

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

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва – 2024

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте проблем механики им. А.Ю. Ишлинского Российской академии наук (ИПМех РАН).

Научный руководитель:

Карев Владимир Иосифович

д.т.н., зам. директора, г.н.с. лаборатории геомеханики ИПМех РАН

Официальные оппоненты:

Попов Сергей Николаевич

д.т.н., г.н.с., зав. лаб. нефтегазовой механики и физико-химии пласта ФГБУН «Институт проблем нефти и газа РАН»

Зайцев Алексей Вячеславович

к.ф.-м.н., доцент кафедры «Механика композиционных материалов и конструкций» ФГАОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет»

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт горного дела им. Н.А. Чинакала Сибирского отделения Российской академии наук (ИГД СО РАН)

Защита состоится 12 декабря 2024 г. в 15 часов на заседании диссертационного совета 24.1.098.01 на базе ИПМех РАН по адресу: просп. Вернадского 101, корп. 1, Москва.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ИПМех РАН <https://ipmnet.ru/files/diss/2024/2/Barkov-diss.pdf>

Автореферат разослан «___» _____ 2024 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета 24.1.098.01

к.ф.-м.н.

Е.Я. Сысоева

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Работа посвящена исследованиям механических и фильтрационных процессов в низкопроницаемых коллекторах нефтегазовых месторождений, изучению влияния напряженно-деформированного состояния низкопроницаемых пород-коллекторов на их проницаемость в условиях сложного нагружения и направлена на создание научных основ технологий разработки месторождений, сложенных данными породами. 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.

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. Kleppe, 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.

Описанные в диссертации исследования являются продолжением работ, инициированных академиком С.А. Христиановичем и проводимых в лаборатории геомеханики ИПМех РАН.

Определение механических и фильтрационных характеристик пород-коллекторов необходимо для заполнения входными данными 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. Особенно важным для построения адекватных геомеханических моделей является определение зависимости фильтрационных свойств пород продуктивного горизонта от напряжений, возникающих в них. 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.

Истощение сырьевой базы углеводородов приводит к необходимости разработки месторождений с трудноизвлекаемыми запасами (ТРИЗ). 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. 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. На сегодняшний день основной технологией разработки месторождений, сложенных низкопроницаемыми породами, является гидроразрыв пласта, в том числе многостадийный. Однако данная технология малоприспособлена для разработки пластов, залегающих на глубинах 3 км и более. К тому же применение этой технологии является дорогостоящим, энерго- и материалозатратным, представляет значительную экологическую опасность. При этом основным эффектом данного подхода заключается в образовании в пласте магистральных трещин, что приводит к увеличению площади фильтрации, но не оказывает существенного влияния на проницаемость пород-коллекторов.

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.

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). 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 в окрестности скважины 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 энергию, запасенную самой природой – за счет горного давления, обусловленного весом

вышележащих пород, и пластового давления 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, при строительстве горизонтальных скважин выбором направления бурения. Выбор способа воздействия на пласт осуществляется на основе моделирования механических и фильтрационных процессов, протекающих в призабойной зоне скважины (ПЗС) с использованием установок истинно трехосного нагружения, позволяющих измерять проницаемость в ходе нагружения, например, на Испытательной системе трехосного независимого нагружения ИПМех РАН (ИСТНН). 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, проводимых на установке ИСТНН, трудно переоценить.

Достаточно молодым и очень перспективным направлением исследований кернового материала, расширяющим возможности лабораторных исследований, является рентгеновская компьютерная томография (РКТ), позволяющая изучать геометрию пустотного пространства породы (поры, каверны, трещины). Применение современного программного обеспечения и новейших подходов численного моделирования позволяет на трехмерных структурах породы вычислять проницаемость и визуализировать фильтрационные потоки. При этом для каждого конкретного типа породы необходимо проведение исследований по определению наиболее оптимальных параметров сканирования и реконструкции массива снимков (теневых проекций) образца в его трехмерную модель, методов фильтрации и сегментации изображения, подходов к численному моделированию фильтрационных процессов. В лаборатории геомеханики ИПМех РАН томографические исследования горных пород осуществляются при помощи высокоразрешающего рентгеновского микротомографа ProCon X-Ray CT-MINI.

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 Верхневеличанского нефтегазоконденсатного месторождения (НГКМ). Изучено влияние напряженно-деформированного состояния на фильтрационные свойства исследуемых низкопроницаемых пород-коллекторов. Определены 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 после испытаний на установке ИСТНН. Образцы изготавливаются из керна, выбуренного из скважин исследуемых месторождений. При помощи специальных методов на трехмерных цифровых структурах образцов проведено численное моделирование фильтрационных процессов с целью оценки их конечной трещинной проницаемости.

