

Экспериментальное изучение процессов деформирования и фильтрации в низкопроницаемых породах–коллекторах ачимовских отложений при реализации метода направленной разгрузки пласта

В.И. Карев,^{*} Ю.Ф. Коваленко,[†] В.В. Химуля[‡]

Институт проблем механики им. А.Ю.Ишлинского РАН, Россия, 119526, Москва, пр-кт Вернадского, 101
(Поступила в редакцию 17.05.2022; подписана в печать 15.06.2022)

В статье описаны исследования реологических и фильтрационных характеристик низкопроницаемых пород ачимовских отложений Уренгойского газоконденсатного месторождения в ходе моделирования реализации метода направленной разгрузки пласта (НРП). Эксперименты проводились на Испытательном стенде трехосного независимого нагружения Института проблем механики РАН. Представлены результаты проведенного физического моделирования реально возникающих в окрестности скважин напряжений при применении метода направленной разгрузки пласта. Проведен статистический анализ влияния процесса ползучести на проницаемость исследуемых горных пород. Установлены закономерности изменения фильтрационных характеристик исследуемых пород ачимовских отложений в ходе моделирования реализации метода НРП. На основе проведенных экспериментальных исследований сделаны выводы о способах недопущения негативных процессов в пластах и намечены пути повышения продуктивности скважин.

PACS: 91.60.-x

УДК: 552.1

Ключевые слова: метод направленной разгрузки пласта, фильтрация, горные породы, ачимовские отложения, истинно трехосное нагружение, напряженно-деформированное состояние, ползучесть, проницаемость.

ВВЕДЕНИЕ

Широко известно, что процессы, связанные с добычей твердых полезных ископаемых или 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 физических 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.

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 [1]. 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.

Несомненно, 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 по-

лям напряжений, действующих в окрестности скважин. Стоит отметить, что подавляющее большинство моделей ползучести создавалось для описания деформирования металлов, и поэтому их прямое перенесение для описания деформирования горных пород не всегда приводит к адекватным результатам, поскольку существует ряд существенных отличий в механическом поведении горных пород и металлов. Важным малоизученным вопросом остается изучение влияния ползучести на проницаемость горных пород, так как оно может быть определено с необходимой на практике точностью только экспериментально. При этом надо учитывать, что влияние ползучести на проницаемость горных пород зависит от величины и вида напряженного состояния, при котором она происходит [2]. Один из путей решения данной проблемы — моделирование на установившемся истинно трехосном нагружении процессов в условиях реальных напряженных состояний, возникающих в окрестности скважин при их бурении и эксплуатации [3].

В связи со стремительным сокращением доли легкоизвлекаемых запасов в мире все чаще водятся в эксплуатацию объекты с трудноизвлекаемыми запасами. Причем выбор оптимальных способов их разработки является одной из важнейших задач для большинства добывающих компаний в России и в мире [4]. Добыча трудноизвлекаемого углеводородного сырья часто осложнена как низкой проницаемостью коллекторов, так и большой глубиной залегания [5]. При этом применение традиционных методов интенсификации добычи, в том числе гидроразрыва пласта, на таких объектах затруднено в силу технологических и геофизических причин [6]. С данной точки зрения видится наиболее перспективным использование технологий, в основе которых лежит воздействие на пласт за счет боль-

* wikarev@ipmnet.ru

† perfolinkgeo@yandex.ru

‡ valery.khim@gmail.com

шого запаса упругой энергии в силу действия горного давления и пластового давления флюида [7].

В рамках работы исследуются процессы в продуктивных пластах ачимовских отложений Уренгойского газоконденсатного месторождения (УГКМ) при реализации процесса управляемого понижения давления в скважине. УГКМ находится в Западно-Сибирском бассейне и входит в тройку крупнейших в мире месторождений на суше. Перспективным направлением освоения Уренгойского месторождения является разработка ачимовских отложений. Основные сложности, с которыми пришлось столкнуться при их разработке — низкая проницаемость и связанность проницаемых пропластков. В связи с этим применение традиционных технологий для разработки ачимовских отложений видится затруднительным [8].

Ранее в статье [9] нами были опубликованы результаты экспериментальных исследований механических и фильтрационных характеристик пород ачимовских отложений. Приведены сводные результаты испытаний, описаны зависимости от времени и напряжений деформационных и фильтрационных свойств пород в ходе моделирования реализации метода направленной разгрузки пласта. Вычислены значения депрессий, необходимых для эффективной реализации метода, а также сделан вывод об оптимальных конструкциях забоя скважин. В данной работе представлены результаты анализа влияния процессов ползучести на фильтрационные свойства исследуемых пород; представлены установленные закономерности изменения фильтрационных свойств данных пород в ходе реализации метода направленной разгрузки пласта. Сделаны выводы о характере протекающих в породах процессах ползучести и разрушения в ходе изменения напряженно-деформированного состояния.

