптимизации вычислений, таких как Multigrid, Relaxation и прочие [173]. Для получения результата с точностью $\text{error bound } 0,1$ потребовалось снижения параметра Relaxation до 0,1, включение Mulltgrid, применение метода Крылова и использование встроенной оптимизации Speed для ускорения вычислений. Полученное значение проницаемости составило 664 мД, расчет занял 29 часов, однако в процессе вычислений по-прежнему наблюдались скачки точности и временные

расхождения. Визуализация полученной структуры и результирующего поля распределения скоростей по модели Навье-Стокса представлены на рисунке 5.17 (а), направление движения потока осуществляется сверху вниз.

Для упрощения трехмерной структуры и оптимизации вычислений, как и на трехмерной структуре образца А2.1, был использован бининг 2x2. Полученная в результате бининга структура представлена на рисунке 5.17 (б). Визуально заметно упрощение внешнего вида структуры, а также локальное изменение распределение скоростей потока фильтрации. Для полученной структуры было проведено моделирование в рамках модели Стокса, которое дало результат в 919 мД, затратив всего 12 минут на вычисление при $\epsilon_{\text{bound}} 0,1$. Расчет в рамках модели Навье-Стокса для данного случая не требовал ручной оптимизации вычислений, продемонстрировал результат в 360 мД за 45 мин.

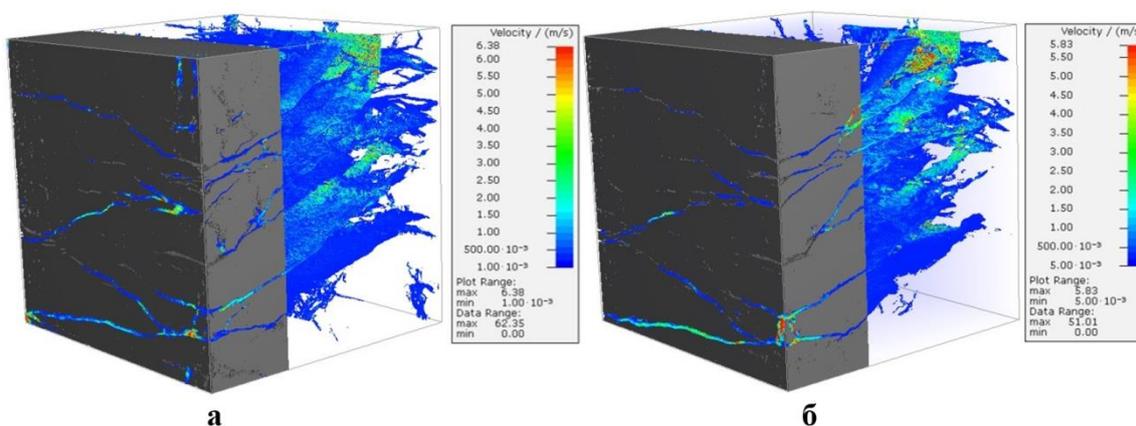


Рисунок 5.17 – Полученная структура материала, а также поле распределения скоростей в рамках модели Навье-Стокса (а); полученная в результате бининга 2x2 структура, а также поле распределения скоростей в рамках модели Навье-Стокса (б)

Для сопоставления результатов численного моделирования образец А2.1 был повторно покрыт герметизирующей оболочкой и помещен в нагружающий узел ИСТНН. Образец был доведен до состояния всестороннего сжатия в 1 МПа, что является необходимым для проведения измерения проницаемости при помощи САИП установки ИСТНН. Такое измерение

позволяет приблизительно оценить проницаемость уже испытанного ненагруженного образца, поскольку необходимое всестороннее сжатие существенно влияет на раскрытость, образованных после геомеханического воздействия, трещин. Конечное значение трещинной проницаемости образца А2.1 на ИСТНН было оценено в 460 мД [14, 184].

Аналогичные результаты были получены для образца А4.1, обработка трехмерной цифровой структуры которого была абсолютно идентична обработке трехмерной цифровой структуры образца А2.1 [185, 186]. Конечное значение проницаемости образца А4.1 при повторном измерении на установке ИСТНН составило 150 мД. Конечная трещинная проницаемость, определенная по результатам численного моделирования фильтрационных потоков в рамках модели Стокса, составила 1,3 Д, а в рамках модели Навье-Стокса – 250 мД. При этом для упрощения трехмерной структуры образца также был использован биннинг 2x2. На рисунке 5.18 в первичной цифровой структуре образца серым выделена образовавшаяся система трещин, а на упрощенной структуре образца визуализировано поле распределения скоростей, рассчитанное в рамках модели Навье-Стокса.

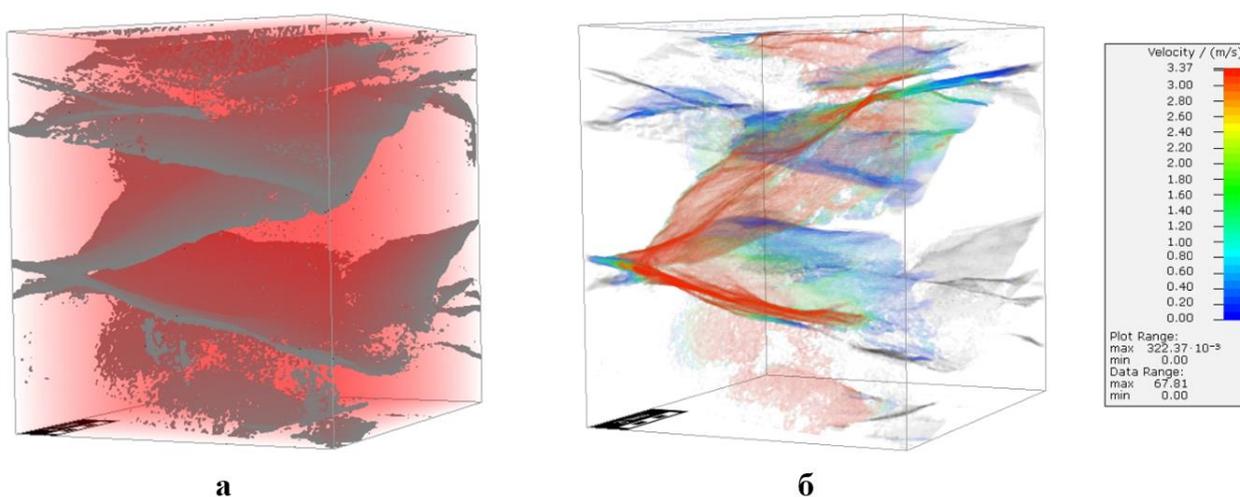


Рисунок 5.18 – Система трещин, образовавшаяся в образце после геомеханического моделирования (а), и визуализированное на упрощенной структуре образца поле распределения скоростей, рассчитанное в рамках модели Навье-Стокса (б)

Таким образом, расчеты в рамках модели Навье-Стокса демонстрируют меньший разброс результатов и хорошее соответствие измеренной в лабораторных условиях проницаемости. Разница в результатах вычислений для двух моделей в целом предсказуема и обусловлена различиями в математических предположениях, содержащихся в моделях. Вычислительная модель, использующая уравнения Стокса, наиболее применима при малых перепадах давления, но имеет неоспоримое преимущество - меньшее потребление вычислительных ресурсов. Модель Навье-Стокса обеспечивает более точную оценку при более высоких перепадах давления, но требует тщательных оптимизационных расчетов для успешного завершения вычислений: расчеты с использованием этих методов не всегда завершаются успешно. Для оптимизации расчетов необходимо использовать специальные процедуры, которые используют больше памяти, ресурсов процессора или требуют больше времени. При этом обе модели демонстрируют завышенную оценку проницаемости на первичной структуре образца.

