

УДК 531.782

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ДЕФОРМИРОВАНИЯ, РАЗРУШЕНИЯ И ФИЛЬТРАЦИИ В ГОРНЫХ ПОРОДАХ

© 2021 г. В. И. Карев^{a,*}, В. В. Химуля^{a,**}, Н. И. Шевцов^{a,***}

^a *Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, Москва, Россия*

^{*}*e-mail: wikarev@ipmnet.ru*

^{**}*e-mail: valery.khim@gmail.com*

^{***}*e-mail: red3991@yandex.ru*

Поступила в редакцию 13.11.2020 г.

После доработки 11.01.2021 г.

Принята к публикации 11.01.2021 г.

В работе представлен обзор современного состояния экспериментальных исследований процессов деформирования, разрушения и фильтрации в горных породах, влияния напряженного состояния на их деформационные, прочностные, реологические и фильтрационные характеристики. Проведен анализ основных результатов, полученных в этой области в последние годы. Представлено краткое описание наиболее распространенных методов экспериментальных исследований. Подчеркнуты ключевые различия и особенности основных методов. Более подробно описана уникальная научная установка, созданная в Институте проблем механики Российской академии наук – Испытательная система трехосного независимого нагружения (ИСТНН). Представлены основные научные результаты, как фундаментального, так и прикладного характера, полученные с ее помощью. Описаны пути модернизации, совершенствования установки, которые позволят существенно расширить спектр решаемых с ее помощью задач. Отдельное внимание в статье уделено анализу работ по математическому моделированию механического поведения горных пород, обсуждены теоретические проблемы, требующие экспериментальных исследований.

Ключевые слова: горные породы, напряженно-деформированное состояние, прочность, ползучесть, проницаемость, истинно трехосное нагружение

DOI: 10.31857/S0572329921050056

1. Введение. 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.

Актуальным направлением исследований является изучение закономерностей ползучести горных пород. Характер деформирования при длительном воздействии неизменных напряжений изучен недостаточно даже для однородных материалов, не говоря о горных породах. Существующие сегодня модели ползучести построены на основе умозрительных заключений, имеют формальный характер и содержат большое число параметров, варьирующихся и подлежащих определению. Для выделения какой-либо из них по-прежнему необходимо большее количество экспериментальных данных. К горным породам это относится в еще большей степени. Обзору проводимых в последние годы исследований в данных областях посвящена эта работа.

2. Обзор методов и оборудования по определению деформационных, прочностных и фильтрационных свойств горных пород и грунтов. Современное состояние исследований. Используемые сегодня лабораторные методы исследования деформационных и прочностных свойств горных пород весьма разнообразны. Существует целый ряд гостированных 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 грунта 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. Гостированы 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. Вторым 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,

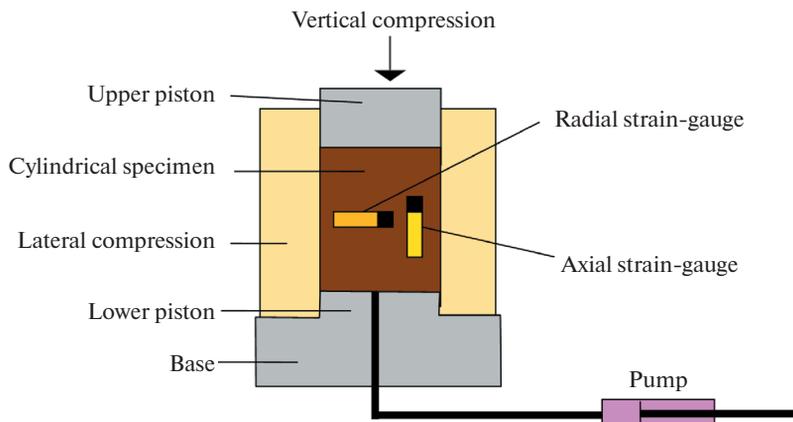


Рис. 1. Схема установки кармановского типа

что использование различных резцов позволяет получать только относительные результаты, которые сравнимы лишь для одинаковых условий испытаний [1].

2.1. *Исследования механических свойств горных пород с использованием условно трехосных установок.* Наиболее распространенный метод связан с использованием установок, основанных на принципе Кармана. В 1911 г. Карман [2] 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 [3] исследовал мрамор уже на растяжение по оси цилиндра при условии всестороннего сжатия жидкостью. Позднее совершенствованием такого подхода занимались М.П. Воларович [4, 5], Хориба, Кобаяси [6], Паттерсон [7]. Методика проведения экспериментов Карманом положила начало целому направлению исследований, которые продолжают 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 кармановского типа также возможно проведение исследований по схеме “полюй цилиндр”. Суть ее заключается в следующем: по оси цилиндрического образца просверливается отверстие. Далее образец нагружается по всей поверхности. В процессе нагружения образца отверстие продувается воздушным потоком, фиксируются осевые и радиальные деформации и количество вынесенного песка, образующегося при разрушении стенок отверстия.