1. МЕТОД НАПРАВЛЕННОЙ РАЗГРУЗКИ ПЛАСТА

На текущий момент проводится значительное число лабораторных испытаний кернового материала [10–13], а также геофизических исследований скважин, с целью определения закономерностей влияния напряженно-деформированного состояния на фильтрационные свойства пород. Эта зависимость определяется литологическим составом горных пород, структурой, их деформационными и прочностными свойствами и может быть установлена с необходимой точностью только экспериментально [14]. При этом проницаемость пород-коллекторов при перераспределении напряжений в пласте может как увеличиваться, так и уменьшаться [15–17].

В Институте проблем механики РАН был развит новый геомеханический подход к решению проблем интенсификации нефтегазодобычи, использующий явление значительного возрастания проницаемости горных пород при неравнокомпонентном нагружении [18]. На его основе создана эффективная технология повыше-

ния продуктивности скважин с помощью управления напряженно-деформированным состоянием в окрестности скважины — метод направленной разгрузки пласта (НРП). Он базируется на инициации трещинообразования в призабойной зоне пласта за счет создания в пласте неравномерного напряженного состояния путем понижения давления в скважине до определенного уровня и выбора определенной геометрии забоя [19]. Выбор параметров его применения определяется на основе предварительных испытаний образцов пород конкретного месторождения на испытательной системе истинно трехосного независимого нагружения (ИСТНН) и проведения соответствующих расчетов. Метод НРП прошел успешные опытно-промышленные испытания на ряде месторождений в Западной Сибири и в Приуралье и показал свою эффективность.

Отличием описанной технологии от метода гидро-разрыва пласта [20], при использовании которого для создания трещин необходимо затратить энергию на преодоление горного давления, в методе НРП для создания трещин, выполняющих роль высокопроницаемой системы фильтрационных каналов, используется огромный запас энергии, накопленный в массиве горных пород. Вследствие этого, метод экологичен и не имеет аналогов в мире.

Для реализации метода направленной разгрузки на конкретном месторождении, а также других технологий, основанных на геомеханическом подходе, и выбора оптимальных параметров для их реализации, необходимо определить деформационные, прочностные и фильтрационные свойства пород месторождения, а также напряженные состояния, которые необходимо создать в призабойной зоне пласта (ПЗП) для повышения ее проницаемости.

2. МЕТОДИКА ИСПЫТАНИЙ

Эксперименты проводились на ИСТНН — уникальной испытательной системе трехосного неравнокомпонентного нагружения, созданной в Институте проблем механики РАН [21]. ИСТНН предназначена для изучения механических и фильтрационных характеристик пород нефтегазовых, рудных и угольных месторождений. Отличительной особенностью установки ИСТНН является возможность нагружать образцы породы, представляющие собой кубики с ребром 40 или 50 мм, независимо по трем осям [22]. Это дает возможность воссоздавать в ходе опытов любые напряженные состояния, возникающие в ПЗП при бурении скважины, ее освоении и эксплуатации, и изучать их влияние на фильтрационные свойства породы [21].

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 пропуска через образец воздуха и измерения проницаемости. Всего был испытан 21 образец. Перед испытаниями на установке ИСТНН с целью определения степени деформационной анизотропии исследуемой породы образцы были прозвучены по трем осям [9]. Результаты показали, что скорости распространения продольных волн по трем осям образцов были близки, что свидетельствует об изотропности упругих свойств пород.

Во время испытаний к граням кубических образцов прикладывались напряжения, соответствующие реальным напряженным состояниям, возникающим на стенках скважин при создании депрессии на их забое. В опытах в процессе нагружения образцов регистрировались деформации образцов по каждой оси, а также измерялась проницаемость породы по оси, соответствующей направлению притока флюида к скважине. В ходе эксперимента определялись зависимости проницаемости породы от изменяющегося трехмерного напряженного состояния. Нагружение образцов выполнялось по двум программам нагружения, отвечающих случаю необсаженной скважины, а также случаю перфорационного отверстия в обсаженной скважине. Составление программ нагружения детально описано в [9, 23].

В цилиндрической системе координат в окрестности скважины действуют главные напряжения: радиальное σ_r , кольцевое σ_θ и вертикальное σ_z . Здесь и ниже сжимающие напряжения считаются отрицательными, т.е. $\sigma_i < 0$. На рис. 1, а представлена программа нагружения образцов при моделировании понижения давления в необсаженной скважине для случая равнокомпонентного горного давления. Изображенные напряжения S_1, S_2, S_3 — напряжения, прикладываемые к граням образца по осям 1, 2, 3 нагружающего узла ИСТНН. Их значения соответствуют эффективным напряжениям s_z, s_θ, s_R , действующим на стенке скважины ($s_i = \sigma_i + p_c, s_i < 0, p_c > 0$), где p_c — давление на забое скважины. Считая, что в исходном состоянии порода является изотропной и находится в состоянии равномерного всестороннего сжатия горным давлением q на данной глубине ($q < 0$), из решения задачи Ламе имеем $s_R = 0, s_\theta = 2(q + p), s_z = q + p$ [24]. При отсутствии геологических нарушений вертикальное горное давление равно весу вышележащих пород, т.е. $q = -\gamma h$, где γ — средний удельный вес горных пород, h — глубина залегания пласта [25].

