

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского
Российской академии наук

На правах рукописи

Химуля Валерий Владимирович

**Реологические и фильтрационные свойства горных
пород в условиях сложного трехосного нагружения**

Специальность 01.02.04

«Механика деформируемого твердого тела»

Диссертация на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук
Карев Владимир Иосифович

Москва — 2021

Оглавление

Введение.....	4
Глава 1. Экспериментальные исследования процессов деформирования, разрушения и фильтрации в горных породах	13
1.1. Гостирированные методы измерения механических свойств материалов	13
1.2. Исследования механических и фильтрационных свойств горных пород с использованием условно трехосных установок.....	14
1.3. Установки истинно трехосного нагружения для изучения свойств горных пород в условиях сложного трехосного нагружения.....	21
1.4. Исследования механических и фильтрационных свойств горных пород с использованием установок истинно трехосного нагружения.	29
1.5. Классификация горных пород по реакции фильтрационных свойств на изменение напряженного состояния.....	37
1.6. Выводы по главе 1.....	40
Глава 2. Напряженное состояние в окрестности скважины.....	41
2.1. Распределение напряжений на стенках скважины при отсутствии бокового распора.....	42
2.2. Распределение напряжений на стенках скважины при наличии бокового распора.....	47
2.3. Распределение напряжений в окрестности кончика перфорационного отверстия в обсаженной скважине	50
2.4. Выводы по главе 2.....	51
Глава 3. Объекты исследования и методика проведения испытаний ...	51
3.1. Объекты исследования	51
3.2. Экспериментальное оборудование.....	55
3.3. Подготовка кернового материала.....	60
3.4. Ультразвуковое прозвучивание образцов с целью определения степени анизотропии упругих свойств пород.....	61
3.5. Программы нагружения образцов.....	64

3.5.1. Программа нагружения образца, отвечающая напряжениям, действующим на контуре необсаженной скважины при отсутствии бокового распора	64
3.5.2. Программа нагружения образца, отвечающая напряжениям, действующим на контуре необсаженной скважины при наличии бокового распора	66
3.5.3. Программа нагружения образца, отвечающая напряжениям, действующим в окрестности кончика перфорационного отверстия	67
Глава 4. Результаты экспериментальных исследований	68
4.1. Результаты испытаний пород второй категории	70
4.1.1. Приразломное месторождение	70
4.1.2. Киринское месторождение	78
4.1.3. Уренгойское месторождение	83
4.2. Результаты испытаний пород третьей категории	95
4.2.1. Приразломное месторождение	95
4.2.2. Киринское месторождение	98
4.3. Сводные результаты испытаний.....	100
4.4. Обсуждение результатов	111
4.5. Выводы и практические рекомендации.....	116
Заключение	121
Список литературы	126

Введение

Актуальность.

Геомеханические и геофизические исследования показали, что возникающее в породах напряженное состояние оказывает большое влияние на их механические и фильтрационные свойства. Строительство подземных сооружений, работы, связанные с добычей твердых полезных ископаемых и углеводородов, приводят к изменению трехмерного напряженного состояния части горного массива. Изучая механизмы деформирования породы при изменении напряженного состояния, можно узнать характер ее разрушения и эволюции механических свойств, что имеет ключевое значение для предотвращения аварийных ситуаций, надежного строительства различного рода конструкций, а также эффективной и безопасной разработки и эксплуатации скважин и горных выработок. В настоящее время проводится широкий спектр исследований деформационных, прочностных и фильтрационных характеристик горных пород в условиях трехмерного напряженного состояния. Все они основаны на экспериментальном изучении, так как эти свойства определены самой природой и не могут быть получены расчетным путем. Для горных пород характерны существенные различия свойств, даже если они залегают в непосредственной близости друг от друга. Сегодня большая часть лабораторных исследований проводится по традиционной условно трехосной схеме с использованием установок кармановского типа. Образцы для испытаний имеют цилиндрическую форму, нагрузка прикладывается по оси образца и по его боковой поверхности, что не позволяет в полной мере воспроизводить реальные трехмерные напряженные состояния, возникающие в массиве горных пород. В реальных геотехнических условиях в горных породах, грунтах напряжения, действующие в трех направлениях могут быть существенно различными. Для моделирования напряженно-деформированного состояния геоматериалов в реальных условиях конструируются установки истинно трехосного нагружения

(УИТН), которые способны независимо и одновременно изменять напряжения или деформации по каждой из трех осей. Такие установки позволяют проводить физическое моделирование геомеханических процессов, происходящих в массиве горных пород при проведении тех или иных технологических операций. УИТН используются для изучения деформационных, прочностных, фильтрационных и реологических свойств горных пород в условиях неравнокомпонентного трехосного сжатия, служат незаменимым инструментом для определения параметров математических моделей, создаваемых для расчетов процессов деформирования и разрушения геоматериалов с учетом анизотропии их свойств.

Знание механических и фильтрационных характеристик продуктивного пласта необходимо для создания геомеханической модели месторождения, на основе которой создается проект его разработки, а также для создания способов повышения продуктивности скважин, нефтеотдачи пластов и обеспечения устойчивости стволов скважин [1].

Большинство горных пород-коллекторов подвержены значительной ползучести, т.е. деформированию во времени при неизменной нагрузке. Учет явления ползучести горных пород при создании моделей и изучении деформационных свойств имеет большое значение при прогнозировании долговременной прочности скважин, особенно в случае необсаженного ствола. Если горная порода в окрестности необсаженной скважины обладает повышенными реологическими свойствами, т.е. способна деформироваться при постоянном давлении на забое скважины, то возникает опасность потери устойчивости стенок скважин в процессе бурения и эксплуатации, приводящей к смятию обсадных колонн, потере стволов при наклонном бурении, что серьезно затрудняет и удорожает добычу углеводородов. При бурении скважин это приводит к таким негативным явлениям, как прихваты бурового инструмента, вывалы породы на стенках скважин и др. Помимо влияния на устойчивость стволов скважин, явление ползучести может

приводить к изменению проницаемости пород-коллекторов в окрестности скважин., что также необходимо учитывать при их эксплуатации.

Совершенно очевидно, что построение теоретических и математических моделей указанных явлений должно опираться на экспериментальные данные по упруго-пластическим и реологическим свойствам исследуемых горных пород. Причем эти свойства должны изучаться в условиях, отвечающих реальным трехмерным полям напряжений, действующих в окрестности скважин. Теория ползучести горных пород в настоящее время недостаточно разработана. Это связано с тем, что подавляющее большинство моделей ползучести создавалось для описания деформирования металлов, и в этой связи их прямое перенесение для описания деформирования таких сред как горные породы не всегда приводит к адекватным результатам, поскольку существует ряд существенных отличий в механическом поведении горных пород и металлов. Поэтому создание математических моделей, хорошо описывающих процессы деформирования и разрушения горных пород при бурении и эксплуатации скважин с учетом их ползучести, в настоящее время не представляется возможным. Один из путей решения данной проблемы - моделирование на установках истинно трехосного независимого нагружения процесса ползучести исследуемых горных пород в условиях реальных напряженных состояний, возникающих в окрестности скважин при их бурении и эксплуатации.

Важным малоизученным вопросом остается изучение влияние ползучести на проницаемость горных пород, так как оно может быть определено только экспериментально. При этом надо учитывать, что влияние ползучести на проницаемость горных пород зависит от величины и вида напряженного состояния, при котором она происходит. Поэтому для определения этой зависимости также необходимо проведение экспериментов на установках истинно трехосного независимого нагружения по изучению изменения проницаемости горных пород под действием реальных напряжений, возникающих в окрестности скважин.

В данной работе проведено физическое моделирование процессов деформирования, разрушения и фильтрации, а также исследованы фильтрационные и реологические свойства пород шельфовых нефтегазовых месторождений Киринское и Приразломное, а также низкопроницаемых пород Уренгойского ГКМ, на установке истинно трехосного нагружения ИСТНН. Результаты экспериментальных исследований представлены в рамках предложенной в Институте проблем механики РАН условной классификации горных пород по реакции на возникающие в них касательные напряжения [2].

Месторождение Приразломное на сегодняшний день является единственным действующим в России проектом по добыче углеводородного сырья на шельфе Арктики [3]. Изучение и физическое моделирование процессов в продуктивных пластах исследуемых месторождений имеет особую значимость в силу их шельфового расположения, что непосредственно связано со сложностью и трудоемкостью разработки, а также повышенной ресурсозатратностью. Известно также, что доля легкоизвлекаемых запасов углеводородного сырья стремительно сокращается. Это приводит к тому, что все чаще в разработку вводятся объекты с низкими фильтрационными характеристиками пород. Разработка таких объектов представляет существенную сложность как в техническом плане, так и в экологическом. В последние годы выбор оптимальных способов разработки низкопроницаемых залежей становится важнейшей задачей для большинства нефте- и газодобывающих компаний в России и в мире [4]. Эти задачи ставятся как при освоении трудноизвлекаемых запасов на новых месторождениях, так и в краевых зонах давно эксплуатируемых объектов [5].

Целями настоящей работы являются:

- Экспериментальное исследование деформационных, реологических и фильтрационных свойств горных пород, слагающих продуктивные пласты нефтяных и газовых месторождений, в том числе с трудноизвлекаемыми

запасами, в условиях реальных напряжений, возникающих в призабойной зоне как вертикальных, так и горизонтальных скважин.

- Изучение характера изменения проницаемости и процессов ползучести горных пород под действием неравномерного напряженно-деформированного состояния пласта, их взаимовлияния.

- Изучение влияния неравномерности исходного поля напряжений в пласте и различных конструкций забоя скважин на процессы деформирования, разрушения и фильтрации пород в призабойной зоне.

- Определение физических параметров и условий, приводящих к улучшению фильтрационных свойств пород в окрестности скважин и недопущению разрушения пород в призабойной зоне.

- Поиск закономерностей в характере изменения фильтрационных свойств пород при изменении неравнокомпонентного истинно трехосного напряженного состояния, а также систематизация накопленных экспериментальных данных.

Для достижения цели работы ставились следующие **задачи**:

1. Обзор современных методов исследования свойств горных пород, анализ преимуществ и недостатков существующих подходов и оборудования. Проведение анализа распределения напряжений в окрестности скважин для разных начальных условий в пласте, а также различных конструкций забоя скважины.

2. Создание программ нагружения, воспроизводящих реальные напряженные состояния в окрестности скважин исследуемых месторождений.

3. Проведение физического моделирования процессов деформирования и фильтрации при изменении неравнокомпонентного напряженного состояния в окрестности скважины в ходе проведения технологических операций; регистрация процессов ползучести исследуемых пород.

4. Определение зависимости фильтрационных свойств исследуемых пород от вида и уровня напряженно-деформированного состояния с последующим анализом эволюции проницаемости во времени.

5. Статистический анализ связи процессов фильтрации и ползучести; определение тесноты установленной связи данных процессов для пород исследуемых месторождений.

6. Систематизация полученных результатов в рамках классификации горных пород по реакции фильтрационных свойств на изменение напряженного состояния; создание феноменологической модели изменения проницаемости исследованных пород.

Положения, выносимые на защиту:

1. Разработанная методика физического моделирования реальных напряженно-деформированных состояний, возникающих в продуктивных пластах нефтегазовых месторождений с целью изучения закономерностей влияния процессов деформирования, в том числе ползучести, на фильтрационные свойства пород.

2. Экспериментально установленные закономерности деформирования и изменения фильтрационных свойств горных пород различных литотипов во времени при моделировании процессов, происходящих в окрестности вертикальных и горизонтальных скважин для различных пластовых и эксплуатационных условий: равномерного и неравномерного исходных распределений напряжений в пласте, а также двух потенциальных конструкций забоя скважины.

3. Проведенный статистический анализ влияния процесса ползучести на проницаемость исследуемых горных пород: вычисленная посредством корреляционного анализа теснота установленной связи фильтрационных и реологических свойств на разных этапах деформирования. Показано, что ползучесть может различным образом влиять на проницаемость пород в зависимости от характера происходящих при этом процессов: заплывание фильтрационных каналов, дилатансия, образование микро- и макротрещин. Изучен характер изменения проницаемости при протекании данных процессов.

4. Разработанная феноменологическая модель эволюции проницаемости исследованных терригенных пород ачимовских отложений в процессе их деформирования при изменении напряжений, соответствующих условиям в окрестности скважины при понижении давления на забое.

5. На основе проведенных экспериментальных исследований реологических и фильтрационных свойств горных пород-коллекторов исследуемых месторождений углеводородов и их взаимосвязи сделаны выводы о способах недопущения негативных процессов в пластах и намечены пути повышения продуктивности скважин.

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций подтверждаются: использованием в ходе исследований фундаментальных законов механики сплошных сред; корректностью постановки задач; 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 и последующий теоретический анализ результатов, включающий их статистическую обработку.

Научная новизна исследований заключается: в разработке методики проведения прямого физического моделирования механических и фильтрационных процессов в окрестности скважины для условий исследуемых месторождений на установке истинно трехосного нагружения; в проведении лабораторного моделирования и определении реологических и

фильтрационных характеристик пород-коллекторов месторождений; в установлении зависимости от времени деформаций исследуемых пород в условиях сложного трехосного нагружения и характера изменения проницаемости в процессе ползучести; в определении влияния ползучести на фильтрационные характеристики, оценке тесноты установленной связи с помощью методов корреляционного анализа; систематизации накопленных результатов изучения эволюции проницаемости в условиях сложного трехосного нагружения; создании феноменологической модели изменения фильтрационных свойств пород исследуемых месторождений при проведении технологических операций на скважине, в получении критериев улучшения фильтрационных характеристик пород.

Практическая значимость и реализация результатов. Результаты 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 исследований по разработанной методике определены условия, которые необходимо создать в породах исследуемых месторождений, в том числе с трудноизвлекаемыми запасами, 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 для различных геометрий забоя. Полученные результаты и практические рекомендации представлены компании-разработчику месторождений: ПАО «Газпром».

Апробация работы. Основные научные и практические результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на: Biot-Bazant Conference 2021 on Engineering Mechanics and Physics of Porous Materials (Illinois, USA); XVI-XVII International Forum-Contest of Students and Young Researchers «Topical Issues of Rational Use of Natural Resources» (Санкт-Петербург, 2020, 2021); XV Всероссийской школе-конференции «Проблемы

механики: теория, эксперимент и новые технологии» (Новосибирск, 2021); XXIV, XXV, XXVII и XXVIII Международных научных конференциях студентов, аспирантов и молодых ученых "Ломоносов" (Москва, 2017-2018, 2020-2021); III, IV и VI Международных научных школах молодых ученых «Физическое и математическое моделирование процессов в геосредах» (Москва, 2017-2018, 2020); 3-й и 4-й Всероссийской конференции молодых учёных-механиков YSM-2020 (Сочи, 2020-2021).

Работы отмечены наградами:

1. The Best Presenter Award for the winners of XVI International Forum-Contest of Students and Young Researchers "Topical Issues of Rational Use of Natural Resources", breakout session on "Oil & Gas Field Development"; awarded by Saint-Petersburg Mining University, International Competence Centre for Mining-Engineering Education under the auspices of UNESCO.
2. Премия корпорации "Шеврон Нефтегаз Инк" аспирантам и студентам МГУ, чья научная деятельность связана с нефтяной отраслью, включая экологию нефти и газа (2018 г.).
3. Премия за лучший доклад в подсекции «Геофизика» (II место) на Международном молодежном научном форуме МГУ «Ломоносов-2018».
4. Премия в конкурсе лучших научных работ среди молодых ученых и студентов ИПМех РАН за 2018 год.
5. Премия в конкурсе лучших научных работ среди молодых ученых и студентов ИПМех РАН за 2017 год.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 15 научных работ, среди которых 7 статей в журналах из списка ВАК, в том числе индексируемых в Web of Science и Scopus.

Личный вклад автора. Основные результаты, изложенные в диссертационной работе, получены лично соискателем. Им выполнены обзор и анализ литературы; проведены подготовка к испытаниям и предварительные исследования образцов исследуемых пород; осуществлен анализ напряженного состояния в окрестности скважин для разных начальных

пластовых условий и различных геометрий забоя; разработаны программы нагружения образцов; проведены эксперименты на установке ИСТНН, осуществлены обработка, анализ и систематизация результатов. В числе основных исполнителей в составе лаборатории геомеханики ИПМех РАН принимал участие в постановке задач исследования, планировании и реализации экспериментов, обсуждении и обработке полученных результатов. Подготовка публикаций по теме диссертации проведена совместно с соавторами. Апробация работы на конференциях, съездах и форумах осуществлена лично автором.

Структура и объём работы. Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав, заключения, списка использованной литературы. Общий объём работы составляет 133 страниц, включая 39 рисунков и 8 таблиц. Список литературы содержит 99 наименований.

Глава 1. Экспериментальные исследования процессов деформирования, разрушения и фильтрации в горных породах

1.1. Гостирированные методы измерения механических свойств материалов

Используемые сегодня лабораторные методы исследования деформационных и прочностных свойств горных пород весьма разнообразны. Существует целый ряд гостирированных методов и приборов для измерения механических свойств материалов: одноплоскостного среза, одноосного сжатия, трехосного сжатия (условно трехосного), компрессионного сжатия в одометрах, исключаяющего возможность бокового расширения образца при его нагружении вертикальной нагрузкой, суффозионного сжатия, основанного на способности засоленных грунтов к уменьшению объема вследствие выщелачивания солей при длительной фильтрации воды и постоянной

сжимающей нагрузке. Гостируются также испытания с целью определения изменения объема глинистых грунтов при водонасыщении (набухании) или высыхании (усадке). Характеристики набухания определяют в приборах свободного набухания грунтов (ПНГ) и в компрессионных приборах при насыщении грунта водой или химическим раствором. Усадку грунта определяют в условиях свободной трехосной деформации образца при высыхании грунта. Во всех этих методах проводятся испытания образцов в форме цилиндра. Есть методы определения твердости материалов, в том числе горных пород. Первый связан с использованием твердомера. На образец давят шариком и измеряют глубину впадины на образце при заданном давлении. Второй получил название *scratch test*. Суть его в следующем: по образцу проводят резцом при определенном давлении и определяют глубину образовавшегося следа. При проведении испытаний решается основная задача определения критической нагрузки, при которой происходит аномальное изменение глубины вдавливания резца. По величине силы судят о характере разрушения поверхности, износостойкости и др. Очевидно, что использование различных резцов позволяет получать только относительные результаты, которые сравнимы лишь для одинаковых условий испытаний [6].

1.2. Исследования механических и фильтрационных свойств горных пород с использованием условно трехосных установок.

Экспериментальными и теоретическими исследованиями механических процессов в горных породах при проведении горных работ и проходке выработок посвящено большое количество работ. Этими вопросами занимались такие известные исследователи, как Христианович С.А., Ганиев Р.Ф., Мирзаджанзаде А.Х., Шемякин Е.И., Садовский М.А., Щелкачев В.Н., Желтов Ю.П., Баренблатт Г.И., Гузь А.Н., Николаевский В.Н., Протосеня А.Г., Тер-Саркисов Р.М., Басниев К.С., Черепанов Г.П., Быков В.Г., Капустянский

С.М., Ставрогин А.Н., Добрынин В.М., Джегер Ч., Друккер Д., Прагер В., Терцаги, Зобак М. др. Существенный вклад в описание движения флюида в геоматериалах, а также изучение трещинообразования, внесли Салганик Р.Л., Ентов В.М. и Маскет М. Основным способом изучения свойств горных пород был и остается экспериментальный подход, так как характеристики геоматериалов определены самой природой и могут существенно отличаться даже для пород, залегающих в непосредственной близости.

Наиболее распространенный метод исследований физических свойств горных пород в условиях трехосного нагружения связан с использованием установок, основанных на принципе Кармана. В 1911 г. Карман [7] поставил первые опыты с образцами песчаников и мрамора. В своих экспериментах он подвергал цилиндрические образцы пород всестороннему боковому давлению жидкости при одновременном независимом одностороннем сжатии плитами. Вскоре его сотрудник и коллега Бекер [8] исследовал мрамор уже на растяжение по оси цилиндра при условии всестороннего сжатия жидкостью. Позднее совершенствованием такого подхода занимались М.П. Воларович [9, 10], Хориба, Кобаяси [11], Паттерсон [12]. Методика проведения экспериментов Карманом положила начало целому направлению исследований, которые продолжаются и на сегодняшний день. Принцип работы установки Кармана сегодня используется в большинстве лабораторий по исследованию механических свойств горных пород во всех странах и признан классическим. Установки такого типа производятся серийно. Они осуществляют так называемое «условно трехосное нагружение» – нагрузка прикладывается по всей поверхности образца, но регулировать ее можно только в двух направлениях: по оси и по радиусу образца, образец для испытаний имеет форму цилиндра. На рис.1 схематично представлена конструкция установки Кармановского типа. На установке данного типа также возможно проведение исследований по схеме «полый цилиндр». Суть ее заключается в следующем: по оси цилиндрического образца просверливается отверстие. Далее образец нагружается по всей поверхности. В процессе

нагрузки образца отверстие продувается воздушным потоком, фиксируются осевые и радиальные деформации и количество вынесенного песка, образующегося при разрушении стенок отверстия.

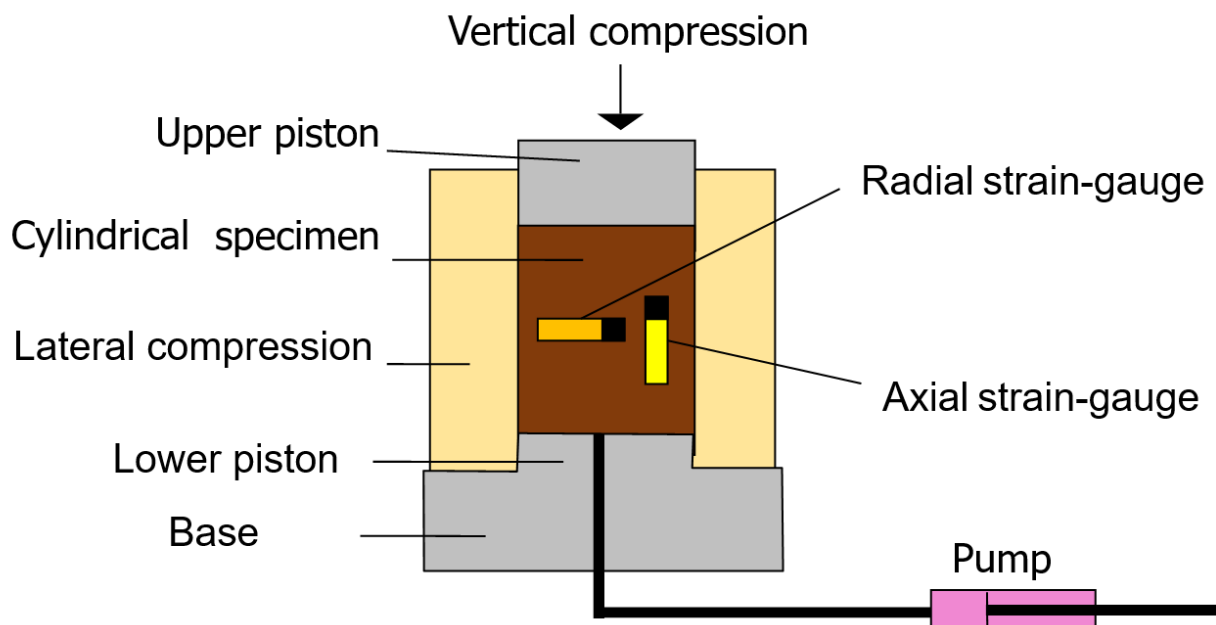


Рис. 1. Схема установки кармановского типа.

Главным недостатком аппаратов данного типа является то, что установки, построенные по кармановской схеме, не позволяют моделировать реальные геомеханические условия в горном массиве, которые являются трехмерными. Кроме того, определение деформационных и прочностных характеристик анизотропных пород с использованием таких установок вызывает существенные затруднения.

В настоящее время существует ряд основных направлений исследований, которые проводятся с использованием установок трехосного нагружения. Это изучение механического поведения горных пород различных литотипов в зависимости от уровня и характера нагружения, влияния начальной структуры пород (наличия начальной трещиноватости, ориентации макротрещин относительно главных напряжений) на их деформационные и прочностные свойства, характер неупругого деформирования, в том числе ползучести.

В работе Zhang и др. [13] условно трехосным методом проведено изучение прочностных свойств норвежских гранита и мрамора. Исследовались взаимосвязи начальной трещиноватости образца с изменением его механических параметров после прохождения предела прочности, а также с углом наклона образовавшейся трещины. По результатам условно трехосных опытов с последующим разрушением цилиндрических образцов авторами предложен индекс повреждения (Damage index) для описания степени повреждения горных пород определенного типа после прохождения предела прочности. Его определяют как отношение энергии разрушения, рассеянной при данной деформации после прохождения предельной точки во время трехосных испытаний, к полной энергии разрушения при одноосном нагружении образца.

Zong Y. и др. [14] исследовали поведение цилиндрических образцов песчаников с повреждениями и без при условно трехосном нагружении с целью изучения параметров, влияющих на характер ползучести. Авторами показан линейный рост деформаций ползучести с увеличением разности прикладываемых боковых и осевых напряжений, а также подчеркнута увеличение скорости ползучести с ростом компонент девиаторной составляющей тензора напряжений и ее снижение с ростом всестороннего сжатия. При этом скорость ползучести на близких к разрушению этапах может как постоянно расти, так и оставаться длительное время постоянной до перехода к неустановившейся ползучести. В другой работе авторов [15] внимание акцентировано на влиянии степени разрушенности образца на прочностные и деформационные характеристики.

В статье Wang Z. и др. [16] приведены результаты испытаний образцов зеленого сланца, проводившихся по кармановской схеме. В работе подчеркивается, что увеличение всестороннего давления оказывает большее влияние на ползучесть в радиальном направлении, нежели в осевом, и предлагается метод определения длительной прочности с помощью точек перегиба кривых деформации.

Большой объем работ по изучению физических характеристик кобургского известняка проводится на протяжении многих лет канадскими исследователями. В одной из последних работ Nguyen T.S. и Nasser M.H. [17], являющейся своего рода резюмированием более ранних исследований, авторы обобщили результаты лабораторных трехосных испытаний на глинистых кобургских известняках с измерением коэффициента проницаемости. Среди прочих важных выводов отмечается, что эволюция проницаемости изучаемых образцов при нагружении следует определенным закономерностям. Начальный участок кривых проницаемости характеризуется более высокими значениями проницаемости. На втором участке наблюдается ухудшение фильтрационных свойств по мере сжатия. На третьем участке заметно увеличение проницаемости еще до достижения предела прочности, что связано с возникновением и слиянием микротрещин. На постпредельном этапе исследователи наблюдают либо увеличение, либо уменьшение проницаемости в зависимости от того, возникает ли сеть макротрещин или происходит вязкое деформирование аналогично пластилину. Проницаемость, измеренная после разрушения некоторых образцов, была на 2-3 порядка выше начальной. Авторы отмечают необходимость дальнейших детальных исследований для изучения такого поведения породы. Ключевым результатом серии работ является разработанная математическая модель для интерпретации гидромеханических процессов в этих породах при испытаниях.

Эволюция газопроницаемости при пластических деформациях, а также вопросы влияния неравномерного напряженного состояния и начальной трещиноватости образца на ползучесть горной породы рассмотрены в работе Yang S. и Hu B. [18]. Исследования проводились кармановским методом на цилиндрических образцах красного песчаника с одиночной искусственной трещиной и всестороннем давлении 30 МПа. В ходе эксперимента осевое давление менялось циклически, при этом создавалась длительная неравномерная нагрузка в каждом из состояний, параллельно с чем

измерялись проницаемость, упругие и пластические деформации, определялись прочностные и реологические характеристики. Мгновенные упругие и вязкоупругие деформации линейно увеличивались с ростом отношения осевого напряжения к радиальному как для неповрежденных, так и для образцов с трещинами, а вязкопластические деформации росли нелинейно. Скорости ползучести нелинейно росли с увеличением разности главных напряжений. В работе сделан вывод о влиянии угла наклона изначальной трещины на реологические и прочностные характеристики. Указано, что проницаемость трещиноватого красного песчаника определяется уровнем напряжений, величиной деформации образца и длительностью выдержки под нагрузкой. Во время многостадийного процесса нагружения/разгрузки деформации ползучести приводили сперва к снижению проницаемости, а затем внезапному увеличению при переходе к третьей стадии ползучести.

В другой работе одного из авторов предыдущей статьи [19] также проведены результаты условно трехосных испытаний образцов песчаника с целью определения влияния всестороннего давления и пространственных дефектов породы на предел прочности и способ образования магистральных трещин. Также проводилась оценка влияния наличия флюида (солевого раствора) в порах образца на прочность породы. Во время опытов предел прочности ненасыщенных соевым раствором образцов увеличивался линейно при увеличении всестороннего сжатия и угла первоначального надреза образца (дефекта), в то время как у насыщенных образцов рост был нелинейным.

Весьма объемные исследования ползучести горных пород были проведены британским коллективом на образцах алевrolита [20]. В экспериментах испытывались образцы с трещинами и без, которые нагружались как одноосно, так и условно трехосно в ячейке Хука. Результаты показали, что и мгновенная деформация, и деформация ползучести коррелируют с прикладываемой разностью осевого и бокового напряжений, что отчетливо

наблюдалось в трещиноватых образцах, где большая разность напряжений приводила к увеличению скорости деформации ползучести. Как и ожидалось, параметры ползучести для цельных и трещиноватых образцов существенно различались, но несмотря на это различие, результаты показали значительную корреляцию между параметрами ползучести обоих типов образцов горных пород и их текущим модулем упругости. Используя регрессионный анализ, авторы обосновали, что параметры ползучести могут быть оценены по текущему модулю упругости с использованием экспоненциальной функции.

В работе Мартюшева Д.А. и др. [21] проводились классические эксперименты по кармановской схеме на известняках. В результате серии опытов на керне установлено, что для трещиноватых образцов при росте эффективного давления происходит резкое снижение проницаемости. В дальнейшем при снижении, а также полном снятии напряжений фильтрационно-емкостные свойства трещиноватых коллекторов не восстанавливаются до исходного значения. В работах Хашпера и др. [22] представлены аналогичные исследования, сопровождающиеся также программным моделированием полученных корреляционных зависимостей [23, 24]. В данных работах цилиндрические образцы пород подвергались циклическому сжатию и изучались их упругие и упруго-пластические свойства. В процессе первого нагружения образцы деформировались упруго-пластически, при этом происходили необратимые ухудшения фильтрационно-емкостных свойств. Разгрузка и повторные нагружения показали лишь упругий отклик породы. Авторы провели физическое моделирование снижения пластового давления и получили при этом эффект необратимого снижения проницаемости породы, наблюдаемый на практике. С использованием полученных экспериментальных данных был создан программный модуль, который позволяет, по словам авторов, выявить дополнительные зоны ухудшения проницаемости в окрестности нагнетательных скважин.

В описанных выше работах достаточно подробно исследуется влияние разности возникающих в цилиндрическом образце осевых и боковых напряжений на прочностные и фильтрационные свойства и процессы ползучести, однако условно трехосное нагружение не позволяет воспроизводить реально возникающие в натуральных условиях напряженные состояния, которые приводят к иной реакции горных пород и изменению их физических свойств.

1.3. Установки истинно трехосного нагружения для изучения свойств горных пород в условиях сложного трехосного нагружения

Начиная с первых поставленных опытов и вплоть до второй половины 20 века большинство лабораторных испытаний, связанных с изучением механических характеристик горных пород в условиях *in situ*, проводилось примерно по однотипной схеме: при достаточно высоком сжимающем всестороннем давлении к верхней и нижней граням образца породы прикладывается дополнительное сжимающее или растягивающее напряжение. Во второй половине 20 века были предприняты первые попытки экспериментов по более сложным схемам [25], в которых напряжения по всем трем пространственным направлениям были не равны между собой, однако в силу своей новизны, сложности и повышенных технических требований такие опыты не получили общего признания в то время, несмотря на их более широкие возможности по сравнению с классическими. Одна из первых установок такого типа была спроектирована и сконструирована К. Моги [26], после чего подобные стенды получили название установок истинно трехосного нагружения (УИТН). С тех пор развитием его идей занимаются многие научные коллективы вплоть до наших дней [27-30]. Исследования с применением УИТН дают наиболее полную информацию о свойствах горной породы. Установки истинно трехосного нагружения распространены в мире недостаточно широко, несмотря на очевидные преимущества по сравнению с

установками кармановского типа. В отличие от установок условно трехосного нагружения образец для испытаний на УИТН имеет форму параллелепипеда, и нагрузка прикладывается одновременно и независимо по каждому из трех взаимно перпендикулярных направлений. Система измерений УИТН в процессе испытания регистрирует силы и перемещения в каждом из трех направлений, которые пересчитываются в напряжения и деформации. По полученным данным строятся кривые деформирования образца, по которым определяются параметры модели механических свойств породы. Возможность истинно трехосного нагружения образца обуславливает появление ряда трудностей при создании установки. Универсального решения конструкции таких установок нет, поэтому в мире нет двух одинаковых УИТН. Во многом это связано с существенной сложностью конструкции, высокой стоимостью и отсутствием конвейерного производства такого оборудования. В последние годы появилась возможность изготовления типовых установок такого рода коммерческими структурами на заказ [31, 32].

УИТН могут быть снабжены различными дополнительными системами в зависимости от решаемых данной лабораторией задач. Это может быть система создания и регулирования порового давления в образце, подогрева образца и измерения температуры, что необходимо для моделирования реальных термобарических пластовых условий. УИТН может быть оборудована системой измерения проницаемости в ходе испытания, что особенно важно для решения задач нефтегазодобычи. Ряд установок снабжен акустическими системами, которые позволяют измерять скорости распространения продольных и поперечных упругих волн в образце и акустическую эмиссию в процессе нагружения, что чрезвычайно важно для изучения разрушения материала под нагрузкой и создания средств диагностики поврежденности геоматериала. Каждая лаборатория создает установку своей конструкции, предназначенную для решения стоящих перед ней задач. Тем не менее, все существующие УИТН можно классифицировать по способу нагружения и ряду других признаков:

1. установки I типа (с жесткими плитами);
2. установки II типа (с гибкими плитами);
3. установки III типа (смешанного типа).

Каждый тип имеет свои достоинства и недостатки.

1. Установки I типа.

Нагружающий узел данного типа установок состоит из 3 гидравлических поршней, передающих нагрузку на грани образца через жесткие (металлические) плиты. Данный тип установок позволяет создавать напряжения значительно большие, чем установки двух других типов, обладает необходимой устойчивостью нагружающей системы, позволяет осуществлять различные траектории нагружения по осям и возможность исследовать образцы больших размеров. Данный тип установок можно разделить на два подтипа:

- 1) установки, у которых нажимные плиты двигаются только по оси сжатия.
- 2) установки, у которых нажимные плиты могут двигаться не только по оси сжатия, но и перпендикулярно ей.