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. Далее приведен ряд результатов, полученных в последние годы на установках кармановского типа.

В настоящее время существует ряд основных направлений исследований, которые проводятся с использованием установок трехосного нагружения. Это изучение меха-

нического 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 [8] 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.

В [9] исследовано 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 [10] внимание акцентировано на влиянии степени разрушенности образца на прочностные и деформационные характеристики.

В [11] 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 [12], 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 [13]. Исследования прово-

дидлись 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 [14] также приведены 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 алевролита [15]. В экспериментах испытывались образцы с трещинами и без, которые нагружались как одноосно, так и условно трехосно. 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 [16] 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 работе [17] представлены аналогичные исследования, сопровождающиеся также программным моделированием полученных корреляционных зависимостей [18, 19]. 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, кото-

рый 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.

2.2. Установки истинно 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 [20], 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 [21], 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 [22–25]. 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 [26, 27].

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 реше-

ния 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 и мембран, 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-го типа, или избежать краевых эффектов, как это было в установках 2-го 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. Desamps.

Установка сделана для изучения эффекта комплексного граничного давления на поведение скальных пород, находящихся на большой глубине. Установка относится к 1-му типу [28]. 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 [29] 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. Nasserli.

На установке проводится изучение типов разломов в горных породах, которые индуцируют сейсмике, 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-му типу. Размеры образца 80*80*80 мм. 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°C [30].

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 [31]. 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 [32].

2) Истинно трехосная ячейка 50 mm 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°C. 6 комплектов тензодатчиков LVDT и 24 акустических преобразователя замеряют 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 CO_2 [33]. 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 с длиной ребра 50 мм, достигает 645 МПа. Кроме того, температура может достигать 100°C . 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 [34, 35].

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. Используются образцы размерами $50 \times 50 \times 100$ 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 образцом за счет пружины. В недавней статье исследователей [36] 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. Руководитель: В.И. Карев, Ю.Ф. Коваленко.

Установка относится к 1-му типу, 2-му подтипу. Установка 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.

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

Установку относят к 2 типу. Отличительной особенностью аппарата является конструкция с цилиндрической ячейкой нагружения. Цилиндрический образец нагружается в осевом направлении жестким поршнем. В радиальном направлении образец на-

гружается 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 [37] 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, North-eastern 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 [38]. В установке реализован механизм, позволяющий избегать смещения центра образца в ходе неравномерного деформирования, что является одной из проблем в установках 1 типа.

2.3. Исследования механических 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 [39, 40] 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 представили новую истинно трехосную установку для проведения экспериментов на твердых породах при высоких напряжениях [41]. В этой же работе описаны первые результаты исследований мрамора на данном стенде. В цикле связанных работ [42–44] 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 [42]. 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 [43]. 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 [44]. При этом скорость деформации ползучести возрастает примерно линейно с увеличением разности максимального и минимального главных напряжений. Однако при больших 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 [45]. В данных исследованиях средняя компонента главных напряжений варьировалась в диапазоне от значения минимальной до максимальной компоненты. Помимо представленного подтверждения о влиянии вида на-

пряженного 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 [46]. 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 материала 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 [47] 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 проводились с целью изучения поведения газового потока в условиях напряженного состояния коллектора для добычи метана из угольных

пластов, подземной добычи угля и связывания CO_2 в глубоких пластах [48]. 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 [49] 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) [50]. Результаты их экспериментов 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 [51] 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. Наиболее точно моделирование таких условий, как говорилось ранее, возможно только на установках истинно трехосного нагружения. Результаты исследований влияния напряженно-деформированного состояния на проницаемость пород-коллекторов и характера ползучести горных пород на установке истинно трехосного нагружения ИПМех РАН приведены в [52, 53]. Исследователи проводят физическое моделирование напряженного состояния в прискважинной области при уменьшении давления в скважине для условий различных нефтегазовых месторождений. Исследованы зависимости проницаемости от напряжений и при сложном неравнокомпонентном нагружении. Представлены зависимости деформаций от времени при ступенчатом нагружении, а также обоснованы основные требования к построению модели напряженно-деформированного состояния, учитывающей влияние временных эффектов.

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 [54]. На сегодняшний день активно проводятся исследования горных пород с целью совершенствования методики и расширения возможности ее применения [55, 56].