Программа нагружения для моделирования условий на стенках необсаженной скважины (рис. 1, а) состоит из трех этапов:

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

где p_0 — начальное значение пластового давления.

Этап 2. Сжимающее напряжение S_2 , соответствующее s_θ , продолжает расти; S_1 , соответствующее s_z , остается постоянным, а S_3 , соответствующее s_R , уменьшается (отрезок АВ). Точка В соответствует состоянию, когда скважина пробурена и давление на ее забое равно пластовому: $p = p_0$. Среднее напряжение $(S_1 + S_2 + S_3)/3$ сохраняется постоянным на протяжении всего этапа 2.

Этап 3. Участок ВС соответствуют 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.

При построении программы нагружения, моделирующей изменение напряжений в окрестности кончика перфорационного отверстия в обсаженной скважине, также был учтен факт слабой анизотропии исследуемых пород. Хорошим приближением для решения задачи с подобной геометрией является задача о распределении напряжений в окрестности полой сферы, испытывающей внешнее и внутреннее давления [26]. В окрестности сферического перфорационного отверстия действуют радиальное σ_r и два кольцевых напряжения σ_θ и σ_φ . В этом случае для эффективных напряжений s_R, s_θ, s_φ , действующих на поверхности кончика перфорационного отверстия, имеем $s_R = 0, s_{\theta, \varphi} = 3/2(q + p)$ [24]. Соответствующие им напряжения S_3, S_1, S_2 прикладываются к граням образца в нагружающем узле установки ИСТНН (рис. 1, б). Точки А, В, С на рис. 1, б имеют тот же смысл, что и на рис. 1, а.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

На рис. 2 в качестве примера представлены результаты испытаний образцов А-5 и Ач-10. 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, отобранного из другой скважины с глубины 3825 м и обладал начальной проницаемостью 0.13 мД. На рис. 2 изображены фактические программы нагружения для каждого образца, а также кривые изменения проницаемости в ходе эксперимента. Ниже (рис. 3, а, б) расположены кривые деформирования образцов по каждой из осей нагружения ($e_1 - e_3$) и кривые объемных деформаций e_v . Напряжение S_2 монотонно растет в ходе опыта и является параметром нагружения.

Проницаемость образца А-5 уменьшалась по мере обжата и дальнейшего роста касательных напряжений. На этапе моделирования понижения давления

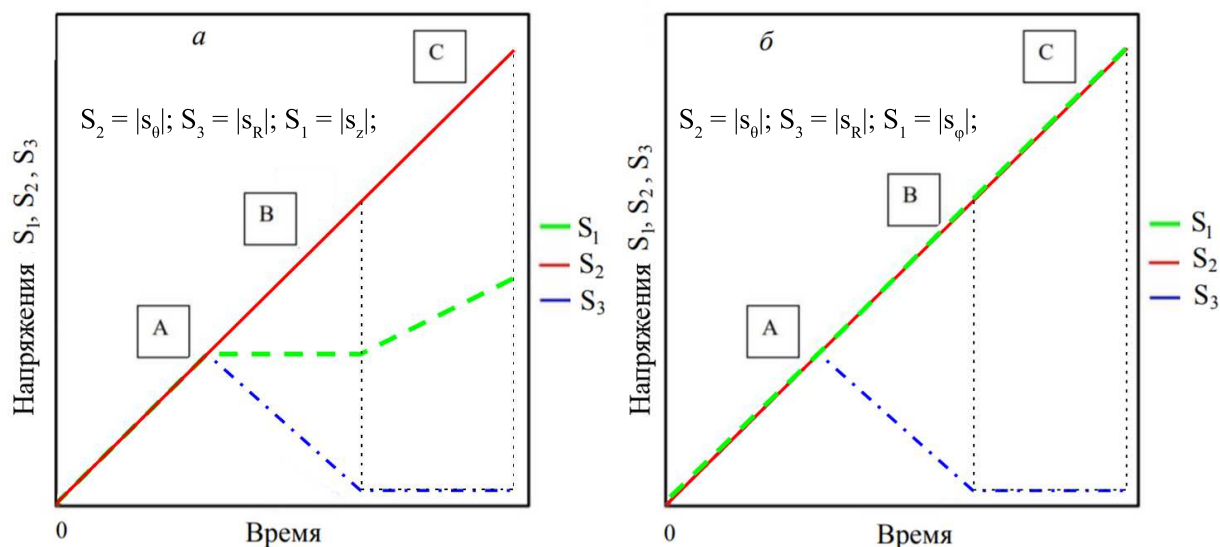


Рис. 1. а — Программа нагружения образцов, соответствующая случаю необсаженной скважины, б — Программа нагружения образцов, соответствующая случаю перфорационного отверстия в обсаженной скважине

в скважине ниже пластового проницаемость сперва вышла на полку, после чего начала расти, причем скорость роста увеличивалась со временем. На последнем этапе нагружение было приостановлено для регистрации ползучести. Проницаемость при этом продолжала ускоренно расти. Интенсивное деформирование ползучести привело к последующему разрушению образца (рис. 3, а), конечная зарегистрированная проницаемость оказалась выше начального значения.

