## Фильтрационные и реологические характеристики низкопроницаемых пород-коллекторов при моделировании направленной разгрузки пласта

В.И. Карев,<sup>\*</sup> Ю.Ф. Коваленко,<sup>†</sup> В.В. Химуля<sup>‡</sup>

Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН. Россия, 119526, Москва, пр-т Вернадского, 101 (Статья поступила 13.01.2021; Подписана в печать 16.02.2021)

Данная работа посвящена исследованию реологических, деформационных и фильтрационных свойств низкопроницаемых пород ачимовских отложений Уренгойского газоконденсатного месторождения при применении метода направленной разгрузки пласта (НРП). В рамках исследования выполнено физическое моделирование реально возникающих в окрестности скважины напряжений при использовании метода направленной разгрузки пласта. Эксперименты проводились на Испытательном стенде трехосного независимого нагружения Института проблем механики РАН. Моделирование проведено для двух типов конструкции забоя скважин: необсаженной скважины (открытый ствол) и перфорационного отверстия в обсаженной скважине. Показана зависимость фильтрационных свойств образцов от вида напряжению-деформированного состояния, сделаны выводы о характере ползучести, определены значения депрессий, приводящих к увеличению проницаемости пород. Полученные результаты свидетельствуют о том, что метод направленной разгрузки пласта может быть успешно применен для скважин, пробуренных на ачимовские отложения.

РАСS: 91.60.-х УДК: 552.1.

Ключевые слова: горные породы, ачимовские отложения, истинно трехосное нагружение, напряженнодеформированное состояние, ползучесть, фильтрация, проницаемость.

#### введение

На сегодняшний день доля легкоизвлекаемых запасов углеводородного сырья стремительно сокращается. Это приводит к тому, что все чаще в разработку вводятся объекты с низкими фильтрационными характеристиками пород. Разработка таких объектов представляет существенную сложность как в техническом плане, так и в экологическом. В последние годы выбор оптимальных способов разработки низкопроницаемых залежей становится важнейшей задачей для большинства нефте- и газодобываюших компаний в России и в мире [1]. Эти задачи ставятся как при освоении трудноизвлекаемых запасов на новых месторождениях, так и в краевых зонах давно эксплуатируемых объектов [2].

Извлечение значительных запасов трудноизвлекаемого углеводородного сырья зачастую осложнено не только низкой проницаемостью коллекторов, но и большой глубиной залегания [3]. При таких условиях применение традиционных методов разработки, в том числе гидроразрыва пласта, становится неэффективным в силу технологических и геофизических причин [4]. Это приводит к необходимости создания и внедрения новых низкозатратных и эффективных методов повышения продуктивности скважин, а также способов снижения рисков негативного воздействия на призабойную зону пласта. С данной точки зрения видится наиболее перспективным использование технологий, в основе которых лежит воздействие на пласт за счет большого запаса упругой энергии, запасенного внутри него и обусловленного наличием горного давления и пластового давления флюида [5]. Характер и метод воздействия на пласт определяется на базе геомеханического подхода. Использование таких методов обеспечит не только увеличение эффективности добычи, но и снижение рисков экологического ущерба и техногенных рисков при разработке и эксплуатации скважин.

Ачимовские отложения характеризуются низкой проницаемостью — до нескольких десятков мД. Они залегают на глубинах около 4 км и обладают аномально высоким пластовым давлением нефти. Эти факторы являются причиной, затрудняющей использование традиционных технологий для разработки ачимовских отложений [6]. Однако с точки зрения применения технологий, основанных на геомеханическом подходе, данные условия являются преимуществом.

В данной работе представлены результаты экспериментальных исследований кернового материала из ачимовских отложений Уренгойского газоконденсатного месторождения, подтверждающие вывод о перспективности применения технологий, основанных на геомеханическом подходе.