3. Испытательная система трехосного независимого нагружения ИПМех РАН. Уникальная научная установка Института проблем механики Российской академии наук — Испытательная система трехосного независимого нагружения (ИСТНН) является главным инструментом проводимых в лаборатории геомеханики ИПМех РАН экспериментальных исследований процессов деформирования и разрушения горных пород продуктивных и вмещающих пластов нефтяных и газовых месторождений, рис. 2.

ИСТНН относится к классу электрогидравлических испытательных машин, она оборудована автоматизированной системой управления с обратной связью. В состав Испытательной системы входят:

- силовой агрегат — установка неравнокомпонентного трехосного нагружения (УНТН);
- маслонасосная станция (МНС);
- система автоматического измерения проницаемости (САИП);
- система автоматического управления (САУ), включающая информационно-измерительную систему (ИИС).

Технические характеристики ИСТНН:

- образцы — куб с ребром 40 мм или 50 мм;
- независимое нагружение по трем осям;
- управление по нагрузке и по перемещениям;
- регистрация деформаций в трех направлениях;



Рис. 2. Испытательная система трехосного независимого нагружения (ИСТНН)

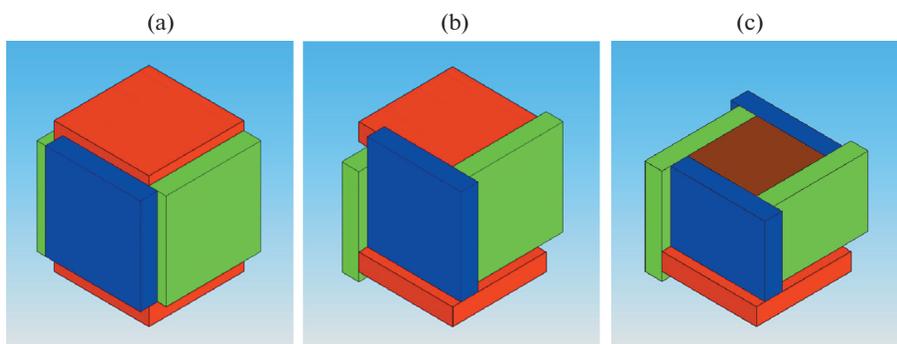


Рис. 3. Схема кинематики нажимных плит нагружающего узла ИСТНН

- измерение проницаемости в ходе нагружения;
- максимальное усилие по каждой оси – 500 кН;
- максимальная деформация – 20%;
- максимальная скорость нагружения – 10 МПа/с;
- максимальная скорость перемещения – 3 мм/с.

Возможность независимо нагружать образец по каждой из трех осей и при этом прикладывать усилие со стороны нажимных плит по всей площади граней образца имеется благодаря примененной в конструкции нагружающего узла оригинальной кинематической схеме, которая позволяет нажимным плитам сближаться в трех направлениях, не создавая препятствия друг другу. На рис. 3 изображена кинематика нажимных плит: начальное положение (а), после деформации образца (б), разрез нагружающего узла после деформации образца (с). Система автоматического измерения проницаемости позволяет измерять проницаемость образца в ходе нагружения.

В состав экспериментального исследовательского комплекса помимо ИСТНН входят универсальный обрабатывающий комплекс для изготовления образцов пород с

высокой точностью, установка для определения скорости распространения упругих волн в образцах горных пород, позволяющая определять степень упругой анизотропии геоматериала.

На ИСТНН был проведен большой цикл исследований влияния напряженно-деформированного состояния на проницаемость для различных типов горных пород-коллекторов. Были проведены исследования свойств пород из коллекторов нефтяных и газовых месторождений из различных регионов Российской Федерации, разного литологического состава, залегающих на глубинах от ста метров до семи километров, с разным коэффициентом аномальности пластового давления. Эти работы позволили установить, что проницаемость пород существенно зависит от действующих в породе напряжений. При этом в зависимости от типа породы и величины напряжений проницаемость может, как уменьшаться, так и увеличиваться, причем необратимо [54].

Проведено экспериментальное и теоретическое изучение закономерностей взаимовлияния напряженно-деформированного состояния и фильтрационных процессов в массиве горных пород [54]. На основе этих исследований предложена классификация пород-коллекторов по этому признаку. Выделено три категории пород.

К первой категории относятся плотные крепко сцементированные мелкозернистые песчаники, аргиллиты, доломиты и т.п. Эти породы деформируются под действием приложенных напряжений чисто упруго. Проницаемость их по мере роста напряжений уменьшается, но обратимо, т.е. после снятия напряжений она возвращается к начальному значению, таким образом влияние напряжений на фильтрационные свойства этих пород незначительно и его можно не учитывать.