Проницаемость образца Ач-10 (рис. 2, б) на участке всестороннего сжатия уменьшилась на 20%. При моделировании увеличения депрессии на забое скважины проницаемость продолжала незначительно уменьшаться. При величине напряжения около 80 МПа образец начал пластически деформироваться, а проницаемость его — медленно расти. По достижении напряжения $S_2 = 85.5$ МПа образец деформировался более интенсивно (рис. 3, б) и в итоге разрушился, проницаемость образца резко возросла.

Анализ результатов всех проведенных испытаний позволил выявить общие закономерности в изменении фильтрационных свойств изучаемых терригенных пород ачимовских отложений в ходе моделирования. Выявленные закономерности позволяют описать эволюцию проницаемости исследованных терригенных пород в процессе вязкоупругопластического деформирования при моделировании понижения давления в скважине с помощью четырех этапов:

1) Первый этап характеризуется снижением проницаемости в результате компакций при всестороннем равномерном сжатии и дальнейшему переходу к напряженному состоянию в окрестности скважины при нулевой депрессии, которое сопровождается появлением касательных напряжений.

2) На втором этапе проницаемость пород не изменя-

лась, 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 ПЗП. Во время данного этапа породы деформировались либо упруго, либо происходил переход к неупругому деформированию (рис. 3).

3) На третьем этапе инициируется постепенный рост проницаемости. Начало этапа связано с ростом в породах касательных напряжений, приводящих к заметным деформациям ползучести и изменению объемной деформации.

4) На четвертом этапе наблюдается скачкообразный рост проницаемости, связанный с появлением и развитием макротрещин в образцах, что может происходить в результате достижения критических значений либо касательными напряжениями, либо деформациями в результате незатухающей ползучести. Переход от третьего к четвертому этапу протекал с разной скоростью для образцов в зависимости от характера деформирования.

На рис. 2 и 3 пунктиром показаны границы этапов эволюции проницаемости в ходе моделирования для данных образцов. Как видно из рис. 3, на втором этапе деформации были преимущественно упругими. При переходе к третьему этапу по мере увеличения касательных напряжений инициируется рост проницаемости, протекающий с изменением объемной деформации и соответствующий некоторой величине депрессии. При переходе к четвертому этапу наблюдается скачкообразное увеличение деформаций, связанное с растрескиванием породы, и резкое увеличение проницаемости.

В ходе опытов для большинства образцов выполнялись остановки нагружения для регистрации процес-

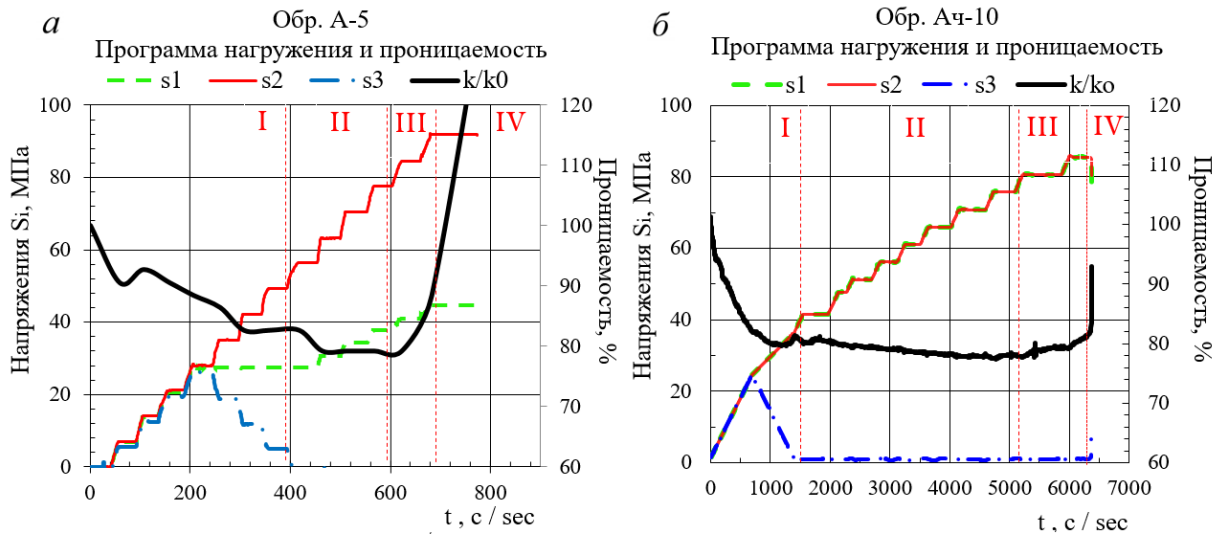


Рис. 2. а — Программа нагружения и кривая проницаемости образца А-5, б — Программа нагружения и кривая проницаемости образца Ач-10