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.

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. 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 и нефтегазоотдачу пластов. 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. Сделана предварительная оценка величин депрессий, обеспечивающих увеличение проницаемости пород в призабойной зоне скважин с различными геометриями забоя и в то же время поддержание устойчивости стенок скважин. 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 проведённых 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 керн 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 [1, 3, 5], проведены подготовка к испытаниям и предварительные исследования образцов исследуемых пород [2, 4, 6-9]. 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 [2, 4, 6-9] и их последующее сканирование на высокоразрешающем микротомографе ProCon X-Ray CT-MINI [2, 8] 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.

Соответствие паспорту научной специальности. По теме и содержанию материалов исследования диссертационная работа соответствует актуальному паспорту специальности 1.1.8. Механика деформируемого твердого тела, в части п. 1 «Законы деформирования, повреждения и разрушения материалов, в том числе природных, искусственных и вновь создаваемых», п. 3. «Задачи теории упругости, теории пластичности, теории вязкоупругости» и п. 13 «Экспериментальные методы исследования процессов деформирования, повреждения и разрушения материалов, в том числе объектов, испытывающих фазовые структурные превращения при внешних воздействиях».

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность исследований, проводимых в диссертационной работе; сформулированы цели работы и поставлены задачи, решение которых необходимо для их достижения; изложена научная новизна и практическая значимость полученных результатов; описаны методы исследований; сформулированы основные положения, выносимые на защиту; кратко изложена структура диссертации.

В **первой главе** рассмотрено развитие подходов к моделированию механических и фильтрационных процессов в нефтегазовых пластах. В разделе 1.1 в контексте развития геомеханики проведен обзор основных работ по аналитическому и численному моделированию механических и фильтрационных процессов в горных породах. В разделе 1.2 представлен обзор экспериментальных установок, используемых для прямого физического моделирования механических и фильтрационных процессов, протекающих в горных породах в условиях осесимметричного трехосного сжатия и сложного (неравнокомпонентного трехосного) нагружения. Приведена классификация установок истинно трехосного нагружения, описаны их основные преимущества и недостатки, приведены примеры исследований, проводимых с их помощью.

Во **второй главе** проводится теоретический анализ распределения напряжений в окрестности скважины при различных конструкциях забоя и

условиях залегания. Согласно данным геофизических исследований рассматриваемых скважин, проведенного ультразвукового прозвучивания и трехосных испытаний образцов, изготовленных из кернового материала скважин, при проведении анализа распределения напряжений в их окрестности была принята изотропная модель среды, а исходное природное напряженное состояние пласта считалось состоянием всестороннего равномерного сжатия горным давлением. Были рассмотрены три возможные конструкции забоя: необсаженная скважина (открытый ствол), необсаженная и обсаженная скважина с перфорационными отверстиями.

В разделе 2.1 на основе решения задачи Ламе были получены соотношения для описания эффективных напряжений, действующих на грунтовый скелет породы в окрестности необсаженного ствола вертикальной и горизонтальной скважины:

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

где S_r, S_θ, S_z – радиальная, окружная и осевая компоненты эффективных напряжений, q – горное давление, R_c – радиус скважины, r – расстояние до рассматриваемой точки от центра скважины, $p(r)$ – давление флюида, δ – доля площадок контактов относительно всей поверхности зерна грунтового скелета. При этом $p(r \leq R_c) = p_c$ – давление на забое скважины, $p(r \gg R_c) = p_0$ – пластовое давление.

В разделе 2.2 на основе решения задачи Ламе для сферической полости были получены соотношения для описания эффективных напряжений, действующих на грунтовый скелет породы в окрестности полусферического кончика перфорационного отверстия в обсаженной вертикальной скважине:

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

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

В разделе 2.3, используя суперпозицию решений задачи Ламе и задачи Кирша, в цилиндрической системе координат, связанной с перфорационным отверстием, были получены соотношения для описания эффективных напряжений, действующих на грунтовый скелет породы в верхней точке на контуре перфорационного отверстия в необсаженной вертикальной скважине:

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

В **третьей главе** представлены объекты исследований, экспериментальное оборудование, применяемое в рамках работы, а также изложена методика проведенных трехосных испытаний, ультразвукового прозвучивания и прямого физического моделирования на установке ИСТНН.

Объектами исследования являются низкопроницаемые карбонатные породы продуктивных горизонтов Астраханского газоконденсатного месторождения (ГКМ) и Верхневилучанского нефтегазоконденсатного месторождения (НГКМ). В разделе 3.1 представлено краткое описание данных месторождений.