Вторую категорию составляют мелко- и среднезернистые песчаники с небольшим содержанием глины, алевролиты и известняки. Эти породы при небольших депрессиях также деформируются упруго, их проницаемость при этом, как правило, не меняется или немного уменьшается. При достижении касательными напряжениями определенной величины, зависящей от свойств породы, условий залегания, пластового давления и других факторов, начинается неупругое деформирование породы при неизменной нагрузке (ползучесть). По мере роста неупругих деформаций проницаемость породы значительно уменьшается (на десятки процентов и даже в разы). Это падение проницаемости носит необратимый характер, то есть при снятии напряжений она остается пониженной. При дальнейшем увеличении сдвиговых напряжений (при увеличении депрессии) скорость ползучести образцов увеличивается, и, когда деформация достигает некоторой критической величины, порода начинает растрескиваться и разрушаться, что сопровождается резким увеличением ее проницаемости даже по сравнению с первоначальным значением. Характер разрушения при этом различен. В более прочных породах разрушение образцов происходит путем образования в них нескольких макротрещин. Менее прочные породы, такие как средне- и крупнозернистые песчаники, превращаются практически в песок (дезинтегрируются). Ко второй категории относится большинство пород-коллекторов, их проницаемость существенно зависит от напряжений.

К третьей категории относятся песчаники и алевролиты с большим содержанием глины. Такие породы уже при незначительных касательных напряжениях начинают интенсивно “ползти”, а их проницаемость при этом падает. Однако даже при значительных деформациях разрушение образцов не наступает, они продолжают деформироваться практически с постоянной скоростью (подобно пластилину), а проницаемость при этом постепенно уменьшается вплоть до нуля.

Исследования, проведенные на ИСТНН, позволили разработать новый геомеханический подход к решению проблем нефтегазодобычи. На его основе предложена новая эффективная технология повышения продуктивности скважин и нефтегазоотдачи пластов с помощью управления напряженно-деформированным состоянием в окрестности скважины – метод направленной нагрузки пласта (НРП). Он основан на

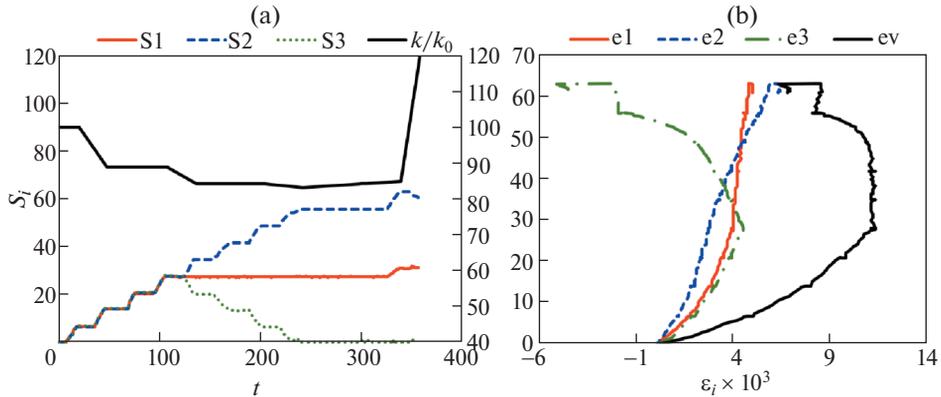


Рис. 4. Результаты испытаний на ИСТНН образца породы из ачимовских отложений Уренгойского газоконденсатного месторождения при моделировании применения метода направленной разгрузки пласта

инициации трещинообразования в призабойной зоне пласта за счет создания в пласте поля повышенных сдвиговых напряжений путем понижения давления в скважине до определенного уровня и выбора определенной геометрии забоя. Выбор уровня депрессии в скважине и конструкции ее забоя определяется на основе предварительных испытаний образцов породы конкретного месторождения на установке ИСТНН и проведения соответствующих расчетов. Метод НРП прошел успешные опытно-промысловые испытания на ряде месторождений в Западной Сибири и в Приуралье и показал свою высокую эффективность. В результате применения метода продуктивность необсаженных скважин удалось повысить в 2–4 раза, обсаженных в 1.5–2 раза.

На рис. 4 в качестве примера поведения пород второй категории представлены результаты испытаний на ИСТНН образца породы из ачимовских отложений Уренгойского газоконденсатного месторождения при моделировании применения метода направленной разгрузки пласта. На рис. 4,а показана программа нагружения образца, а также изменение относительной проницаемости в ходе нагружения. Три компоненты эффективных напряжений S_i , действующих на грунтовый скелет породы, измеряются в МПа, отношение конечной проницаемости к начальной в каждый момент времени – в процентах; время нагружения указано в секундах. На рис. 4,б представлены кривые деформирования по каждой из осей, а также объемная деформация. Монотонно возрастающее напряжение S_2 выбрано параметром нагружения, оно откладывается по оси ординат в МПа. Величины деформаций по каждой из осей образца отложены по оси абсцисс в безразмерных единицах. Наглядно продемонстрирован резкий скачок проницаемости при создании в породе касательных напряжений определенного уровня.