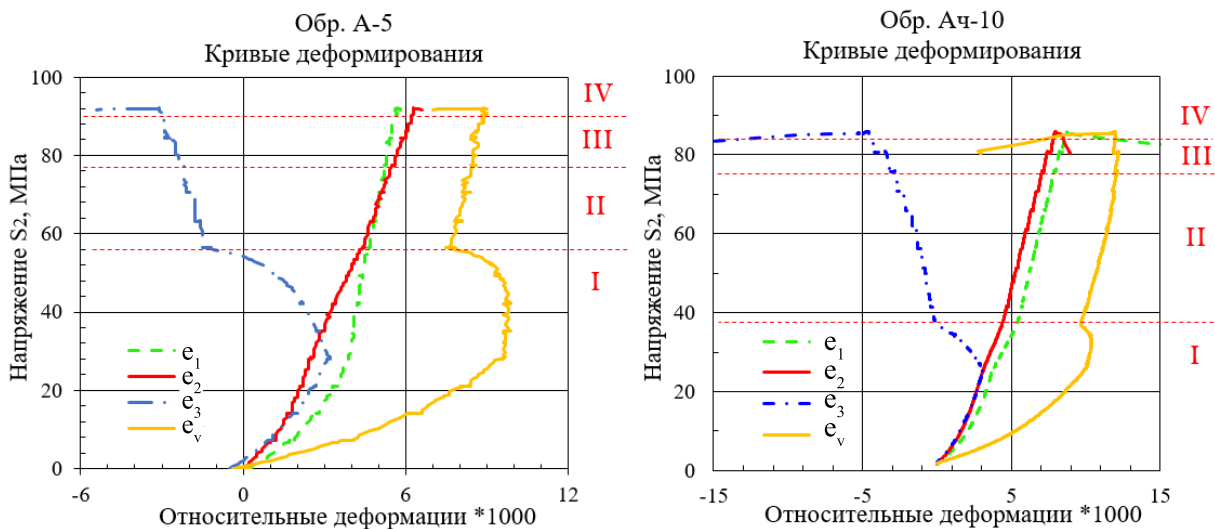


Рис. 3. а — Кривые деформирования образца А-5, б — Кривые деформирования образца Ач-10

са ползучести и его влияния на проницаемость пород. Паузы нагружения и дальнейшая выдержка под постоянной нагрузкой соответствовали некоторой величине депрессии на скважине. Если ползучесть в ходе остановки была затухающей, нагружение возобновлялось до появления существенных неупругих деформаций, после чего рост напряжений вновь прекращался. В [9] описаны результаты измерения деформаций ползучести в образцах с целью изучения характера деформирования и недопущения неконтролируемого разрушения пород в ходе эксплуатации скважины. В данной работе изучается процесс изменения проницаемости в ходе длительного неупругого деформирования.

На рис. 4 в качестве примера для образца Ач-10 представлены кривые ползучести и соответствующие

кривые изменения проницаемости во времени для нескольких значений напряжений. По оси ординат отложены изменения деформации (радиальной компоненты) и изменение относительной проницаемости по сравнению с их величинами на момент остановки нагружения. При напряжениях $S_2 = 70.7$ МПа и $S_2 = 75.8$ МПа ползучесть образца была ограниченной, т.е. затухала со временем, 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.