Одним из способов решения проблемы высокого потребления ресурсов является выбор меньшего размера области моделирования, т.е. выбор репрезентативного объема породы. В случае моделирования многофазной фильтрации или фильтрации через многокомпонентную структуру, требования к этому объему значительно возрастают. В противном случае могут потребоваться высокопроизводительные кластерные и суперкомпьютерные ресурсы. Тем не менее, выбор репрезентативного объема становится затруднительным при рассмотрении трещинной проницаемости. Распределение макротрещин не равномерно по объему, и каждая из трещин дает весомый вклад в проницаемость. Более того, связь трещин между собой происходит в разных частях объема образца. В таких случаях нельзя ограничиться частью объема образца при моделировании, как это часто делается для рассмотрения поровой проницаемости в виду относительной однородности распределения пор в породе. Однако при использовании крупных структур с большим числом вокселей необходимо задействовать

значительно больше памяти и ресурсов процессора, а также существенно больше времени. В связи с этим при моделировании трещинной фильтрации в породах отдавать приоритет следует экономящим вычислительные ресурсы стабильным методам. При этом, как показали проведенные в диссертационной работе исследования, для оценки трещинной проницаемости низкопроницаемых пород наиболее эффективным подходом, позволяющим добиться хорошего соответствия физически измеренной проницаемости, является упрощение начальной структуры – использование бининга 2x2 (слияния соседних вокселей). Для пористой проницаемости такой подход существенно искажает конечный результат, т.к. размер пор, через которые происходит фильтрация, значительно меняется по сравнению с исходным. В случае же наличия макротрещин в породе, снижение числа пикселей изображения оказывает менее значительную роль на результаты моделирования, при этом существенно снижая затраты ресурсов и времени.

Стоит отметить, что различия в рассчитанных и физически измеренных значениях проницаемости неизбежны даже при идеально подобранных условиях: качество исходного изображения (разрешение) и постобработка (артефакты, фильтрация, сегментация) оказывают существенное влияние на результат расчета [171]. Уменьшение размера вокселя позволяет уточнить различимые границы трещин и пор, а корректный подбор параметров сканирования минимизирует наличие артефактов изображения, которые влияют на различимость внутреннего пространства. Выбор параметров фильтрации изображения влияет на процедурное объединение пикселей для последующей сегментации и меньшее потребление ресурсов при моделировании различного рода процессов на полученной структуре. С другой стороны, сглаживание изображения или бининг снижают различимость границ порового пространства, что сказывается на вычислениях. Важным недостатком томографии в целом является неоднозначность сегментации полученных изображений, т.е. присвоение вокселям изображения ярлыков различных материалов (например, разделение

на породу и воздух). В зависимости от выбранного метода сегментации и предварительной работы с изображением, распределение пор, трещин и их границ может отличаться, влияя на конечный вид получаемой структуры (и иногда весьма существенно). В данной работе потребовалось проведение нескольких сканирований образцов для проведения корректной сегментации изображения. Отдельно стоит отметить, что модели, лежащие в основе вычислительных методов, могут давать разные результаты в зависимости от упрощений и приближений, лежащих в их основе.

При проведении исследований на большой выборке образцов породы представляется возможным определение оптимальных параметров сканирования, обработки и сегментации для точного соответствия результатов моделирования с результатами физически измеренной проницаемости. После этого созданная методика может быть применена к другим образцам породы того же типа, если все параметры сканирования и обработки изображений сохраняются, а калибровка прибора точная и неизменная.

5.3 Выводы по Главе 5

В Главе 5 представлены результаты комплексных экспериментальных исследований механических и фильтрационных процессов в низкопроницаемых коллекторах Верхневиллючанского НГКМ и Астраханского ГКМ. По результатам трехосных испытаний построены кривые деформирования образцов и определены упруго-прочностные характеристики пород. Осуществлено ультразвуковое прозвучивание образцов, по результатам которого была подтверждена изотропность упругих свойств исследуемых пород-коллекторов. Проведены эксперименты по прямому физическому моделированию механических и фильтрационных процессов в окрестности скважин при создании в них депрессии для различных конструкций забоя. По результатам экспериментов получены кривые деформирования образцов и зависимости их проницаемости от напряженно-деформированного состояния. Определены оптимальные конструкции забоя и

величины необходимых депрессий, при которых начинается разрушение пород, сопровождающееся резким ростом их проницаемости. Для оценки конечной трещинной проницаемости образцов были использованы методы РКТ. Осуществлено сканирование образцов, проведена обработка данных РКТ, реконструированы трехмерные модели внутренних структур образцов, на которых было проведено численное моделирование фильтрационных процессов в рамках моделей Стокса и Навье-Стокса. Выбран способ упрощения трехмерных структур, позволивший добиться достаточно хорошего соответствия проницаемости образцов, рассчитанной на основе численных методов, с проницаемостью определённой в лабораторных условиях на установке ИСТНН. Томографические исследования подтверждают факт роста проницаемости образцов после испытаний на установке ИСТНН.

Из полученных результатов следует ряд практически важных выводов:

1. Из практики, особенно на месторождениях с низкопроницаемыми коллекторами, известно, что понижение давления на забое обсаженных скважин с перфорированным забоем практически до их осушения не приводит к росту дебита скважин. Аналогичная картина часто наблюдается и для необсаженных скважин, что было подтверждено проведенными в данной работе экспериментами. В этом случае может помочь предварительная перфорация необсаженного ствола скважины, поскольку при этом в окрестности перфорационного отверстия возникают сжимающие напряжения, значительно превосходящие напряжения при других конструкциях забоя скважины. Этот вывод подтверждают результаты приведенных в работе экспериментов.

2. Как следует из соотношений (2.18) – (2.19), существенная концентрация напряжений на поверхности перфорационного отверстия в необсаженной скважине возникает не более, чем на расстоянии 2 – 3 радиусов скважины от ее оси. Из сказанного следует важный вывод, касающийся оптимальной формы перфорационных отверстий в необсаженной скважине –

они должны быть достаточно короткими, но широкими. В этом случае эффект от их использования будет максимальным. Так при испытаниях пород-коллекторов Верхневилючанского НГКМ и Астраханского ГКМ резкое увеличение проницаемости образцов во время разрушения наблюдалось только при испытаниях по программе нагружения, соответствующей напряжениям, действующим в верхней (нижней) точке на поверхности перфорационного отверстия в необсаженной скважине, отстоящей от ее оси на расстояние $r = 1,25R_c$. При испытаниях по аналогичной программе нагружения, но для $r = 2R_c$, рост проницаемости образцов не наблюдался.