На основе испытаний, проведенных на ИСТНН, предложены и научно обоснованы способы обеспечения устойчивости стволов скважин, прежде всего, наклонно направленных, пробуренных в анизотропных пластах. Техничко-технологические решения и рекомендации, разработанные на основе полученных научных результатов, прошли успешные нефтепромысловые испытания. Было проведено геомеханическое моделирование бурения и эксплуатации наклонных и горизонтальных скважин на месторождениях ОАО “Газпром”, НК “ЛУКОЙЛ”, ОАО “Сургутнефтегаз”, АО “Штокман Девелопмент АГ” с выдачей практических рекомендаций по снижению рисков разрушения стволов скважин и обоснованию допустимых максимальных дебитов.

Разработан научный подход к экспериментальному исследованию упруго-вязко-пластического поведения горных пород в условиях сложного трехосного нагружения на ИСТНН. Предложен и реализован для нескольких типов горных пород способ определения пластических параметров моделей Кулона–Мора и Друкера–Прагера путем проведения экспериментов по достаточно простым траекториям нагружения.

На ИСТНН исследуются реологические свойства горных пород. В настоящее время проводятся исследования с целью создания модели ползучести геоматериалов, которая существенно отличается от известных моделей, разработанных для металлов.

Таким образом в ИПМех РАН был создан способ разработки геомеханических моделей месторождений углеводородного сырья. Проведен комплекс экспериментальных и теоретических исследований для определения деформационных, прочностных и фильтрационных характеристик пород-коллекторов, что необходимо для наполнения геомеханико-фильтрационной модели. Расчеты по разработанным на основе предложенного способа моделям хорошо согласуются с экспериментальными данными.

По результатам исследований, проведенных на ИСТНН опубликовано более 200 научных работ, получено 11 патентов, в том числе международных.

3.1. Модернизация ИСТНН. Новые задачи. В настоящее время лабораторией геомеханики проводится существенная модернизация ИСТНН, фактически создается новый аппарат.

Во-первых, разработан и построен значительно более жесткий корпус машины, представляющий собой толстостенный металлический куб (толщина стенки 80 мм), позволяющий проводить испытания твердых скальных пород со значительно большей точностью. Использована более мощная и современная маслососная станция фирмы Хьюдак (мощностью 350 ат) и более мощные гидроцилиндры. Мощность машины увеличена в 2 раза, максимальное усилие, которое достигается при нагружении составляет 1000 кН. Это позволит моделировать на установке напряжения, возникающие в пластах глубоких и сверхглубоких месторождений (до 10 км). С участием компании National Instruments разработана и внедрена новая более совершенная быстрая и надежная автоматизированная система управления машиной. Новая машина и ее система управления создавалась с учетом дальнейшего подключения к ней системы измерения скоростей распространения упругих волн (продольных и поперечных различной поляризации) и акустической эмиссии в ходе механических испытаний. Начаты работы по созданию такой системы и ее адаптации в комплексе ИСТНН. Это позволит проводить более глубокое и всестороннее изучение процессов деформирования и разрушения горных пород, влияния напряженно-деформированного состояния на их деформационные и прочностные свойства. На рис. 5 представлена модернизированная установка.

4. Экспериментальные исследования – основа для математического моделирования поведения горных пород. Важнейшими задачами экспериментальных исследований является получение данных для теоретических исследований. Эксперименты позволяют строить адекватные модели физических процессов [57–64], определять параметры для наполнения этих моделей. Однако на сегодняшний день все теоретические модели опираются на ограниченное число экспериментальных фактов и хорошо описывают поведение лишь отдельных пород, не позволяя расширить область их применения в целом. Например, в работе [58] предлагается новый критерий прочности для анизотропных горных пород. Предложенный критерий является переносом двумерного анизотропного критерия Джагера на трехмерный с использованием критерия прочности Моги–Кулона. В другой недавней работе [59] проводится исследование, направленное на проверку применимости методов машинного обучения для прогнозирования проницаемости. Используется специальное 3D-оборудование, сканирующее песчаник Берея методом рентгеновской микротомографии, и симулируются соответ-



Рис. 5. Модернизированная установка ИСТНН

ствующие значения проницаемости. Как утверждают авторы, полученные результаты моделирования демонстрируют применимость машинного обучения для прогнозирования проницаемости на основе изображений и открывают новую область цифровых исследований горных пород.