Прямое физическое моделирование механических и фильтрационных процессов, протекающих в окрестности скважин с различной геометрией забоя при понижении давления на их забое проводилось при помощи уникальной установки истинно трехосного нагружения ИСТНН (рис. 1). Данная установка позволяет нагружать кубические образцы пород с ребром 40 мм или 50 мм независимо и одновременно по трем осям, благодаря чему в образцах можно воссоздавать любые напряженные состояния, возникающие в коллекторах нефтяных и газовых месторождений при бурении скважин, освоении и эксплуатации. При этом в процессе испытания образцов по различным траекториям нагружения ИСТНН позволяет непрерывно измерять деформации по каждой из осей образца и проницаемость по воздуху вдоль одной из осей. Таким образом, одной из главных особенностей данной установки является возможность изучения влияния напряженно-деформированного состояния пород на их фильтрационные свойства. В разделе 3.2 приводится подробное описание всех составляющих ИСТНН и методики измерения проницаемости образцов с ее помощью.

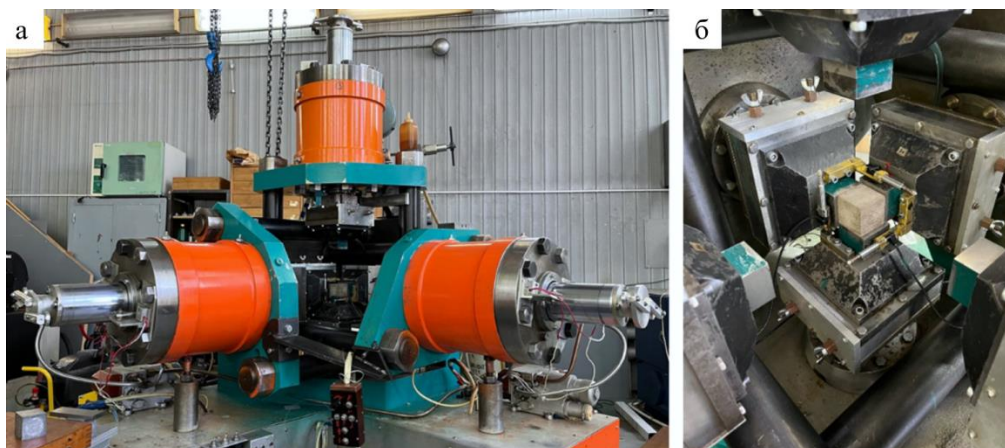


Рис. 1. Испытательная система трехосного независимого нагружения (а), Образец в нагружающем узле ИСТНН перед проведением испытаний (б)

В разделе 3.3 приводится краткое описание оборудования, используемого для изготовления кубических образцов породы из керна материала. В разделах 3.4 и 3.5 описаны методики проведения трехосных испытаний на установке ИСТНН для определения упруго-прочностных характеристик пород и ультразвукового прозвучивания образцов с целью определения степени анизотропии упругих свойств породы. Проводится сравнение результатов

трехосных испытаний в эффективных напряжениях, проводимых на ИСТНН и установке трехосного осесимметричного сжатия (установке Кармановского типа) ГТ-1.3.9. При помощи установки ГТ-1.3.9, позволяющей создавать в цилиндрических образцах породы пластовые термобарические условия, на модельном образце проведено сравнение результатов трехосных испытаний в эффективных и полных напряжениях, на основании чего была подтверждена правомерность испытаний в эффективных напряжениях на установке ИСТНН.

Для испытаний пород-коллекторов на установке ИСТНН на основании соотношений (1)-(3) с учетом условий залегания пород-коллекторов было проведено построение программ нагружения, отвечающих напряжениям, действующим на грунтовой скелет (эффективным напряжениям): на контуре необсаженной скважины (Программа №1), в окрестности кончика перфорационного отверстия в обсаженной скважине (Программа №2), а также в верхней точке на контуре протяженного перфорационного отверстия в необсаженной скважине (Программа №3) при понижении давления на их забое. Программа №3 была отдельно построена для двух точек, отстоящих от оси необсаженной скважины на расстояние $r = 1,25R_c$ и $r = 2R_c$. Поскольку исследуемые породы представлены карбонатными отложениями с низкой начальной проницаемостью и высокой прочностью, при построении программ нагружения для всех образцов было положено $\delta = 0$. Для напряжений, прикладываемых к граням образца по осям 1,2,3 нагружающего узла ИСТНН, были использованы обозначения S_1, S_2, S_3 . На рис. 2 для всех рассматриваемых случаев представлен общий вид построенных программ нагружения, подробное описание которых приводится в разделе 3.6.