Для установок первого подтипа наконечники нажимных плит приходится делать меньше размеров граней образца, чтобы избежать надавливания на соседние плиты. Такой способ приложения нагрузки порождает граничные и угловые эффекты. У установок второго подтипа этого недостатка нет из-за возможности движения плит перпендикулярно оси сжатия, но возникает другая проблема, трение между образцом и плитами, которое приводит к дополнительной погрешности измерений.

2. Установки II типа.

Данный тип установок в двух или более направлениях имеет гибкие плиты. Под гибкой плитой подразумевается подушка из прочного эластичного материала, которая наполняется жидкостью и принимает форму поверхности образца, тем самым, исключая краевые эффекты. В другом случае давление жидкости может передаваться напрямую к грани образца, помещенного в изолирующий карман или мембрану. Но на этих установках нельзя создавать

большие напряжения из-за недостаточной прочности материалов подушек, также нельзя добиться высокой устойчивости нагружающей системы. Имеются ограничения по размерам самих образцов.

3. Установки III типа.

Такие установки принято называть аппаратами смешанного типа. Усилия в одном или двух направлениях прикладываются жесткими плитами, а по другим осям – жидкой средой (давлением масла или мембранами). Конечно, превзойти по величине напряжения, создаваемые в установках I-ого типа, или избежать краевых эффектов, как это было в установках 2-ого типа, они не могут, зато позволяют на определенном уровне сочетать в себе обе возможности сразу.

Ниже приводятся примеры конкретных установок различных типов.

1. University of Mons – FPMs, Mons, Belgium. Руководители: J.-P. Tshibangu & F. Descamps.

Установка сделана для изучения эффекта комплексного граничного давления на поведение скальных пород, находящихся на большой глубине. Установка относится к 1-ому типу [33]. Развивает давление на каждом направлении до 500 МПа. Для установки делают специальные образцы размером 31*30*30 мм. Прочность машины оценивается в 3.2 МН/мм.

На установке, среди прочего, проводят общепринятые трехосные испытания. Такое испытание проходит в три этапа. На первом этапе увеличиваются все три значения напряжения до заданного уровня $\sigma_1=\sigma_2=\sigma_3$. На втором этапе значение напряжения σ_3 остается постоянным, а два других увеличиваются до заданного уровня $\sigma_1=\sigma_2$. На третьем этапе увеличивается только значение σ_1 до конца испытания, а именно до предельного состояния, после достижения которого начинается пластическая деформация образца. Потом образец разгружается. Этот тест может проводиться с вариацией значений параметра Лоде от общепринятого условно трехосного сжатия ($\sigma_2=\sigma_3$) до трехосного расширения ($\sigma_1=\sigma_2$).

В одной из последних работ [34] данного коллектива исследователей проводились испытания сухих и водонасыщенных пород и твердых грунтов мелового карьера Malogne. Широкий спектр лабораторных испытаний, включая истинно трехосные тесты 16 кубических образцов с исходными всесторонними обжатиями в 5 и 10 МПа, проводился с целью определения механических свойств. Полученные данные использовались в качестве входных параметров для разработанной модели устойчивости и разрушения подземных выработок в карьере.

2. Lassonde Institute and Department of Civil engineering University of Toronto, Toronto, Canada. Руководители: R.P.Young & M.H.B.Nasseri

На установке проводится изучение типов разломов в горных породах, которые индуцируют сейсмику, изменения упругих свойств и фильтрации жидкости. Фильтрация жидкости через образец осуществляется за счет того, что в жестких плитах сделаны поры, через которые при помощи насосов подается жидкость к граням образца. Это позволяет исследовать проницаемость породы во всех трех направлениях. Установка относится к 1-ому типу. Размеры образца 80*80*80мм. Нагружающий узел системы допускает осевое усилие 6800 кН и поперечное усилие 3400 кН. На установке имеются 18 датчиков акустической эмиссии. 16 пьезоэлектрических индукторов, смонтированных в жесткие плиты нагружающего узла и находящихся в прямом контакте с поверхностями граней образца, позволяют исследовать скорости прохождения высокочастотных волн и акустическую эмиссию. Так же плиты оснащены системой контроля температуры, которая позволяет нагревать образец до 200 °С [35].

3. Department of Petroleum Engineering, Curtin University, Perth, Australia. Руководитель Dr Mohammad Sarmadivaleh.

Организованная в 2007 году научная группа, занимающаяся геомеханическими исследованиями, располагает четырьмя различными истинно трехосными ячейками нагружения (одна находится на стадии разработки), каждая из которых имеет отдельное применение.

1) Blue TTSC позволяет моделировать различные сценарии бурения и разработки пласта в крупном масштабе с применением анизотропных напряжений. Аппарат может прикладывать независимо силы в 315 кН и 1000 кН в горизонтальном и вертикальном направлениях, соответственно, на кубических образцах размером от 30 мм до 300 мм [36]. Для самого маленького образца, таким образом, напряжение может достигать 350 МПа и 1110 МПа в горизонтальном и вертикальном направлениях соответственно. Во время испытания также может создаваться поровое давление до 21 МПа. Отверстие, просверленное в центре образца, позволяет закачивать жидкость, имитируя гидроразрыв пласта. Установка относится к первому типу [37].

2) Истинно трехосная ячейка 50mm NGL TTSC позволяет моделировать напряженные состояния на кубических образцах с гранью 50 мм. Куб с диаметром 50 мм – это самый крупный образец, который может быть извлечен при обычном бурении нефтяных и газовых скважин. Установка позволяет приложить вертикальное и два независимых горизонтальных равномерных напряжения до 70 МПа в каждом направлении к образцу. Кроме того, может быть создано поровое давление вплоть до 65 МПа при 100 °С. 6 комплектов тензодатчиков LVDT и 24 акустических преобразователя измеряют деформации и акустические явления в породе. Можно вводить и выводить жидкость с каждой из шести сторон ячейки. Жидкость может закачиваться в образцы для моделирования гидроразрыва пласта или для исследования повторной активации трещин во время закачки CO₂ [38]. Установка относится ко второму типу.

3) Swing NGL TTSC позволяет прикладывать вертикальную и две независимые горизонтальные составляющие сил до 1619 кН в каждом направлении. В ячейку помещаются образцы горных пород размером 150, 100 и 50 мм. Напряжение, которое может быть приложено к образцу куба диаметром 50 мм, достигает 645 МПа. Кроме того, температура может достигать 100 °С. Акустическая эмиссия регистрируется 60 датчиками. Особенностью установки является возможность моделирования процесса

гидроразрыва в условиях неравнокомпонентного трехосного сжатия путем впрыскивания под определенным давлением рабочей жидкости внутрь крупных образцов через предварительно созданные осевые отверстия. Установка относится к первому типу.

Группа обладает широкими возможностями в проведении фундаментальных исследований. Исследовательская деятельность, проводимая группой, включает такие темы, как химико-механическая стабильность сланцев, анализ устойчивости ствола скважины, трехмерный геомеханический анализ, оценка порового давления, влияние истощения коллектора на напряжения и физические свойства коллектора, взаимосвязь между напряжениями и проницаемостью коллектора, эффекты проседания и тепловые эффекты [39, 40].

4. State Key Laboratory for GeoMechanics and Deep Underground Engineering. China University of Mining and Technology. Руководитель: Miao Xiexing.

Установка относится к 1 типу, 2 подтипу – нажимные плиты способны сдвигать друг друга во избежание краевых эффектов. Максимальные усилия для каждой оси – 2000 кН, 500 кН и 300 кН соответственно. Обычные размеры образцов $50 \times 50 \times 100$ мм, однако ячейка может изменять свой размер в случае необходимости. Установка имеет возможность регистрации акустической эмиссии, датчик для измерения которой помещен в отверстие внутри плиты и находится в непосредственном контакте с образцов за счет пружины. В недавней статье исследователей [41] проведено сравнение результатов, полученных с использованием условно трехосного (традиционного) и истинно трехосного метода исследований горных пород. Авторы приводят анализ серии экспериментов, проведенных на одинаковых породах с изменением двух или трех компонент сжимающих напряжений. Среди прочего, делается вывод о том, что эксперименты кармановским методом не позволяют провести полноценные исследования влияния напряжений на физические свойства пород, в том числе невозможно изучить влияние средней компоненты напряжений на характер деформации. Также подчеркивается разный характер

деформирования и разрушения при использовании двух описанных методов, что указывает на острую необходимость в исследованиях именно истинно трехосным способом ввиду того, что реальные напряженные состояния в натуральных условиях являются трехмерными неравнокомпонентными.

5. Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского Российской академии наук, Москва, Россия. Руководители: В.И. Карев, Ю.Ф. Коваленко.

Установка относится к 1-ому типу, 2-ому подтипу. Испытательный стенд трехосного независимого нагружения (ИСТНН) используется для физического моделирования механических и фильтрационных процессов, возникающих в нефтегазосодержащих пластах при бурении, освоении и эксплуатации скважин, для изучения взаимосвязи напряженно-деформированного состояния пород-коллекторов и их фильтрационных свойств. Более подробно установка и полученные с ее помощью результаты описаны ниже. Данное научное направление, равно как и работы по созданию установки ИСТНН были инициированы академиком С.А. Христиановичем. Проведенные в данной работе исследования являются идейным продолжением работ, начатых Христиановичем С.А. и значительно развитых сотрудниками лаборатории геомеханики ИПМех РАН Каревым В.И., Коваленко Ю.В., Устиновым К.Б. и др.

6. Unconventional Natural Gas and Oil Institute, Colorado School of Mines, USA. Руководители: Dr. Azra Nur Tutuncu, Dr. Ali I Mese.

Установку относят ко 2 типу. Отличительной особенностью аппарата является конструкция с цилиндрической ячейкой нагружения. Цилиндрический образец нагружается в осевом направлении жестким поршнем. В радиальном направлении образец нагружается всесторонним давлением жидкости, прикладываемым непосредственно к резиновой оболочке. Среднее главное напряжение создается набором из двух гибких полукруглых резиновых мембран, передающих давление жидкости на оставшиеся противоположные стороны образца. Установка также позволяет измерять проницаемость насыщенных и ненасыщенных образцов,

регистрировать акустическую эмиссию. Авторы утверждают, что подобная конструкция нагружающего узла позволяет избежать негативных эффектов, которым подвержены установки 1 и 3 типа, однако, очевидно, в таком случае возрастают ограничения на максимальные прикладываемые усилия. В недавней работе сотрудников лаборатории [42] проведены измерения проницаемости при различных неравномерных напряженных состояниях образцов с циклической нагрузкой. Показано влияние средней компоненты напряжений на фильтрационные свойства пород, а также экспериментально установлено уменьшение проницаемости при приложении нагрузки, перпендикулярной направлению течения флюида, в силу закрытия микротрещин, ориентированных вдоль линий тока.

7. Key Laboratory of Ministry of Education on Safe Mining of Deep Metal Mines, Northeastern University, China. Руководитель Xia-ting Feng.

Установка относится к 3 типу. Истинно трехосный аппарат представляет собой испытательную машину с двумя жесткими и одной гибкой плитой, и в основном используется для исследования зависящих от времени деформационных характеристик, характера разрушения горных пород при высоких нагрузках. Максимальные нагрузки вдоль вертикальной и горизонтальных осей составляют 3000 и 6000 кН. Размеры образцов 50*50*100 мм [43]. В установке реализован механизм, позволяющий избегать смещения центра образца в ходе неравномерного деформирования, что является одной из проблем в установках 1 типа.

1.4. Исследования механических и фильтрационных свойств горных пород с использованием установок истинно трехосного нагружения.

В современных исследованиях механических свойств горных пород и влияния на них напряженного состояния большое внимание уделяется истинно трехосным методам. Ниже представлен обзор современных

исследований, выполненных с использованием установок истинно трехосного нагружения.

На истинно трехосных установках, как и на установках условно трехосного нагружения, основными направлениями исследований являются: изучение механического поведения горных пород различных литотипов в зависимости от уровня и характера нагружения, влияния начальной структуры пород, различного рода дефектов на деформационные и прочностные свойства, изучение упруговязкопластического деформирования пород, влияния порового давления на механические процессы, влияния напряжений и фильтрации. Однако в отличие от установок кармановского типа на истинно трехосных аппаратах нагружение производится независимо и одновременно по трем осям, что позволяет моделировать реальные напряжения, возникающие в массиве горных пород, и изучать анизотропию свойств геоматериалов. Наибольшее внимание на протяжении всей истории истинно трехосных испытаний уделяется изучению влияния средней компоненты главных напряжений на процессы деформирования, разрушения и фильтрации.

В работе японских исследователей Национального института передовых промышленных наук и технологий [44, 45] проводились истинно трехосные тесты на образцах японского песчаника Кимачи с целью реактивации трещиносодержащих плоскостей внутри образцов путем увеличения давления поровой жидкости и изучения влияния этого процесса на механические и фильтрационные характеристики породы. Опыты подтвердили, что увеличение порового давления ведет к уменьшению эффективных напряжений, что приводит к расширению трещин и пор и увеличению проницаемости. Выявлен гистерезис деформаций при циклическом изменении порового давления. Авторы отмечают необходимость проведения дополнительных испытаний для изучения влияния длительности нагружения (ползучести) на исследуемые процессы.

Исследования характера ползучести горных пород при истинном трехосном нагружении проводятся в Северо-восточном университете в Китае. В 2018 году исследователи Feng X.-T., Zhao J., Zhang X. и др. представили новую истинно трехосную установку для проведения экспериментов на твердых породах при высоких напряжениях [46]. В этой же работе описаны первые результаты исследований мрамора на данном стенде. В цикле связанных работ [47-49] подтверждено ключевое влияние средней компоненты напряжений на характер деформирования и длительную прочность Цзинпинского мрамора, а также подчеркнута невозможность получения достоверных результатов по изучению неравномерного напряженного состояния при использовании общепринятой условно трехосной методики. В работах представлены кривые ползучести мрамора, показано влияние средней компоненты напряжений на характер ползучести. Обнаружено, что дилатансия образцов в основном проявлялась вдоль направления минимального прикладываемого напряжения с увеличением максимального главного напряжения. Причем образцы демонстрировали определенную прочность даже после прохождения предела прочности, что авторы связывают с возникновением в них нового равновесного состояния, вызванного релаксацией. На основе результатов истинных трехосных испытаний была разработана нелинейная упруговязкопластическая модель ползучести, которая может описывать ускоренный этап ползучести [47]. В статье предложен метод выбора параметров модели, а также проверена целесообразность ее использования. Зафиксировано, что при значениях максимального главного напряжения меньших предела длительной прочности породы, проявляется только начальная стадия ползучести. При достижении максимальным напряжением предела длительной прочности образец демонстрирует установившийся режим ползучести. Из-за короткого времени нагружения активная стадия ползучести не развивается, однако дальнейшее увеличение максимального главного напряжения приводит к возрастанию скорости ползучести и появлению третьей стадии ползучести,

сопровождающейся разрушением образцов. С увеличением средней компоненты напряжений деформация ползучести, начальная и установившаяся скорости ползучести и время перехода от начального к установившемуся режиму ползучести уменьшаются. Авторами также получено уравнение, описывающее установившийся режим ползучести породы.

В работах данных исследователей проводятся сравнения характера разрушения мраморной породы при условно и истинно трехосном нагружении [48]. Отмечается, что мрамор проявляет определенную пластичность после прохождения предела прочности при истинно трехосном испытании. Отдельный акцент делается на переходе образцов от хрупкого к хрупко-пластическому характеру разрушения при изменении отношения минимальной и средней компоненты главных напряжений. По результатам исследований коллективом предложено разделение характера хрупко-пластического разрушения на три вида в зависимости от различных напряженных состояний. Также указывается, что при низких минимальных главных напряжениях ($\sigma_3=5$ МПа) влияние средней компоненты σ_2 на характер разрушения и ползучести невелико, причем наблюдается только хрупкое разрушение [49]. При этом скорость деформации ползучести возрастает примерно линейно с увеличением разности максимального и минимального главных напряжений. Однако при бóльших σ_3 (20 МПа, 35 МПа) рост средней компоненты σ_2 оказывает существенное влияние на характер разрушения и ползучести: горная порода переходит из пластичного состояния разрушения в хрупкое, а скорость установившейся ползучести приобретает нелинейную тенденцию роста с увеличением разности главных напряжений.

Этим же коллективом позже были проведены испытания по схожей схеме с использованием песчаников и гранитов [50]. В данных исследованиях средняя компонента главных напряжений варьировалась в диапазоне от значения минимальной до максимальной компоненты. Помимо представленного подтверждения о влиянии вида напряженного состояния на

процессы деформирования, предел прочности и характер разрушения, вновь подчеркивается роль средней компоненты напряжений в эволюции трещинообразования и возникновении сильной анизотропии деформаций. При приближении значений средней компоненты главных напряжений (σ_2) к величине максимальной (σ_1) деформация вдоль второй оси становится примерно нулевой, но существенно возрастает деформация по третьей оси. Кроме того, наблюдалась деформация со ступенчатым падением напряжений после прохождения предела прочности, что иллюстрирует наличие многоступенчатой остаточной прочности в процессе разрушения породы. Отдельное внимание в данном исследовании уделялось изучению анизотропии свойств пород, что является важным направлением современных исследований. Исследователями рассматривается анизотропия свойств пород, вызванная напряжениями и возникающая вследствие негидростатического сжатия. Как известно, такая анизотропия отличается от собственной анизотропии породы и должна учитываться при описании поведения пород при неравнокомпонентном нагружении. Во время испытаний по классической схеме ($\sigma_2 = \sigma_3$) коэффициент анизотропной деформации был нулевым. Однако при увеличении модуля средней компоненты напряжений он значительно увеличивался и достигал, к примеру, значения 23.3 для пород-песчаников. Авторы утверждают, что этот результат указывает на то, что промежуточное главное напряжение существенно повлияло на раскрытие трещин и привело к вызванной напряжением анизотропии деформации, которую следует учитывать при разработке механической модели.

Изучение процесса разрушения и деформирования анизотропных горных пород было выполнено данным коллективом в недавней работе [51]. Исследователями проведен ряд истинно трехосных циклических испытаний на нагружение и разгрузку трех типов горных пород (гранита, мрамора и песчаника) для исследования эволюции свойств породы в зависимости от накопленных повреждений. Было обнаружено, что породы обладают значительной анизотропией деформации и направленным расширением:

наибольшие деформации наблюдались в направлении напластования. В силу трансверсальной анизотропии пород были рассчитаны пять упругих констант для каждого цикла нагружения. Эволюция прочностных свойств пород при истинном трехосном сжатии была исследована с использованием линейного трехмерного критерия разрушения. Также изучено влияние промежуточного главного напряжения на эволюцию свойств пород. Кроме того, установлено, что минимальное и среднее напряжения оказывают значительное влияние на относительное изменение упругих констант.

Анизотропная структура может влиять не только на деформационные и прочностные, но и на фильтрационные свойства геоматериалов.

Изучение анизотропии фильтрационных свойств геоматериалов проводится преимущественно на образцах угля в силу более ярко выраженной структурной анизотропией по сравнению с горными породами. В работе Duan M. и др. [52] изучено изменение трехмерной проницаемости при истинно трехосном нагружении. Подтверждено, что анизотропия фильтрационных свойств существенно определяется направлением напластования и напряженным состоянием. Основываясь на результатах истинных трехосных испытаний исследователями построена модель динамической анизотропной (D-A) проницаемости с учетом влияния напластования и напряженного состояния. Было исследовано влияние начального коэффициента анизотропии проницаемости на распределение давления газа в угольном пласте во время добычи газа, что дает возможность разрабатывать теоретические рекомендации по оптимизации схемы расположения ствола скважины для добычи газа в угольной шахте. Обсуждено влияние начального коэффициента анизотропии проницаемости на изменение давления газа и скорость отбора.

Аналогичные исследования проводили Liu Y. и др. с целью изучения поведения газового потока в условиях напряженного состояния коллектора для добычи метана из угольных пластов, подземной добычи угля и связывания CO₂ в глубоких пластах [53]. В работе проведено экспериментальное и теоретическое изучение эволюции анизотропной проницаемости угля при

различных условиях истинного трехосного напряженного состояния. Результаты показали, что проницаемость сильно зависит от изменений напряженного состояния и ориентации плоскостей фильтрации. Этот факт может оказать значительное влияние на расположение газовых дренажных скважин при подземной добыче угля и оптимальную конструкцию скважины для добычи. Проницаемость угля демонстрировала большую анизотропию в вертикальном направлении из-за присутствия минералов в фильтрационных трещинах, расположенных поперек плоскости напластования. Данные по анизотропной проницаемости, измеренные в условиях истинного трехосного напряжения, были хорошо выражены экспоненциальным уравнением, содержащим различные средние значения сжимаемости трещин и значения возникающих напряжений.

Другой подход к проведению истинно трехосных исследований предлагается исследователями из Саудовской Аравии. В [54] представлена истинно трехосная установка университета KAUST, созданная для исследования свойств трещиноватых пород. Нагружающий узел вмещает огромные образцы 50*50*50 см, для создания которых используются предварительно нарезанные блоки пород размерами 2.5*2.5*5 см. Однако максимальное давление, создаваемое узлом, ограничивается значением в 3 МПа. Несколько вспомогательных систем измеряют прикладываемые напряжения и деформации во всех трех основных направлениях, скорости длинноволновых продольных волн, акустическую эмиссию и тепловые изменения. Данная установка не предназначена для изучения процессов разрушения и деформирования пород, однако размеры исследуемых образцов позволяют проводить детальные исследования влияния трещиноватости на другие свойства пород, в том числе изучать распространение продольных волн на крупных масштабах. Между образцом и нагружающими плитами располагается слой резины толщиной 3 мм, позволяющий уменьшить трение и способствующий уменьшению краевых эффектов. Насосная система позволяет исследовать гидро-механо-химические процессы в трещиноватых

породах, например, раскрытие трещин гидроразрыва. В упомянутой работе представлены данные о скорости продольных волн, собранные в условиях изотропного и анизотропного напряжения, которые подтверждают выраженную зависимость скорости волн от напряженного состояния в трещиноватой породе.

С использованием истинно трехосного метода проводились исследования прочностных характеристик Вогезского песчаника (Франция) [55]. Результаты экспериментов Couture С. и Bésuelle Р. подтверждают влияние неравномерного по всем трем осям приложения напряжений на переход от хрупкого к пластичному состоянию для изотропных пористых пород. Помимо среднего уровня напряжений, ключевое влияние на предел прочности и режим разрушения оказывает распределение напряжений внутри породы.

В [56] проводятся исследования влияния средней нагрузки и девиаторной составляющей тензора напряжений на деформационные и фильтрационные характеристики песчаника как при условных, так и истинных трехосных испытаниях. Результаты эксперимента показывают, что изменение вида напряженного состояния оказывает существенное влияние на механические свойства, деформирование и проницаемость породы. Более того, влияние среднего уровня напряжений и девиаторной составляющей тензора напряжений на деформацию и проницаемость различно. Для постоянного девиатора тензора напряжений и переменного среднего уровня напряжений пластическая деформация уменьшалась с уменьшением средней нагрузки, а проницаемость росла. Для постоянной же средней нагрузки и переменной девиаторной составляющей тензора напряжений проницаемость сначала уменьшалась, а затем увеличивалась с ростом компонент девиатора тензора напряжений. Вновь отмечено, что средняя компонента главных напряжений оказывает существенное влияние на деформацию породы. Результаты эксперимента показывают, что проницаемость породы напрямую связана с

объемной и девиаторной составляющей тензора деформаций, причем эта связь выведена авторами в математическом виде.

Таким образом, основное внимание исследователей, проводящих истинно трехосные испытания горных пород, уделяется роли средней компоненты главных напряжений, влиянию начальной трещиноватости горных пород на механические свойства, характеру распространения имеющих в породе трещин при нагружении. Однако физическому моделированию реальных процессов в нефтегазовых пластах, происходящих при проведении различных технологических операций на скважинах уделяется недостаточно внимания. Влияние неравнокомпонентности напряженного состояния на процессы фильтрации и ползучести изучено еще недостаточно, и для фундаментального понимания механических и фильтрационных процессов необходимо исследовать напряженные состояния, максимально приближенные к состояниям, возникающим в пластах в реальных условиях эксплуатации месторождений.

1.5. Классификация горных пород по реакции фильтрационных свойств на изменение напряженного состояния

Наиболее точно физическое моделирование реальных условий в горных породах, как говорилось ранее, возможно только на установках истинно трехосного нагружения. Детальное изучение влияния неравнокомпонентного трехосного напряженного состояния на проницаемость горных пород проводилось в последние годы на установке истинно трехосного нагружения ИПМех РАН [57, 58]. Академиком Климовым Д.М. и исследователями лаборатории геомеханики ИПМех РАН Каревым В.И., Коваленко Ю.Ф. и Устиновым К.Б. были испытаны образцы пород из многих регионов РФ, с разным литологическим составом и глубиной залегания. Данные эксперименты позволили установить, что изменение проницаемости горных пород при неравнокомпонентном нагружении определяется прежде всего уровнем возникающих в породе касательных напряжений. Проведенные

испытания позволили условно разделить горные породы на три категории с точки зрения их реакции на возникающие касательные напряжения. Результаты исследований, полученных в данной работе, представлены в рамках данной классификации.

Породы первой категории. К первой категории относятся породы, деформирующиеся под действием приложенных напряжений чисто упруго. Их проницаемость под действием реально допустимых напряжений практически не меняется – она незначительно уменьшается по мере роста касательных напряжений, но обратимо, т.е. после снятия напряжений она возвращается к начальному значению. Такое поведение горных пород было также зафиксировано в [59]. Авторы данной статьи описывают результаты экспериментальных исследований по изменению фильтрационно-емкостных свойств коллекторов газоконденсатного месторождения при длительном воздействии повышенных напряжений, вызванных снижением пластового давления. По результатам данных экспериментов наблюдается снижение как пористости, так и проницаемости всех образцов по мере возрастания эффективных напряжений и постоянного длительного нагружения. Однако даже после длительной выдержки образца под нагрузкой, проницаемость вернулась практически на исходный уровень, пройдя цикл разгрузки. Аналогичное поведение горных пород было описано в работах как зарубежных, так и отечественных авторов [60-63], что является независимым экспериментальным подтверждением предложенной ранее условной классификации горных пород по воздействию возникающих напряжений на проницаемость.

Породы второй категории. Вторую категорию составляют породы, проницаемость которых может как уменьшаться, так и увеличиваться (причем необратимо) в зависимости от уровня создаваемых в них касательных напряжений и интенсивности вызванных ими неупругих деформаций. В начале упругопластического деформирования породы ведут себя аналогично породам первой категории, т.е. их проницаемость практически не изменяется.

При достижении касательными напряжениями определенной величины начинается интенсивное пластическое деформирование породы и ее ползучесть, во время которых проницаемость породы уменьшается, причем значительно (на десятки процентов и даже в разы). Это падение проницаемости носит необратимый характер, то есть при снятии напряжений она не восстанавливается.

Дальнейшее увеличение касательных напряжений влечет за собой увеличение скорости ползучести таких пород, и, когда деформация достигает критической величины, порода начинает растрескиваться и разрушаться, что сопровождается резким увеличением ее проницаемости даже по сравнению с первоначальным значением. Характер разрушения образцов при этом различен. В более прочных породах разрушение образцов происходит путем образования в них нескольких макротрещин. Менее же прочные породы, такие как, например, средне- и крупнозернистые песчаники, при разрушении практически превращаются в песок (дезинтегрируются).

Породы второй категории испытывались также указанными выше авторами работ [60-63], поведение таких рода пород описывается в обзоре [64], а также детально изучалось в работах исследователей из Института Проблем Механики РАН [65-69].

На основе явления резкого возрастания проницаемости горных пород при неравнокомпонентном нагружении в Институте проблем механики РАН был разработан новый метод повышения дебита нефтяных и газовых скважин – метод направленной разгрузки пласта [70]. На сегодняшний день активно проводятся исследования горных пород с целью совершенствования методики и расширения возможности ее применения [71, 72].

Породы третьей категории. К третьей категории относятся горные породы, проницаемость которых при росте прикладываемых к ним напряжений падает вплоть до полного исчезновения. Это падение проницаемости носит необратимый характер, то есть при снятии напряжений она остается пониженной. Подобные свойства часто наблюдаются в

песчаниках с большим содержанием глины. При возникновении в таких породах касательных напряжений начинается их интенсивное неупругое деформирование, проявляющееся как в пластическом деформировании, так и в деформациях ползучести. Причем даже при значительных деформациях разрушение образцов не наступает, они продолжают деформироваться практически с постоянной скоростью.

Подобный характер поведения проницаемости наблюдался во время испытаний различных пород в вышеупомянутых работах [59-61], а также описывался авторами [73-78] при изучении влияния напряженно-деформированного состояния на фильтрационные и емкостные [79] свойства пород различного типа.

1.6. Выводы по главе 1.

Таким образом, основное внимание исследователей, проводящих истинно трехосные испытания горных пород, уделяется роли средней компоненты главных напряжений, влиянию начальной трещиноватости горных пород на механические свойства, характеру распространения имеющих в породе трещин при нагружении. Однако физическому моделированию реальных процессов в нефтегазовых пластах, происходящих при проведении различных технологических операций на скважинах уделяется недостаточно внимания. Влияние неравнокомпонентности напряженного состояния на процессы фильтрации и ползучести изучено еще недостаточно, и для фундаментального понимания механических и фильтрационных процессов необходимо исследовать напряженные состояния, максимально приближенные к состояниям, возникающим в пластах в реальных условиях эксплуатации месторождений.

Описанная классификация позволяет на основе литологического описания ядра качественно прогнозировать характер изменения проницаемости в призабойной зоне пласта при изменении напряжений и оценивать целесообразность проведения тех или иных технологических операций. Более

точную, количественную, оценку изменения проницаемости в окрестности скважины при определенном воздействии на пласт может дать детальное изучение свойств пород, слагающих продуктивный пласт конкретного месторождения. Корректность описанной классификации горных пород подтверждается работами как зарубежных, так и отечественных авторов. Данная классификация позволяет сделать вывод о том, что возникающие в призабойной зоне пласта напряжения могут оказывать существенное влияние на фильтрационные свойства пласта и, как следствие, на продуктивность скважин. Причем влияние может быть как положительным, так и отрицательным.

Глава 2. Напряженное состояние в окрестности скважины

Одним из основных факторов, влияющих на фильтрационные свойства пласта, а значит и на дебит нефтяных скважин, являются действующие в окрестности скважин напряжения. Величина этих напряжений зависит как от деформационных свойств породы, так и от давления нефти на забое скважины [2].

При бурении давление в скважине уменьшается, и это существенно меняет напряженное состояние в окрестности скважины - оно становится неравномерным, и в породе возникают касательные напряжения. В дальнейшем, в ходе освоения и эксплуатации скважин давление на ее забое дополнительно снижается, чтобы обеспечить приток нефти или газа [69]. Это приводит к росту действующих в ее окрестности касательных напряжений и, при определенных условиях, к значительному деформированию и даже разрушению породы.

Результатом этих процессов может стать как необратимое снижение проницаемости породы в прискважинной зоне пласта (ПЗП) и уменьшение дебита скважин, так и растрескивание, и разрушение породы, приводящее к увеличению проницаемости в ПЗП и росту дебита скважин.

Величина возникающих в окрестности скважины напряжений и протяженность зоны их существенного влияния зависят от целого ряда факторов: горного давления, давления на забое скважины, конструкции забоя скважины и др. Кроме того, на величину напряжений в окрестности скважины могут оказывать влияние фильтрационные течения в пласте, причем степень этого влияния для нефти и газа будет разной.

Рассмотрение влияния напряженно-деформированного состояния на процессы фильтрации в окрестности скважины является одним из предметов настоящей работы. И хотя влияние фильтрации на напряженное состояние можно рассчитать теоретически, невозможно заранее рассчитать, к каким изменениям фильтрационных свойств приводит изменение напряжений в скважине, так как это зависит от свойств самой породы.

Далее выполнен теоретический анализ с применением методов теории упругости распределения напряжений в окрестности скважин для разных начальных условий в пласте, а также различных конструкций забоя скважины.

2.1. Распределение напряжений на стенках скважины при отсутствии бокового распора

В исходном состоянии пласты нефтяных и газовых месторождений находятся в состоянии сжатия горным давлением. При этом вертикальное давление равно весу вышележащих горных пород, т.е. γH , где $\gamma = \rho g$ – средний удельный вес горных пород, ρ – средняя плотность пород, а H – глубина залегания пласта. Боковое давление может отличаться от вертикального давления либо быть равным ему. Но если порода достаточно пластична, то за геологические времена все напряжения в пласте должны были выровняться. И тогда считают, что горное давление в ненарушенном пласте одинаково во всех направлениях, т.е. каждый элемент породы равномерно сжат со всех сторон.

Рассмотрим распределение напряжений в окрестности вертикальной цилиндрической скважины радиуса R_c , пробуренной на глубину H . Пласт считаем изотропным и однородным. В случае равномерного начального

сжатия горным давлением, распределение напряжений в горизонтальной и вертикальной скважинах идентичны. Направим ось Z по оси скважины, рис. 4.

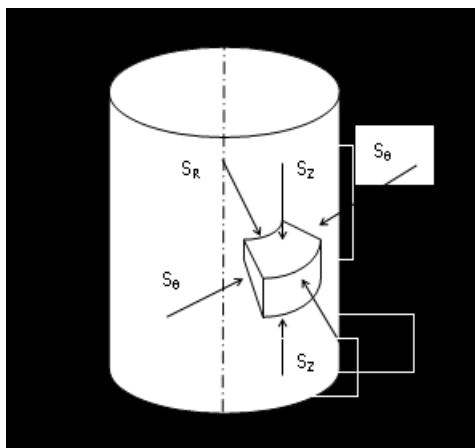


Рис. 4. Напряжения, действующие в окрестности вертикальной скважины

Полные напряжения $\sigma_r, \sigma_\theta, \sigma_z$, действующие в пласте, распределены между напряжениями, передающимися через грунтовый скелет (эффективными напряжениями) S_r, S_θ, S_z , и давлением нефти P таким образом, что

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

где δ — доля поверхности зерна, занятая площадками контакта, а сжимающие напряжения, как это принято в теории упругости, считаются отрицательными [80]. Значения δ для большинства горных пород варьируются от 0 до 0.2. Для простоты будем считать $\delta = 0$. Для некоторых пород в данной работе значение δ будет рассматриваться 0.2.