3. Обобщая результаты экспериментов и математических расчетов, можно заключить, что геомеханический подход с использованием физического моделирования процессов деформирования, разрушения и фильтрации в продуктивных пластах может служить основой для разработки новых эффективных и экологически чистых технологий повышения продуктивности нефтегазовых скважин и увеличения нефтеотдачи низкопроницаемых пластов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Настоящая диссертационная работа была посвящена исследованиям механических и фильтрационных процессов в низкопроницаемых породах залежей углеводородов в условиях сложного нагружения и направлена на создание научных основ технологий разработки месторождений с низкопроницаемыми коллекторами. Для проведения исследований использовались низкопроницаемые породы продуктивных горизонтов Верхневилючанского НГКМ и Астраханского ГКМ. Основные результаты работы заключаются в следующем:

1. Проведены трехосные испытания исследуемых низкопроницаемых пород-коллекторов, по результатам которых определены их упруго-прочностные характеристики. По результатам ультразвукового прозвучивания исследуемых пород определена изотропия их упругих свойств.

2. Проведен анализ напряженно-деформированного состояния в окрестности скважин для различных конструкций забоя и условий залегания в рамках изотропной модели среды. Изотропия подтверждается данными ГИС по исследуемым скважинам, результатами трехосных испытаний и ультразвукового прозвучивания образцов из исследуемых пород. В качестве возможных конструкций забоя были рассмотрены необсаженный (открытый) ствол скважины, а также обсаженный и необсаженный ствол скважины с перфорационными отверстиями.

3. Для испытаний низкопроницаемых пород-коллекторов Верхневилючанского НГКМ и Астраханского ГКМ на установке ИСТНН с учетом условий залеганий для испытуемых образцов проведено построение программ нагружения, отвечающих напряжениям, действующим на контуре необсаженной скважины, в окрестности кончика перфорационного отверстия в обсаженной скважине, а также в верхней точке на контуре протяженного перфорационного отверстия в необсаженной скважине при понижении давления на ее забое.

4. По созданным программам нагружения проведено прямое физическое моделирование процессов деформирования, разрушения и связанного с ними изменения проницаемости низкопроницаемых пород-коллекторов под действием неравномерного напряженно-деформированного состояния при понижении давления в скважине с различными конструкциями забоя. Установлены зависимости от времени деформаций и проницаемости исследуемых пород в условиях сложного трехосного нагружения.

5. Определены параметры оптимального геомеханического воздействия на скважины Верхневелиючанского НГКМ и Астраханского ГКМ с целью увеличения продуктивности скважин и нефтегазоотдачи пласта. Для исследуемых объектов установлены конструкция забоя и величины необходимых депрессий, при которых произойдет растрескивание породы в призабойной зоне скважины, сопровождающееся резким ростом их проницаемости и увеличению продуктивности скважин. На основе моделирования на установке истинно трехосного нагружения реальных процессов деформирования и разрушения пород в окрестности скважины обоснована эффективность применения на месторождениях с низкопроницаемыми коллекторами метода направленной разгрузки пласта.

6. Для оценки конечной трещинной проницаемости образцов, изготовленных из кернового материала исследуемых месторождений, после испытаний на установке ИСТНН были использованы методы рентгеновской компьютерной томографии. Сканирование образцов осуществлено при помощи высокоразрешающего рентгеновского микротомографа ProCon X-Ray CT-MINI. В специализированном ПО проведена обработка данных РКТ: устранены артефакты и различные искажения, возникающие при сканировании; осуществлена реконструкция трехмерных моделей образцов; проведена корректировка яркости, фильтрация и сегментация изображений. На трехмерных цифровых структурах образцов при помощи численных методов осуществлено моделирование фильтрационных процессов в рамках модели Стокса и Навье-Стокса, а также рассчитаны проницаемости образцов. Расчеты

в рамках модели Навье-Стокса демонстрируют наиболее точное соответствие измеренной в лабораторных условиях проницаемости, но для этого требуется упрощение трехмерной структуры образцов – применение бининга 2x2, что, как показали расчеты, является самым эффективным, быстрым и менее трудоемким подходом.

Автор выражает благодарность и признательность В.И. Кареву за постановку задачи, руководство работой, ценные советы, постоянные внимание и поддержку. Автор благодарен всему коллективу лаборатории геомеханики ИПМех РАН, в особенности заведующему Ю.Ф. Коваленко за руководство экспериментом, неоценимую консультативную помощь и важные замечания; В.В. Химуле за всестороннюю помощь в реализации томографических исследований; Н.И. Шевцову и Ю.Н. Семенову за помощь в подготовке и проведении экспериментов; Т.О. Чаплиной за всеобъемлющую поддержку на протяжении всего обучения в аспирантуре.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шмаль Г.И. Проблемы при разработке трудноизвлекаемых запасов нефти в России и пути их решения // Георесурсы. 2016. Т. 18. № 4. Ч. 1. С. 256–260.
2. Шпуров И.В. Трудноизвлекаемые запасы Российской Федерации. Критерии и оценка. Возможность разработки // Проблемы экономики и управления нефтегазовым комплексом. 2017. № 7. С. 8–12.
3. Леонтьев Д.С., Шамсутдинов Н.М., Овчинников В.П., Рожкова О.В., Спасибов В.М. Многостадийный гидравлический разрыв продуктивного пласта // Бурение и нефть. 2021. № 5. С. 32–36.
4. Ашрапов Т.Р. Технология многостадийного гидравлического разрыва пласта // Академический журнал Западной Сибири. 2016. Т. 12. № 5 (66). С. 6–8.
5. Xie H., Lu J., Li C., Li M., Gao M. Experimental study on the mechanical and failure behaviors of deep rock subjected to true triaxial stress: A review // Int. J. Min. Sci. Technol. 2022. V. 32. No. 5. P. 915–950.
6. Коваленко Ю.Ф., Карев В.И., Барков С.О., Химуля В.В. Анализ подходов к изучению влияния напряженно-деформированного состояния на механические и фильтрационные свойства пород-коллекторов // Процессы в геосредах. 2024. № 1 (39). С. 2386–2395.
7. Христианович С.А., Коваленко Ю.Ф., Кулинич Ю.В., Карев В.И. Увеличение продуктивности нефтяных скважин с помощью метода георыхления // Нефть и газ Евразия. 2000. № 2. С. 90–94.
8. Карев В.И., Коваленко Ю.Ф., Химуля В.В., Шевцов Н.И. Физическое моделирование метода направленной разгрузки пласта // Газовая промышленность. 2021. № 7 (819). С. 66–73.
9. Karev V., Kovalenko Y., Ustinov K. Geomechanics of oil and gas wells. Advances in oil and gas exploration and production. Switzerland, Cham: Springer International Publishing, 2020. 166 p.