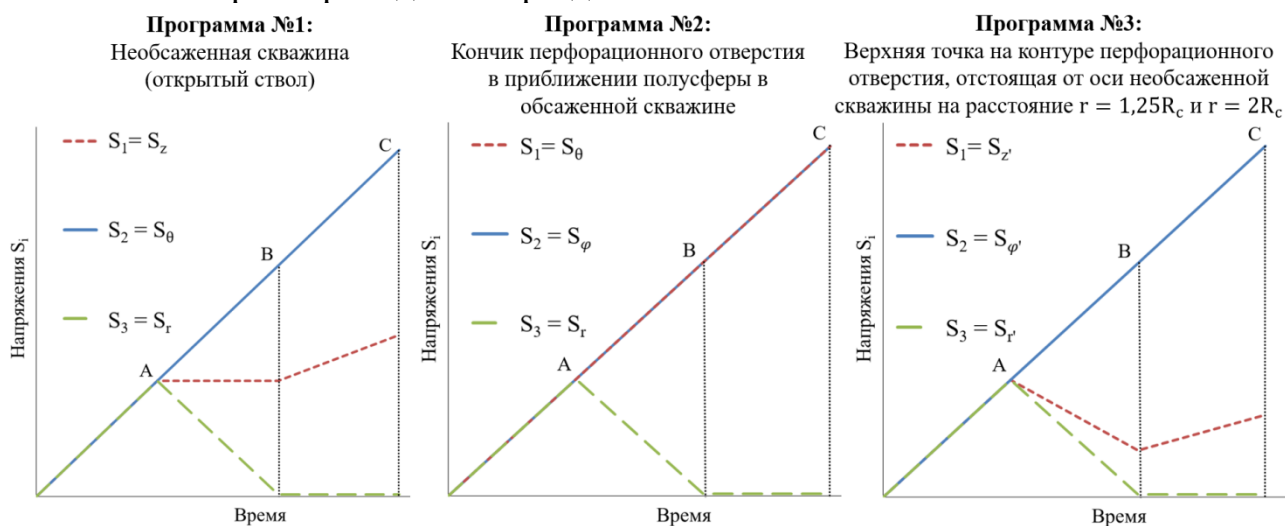


Рис. 2. Общий вид программ нагружения образцов

Все программы состоят из трех этапов нагружения, завершение которых обозначено точками А, В и С. Точка А соответствует эффективным напряжениям, действующим в пласте до пробуривания скважины; точка В – состоянию, когда скважина пробурена и давление на ее забое равно пластовому ($p_c = p_0$); точка С – полному «осушению» скважины, т.е. когда давление в скважине равно нулю ($p_c = 0$). Нагружение образца осуществляется до тех пор, пока он не будет

разрушен или напряжения не достигнут значений, соответствующих максимально возможной депрессии (завершение программы). 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.

В четвертой главе в разделе 4.1 рассмотрены основные понятия и принципы рентгеновской компьютерной томографии (РКТ). В разделе 4.2 представлено описание основных характеристик и возможностей высокоразрешающего рентгеновского микротомографа ProCon X-Ray CT-MINI ИПМех РАН (рис. 3), используемого в данной работе для получения трехмерных цифровых структур образцов низкопроницаемых пород-коллекторов Астраханского ГКМ и Верхневилучанского НГКМ после геомеханических испытаний на ИСТНН и проведения на них численного моделирования фильтрационных процессов с целью оценки конечной трещинной проницаемости. В разделе 4.3 подробно описана методика проведения исследований горных пород при помощи микротомографа ProCon X-Ray CT-MINI, включающая подготовку и сканирование образца, реконструкцию его трехмерной модели по результатам сканирования, обработку данных и последующее численное моделирование фильтрационных процессов на трехмерной цифровой модели образца.