Напряженное состояние пласта в исходном состоянии будем полагать состоянием равномерного всестороннего сжатия горным давлением $q = -\gamma H$, где γ - средняя плотность вышележащих пород, т.е

$$\sigma_r^0 = \sigma_\theta^0 = \sigma_z^0 = q \quad (2)$$

и, соответственно,

$$S_r = q + P_0, \quad S_\theta = q + P_0, \quad S_z = q + P_0 \quad (3)$$

где P_0 – пластовое давление нефти (газа).

При бурении скважины в ее окрестности происходит перераспределение напряжений. В породе возникают максимальные касательные напряжения $\tau = 1/2(\sigma_r - \sigma_\theta)$, величина которых определяется давлением в скважине и скоростью фильтрационного потока нефти (газа) в пласте.

Так как мощность пласта во много раз больше диаметра скважины, то можно считать, что пласт при пробуривании скважины испытывает плоскую деформацию, а скважину можно рассматривать как толстостенный цилиндр. Решение такой задачи было предложено французским механиком Ламе. Рассматривая равновесие элементарной трапеции ABCD в сечении цилиндра (рис. 5), соответствующей центральному углу $d\theta$, для окружных σ_θ и радиальных σ_r напряжений можем записать уравнение равновесия в проекции на нормаль к цилиндрической поверхности:

$$\sum F_n = 0 \Rightarrow -\sigma_r \cdot r \cdot d\theta + (\sigma_r + d\sigma_r) (r + dr) \cdot d\theta - 2 \cdot \sigma_\theta dr \cdot \sin d\theta/2 = 0.$$

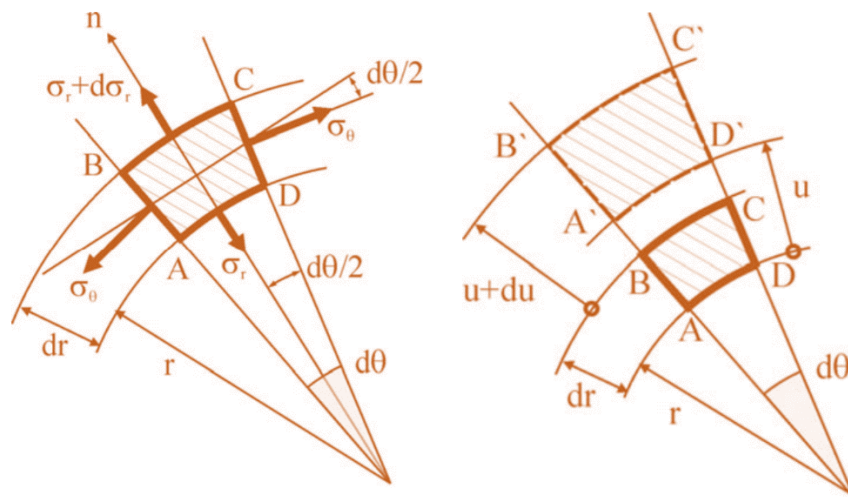


Рис. 5. Рассматриваемый элемент сечения

Пренебрегая бесконечно малыми величинами высоких порядков и учитывая малость угла получим следующее уравнение равновесия:

$$\frac{d\sigma_r}{dr} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} = 0 \quad (4)$$

Рассматривая относительные радиальную ε_r и окружную ε_θ деформации данного элемента ABCD (рис. 5), получим:

$$\varepsilon_r = \frac{A'B' - AB}{AB} = \frac{BB' - AA'}{AB} = \frac{(u + du) - u}{dr} \Rightarrow \varepsilon_r = \frac{du}{dr}. \quad (5)$$

$$\varepsilon_\theta = \frac{A'D' - AD}{AD} = \frac{(r + u) \cdot d\theta - r \cdot d\theta}{r \cdot d\theta} \Rightarrow \varepsilon_\theta = \frac{u}{r}.$$

где u и r – перемещения.

Записываем обобщенный закон Гука для плоского напряженного состояния:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_r &= \frac{E}{1-\mu^2} \cdot (\varepsilon_r + \mu \cdot \varepsilon_\theta); \\ \sigma_\theta &= \frac{E}{1-\mu^2} \cdot (\varepsilon_\theta + \mu \cdot \varepsilon_r). \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

где E и ν - модуль Юнга и коэффициент Пуассона соответственно.

Подставим выражения для деформаций в закон Гука, после чего полученные выражения используем в уравнении состояния. Получим линейное дифференциальное уравнение 2-го порядка с переменными коэффициентами

$$\frac{d^2u}{dr^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{du}{dr} - \frac{u}{r^2} = 0. \quad (7)$$

Его общее решение записывается в виде:

$$u = C_1 \cdot r + \frac{C_2}{r}. \quad (8)$$

Подставив данное решение в измененный закон Гука, получим напряжения в точках на расстоянии r от оси цилиндра:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_r &= \frac{E}{1-\mu^2} \cdot \left[C_1 \cdot (1+\mu) - C_2 \cdot \frac{1-\mu}{r^2} \right]; \\ \sigma_\theta &= \frac{E}{1-\mu^2} \cdot \left[C_1 \cdot (1+\mu) + C_2 \cdot \frac{1-\mu}{r^2} \right]. \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

А введя новые произвольные константы C и D , получим формулы в виде:

$$\begin{aligned}\sigma_r &= C - \frac{B}{r^2} \\ \sigma_\theta &= C + \frac{D}{r^2}\end{aligned}\tag{10}$$

Для нахождения констант используем граничные условия для скважины:

1. На стенке скважины $r = R_c$ радиальное нормальное напряжение равно забойному давлению в скважине
2. Вдали от скважины $r \rightarrow \infty$ радиальное нормальное напряжение равно горному давлению (это справедливо, если коэффициент бокового распора $\alpha = 1$)

Учитывая граничные условия и выражения (3) для напряжений в пласте, получим итоговые уравнения уже в терминах эффективных напряжений, действующих на грунтовый скелет породы:

$$\begin{aligned}S_r &= -(q + p_c) \left(\frac{r_c^2}{r^2} \right) + q + p_c \\ S_\theta &= (q + p_c) \left(\frac{r_c^2}{r^2} \right) + q + p_c\end{aligned}\tag{11}$$

$$S_z = q + p_c$$

где P_c – давление в скважине. Вертикальная компонента напряжений не изменяется в силу симметрии задачи и следует из выражения для веса вышележащих пород.

Соответственно, максимальные касательные напряжения $\tau = 1/2(S_r - S_\theta)$ равны

$$\tau = -(q + P_c)(R_c / r)^2\tag{12}$$

Отметим, что напряжения S_i – отрицательны, а касательное напряжение τ – положительно.

Объемное сжатие в каждой точке пласта при его упругом деформировании сохраняется, т.е.

$$1/3(S_r + S_\theta + S_z) = q + P_c\tag{13}$$

И на контуре скважины при $r = R_c$ из решения задачи Ламе:

$$S_r = 0, \quad S_\theta = 2(q + P_c), \quad S_z = q + P_c \quad (14)$$

Величина депрессии в скважине Δp_c связана с напряжением S_θ , действующим на ее стенке, соотношением:

$$\Delta p_c = q + p_0 - \frac{S_\theta}{2} \quad (15)$$

где p_0 – пластовое давление.

А максимальные касательные напряжения:

$$\tau = -(q + P_c) \quad (16)$$

При достаточной разности между величиной горного давления и давлением в скважине (равным в рассматриваемом случае давлению в пласте) касательные напряжения в некоторой области в окрестности скважины возрастают настолько, что под их действием порода в этой зоне начинает растрескиваться и разрушаться, и ее поведение перестает быть упругим.

2.2. Распределение напряжений на стенках скважины при наличии бокового распора

Если боковое горное давление не равно вертикальному, то грунтовый скелет до пробуривания скважины нагружен неравномерными сжимающими напряжениями. Отношение величин горизонтальных составляющих горного давления к вертикальной составляющей называется боковым распором [81].

В вертикальном направлении на грунтовый скелет действует напряжение $q_v = (\gamma H - P_0)$, а в горизонтальном $q_r = \alpha(\gamma H - P_0)$, где α – коэффициент бокового распора, $\alpha < 1$.

Наличие бокового распора приводит к тому, что после пробуривания скважины напряжения, действующие на ее контуре, будут отличны от тех, что действуют на контуре скважины при равномерном сжатии. А значит и изменится программа нагружения образцов, моделирующая понижение давление в скважине.

На рис. 6 (а) представлено вертикальное сечение горизонтальной скважины. Вдали от скважины в вертикальном направлении порода нагружена

вертикальным горным давлением $q_B=(\gamma H-P_0)$, а в горизонтальном направлении – боковым горным давлением $q_G=\alpha q_B$, $\alpha < 1$. Внутри скважины давление равно P_c .

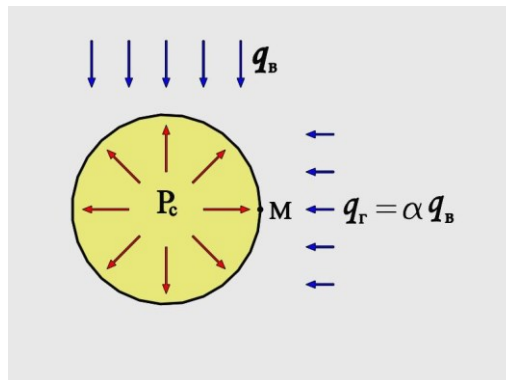


Рис. 6 (а). Распределение напряжений в вертикальном сечении горизонтальной скважины

Рассматриваемую задачу можно представить, как суперпозицию двух задач:

1. Всестороннее равномерное сжатие напряжениями $q_G=\alpha(\gamma h-P_0)$. Внутри скважины давление равно P_c , рис. 6 (б) (Задача Ламе).

2. Одноосное сжатие скважины в вертикальном направлении напряжением $(q_B-q_G)=(1-\alpha)q_B$. Внутри отверстия давление отсутствует, рис. 6 (в). Эта задача известна как задача Кирша [82].

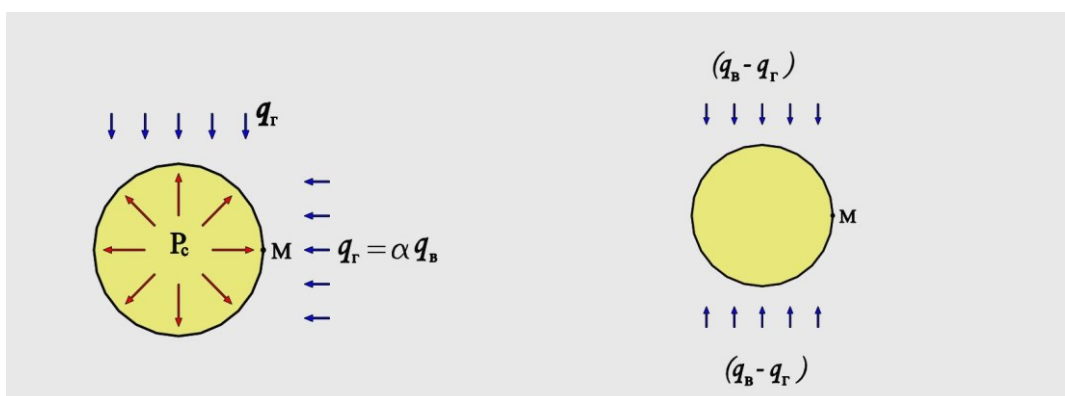


Рис. 6 (б, в). Рассматриваемое напряжение для задач Ламе и Кирша

Тогда суммарные напряжения по контуру скважины, будут равны сумме напряжений для каждой из указанных задач:

$$\begin{aligned}
S_{\theta} &= \frac{(q + p_c)}{2} (\alpha + 1) \left(1 + \frac{r_c^2}{r^2}\right) - \frac{(q + p_c)}{2} (\alpha - 1) \left(1 + \frac{3r_c^4}{r^4}\right) \cos 2\theta \\
S_r &= \frac{(q + p_c)}{2} (\alpha + 1) \left(1 - \frac{r_c^2}{r^2}\right) - \frac{(q + p_c)}{2} (\alpha - 1) \left(1 + \frac{3r_c^4}{r^4} - \frac{4r_c^2}{r^2}\right) \cos 2\theta \quad (17) \\
S_z &= \alpha(q + p_c)
\end{aligned}$$

где θ – угол от горизонтали до рассматриваемой точки, α – величина бокового распора.

Или, рассматривая задачи отдельно, для первой задачи из решения задачи Ламе следует, что после пробуривания скважины напряжения в грунтовом скелете по контуру скважины будут одинаковыми и равны:

$$S^1_{\theta} = 2q_r, \quad S^1_R = 0, \quad S^1_Z = q_r \quad (18)$$

Для второй задачи из решения задачи Кирша вытекает, что кольцевые напряжения, и, следовательно, касательные напряжения достигают максимума в точке М (и в противоположной ей точке). В точке М напряжения равны:

$$S^2_{\theta} = 3(q_B - q_r), \quad S^2_R = 0, \quad S^2_Z = 0 \quad (19)$$

Тогда суммарные напряжения в точке М (учитывая, что $q_r = \alpha q_B$)

$$S_{\theta} = (3 - \alpha)q_B, \quad S_R = 0, \quad S_Z = \alpha q_B \quad (20)$$

При проведении испытаний пород Приразломного месторождения коэффициент бокового распора принимался равным $\alpha=0,4$. В этом случае для напряжений в точке М имеем

$$S_{\theta} = 2,6 q_B, \quad S_R = 0, \quad S_Z = 0,4q_B \quad (21)$$

2.3. Распределение напряжений в окрестности кончика перфорационного отверстия в обсаженной скважине

При строительстве скважины в определенных случаях производится ее обсадка. В случае обсаженного ствола гидродинамическая связь с коллектором осуществляется путем создания перфорационных отверстий в стенках обсадной колонны.

Хорошей аппроксимацией подобного случая является модель полусферического кончика перфорационного отверстия. Для определения напряжений, действующих в окрестности конца перфорации, можно воспользоваться аналогичным вышеописанному решению задачи Ламе для сферической полости, заполненной жидкостью или газом под давлением и нагруженной вдали всесторонней сжимающей нагрузкой [83].

Тогда по аналогии с вышесказанным распределение эффективных напряжений, действующих на грунтовый скелет горной породы в сферических координатах, дается выражениями:

$$\begin{aligned} S_r &= -(q + p_c) \left(\frac{r_c^3}{r^3} \right) + q + p_c \\ S_\theta &= \frac{1}{2} (q + p_c) \left(\frac{r_c^3}{r^3} \right) + q + p_c \\ S_\varphi &= \frac{1}{2} (q + p_c) \left(\frac{r_c^3}{r^3} \right) + q + p_c \end{aligned} \quad (22)$$

где S_θ , S_φ , S_R – компоненты напряжения в радиальном и двух окружных направлениях, r_c – радиус перфорационного отверстия, δ – доля поверхности зерна, занятая площадками контакта.

Тогда на стенках кончика перфорационного отверстия с учетом $\delta = 0$ имеем:

$$S_r = 0, S_\varphi = S_\theta = 3/2(|q| - p_c) \quad (23)$$

Аналогично, объемное сжатие в каждой точке пласта при его упругом деформировании сохраняется.

2.4. Выводы по главе 2

Таким образом, в главе 2 проведен теоретический анализ распределения напряжений в окрестности скважины для различных условий и конструкций забоя, физическое моделирование которых будет проведено далее. Рассмотрены три случая: распределение напряжений в окрестности открытого ствола скважины с учетом равномерных исходных напряжений в пласте; распределение напряжений в окрестности открытого ствола скважины с учетом наличия бокового распора (в данной работе значение α принято 0.4); распределение напряжений в окрестности кончика перфорационного отверстия в обсаженной скважине. Полученные расчетные значения напряжений будут использованы далее для составления программ нагружения каждого испытанного образца горных пород.

Глава 3. Объекты исследования и методика проведения испытаний

3.1. Объекты исследования

Объектами исследования в данной работе являются породы продуктивных пластов месторождений Кириновское, Приразломное, а также ачимовских отложений Уренгойского газоконденсатного месторождения.

Приразломное нефтяное месторождение расположено в юго-восточной части Печорского моря, в 55 км к северо-западу от прибрежного поселка Варандей, в 320 км от речного порта Нарьян-Мар и в 980 км от морского порта Мурманск. Глубина моря в районе месторождения составляет около 20 м. Проектом запланировано бурение 36 эксплуатационных скважин (из них 19 добывающих) [84]. Добыча ведется с морской стационарной платформы (рис. 7). Начало добычи на месторождении - 2013 г.

В рамках данной работы были отобраны 18 образцов пород Приразломного месторождения. Исследования заключались в физическом моделировании процессов деформирования и разрушения породы в окрестности скважины

при ее эксплуатации, изучении влияния действующих в окрестности скважины напряжений на фильтрационные свойства пород.

В работе рассмотрены два случая начального напряженного состояния пласта для условий Приразломного месторождения:

1. В исходном состоянии порода находится в состоянии равномерного всестороннего сжатия горным давлением на данной глубине (боковой распор отсутствует).
2. Величина бокового горного давления составляет 40% от величины вертикального горного давления, т.е. коэффициент бокового распора равен 0,4.



Рис. 7. Нефтедобывающая платформа Приразломное

Кириновское газоконденсатное месторождение — расположенное в пределах Кириновского блока проекта «Сахалин-3» на шельфе о. Сахалин месторождение, открытое в 1992 году. Введено в опытную эксплуатацию в октябре 2013 года. Расположено в 28 км от берега, к востоку от о. Сахалин. Глубина моря в районе Кириновского месторождения составляет 91 м.

Всего было исследовано 9 образцов пород Киринского месторождения. Испытания заключались в изучении фильтрационных и деформационных свойств пород, а также их зависимости от реально возникающих на стенках необсаженной скважины напряжений при отсутствии бокового распора. Также изучалась эволюция проницаемости образцов во времени при неупругом деформировании (ползучести).



Рис. 8. Киринское шельфовое месторождение

Уренгойское месторождение (рис. 9) находится в Западно-Сибирском бассейне и входит в тройку крупнейших в мире месторождений на суше. Большая часть месторождения расположена за пределами полярного круга. Перспективным направлением развития Уренгойского месторождения является разработка труднодоступных ачимовских отложений. Ачимовские отложения залегают на глубинах около 4000 м и имеют сложное геологическое строение. В 2008 и 2009 года начались этапы эксплуатации первых двух участков ачимовских отложений. В настоящее время готовятся к разработке еще три участка. Основные нюансы, с которыми пришлось столкнуться при разработке ачимовских отложений – низкие фильтрационно-емкостные свойства и плохая сообщаемость коллектора.



Рис. 9. Добывающая платформа Уренгойского ГКМ

Запасы ачимовских отложений по категории С1 на месторождениях ООО «Газпром добыча Уренгой» составляют более 1 трлн куб. м газа и 400 млн тонн конденсата.

В рамках работы проведена серия экспериментов по физическому моделированию механических и фильтрационных процессов в продуктивных пластах ачимовских отложений УГКМ при реализации процесса понижения давления в скважине.

Ачимовские отложения Уренгойского ГКМ при глубине залегания порядка 3700 м, где горное давление составляет величину порядка 92 МПа, характеризуются аномально высоким пластовым давлением – от 57 до 64 МПа. Ачимовские отложения характеризуются низкой проницаемостью – до нескольких десятков мД. Эти факторы являются причиной, затрудняющей использование традиционных технологий для разработки ачимовских отложений [85]. Однако с точки зрения применения технологий, основанных на геомеханическом подходе, данные условия являются преимуществом.

Объектом исследования являются породы ачимовских отложений трех скважин Уренгойского газоконденсатного месторождения, из которых были

изготовлены кубические образцы с ребром 40 мм. Маркировка осуществлялась следующим образом: ось 1 образца совпадала с осью керна, ориентация осей 2 и 3 была произвольной. Четыре боковые грани образца покрывались непроницаемой тонкой пленкой, две грани оставались свободными для пропускания через образец воздуха и измерения проницаемости. Всего был испытан 21 образец.

Во время испытаний к граням кубических образцов прикладывались напряжения, соответствующие реально возникающим напряженным состояниям, возникающим на стенках скважин при создании депрессии в скважине. В ходе нагружения записывались деформации образцов по каждой оси, а также измерялась проницаемость породы в направлении притока флюида к скважине: определялись зависимости проницаемости породы от изменяющегося трехмерного напряженного состояния. Нагружение образцов ачимовских отложений выполнялось по двум программам нагружения, соответствующих случаю необсаженной скважины, а также случаю перфорационного отверстия в обсаженной скважине. Более детально методика проведения экспериментов описана в следующих разделах.

3.2. Экспериментальное оборудование

ИСТНН – это уникальная испытательная система трехосного неравнокомпонентного нагружения, созданная в Институте проблем механики РАН (рис. 10), и предназначенная для изучения деформационных, прочностных и фильтрационных характеристик пород нефтегазовых, рудных и угольных месторождений. Отличительной особенностью установки ИСТНН является возможность нагружать образцы породы, представляющие собой кубики с гранью 40 или 50 мм, независимо по трем осям [86]. Это дает возможность воссоздавать в ходе опытов любые напряженные состояния, возникающие в призабойной зоне пласта при бурении скважины, ее освоении и эксплуатации, и изучать их влияние на фильтрационные свойства породы [87].

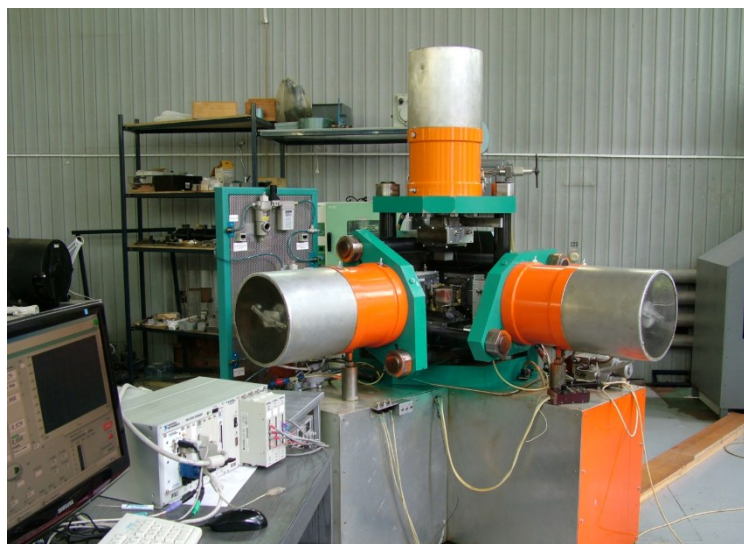


Рис. 10. Испытательная система трехосного независимого нагружения (ИСТНН)

Система представляет собой электрогидравлическую испытательную машину с системой автоматизированного управления (САУ). Данная установка позволяет регулировать нагружение как по силе, так и по перемещениям. Это дает возможность проводить испытания вплоть до полного разрушения образца. При этом в процессе всего испытания в автоматическом режиме измеряется проницаемость образца. Силы измеряются тензометрическими датчиками, перемещения - индуктивными, проницаемость определяется по показаниям расходомеров [87].

ИСТНН относится к классу электрогидравлических испытательных машин с автоматизированной системой управления. Испытательная система представляет собой комплекс, включающий силовой агрегат, маслonaсосную станцию (МНС) с пультом управления, блок автоматического управления, измерительно-информационную систему. Силовой агрегат представляет собой конструкцию из трех силовых рам, установленных на специальной подставке. Оси силовых рам взаимно перпендикулярны и имеют общую точку пересечения. На верхней траверсе установлен силовой двухштоковый гидроцилиндр, на штоке гидроцилиндра установлен динамометр для измерения усилия, развиваемого гидроцилиндром. Наибольшее давление рабочей жидкости в гидроцилиндре составляет 200 МПа, при этом

гидроцилиндр развивает усилие 500 кН. Чтобы обеспечить возможность перемещения плит в плоскости перпендикулярной оси силовой рамы с малой силой трения при довольно высокой нагрузке нажимная и опорная плиты установлены на плоских роликовых подшипниках прецизионного исполнения. Три пары плит образуют нагружающий узел, в котором нагрузки прикладываются по всей поверхности призматического образца. Нагружающие и опорные плиты снабжены комплектами сменных наконечников, позволяющих проводить испытания образцов в форме куба с ребром 40 мм и 50 мм. На наконечниках установлены элементы датчика перемещения. Рабочий ход каждой из нажимных плит составляет 12 мм, холостой ход (отвод и подвод нажимной плиты) – 130мм.

В исходном рабочем состоянии три пары нажимных плит образуют узел нагружения, а наконечники нажимных плит – рабочую камеру, в которую помещается испытуемый образец горной породы. Рабочая камера, соответственно образец, имеет форму куба. Особенностью конструкции узла нагружения ИСТНН является то, что рабочая поверхность наконечника нажимной плиты (поверхность, контактирующая с образцом) имеет размер несколько больший, чем размер грани образца, и в рабочем положении наконечники нажимных плит установлены с заходом относительно друг друга. Таким образом, активная нажимная плита, перемещаясь в осевом направлении и деформируя образец, сдвигает две соседние нажимные плиты (одну активную и одну опорную) в том же направлении.

Такая конструкция узла нагружения является отличительной особенностью ИСТНН. По сравнению с другими испытательными средствами на сложное нагружение с использованием жестких нажимных плит она обеспечивает равномерное приложение нагрузок по всей площади образца в течение всего процесса деформирования, включая стадию разрушения, что существенно упрощает анализ результатов экспериментов, так как отпадает необходимость учета возможности концентрации напряжений вблизи ребра образца

Гидропривод ИСТНН (МНС) предназначен для подачи рабочей жидкости к агрегатам управления силовыми гидроцилиндрами. Гидропривод обеспечивает максимальную скорость перемещения штока силового гидроцилиндра равную 3 мм/сек. Рабочее давление масла может устанавливаться в интервале от 7 до 20 МПа.

В ИСТНН применена четырехканальная система управления с электрогидравлическими преобразователями (сервоклапанами). Три канала управляющей системы использованы для управления силовыми гидроцилиндрами, один - резервный. Динамометры, установленные в штоках силовых гидроцилиндров, либо датчики перемещения используются в качестве датчиков обратной связи в системе управления. Возможность управлять процессом нагружения либо по усилиям, либо по перемещениям по каждому из трех каналов позволяет реализовать практически любую траекторию нагружения (деформирования) образца, включая процесс разрушения.

Измерительно-информационная система ИСТНН включает тензометрическую систему измерения напряжений и деформаций (усилия на штоке гидроцилиндра и перемещения граней) в образце. Сигналы с датчиков перемещений и усилий поступали на тензометрические усилители, после чего преобразовались в код и далее записывались в память ЭВМ.

Измерение проницаемости осуществляется пропусканием сжатого воздуха через образец в процессе нагружения. Для этого в одной паре плит имеются каналы для подачи сжатого газа в образец и отвода профильтрованного через образец газа, а также перфорированные венты для равномерного подвода и отвода газа по поверхности грани образца.

Образец для измерения проницаемости по одной из осей в условиях сложного напряженного состояния всего образца подготавливается следующим образом. В соответствии с необходимостью выбирается та ось образца, вдоль которой будет фильтроваться газ. На четыре грани образца, параллельные оси фильтрации, наносится оболочка из полимеризующегося

при комнатной температуре раствора на латексной основе или водном растворе поливинилацетата, рис. 11.

В течение нескольких часов латексная оболочка высушивается при комнатной температуре. Созданная на боковых гранях таким образом оболочка делается достаточно тонкой, не более 50 мкм, чтобы не вносить существенной погрешности в результаты измерения деформации образца. И одновременно такая оболочка обладает достаточной прочностью и эластичностью, чтобы обеспечить герметичность образца вплоть до образования магистральных трещин.

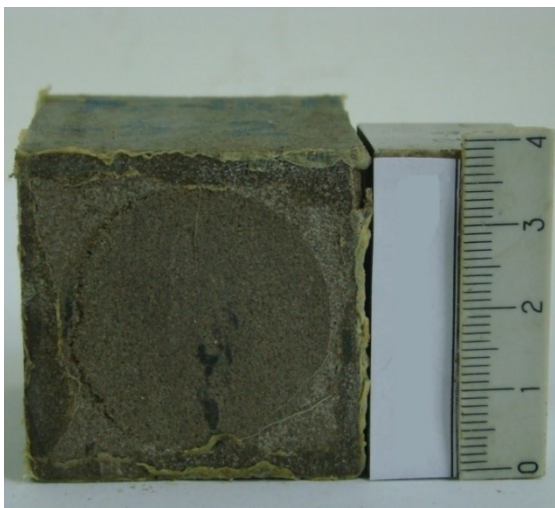


Рис. 11. Образец с латексной оболочкой

Непосредственно для измерения проницаемости в ходе эксперимента используется система автоматического измерения проницаемости (САИП), позволяющая в процессе испытания образца на установке ИСТНН непрерывно вести наблюдение за изменением его проницаемости. Измерение проницаемости в некотором количестве испытаний ачимовских отложений было проведено аналогично описанному далее методу, но в дискретном формате в силу технических причин.

САИП оборудована двумя расходомерами, позволяющими производить измерения в широком диапазоне величин: от 0,5 мл/мин до 5 л/мин. А также двумя цифровыми манометрами, измеряющими давление на входе и на выходе из образца. Сигналы с расходомеров и манометров передаются в контроллер

САУ, обрабатываются, выводятся на экран монитора и записываются в память компьютера.

Предварительно устанавливается интервал значений давления P на входе в образец, для которого зависимость расхода воздуха Q от разности квадратов давления на входе и на выходе из образца $Q = Q(p^2 - p_a^2)$ имеет линейный характер (на выходе всегда атмосферное давление p_a). Давление воздуха при испытаниях образца устанавливается в этом интервале, где течение газа описывается законом Дарси. Тогда коэффициент проницаемости определяется формулой

$$k = \frac{2lQ\mu}{F \cdot p_a (p'^2 - 1)} \quad (24)$$

где μ – динамическая вязкость воздуха, l – длина ребра образца, F – площадь поперечного сечения образца, а $p' = p/p_a$.

В общем случае μ будет зависеть от содержания в газе паров воды, паров технических масел и температуры. Так как контроль концентрации паров воды и паров масла в газе сопряжён со значительными материальными затратами и техническими сложностями, САИП оснащена фильтрами – осушителями, которые удаляют пары воды и масла из фильтрующего газа. Для определения величины μ при контролируемой температуре использовались табличные данные. Учитывая то, что ИСТНН располагается в лабораторном помещении с достаточно стабильной температурой на протяжении всего процесса испытания одного образца, подвод газа к ИСТНН осуществляется по медным трубам сравнительно большой протяжённости и объёмный расход газа не превышает 20 л/мин, можно принять с достаточной степенью точности, что температура газа постоянна и равна температуре воздуха в помещении.

3.3. Подготовка кернового материала

Методика проводимых исследований включает в себя работу с керновым материалом, полученным с исследуемых месторождений, а именно: подготовку образцов кубической формы, их маркировку и определение

степени анизотропии упругих свойств исследуемых образцов. После этого создается программа нагружения исследуемых пород.

Для проведения испытаний на испытательном стенде ИСТНН используется керновый материал из скважин исследуемых месторождений.

Из него изготавливаются кубические образцы с гранью 40 мм. Образцы вырезаются на специальном обрабатывающем комплексе, состоящем из двух станков – камнерезного и шлифовального (рис. 12).

Образцы маркируются следующим образом: ось 1 образца совпадает с осью керна, ориентация осей 2 и 3 в горизонтальной плоскости остается произвольной. После осуществленной обработки непараллельность граней образца и отклонение от перпендикулярности не превышает 20 мкм.



Рис. 12. Обрабатывающий комплекс для изготовления образцов

3.4. Ультразвуковое прозвучивание образцов с целью определения степени анизотропии упругих свойств пород

Для моделирования на установке ИСТНН деформационных и фильтрационных процессов, происходящих в окрестности горизонтальной скважины необходимо знать, какие напряжения следует прикладывать к граням образца, то есть составить программу нагружения. Величина напряжений, действующих в окрестности наклонной скважины, зависит от наличия анизотропии упругих свойств. Вокруг вертикальной скважины в трансверсально-изотропной среде распределение напряжений такое же, как и в изотропной среде. Однако при наклоне скважины напряжения по контуру скважины уже не являются постоянными, как в случае изотропной среды, а

меняются от точки к точке, а их величина зависит от модулей упругости породы и угла наклона скважины. В общем случае определение напряжений, действующих в окрестности наклонной скважины, пробуренной в трансверсально-изотропной породе, представляет собой сложную задачу и требует определения упругих модулей породы.

Степень анизотропии упругих свойств образцов определялась с помощью измерения скоростей распространения продольных упругих волн. Как известно, скорость пропорциональна квадратному корню из модуля упругости.

$$c \sim \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (25)$$

где E - модуль упругости породы, ρ - ее плотность.

Измерения проводились на специальной установке (рис. 13). 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.

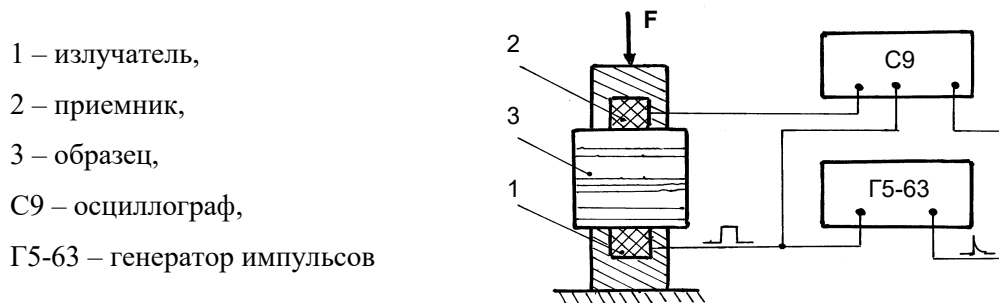


Рис. 13. Схема установки для измерения скоростей продольных волн в образце.

Установка представляет собой два датчика-генератора ультразвуковых волн, между которыми устанавливался исследуемый образец. Для визуализации результатов измерений электрические сигналы с обоих датчиков выводятся на осциллограф. Между датчиками-генераторами пропускались

волны длиной 5 мм, частотой 1,25 МГц и определялось время прохождения волн через образец и затухание амплитуды колебаний.

В таблице 1 в качестве демонстрации приведены результаты измерений скоростей продольных волн по трем осям для нескольких образцов каждого из исследуемых месторождений.