10. Karev V.I., Kovalenko Yu.F. Triaxial loading system as a tool for solving geotechnical problems of oil and gas production. In: Kwasniewski M., Li X., Takahashi M. (eds.) True Triaxial Testing of Rocks. Leiden: CRC Press/Balkema, 2013. P. 301-310.
11. Ефимов А.А., Савицкий Я.В., Галкин С.В., Шапиро С.А. Опыт исследования керна карбонатных отложений методом рентгеновской томографии // Вестник ПНИПУ. Геология. Нефтегазовое и горное дело. 2016. Т. 15. № 18. С. 23–32.
12. Callow B., Falcon-Suarez I., Marin-Moreno H., Bull J.M., Ahmed S. Optimal X-ray micro-CT image based methods for porosity and permeability quantification in heterogeneous sandstones // Geophys. J. Int. 2020. V. 223. No 2. P. 1210–1229.
13. Jacob A., Enzmann F., Hinz C. et al. Analysis of Variance of Porosity and Heterogeneity of Permeability at the Pore Scale // Transp. Porous Media. 2019. V. 130. P. 867–887.
14. Химуля В.В., Барков С.О. Анализ изменения внутренней структуры низкопроницаемых пород-коллекторов средствами компьютерной томографии при реализации метода направленной разгрузки пласта // Актуальные проблемы нефти и газа. 2022. № 4 (39). С. 27–42.
15. CT-MINI by ProCon X-Ray GmbH: [Электронный ресурс]. URL: <https://procon-x-ray.de/en/ct-mini> (Дата обращения: 05.09.2024).
16. Мамбетов Ш.А. Геомеханика: учебник: в 2-х т. Т. 1. Основы геомеханики. Бишкек: Изд-во КРСУ, 2013. 138 с.
17. Алиев М.М., Лутфуллин А.А., Исмагилова З.Ф. Нефтегазовая геомеханика: учебное пособие. Вологда: Инфра-Инженерия, 2020. 160 с.
18. Бордовский, Г.А., Кондратьев А.С., Чоудери А. Физические основы математического моделирования: Учебник и практикум. 2-е изд., испр. и доп. М.: Издательство Юрайт, 2020. 319 с.
19. Рейзлин В.И. Математическое моделирование: Учебное пособие. 2-е изд., пер. и доп. М.: Издательство Юрайт, 2020. 126 с.

20. Barkov S.O., Khimulia V.V. Evolution of Approaches to Modelling Geomechanical Processes in Oil and Gas Reservoirs // PMMEEP 2022. Springer Proceedings in Earth and Environmental Sciences. Cham: Springer International Publishing AG, 2023. P. 239–249.
21. Дементьев Л.Ф. Статистические методы обработки и анализа промыслово-геологических данных. М.: Недра, 1966. 206 с.
22. Барков С. О. Развитие подходов к прогнозированию добычи нефти на основе статистических методов моделирования // Процессы в геосредах. 2021. № 4. С. 1307–1314.
23. Маневич Л.И., Гендельман О.В. Аналитически разрешимые модели механики твердого тела. Ижевск: Регулярная и хаотическая динамика, Институт компьютерных исследований, 2016. 344 с.
24. Peaceman D.W., Rachford H.H. Numerical calculation of multidimensional miscible displacement // Soc. Pet. Eng. J. 1962. V. 2. No. 4. P. 327-339.
25. Карев В.И., Коваленко Ю.Ф., Сидорин Ю.В., Степанова Е.В., Устинов К.Б. Моделирование фильтрации флюида в скважину на больших глубинах с учетом анизотропии прочностных свойств пород коллектора // Процессы в геосредах. 2017. № 2 (11). С. 512–521.
26. Устинов К.Б., Карев В.И., Коваленко Ю.Ф., Барков С.О., Химуля В.В., Шевцов Н.И. Экспериментальное исследование влияния анизотропии на ориентацию вывалов в скважинах // Изв. РАН. МТТ. 2023. № 3. С. 21–35.
27. Павлов В.А., Павлюков Н.А., Субботин М.Д. и др. Геомеханическое моделирование для оценки влияния разработки слабосцементированных коллекторов // Нефтяная провинция. 2022. № 4(32). С. 208–222.
28. Корельский Е.П., Зиновьев А., Коротков С., Рассказов А. Использование геомеханики для оптимизации процесса бурения скважин и разработки месторождений в Ямальском регионе // Российская отраслевая энергетическая конференция: Сборник материалов конференции. М.: ООО «Геомодель», 2023. С. 977–991.

29. Абишев Д.Б., Шишкин В.В., Алехин И.Г., Насибуллин А.З. Построение 3d геомеханической модели и ее влияние на динамические показатели модели карбонатного коллектора // Вестник нефтегазовой отрасли Казахстана. 2021. Т. 3. №1. С. 43–55.
30. Босиков И.И., Ключев Р.В., Силаев И.В., Пилиева Д.Э. Оценка параметров многостадийного гидравлического разрыва пласта с помощью 4D моделирования // Горные науки и технологии. 2023. Т. 8. № 2. С. 141–149.
31. Petrel Reservoir Geomechanics – Интегрированная среда для 3D и 4D геомеханического моделирования: [Электронный ресурс]. URL: https://digital.slb.ru/upload/iblock/e98/petrel_reservoir_geomechanics.pdf (Дата обращения: 08.09.2024).
32. Sanei M., Ramezanzadeh A., Asgari A. Building 1D and 3D static reservoir geomechanical properties models in the oil field // J. Petrol. Explor. Prod. Technol. 2023. V. 13. P. 329–351.
33. Щедрина Н. Н. Развитие методов оценки механических характеристик массивов осадочных пород на месторождениях с неизученным характером процесса сдвижения: дис. ... канд. техн. наук: 25.00.20 – Москва, 2014. 131 с.
34. Протодяконов М.М. Давление горных пород на рудничную крепь. Екатеринбург: Типогр. Губерн. Земства, 1907. 102 с.
35. Tournaise des demenions oi danneroux pillers dis carrieres des pressirs ouxguelles les terrains sont soumis daus les profoucleurs. Ann, miner 1884, V. 82–84, 1886, VII. P. 104–109.
36. Шевяков Л.Д. О расчете прочных размеров и деформации опорных целиков // Изв. АН СССР. ОТН. 1941. № 7–8. С. 3–13; № 9. С. 43–58.
37. Динник А.Н. О давлении горных пород и расчет крепи круглой шахты // Инженерный работник. 1925. № 7. С. 1–12.

38. Шмидт Р. О зависимости между напряжениями и деформациями в области упрочнения // Теория пластичности. М.: Изд-во Иностран. лит., 1948. С. 256-321.
39. Абдылдаев Э.К. Математическое моделирование геомеханических процессов и численно-компьютерный анализ состояние массива. Алматы: ТОО «Лантар Трейд», 2020. 288 с.
40. Динник А.Н., Моргаевский А. Б., Савин Г.Н. Распределение напряжений вокруг подземных горных выработок // Труды совещания по управлению горным давлением. М.–Л.: Академиздат, 1938. С. 7-55.
41. Fenner R. Untersuchungen zur Erkenntnis des Gebirgsdruckes // Gluckauf. 1938. V. 74. No. 32. P. 681-695.
42. Головачев Д.Д. Измерение давления горных пород на рудничную крепь с помощью струнного метода // Труды совещания по управлению горным давлением. М.–Л.: Академиздат, 1938. С. 103–112.
43. Кузнецов Г.Н. Экспериментальные методы исследования вопросов горного давления // Труды совещания по управлению горным давлением. М.: Углетехиздат, 1948. С 90–150.
44. Слесарев В.Д. Механика горных пород. М.: Углетехиздат, 1948. 303 с.
45. Jacubec J., Laubscher D.H. The MRMR Rock Mass Rating Classification System in Mining Practice // Proceedings MassMin 2000. Brisbane, 2000. P. 413–421.
46. Михлин С.Г. О напряжениях в породе над угольным пластом // Изв. АН СССР. ОТН. 1942. № 7–8. С. 13–28.
47. Шерман Д.И. Об одном методе решения некоторых задач теории упругости для двухсвязных областей // Доклады Академии Наук СССР. 1947. Т. 40. №8. С. 701–704.
48. Лехницкий С.Г. Теория упругости анизотропного тела. М.–Л.: ГИТТЛ, 1950. 300 с.
49. Савин Г.Н. Распределение напряжений около отверстий. Киев: Наукова думка, 1968. 887 с.