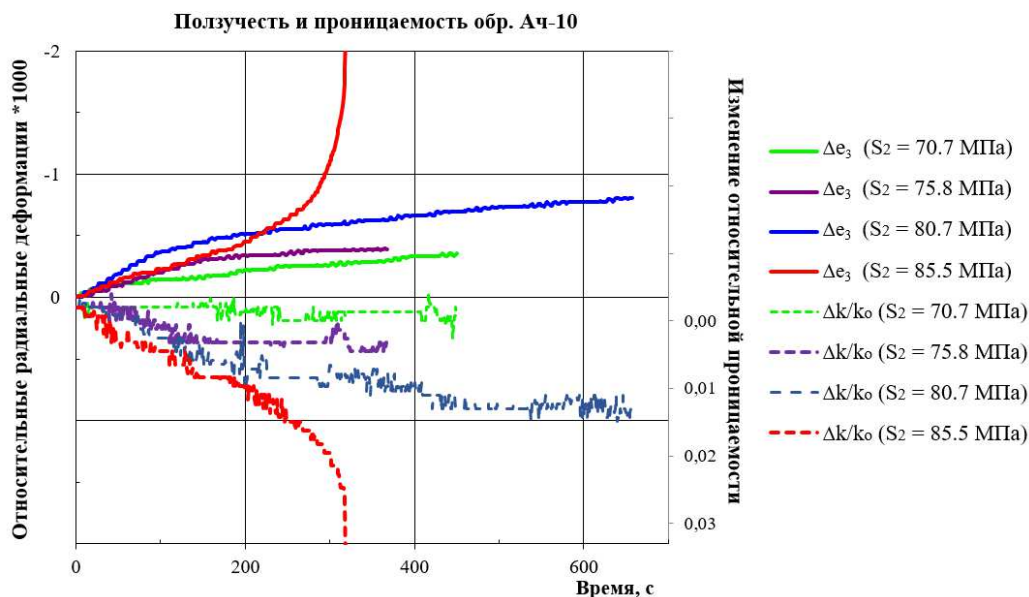


Рис. 4. Кривые ползучести и проницаемости образца Ач-10

Анализируя полученные зависимости ползучести и проницаемости для каждого из образцов, было установлено, 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. Он представляет собой отношение выборочного коэффициента ковариации к произведению выборочных средних квадратических отклонений [27]. Для примера в таблице 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.

Как видно из таблицы, значения модуля коэффициента корреляции по мере роста напряжений (и деформаций) для каждого образца приближаются к единице. Высокий коэффициент свидетельствует о сильной прямой (положительный знак) или сильной обратной связи (отрицательный знак) между величинами. Как можно заметить, остановки при меньшем уровне напряжений 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 те-

Таблица. Сводные результаты анализа

| № Обр. | Фикс. кольцевое напряжение S_2 , МПа | Коеф. корреляции r |
|--------|--|----------------------|
| Ач-10 | 56.2 | 0.531946 |
| | 61 | 0.524044 |
| | 66 | 0.398166 |
| | 70.7 | -0.5021 |
| | 75.8 | -0.91792 |
| | 80.7 | -0.94373 |
| | 85.5 | -0.95902 |
| Ач-7.4 | 52.6 | -0.52783 |
| | 65 | -0.78787 |
| | 70.6 | -0.77239 |
| Ач-6 | 54.7 | -0.71316 |
| | 61.6 | -0.94118 |

кущем 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. 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. Высокие значения корреляций как с положительным, так и с отрицательным знаками в рамках одного исследуемого образца, говорят о тесноте свя-

зи 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. Статистическая значимость рассчитанных коэффициентов подтверждена с использованием t -статистики.

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 планируется 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.

Ползучесть исследованных пород при докритических значениях максимального главного напряжения проявлялась незначительно и была затухающей, что характерно для начальных этапов развития ползучести. Установившийся режим ползучести либо отсутствовал, либо был непродолжительным, быстро приводя к появлению третьей стадии ползучести. При проявлении дилатансии изменение 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. 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.

Полученные в настоящей работе данные о влиянии процесса ползучести на фильтрационные характеристики пород хорошо коррелируют с описанным в статье [28] 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 напряже-

нии, 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. В рамках проведенных исследований авторами работы [28] 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.

Изменение проницаемости пород ачимовских отложений по мере роста касательных напряжений демонстрировало меньшую чувствительность к напряженно-деформированному состоянию, чем в породах, описанных в [29, 30]. Описанный в настоящей работе характер изменения проницаемости исследуемых пород также хорошо коррелирует с результатами, полученными при многолетнем изучении свойств кобургского известняка канадскими исследователями в работе [10]. 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 слиянием 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 [31] 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.

В [9] утверждалось, что результаты опытов показали кратковременность и незначительность процессов развития микротрещин и их влияния на проницаемость в данных образцах. Действительно, величина роста проницаемости в ходе предполагаемого развития микротрещиноватости является незначительной на фоне скачкообразного роста при макро-растрескивании. Поэтому с прикладной точки зрения эти процессы могут остаться неучтенными при условии дальнейшей дезинтеграции породы. Однако детальный анализ изменения фильтрационных свойств в ходе неупругого деформирования показал наличие кратковременных участков дилатансии в исследуемых образцах (либо длительных, но с незначительным изменением проницаемости), которые необходимо принимать во внимание при планировании длительной эксплуатации скважин. Так, в [9] был сделан вывод о том, что одним из факторов при реализации метода является правильный выбор геометрии забоя скважины, которая определяет распределение напряжений на стенках. Обнаруженный постепенный рост проницаемости в ходе пластического деформирования, свидетельствует о том, что другим фактором для реализации способности данных пород 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 увеличения нефтеотдачи (МУН), основанных на геомеханическом подходе.