Таблица 1
Данные по ультразвуковому прозвучиванию образцов

№№ п/п	№ оси	Скорость, м/с
Обр. Приразломн. №П1	1	4098,4
	2	4098,4
	3	4166,7
Обр. Приразломн. №П4	1	4000
	2	4000
	3	4000
Обр. Кирин. №К11	1	3508,8
	2	3573,6
	3	3571,4
Обр. Кирин. №К8	1	3571,4
	2	3508,8
	3	3508,8
Обр. Кирин. №К3	1	3603
	2	3597,1
	3	3610,2
Обр. Ач. № А-1	1	2631
	2	2703
	3	2703
Обр. Ач. № А-2	1	2632
	2	2941
	3	2941

Из таблицы 1 видно, что скорости распространения продольных волн по трем осям в представленных образцах керна практически одинаковы, что свидетельствует о том, что упругие свойства пород близки к изотропным. Аналогичные результаты были получены для большинства имеющихся образцов пород обоих месторождений. На всех образцах ачимовских отложений скорости продольных волн вдоль оси керна были незначительно меньше, чем вдоль двух осей в горизонтальной плоскости. Это является

свидетельством того, что исследуемые породы Уренгойского ГКИ являются трансверсально изотропными с низкой степенью анизотропии. Этот факт учитывался при составлении программ нагружения для моделей изотропной среды.

3.5. Программы нагружения образцов

Для моделирования на установке ИСТНН деформационных и фильтрационных процессов, происходящих в окрестности горизонтальной скважины необходимо знать, какие напряжения следует прикладывать к граням образца, то есть составить программу нагружения. Величина напряжений, действующих в окрестности наклонной скважины, зависит от наличия анизотропии упругих свойств. Вокруг вертикальной скважины в трансверсально-изотропной среде распределение напряжений такое же, как и в изотропной среде.

На основе теоретического исследования напряжений в окрестности скважины для разных условий и геометрий забоя были составлены программы нагружения, отвечающие каждому описанному в главе 2 случаю. При составлении программ была принята изотропная модель среды в силу низкой степени анизотропии упругих свойств пород (см. раздел 3.4).

3.5.1. Программа нагружения образца, отвечающая напряжениям, действующим на контуре необсаженной скважины при отсутствии бокового распора

Ниже приводится программа нагружения образца, отвечающая напряжениям, действующим на контуре необсаженной скважины при равномерном всестороннем изначальном горном давлении (рис. 14).

Здесь S_i – напряжения, прикладываемые в машине к граням образца. Эти напряжения соответствуют эффективным главным напряжениям, действующим на грунтовый скелет в окрестности скважины: $S_3 - S_\theta$ (тангенциальное); $S_2 - S_R$ (радиальное); $S_1 - S_Z$ (вертикальное).

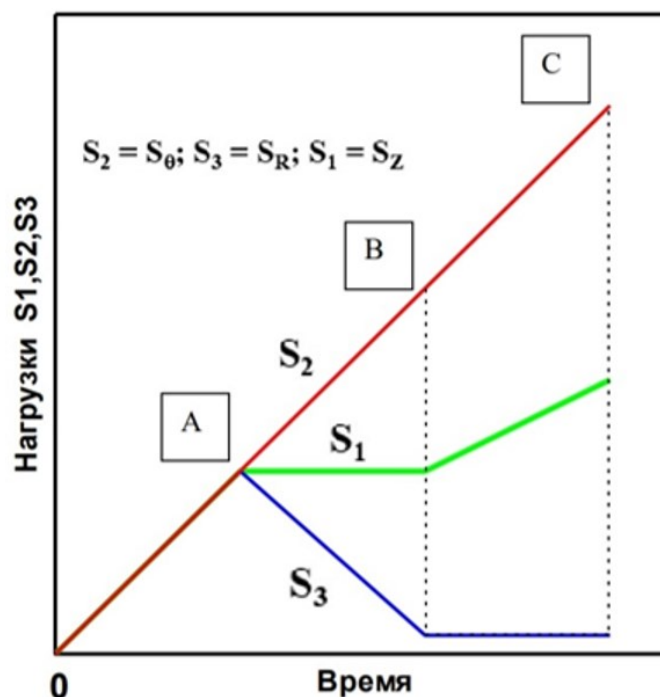


Рис. 14. Программа нагружения образцов на ИСТНН

Программа нагружения состоит из трех этапов:

Этап 1. Точка А соответствует напряжениям, действующим на грунтовый скелет перед бурением скважины. Образец сжимается равномерно со всех сторон до напряжения, равного разнице между значением горного давления на заданной глубине и значением пластового давления: $S_1 = S_2 = S_3 = |q| - p_0$, где p_0 — значение пластового давления.

Этап 2. Компонента напряжения S_2 , соответствующая S_θ , продолжает расти; S_1 , соответствующая S_z , остается постоянной, а S_3 , соответствующая S_R , уменьшается (отрезок АВ). Точка В соответствует состоянию, когда скважина пробурена и давление на ее забое равно пластовому: $p_c = p_0$. Среднее напряжение $(S_1 + S_2 + S_3)/3$ сохраняется постоянным на протяжении всего этапа 2.

Этап 3. Участок ВС соответствует понижению давления на забое скважины. Третий этап длится до тех пор, пока образец не будет разрушен или напряжения не достигнут значений, соответствующих максимально возможной депрессии. В таком случае образец разгружается. Процесс разгрузки протекает прямо противоположно нагружению образца.

3.5.2. Программа нагружения образца, отвечающая напряжениям, действующим на контуре необсаженной скважины при наличии бокового распора

Если боковое горное давление в пласте не равно вертикальному, то грунтовый скелет до пробуривания скважины нагружен неравномерными сжимающими напряжениями. Отношение величин горизонтальных составляющих горного давления к вертикальной составляющей называется боковым распором [81]. В главе 2 детально описано распределение напряжений в скважине при наличии бокового распора. Согласно полученному ранее решению, программа нагружения образца выглядит следующим образом (рис. 15).

Как и ранее, S_i – напряжения, прикладываемые в машине к граням образца. Эти напряжения соответствуют эффективным главным напряжениям, действующим на грунтовый скелет в окрестности скважины: $S_2 - S_\theta$ (тангенциальное); $S_3 - S_R$ (радиальное); $S_1 - S_Z$ (вертикальное).

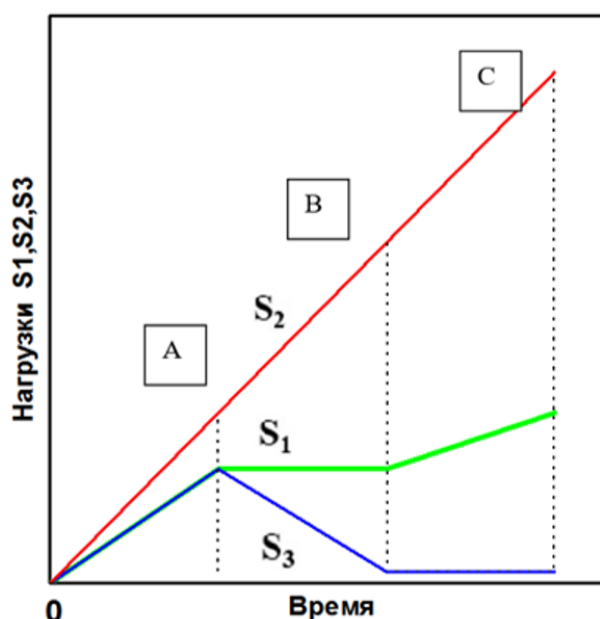


Рис.15. Программа нагружения образцов при наличии бокового распора

Испытание образца включает в себя три этапа.

Этап 1. На первом этапе образец обжимается по оси 2 напряжением $q_b=(\gamma H-P_0)$, а по осям 1 и 3 – напряжениями $q_r=0.4(\gamma H-P_0)$ (отрезки ОА на Рис.

15). Точка А отвечает напряжениям, действовавшим в грунтовом скелете до пробуривания скважины при наличии бокового распора.

Этап 2. На втором этапе нагружения АВ кольцевая компонента напряжения S_2 продолжает расти, вторая S_1 остается постоянной, а третья S_3 убывает. Конечная точка этапа (точка В) отвечает состоянию, когда скважина пробурена и давление на забое равно пластовому.

Этап 3. На третьем этапе моделируется процесс создания депрессии. При этом радиальное напряжение S_R в грунтовом скелете по мере роста депрессии остается практически равным нулю, а кольцевые и вертикальные напряжения растут. Эксперимент продолжается вплоть до момента разрушения образца. В ходе опыта измерялась деформация образца в трех направлениях и регистрировалась его проницаемость.

3.5.3. Программа нагружения образца, отвечающая напряжениям, действующим в окрестности кончика перфорационного отверстия

Хорошим приближением для решения задачи с подобной геометрией является задача о распределении напряжений в окрестности полой сферы, испытывающей внешнее и внутреннее давления [89]. В окрестности сферического перфорационного отверстия действуют радиальное σ_r и два кольцевых напряжения σ_θ и σ_φ . Соответствующие им эффективные напряжения S_R , S_θ , S_φ , действующие на грунтовый скелет, прикладываются к граням образца в нагружающем узле установки ИСТНН как S_3 , S_1 , S_2 и представлены на рис 12. Программа нагружения при моделировании перфорационного отверстия имеет три этапа, аналогичных ранее описанным, однако распределение напряжений меняется.

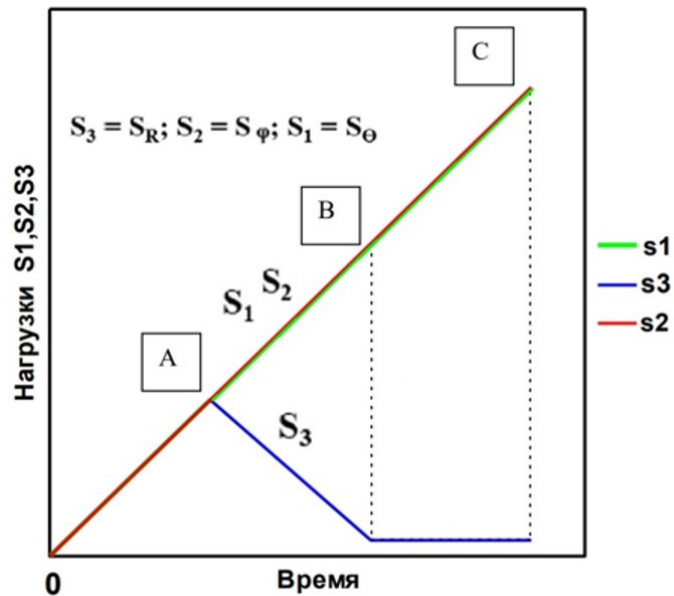


Рис.16. Программа нагружения образцов при моделировании конца перфорации

Точка А соответствует напряженному состоянию в матрице породы до пробуривания скважины, т.е. $S_1 = S_2 = S_3 = |q| - p_0$, где p_0 – значение пластового давления.

Точка В соответствует состоянию, когда скважина пробурена и давление на забое равно пластовому. При этом прикладываемые напряжения соответствуют решению задачи о распределении напряжений в окрестности сферы: $S_3 = 0$, $S_1 = S_2 = 3/2(|q| - p_c)$. Среднее напряжение $(S_1 + S_2 + S_3)/3$ сохраняется постоянным на протяжении всего этапа 2.

Участок программы ВС соответствует понижению давления на забое скважины. Третий этап программы длится вплоть до разрушения образца или до достижения максимально допустимых для натуральных условий депрессий на скважине.

Глава 4. Результаты экспериментальных исследований

В рамках данной работы были отобраны 18 образцов пород Приразломного, 9 образцов пород Киринского месторождения и 21 образец пород Уренгойского месторождения с близкими скоростями прохождения

упругих волн по каждой из осей. Вывод об изотропии упругих свойств исследуемых пород позволяет использовать для моделирования напряжений в окрестности горизонтальной скважины решение для изотропной среды, полученное решением задачи Ламе [90]. Это дает возможность проводить исследования по методике, описанной ранее, т.е. нагружать образцы согласно программам нагружения.

Для части исследуемых пород при ряде значений прикладываемых к образцу нагрузок, отвечающих различным напряженным состояниям, нагружение образца останавливалось и измерялось изменение деформации образца при постоянной нагрузке (деформация ползучести).

Если при данном распределении напряжений (например, соответствующему определенной величине депрессии на забое) ползучесть образца является ограниченной, т.е. его деформация спустя некоторое время перестает нарастать, то осуществляется догружение образца до значений, отвечающих большей величине касательных напряжений.

Если ползучесть образца носит установившийся характер, т.е. деформация образца нарастает со временем, то измерение деформации ползучести производится до тех пор, пока ползучесть образца прекратится или произойдет разрушение образца.

Полученные результаты могут использоваться как для оценки возможности налегания породы на фильтр, так и для определения допустимых депрессий на забое скважины. Кроме того, в процессе экспериментов будет проводиться измерение проницаемости образцов, что даст возможность изучить влияние деформации ползучести образцов на их проницаемость.

По результатам испытаний для каждого образца были получены данные в виде графиков и проведен их анализ: получены кривые деформирования (зависимость деформаций от напряжения) – по оси ординат отложено монотонно возрастающее в ходе испытания напряжение S_2 – являющееся параметром нагружения; получены кривые изменения проницаемости во времени вместе с реальной программой нагружения каждого образца. Также

построены кривые ползучести. Ниже описаны основные результаты для исследованных образцов каждого месторождения.

Описанная ранее условная классификация пород с точки зрения характера изменения проницаемости при создании в них напряжений была использована в данных исследованиях для систематизации полученных результатов.

4.1. Результаты испытаний пород второй категории

Вторую категорию составляют породы, проницаемость которых может как уменьшаться, так и увеличиваться (причем необратимо) в зависимости от уровня создаваемых в них касательных напряжений и интенсивности вызванных ими неупругих деформаций. В начале упругопластического деформирования породы ведут себя аналогично породам первой категории, т.е. их проницаемость практически не изменяется.

При достижении касательными напряжениями определенной величины начинается интенсивное пластическое деформирование породы и ее ползучесть, во время которых проницаемость породы уменьшается, причем значительно (на десятки процентов и даже в разы). Это падение проницаемости носит необратимый характер, то есть при снятии напряжений она не восстанавливается.

Дальнейшее увеличение касательных напряжений влечет за собой увеличение скорости ползучести таких пород, и, когда деформация достигает критической величины, порода начинает растрескиваться и разрушаться, что сопровождается резким увеличением ее проницаемости даже по сравнению с первоначальным значением. Характер разрушения образцов при этом различен. В более прочных породах разрушение образцов происходит путем образования в них нескольких макротрещин. Менее же прочные породы, такие как, например, средне- и крупнозернистые песчаники, при разрушении практически превращаются в песок (дезинтегрируются).

4.1.1. Приразломное месторождение

Картина изменения проницаемости, характерная для пород второй категории, наблюдалась при испытаниях 10 образцов из продуктивного пласта Приразломного месторождения. В качестве одного из наиболее типичных характеров зависимости проницаемости от напряжений для пород второго типа можно привести образец №П2-4 Приразломного месторождения (рис. 17).

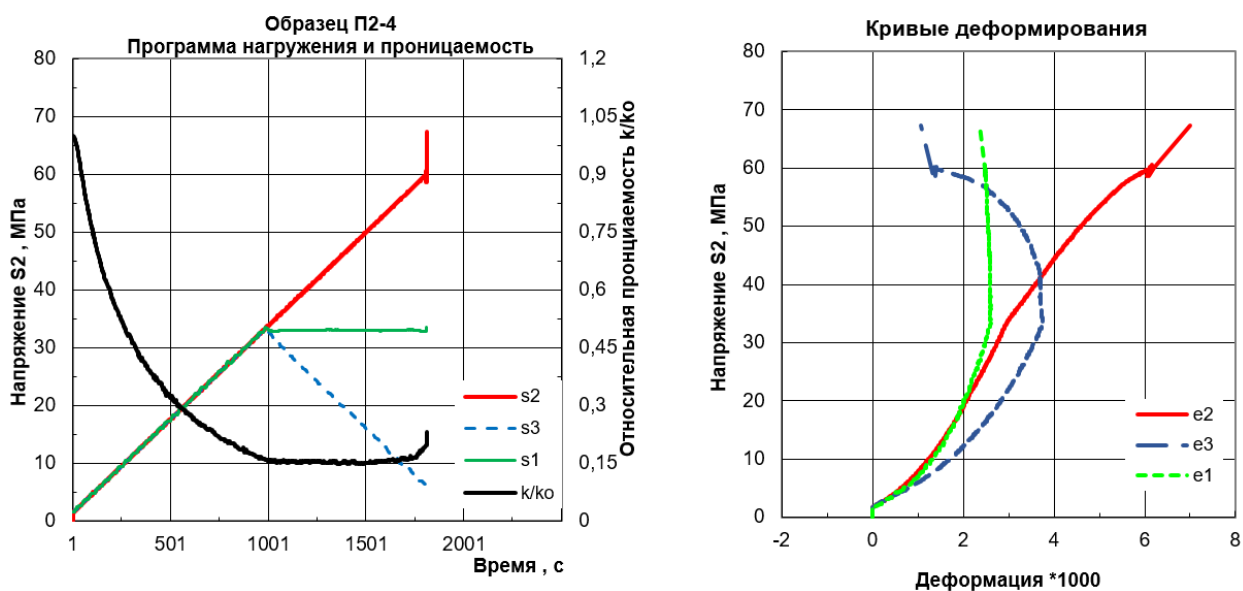


Рис. 17 (а, б). Результаты моделирования на образце П2-4

На первом графике изображена кривая изменения проницаемости со временем, а также монотонно возрастающая компонента напряжений S_2 , отвечающая реальной программе нагружения. На втором графике представлены кривые деформирования. В качестве параметра нагружения выступает компонента S_2 напряжений в силу ее монотонного роста в ходе опытов; её значение отложено по вертикальной оси. На образце моделировались условия, возникающие в окрестности точки М (рис. 6) горизонтальной скважины в условиях всестороннего равномерного начального сжатия. Напряжение S_2 , соответствующее кольцевой компоненте главных напряжений, прикладывалось вдоль оси керн, т.е. перпендикулярно напластованию, и монотонно росло в ходе эксперимента. Проницаемость измерялась в перпендикулярном направлении, т.е. вдоль напластования. На первом этапе образец был всесторонне равномерно обжат до напряжения 33

МПа, что соответствует разности между величинами горного давления и пластового давления на данной глубине при отсутствии бокового распора.

Конечная точка второго этапа нагружения соответствует состоянию скважины, заполненной технической водой. Но до этой точки испытание не дошло. Разрушение произошло на втором этапе нагружения. При $S_2=60$ МПа произошло нарушение структуры образца, в нем образовалась система трещин. Проницаемость образца, в ненагруженном состоянии равная 8.5 мД, плавно падала вплоть до начала растрескивания образца. В момент разрушения образца происходит нарушение целостности герметической оболочки, из-за чего поток воздуха начинает распространяться по всем осям. Но так как измерение проницаемости осуществляется только вдоль одной оси, невозможно далее измерять проницаемость. Однако появление в образце сети макротрещин однозначно свидетельствует о многократном росте проницаемости, предпосылка к которому также видна на графике.

Другой образец П5-4 взят из менее глубокого слоя породы, чем предыдущий. На нем моделировались те же условия нагружения, то есть программа испытаний остается прежней.

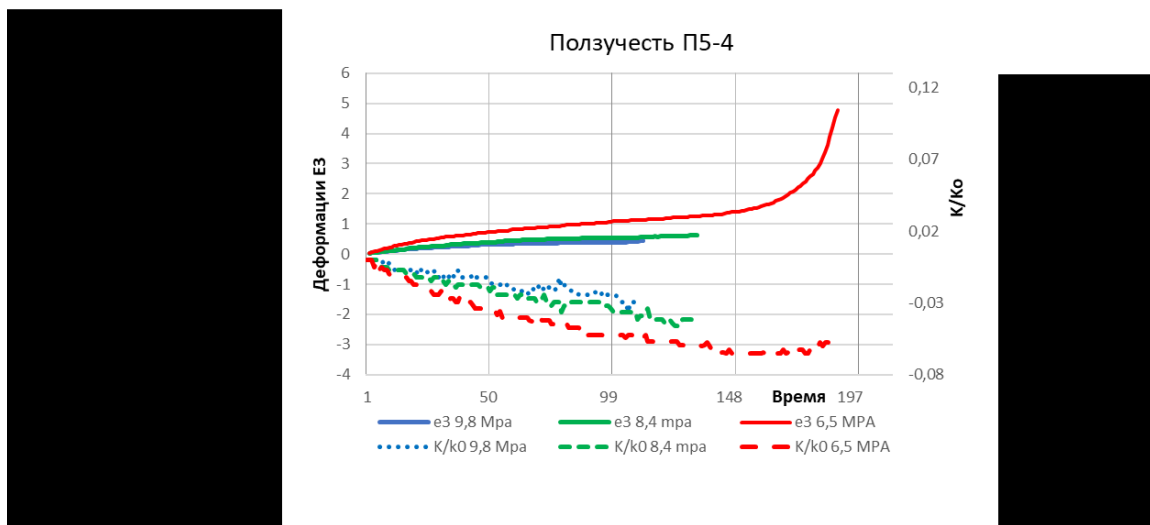
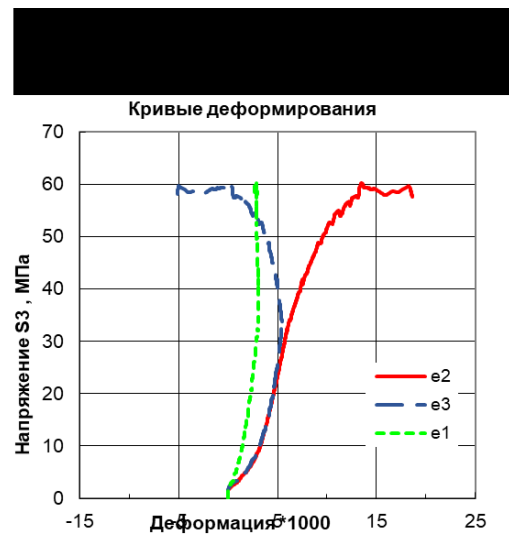
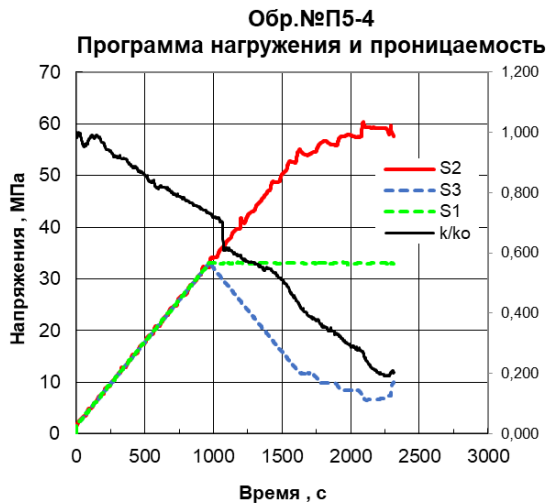


Рис. 18 (а, б, в). Результаты моделирования на образце П5-4

На первом этапе образец нагружался до начального состояния всестороннего сжатия 33 МПа. Второй этап нагружения не был закончен из-за разрушения породы. Нарушение структуры образца произошло при $S_2=59.5$ МПа. По оси 1 (вертикальной) образец деформировался упруго на протяжении всего испытания. По остальным двум осям переход к неупругому деформированию произошел при $S_3=54$ МПа. На данном образце также исследовалось влияние процесса длительного деформирования на фильтрационные свойства, для чего осуществлялись паузы при нагружении для регистрации деформаций ползучести. Образец испытывался по программе нагружения с постоянным первым инвариантом напряжения: на каждом из трех шагов первое главное напряжение увеличивалось (56.2, 57.6, 59.5 МПа),

второе оставалось постоянным (33 МПа), третье уменьшалось, в той же степени, что увеличивалось первое (9.8, 8.4, 6.5 МПа). При первых двух остановках наблюдалась быстро затухающая ползучесть, вследствие чего нагружение возобновлялось. При значении наименьшей компоненты напряжений 6.5 МПа наблюдалась установившаяся ползучесть, быстро перешедшая к ускоренному этапу. Проницаемость на всех участках измерения ползучести уменьшалась монотонно по мере роста деформаций. При последней остановке нагружения тенденция изменения проницаемости изменилась, что может быть связано с развитием значительных деформаций и инициации растрескивания породы. Таким образом, в ходе деформирования ползучести фильтрационные свойства образца ухудшались, однако при приближении к этапу разрушения характер изменения проницаемости изменился. В момент разрушения видна предпосылка к увеличению проницаемости, что подтверждается наличием трещин на образце.

Образец П7-4 был взят из интервала 2517 м. Его начальная проницаемость составила всего 6.7 мД. Программа испытаний была аналогична предыдущей. В ходе испытаний образец деформировался упруго вплоть до значений кольцевой компоненты напряжений 55 МПа. Проницаемость в ходе всестороннего обжатия падала с меньшей скоростью, чем по мере возрастания касательных напряжений. И конечная проницаемость составила 33% от начальной. В ходе опыта осуществлялось измерение ползучести при значениях S_3 равных 10.2, 7.6 и 5.7 МПа. После первых двух остановок нагружение в скором времени возобновлялось в силу незначительного проявления ползучести, к тому же быстро затухающей. Проницаемость в ходе такого деформирования уменьшалась схожим с деформациями образом. При $S_3 = 5.7$ МПа наблюдалась интенсивная нарастающая ползучесть. Скорость ползучести росла по мере длительности выдержки под нагрузкой, что привело к последующему разрушению породы. Проницаемость при этом сперва

менялась незначительно, однако определенно видна тенденция к ухудшению фильтрационных свойств.

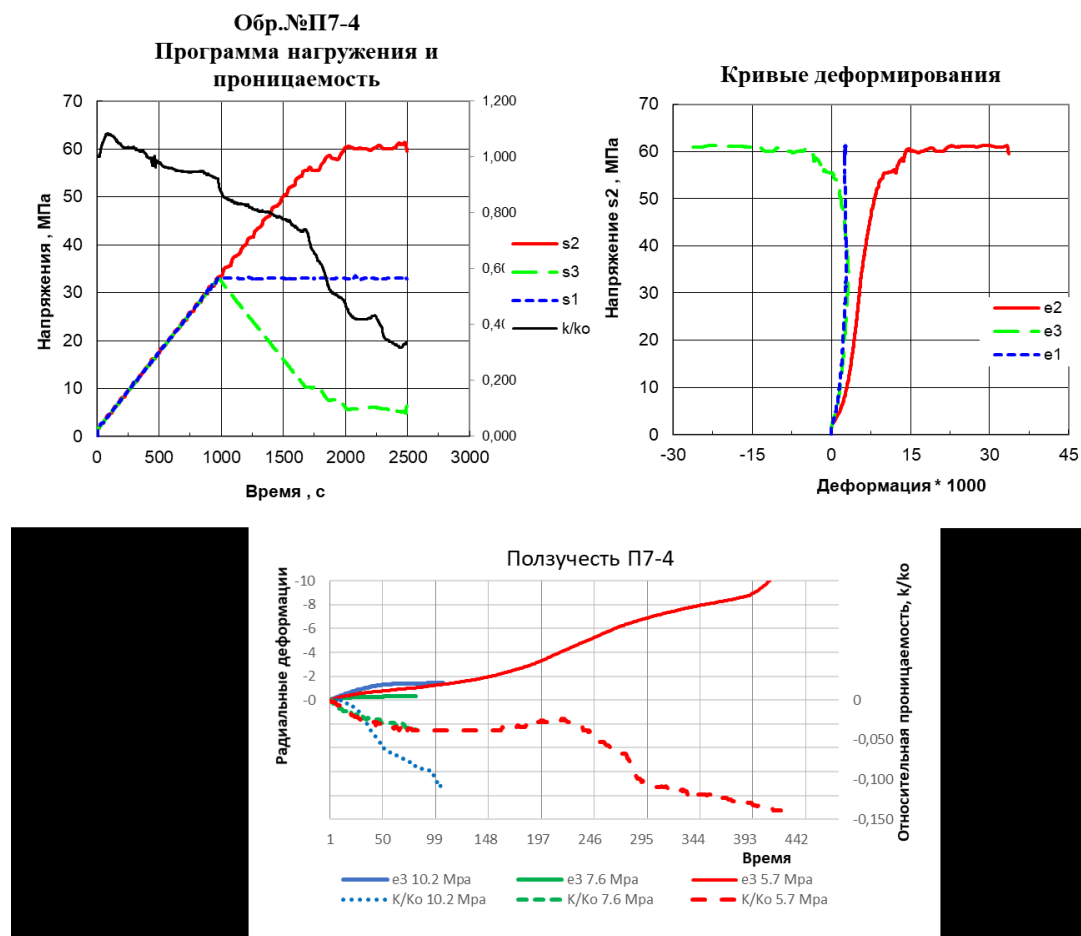


Рис. 18 (а,б,в). Результаты моделирования на образце П7-4

Образец П7-6 был взят из того же интервала отбора керна, что и предыдущий. Несмотря на это, его начальная проницаемость составила 17 мД. Данный образец был испытан по программе нагружения, соответствующей случаю наличия бокового распора в пласте. Результаты испытания представлены на рис. 19. Кривая проницаемости показала аналогичный предыдущему характер изменения: при всестороннем обжатии породы проницаемость ожидаемо уменьшается, однако с меньшей скоростью, чем при возникновении и росте касательных напряжений. Кривые деформирования указывают на упругих характер деформирования вплоть до начала измерения ползучести. Всего было сделано 6 остановок в ходе нагружения. Ползучесть и измерение проницаемости в ходе последних четырех из них показаны на рисунке 19,в. Первые три измерения при значениях $S_3 = 8.4$; 7.9 ; и 7.3 МПа

демонстрируют отсутствие развития деформирования ползучести. Проницаемость по время всех измерений монотонно уменьшается. Выдержка образца при значении минимальной компоненты напряжений в 6.9 МПа приводит сразу к развитому режиму ползучести. Деформации интенсивно и практически монотонно нарастают, приводя к растрескиванию породы. Стоит отметить, что проницаемость при этом меняется незначительно, несмотря на интенсивное деформирование породы.

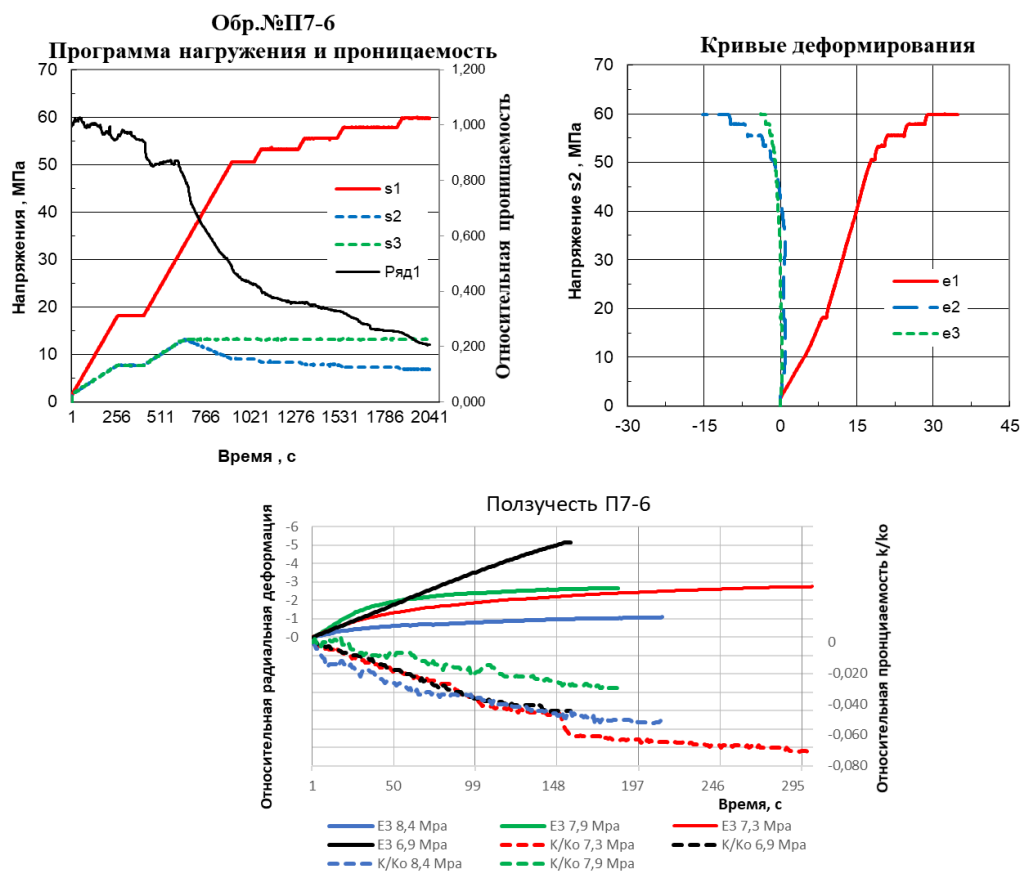


Рис. 19 (а, б, в). Результаты моделирования на образце П7-6

Характерным для пород второй категории поведением проницаемости обладал образец №П16, также испытанный по программе бокового распора (рис. 20). Проницаемость сохранялась на ранних этапах нагружения, после

чего происходило плавное, но значительное падение до значения 30% от начального. Характер деформирования был преимущественно упругим.

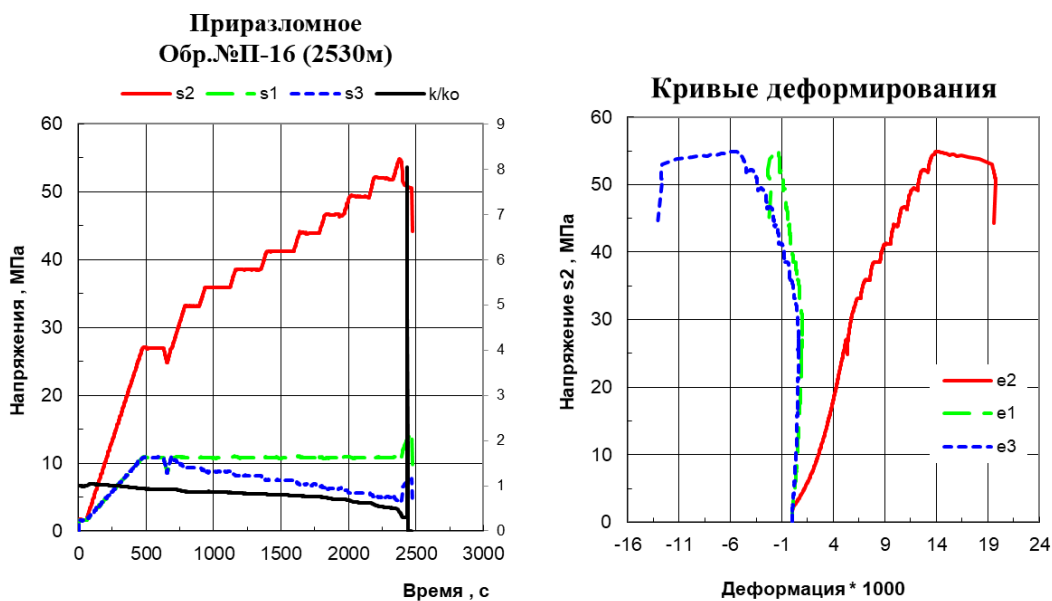


Рис. 20 (а, б). Результаты моделирования на образце П16

Но при переходе к абсолютно неупругому деформированию начался процесс дезинтеграции породы, который сопровождался скачкообразным увеличением проницаемости до значения в 8 раз превышающего начальное.