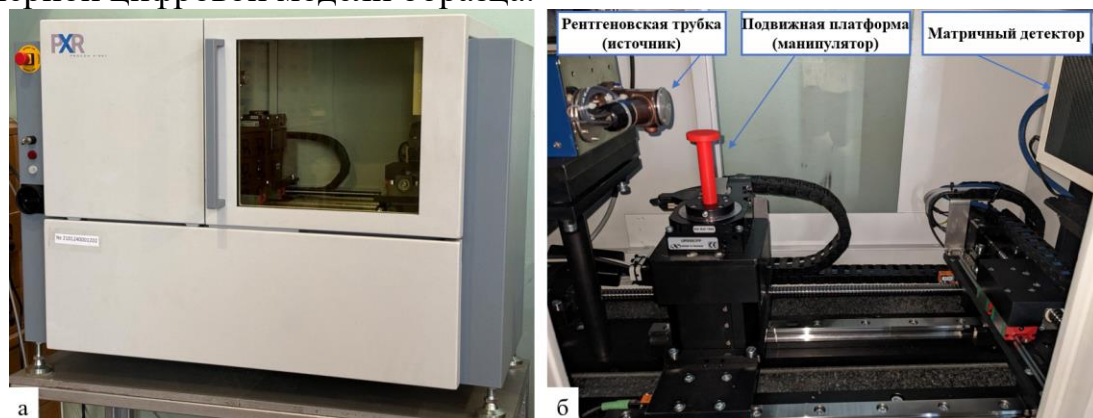


Рис. 3. Высокораesшающий рентгеновский микротомограф ProCon X-Ray CT-MINI ИПМех РАН (а) и основные конструкционные элементы его камеры (б)

Реконструирование трехмерных моделей образцов по результатам проведенного сканирования осуществлялось в ПО VGSTUDIO. Обработка трехмерных моделей образцов проводилась в специализированном ПО GeoDict Math2Market GmbH. Корректировка яркости изображений осуществлялась методом Гаусса (Gaussian brightness correction), фильтрация изображения была выполнена при помощи алгоритма нелокального усреднения (Non-Local Means), сегментация изображения, т.е. разделение цифрового изображения материала на составляющие этот материал вещества (фазы), проводилась пороговым методом. Для моделирования фильтрационных процессов на трехмерных цифровых структурах образцов после геомеханических испытаний был использован специальный программный модуль FlowDict пакета GeoDict, который 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. Для численных расчетов использовался решатель LIR, 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. Моделирование фильтрационных процессов на трехмерных структурах образцов было выполнено в рамках моделей Стокса и Навье-Стокса. При этом 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. В качестве одного из способов упрощения структуры для оптимизации вычислений был использован бининг 2x2, т.е. объединение соседних пар вокселей трехмерного изображения (трехмерных пикселей) для уменьшения общего числа точек. При этом происходит осреднение оттенков серого, а общее число вокселей трехмерного изображения уменьшается в 8 раз.

В пятой главе представлены результаты комплексных экспериментальных исследований механических и фильтрационных процессов в низкопроницаемых коллекторах Верхневиллючанского НГКМ и Астраханского ГКМ. По два образца из каждого месторождения были использованы для проведения трехосных испытаний, остальные – для проведения прямого физического моделирования механических и фильтрационных процессов в окрестности скважин с различной геометрией забоя для определенных условий залегания образцов при понижении давления на забое скважин по программам, приведенным на рис. 2. В подразделах 5.1.1 и 5.2.1 приводятся результаты ультразвукового прозвучивания некоторых образцов Верхневиллючанского НГКМ и Астраханского ГКМ соответственно. В таблице 1, в качестве примера, приводятся результаты трехосных испытаний пород-коллекторов Верхневиллючанского месторождения, а также рассчитанные по ним удельное сцепление c и угол внутреннего трения φ .

Таблица 1. Результаты трехосных испытаний пород-коллекторов из скважины № 125-12 Верхневиллючанского 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		

Приложение девиаторной нагрузки к образцам ВВ2.1 и ВВ2.2, изготовленных из одного куска керна, осуществлялось вдоль оси керна и перпендикулярно ей соответственно, что позволило при анализе кривых деформирования образцов подтвердить изотропность их упругих свойств.

Результаты ультразвукового прозвучивания образцов также подтвердили изотропность упругих свойств исследуемых пород-коллекторов. В связи с этим во второй главе при проведении теоретического анализа распределения напряжений в окрестности скважин была выбрана изотропная модель среды.

В подразделах 5.1.2 и 5.2.2 для исследуемых месторождений приводятся результаты экспериментов по прямому физическому моделированию механических и фильтрационных процессов в окрестности скважин при создании в них депрессии для различных конструкций забоя. По результатам экспериментов для каждого образца были построены кривые деформирования и зависимость изменения его проницаемости, совмещенная с реальными программами нагружения.