Изучаемые в работе процессы знакопеременного изменения проницаемости рассматривались в недавних работах [32, 33] на примере сложнопостроенных карбонатных коллекторов Припятского прогиба. Среди исследуемых пород присутствовали как низкопроницаемые, так и относительно высокопроницаемые породы. Исследователями 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 взаимоположенных 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.

Результаты экспериментов подтверждают факт, что в механизмах длительного деформирования металлов и горных пород имеется ряд существенных отличий, выражающихся в активном проявлении процессов дилатансии, возможном отсутствии ускоряющегося этапа ползучести, проявлении дезинтеграции структуры, образовании множественных магистральных трещин и т.д. 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 кернового материала в условиях, приближенных к реальным.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе проведены исследования фильтрационных, деформационных и реологических свойств низкопроницаемых пород Уренгойского ГКМ на установке истинно трехосного нагружения в условиях реальных напряжений, возникающих в призабойной зоне скважин. Рассмотрены две конструкции забоя: необсаженная скважина, перфорационное отверстие в обсаженной скважине. Исследовались породы из разных интервалов залегания, взятые из трех скважин.

Определены зависимости фильтрационных свойств различных типов горных пород от вида и уровня напряженно-деформированного состояния, с последующим описанием механизмов изменения проницаемости и развития ползучести. Были выявлены закономерности в эволюции проницаемости исследованных терригенных пород ачимовских отложений в процессе вязкоупругопластического деформирования при моделировании понижения давления в скважине.

Установлена корреляция кривых изменения проницаемости и ползучести изучаемых пород. 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 это-

го фактора при эксплуатации скважины может позволить не допустить разрушения стенок либо повысить эффективность применения методов МУН, основанных на геомеханическом подходе.

Для более полного изучения изменения проницаемости в ходе изменения напряженно-деформированного состояния необходимо проведение широкого спектра различных лабораторных исследований, а также раз-

работка математических моделей, описывающих данные процессы с учетом совместного геомеханического, гидродинамического и геохимического моделирования.

Работа выполнена при финансовой поддержке проекта Российской Федерации в лице Министерства науки и высшего образования РФ № 13.1902.21.0018 (соглашение 075-15-2020-802).