Измерение проницаемости показало существенную зависимость проницаемости этих пород от напряженно-деформированного состояния, а именно падение проницаемости образцов в ходе моделирования снижения давления в скважине, а также скачкообразный рост после растрескивания а некоторых случаях. Проницаемость в ходе развития процесса ползучести уменьшалась, причем преимущественно монотонно. Если ползучесть приводила к инициации дезинтеграции породы, проницаемость значительно и необратимо росла.

4.1.2. Киринское месторождение

Картина изменения проницаемости, характерная для пород второй категории, наблюдалась при испытаниях из продуктивного пласта 6 образцов Киринского месторождения. На образцах Киринского месторождения также проводились измерения ползучести породы при различных напряженных состояниях. При этом производились измерения проницаемости с целью исследования влияния процесса ползучести на фильтрационные характеристики образца. Показательным примером пород второй категории является образец №К-4/7 Киринского месторождения (рис. 21).

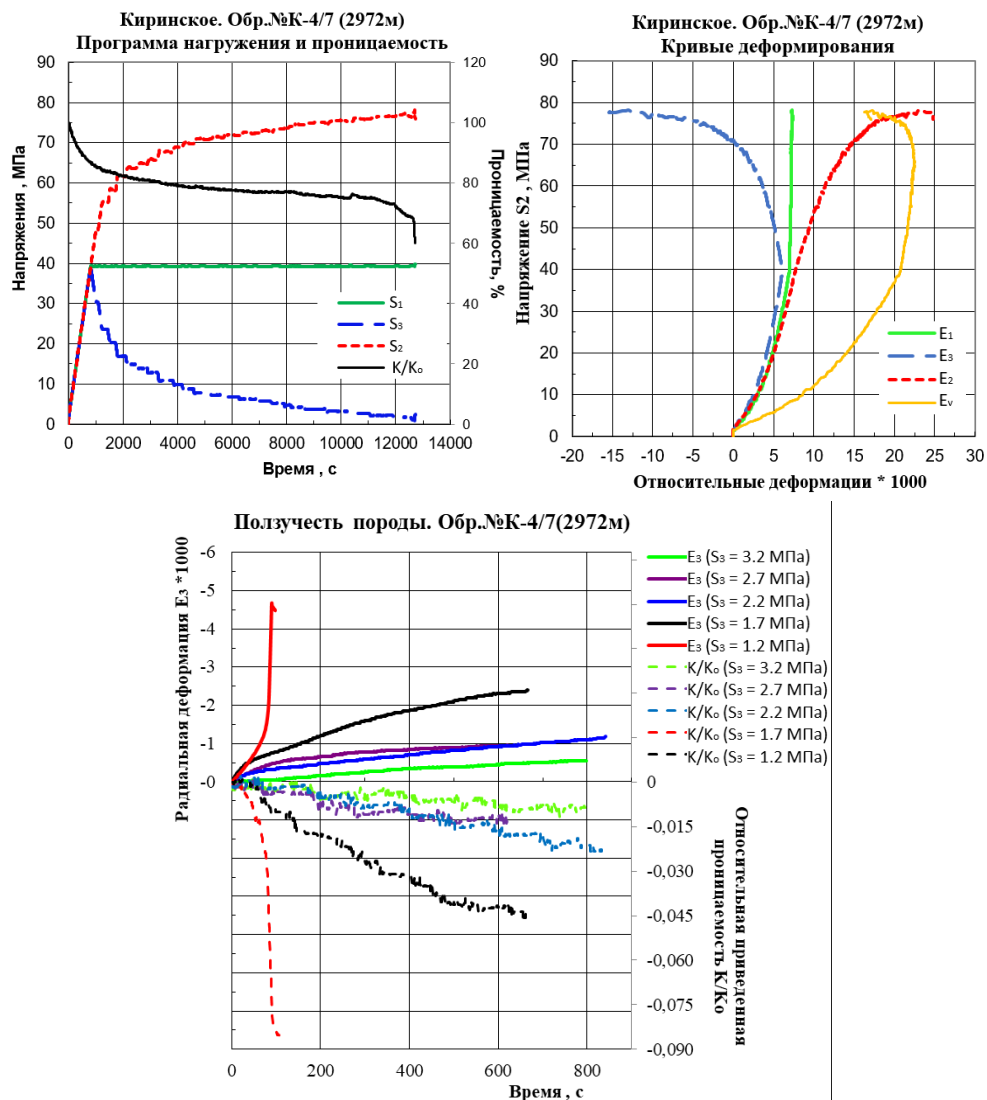


Рис. 21. Результаты моделирования на образце №К-4/7

Данный образец обладал высокой начальной проницаемостью 2090 мД и был отобран с глубины 2972 м. На первом графике изображены кривые

деформирования по каждой оси образца. По вертикальной оси отложено монотонно возрастающее в ходе испытания напряжение S_2 . На втором графике представлена программа нагружения образца и кривая проницаемости. Ниже изображена кривая ползучести и зависимость проницаемости от времени. Порода деформировалась упруго в течение долгого времени, причем проницаемость изменялась незначительно в упругой зоне, что характерно породам первой категории. Однако при дальнейшем росте касательных напряжений произошел переход к неупругому деформированию и соответствующему ускорению падения проницаемости. Скорость падения проницаемости резко увеличилась при переходе к абсолютно неупругому деформированию. Конечная зарегистрированная проницаемость составила лишь 60% от начальной.

Изучение влияния ползучести на проницаемость осуществлялось для пяти значений минимальной компоненты напряжений. При первых четырех остановках нагружения образец демонстрировал затухающую ползучесть. Проницаемость при этом уменьшалась, но незначительно. Уменьшение проницаемости в ходе длительного деформирования проявлялось сильнее при $S_3 = 1.7$ МПа в силу развития более интенсивных деформаций. В ходе последней остановки образец стремительно перешел к ускоряющейся ползучести, что привело к разрушению. Проницаемость при этом значительно и резко уменьшилась. Скорость изменения проницаемости при этом примерно равна скорости нарастания деформаций.

На рис. 22 представлены результаты моделирования на образце К-1/2, обладающего высокой начальной проницаемостью 4827 мД и изготовленного из керна глубиной 2776 м. Его проницаемость на начальном этапе почти не изменялась, после чего наблюдалось плавное падение проницаемости по мере роста касательных напряжений. Конечная проницаемость составила 60% от начальной.

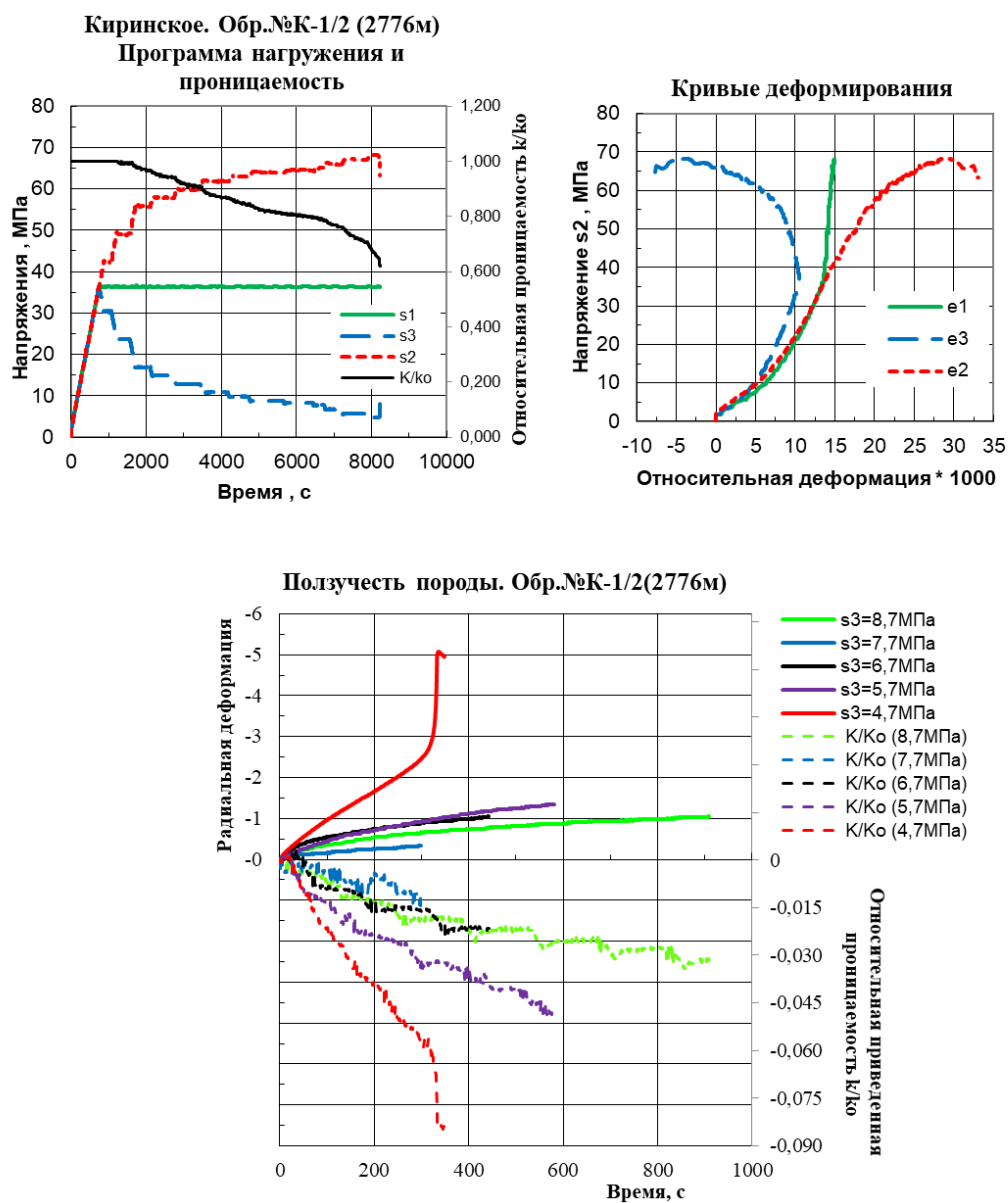


Рис. 22 (а, б, в). Результаты испытаний образца №К-1/2.

Для измерения ползучести было выполнено несколько остановок нагружения, пять из которых (при значениях S_3 от 8,7 МПа до 4,7 МПа) представлены на рис. 22в. Первые четыре остановки демонстрировали затухающий характер ползучести, проницаемость при котором менялась незначительно и уменьшалась с ростом деформаций. При значении $S_3 = 4,7$ МПа образец активно деформировался с нарастающей скоростью, что привело к разрушению породы. Проницаемость при этом уменьшалась монотонно, несмотря на ускоряющийся характер ползучести, после чего стремительно

уменьшилась при разрушении, что может быть связано с нарушением герметичности оболочки образца.

Ниже представлены результаты испытаний образца № К-3/7 (рис. 23). На втором графике изображены кривые деформирования по каждой оси образца. По вертикальной оси отложено монотонно возрастающее в ходе испытания напряжение S_2 . На первом графике представлена программа нагружения образца и кривая проницаемости. Ниже изображены кривые ползучести, соответствующие остановкам нагружения при значении радиального напряжения S_3 равного 5 МПа, 4.5 МПа, 3 МПа, а также этапу моделирования депрессии на скважине. На этом же графике представлены соответствующие кривые изменения проницаемости. Начальная проницаемость образца составила 74.9 мД.

Остановки, предшествовавшие представленным на графике, показали отсутствие интенсивного деформирования ползучести и изменения проницаемости. Деформирование являлось быстро затухающим, проницаемость незначительно уменьшалась либо оставалась постоянной.

Проницаемость образца в ходе нагружения менялась незначительно вплоть до значений $S_2 = 70$ МПа, $S_3 = 4,5$ МПа. В ходе остановки и выдержки образца при таком распределении напряжений проницаемость выросла, что сопровождалось интенсивным деформированием и дилатансией. После такого скачка скорость ползучести значительно уменьшилась. Такое изменение проницаемости может быть связано с изменением структуры порового пространства вследствие дилатансии (сдвиг и смещение зерен) и/или инициацией и развитием микротрещин в материале. По мере дальнейшего роста касательных напряжений проницаемость продолжала поэтапно нарастать. При переходе к моделированию депрессии началось убывание

проницаемости (прекратилась разгрузка по третьей оси, начала увеличиваться промежуточная составляющая напряжений).

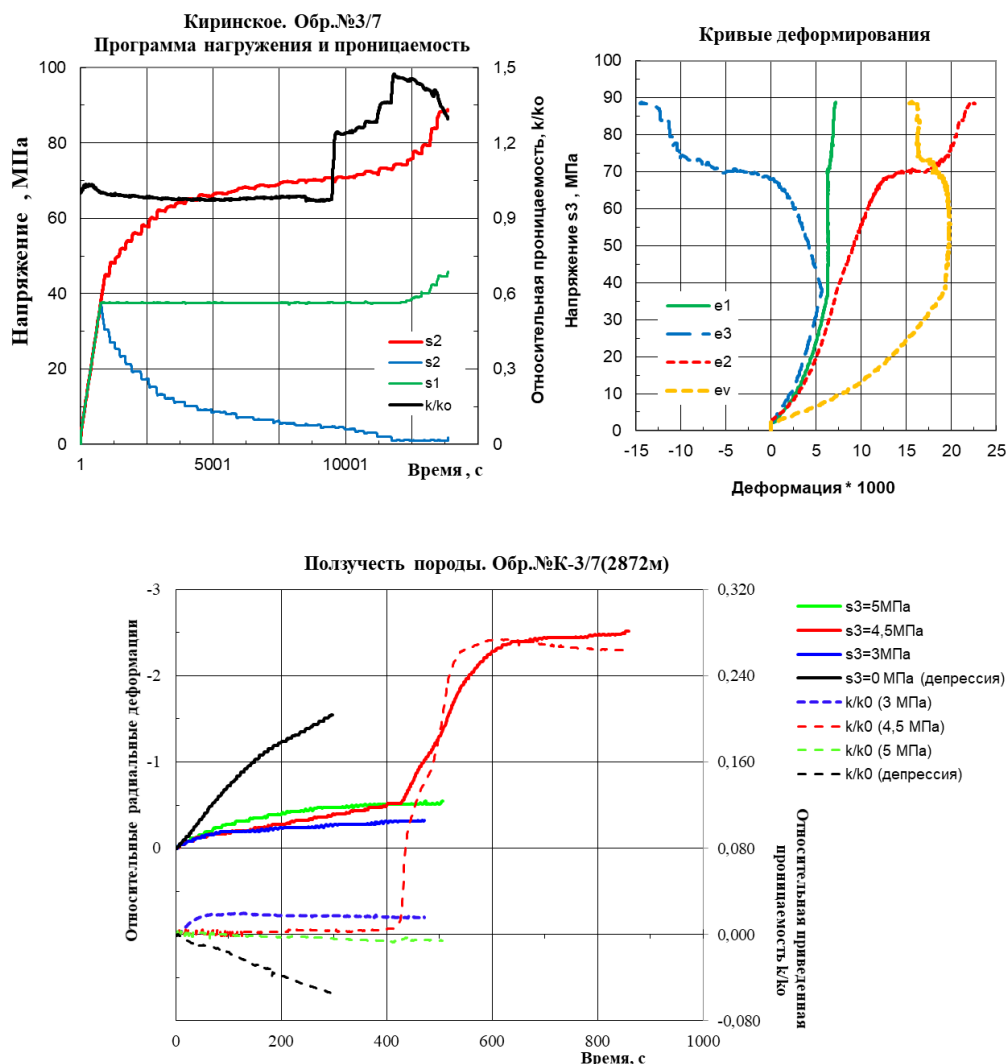


Рис. 23. Результаты испытаний образца №К-3/7

Конечная проницаемость образца осталась выше начальной, разрушение породы произошло на этапе, соответствующему некоторой депрессии в скважине. Деформирование ползучести с нарастающей скоростью предшествовало растрескиванию образца. На данном этапе проницаемость монотонно уменьшалась. Стоит отметить, что в целом проницаемость в ходе опыта почти не менялась до перехода в неупругое состояние, после чего был замечен резкий рост, после которого проницаемость продолжала увеличиваться по мере роста касательных напряжений. При остановках нагружения изменение проницаемости также останавливалось. Однако при

переходе к этапу моделирования депрессии на скважине проницаемость образца начала уменьшаться.

Образец №К2/2-1 (рис. 24) напротив с самого начала испытания стремительно терял проницаемость, несмотря на длительный этап упругого деформирования. Однако при переходе к неупругому деформированию проницаемость начала увеличиваться, вероятно, в силу прочищения и изменения формы фильтрационных каналов с инициацией процесса дилатансии, что можно заметить по кривым деформирования, либо развитием микротрещин. Проницаемость продолжала расти по мере роста касательных напряжений и развития дилатансии. Во время разрушения нарушилась герметичная оболочка образца, что видно по резкому падению проницаемости. Однако по внешнему виду испытанного образца можно судить об однозначном увеличении фильтрационной способности образца.

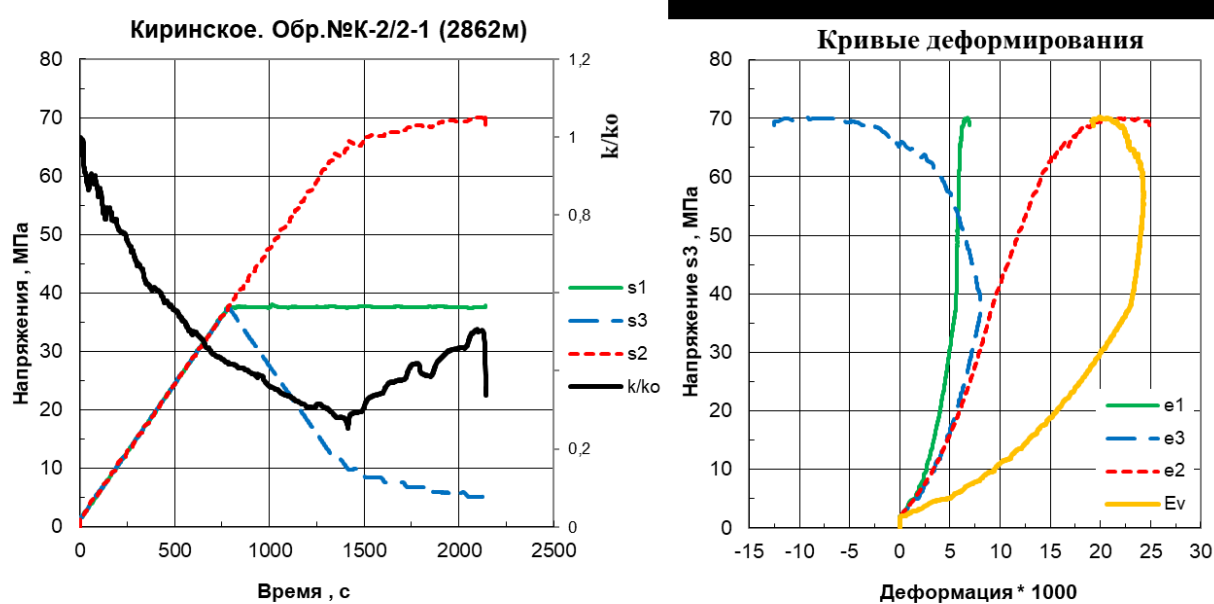


Рис. 24. Кривые проницаемости образцов К4 и К2

4.1.3. Уренгойское месторождение

В рамках исследования было испытано 21 образец ачимовских отложений Уренгойского ГКМ. Все испытанные породы могут быть отнесены ко второй категории, за исключением трех образцов: несмотря на одинаковую с остальными глубину залегания и схожие свойства, эти образцы

деформировались в течение всего испытания упруго, их проницаемость незначительно изменялась и вернулась практически в исходное значение после разгрузки. Данный факт позволяет отнести эти образцы к первой категории. Образцы отмечены в таблице сводных результатов исследований как не разрушившиеся. Далее описаны образцы второй категории в силу наличия этапов неупругого деформирования и изменения фильтрационных свойств.

Для условий Уренгойского ГКМ были проведены опыты по моделированию понижения давления в необсаженной скважине, а также в обсаженной скважине с перфорационным отверстием. В ходе испытаний на части образцов осуществлялось измерение ползучести и ее влияния на фильтрационные характеристики.

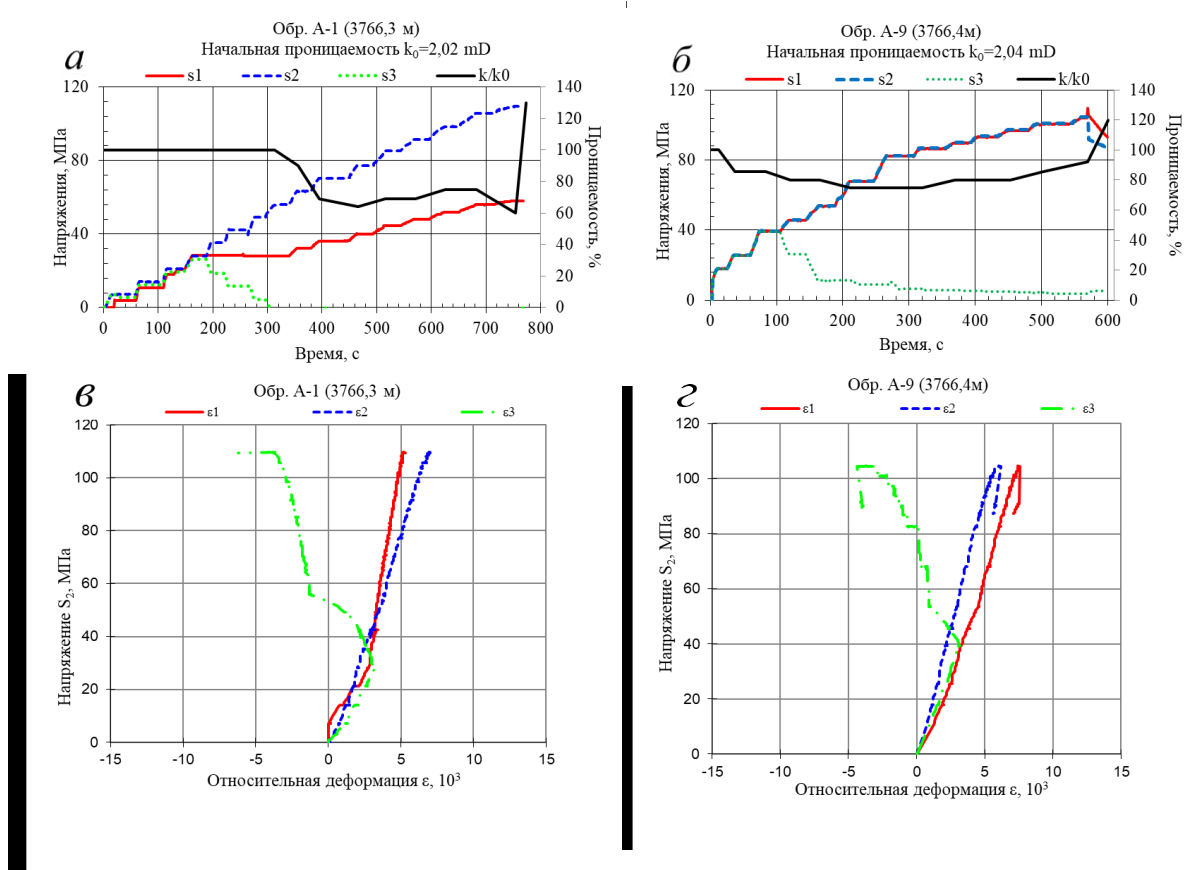


Рис. 25. (а) – Программа нагружения и кривая проницаемости образца А-1, (б) – Программа нагружения и кривая проницаемости образца А-9, (в) – Кривые деформирования образца А-1, (г) – Кривые деформирования образца А-9

На рис. 25 представлены результаты испытаний образцов А-1 и А-9, вырезанных из одного куска керна с глубиной залегания 3766 м. Первый из представленных образцов был испытан по программе открытого ствола скважины, второй – по программе перфорационного отверстия. На рисунках 25а, б изображены фактические программы нагружения для каждого образца, а также кривые изменения проницаемости в ходе эксперимента. Ниже (рис. 25в,г) расположены кривые деформирования образцов. Напряжение S_2 монотонно растет в ходе опыта и является параметром нагружения.

Оба образца обладали низкой начальной проницаемостью: порядка миллиарда. Из рис. 25, а видно, что проницаемость образца А-1 не менялась вплоть до этапа понижения давления в скважине. По мере роста касательных напряжений проницаемость менялась незначительно, и при значении $S_2 = 109$ МПа образец начал интенсивно деформироваться, что привело к разрушению и к скачкообразному росту проницаемости в силу растрескивания и образования новой сети фильтрационных каналов. Зарегистрировать точное значение конечной проницаемости не всегда представляется возможным, так как при растрескивании нарушается герметичность пленки, покрывающей образец. Однако даже последняя зарегистрированная проницаемость образца составила 130% от начальной. Стоит отметить, что на протяжении опыта порода деформировалась упруго, после чего произошел резкий переход к неупругому состоянию и дальнейшему разрушению. Значение напряжения, при котором произошло растрескивание образца, соответствует депрессии на забое в 26.4 МПа.

Проницаемость образца А-9 (рис. 25, б) также изменялась незначительно в ходе нагружения вплоть до перехода к неупругому деформированию и дальнейшему растрескиванию при напряжении $S_2 = 105$ МПа, соответствующему депрессии на забое в 38.8 МПа, что привело к резкому увеличению проницаемости. Образец деформировался практически упруго в ходе нагружения вплоть до разрушения. Таким образом, оба образца проявили хрупкий характер разрушения.

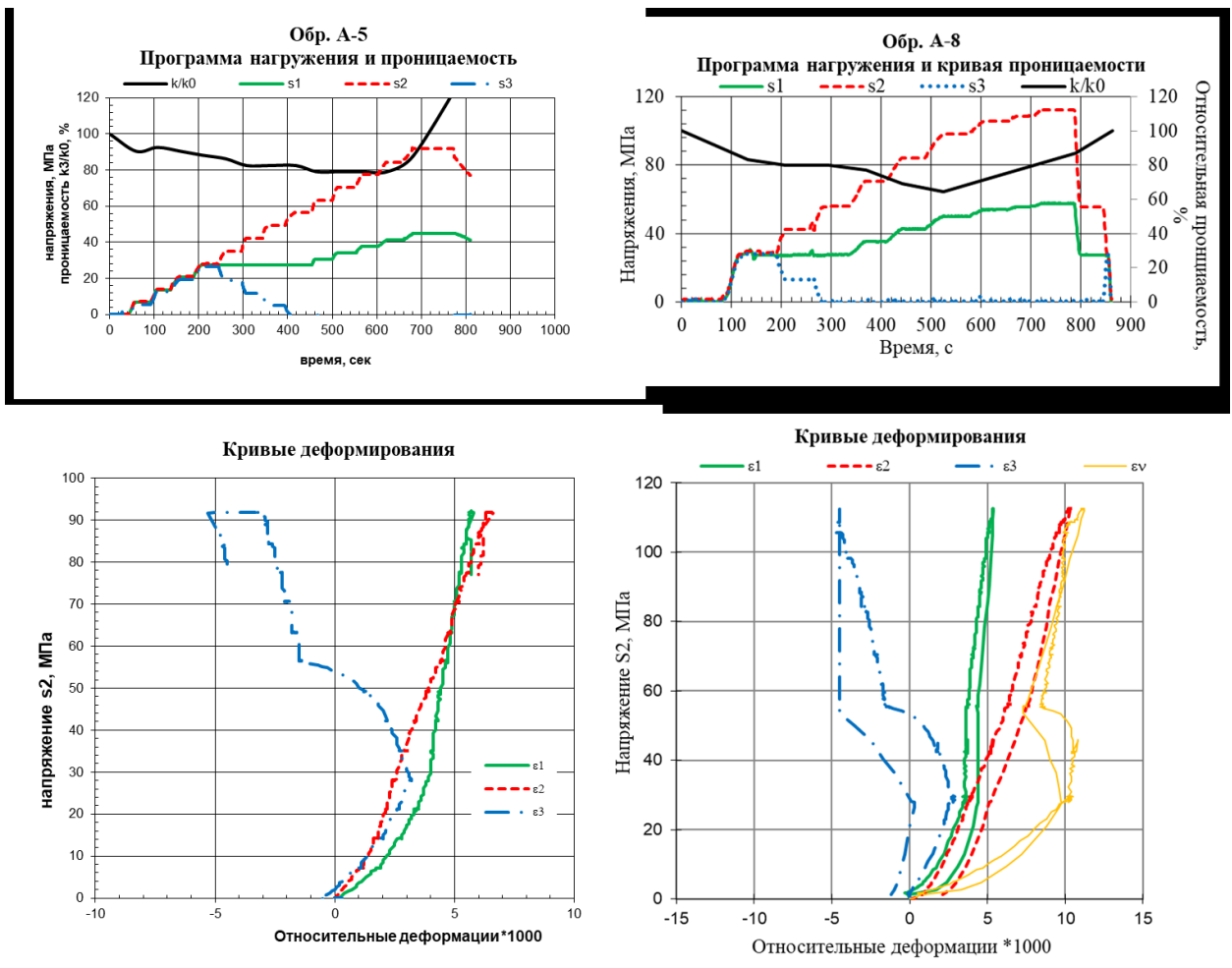


Рис. 26. (а) – Программа нагружения и кривая проницаемости образца А-5, (б) – Программа нагружения и кривая проницаемости образца А-8, (в) – Кривые деформирования образца А-5, (г) – Кривые деформирования образца А-8.

Образцы А-5 и А-8 были взяты из одного интервала отбора керн. Оба образца испытаны по программе для необсаженного ствола скважины. На рис. 26 представлены программы нагружения образцов, кривые изменения проницаемости в ходе опыта, а также кривые деформирования образцов по каждой оси.

Образцы обладали почти одинаковыми значениями начальной проницаемости – 0.13 мД и 0.14 мД соответственно. Проницаемость образца А-5 незначительно уменьшалась по мере нагружения. На этапе моделирования понижения давления в скважине ниже пластового проницаемость начала расти, причем скорость роста оказалась выше предыдущей. На последнем этапе нагружение было приостановлено для регистрации ползучести.

Проницаемость при этом продолжала ускоренно расти. Интенсивное деформирование ползучести привело к последующему разрушению образца, конечная зарегистрированная проницаемость оказалась выше начального значения. Стоит отметить, что даже при разрушении проницаемость изменилась не скачкообразно.

Проницаемость образца А-8 уменьшалась в ходе первых двух этапов нагружения. Смена знака изменения проницаемости произошла при меньших значениях касательных напряжений по сравнению с предыдущим образцом. На этапе моделирования создания депрессии в скважине проницаемость росла с практически постоянной скоростью. Такой характер изменения продолжался и при короткой остановке нагружения на последнем этапе. Разрушение образца не наступило даже при значении $S_2 = 113$ МПа, соответствующему депрессии на забое в 26.5 МПа, после чего образец был разгружен. Проницаемость при этом вернулась практически в исходное состояние, а сам образец деформировался практически упруго в ходе моделирования, в связи с чем был отнесен к первой категории.

Результаты испытаний образца А-10, глубина отбора керна которого составила 3794.2 м представлены на рис. 27. Данный образец был испытан по программе нагружения, соответствующей случаю перфорационного отверстия в обсаженной скважине. Начальная проницаемость составила 2.41 мД и практически не менялась в течение всего нагружения. В ходе нагружения было сделано несколько остановок, однако ползучести не наблюдалось вплоть до значения $S_2=76.1$ МПа, соответствующего депрессии $\Delta p = 24.7$ МПа. При таком напряженном состоянии наблюдалась незначительная затухающая ползучесть, начался процесс увеличения объемной деформации (рис. 27, б). Проницаемость при этом сперва уменьшалась с очень низкой скоростью, затем ее скорость начала менять знак.

На следующей остановке нагружения при $S_2=82$ МПа, соответствующей депрессии $\Delta p = 25.4$ МПа, проявлялась интенсивная ползучесть с возрастающей скоростью. Скорость роста проницаемости увеличивалась по

мере роста деформаций ползучести. Разрушение, как ожидалось, привело к образованию макротрещин, а значит к значительному увеличению проницаемости.

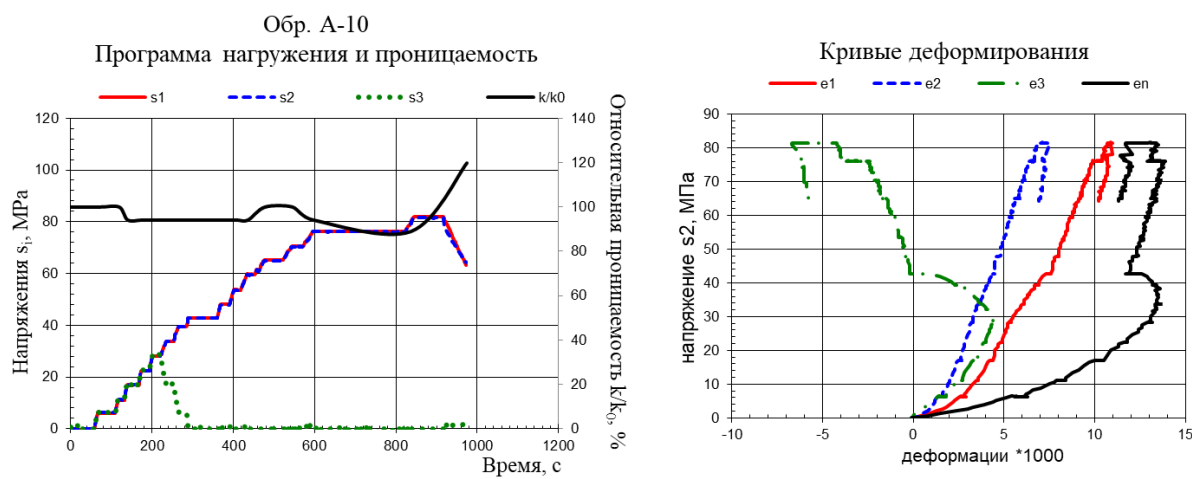


Рис. 27. Результаты моделирования на образце А-10

В описанных выше случаях проницаемость менялась практически монотонно на участках деформирования, предшествующих разрушению, что может быть вызвано другими механизмами ее изменения по сравнению с описанными ранее, в том числе проявлением дилатансии. При смещении берегов существующих микротрещин, которые образуют систему фильтрационных каналов, друг относительно друга в связи с неровностью поверхностей трещин происходит их дополнительное раскрытие. Улучшение фильтрационных свойств под действием касательных напряжений в данном случае проявляется с течением времени. Это говорит в пользу того, что ключевым параметром улучшения фильтрационных характеристик пород может быть не только модуль касательных напряжений, возникающих в породе, но и время их действия в породе.