Существенный рост проницаемости образцов Верхневилучанского НГКМ и Астраханского ГКМ при их растрескивании наблюдался при испытаниях по программе № 3 для случая $r = 1,25R_c$. При испытаниях по этой программе при $r = 2R_c$ образцов из Астраханского ГКМ они также растрескались. Образец же из Верхневилучанского НГКМ при нагружении по данной программе при $r = 2R_c$ деформировался упруго вплоть до состояния, соответствующего полному осушению скважины, а его проницаемость увеличилась, но ее конечное значение осталось ничтожно малым. При испытаниях по программе № 2 образцы из двух месторождений деформировались упруго на протяжении всего нагружения, а их проницаемость оставалась практически неизменной. При испытаниях по программе № 1 проницаемость пород-коллекторов Верхневилучанского НГКМ менялась незначительно, растрескивания образцов не происходило. При испытаниях по программе № 1 образец породы Астраханского ГКМ в конце третьего этапа нагружения растрескался, изменение его проницаемости не удалось зафиксировать по причине нарушения целостности герметизирующей оболочки. На рис. 4 и рис. 5, в качестве примера, представлены результаты испытаний пород Верхневилучанского НГКМ и Астраханского ГКМ по программе № 3 для случая $r = 1,25R_c$.

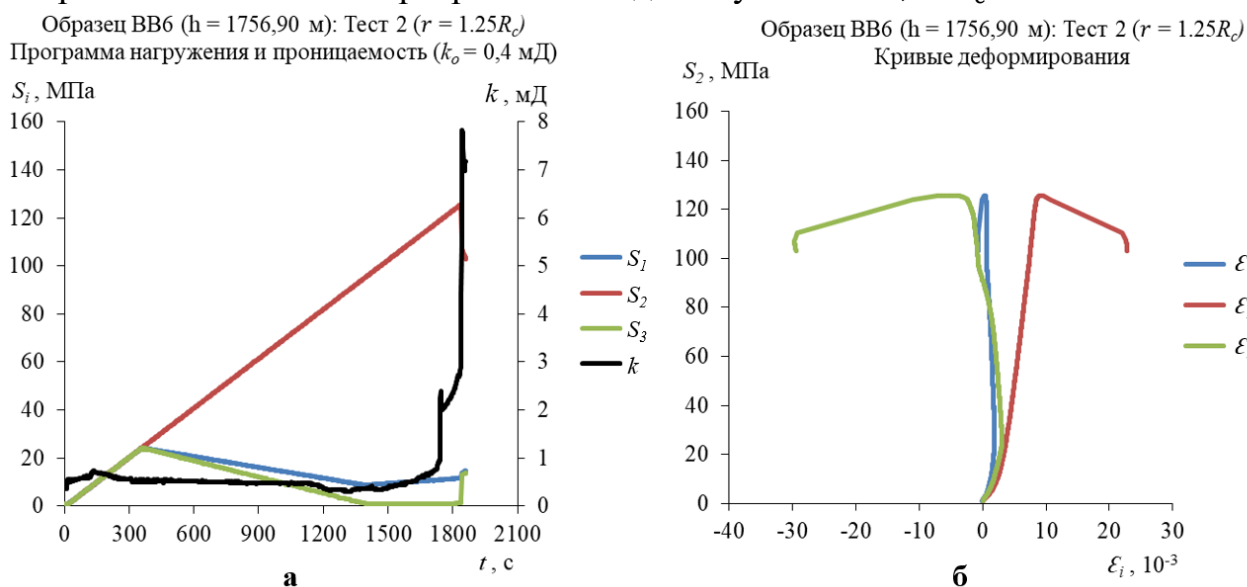


Рис. 4. Результаты физического моделирования на образце ВВ6: программа нагружения и кривая проницаемости (а), кривые деформирования (б)