Важным нерешенным вопросом остается отсутствие актуального и сколь-нибудь универсального модельного подхода к вопросам проницаемости и ползучести. И хотя активно предпринимаются попытки обобщения уже имеющихся моделей и экспериментальных данных [53, 56, 60, 63] с целью создания общей модели ползучести, вследствие большого отличия характеристик пород хотя бы в пределах одного интервала залегания, возникают существенные сложности в разработке моделей даже для близких по свойствам пород, не говоря об общих моделях. Как отмечалось ранее, некоторые авторы по-прежнему указывают на недостаток качественных экспериментальных данных для продвижения в создании модельных подходов, особенно это касается результатов истинно трехосных испытаний.

Одна из недавних моделей ползучести предложена, например, в работе [63]. Авторами представлена нелинейная нестационарная вязкопластическая модель ползучести (NNPV), которая хорошо описывает кривые ползучести песчаника, построенные по результатам условно трехосных опытов, проведенных исследователями для изучения влияния фильтрационного давления флюида на механические свойства породы. Помимо самой математической модели, получено ее аналитическое решение для трехмерного случая и определены соответствующие параметры модели на основании экспериментальных данных. Отмечается, что новая модель хорошо описывает не только первую и вторую, но и третью, ускоренную, стадию ползучести.

Другая модель представлена в статье 2018 года [60], построенная по результатам серии условно трехосных испытаний на ползучесть образцов трещиноватого известняка в условиях многоуровневых циклов нагружения и разгрузки. Предложенная нелинейная упруговязкопластическая (EVP) модель ползучести основана на синтезе моделей упругого тела Гука, тел Сен-Венана, Кельвина и вязкопластического тела Бингама. Предложенная модель, по мнению авторов, точно описывает как нагружающий, так и разгружающий этапы проведенных испытаний. Кривые, полученные из модели, хорошо согласуются с экспериментальными результатами и соответствуют всем стадиям ползучести, особенно третьей.

Стоит отметить работу [64], посвященную поиску модели фильтрации в трещиновато-пористом массиве для условий Ярегского месторождения высоковязкой нефти. В статье проведен сравнительный анализ существующих моделей фильтрации в плане учитываемых механизмов массопереноса флюидов и получаемых в результате моделирования физических эффектов. Авторами выведен метод оценки относительного вклада течения Дарси в поровой матрице и течения Пуазейля в системе трещин пласта. Предложена комбинированная модель нестационарного фильтрационного течения флюидов в трещиновато-пористом песчанике Ярегского месторождения, основанная на уравнениях Эйлера для движения флюидов в сети трещин с учетом линейного сопротивления и модели массопереноса нефти в матрице и трещинах.

В [57] представлен геомеханический подход к моделированию деформирования и фильтрации пород-коллекторов с учетом анизотропии упругопластических свойств. Описаны три этапа моделирования, а именно: выбор соответствующей механической модели и ее адаптация к рассматриваемому случаю, получение параметров модели из прямых экспериментов, вычисление напряженного состояния и параметров течения жидкости для отдельных конфигураций скважины. Предложенный подход позволяет описать основные специфические характеристики механического поведения коллектора: влияние порового давления, сдвигового и всестороннего напряжений на характер деформации и переход к неупругому деформированию; возникновение неупругой объемной деформации и ее зависимость от напряженного состояния; анизотропию упругих, прочностных и фильтрационных свойств; неочевидную зависимость проницаемости от напряженно-деформированного состояния.

На сегодняшний день активно предпринимаются попытки математического описания процессов ползучести, деформирования и эволюции проницаемости при изменении напряженного состояния горных пород. Дальнейшее развитие такого подхода видится в расширении области применимости созданных моделей либо создании новых, более точных и универсальных методов, для чего по-прежнему необходимо большее количество качественных экспериментальных данных.

5. Заключение. В настоящее время исследования фильтрационных, деформационных, реологических и прочностных характеристик горных пород при изменении напряженного состояния проводятся весьма активно. Экспериментальные исследования свойств горных пород и процессов в них имеют исключительное значение в силу существенной дифференциации свойств горных пород и их гетерогенности. Также экспериментальные исследования позволяют определить параметры геомеханических моделей, проверить их адекватность.

Наиболее распространенным видом лабораторных исследований остаются испытания цилиндрических образцов горных пород условно трехосным методом. Такой подход позволяет проводить традиционные опыты по определению прочностных, фильтрационных и деформационных характеристик большинства горных пород, однако не дает возможности для изучения влияния неравнокомпонентных нагрузок, соответствующих реальным напряженным состояниям, возникающим в массиве горных пород, и исследований горных пород с анизотропными свойствами. С этой целью в настоящее время все шире проводятся испытания на истинно трехосных установках.