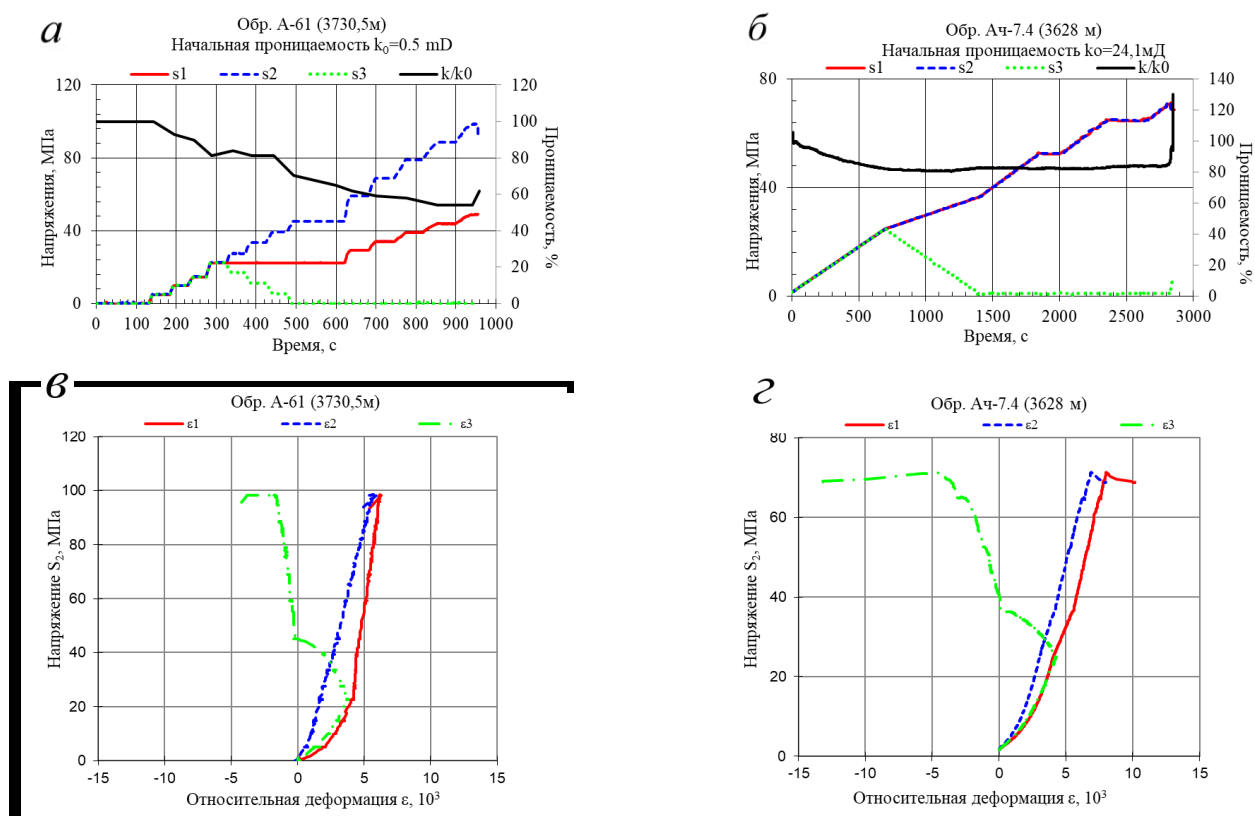


Рис. 28. (а) – Программа нагружения и кривая проницаемости образца А-61, (б) – Программа нагружения и кривая проницаемости образца Ач-7.4, (в) – Кривые деформирования образца А-61, (г) – Кривые деформирования образца Ач-7.4

На рис. 28 представлены результаты испытаний образцов А-61 и Ач-7.4 из двух других скважин с различными глубинами залегания. Образец А-61 был испытан по программе необсаженной скважины. Глубина отбора керна составила 3730.5 м. Образец обладал низкой начальной проницаемостью в 0.5 мД, которая монотонно уменьшалась в ходе нагружения. С учетом малости начального значения проницаемости такое изменение можно считать незначительным, так как даже в минимальной точке кривой проницаемость составляла около 0.3 мД. Однако далее видна предпосылка к скачкообразному увеличению проницаемости при достижении кольцевым напряжением значения 98.5 МПа, соответствующего депрессии 18.6 МПа. При этом порода начала интенсивно ползти, что привело к растрескиванию образца. Стоит также отметить, что до возникновения критических касательных напряжений

порода деформировалась упруго, т.е. имеет место хрупкий характер разрушения.

Ползучесть Ач-7.4

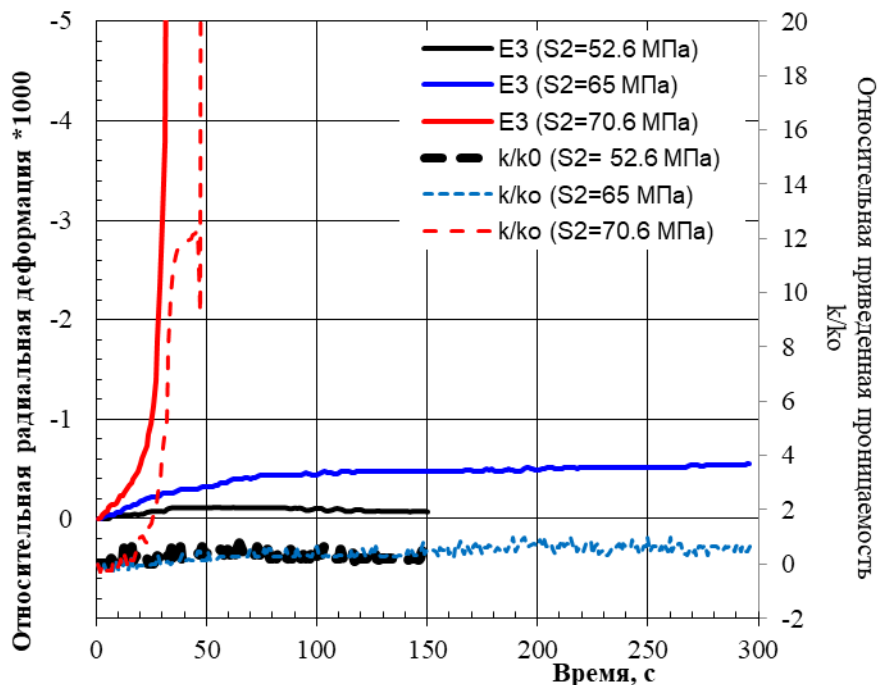


Рис. 29. Кривые ползучести и проницаемости образца Ач-7.4

Образец Ач-7.4 изготовлен из куска керна глубиной 3628 м и был испытан по программе для моделирования перфорационного отверстия в обсаженной скважине. Его начальная проницаемость составила 24.1 мД. На начальном этапе нагружения проницаемость уменьшалась в силу всестороннего сжатия образца. Значение проницаемости в конце данного этапа можно считать исходным значением в пластовых условиях. Далее по мере роста касательных напряжений проницаемость практически не изменялась вплоть до достижения кольцевой компонентой напряжения 71 МПа, что соответствует понижению давления на забое на 22.4 МПа. Далее наблюдалось резкое и необратимое увеличение проницаемости. Последнее зарегистрированное значение проницаемости составило 130% от начального. Образец также деформировался упруго в ходе опыта.

Во время нагружения были осуществлены три остановки для регистрации ползучести при фиксированном значении напряжений. При первой остановке

ползучесть не наблюдалась. На рис. 29 показаны кривые ползучести образца, а также изменение проницаемости образца по оси Z. В течение первых двух остановок деформирование ползучести было незначительным и быстрозатухающим. Скорость ползучести уменьшалась, кривые вышли на полки. Проницаемость при этом практически не менялась. В самом же начале третьей остановки наблюдалось интенсивное деформирование образца, которое достаточно быстро привело к разрушению. При этом проницаемость начала экспоненциально расти по мере роста деформаций.

Более показательным примером может служить образец Ач-6, испытанный по программе необсаженной скважины. Как видно из кривой проницаемости (рис. 30), фильтрационная способность породы значительно уменьшалась по мере роста всестороннего обжатия. Далее проницаемость постепенно росла по мере роста касательных напряжений и снятия всесторонней нарузки, после чего ее изменение оставалось незначительным. Заметные изменения проницаемости происходили при регистрации ползучести перед этапом разрушения: сперва проницаемость монотонно росла, после чего быстро упала при интенсивном росте деформаций, однако после разрушения скачкообразно выросла до значений, больше начального (последнее зарегистрированное значение). Внезапное уменьшение проницаемости перед разрушением может быть связано с образованием первой макротрещины, перпендикулярной направлению изменения проницаемости (этот момент соответствует резкому увеличению деформаций), или нарушением герметичности пленки, покрывающей образец.

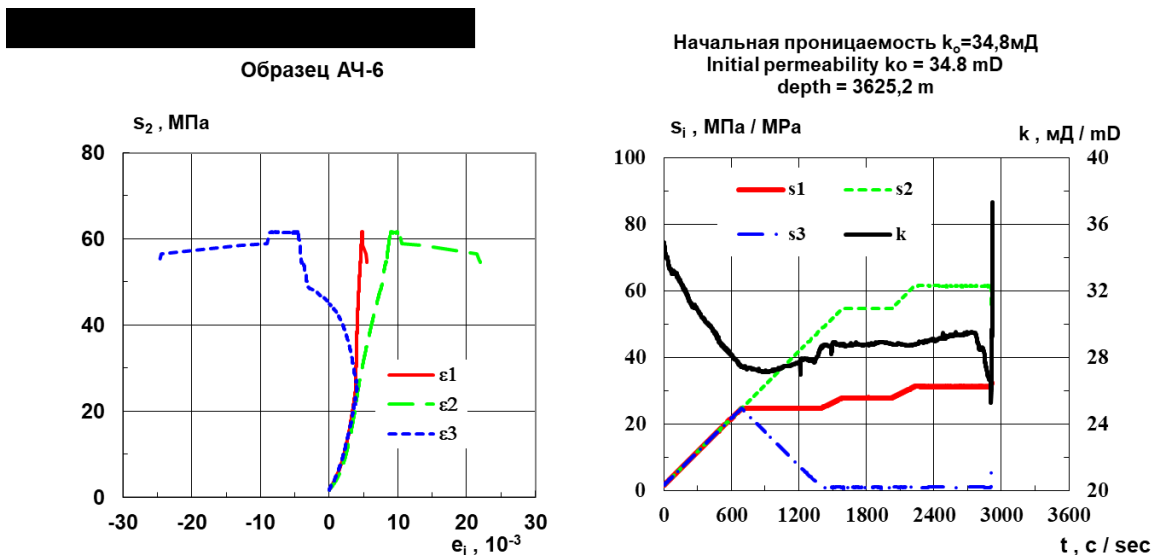


Рис. 30. (а) – Кривые деформирования образца Ач-6, (б) – Программа нагружения и кривая проницаемости образца Ач-6

На рис. 31 показаны кривые ползучести образца Ач-6. В ходе эксперимента нагружения нагружение останавливалось при двух значениях напряжения $S_2 = 54.7 \text{ МПа}$ и $S_2 = 61.6 \text{ МПа}$, соответствующих депрессиям на скважине 2.1 МПа и 5.5 МПа . При $S_2 = 54.7 \text{ МПа}$ ползучесть образца была малоинтенсивной и быстро затухающей, не менялась и проницаемость образца. При значении напряжения $S_2 = 61.6 \text{ МПа}$ картина изменилась. Видно, что после остановки нагружения довольно длительное время ползучесть образца незначительно развивалась, а проницаемость плавно подрастала. Это может быть связано с процессом дилатансии. Затем началась ползучесть образца с большей постоянной скоростью, При этом проницаемость образца продолжала медленно подрастать. Впоследствии ползучесть образца резко ускорилась, проницаемость начала уменьшаться, после чего образец разрушился. Проницаемость образца на этом этапе резко возросла до 37.5 мД и стала выше начальной. Это свидетельствует о том, что ползучесть привела к образованию макротрещин в образце. Стоит отметить, что поведение проницаемости до этапа разрушения почти полностью повторяет кривую ползучести.

Ползучесть АЧ-6

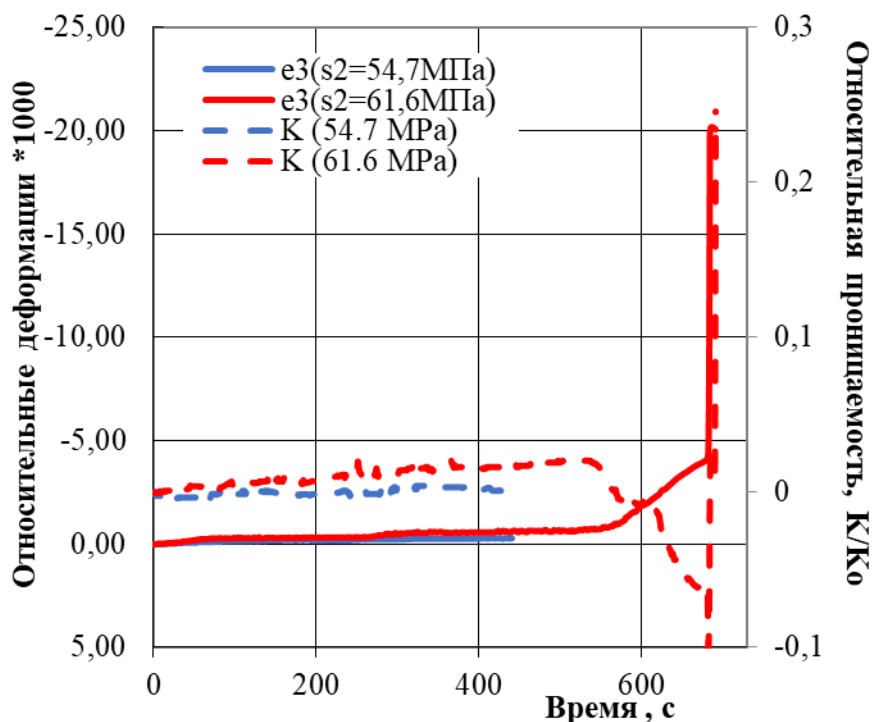


Рис. 31. Кривые ползучести Ач-6

Проницаемость образца Ач-10 (рис. 32) на участке всестороннего сжатия уменьшилась на 20%. При моделировании увеличения депрессии на забое скважины проницаемость продолжала постепенно уменьшаться. При величине напряжения около 80 МПа образец начал пластически деформироваться, а проницаемость его - медленно расти. По достижению напряжения $S_2 = 85.5$ МПа образец деформировался более интенсивно и в итоге разрушился, проницаемость образца резко возросла. В ходе испытания образца Ач-10 была измерена ползучесть при нескольких значениях напряжения S_2 .

На рис. 33 показаны кривые ползучести образца по оси 3, а также изменение его проницаемости. Первые две остановки показали затухающий

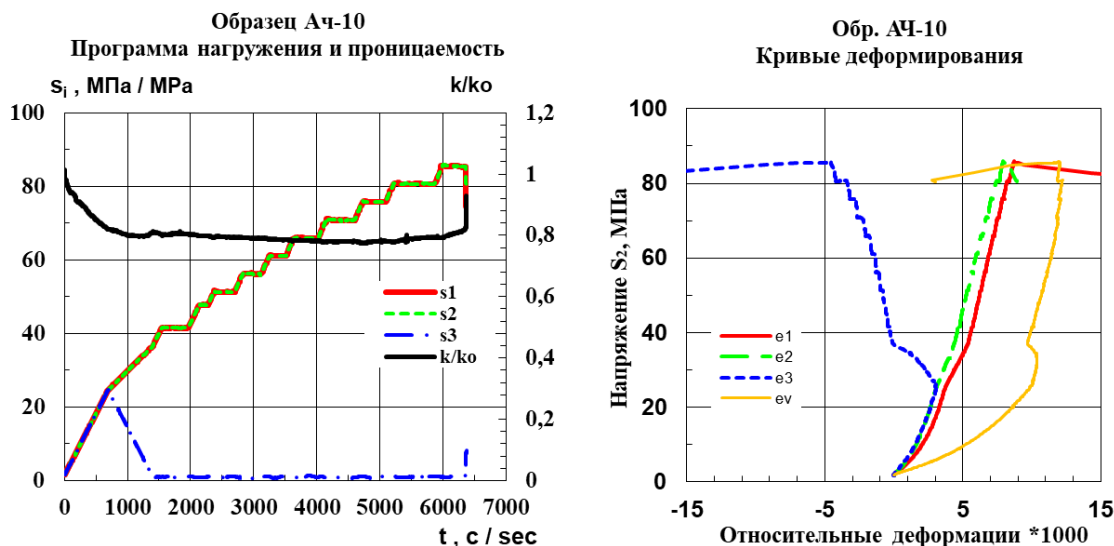


Рис. 32. (а) – Программа нагружения и кривая проницаемости образца АЧ-10, (б) – Кривые деформирования образца АЧ-10

режим ползучести без существенного изменения проницаемости. При $S_2 = 80.7$ МПа ползучесть образца была более заметной, отчетливо виден рост проницаемости. При $S_2 = 85.5$ МПа ползучесть образца резко ускорилась и привела к его разрушению, а проницаемость резко возросла. Последнее значение напряжений отвечает депрессии на забое скважины $\Delta p = 31.7$ МПа.

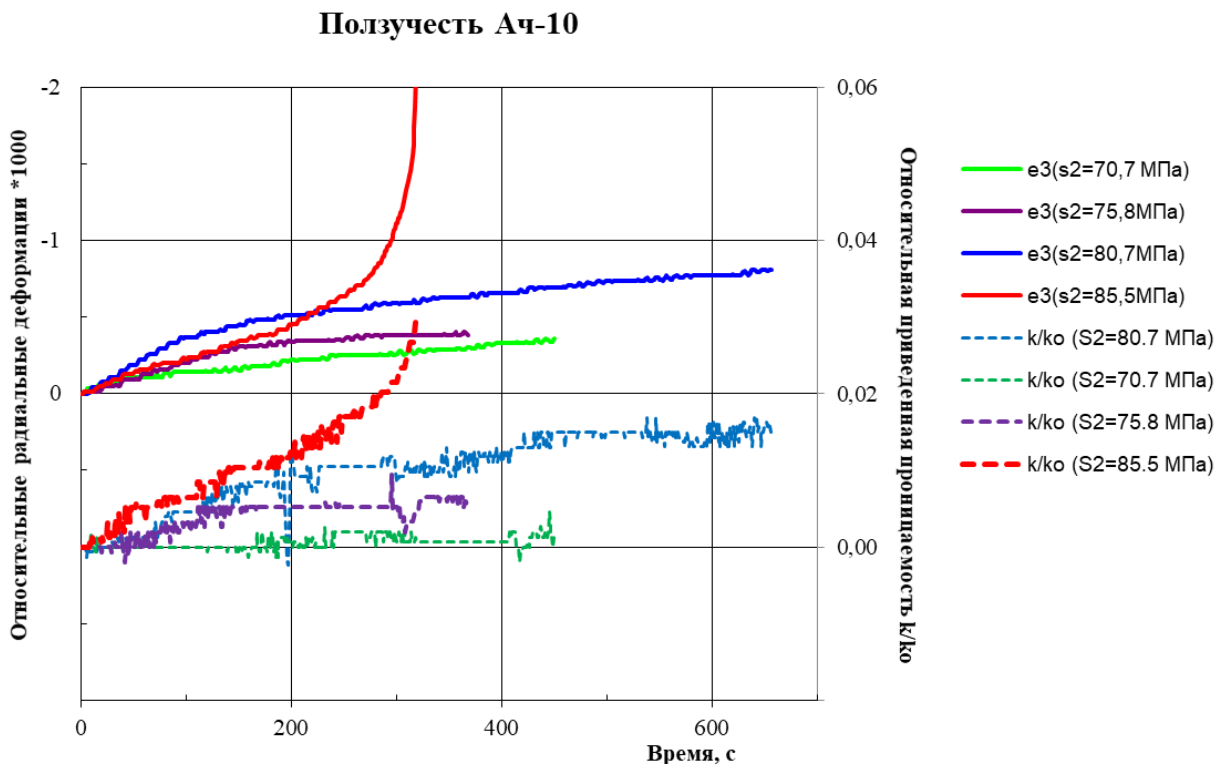


Рис. 33. Кривые ползучести и изменения проницаемости образца АЧ-10

Ниже представлены результаты испытаний образцов, изготовленных из пород, относящихся к третьей категории. Сводные результаты и выводы будут обсуждены в соответствующих разделах далее.

4.2. Результаты испытаний пород третьей категории

К третьей категории относятся горные породы, проницаемость которых при росте прикладываемых к ним напряжений падает вплоть до полного исчезновения. Это падение проницаемости носит необратимый характер, то есть при снятии напряжений она остается пониженной. Подобные свойства часто наблюдаются в песчаниках с большим содержанием глины. При возникновении в таких породах касательных напряжений начинается их интенсивное неупругое деформирование, проявляющееся как в пластическом деформировании, так и в деформациях ползучести. Причем даже при значительных деформациях разрушение образцов зачастую не наступает, они продолжают деформироваться практически с постоянной скоростью.

4.2.1. Приразломное месторождение

Картина изменения проницаемости, характерная для пород третьей категории, наблюдалась при испытаниях 8 образцов из продуктивного пласта Приразломного месторождения. Показательным примером пород третьей категории является образец Приразломного месторождения №П11 (рис. 34). На нем моделировались условия, соответствующие напряжениям на стенках необсаженной скважины. На первом этапе образец нагружался до начального состояния всестороннего сжатия 27 МПа. Интервал отбора керна составил 2530 м, начальная проницаемость 12,1 мД. Уже при небольших касательных напряжениях порода перешла к неупругому деформированию, что также отразилось и на проницаемости образца.

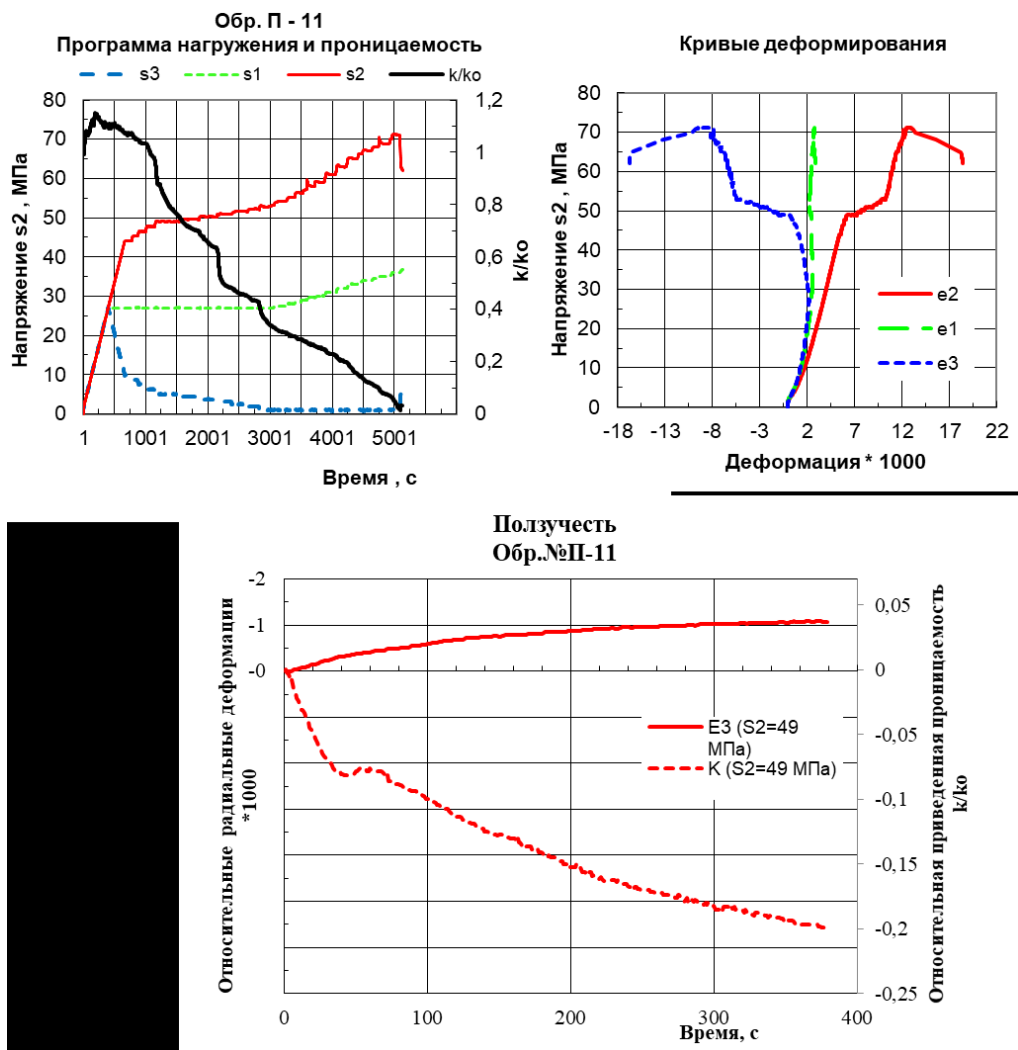


Рис. 34. (а) – Программа нагружения и кривая проницаемости образца П-11, (б) - Кривые деформирования образца, (в) – Кривые ползучести образца

На начальном этапе обжатия проницаемость изменялась незначительно, однако при создании неравномерной нагрузки начала стремительно падать. Во время пластического деформирования скорость падения резко возросла, после чего на коротком этапе снизилась до предыдущего значения. К концу эксперимента проницаемость приняла практически нулевое значение. То есть порода полностью потеряла свои фильтрационные свойства. Разрушение образца произошло на этапе создания депрессии в скважине, в отличие от всех остальных испытанных образцов данного месторождения.

В ходе эксперимента измерялась ползучесть породы. Для этого нагружение было приостановлено при нескольких значениях кольцевой компоненты напряжений. На рис. 34в показана кривая ползучести с наиболее

заметным ростом деформаций; видно, что наблюдалось интенсивное затухающее деформирование ползучести. Проницаемость во время такого деформирования продолжала уменьшаться, как и в ходе всего опыта в целом.

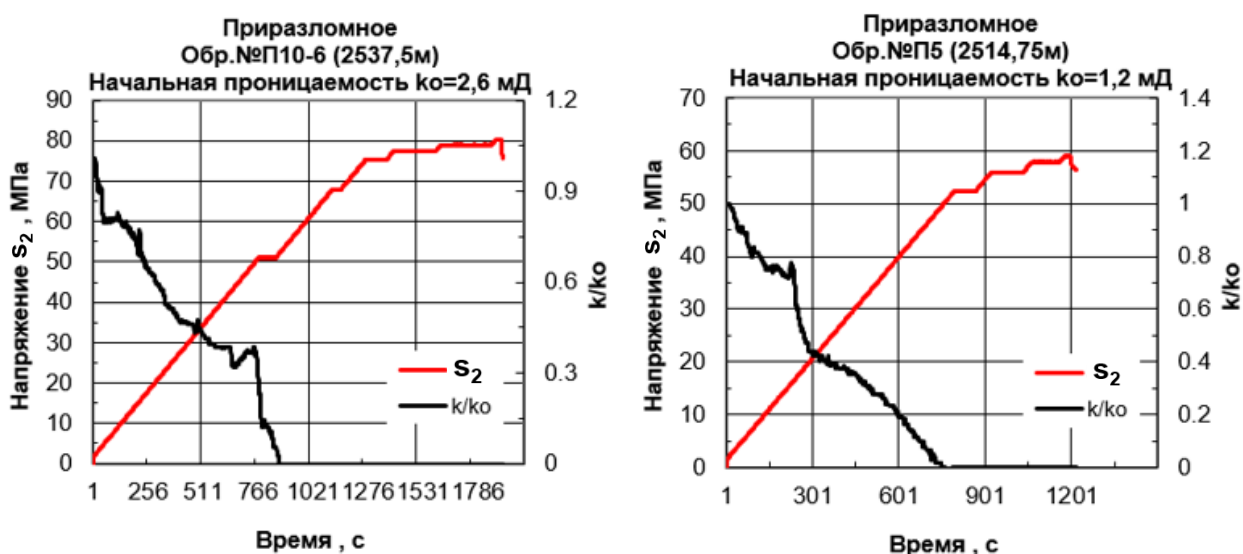


Рис. 35. Кривые проницаемости образцов №П10-6, №П5

Поведение проницаемости с ростом касательных напряжений, характерное для пород третьей категории, наглядно представлено на образцах №П10-6, №П5 (рис. 35). Образец №П10-6 Приразломного месторождения обладал малой начальной проницаемостью 2,6 мД, которая полностью исчезла еще до середины опыта. В образце произошло полное закрытие системы фильтрационных каналов. При этом образец выдерживал более высокие нагрузки, чем другие, и разрушился лишь при 80 МПа кольцевой составляющей нагружения. Аналогичные свойства проницаемости показал образец №П5. Обладая небольшой начальной проницаемостью, он деформировался неупруго почти с самого начала нагружения и полностью потерял проницаемость уже при 50 МПа. Разрушение этих образцов Приразломного месторождения произошло при значениях напряжения S₂, отвечающих отрезкам АВ программы нагружения на рис. 14. Проведенные исследования позволяют сделать вывод, что для сохранения проницаемости в испытанных породах нельзя допускать возникновения высокого уровня

касательных напряжений, т.е. нужно обеспечить разгрузку породы от касательных напряжений при бурении.

4.2.2. Киринское месторождение

Картина изменения проницаемости, характерная для пород третьей категории, наблюдалась при испытаниях 3 образцов из продуктивного пласта Киринского месторождения.

Образец №K1 Киринского месторождения, взятый с глубины 2776 м (рис. 36), обладал высокой начальной проницаемостью в 5566 мД.

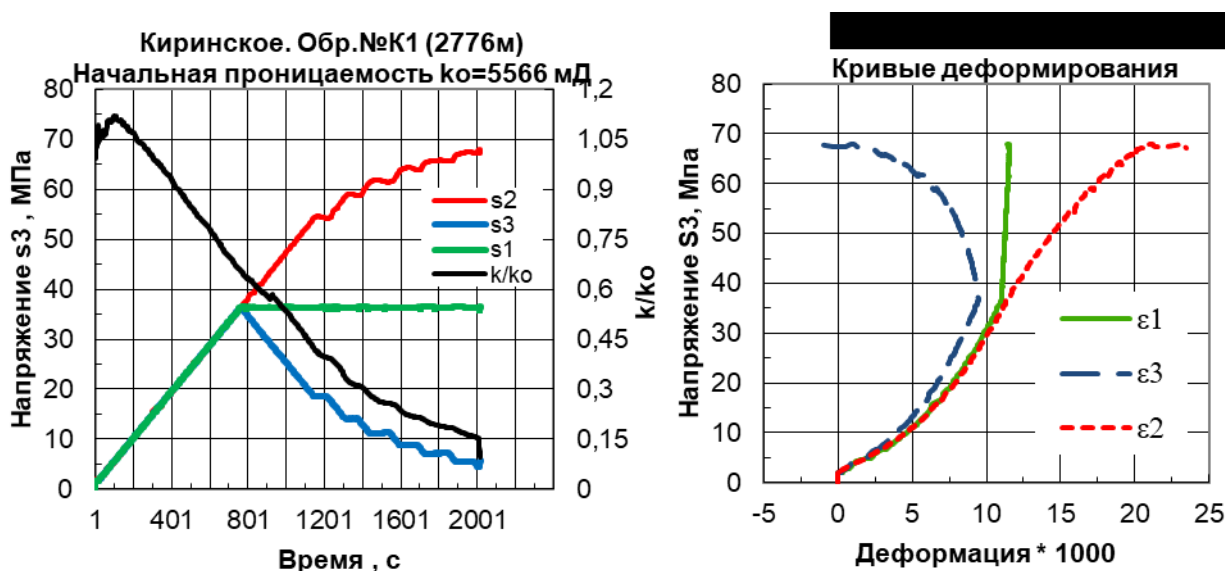


Рис. 36. Результаты испытаний образца K1

Как видно из кривых деформирования, образец очень быстро перешел к неупругому деформированию, которое сменилось абсолютно пластичным этапом. Проницаемость породы быстро, но монотонно падала. Причем скорость изменения проницаемости существенно не поменялась при переходе с этапа всестороннего обжатия на этап моделирования скважины. Рост касательных напряжений не оказал значительного влияния на характер изменения проницаемости. Скорость падения увеличилась только на этапе абсолютно пластического деформирования. Конечная проницаемость составила лишь 10% от начальной.

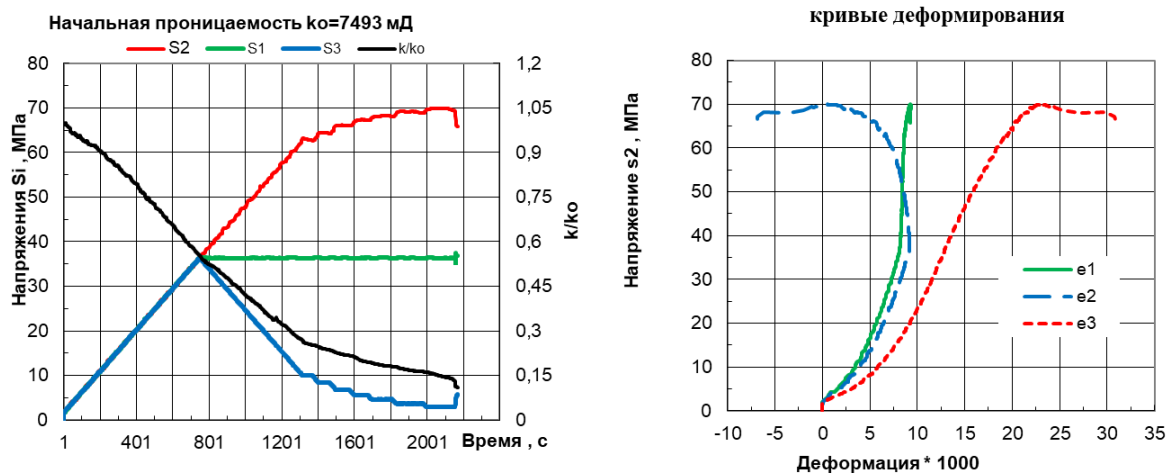


Рис. 37. Результаты испытаний образца K10

Интервал отбора керна образца №K10 – 2776 м, начальная проницаемость составила 7493 мД (рис. 37). Порода почти полностью потеряла проницаемость в сравнении с начальной в ходе испытания. Как и на описанном ранее образце, скорость изменения проницаемости не изменилась существенно при переходе ко второму этапу нагружения, то есть при возникновении и росте касательных напряжений. Проницаемость быстро падала как по мере роста всестороннего обжатия, так и при создании сложного трехосного напряженного состояния. Порода быстро перешла к неупругому деформированию. Из графика проницаемости видно, что скорость ее изменения в ходе опыта в целом уменьшается. Конечная проницаемость составила порядка 10% от начальной.