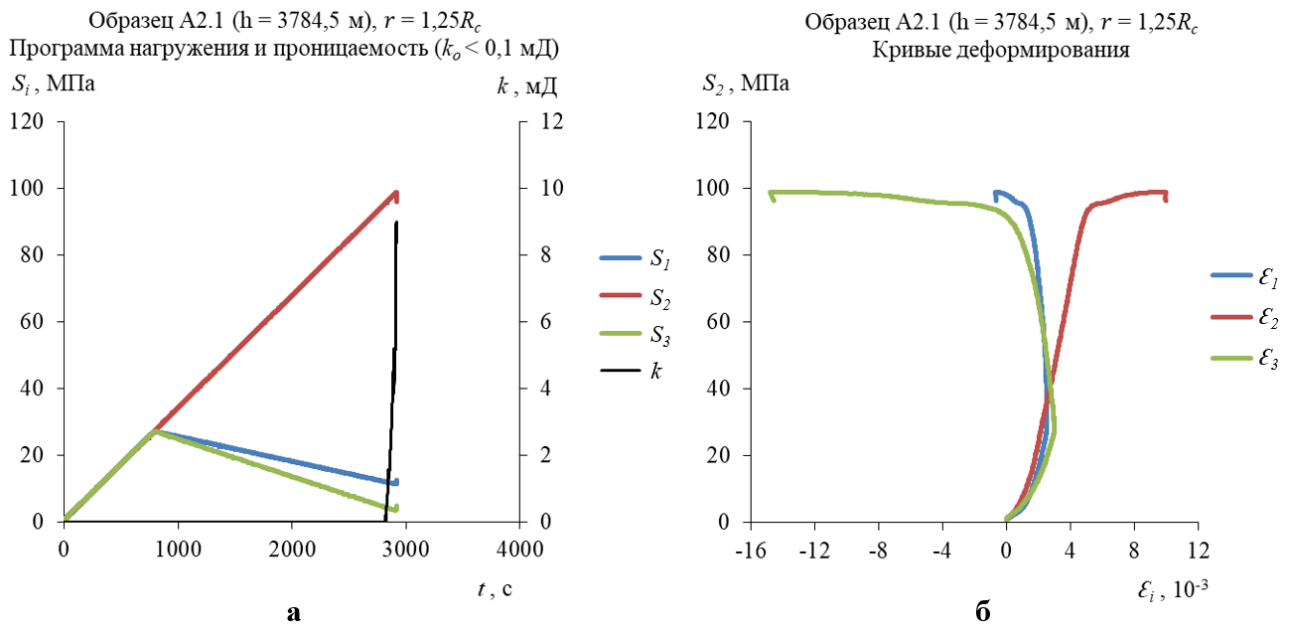


Рис. 5. Результаты физического моделирования на образце А2.1: программа нагружения и кривая проницаемости (а), кривые деформирования (б)

При проведении анализа кривых деформирования испытываемых образцов проводилось определение значений главных напряжений, при которых образцы переходили к неупругому деформированию и при которых, за счет достижения касательными напряжениями критических значений, происходило их растрескивание, сопровождающееся резким скачкообразным увеличением проницаемости. Далее из соотношений (3) определялись значения давления в скважине p_c и соответствующей ему депрессии $\Delta p = p_0 - p_c$, при которых наблюдалось растрескивание образцов.

Образец ВВ6 при моделировании понижения давления в необсаженной скважине с перфорационными отверстиями деформировался упруго до середины третьего этапа нагружения. При достижении напряжений, соответствующих депрессии в скважине $\Delta p = 9,4$ МПа, произошло его растрескивание, сопровождающееся резким увеличением проницаемости.

Образец А2.1 в конце второго этапа нагружения перешел к неупругому деформированию, что привело к его растрескиванию и резкому скачкообразному росту проницаемости. Таким образом, данный образец, на котором моделировались процессы в верхней точке перфорационного отверстия, отстоящей от оси необсаженной скважины на расстояние $r = 1,25R_c$, растрескался уже при моделировании напряженного состояния, соответствующего пластовому давлению в скважине.

Важно отметить, что при разрушении образцов 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 в конце испытания на установке ИСТНН не представляется возможным. Провести измерения проницаемости уже

разрушенного образца после повторной герметизации удается достаточно редко по ряду причин.

Для оценки конечной трещинной проницаемости образцов, испытанных по программе №3 для случая $r = 1,25R_c$, были использованы методы РКТ и численного моделирования. Подробное описание результатов томографических исследований образцов пород рассматриваемых месторождений приводится в подразделах 5.1.3 и 5.2.3. Сканирование образцов и последующая обработка данных РКТ проводилась согласно методике, описанной в четвертой главе. На реконструированных трехмерных моделях внутренних структур образцов было проведено численное моделирование фильтрационных процессов в рамках моделей Стокса и Навье-Стокса, по результатам которого были рассчитаны и визуализированы поля распределения скоростей и оценена конечная трещинная проницаемость на основе закона Дарси. Для образцов из Астраханского ГКМ удалось провести повторное измерение проницаемости на ИСТНН при всестороннем сжатии в 1 МПа, что было использовано для сравнения с результатами численного моделирования. Наиболее точное соответствие измеренной в лабораторных условиях проницаемости было получено при численных расчетах в рамках модели Навье-Стокса на упрощенных при помощи бининга 2x2 трехмерных структурах образцов. На рис. 6, в качестве примера, приведено фото образца А2.1 после испытаний на установке ИСТНН и визуализированное на его трехмерной внутренней структуре после применения бининга 2x2 поле распределения скоростей в рамках модели Навье-Стокса. Конечное значение трещинной проницаемости образца А2.1 при повторном измерении на установке ИСТНН составило 460 мД, по результатам численного моделирования на упрощенной структуре в рамках моделей Стокса и Навье-Стокса – 919 мД и 360 мД соответственно. Для образца ВВ6, например, повторно измерить проницаемость на ИСТНН не удалось, но при идентичной обработке трехмерной модели образца по результатам численного моделирования в рамках модели Навье-Стокса его проницаемость была оценена в 1,1 Д.