50. Родин И.В. К вопросу о влиянии выработок на напряженное состояние горного массива // Изв. АН СССР. ОТН. 1950. № 12. С. 1763–1783.
51. Белаенко Ф.А. Напряжения вокруг круглого ствола шахты при упругопластичных породах // Изв. АН СССР. ОТН. 1950. № 6. С. 914–925.
52. Ставрогин А.Н., Протосення А.Г. Пластичность горных пород. М.: Недра, 1979. 301 с.
53. Руппнейт К.В. Некоторые вопросы механики горных пород. М.: Углетехиздат, 1954. 383 с.
54. Немчин Н.П. Об учете неупругого разрыхления в теории предельного давления // ФТПРПИ. 1971. №3. С. 13–17.
55. Либерман Ю.М. Давление на крепь капитальных выработок. М.: Наука, 1969. 119 с.
56. Соколовский В.В. Статика сыпучей среды. М.–Л.: Изд. АН СССР, 1942. 207 с.
57. Голушкевич С.С. Статика предельных состояний грунтовых масс. М.: ГИТТЛ, 1957. 288 с.
58. Фисенко Г.Л. Устойчивость бортов угольных карьеров. М.: Углетехиздат, 1956. 230 с.
59. Фисенко Г.Л. Устойчивость бортов карьеров и отвалов. М.: Недра, 1965. 387 с.
60. Баренблатт Г. И., Христианович С. А. Об обрушении кровли при горных выработках // Изв. АН СССР. ОТН. 1955. № 11. С. 73–86.
61. Салганик Р.Л. Приближение сплошной среды для описания деформирования слоистого массива // Изв. АН СССР. МТТ. 1987. № 3. С. 48–56.
62. Салганик Р.Л., Афанасенко Г.В., Иофис И.М. Горное давление: учеб. для студ. горных спец. вузов. М.: Недра, 1992. 207 с.

63. Коваленко Ю.Ф., Салганик Р.Л. Трещиновидные неоднородности и их влияние на эффективные механические характеристики // Изв. АН СССР. МТТ. 1977. № 5. С. 76–86.
64. Салганик Р.Л. Механика тел с большим числом трещин // Изв. АН СССР. МТТ. 1973. № 4. С. 149–158.
65. Ержанов Ж.С. Теория ползучести горных пород и ее приложения. Алма-Ата: Наука, 1964. 175 с.
66. Максимов А.П. Выдавливание горных пород и устойчивость подземных выработок. М.: Госгортехиздат, 1963. 144 с.
67. Работнов Ю.Н. Ползучесть элементов конструкций. М.: Наука, 1966. 752 с.
68. Глушко В.Т., Широков А.З. Механика горных пород и охрана выработок. Киев: Наукова думка, 1967. 154 с.
69. Terzaghi K. *Erdbaumechanik auf bodenphysikalischen Grundlagen*. Leipzig: Deuticke, 1925. 399 p.
70. Терцаги К. Строительная механика грунта. М.: Госстройиздат, 1933. 392 с.
71. Biot M.A. General theory of three-dimensional consolidation // *Journal of Applied Physics*. 1941. V. 12. P. 155–164.
72. Biot M.A. Le problème de la Consolidation des Matières argileuses sous une charge // *Ann. Soc. Sci. Brux.* 1935. Ser. B. V. 55. P. 110–113.
73. Zoback M.D. *Reservoir Geomechanics*. Cambridge: Cambridge University Press, 2007. 449 p.
74. Khristianovich S.A. Fundamentals of filtration theory // *Soviet Mining Science*. 1991. V. 27. No 1. P. 1–15.
75. Желтов Ю.П., Христианович С.А. О гидравлическом разрыве нефтеносного пласта // *Известия АН СССР. ОТН*. 1955. № 5. С. 3–41.
76. Darcy H. *Recherches experimentales relatives au mouvement de l'eau dans les tuyaux*. Paris: Mallet-Bachelier, 1857. 268 p.

77. Dupuit J. Essai et experiences sur le tirage de voitures et sur le frottement de second espece. Paris: Carilian – Goeury, 1837. 167 p.
78. Жуковский Н.Е. Просачивание воды через плотины // Опытномелиоративная часть НКЗ. 1923. Вып. 30. С. 30–52.
79. Жуковский Н.Е. Собрание сочинений. Т. 3: Гидравлика. Прикладная механика. М.–Л.: Гостехтеоретиздат, 1949. 700 с.
80. Басниев К.С., Власов А.М., Кочина И.Н., Максимов В.М. Подземная гидравлика: Учебник для вузов. М.: Недра, 1986. 303 с.
81. Пыхачев Г.Б., Исаев Р.Г. Подземная гидравлика: Учебное пособие. М.: Недра, 1972. 360 с.
82. Павловский Н.Н. Гидравлика. Ч.1. Л.: Изд. упр. вод. хоз. Средней Азии, 1928. 379 с.
83. Павловский Н.Н. Гидравлический справочник. М.–Л.: ОНТИ, 1937. 890 с.
84. Лейбензон Л.С. Движение газа в пористой среде // Нефтяное хозяйство. 1929. № 10. С. 497-519; 1930. № 8-9. С. 181–197.
85. Лейбензон Л.С. Движение природных жидкостей и газов в пористой среде. М.-Л.: ОГИЗ. Гостехтеоретиздат, Москва, 1947. 244 с.
86. Kozeny I. Uber kapillare leitng des wassers im boden // Sitzungsber Akad. Wiss. 1927. V. 136. No. 2a. P. 271–306.
87. Carman P.C. Flow of gases through porous media. London: Butterworths Scientific Publications, 1956. 182 p.
88. Adzumi H. On the flow of gases through a porous wall // Bull. Chem. Soc. Jpn. 1937. V. 12. No. 6. P. 304–312.
89. Полубаринова-Кочина П.Я. О наклонных и горизонтальных скважинах конечной длины // Прикладная математика и механика. 1956. Т. 20. № 1. С. 95–108.
90. Monin A.S., Yaglom A.M. Statistical Fluid Mechanics: Mechanics of Turbulence. Cambridge, Mass.: MIT Press, 1971.