Вышеописанные факты, а также значение начальной проницаемости исследованных образцов, позволяют описать механизм изменения проницаемости следующим образом. Изначально данные породы обладали высокой проницаемостью, а, следовательно, пористостью. Поровое пространство занимало значительную долю объема образца. По мере всестороннего обжатия происходило значительное уменьшение объема порового пространства, и, как следствие, проницаемости, даже на упругом участке. По мере возникновения касательных напряжений этот процесс продолжился с немного меньшей скоростью за счет разгрузки одной из осей

образца и продолжения интенсивного деформирования только вдоль одной оси. На этапе пластического и абсолютно пластического деформирования происходило полное закрытие части фильтрационных каналов, о чем также свидетельствует резко увеличение скорости падения проницаемости перед разрушением. В целом в ходе эксперимента образцы значительно деформировались, причем относительная деформация была в среднем больше, чем у пород, отнесенных ко второй категории. Разрушение происходило в основном при больших значениях касательных напряжений по сравнению с породами второго типа и сопровождалось длительными пластическими деформациями. Последний образец, отнесенный к породам третьей категории, обладал близкой к нулевой проницаемостью, которая на самом начальном этапе полностью исчезла. Образец деформировался неупруго и быстро разрушился.

Далее представлены сводные результаты испытаний пород каждого месторождения. Выводы по результатам исследований описаны в разделе 4.5.

4.3. Сводные результаты испытаний

Приразломное месторождение. В таблицах 2 и 3 приведены сводные результаты проведенного моделирования для пород Приразломного месторождения. В рамках данной работы были отобраны 18 образцов пород Приразломного месторождения. Исследования заключались в физическом моделировании процессов деформирования и разрушения породы в окрестности скважины при ее эксплуатации, изучении влияния действующих в окрестности скважины напряжений на фильтрационные свойства пород.

Были рассмотрены два случая начального напряженного состояния пласта для условий Приразломного месторождения:

1. В исходном состоянии порода находится в состоянии равномерного всестороннего сжатия горным давлением на данной глубине (боковой распор отсутствует).

2. Величина бокового горного давления составляет 40% от величины вертикального горного давления, т.е. коэффициент бокового распора равен 0,4.

В таблице 2 представлены результаты испытаний пород Приразломного месторождения при отсутствии бокового распора. Обозначения в таблице: K_0 – начальная проницаемость образцов, K/K_0 – отношение конечной (на момент разрушения образца) проницаемости к начальной, S_3^* - величина напряжения S_3 , при котором произошло разрушение образца.

Таблица 2. Результаты физического моделирования измерения проницаемости образцов при отсутствии бокового распора.

№ образца	Интервал по керну, м	Начальная проницаемость K_0 , мД	K/K_0	Напряжение S_3^* , МПа
ПЗ-4	2453,6	572	0,15	2,1
П5-4	2514,75	5,7	0,2	6,6
П7-4	2517	6,7	0,32	5,4
П6-4	2521	20.1	0,51	2,0
П11-4	2528,75	3,6	0,43	3,6
П11-5	2528,75	15	0,42	3,5
П-11	2530	12,1	0,03	Разруш. при депрессии
П10-4	2537,5	2,6	0,1	2,0
П1-4	2542,75	68	0,15	3,4
П2-4	2548,5	8,5	0,15	6,25
П8-4	2558	10,5	0,1	4,9
П4-4	2566,75	5,6	0,35	5,5

В таблице 3 представлены результаты испытаний пород Приразломного месторождения при наличии бокового распора. Обозначения в таблице: K_0 – начальная проницаемость образцов, K/K_0 – отношение конечной (на момент разрушения образца) проницаемости к начальной, S_3^* - величина напряжения S_3 , при котором произошло разрушение образца.

Таблица 3. Результаты физического моделирования и измерения проницаемости образцов при наличии бокового распора.

№ образца лабораторный	Интервал по керну, м	Начальная проницаемость K_0 , мД	K/K_0	Напряжение S_3^* , МПа
П5 р	2514,75	1,2	0	7,5
П7 р	2517	16,9	0,2	6,9
П-16 р	2530	20,3	8,0	4,4
П10-6 р	2537,5	2,6	0,1	2,2
П1-6 р	2542,75	0,75	0	5,4
П2-9 р	2548,5	8,2	0,12	6,5
П8-6 р	2558	0,23	0	4,2

Из таблиц видно, что для одинаковых глубин залегания при наличии бокового распора разрушение образцов происходило в основном при более высоких значениях напряжения S_3^* . Разрушение образцов произошло при значениях напряжения S_3 , отвечающих отрезкам АВ на рис. 11.

Киринокое месторождение. В таблице 4 приведены сводные результаты проведенного моделирования для пород Киринокое месторождения. Всего было исследовано 9 образцов пород Киринокое месторождения. Испытания заключались в изучении фильтрационных и деформационных свойств пород, а также их зависимости от реально возникающих на стенках необсаженной скважины напряжений при отсутствии бокового распора. Также изучалась эволюция проницаемости образцов во времени при неупругом деформировании (ползучести). Обозначения в таблице аналогичны предыдущим.

Таблица 4. Результаты физического моделирования и измерения проницаемости образцов для условий Киринокое месторождения.

№ образца	Интервал по керну, м	Начальная Проницаемость K_0 , мД	K/K_0	Напряжение S_3^* , МПа
К-10	2776	7493	0,11	2,9
К-4/2-1	2972	363	0,53	5,45
К-3/4	2872	59	1,4	7,3

К-2/2	2862	0	0	8,6
К-2/2-1	2862	20	0,36	5,1
К-1	2776	5566	0,1	4,5
К4-7	2972	1912	0,6	0,9
К-1/2	2776	4827	0,62	4,7
К-3/7	2872	74,9	1,3	Разруш. при депрессии

Разрушение образцов произошло при значениях напряжения S_3 , отвечающих отрезкам АВ на рис. 11.

Уренгойское месторождение. В рамках работы была проведена серия экспериментов по физическому моделированию механических и фильтрационных процессов в продуктивных пластах ачимовских отложений УГКМ при реализации процесса понижения давления в скважине. Всего был испытан 21 образец. Для части образцов также проводились исследования механизмов ползучести, а также влияния процесса ползучести на изменение фильтрационных свойств породы. Для условий Уренгойского ГКМ были проведены опыты по моделированию понижения давления в необсаженной скважине, а также в обсаженной скважине с перфорационным отверстием.

Сводные результаты испытаний пород ачимовских отложений Уренгойского ГКМ представлены в таблице 5. На основе экспериментальных данных были рассчитаны значения депрессий на забое скважины, приводящих к растрескиванию пород. Для каждого образца в таблице указаны: номер скважины; программа нагружения; глубина отбора керна; критические значения кольцевой составляющей напряжений; депрессии, приводящие к разрушению; начальная проницаемость.

Таблица 5. Сводные результаты испытаний пород Уренгойского месторождения.

№	Номер образца	Скважина №	Программа нагружения	Глубина отбора, м	S_0 , МПа	Δp , МПа	k_0 , мД
1.	А-6	1	Открытый ствол	3836	115	24	3.7
2.	А-11	1	Перфорация	3836	85	21.6	0.2

3.	А-4	1	Перфорация	3825	90	30	0.18
4.	А-5	1	Открытый ствол	3825	92	16	0.13
5.	А-8	1	Открытый ствол	3825	не разруш		0.14
6.	А-10	1	Перфорация	3794	82	25.4	2.41
7.	А-3	1	Открытый ствол	3794	63	22	2.41
8.	А-2	1	Открытый ствол	3793	68	4.8	1.61
9.	А-7	1	Открытый ствол	3793	81	11.3	1.61
10.	А-1	1	Открытый ствол	3766	110	26.4	2.02
11.	А-9	1	Перфорация	3766	105	38.8	2.04
12.	А-17	2	Перфорация	3727	98.5	40.1	0.027
13.	А-22	2	Перфорация	3730	98.5	40.1	0.1
14.	А-32	2	Перфорация	3740	не разруш		0.001
15.	А-42	2	Открытый ствол	3730	88.3	33.3	0.1
16.	А-52	2	Перфорация	3749	не разруш		0.013
17.	А-61	2	Открытый ствол	3730	98.5	18.6	0.5
18.	Ач-6	3	Открытый ствол	3625	61.6	5.5	34.8
19.	Ач-7.3	3	Открытый ствол	3628	74.6	12.4	18.9
20.	Ач-7.4	3	Перфорация	3628	71	22.4	24.1
21.	Ач-10	3	Перфорация	3630	85.5	31.7	22.5

Разрушение пород при моделировании открытого ствола скважины в среднем происходило при меньших депрессиях, однако для однозначного вывода об оптимальной конструкции забоя для данных условий требуется большее количество испытаний. Деформирование образцов при моделировании обеих конструкций забоя было в основном упругим вплоть до разрушения. При этом характер разрушения пород преимущественно хрупкий. Проницаемость образцов незначительно менялась в ходе изменения напряженно-деформированного состояния вплоть до растрескивания. Ползучесть проявлялась при приближении к критическим значениям напряжений и приводила к растрескиванию, разрушению породы.

Анализ результатов испытаний позволил выявить закономерности в изменении фильтрационных свойств изучаемых терригенных пород ачимовских отложений в ходе моделирования. По результатам испытаний

предложена феноменологическая модель эволюции проницаемости исследованных терригенных пород ачимовских отложений в процессе вязкоупругопластического деформирования при моделировании понижения давления в скважине:

- 1) Первый этап характеризуется снижением проницаемости в результате компакци при всестороннем равномерном сжатии и дальнейшему переходу к напряженному состоянию в окрестности скважины при нулевой депрессии, которое сопровождается появлением касательных напряжений. Для некоторых пород, в частности алевролитов, снижение фильтрационных свойств на данном этапе было незначительно в силу изначально малой проницаемости и меньшей интенсивности деформирования. В процессе появления касательных напряжений скорость падения проницаемости уменьшалась.
- 2) На втором этапе проницаемость пород не изменялась либо ее изменение было незначительно по сравнению с другими этапами. Данный этап связан с началом процесса понижения давления в скважине, сопровождающимся дальнейшим ростом касательных напряжений в образце. Во время данного этапа породы деформировались либо упруго, либо происходил переход к неупругому деформированию.
- 3) На третьем этапе инициируется постепенный рост проницаемости. Начало этапа связано с ростом в породах касательных напряжений, приводящих к заметным деформациям ползучести и росту объемной деформации.
- 4) На четвертом этапе наблюдается скачкообразный рост проницаемости, связанный с появлением и развитием макротрещин в образцах, что может происходить либо в результате достижения критических значений либо касательными напряжениями, либо деформациями в результате незатухающей ползучести.

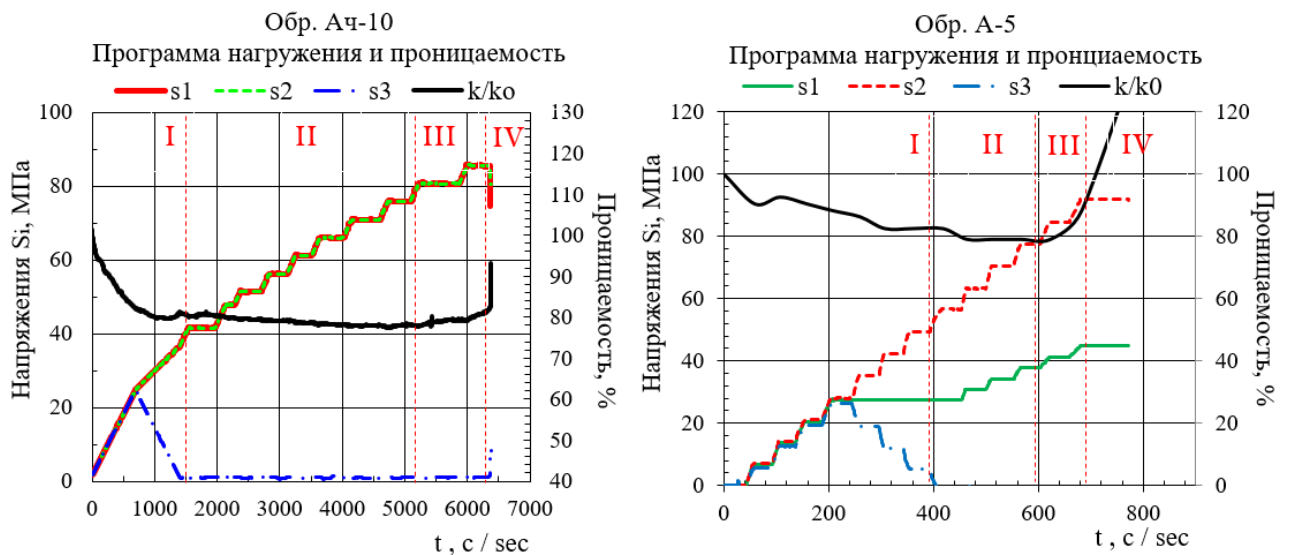


Рис. 38. Изменение приложенных напряжений и проницаемостей образцов Ач-10 и А-5 ачимовских отложений

На рис. 38, 39 в качестве примера представлены программы нагружения, кривые изменения проницаемостей и кривые деформирования образцов Ач-10 и А-5 ачимовских отложений с разделением на этапы в рамках предложенной модели. Образец Ач-10 был испытан по программе перфорационного отверстия, образец А-5 – по программе необсаженной скважины. Образец Ач-10 взят с глубины 3629.8 м и обладал начальной проницаемостью 22.5 мД. Образец А-5 изготовлен из керна другой скважины с глубины 3825 м и обладал начальной проницаемостью 0.13 мД.

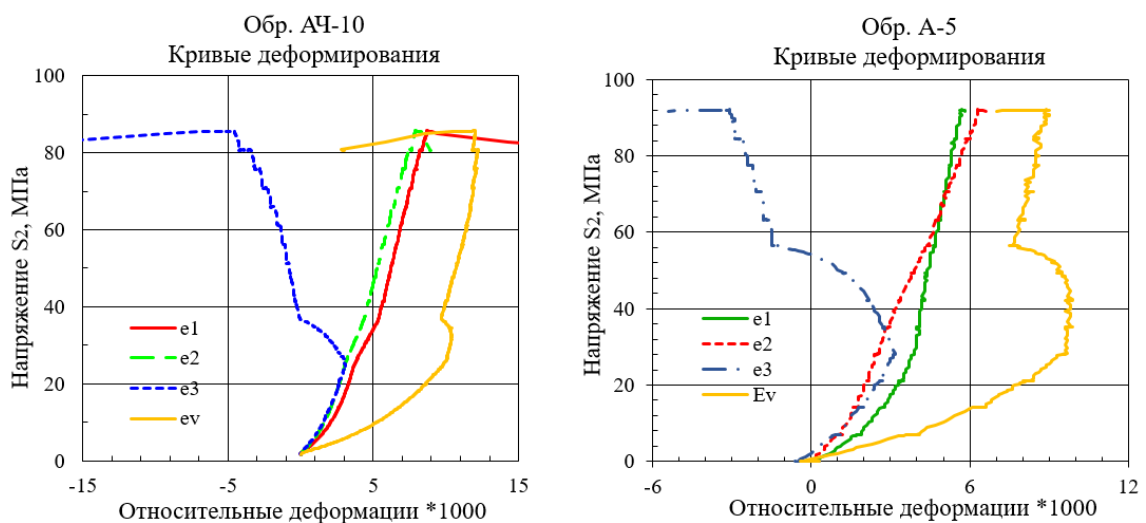


Рис. 39. Кривые деформирования и кривые объемной деформации образцов Ач-10 и А-5

На первых двух этапах деформации были преимущественно упругими. При переходе к третьему этапу по мере увеличения касательных напряжений инициируется рост проницаемости, протекающий с увеличением объемной деформации и соответствующий некоторой величине депрессии. При переходе к четвертому этапу наблюдается скачкообразное увеличение деформаций, связанное с растрескиванием породы, и резкое увеличение проницаемости.

Корреляционный анализ результатов. Анализируя полученные зависимости ползучести и проницаемости для каждого из месторождений можно заметить, что оба процесса протекают схожим образом, то есть имеет место корреляция. Для определения факта связи данных процессов, а также установления тесноты данной связи были применены базовые методы статистического анализа, в частности, корреляционного анализа.

Для каждой пары кривых ползучесть-проницаемость вычислялся линейный коэффициент корреляции. Данный метод применяется для исследования взаимосвязи двух величин и характеризует тесноту линейной связи между ними. Линейный коэффициент корреляции (или коэффициент корреляции Пирсона) представляет собой отношение выборочного коэффициента ковариации к произведению выборочных средних квадратических отклонений:

$$r_{XY} = \frac{\text{cov}_{XY}}{\sigma_X \sigma_Y} = \frac{\sum(X - \bar{X})(Y - \bar{Y})}{\sqrt{\sum(X - \bar{X})^2 \sum(Y - \bar{Y})^2}}.$$

Для примера в таблице 6 представлены сводные результаты корреляционного анализа для трех образцов Киринского месторождения. Для каждого образца указаны кольцевые и радиальные компоненты напряжений, при которых осуществлялась остановка нагружения и выполнялись измерения ползучести. Посчитаны рассчитанные коэффициенты корреляции между деформациями в радиальном направлении (ось разгрузки) и изменением проницаемости.

Таблица 6. Коэффициент корреляции между изменением проницаемости и ростом радиальных деформаций ползучести пород Киринского месторождения

К-4/7			К-3/7			К-1/2		
Фикс. кольцевое напряжение S_2 , МПа	Фикс. радиальное напряжение S_3 , МПа	Коэф. корреляции r	Фикс. кольцевое напряжение S_2 , МПа	Фикс. радиальное напряжение S_3 , МПа	Коэф. корреляции r	Фикс. кольцевое напряжение S_2 , МПа	Фикс. радиальное напряжение S_3 , МПа	Коэф. корреляции r
64.7	12.8	0.715	63.9	11	-0.419	57.8	14.8	0.937
67.6	10.8	0.724	67	8	-0.287	63.9	8.7	0.984
75.4	3.2	0.859	68.8	6	-0.312	64.9	7.7	0.829
75.9	2.7	0.916	70.2	5	0.881	66	6.7	0.966
76.4	2.2	0.960	70.6	4.5	-0.981	67.1	5.7	0.993
76.9	1.7	0.992	72.3	3	-0.511	67.8	4.7	0.960
77.3	1.2	0.995	73.3	2	-0.904			
			74.3	депрессия	0.845			
			79.4	депрессия	0.655			
			88.5	депрессия	0.978			

Как видно из таблицы, значения коэффициента корреляции в подавляющем большинстве близки к единице. Высокий коэффициент свидетельствует о сильной прямой (положительный знак) или сильной обратной связи (отрицательный знак) между величинами. Например, для описанного образца К-4/7 корреляция получена положительная, так как при деформировании образца в направлении разгрузки проницаемость уменьшалась с отрицательным ростом деформаций. Как можно заметить, остановки при 64.7 и 67.6 МПа в образце К-4/7 демонстрируют менее тесную связь (однако так же высокую), чем остановки при большем уровне касательных напряжений. Это может быть связано с различными этапами деформирования образца и текущем соотношением упругих и неупругих

деформаций в образце: данные значения кольцевого напряжения соответствуют окончанию упругого этапа деформирования. Следовательно, в этом диапазоне напряжений начинается развитие неупругих деформаций, которые, как известно, оказывают ключевое влияние на изменение фильтрационных свойств пород. Аналогичные отличия между коэффициентами корреляции можно заметить и для других представленных образцов. Снижение коэффициентов корреляции для первых остановок нагружения в образце К-3/7 может быть объяснено аналогичным образом: данные этапы соответствуют окончанию упругого деформирования. Для некоторых образцов наблюдалось единичное снижение корреляций и на других этапах испытаний, что может быть объяснено процессами упрочнения и прочищения фильтрационных каналов в ходе пластических деформаций.

В таблице 7 представлены сводные результаты корреляционного анализа для трех образцов Приразломного месторождения. Для каждого образца указаны кольцевые и радиальные компоненты напряжений, при которых осуществлялась остановка нагружения и выполнялись измерения ползучести. Посчитаны коэффициенты корреляции между деформациями в радиальном направлении (ось разгрузки) и изменением проницаемости.

Таблица 7. Коэффициент корреляции между изменением проницаемости и ростом радиальных деформаций ползучести пород Приразломного месторождения

П5-4			П7-4			П7-6		
Фикс. радиальное напряжение S_3 , МПа	Фикс. кольцевое напряжение S_2 , МПа	Коэф. корреляции r	Фикс. радиальное напряжение S_3 , МПа	Фикс. кольцевое напряжение S_2 , МПа	Коэф. корреляции r	Фикс. радиальное напряжение S_3 , МПа	Фикс. кольцевое напряжение S_2 , МПа	Коэф. корреляции r
9.8	56	-0.92399	10.2	55.6	-0.92013	8.4	53.2	-0.98734
8.4	57.7	-0.97173	7.6	58	-0.96272	7.9	55.6	-0.88066
6.5	59.2	-0.99254	5.7	60	-0.95143	7.3	57.8	-0.95225
						6.9	59.8	-0.99206

В таблице 8 представлены сводные результаты корреляционного анализа для трех образцов Уренгойского месторождения. Для каждого образца указаны кольцевые компоненты напряжений, при которых осуществлялась остановка нагружения и выполнялись измерения ползучести. Посчитаны коэффициенты корреляции между деформациями в радиальном направлении (ось разгрузки) и изменением проницаемости.

Таблица 8. Коэффициент корреляции между изменением проницаемости и ростом радиальных деформаций ползучести пород Приразломного месторождения

Ач-10		Ач-7.4		Ач-6	
Фикс. кольцевое напряжение S_2 , МПа	Коэф. корреляции r	Фикс. кольцевое напряжение S_2 , МПа	Коэф. корреляции r	Фикс. кольцевое напряжение S_2 , МПа	Коэф. корреляции r
56.2	0.531946	52.6	-0.52783	54.7	-0.71316
61	0.524044	65	-0.78787	61.6	-0.94118
66	0.398166	70.6	-0.77239		
70.7	-0.5021				
75.8	-0.91792				
80.7	-0.94373				
85.5	-0.95902				

Высокие значения корреляций как с положительным, так и с отрицательным знаками в рамках одного исследуемого образца, говорят о тесноте связи между деформациями и проницаемостью несмотря на различие протекающих в породе процессов в ходе нагружения. На разных этапах нагружения наблюдаются высокие корреляции как при падении проницаемости с ростом деформаций, так и ее увеличении (причем как постепенном, так и скачкообразном). В среднем наибольшая корреляция в каждом опыте наблюдалась во время этапов интенсивного деформирования ползучести, а также во время развития деформаций, приводящих к разрушению.

В общем случае, наличие корреляционной зависимости, определенной данным образом, отражает только факт и силу взаимосвязи между параметрами и не говорит о причинно-следственных связях, так как может иметь место третий фактор, посредством которого связаны исследуемые зависимости. Несмотря на то, что согласно классическим моделям, изменение проницаемости вызывается непосредственно изменением структуры порового пространства посредством деформирования породы, для однозначного установления и изучения причинно-следственной связи необходимо проведение комплексных исследований, включающих томографию горных пород, регистрацию акустической эмиссии. Данные методы планируются использовать в дальнейших исследованиях. Помимо сказанного, снижение коэффициента корреляции может быть связано с наличием более сложной, нелинейной, связи между изучаемыми свойствами, что не может быть отражено в рамках линейного анализа. Проведенный в рамках данного исследования линейный регрессионный анализ также указывает на возможную нелинейную связь на разных этапах деформирования для некоторых образцов.

4.4. Обсуждение результатов

Измерение проницаемости исследуемых пород в ходе неравнокомпонентного нагружения показало существенную зависимость фильтрационных характеристик пород Приразломного и Киринского месторождений от напряженно-деформированного состояния. Изменение проницаемости пород ачимовских отложений по мере роста касательных напряжений демонстрировало меньшую чувствительность к напряженно-деформированному состоянию, однако для каждого типа пород можно выделить общий характер изменения фильтрационных свойств, описанный в предложенной феноменологической модели. Такой характер изменения проницаемости хорошо коррелирует с результатами, полученными при многолетнем изучении свойств кобургского известняка канадскими

исследователями в работе [17]. Авторами исследовано изменение фильтрационных свойств пород при трехосном нагружении. Отмечается, что эволюция проницаемости изучаемых образцов при нагружении следует определенным закономерностям. Начальный участок кривых проницаемости характеризовался более высокими значениями проницаемости. На втором участке наблюдалось ухудшение фильтрационных свойств по мере испытания. На третьем участке заметно увеличение проницаемости еще до достижения предела прочности, что авторы связывают с возникновением и сливанием микротрещин. На постпредельном этапе исследователи наблюдали либо увеличение, либо уменьшение проницаемости в зависимости от того, возникает ли сеть макротрещин в образце или происходит вязкое деформирование аналогично пластилину. Проницаемость, измеренная после разрушения некоторых образцов, была на 2-3 порядка выше начальной. В более ранней работе данного коллектива [63] также отмечается схожий характер изменения проницаемости при трехосных испытаниях известняков с последующей разгрузкой образцов. Проницаемость испытанных пород уменьшалась при невысоких нагрузках, однако по мере роста напряжений наблюдалось кратное увеличение проницаемости по сравнению с начальной. Причем после полной разгрузки образцов проницаемость оставалась высокой. Авторы объясняют это появлением сети микро- и макротрещин в образцах пород. Также указывается, что зависимость проницаемости от уровня касательных напряжений, коррелирует с эволюцией скорости упругих волн в ходе испытаний.

Изучаемые в работе процессы знакопеременного изменения проницаемости рассматривались в недавних работах [60, 61] на примере сложнопостроенных карбонатных коллекторов Припятского прогиба. Среди исследуемых пород присутствовали как низкопроницаемые, так и относительно высокопроницаемые породы, аналогично представленным в работе. Исследователями также было зафиксировано двойственное поведение фильтрационных свойств при нагрузке образцов. Сделан вывод о том, что под

воздействием депрессий в пласте и последующего восстановления давления в коллекторах трещинного типа протекают два взаимопротивоположных процесса: с одной стороны, происходит смятие контактов и смыкание трещин, вызывающее ухудшение проницаемости развитой системы трещин, а с другой - деформация блоков трещинного коллектора, которая приводит к развитию имеющихся микротрещин и образованию новых. Степень влияния каждого из процессов зависит от внутренней структуры породы. Стоит отметить, что авторами наблюдалось резкое уменьшение проницаемости в низкопроницаемых коллекторах в условиях изменения пластового давления, и увеличение проницаемости в относительно высокопроницаемых, что может быть связано с изначальной трещиноватостью коллектора, породы которого изучались в работах, что является отличием с описанными ранее результатами.

Полученные в настоящей работе данные о влиянии процесса ползучести на фильтрационные характеристики пород хорошо коррелируют с описанным в статье [91] поведением проницаемости мрамора в ходе длительного трехосного нагружения. Газопроницаемость, описанная в данной статье, демонстрирует фазу уменьшения при начальной девиаторной нагрузке и начинает увеличиваться при критическом напряжении, соответствующем начальному пределу текучести мрамора при испытаниях на трехосное нагружение. Несмотря на существенную разницу в длительности испытаний, характер кривой проницаемости оказывается схожим, в том числе с присутствием участков скачкообразного роста при переходе от установившегося режима ползучести к ускоренной ползучести. Также подтверждается постепенное уменьшение проницаемости в ходе пластического деформирования, как это наблюдалось для пород третьей категории. В рамках проведенных исследований авторами был сделан вывод, что изменение проницаемости пород более чувствительно к изменению напряженного состояния, чем изменение деформаций. Полученные же в настоящей работе данные показали, что изменение проницаемости в целом имеет характер изменения близкий к характеру роста деформаций. То есть

скорость падения проницаемости тесно коррелирует со скоростью роста деформаций, поэтому сделать однозначный вывод о большей чувствительности к напряжениям нельзя.

Для некоторых образцов опыты показали снижение скорости накопления неупругих деформаций с ростом напряжения. Такое поведение можно объяснить в терминах распространенных теорий ползучести, таких как теория упрочнения [92, 93]. Согласно данной теории, процесс развития деформаций ползучести определяется не только уровнем напряжений, но и величиной накопленных неупругих деформаций, либо полных, либо связанных только непосредственно с ползучестью, т.е. за исключением мгновенно возникающих пластических деформаций [92]. Так в режиме затухающей ползучести после достаточно долгой выдержки образца под действием определенных напряжений, при небольшом увеличении прикладываемых напряжений существенный рост деформаций ползучести не наступает. Согласно традиционному методу описания роста деформаций ползучести в терминах теории упрочнения, при приложении напряжений определенного уровня дальнейшее деформирование следует определять, начиная от точки, соответствующей уровню уже накопленных деформаций ползучести [92]. Таким образом, при скачкообразном увеличении напряжений рост деформаций ползучести, согласно теории упрочнения, будет тем меньше, чем меньше относительная величина скачка и чем длительнее была выдержка на предыдущих этапах.

Характер деформирования ползучести горных пород в условиях сложного истинно трехосного нагружения, аналогичный полученному в данной работе, описан в недавних работах [47-49]. Проведенные исследователями истинно трехосные испытания Цзинпинского мрамора показали, что дилатансия образцов в основном проявлялась вдоль направления минимального прикладываемого напряжения с увеличением максимального главного напряжения. Зафиксировано, что при значениях максимального главного напряжения меньших предела длительной прочности породы, проявляется

только начальная стадия ползучести. При достижении максимальным напряжением предела длительной прочности образец демонстрирует установившийся режим ползучести. Из-за короткого времени нагружения как в данном, так и в описанном авторами исследовании, при докритических нагрузках активная стадия ползучести не развивается, однако дальнейшее увеличение максимального главного напряжения приводит к возрастанию скорости ползучести и появлению третьей стадии ползучести, сопровождающейся разрушением образцов.

Постепенное увеличение проницаемости, потенциально вызванное ростом количества микротрещин в хрупком материале, описанное в статье [94], часто наблюдалось на образцах ачимовских отложений в ходе проведенных в рамках диссертации опытов. В упомянутой работе описываются механизмы роста проницаемости при нагружении хрупких материалов, одним из первых среди которых является рост числа микротрещин, по мере которого иницируется постепенное улучшение фильтрационных свойств. Ориентация, рост и связность таких трещин зависят от свойств материала и способа нагружения. Влияние этапа развития и раскрытия микротрещин на рост проницаемости изучаемых пород может быть незначительным в силу его кратковременности или особенностей ориентации возникающих трещин вследствие специфической траектории нагружения. Плавное изменение проницаемости может заметнее проявляться при длительной выдержке породы на докритических нагрузках.

Полученные результаты измерения проницаемости ачимовских отложений в условиях трехосного нагружения хорошо коррелируют с представленными исследованиями базальтовых хрупких пород в [95], несмотря на различия приложенных полей напряжений. Авторы описывают изменение проницаемости образцов в три этапа по мере приложения неравномерной нагрузки: незначительное уменьшение проницаемости, связанное с изначальной закрытостью микротрещин в породе и/или их малой исходной плотностью; отсутствие изменения проницаемости, связанное с

упругим деформированием образцов; значительное постепенное увеличение проницаемости, вызванное раскрытием, слиянием микротрещин и их соединением с сетью исходных фильтрационных каналов. Изучаемые породы ачимовских отложений демонстрировали как полностью аналогичный данному постепенный характер изменения проницаемости, так и стремительное развитие третьего этапа и резкий переход к возникновению макротрещин, что может быть связано как с особенностями внутренней структуры исследуемых пород, так и с существенной неравномерностью поля напряжений в проведенном моделировании.

Исследованные в данной работе высокопроницаемые образцы в целом показали уменьшение фильтрационной способности в ходе нагружения независимо от категории породы. Однако степень изменения проницаемости была различной. Аналогичный результат был получен авторами исследования по изучению влияния пластового давления на фильтрационные свойства терригенных коллекторов в работах [96, 97]. Исследователями был сделан вывод о том, что чем выше изначальная проницаемость породы, тем быстрее происходит падение проницаемости. То есть относительная величина остаточной проницаемости определяется величиной абсолютной проницаемости.

4.5. Выводы и практические рекомендации

Проведенные исследования подтверждают тот факт, что напряжения в призабойной зоне пласта могут оказывать как положительное, так и отрицательное влияние на фильтрационные свойства пласта и продуктивность скважин. Таким образом, предварительные исследования свойств породы конкретного месторождения и проведение соответствующих расчетов могут позволить выбрать конструкцию забоя и величину создаваемых на забое давлений, которые обеспечивают максимальные дебиты скважин. Для этого могут использоваться полученные ранее знания о моделях изменения проницаемости при неравномерном нагружении.

Измерение проницаемости исследуемых пород Приразломного и Киринского месторождений в ходе неравнокомпонентного нагружения показало существенную зависимость фильтрационных характеристик от напряженно-деформированного состояния.

Проведенные испытания указывают на то, что неравномерность поля начальных напряжений в пласте достаточно сильно влияет на процессы деформирования и разрушения горных пород. Установлено, что наличие бокового распора влияет на устойчивость стенок скважины. Возникающие на стенках скважины напряжения при наличии бокового распора могут вызывать разрушение пород в призабойной зоне при больших значениях радиальной компоненты напряжений.

Ползучесть исследованных пород при докритических значениях максимального главного напряжения проявлялась незначительно и была затухающей, что характерно для начальных этапов развития ползучести. В силу недостаточной длительности нагружения Установившийся режим ползучести либо отсутствовал, либо был непродолжительным, быстро приводя к появлению третьей стадии ползучести. При проявлении дилатансии увеличение объемной деформации образцов в основном наблюдалось вдоль направления минимального прикладываемого напряжения. Обращает на себя внимание то, что, как минимум для исследуемого диапазона времен, переход от ограниченной к неограниченной ползучести соответствует достаточно узкому интервалу изменения напряжений. Безусловно, проведенные испытания соответствуют режиму краткосрочной ползучести (порядка минут или десятков минут). При уровнях напряжений, предшествующих наблюдаемому в экспериментах переходу к неограниченной ползучести, можно ожидать подобного перехода при более длительных временах. Исследование данного явления является предметом будущих исследований.