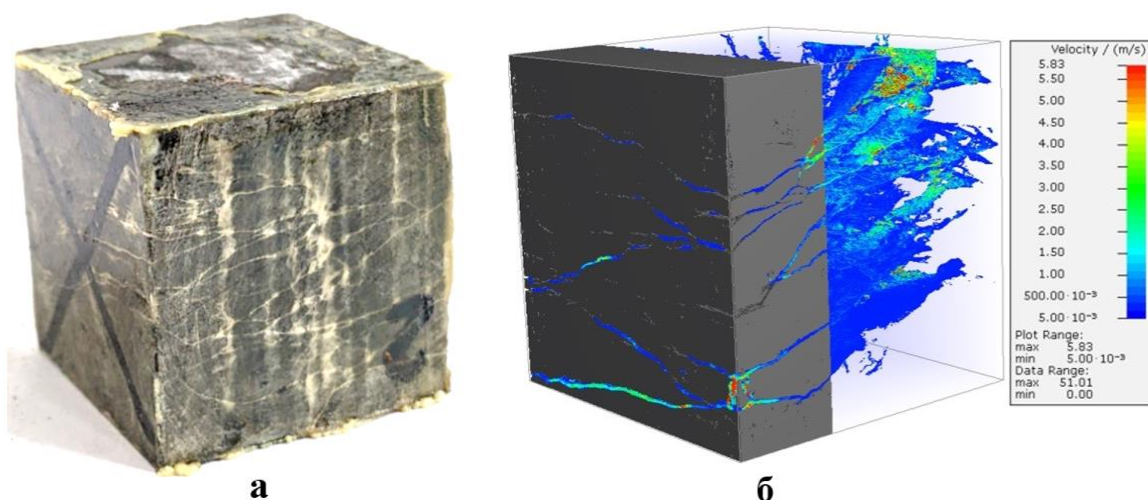


Рис. 6. Фото образца А2.1 после испытаний (а) и визуализированное на его трехмерной внутренней структуре после применения бининга 2x2 поле распределения скоростей в рамках модели Навье-Стокса (б)

Таким образом, результаты проведенных геомеханических испытаний и томографических исследований низкопроницаемых пород-коллекторов Астраханского ГКМ и Верхневиллючанского НГКМ свидетельствуют о возможности успешного применения метода НРП на рассматриваемых скважинах и подтверждают эффективность геомеханического подхода к разработке месторождений, сложенных низкопроницаемыми породами. Из полученных результатов следует ряд важных выводов и рекомендаций:

1. Для увеличения проницаемости пород-коллекторов в ПЗП рассматриваемой скважины Астраханского ГКМ достаточно осуществить перфорацию необсаженного ствола скважины. При этом нет необходимости дополнительно понижать давление на забое скважины.

2. Для увеличения проницаемости пород-коллекторов в ПЗП рассматриваемой скважины Верхневиллючанского НГКМ необходимо осуществить перфорацию необсаженного ствола скважины и создать депрессию определенной величины.

3. Оптимальная форма перфорационных отверстий – достаточно короткие, но широкие. Поскольку существенная концентрация напряжений на поверхности перфорационного отверстия в необсаженной скважине, согласно проведенным расчетам, возникает не более, чем на расстоянии 2 – 3 радиусов скважины от ее оси.

В **заключении** кратко формулируются основные выводы, полученные в диссертации.

Основные результаты диссертационной 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 Верхневиллючанского НГКМ и Астраханского ГКМ на установке ИСТНН с учетом условий залегания для испытываемых 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 Верхневеличанского 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.

СПИСОК РАБОТ ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в научных журналах, входящих в Перечень ВАК РФ, и научных сборниках, индексируемых в Scopus:

1. 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.

2. 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.

3. Барков С. О. Развитие подходов к прогнозированию добычи нефти на основе статистических методов моделирования // Процессы в геосредах. 2021. № 4. С. 1307–1314.

4. 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.

5. 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.

6. 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.

7. 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.

8. 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.

9. 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.

БАРКОВ СВЯТОСЛАВ ОЛЕГОВИЧ

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

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Подписано в печать ____ . ____ . 2024 г. Заказ № _____
Формат 60x90/16. Усл. печ. л. 1. Тираж _____ экз.

Отпечатано на ризографе Института проблем механики
им А.Ю. Ишлинского РАН
119526, Москва, проспект Вернадского, д. 101, корп. 1