-
- [1] *Кашников Ю.А., Ашихмин С.Г.* // Механика горных пород при разработке месторождений углеводородного сырья. М.: ООО «Недра-Бизнесцентр», 2007.
- [2] *Karev V., Kovalenko Yu., Ustinov K.* Geomechanics of Oil and Gas Wells. Springer Nature Switzerland AG. 2020.
- [3] *Christensen H.F., Foged N.* // Rock Mech. Petr. En. Delft. SPE-28134-MS. 1994.
- [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] *Яценко И.Г.* // Вестн. Инст. Геол. Коми НЦ УрО РАН. 2014. **11**(239).
- [6] *Чубаков Е.С., Кирсанов М.С.* // Труды ИПНГ РАН. Серия «Конференции». Материалы Всероссийской научной конференции 07–09 ноября 2018 г., М.: ИП Лысенко А.Д. «PRESS-BOOK.RU». 2018. С. 122.
- [7] *Повжик П.П., Сердюков Д.В., Демяненко Н. А.* и др. // *Neftgaz.ru*. 2018. № 6. С. 64.
- [8] *Букатов М.В., Пескова Д.Н., Ненашева М.Г., Погребнюк С.А.* и др. // Профессионально о нефти. 2018. № 2(8). С. 16.
- [9] *Карев В.И., Коваленко Ю.Ф., Химуля В.В.* // Учен. зап. физ. фак-та Моск. ун-та. 2021. № 2. 2120901.
- [10] *Nguyen T.S., Li Z., Su G., Nasser M.H.B., Young R.P.* // *J. Rock Mech. Geotech. En.* 2018. **10**, N 6. P. 1063. doi:10.1016/j.jrmge.2018.03.010
- [11] *Yang S., Hu B.* // *Sci. Rep.* 2020. **10**. N 1900.
- [12] *Sato M., Takemura T., Takahashi M.* // *Int. J. Rock Mech. Mining Sci.* 2018. **108**. P. 118. doi:10.1016/j.ijrmmms.2018.06.010.
- [13] *Baizhanov B., Katsuki D., Tutuncu A.N.* et al. // *Rock Mech. Rock. Eng.* 2019. **52**. P. 2491. doi: 10.1007/s00603-019-01816-6.
- [14] *Hu W., Wei Y., Bao J.* // *Petr. Explor. Dev.* 2018. **45**(4), P. 685.
- [15] *Holt R.M.* // *SPE Formation Evaluation*. 1990. 5(04). P. 444. doi:10.2118/19595-pa
- [16] *Jia Q., Liu D., Cai Y.* et al. // *Front. Earth Sci.* 2021. № 15. P. 202.
- [17] *Shi, J.-Q., Durucan, S.* // *SPE Rocky Mountain Petroleum Technology Conference. 2009. SPE-123206-MS.*
- [18] *Karev V., Kovalenko Y., Ustinov K.* Directional unloading method is new approach to enhancing oil and gas well productivity. In book: *Advances in Oil and Gas Exploration and Production*. Switzerland: Springer International Publishing. 2020. P. 155-166.
- [19] *Христианович С.А., Коваленко Ю.Ф., Кулинич Ю.В., Карев В.И.* // Нефть и газ Евразия. 2000. № 2. С. 90.
- [20] *Яркева Н.Р., Хазиев А.М.* // Нефтегазовое дело. 2018. № 5. С. 30.
- [21] *Karev V.I., Kovalenko Yu.F.* Triaxial loading system as a tool for solving geotechnical problems of oil and gas production. In M. Kwarsniewski et al. (eds), *True Triaxial Testing of Rocks*: 301–310. Leiden: CRC Press/Balkema. 2013.
- [22] *Karev V., Kovalenko Y., Ustinov K.* Geomechanics of oil and gas wells. *Advances in oil and gas exploration and production*. Springer International Publishing Cham: Switzerland, 2020.
- [23] *Karev V.I., Klimov D.M., Kovalenko Yu.F.* // *Phys. and Math. Modeling of Earth and Environment Proc.* Springer, 2018. pp. 336–350.
- [24] *Ляв А.* Математическая теория упругости. М.–Л.: ОНТИ НКГип. СССР, 1935.
- [25] *Klimov D.M., Karev V.I., Kovalenko Y.F.* // *Mechanics of Solids*. 2015. **50**, № 6. С. 633.
- [26] *Тимошенко С.П.* Теория упругости. Издание второе исправленное. Л.: Ленгорлит, 1937.
- [27] *Гмурман В. Е.* Теория вероятностей и математическая статистика. М.: Высшая школа, 2004.
- [28] *Liu Z., Shao J.* // *Rock Mech. Rock Eng.* 2017. N 50. P. 529.
- [29] *Карев В.И., Химуля В.В.* // Учен. зап. физ. фак-та Моск. ун-та. 2018. № 4. 1840405.
- [30] *Карев В.И., Химуля В.В., Коваленко Ю.Ф.* // Процессы в геосредах. 2018. № 1(14). С. 746.
- [31] *Nasser M.H.B., Young R.P.* // Final Report. University of Toronto Rock Fracture Dynamics Facility, 2016.
- [32] *Ковхута А.М., Кибаш М.Ф., Зайцев А.И., Евтушенко Н.Н., Лобова Н.Л., Лобов К.А.* // Матер. Межд. Науч.-практ. Конф. в рамках XVII сессии Межправительственного совета стран Содружества Независимых Государств по разведке, использованию и охране недр. Минск, 13–15 ноября 2013 г. С. 27.
- [33] *Ковхута А.М., Кибаш М.Ф., Зайцев А.И., Евтушенко Н.Н., Лобова Н.Л., Лобов К.А.* // Геол. Геоф. Разраб. Нефт. Газ. Месторожд. 2015. № 3. С. 56.

Experimental study of deformation and filtration processes in low-permeability reservoir rocks of Achimov deposits when implementing the method of directional unloading of the reservoir

V.I. Karev^a, Yu. F. Kovalenko^b, V.V. Khimulia^c

¹*Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics of the Russian Academy of Sciences, Moscow, 119526, Russia*
E-mail: ^awikarev@ipmnet.ru, ^bperfolinkgeo@yandex.ru, ^cvalery.khim@gmail.com

The article describes the studies of rheological and filtration characteristics of low-permeability rocks of the Achimov deposits of the Urengoy gas-condensate field in the course of modeling the implementation of the method of directional unloading formation. The experiments were carried out on the Triaxial Independent Load Test System (TILTS) at the Institute for Problems in Mechanics of the Russian Academy of Sciences. The results of physical modeling of actually occurring stresses in the vicinity of the wells during application of the method of directional unloading formation are presented. The statistical analysis of the influence of the creep process on the permeability of the rocks under study is carried out. The patterns of changes in the filtration characteristics of the studied rocks of the Achimov deposits during the simulation of the implementation of the method of directional unloading are established. Based on the experimental studies, conclusions were made about ways of preventing negative processes in reservoirs and ways of increasing well productivity were outlined.

PACS: 91.60.-x.

Keywords: directional unloading method, filtration, rocks, Achimov deposits, true triaxial loading, stress.

Received 17 May 2022.

Сведения об авторах

1. Карев Владимир Иосифович — доктор техн. наук, зам. директора.; тел.: (495) 434-35-56, e-mail: wikarev@ipmnet.ru.
2. Коваленко Юрий Федорович — доктор физ.-мат. наук, зав. лабораторией; e-mail: perfolinkgeo@yandex.ru.
3. Химуля Валерий Владимирович — канд. физ.-мат. наук, мл. науч. сотрудник; e-mail: valery.khim@gmail.com.