Влияние процесса ползучести на изменение проницаемости проявляется различно при разных уровнях касательных напряжений. До достижения критической величины касательных напряжений, ползучесть пород была

быстро затухающей, вследствие чего влияние на фильтрационные свойства незначительно. Проницаемость при этом либо несущественно уменьшается (что может быть связано со сдвигом зерен и их более плотной упаковкой), либо остается на одном уровне. На активном этапе ползучести приводит к увеличению проницаемости, причем как монотонному, так и скачкообразному. Резкий рост проницаемости связан с образованием и развитием макротрещин в материале и протекает параллельно с ускорением развития ползучести.

Результаты экспериментов подтверждают факт, что процесс ползучести горных пород может существенно отличаться от механизма ползучести металлов на разных стадиях проявления. В ходе длительного деформирования горных пород могут происходить изменение внутренней структуры образца, смещение и перекомпоновка зерен матрицы, увеличение порового пространства за счет дилатансии, появление микро- и макротрещин, вынос песка, проявление вязких свойств цемента (при наличии глинистых примесей) или неоднородности структуры породы и т.д. Поэтому описание ползучести горных пород на основе теории деформирования металлов может применяться скорее для рассмотрения ранних этапов ползучести. Для точного описания процессов длительного деформирования в горных породах необходимы новые модели, основанные на результатах экспериментальных исследований ядерного материала в условиях, приближенных к реальным.

Характер изменения фильтрационных характеристик со временем в ходе деформирования ползучести коррелирует с тенденцией роста деформаций. Проведенный корреляционный анализ указывает на наличие тесной связи между этими процессами, причем коэффициенты корреляций велики как в случаях прямой, так и обратной связи исследуемых процессов.

Постепенный рост проницаемости, зарегистрированный на части испытанных образцов может быть вызван дилатансией породы либо процессом развития макротрещин в ходе пластического деформирования. Эти результаты свидетельствуют о том, что одним из ключевых факторов для

реализации способности пород второй категории повышать фильтрационные свойства является не только уровень касательных напряжений, действующих в породе, но и длительность их действия. Правильный учет этого фактора при эксплуатации скважины может позволить не допустить разрушения стенок скважины либо повысить эффективность применения методов МУН, основанных на геомеханическом подходе.

Подтвержденное в опытах свойство пород второй категории сильно деформироваться («ползти») под действием возникающих в призабойной зоне скважины касательных напряжений может приводить к значительному падению дебита скважин. При увеличении депрессии на забое вокруг открытого ствола скважины или вокруг перфорационных отверстий образуется зона пониженной проницаемости, своего рода низко проницаемая «пробка», затрудняющая фильтрацию в скважину. Причем во многих случаях такая пробка образуется в окрестности скважины при создании эксплуатационных депрессий. Возникает ситуация, когда по данным геофизических исследований нефти в пласте много, но она оттуда не идет. При дальнейшем увеличении депрессии, когда деформация достигает некоторой критической величины, порода в призабойной зоне скважины может начать растрескиваться. Это приводит к тому, что проницаемость призабойной зоны резко увеличивается, причем необратимо, и фильтрационные свойства породы в окрестности скважины не только восстанавливаются, но и значительно улучшаются. Таким образом способность пород второй категории резко увеличивать свою проницаемость может быть использована на практике для повышения продуктивности скважин [98, 99].

Если продуктивный пласт месторождения сложен породами третьей категории, единственным возможным выходом для сохранения естественной проницаемости является разгрузка пласта в окрестности скважины от касательных напряжений, что для открытого ствола сводится к уменьшению действующих в ее окрестности кольцевых напряжений.

Для скважин, пробуренных в породах первой категории, влияние напряжений на фильтрационные характеристики пласта невелико и может не учитываться при выборе режимов освоения и эксплуатации скважин

Результаты физического моделирования процессов деформирования и фильтрации в породах ачимовских отложений Уренгойского ГКМ показывают, что исследованные породы относятся ко второй категории, и путем создания необходимого напряженного состояния в окрестности скважины возможно вызвать растрескивание породы, приводящее к значительному увеличению проницаемости. Сделана предварительная оценка величин депрессий, необходимых для реализации механизма повышения проницаемости. При эксплуатации скважин, пробуренных на ачимовские отложения, депрессия на забое составляет 24 - 26 МПа. Кроме того, согласно принятой технологии освоения скважин на Уренгойском ГКМ после освоения скважина ставится на продувку – она работает на факел или через штуцер, или через открытый конец. При этом депрессия на забое достигает 50 и более МПа. Поэтому полученные в результате испытаний кернового материала на установке ИСТНН величины депрессий, необходимые для реализации метода НРП – 20-40 МПа, вполне достижимы для условий Уренгойского ГКМ. Вывод о возможности увеличения проницаемости призабойной зоны путем создания депрессии достаточно высокого уровня подтверждается также наблюдавшимися на практике случаями, когда в процессе бурения (скважины при этом еще не обсажены) возникали аварийные ситуации, связанные со значительным поглощением бурового раствора на забое скважины и, как следствие, значительным понижением забойного давления. Это приводило к выносу породы из скважин и резкому росту дебита скважин. В результате дебит аварийных скважин при эксплуатации достигал 2 млн.м³ газа при обычных дебитах на порядок меньше.

Одним из факторов при реализации способности пород второй категории увеличивать проницаемость является правильный выбор геометрии забоя скважины. Разрушение пород при моделировании открытого ствола скважины

в среднем происходило при меньших депрессиях, однако для однозначного вывода об оптимальной конструкции забоя для данных условий требуется большее количество испытаний. Деформирование образцов при моделировании обеих конструкций забоя было в основном упругим вплоть до разрушения. При этом характер разрушения пород преимущественно хрупкий. Проницаемость образцов незначительно менялась в ходе изменения напряженно-деформированного состояния вплоть до растрескивания. Ползучесть интенсивно проявлялась только при приближении к критическим значениям напряжений и приводила к растрескиванию, разрушению породы.

Для более полного изучения изменения проницаемости в ходе изменения напряженно-деформированного состояния необходимо проведение широкого спектра различных лабораторных исследований, а также разработка математических моделей, описывающих данные процессы с учетом совместного геомеханического, гидродинамического и геохимического моделирования.

Заключение

В работе проведены исследования фильтрационных, деформационных и реологических свойств пород шельфовых нефтегазовых месторождений Киринское и Приразломное, а также низкопроницаемых пород Уренгойского ГКМ, на установке истинно трехосного нагружения в условиях реальных напряжений, возникающих в призабойной зоне скважин. Изучен характер изменения проницаемости и процессов ползучести горных пород под действием неравномерного напряженно-деформированного состояния пласта, их взаимовлияния. Результаты экспериментальных исследований представлены в рамках предложенной в Институте проблем механики РАН условной классификации горных пород по реакции на возникающие в них касательные напряжения.

Проведен анализ напряженного состояния в призабойной зоне пласта для разных пластовых условий и конструкций забоя. Определена степень

анизотропии упругих свойств исследуемых пород. Созданы программы нагружения на установке ИСТНН, соответствующие реальным условиям для каждой породы. Проведено физическое моделирование процессов деформирования и фильтрации при изменении неравнокомпонентного напряженного состояния, в том числе моделирование процесса ползучести.

Моделирование процесса понижения давления в скважине для условий Приразломного месторождения выполнено для двух исходных состояний пласта: случая равномерного всестороннего изначального горного давления, а также для случая наличия в пласте бокового распора, равного 0.4. Показано, что разрушение пород Киринского и Приразломного месторождений происходило в основном при давлениях на забое скважины выше пластовых.

Для условий Уренгойского ГКМ были проведены опыты по моделированию понижения давления в необсаженной скважине, а также в обсаженной скважине с перфорационным отверстием. Предложена феноменологическая модель эволюции проницаемости при понижении давления в скважине.

Определены зависимости фильтрационных свойств различных типов горных пород от вида и уровня напряженно-деформированного состояния, с последующим описанием механизмов изменения проницаемости и развития ползучести. Показано, что предварительные исследования свойств породы конкретного месторождения и проведение соответствующих расчетов позволяют выбирать конструкцию забоя и величину создаваемых на забое давлений, которые обеспечивают максимальные дебиты скважин.

Показано, что учет явления ползучести горных пород при создании моделей и изучении деформационных свойств имеет большое значение при прогнозировании долговременной прочности скважин, особенно в случае необсаженного ствола. Установлено влияние ползучести на проницаемость горных пород из коллекторов ряда исследованных месторождений при напряженных состояниях, отвечающих реально возникающим в окрестности скважин при различных конструкциях их забоя. Показано, что характер

влияния зависит от величины и вида напряженного состояния, при котором она происходит. Установлено, что явление ползучести негативно сказывается на фильтрационных свойствах исследованных пород. Проницаемость пород-коллекторов возрастает (и значительно) вследствие ползучести в случае, если она со временем приводит к образованию в породе микро- и макротрещин или ее разрушению.

Установлено, что кривые изменения проницаемости изучаемых пород находятся в корреляционной зависимости с кривыми ползучести. Проведен статистический анализ полученных зависимостей: установлена корреляционная связь между характером роста деформаций ползучести и изменением проницаемости пород. Показано, что ползучесть может различным образом влиять на проницаемость пород в зависимости от характера происходящих при этом процессов: заплывание фильтрационных каналов, дилатансия, образование микро- и макротрещин. Одним из ключевых факторов для реализации способности некоторых пород к увеличению проницаемости является не только уровень и вид возникающих касательных напряжений, но и длительность их действия. Правильный учет этого фактора при эксплуатации скважины может позволить не допустить разрушения стенок либо повысить эффективность применения методов МУН, основанных на геомеханическом подходе.

На основе проведенных экспериментальных исследований реологических и фильтрационных свойств горных пород-коллекторов месторождений углеводородов и их взаимосвязи намечены подходы к повышению качества скважин. Для исследованных пород ачимовских отложений вычислены значения депрессий, при которых возможно реализовать увеличение проницаемости пород в призабойной зоне скважины. Сделан предварительный вывод о наиболее оптимальной конструкции забоя скважины при условиях данного месторождения.

Автор выражает искреннюю благодарность и признательность научному руководителю В.И. Кареву за постановку задачи, ценные советы, постоянные

внимание и поддержку на протяжении всех лет руководства. Автор благодарен всему коллективу лаборатории геомеханики ИПМех РАН, в особенности заведующему Ю.Ф. Коваленко за плодотворные обсуждения, неоценимую консультативную помощь и руководство экспериментом; Н.И. Шевцову и Ю.Н. Семенову за помощь в подготовке и проведении экспериментов; Т.О. Чаплиной за полезные замечания и всестороннее содействие. Отдельно хотелось бы выразить благодарность за наставничество и обучение технике эксперимента покойным А.А. Сиротину и Ю.В. Сидорину, создавшим возможность проведения данных исследований и безупречно осуществлявшим до последнего дня своей жизни техническое обслуживание и эксплуатацию экспериментального оборудования.

Публикации автора по теме диссертации:

1. Карев В. И., Химуля В.В., Шевцов Н.И. Экспериментальные исследования процессов деформирования, разрушения и фильтрации в горных породах // Известия российской академии наук. Механика твердого тела. 2021, № 5.
2. Karev V. I., Khimulia V. V. Physical modeling of deformation and filtration processes in low-permeability reservoir rocks when implementing the directional unloading method // E3S Web of Conferences. — 2021. — Vol. 266. — P. 01001.
3. Карев В. И., Коваленко Ю. Ф., Химуля В.В. Фильтрационные и реологические характеристики низкопроницаемых пород-коллекторов при моделировании направленной разгрузки пласта // Ученые записки физического факультета Московского Университета. — 2021. — № 2.
4. Карев В.И., Коваленко Ю.Ф., Химуля В.В., Шевцов Н.И. Применение на пластах-объектах хранения газа метода направленной разгрузки пласта // Газовая промышленность, №7, 2021.
5. Карев В. И., Химуля В. В., Коваленко Ю. Ф. Влияние напряжений на прочностные и фильтрационные свойства пород в окрестности горизонтальной скважины // Процессы в геосредах. — 2018. — № 1 (14). — С. 746–756.
6. Карев В. И., Химуля В. В. Влияние напряженно-деформированного состояния на фильтрационные характеристики пород–коллекторов

нефтегазовых месторождений // Ученые записки физического факультета Московского Университета. — 2018. — № 4. — С. 1840405.

7. Карев В. И., Коваленко Ю. Ф., Химуля В. В. Влияние деформационных процессов на проницаемость горных пород и устойчивость нефтяной скважины // Ученые записки физического факультета Московского Университета. — 2017. — № 4. — С. 1740501–1–1740501–7.

8. Химуля В.В. Лабораторное моделирование реологических и фильтрационных процессов в пластах подземных хранилищ газа при реализации метода направленной разгрузки пласта // Материалы Международного молодежного научного форума ЛОМОНОСОВ-2021. Москва, 2021.

9. Химуля В.В. Моделирование процессов деформирования и фильтрации при использовании метода направленной разгрузки пласта на скважинах, пробуренных на Ачимовские отложения // Физическое и математическое моделирование процессов в геосредах: Шестая международная научная конференция-школа молодых ученых; Сборник материалов. Москва, 2020. — С. 229–230.

10. Karev V., Khimulia V. Physical modeling of deformation and filtration processes in low-permeability reservoir rocks when implementing the directional unloading method // Topical Issues of Rational Use of Natural Resources Proceedings of the International Forum-Contest of Young Researchers 2020, St. Petersburg, Russia.

11. Карев В. И., Химуля В. В. Влияние напряженно-деформированного состояния на фильтрационно- емкостные характеристики пород-коллекторов // Физическое и математическое моделирование процессов в геосредах: Четвертая международная школа молодых ученых; 2018. Москва: Сборник материалов школы. С. 44–45.

12. Химуля В. В. Влияние деформационных процессов на проницаемость горных пород и устойчивость нефтяной скважины // Физическое и математическое моделирование процессов в геосредах: Третья международная школа молодых ученых. Сборник материалов школы. Москва, 2017. С. 213–214.

13. Химуля В. В. Влияние деформационных процессов на проницаемость горных пород и устойчивость нефтяной скважины // Материалы Международного молодежного научного форума Ломоносов-2017 М.: МАКС Пресс, 2017. — Москва: Москва, 2017. — С. 160–161.

14. Химуля В. В. Фильтрационные и реологические характеристики низкопроницаемых пород-коллекторов при моделировании направленной разгрузки пласта // Материалы Международного молодежного научного форума Ломоносов-2020. Москва, 2020.

15. Химуля В. В. Влияние напряженно-деформированного состояния на фильтрационно-емкостные характеристики пород-коллекторов // Материалы Международного молодежного научного форума Ломоносов-2018. Москва: 2018.

Список литературы

1. Карев В.И., Коваленко, Ю.Ф., Негомедзянов В. Р. и др. // Технологии ТЭК. 2004. № 5. С. 18-23.
2. Климов Д.М., Карев В.И., Коваленко Ю.Ф. // Механика Твёрдого Тела № 6, 2015, С. 39- 48.
3. Проекты ПАО «Газпром»: Приразломное месторождение // <http://www.gazprom.ru/about/production/projects/deposits/pnm/>
4. Дежина И.Г., Спасенных М.Ю., Фролов А.С. и др. Актуальные технологические направления в разработке и добыче нефти и газа: публичный аналитический доклад – М., БиТуБи, 2017.
5. Василькова Н.А., Горева А.А., Данильченко В.А. и др. Государственный доклад «О состоянии и использовании минерально-сырьевых ресурсов Российской Федерации в 2016 и 2017 годах». Министерство природных ресурсов и экологии Российской Федерации, 2018.
6. Селиванов К. С. Оценка прочности материала поверхности при его испытании методом «скретч-тест» // Вестник УГАТУ. 2015. Т. 19, № 1 (67). С. 100–106.
7. Karman T. Festigkeitsversuche unter allseitigem Druck // Z. ver. deutsch. Ing., 1911.
8. Böker R. Die Mechanik der bleibenden Formänderungen in Kristallinisch aufgebauten Körpern. Mitt. Forschungsarb. ver. deutsch. Ing., 1915, 175.
9. Воларович М.П., Томашевская И.С., Будников В.А. Механика горных пород при высоких давлениях. Деформационные и прочностные свойства. М.: Наука, 1979. 152 с.
10. Воларович М.П., Баяк Е.И. Влияние всестороннего давления до 4000 кг/см² на упругие свойства образцов горных пород // Докл. АН СССР. 1960. Т. 135. №1. С. 65–69.
11. Horibe T., Kobayashi R. Physical properties of coal-measures rocks under triaxial pressure // J. Min. Soc. Japan. 1958. Vol. 74. P. 142-146.
12. Paterson M.S. A high-pressure, high-temperature apparatus for rock deformation // Intern. J. Rock Mech. Mining Sci. 1970. Vol. 7. P. 517-526.
13. Zhang H., Li C.C. Effects of Confining Stress on the Post-Peak Behaviour and Fracture Angle of Fauske Marble and Iddefjord Granite // Rock Mech. Rock En. 2019. Vol. 52. P. 1377–1385. doi: 10.1007/s00603-018-1695-7.

14. *Zong Y, Han L, Jin Y, Zhao W, Meng L.* Experimental Investigation on the Post-Peak Short-Term and Creep Behavior of Fractured Sandstone // *Energies*. 2020. Vol. 13. P. 598. doi: 10.3390/en13030598
15. *Zong Y, Han L., Meng Q., Wang Y.* Strength properties and evolution laws of cracked sandstone samples in re-loading tests // *Inter. J. Mining Sci. Tech.* 2020. Vol. 30, N2. P. 251-258, doi: 10.1016/j.ijmst.2019.03.004.
16. *Wang Z., Shen M., Gu L., Zhang F.* Creep Behavior and Long-Term Strength Characteristics of Greenschist Under Different Confining Pressures // *Geotech. Test. J.* 2018. V. 41, N1. P. 55-71. <https://doi.org/10.1520/GTJ20170143>
17. *Nguyen T.S., Li Z., Su G., Nasser M.H.B., Young R.P.* Hydro-mechanical behavior of an argillaceous limestone considered as a potential host formation for radioactive waste disposal // *J. Rock Mech. Geotech. En.* 2018. V. 10. N6. P. 1063-1081. doi: 10.1016/j.jrmge.2018.03.010
18. *Yang S., Hu B.* Creep and permeability evolution behavior of red sandstone containing a single fissure under a confining pressure of 30 MPa // *Sci. Rep.* 2020. V. 10. N. 1900. doi: 10.1038/s41598-020-58595-2
19. *Yang S., Huang Y-H., Ranjith P.G.* Failure mechanical and acoustic behavior of brine saturated-sandstone containing two pre-existing flaws under different confining pressures // *Engineering Fracture Mech.* 2018. V. 193. P. 108-121. doi: 10.1016/j.engfracmech.2018.02.021.
20. *Hamza O., Stace R.* Creep properties of intact and fractured muddy siltstone // *Int. J. Rock Mech. Mining Sci.* 2018. V. 106. P. 109-116.
21. *Мартюшев Д.А., Галкин С.В., Шелепов В.В.* Влияние напряженного состояния горных пород на матричную и трещинную проницаемость в условиях различных литолого-фациальных зон турне-фаменских нефтяных залежей Верхнего Прикамья. // *Вестник Московского университета. Геология.* 2019. №5. С. 44-52.
22. *Хашпер А.Л., Аминев Т.Р., Федоров А.И., Жонин А.В.* Исследование зависимости проницаемости горной породы от ее напряженно-деформированного состояния // *Геол. Вестник.* 2019. № 1. С. 133–140. DOI: <http://doi.org/10.31084/2619-0087/2019-1-10>.
23. *Хашпер А.Л., Аминев Т.Р., Федоров А.И., Жонин А.В.* Исследование влияния напряженно-деформированного состояния горной породы на ее проницаемость // *Геология, геоэкология и ресурсный потенциал Урала и сопредельных территорий.* 2019. № 7. С. 193-196.
24. *Хашпер А.Л., Аминев Т.Р., Федоров А.И., Жонин А.В.* Исследование зависимости проницаемости горной породы от ее напряженно-деформированного состояния // *Геология, геоэкология и ресурсный потенциал Урала и сопредельных территорий.* 2018. № 6. С. 185-188.

- 25.Протодьяконов М. М., Ильиницкая Е. И., Карпов В. И. Методы исследования механических свойств горных пород в условиях объемного напряженного состояния // В сб. «Механические свойства горных пород». М.: Изд-во АН СССР, 1963. С. 151-156.
- 26.Mogi K. Fracture and flow of rocks under high triaxial compression // J. Geophys. Res. 1971. V. 76 P. 1255–1269. doi: 10.1029/JB076i005p01255.
- 27.Lade PV. Rock strength criteria: the theories and the evidence // Comprehensive rock engineering. 1993. N 1. P. 255–284.
- 28.Labuz J., Dai S-T., Papamichos E. Plane-strain compression of rock-like materials // Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr. 1996. N 33. P. 573–584.
- 29.Shi L., Li X., Bai B., Wang A., Zeng Z., He H. A Mogi-type true triaxial testing apparatus for rocks with two moveable frames in horizontal layout for providing orthogonal loads // Geotech. Test. J. 2017. N 40. P. 542–558. doi: 10.1520/GTJ20160242.
- 30.Sato M., Takemura T., Takahashi M. Development of the permeability anisotropy of submarine sedimentary rocks under true triaxial stresses // Int. J. Rock Mech. Mining Sci. 2018. V. 108. P. 118–127. doi:10.1016/j.ijrmms.2018.06.010.
- 31.GCTS Testing Systems. URL: https://www.gcts.com/?s=prod_ver&p=products&ID=199#tab-1 (дата обращения 10.02.2021).
- 32.GDS Instruments. URL: <https://www.gdsinstruments.com/gds-products/gds-true-triaxial-apparatus> (Дата обращения 10.02.2021).
- 33.Kwasniewski M., et al. (eds). True triaxial testing of rocks. 2013. Leiden: CRC Press/Balkema, p. 365.
- 34.Georgieva T., Descamps F., Gonze N., et al. Stability assessment of a shallow abandoned chalk mine of Malogne (Belgium) // Eur. J. Environ. Civ. En. 2020. P. 1-15. doi: 10.1080/19648189.2020.1762752.
- 35.Young R.P., Nasser M.H.B. & Lombos L. Imaging the effect of the intermediate principal stress on strength, deformation and transport properties of rocks using seismic methods // In M. Kwasniewski et all. (eds), True triaxial testing of rocks. 2013. P. 311-318. Leiden : CRC Press/Balkema. 2013
- 36.Minaeian V., Dewhurst D. N., & Rasouli V. An Investigation on Failure Behaviour of a Porous Sandstone Using Single-Stage and Multi-stage True Triaxial Stress Tests // Rock Mechanics and Rock Engineering 53, pp. 3543–3562. 2020. doi:10.1007/s00603-020-02134-y.
- 37.Rasouli V. A true triaxial stress cell (TTSC) used for simulations of real field operations in the lab // In M. Kwasniewski et all. (eds), True triaxial testing of rocks. 2013. V. 4. P. 311-318.

38. *Rezagholilou A., Sarmadivaleh M.* Design and Application of a High-performance True Triaxial Stress Cell // *Insights Min. Sci. Technol.* 2019. V. 1(5): 555573. doi: 10.19080/IMST.2019.01.555573.
39. *Nabipour A.* Experimental and numerical study of ultrasonic monitoring of hydraulic fracture propagation. Doctoral dissertation. Curtin University. Australia, 2013. 222 p.
40. *Minaeian V.* True triaxial testing of sandstones and shales. Doctoral dissertation. Curtin University. Australia, 2014. 220 p.
41. *Li Z., Wang L., Lu Y. et al.* Experimental investigation on True Triaxial Deformation and Progressive Damage Behaviour of Sandstone // *Sci. Rep.* 2019. V. 9. N. 3386. doi:10.1038/s41598-019-39816-9.
42. *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. doi: 10.1007/s00603-019-01816-6.
43. *Feng X.-T., Zhang X., Kong R., Wang G.* A novel mogi type true triaxial testing apparatus and its use to obtain complete stress–strain curves of hard rocks // *Rock. Mech. Rock. Eng.* 2015. V. 49(5). P. 1649–1662. doi:10.1007/s00603-015-0875-y.
44. *Asahina D., Sato M., Takahashi M.* Laboratory observations of fracture plane reactivation induced by pore pressure in Kimachi sandstone // *Proceed. Rock Dyn. Summit.* 2019. pp. 101-105. doi: 10.1201/9780429327933-14.
45. *Asahina D., Pan P., Sato M. et al.* Hydraulic and Mechanical Responses of Porous Sandstone During Pore Pressure-Induced Reactivation of Fracture Planes: An Experimental Study // *Rock. Mech. Rock. Eng.* 2019. V. 52. P. 1645–1656. doi: 10.1007/s00603-018-1706-8.
46. *Feng X.-T., Zhao J., Zhang X. et al.* A Novel True Triaxial Apparatus for Studying the Time-Dependent Behaviour of Hard Rocks Under High Stress // *Rock. Mech. Rock. Eng.* 2018. V. 51. P. 2653–2667. doi: 10.1007/s00603-018-1516-z.
47. *Zhao J., Feng X.-T., Zhang X., et al.* Time-dependent behaviour and modeling of Jinping marble under true triaxial compression. // *Int. J. Rock Mech. Mining. Sci.* 2018. V. 110. P. 218-230.
48. *Zhao J., Feng X.-T., Zhang X., et al.* Brittle-ductile transition and failure mechanism of Jinping marble under true triaxial compression // *En. Geol.* 2018. V. 232. P. 160-170.
49. *Zhao J., Feng X.-T., Zhang X., Yang C.* Brittle and ductile creep behavior of Jinping marble under true triaxial stress // *En. Geol.* 2019. V. 258. P. 105157. doi:10.1016/j.enggeo.2019.105157.

50. *Feng X.-T., Kong R., Zhang X., Yang C.* Experimental Study of Failure Differences in Hard Rock Under True Triaxial Compression // *Rock. Mech. Rock. Eng.* 2019. V. 52. P. 2109–2122. doi: 10.1007/s00603-018-1700-1.
51. *Feng X.-T. et al.* Evolution of the mechanical and strength parameters of hard rocks in the true triaxial cyclic loading and unloading tests // *Int. J. Rock Mech. Mining Sci.* 2020. V. 131. P. 104349.
52. *Duan M., Jiang C., Gan Q. et al.* Study on Permeability Anisotropy of Bedded Coal Under True Triaxial Stress and Its Application // *Transp. Porous Med.* 2020. V. 131. P. 1007–1035. doi: 10.1007/s11242-019-01375-y.
53. *Liu Y. et al.* Permeability evolution of anthracite coal considering true triaxial stress conditions and structural anisotropy // *J. Nat. Gas Sci. Eng.* 2018. V. 52. P. 492-506.
54. *Garcia A. V., Rached R. M., Santamarina J. C.* Large-Scale True Triaxial Apparatus for Geophysical Studies in Fractured Rock // *Geotech. Test. J.* 2018. V. 41. N. 4. P. 821-829.
55. *Couture C., Bésuelle P.* Diffuse and localized deformation of a porous Vosges sandstone in true triaxial conditions // In. *E3S Web. Conf.* 2019. Vol. 92. N. 06007. doi: 10.1051/e3sconf/20199206007
56. *Lu J., Yin G., Li X., et al.* Deformation and CO₂ gas permeability response of sandstone to mean and deviatoric stress variations under true triaxial stress conditions // *Tunnelling and Underground Space Tech.* 2019. Vol. 84. P. 259-272.
57. *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 // *Mech. Solids.* 2015. V. 50. № 6. P. 633-640.
58. *Карев, В. И., Климов, Д. М., Коваленко, Ю. Ф., Устинов, К. Б.* Экспериментальное исследование ползучести горных пород при истинно трехосном нагружении // *Изв. РАН. МТТ.* 2019. № 6. С. 30–37.
59. *Кашников Ю.А., Ашихмин С.Г., Обшаров П.А.* // *Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений* № 8, 2008.
60. *Ковхуто А.М., Кибаш М.Ф., Зайцев А.И., Евтушенко Н.Н., Лобова Н.Л., Лобов К.А.* // *Материалы международной научно-практической конференции в рамках XVII сессии Межправительственного совета стран Содружества Независимых Государств по разведке, использованию и охране недр.* Минск, 13–15 ноября 2013 г.
61. *Ковхуто А.М., Кибаш М.Ф., Зайцев А.И., Евтушенко Н.Н., Лобова Н.Л., Лобов К.А.* // *Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений,* т. 3, 2015 г.
62. *A.P.S. Selvadurai.* // *Geofluids* (2015) 15, 37–47.

63. M.H.B. Nasser, R.P. Young. // Final Report, University of Toronto Rock Fracture Dynamics Facility, 2016.
64. Михайлов Н.Н., Попов С.Н. // Георесурсы, геознергетика, геополитика. № 1(11), 2015.
65. Карев В.И., Коваленко Ю.Ф. // Нефтесервис. 2006. № 6. С. 59-63.
66. Коваленко Ю.Ф., Карев В.И. // Технологии ТЭК. 2003. № 1. С. 31-35.
67. Карев В.И., Коваленко Ю.Ф. // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. 2011. № 4 (2). С. 448–450
68. Христианович С.А., Коваленко Ю.Ф., Кулинич Ю.В., Карев В.И. // Нефть и газ Евразия. 2000. № 2. С. 90-94.
69. Карев В.И., Коваленко Ю.Ф., Сидорин Ю.В., Устинов К.Б. // Мониторинг. Наука и технологии. 2016. № 3. С. 85-89.
70. Karev V.I., Kovalenko Y.F., Ustinov K.B. Geomechanics of Oil and Gas Wells. Advances in Oil and Gas Exploration and Production. Springer International Publishing Cham: Switzerland, 2020. 166 p.
71. Карев В.И., Коваленко Ю.Ф., Химуля В.В. Влияние напряжений на прочностные и фильтрационные свойства пород в окрестности горизонтальной скважины // Процессы в геосредах. 2018. № 1 (14). С. 746–756.
72. Karev V.I., Klimov D.M., Kovalenko Y.F., Ustinov K.B. Modelling of mechanical and filtration processes near the well with regard to anisotropy // J. Phys.: Conference Series. 2018. V. 991. N 1. P. 012039. doi: 10.1088/1742-6596/991/1/012039.
73. Лобов К.А. // Современные проблемы геологического картирования: материалы X Университетских геол. чтений, 14-15 апр. 2016 г. – Минск: Изд. центр БГУ, 2016. – 182 с.
74. Abasov M.T., Dzhevanshyre R.D., Imanov A.A., Dzhalalov G.I. // Oil and gas geology. 1997. № 05.
75. Джон Кук, Рене А. Фредериксен, Клаус Хасбо, Сидни Грин, Арнис Джадзис, Дж. Уэсли Мартин, Роберто Суарес-Ривера, Йорг Хервангер, Патрик Хойман, Дон Ли и др. // Нефтегазовое обозрение, осень 2007 г.
76. Wenlu Zhu, Laurent G. J. Montesi, Teng-Fong Wong // London Geological Society special publication, 2002. № 200. pp. 119-136.
77. Жуков В.С. // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал), 2010. № 6, с. 341-349.
78. Карманский А.Т. // Записки Горного института, 2009, № 183, pp. 289-292.
79. Рыжов, А. Е., Перунова, Т. А., Орлов, Д. М. // Вести газовой науки, 2011. 1 (6), 162-174.

80. Желтов Ю. П., Христианович С. А. О гидравлическом разрыве нефтеносного пласта. – Известия АН СССР. Отделение технических наук. – 1955. – № 5. – С. 3-41.
81. Андриасова Р.С., Мищенко И.Т., Петров А.И. Справочное руководство по проектированию разработки и эксплуатации нефтяных месторождений. Добыча нефти. М.: Недра. 1983. 455 с.
82. Лурье А.И. Теория упругости. М.: Наука. 1970. 939с.
83. Тимошенко С.П., Гудьер Дж. Теория упругости. – М.: Наука, 1979. – 560 с.
84. Морозов О., Овчинников А. // Offshore [Russia]. 2015. № 3. С. 52.
85. Букатов М.В., Пескова Д.Н., Ненашева М.Г., Погребнюк С.А. и др. // Профессионально о нефти. – 2018 - № 2(8). – С. 16-21.
86. Karev V., Kovalenko Yu. // The 12th International Congress on Rock Mechanics. 2011.
87. Карев В.И. Влияние напряженно-деформированного состояния горных пород на фильтрационный процесс и дебит скважин: автореф. дисс. на соискание учен. степени д-ра технических наук 01.02.04 – механика деформируемого твердого тела // В.И. Карев.– Санкт-Петербург, 2010. – 34 с
88. Карев В.И., Коваленко Ю.Ф., Сидорин Ю.В., Устинов К.Б. // Мониторинг. Наука и технологии. 2016. № 3. С. 85-89. Бельтюков Н.Л., Евсеев А.В. // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология, нефтегазовое и горное дело. 2010. № 5. С. 82
89. Тимошенко С.П. Теория упругости. Издание второе исправленное. Л.: Ленгорлит, 1937.
90. Ляв А. Математическая теория упругости. – М. – Л.: ОНТИ НКГиП СССР, 1935. 676 с.
91. Liu, Z., Shao, J. Strength Behavior, Creep Failure and Permeability Change of a Tight Marble Under Triaxial Compression. Rock Mech Rock Eng 50, 529–541 (2017). <https://doi.org/10.1007/s00603-016-1134-6>
92. Работнов Ю.Н. Ползучесть элементов конструкций. М.: Наука, 1966. 752 с
93. Симонян А.М. Некоторые вопросы ползучести. Ереван: Гитутюн, 1999. 260 с
94. Maleki, K., Pouya, A. // Computers and Geotechnics, 37(5), 619–628 (2010). doi:10.1016/j.compgeo.2010.03.009
95. Jiang, T., Shao, J. F., Xu, W. Y., Zhou, C. B. // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 47(5), 703–713 (2010). doi:10.1016/j.ijrmms.2010.05.003
96. Кашников Ю.А., С.Г. Ашихмин, А.Ю. Назаров и др. // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений № 1, 2007
97. Кашников Ю.А.. // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений № 9, 2007

- 98.Христианович С.А., Коваленко Ю.Ф., Кулинич Ю.В., Карев В.И. Увеличение продуктивности нефтяных скважин с помощью метода георыхления//Oil&Gas Eurasia. 2000. № 2. С. 90-94
- 99.Коваленко, Ю. Ф. Метод георыхления -новый подход к проблеме повышения продуктивности скважин / Ю. Ф. Коваленко, В. И. Карев // Технологии топливно-энергетического комплекса. – 2003. – № 1. – С. 31-35