91. Schlichting H. Boundary layer theory. 6th edn. New York: McGraw-Hill, 1968. 747 p.
92. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа: Учебник для вузов. 7-е изд., испр. М.: Дрофа, 2003. 840 с.
93. Баренблатт Г.И., Ентов В.М., Рыжик В.М. Теория нестационарной фильтрации жидкости и газа. М.: Недра, 1972. 288 с.
94. Баренблатт Г.И., Желтов Ю.П., Кочина И.Н. Об основных представлениях теории фильтрации в трещиноватых средах // Прикладная математика и механика. 1960. Т. 24. № 5. С. 58–73.
95. Николаевский В.Н., Басниев К.С., Горбунов А.Т., Зотов Г.А. Механика насыщенных пористых сред. М.: Недра, 1970. 339 с.
96. Огибалов П.М., Мирзаджанзаде А.Х. Механика физических процессов. М.–Ижевск.: НИЦ «Регулярная хаотическая динамика», 2008. 376с.
97. Щелкачев В.Н. Влияние проницаемости призабойной области и диаметра скважины на дебит // Нефтяное хозяйство. 1946. № 10. С. 21–27.
98. Щелкачев В.Н. Гидромеханическая теория флюидинга и реперссии // Нефтяное хозяйство. 1936. №4. С. 44–48; №6. С. 28–32.
99. Телков А.П., Стклянин Ю.И. Расчет предельных безводных и безгазовых дебитов в подгазовых нефтяных залежах с подошвенной водой // Тр. МИНХ и ГП. 1963. Вып. 42. С. 94–115.
100. Smith G.D. Numerical solution of partial differential equations: with exercises and worked solutions. New York, London: Oxford University Press, 1965. 179 p.
101. Mitchell A.R. Computational methods in partial differential equations. London, New York: J. Wiley & Sons, 1969. 255 p.
102. Маскет М. Течение однородной жидкости в пористой среде. М.-Л.: Гостоптехиздат, 1949. 628 с.

103. Монахов В.Н. Сопряжение основных математических моделей фильтрации двухфазной жидкости // Математическое моделирование. 2002. Т. 14. № 40. С. 109–115.
104. Richardson J.G., Stone H.L. A quarter century of progress in the application of reservoir engineering // J. Petrol. Technol. 1973. V. 25. No. 12 P. 1371–1379.
105. Максимов М.М., Рыбицкая Л.П. Математическое моделирование процессов разработки нефтяных месторождений. М.: Недра, 1976. 64 с.
106. Закиров С.Н., Сомов Б.Е., Гордон В.Я., Палатник Б.М., Юфин П.А. Многомерная и многокомпонентная фильтрация. М.: Недра, 1988. 335 с.
107. Кац Р.М., Андриасов А.Р. Математическая модель трехфазной фильтрации в трещиновато-пористой среде // Сб. науч. тр. ВНИИ. 1986. Вып. 95. С. 61–66.
108. Kazemi H. Pressure transient analysis of naturally fractured reservoir with uniform fracture distribution // SPE J. 1969. V. 9. No. 4. P. 451–462.
109. Kleppe J. and Morse R. A. (1974). Oil production from fractured reservoirs by water displacement // Proceedings of the Fall Meeting of the Society of Petroleum Engineers of AIME, Houston, TX, USA, 1974. SPE-5084-MS.
110. Kazemi H., Seth M.S., Thomas G.V. The interpretation of interference tests in naturally fractured reservoirs with uniform fracture distribution // SPE J. 1969. V. 9. No. 4. P. 463–471.
111. Warren J.E., Root P.J. The behaviour of naturally fractured reservoirs // SPE J. 1963. V. 3. No. 3. P. 245–255.
112. Van Golf-Racht T.D. Fundamentals of Fractured Reservoir Engineering. Amsterdam: Elsevier Scientific Publishing Company, 1982. 710 p.
113. De Swaan A. Analytic solutions for determining naturally fractured reservoir properties by well testing // SPE J. 1976. V. 16. No. 3. P. 117–122.
114. Karman T. Festigkeitsversuche unter allseitigem Druck // Zeitschr. Ver. deutsch. Ingenieure. 1911. V. 55. P. 1749–1757.

115. ГОСТ 12248-2010. Грунты. Методы лабораторного определения характеристик прочности и деформируемости: утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 19 апреля 2011 г. N 46-ст: дата введения 2012-01-01. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200084869> (Дата обращения: 04.09.2024).
116. Meng Qb., Qian W., Liu Jf., Zhang Mw., Lu Mm., Wu Y. Analysis of triaxial compression deformation and strength characteristics of limestone after high temperature // Arab. J. Geosci. 2020. V. 13. N. 4. P. 153.
117. Golosov A.M., Riabokon E.P., Turbakov M.S. et al. The Effect of Dynamic Loads on the Creep of Geomaterials. In: Altenbach, H., Naumenko, K. (eds) Creep in Structures VI. IUTAM 2023. Advanced Structured Materials, Springer, Cham. 2023. V. 194. P. 143–150.
118. Barkov S.O. Studying the features of measuring rock deformations during tests at the high pressure high temperature triaxial apparatus // PMMEEP 2023. Springer Proceedings in Earth and Environmental Sciences. Cham: Springer International Publishing AG, 2024. P. 295–302.
119. Brace W.F., Walsh J.B., Frangos W.T. Permeability of granite under high pressure // J. Geophys. Res. 1968. V. 73. No. 6. P. 2225 – 2236.
120. Patsoules M.G., Gripps J.C. An investigation of the permeability of Yorkshire chalk under differing pore water and confining pressure conditions // Energy Sources. 1982. V. 6. No. 4. P. 321 – 334.
121. Walsh J.B. Effect of pore pressure and confining pressure on fracture permeability // Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr. 1981. V. 18 No. 5. P. 429–435.
122. Zhu W., Wong T.-F. The transition from brittle faulting to cataclastic flow: Permeability evolution // J. Geophys. Res. 1997. V. 102. No. B2. P. 3027–3041.
123. Wang J.-A., Park H.D. Fluid permeability of sedimentary rocks in a complete stress–strain process // Engineering Geology. 2002. V. 63. No. 3. P. 291–300.

124. Konecny P., Kozusnikova A. Influence of stress on the permeability of coal and sedimentary rocks of the Upper Silesian basin // *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 2011. V. 48. No. 2. P. 347–352.
125. Zheng J., Zheng L., Liu H., Ju Y. Relationships between permeability, porosity and effective stress for low-permeability sedimentary rock // *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 2015. V. 78. P. 304–318.
126. Хашпер А.Л., Аминев Т.Р., Федоров А.И., Жонин А.В. Исследование зависимости проницаемости горной породы от ее напряженно-деформированного состояния // *Геологический вестник.* 2019. № 1. С. 133–140.
127. Li X., Shi L., Bai B. Li Q., Xu D., Feng X. True-triaxial testing techniques for rocks - State of the art and future perspectives. In: Kwasniewski M., Li X., Takahashi M. (eds.) *True triaxial testing of rocks.* Leiden: CRC Press, 2012. P. 3-18.
128. Mogi K. Effect of the triaxial stress system on rock failure // *Rock Mech. Jap.* 1970. V. 1. P. 53–55.
129. Wawersik W.R., Carlson L.W., Holcomb D.J., Williams R.J. New method for true-triaxial rock testing // *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 1997. V. 34. No. 3–4. P. 330.e1–330.e14.
130. Liu K., Zhang Q.B., Wu G., Li J.C., Zhao J. Dynamic mechanical and fracture behaviour of sandstone under multiaxial loads using a triaxial Hopkinson bar // *Rock Mech. Rock Eng.* 2019. V. 52. No. 7. P. 2175–2195.
131. Xie H.P., Zhu J.B., Zhou T., Zhao J. Novel three-dimensional rock dynamic tests using the true triaxial electromagnetic Hopkinson bar system // *Rock Mech. Rock Eng.* 2021. V. 54. No. 4. P. 2079–2086.
132. Карев В.И., Химуля В.В., Шевцов Н.И. Экспериментальные исследования процессов деформирования, разрушения и фильтрации в горных породах // *Изв. РАН. МТТ.* 2021. № 5. С. 3-26.