Достаточно детально исследователями, проводящими истинно трехосные испытания горных пород, изучена роль средней компоненты главных напряжений, влияние начальной трещиноватости горных пород на механические свойства, характер 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 недостаточно. Для фундаментального понимания механических и фильтрационных процессов необходимо моделирование напряженных со-

стояний, максимально приближенных к возникающим в пластах в реальных условиях при эксплуатации месторождений. На данный момент отсутствуют универсальные модели ползучести горных пород, остается затруднительным предсказание изменения фильтрационных свойств при неравномерном трехосном нагружении. Проведение широкого спектра лабораторных исследований необходимо для более полного изучения закономерностей механических процессов в горных породах *in situ* и создания адекватных математических моделей.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-11-50047 Экспансия.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Селиванов К.С. Оценка прочности материала поверхности при его испытании методом “скретч-тест” // Вестник УГАТУ. 2015. Т. 19. № 1 (67). С. 100–106.
2. Karman T. Festigkeitsversuche unter allseitigem Druck // Z. ver. deutsch. Ing., 1911.
3. Böker R. Die Mechanik der bleibenden Formänderungen in Kristallinisch aufgebauten Körpern. Mitt. Forschungsarb. ver. deutsch. Ing., 1915. 175 p.
4. Воларович М.П., Томашевская И.С., Будников В.А. Механика горных пород при высоких давлениях. Деформационные и прочностные свойства. М.: Наука, 1979. 152 с.
5. Воларович М.П., Баюк 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.
6. Horibe T., Kobayashi R. Physical properties of coal-measures rocks under triaxial pressure // J. Min. Soc. Japan. 1958. V. 74. P. 142–146.
7. Paterson M.S. A high-pressure, high-temperature apparatus for rock deformation // Intern. J. Rock Mech. Mining Sci. 1970. V. 7. P. 517–526.
8. 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. V. 52. P. 1377–1385. <https://doi.org/10.1007/s00603-018-1695-7>
9. 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. V. 13. P. 598. <https://doi.org/10.3390/en13030598>
10. 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. V. 30. Iss. 2. P. 251–258, <https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2019.03.004>
11. 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. № 1. P. 55–71. <https://doi.org/10.1520/GTJ20170143>
12. 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. № 6. P. 1063–1081. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2018.03.010>
13. 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. № 1900. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-58595-2>
14. 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. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2018.02.021>
15. Hamza O., Stace R. Creep properties of intact and fractured muddy siltstone // Int. J. Rock Mech. Mining Sci. 2018. V. 106. P. 109–116.
16. 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. <https://doi.org/10.33623/0579-9406-2019-5-44-52>

17. *Хашпер А.Л., Аминов 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.
<https://doi.org/10.31084/2619-0087/2019-1-10>
18. *Хашпер А.Л., Аминов 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.
19. *Хашпер А.Л., Аминов 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.
20. *Протодьяконов М.М., Ильиницкая Е.И., Карпов В.И.* Методы исследования механических свойств горных пород в условиях объемного напряженного состояния // Механические свойства горных пород. М.: Изд-во АН СССР, 1963. С. 151–156.
21. *Mogi K.* Fracture and flow of rocks under high triaxial compression // J. Geophys. Res. 1971. V. 76 P. 1255–1269.
<https://doi.org/10.1029/JB076i005p01255>
22. *Lade P.V.* Rock strength criteria: the theories and the evidence // Comprehensive rock engineering. 1993. № 1. P. 255–284.
23. *Labuz J., Dai S.-T., Papamichos E.* Plane-strain compression of rock-like materials // Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr. 1996. № 33. P. 573–584.
24. *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. № 40. P. 542–558.
<https://doi.org/10.1520/GTJ20160242>
25. *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.
<https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2018.06.010>
26. GCTS Testing Systems. URL: https://www.gcts.com/?s=prod_ver&p=products&ID=199#tab-1 (дата обращения 10.02.2021).
27. GDS Instruments. URL: <https://www.gdsinstruments.com/gds-products/gds-true-triaxial-apparatus> (Дата обращения 10.02.2021).
28. True triaxial testing of rocks / Ed. by *Kwasniewski M.*, Leiden: CRC Press/Balkema, 2013. 365 p.
29. *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.
<https://doi.org/10.1080/19648189.2020.1762752>
30. *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 // True triaxial testing of rocks / Ed. by *Kwasniewski M.* et al. Leiden: CRC Press/Balkema, 2013. P. 311–318.
31. *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 Mech. Rock Eng. V. 53. P. 3543–3562. 2020.
<https://doi.org/10.1007/s00603-020-02134-y>
32. *Rasouli V.* A true triaxial stress cell (TTSC) used for simulations of real field operations in the lab // True triaxial testing of rocks / Ed. by *M. Kwasniewski et al.* 2013. V. 4. P. 311–318.
33. *Rezagholilou A., Sarmadivaleh M.* Design and Application of a High-performance True Triaxial Stress Cell // Insights Min. Sci. Technol. 2019. V. 1 (5): 555573.
<https://doi.org/10.19080/IMST.2019.01.555573>
34. *Nabipour A.* Experimental and numerical study of ultrasonic monitoring of hydraulic fracture propagation. Doctoral dissertation. Curtin University. Australia, 2013. 222 p.
35. *Minaeian V.* True triaxial testing of sandstones and shales. Doctoral dissertation. Curtin University. Australia, 2014. 220 p.
36. *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.
<https://doi.org/10.1038/s41598-019-39816-9>