133. Frash LP, Gutierrez M, Hampton J. True-triaxial apparatus for simulation of hydraulically fractured multi-borehole hot dry rock reservoirs // *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 2014. V. 70. P. 496–506.
134. Baizhanov B., Katsuki D., Tutuncu A.N. et al. Experimental investigation of coupled geomechanical, acoustic, and permeability characterization of Berea sandstone using a novel true triaxial assembly // *Rock. Mech. Rock. Eng.* 2019. V. 52. P. 2491–2503.
135. Feng XT., Zhang X., Kong R. et al. A novel Mogi type true triaxial testing apparatus and its use to obtain complete stress–strain curves of hard rocks // *Rock Mech. Rock Eng.* 2016. V. 49. P. 1649–1662.
136. Li M., Yin G., Xu J., Cao J., Song Z. Permeability evolution of shale under anisotropic true triaxial stress conditions // *Int. J. Coal Geol.* 2016. V. 165. P. 142–148.
137. Li M., Yin G., Xu J., Li W., Song Z., Jiang C. A novel true triaxial apparatus to study the geomechanical and fluid flow aspects of energy exploitations in geological formations // *Rock Mech. Rock Eng.* 2016. V. 49. P. 4647–4659.
138. Jiang T., Yao W., Sun X. et al. Evolution of anisotropic permeability of fractured sandstones subjected to true-triaxial stresses during reservoir depletion // *J. Pet. Sci. Eng.* 2021. V. 200. P. 108251.
139. Boronin S.A., Tolmacheva K.I., Osiptsov A.A. et al. Modelling of injection well capacity with account for permeability damage in the near-wellbore zone for oil fields in Western Siberia // *Proceedings of SPE Russian Petroleum Technology Conference. Moscow, 2017. Paper SPE-187806-MS.*
140. Klimov D.M., Karev V.I., Kovalenko Y.F. Experimental study of the influence of a triaxial stress state with unequal components on rock permeability // *Mechanics of Solids.* 2015. V. 50, No. 6. P. 633–640.
141. Ковхуто А.М., Кибаш М.Ф., Зайцев А.И. и др. Влияние напряженно-деформированного состояния горных пород на фильтрационные характеристики и дебиты скважин (на примере залежей Речицко-

- Вишанской зоны поднятий Припятского прогиба) // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. 2015. № 3. С. 56–62.
142. Карев В.И., Коваленко Ю.Ф., Сидорин Ю.В., Устинов К.Б. Геомеханическое моделирование процессов в призабойной зоне скважины // Мониторинг. Наука и технологии. 2016. № 3. С. 85-89.
143. Love A.E.H. A treatise on the mathematical theory of elasticity. 4th edn. New York: Cambridge University Press, 2013. 662 p.
144. Тимошенко С.П., Гудьер Дж. Теория упругости. М.: Наука, 1979. 560 с.
145. Косачук Г.П., Буракова С.В., Буточкина С.И. и др. К вопросу о формировании нефтяных залежей (оторочек) месторождений Непско-Ботуобинской антеклизы // Научно-технический сборник Вести газовой науки. 2013. № 5 (16). С. 114-123.
146. Нефтяники. Нефть и газ. Верхневилучанское нефтегазовое месторождение: [Электронный ресурс]. URL: http://www.nftn.ru/oilfields/russian_oilfields/jakutija_sakha_respublika/verkhneviljuchanskoe/21-1-0-1351 (Дата обращения: 10.09.2024).
147. Федорова Н.Ф., Быстрова И.В. Филипповские отложения нижней перми - новый источник углеводородов Прикаспийской нефтегазоносной провинции // Геология, география и глобальная энергия. 2010. № 3 (38). С. 223-227.
148. Карев В.И. Влияние напряженно-деформированного состояния горных пород на фильтрационный процесс и дебит скважин: автореф. дисс. ... д-ра тех. наук: 01.02.04 – Санкт-Петербург, 2010. 34 с.
149. Косков В.Н., Косков Б.В. Геофизические исследования скважин и интерпретация данных ГИС: учеб. пособие. Пермь: Изд-во Перм. гос. техн. ун-та, 2007. 317 с.
150. Павлов В.А., Павлюков Н.А., Субботин М.Д. и др. Обоснование режимов эксплуатации скважин сеноманской газовой залежи Харампурского месторождения по результатам геомеханического моделирования // Экспозиция Нефть Газ. 2021. №2 (81). С. 41-16.

151. Терцаги К. Теория механики грунтов. М.: Госстройиздат, 1961. 507 с.
152. Вавилин В.А., Миков Д.С. Выбор и построение оптимальной огибающей кругов Мора. Паспорт прочности породы // Геомодель 2022: Сборник материалов 24-й научно-практической конференции по вопросам геологоразведки и разработки месторождений нефти и газа. М.: Общество с ограниченной ответственностью "ЕАГЕ ГЕОМОДЕЛЬ", 2022. С. 162–165.
153. Барков С.О. Реализация трехосных испытаний в эффективных и полных напряжениях на установке трехосного осесимметричного сжатия ГТ 1.3.9 // Физическое и математическое моделирование процессов в геосредах: Девятая международная научная конференция-школа молодых ученых. Сборник материалов конференции. М.: ИПМех РАН, 2023. С. 127–130.
154. Барков С.О., Химуля В.В. Изучение особенностей проведения трехосных испытаний горных пород на установке осесимметричного трехосного сжатия ГТ 1.3.9 и установке истинно трехосного нагружения ИСТНН // ИИТМА: сборник материалов VII Международной научно-практической конференции. Кемерово: КузГТУ, 2023. С. 413–417.
155. Кривощёков С.Н., Кочнев А.А. Опыт применения рентгеновской компьютерной томографии для изучения свойств горных пород // Вестник ПНИПУ. Геология. Нефтегазовое и горное дело. 2013. №6. С. 32–42.
156. Diaz M., Kim K.Y., Yeom S. et al. Surface roughness characterization of open and closed rock joints in deep cores using X-ray computed tomography // Int. J. Rock Mech. Min. Sci. 2017. V. 98. P. 10–19.
157. Ефимов А.А., Савицкий Я.В., Галкин С.В., Шапиро С.А. Опыт исследования керна карбонатных отложений методом рентгеновской томографии // Вестник ПНИПУ. Геология. Нефтегазовое и горное дело. 2016. Т. 15. № 18. С. 23–32.

158. Абросимов, А.А. Разработка методик определения фильтрационно-емкостных свойств и остаточной водонасыщенности горных пород по данным рентгеновской томографии и численного моделирования: автореф. дисс. ... канд. техн. наук: 25.00.10 – Москва, 2017. 24 с.
159. Gerke K.M., Korost D.V., Karsanina M.V. et al. Modern approaches to pore space scale digital modeling of core structure and multiphase flow // *Georesursy*. 2021. V. 23. No. 2. P. 197–213.
160. Ar-Rushood I., Alqahtani N., Wang Y.D. et al. Segmentation of x-ray images of rocks using deep learning // *Proceedings of SPE Annual Technical Conference and Exhibition*. 2020. P. SPE-201282-MS.
161. Menke H.P., Gao Y., Linden S., Andrew M.G. Using nano-XRM and high-contrast imaging to inform micro-porosity permeability during Stokes–Brinkman single and two-phase flow simulations on micro-CT images // *Front. Water*. 2022. V. 4. P. 935035.
162. Mostaghimi P., Blunt M.J., Bijeljic B. Computations of absolute permeability on micro-CT images // *Math. Geosci.* 2013. V. 45. P. 103–125.
163. Alyafei N., Raeni A.Q., Paluszny A., Blunt M.J. A sensitivity study of the effect of image resolution on predicted petrophysical properties // *Transp. Porous Media*. 2015. V. 110. P. 157–169.
164. Cid H.E., Carrasco-Núñez G., Manea V.C. Improved method for effective rock microporosity estimation using X-ray microtomography // *Micron*. 2017. V. 97. P. 11–21.
165. GeoDict – The Digital Material Laboratory: [Электронный ресурс]. URL: <https://www.math2market.de/> (Дата обращения: 10.09.2024).
166. Панченко Д.С., Путятин Е.П. Сравнительный анализ методов сегментации изображений // *Радиоэлектроника и информатика*. 1999. №4 (9). С. 109–114.
167. Bali A., Singh S.N. A Review on the Strategies and Techniques of Image Segmentation // *Proceedings of Fifth International Conference on Advanced Computing & Communication Technologies*. 2015. P. 113-120.

168. Hilden J., Linden S., Planas B. GeoDict 2024. User Guide. FlowDict: [Электронный ресурс]. URL: <https://www.math2market.com/fileadmin/UserGuide/GeoDict2024/FlowDict2024.pdf> (Дата обращения 10.09.2024).
169. Balucan R., Jing Z., Unterschultz J., Steel K.M. Coal permeability stimulation by NaClO oxidation // The APPEA Journal. 2019. V. 59. No. 2. P. 846–850.
170. Steel K.M., Jenkins D.R., Balucan R.D., Mahoney M.R. Identification of preferential pathways in the pore microstructure of metallurgical coke and links to anisotropic strength properties // Fuel. 2021. V. 296. P. 120688.
171. Herdtle T., Xue Y., Bolton J.S. Numerical modelling of the acoustics of low density fibrous media having a distribution of fiber sizes // Publications of the Ray W. Herrick Laboratories. 2017. P. 167.
172. Soltani P., Azimian M., Wiegmann A., Zarrebini M. Experimental and computational analysis of sound absorption behavior in needled nonwovens // J. Sound Vib. 2018. V. 426. P. 1–18.
173. Linden S., Wiegmann A., Hagen H. The LIR space partitioning system applied to the Stokes equations // Graph. Models. 2015. V. 82. P. 58–66.
174. Azimian M., Kühnle C., Wiegmann A. Design and Optimization of Fibrous Filter Media Using Lifetime Multipass Simulations // Chem. Eng. Technol. 2018. 41. No. 5. P. 928.
175. Rimmel O., May D. Modeling transverse micro flow in dry fiber placement preforms // J. Compos. Mater. 2020. 54. No. 13. P. 1691–1703.
176. Pan Z., Liang Y., Tang M., Sun Z., Hu J., Wang J. Simulation of performance of fibrous filter media composed of cellulose and synthetic fibers // Cellulose. 2016. V. 26. P. 7051–7065.
177. Saxena N., Hofmann R., Alpak F.O. et al. References and benchmarks for pore-scale flow simulated using micro-CT images of porous media and digital rocks // Adv. Water Resour. 2017. V. 109. P. 211–235.
178. Blumer A., Rief S., Planas B. GeoDict 2024. User Guide. MatDict: [Электронный ресурс]. URL:

<https://www.math2market.com/fileadmin/UserGuide/GeoDict2024/MatDict2024.pdf> (Дата обращения 10.09.2024).

179. Blumer A., Rief S., Planas B. GeoDict 2024. User Guide. PoroDict: [Электронный ресурс]. URL: <https://www.math2market.com/fileadmin/UserGuide/GeoDict2024/PoroDict2024.pdf> (Дата обращения 10.09.2024).
180. Barkov S., Khimulia V. Study of elastic-strength properties of low-permeability reservoir rocks in the Verkhnevilyuchanskoye oil and gas field on a true triaxial loading unit // AIP Conference Proceedings. 2023. V. 2910. No. 1. P. 020115.
181. Karev V.I., Barkov S.O. Adapting the method of directional unloading of the formation for low permeable deposits // PMMEEP 2021. Springer Proceedings in Earth and Environmental Sciences. Cham: Springer International Publishing AG, 2022. P. 33–39.
182. Барков С.О., Шевцов Н.И. Определение оптимальных параметров и режимов эксплуатации скважин в низкопроницаемых коллекторах на установке истинно трехосного нагружения // Процессы в геосредах. 2022. № 3. С. 1729–1734.
183. Barkov S.O., Shevtsov N.I. Determination of optimal parameters and modes of well operation in low-permeability reservoirs on a true triaxial loading unit // PMMEEP 2022. Springer Proceedings in Earth and Environmental Sciences. Cham: Springer International Publishing AG, 2023. P. 181–188.
184. Khimulia V., Barkov S. Analysis of permeability changes of the Astrakhanskoye field rocks while implementing the method of directional unloading of the reservoir based on x-ray computed tomography // AIP Conference Proceedings. 2023. V. 2910. No. 1. P. 020114.
185. Барков С.О., Химуля В.В., Шевцов Н.И. Определение оптимальных параметров эксплуатации скважин нефтегазовых месторождений на основе результатов истинно трехосных испытаний пород-коллекторов и компьютерной томографии // XIII Всероссийский Съезд по

теоретической и прикладной механике: сборник тезисов докладов в 4 томах. Материалы симпозиумов и Исторической сессии. СПб.: Политех-Пресс СПб, 2023. Т. 4. С. 356–358.

186. Khimulia V.V., Barkov S.O., Shevtsov N.I. Computed tomography analysis of changes in the internal structure of low-permeability rocks when implementing the method of directional unloading of a reservoir // Proceedings of VIII International scientific conference-school for young scientists: Physical and mathematical modeling of processes in geomechanics. М.: IPMech RAS, 2022. P. 12–14.