37. *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.
<https://doi.org/10.1007/s00603-019-01816-6>
38. *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.
<https://doi.org/10.1007/s00603-015-0875-y>
39. *Asahina D., Sato M., Takahashi M.* Laboratory observations of fracture plane reactivation induced by pore pressure in Kimachi sandstone // *Proceed. Rock Dyn. Summit.* 2019. P. 101–105.
<https://doi.org/10.1201/9780429327933-14>
40. *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.
<https://doi.org/10.1007/s00603-018-1706-8>
41. *Feng X., 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.
<https://doi.org/10.1007/s00603-018-1516-z>
42. *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.
43. *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.
44. *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.
<https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2019.105157>
45. *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.
<https://doi.org/10.1007/s00603-018-1700-1>
46. *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.
47. *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.
<https://doi.org/10.1007/s11242-019-01375-y>
48. *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.
49. *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. № 4. P. 821–829.
50. *Couture C., Bésuelle P.* Diffuse and localized deformation of a porous Vosges sandstone in true triaxial conditions // *In. E3S Web. Conf.* 2019. V. 92. № 06007.
<https://doi.org/10.1051/e3sconf/20199206007>
51. *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. V. 84. P. 259–272.
52. *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.
<https://doi.org/10.3103/S0025654415060047>
53. *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.
54. *Karev V.I., Kovalenko Y.F., Ustinov K.B.* Geomechanics of Oil and Gas Wells. *Advances in Oil and Gas Exploration and Production.* Cham: Springer, 2020. 166 p.
55. *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.

56. 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.: Conf. Series. 2018. V. 991. № 1. P. 012039. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/991/1/012039>
57. Tang H., Wang D., Huang R. et al. A new rock creep model based on variable-order fractional derivatives and continuum damage mechanics // Bull. Eng. Geol. Environ. 2048. V. 77. P. 375–383. <https://doi.org/10.1007/s10064-016-0992-1>
58. Singh A., Kumar A., Rao K.S. Strength behaviour of anisotropic rock under true triaxial stress state // Int. Society Rock Mech. Rock En. 10th Asian Rock Mechanics Symposium, Singapore. 2018. N. ISRM-ARMS10-2018-227.
59. Li X., Qi C., Shao Z. A microcrack growth-based constitutive model for evaluating transient shear properties during brittle creep of rocks // En. Fract. Mech. 2018. V. 194. P. 9–23. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2018.02.034>
60. Zhao Y., Lianyang Z., Wang W. et al. Separation of elastoviscoplastic strains of rock and a nonlinear creep model // Int. J. Geomech. 2018. V. 18. Iss.1. P. 04017129. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GM.1943-5622.0001033](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0001033)
61. Zhao Y., Wang Y., Wang W. et al. Modeling of rheological fracture behavior of rock cracks subjected to hydraulic pressure and far field stresses // Theor. Appl. Fract. Mech. 2019. V. 101. P. 59–66. <https://doi.org/10.1016/j.tafmec.2019.01.026>
62. Sudakov O., Burnaev E., Koroteev D. Driving digital rock towards machine learning: Predicting permeability with gradient boosting and deep neural networks // Comp. Geosci. 2019. V. 127. P. 91–98. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2019.02.002>
63. Wang X., Yin Y., Wang J. et al. A nonstationary parameter model for the sandstone creep tests // Landslides. 2018. V. 15. № 7. P. 1377–1389. <https://doi.org/10.1007/s10346-018-0961-9>
64. Семин М.А., Зайцев А.В., Левин Л.Ю. Моделирование фильтрации нефти в трещиновато-пористом пласте в условиях Ярегского месторождения высоковязких нефтей // Изв. ТГУ. Науки о земле. 2018. № 3. С. 270–284.