### 1. МЕТОД НАПРАВЛЕННОЙ РАЗГРУЗКИ ПЛАСТА

Знание физических характеристик продуктивного пласта необходимо для создания геомеханической модели месторождения, на основе которой создается проект его разработки, а также для поиска способов повышения продуктивности скважин, нефтеотдачи пластов и обеспечения устойчивости стволов скважин [7]. Ве-

<sup>\*</sup>E-mail: wikarev@ipmnet.ru

<sup>&</sup>lt;sup>†</sup>E-mail: perfolinkgeo@yandex.ru

<sup>&</sup>lt;sup>‡</sup>E-mail: valery.khim@gmail.com

личина дебита конкретной скважины существенно зависит от фильтрационных свойств пород, находящихся в ее призабойной зоне. Ухудшение проницаемости даже в небольшой окрестности скважины, потенциально возникающее вследствие различных процессов, в том числе бурения и эксплуатации, существенно снижает ее продуктивность [8].

Принято считать, что одной из главных причин уменьшения проницаемости является загрязнение фильтрационных каналов во время промышленных работ на скважине [9]. Однако существенное изменение проницаемости в окрестности скважины также может происходить вследствие влияния механических напряжений на фильтрационные свойства породы [10]. И хотя зависимость проницаемости от концентрации напряжений исследуется давно [11], в том числе для прискважинных условий, роль напряжений, возникающих в призабойной зоне, в настоящее время изучена недостаточно. За последнее время проводилось немалое число экспериментальных испытаний кернового материала [12, 13], а также геофизических исследований скважин, с целью определения закономерностей влияния напряженно-деформированного состояния на фильтрационные свойства пород. Известно, что в зависимости от литологического состава, деформационных и прочностных свойств, глубины залегания и структуры пород, пластового давления нефти, геометрии забоя скважины и режимов ее эксплуатации, возникающие в породах напряжения могут значительно и необратимо изменять проницаемость пород [14]. Причем проницаемость горных пород, слагающих продуктивные пласты, при изменении напряжений в ходе технологических операций может как увеличиваться, так и уменьшаться [15-17]. Более детально влияние неравнокомпонентого поля напряжений в горных породах на их фильтрационные свойства описано в [18].

На основе принципиально нового геомеханического подхода в Институте проблем механики РАН был разработан новый эффективный и экономичный метод повышения продуктивности нефтяных и газовых скважин — метод направленной разгрузки пласта (НРП) [19]. Технология метода основана на явлении резкого увеличения проницаемости горных пород в результате возникновения искусственной системы микро- и макротрещин (новых фильтрационных каналов) в призабойной зоне пласта при понижении давления в скважине до определенного уровня и формирования определенной геометрии забоя скважины [20]. Требуемая величина депрессии и геометрия забоя определяются на основании лабораторных испытаний кернового материала с помощью ИСТНН — Испытательной системы истинно трехосного независимого нагружения, описание которой представлено ниже. В отличие от метода гидроразрыва пласта [21], при реализации которого необходимо затрачивать энергию на создание трещин гидроразрыва с целью преодоления горного давления, в этой технологии 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 пластовых пород месторождения. Также особенно важным представляется исследование влияния неравнокомпонентного напряженного состояния, возникающего в призабойной зоне скважины, на проницаемость пород.

#### 2. ИСПЫТАТЕЛЬНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ И ПОДГОТОВКА ОБРАЗЦОВ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ

Эксперименты проводились на ИСТНН — уникальной испытательной системе трехосного неравнокомпонентного нагружения, созданной в Институте проблем механики РАН [22]. ИСТНН предназначена для изучения механических и фильтрационных характеристик пород нефтегазовых, рудных и угольных месторождений. Она позволяет нагружать образцы породы, представляющие собой кубики с гранью 40 или 50 мм, независимо по трем осям, что дает возможность воссоздавать в ходе опытов напряженное состояние любого типа, которое возникает в пласте при проведении различных технологических операций на скважине, а также изучать влияние напряжений на фильтрационные свойства породы путем непрерывного измерения проницаемости в ходе испытания [23].

Объектом исследования являются породы ачимовских отложений скважин №737, №756 и №789 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 оставлялись свободными для пропуска через образец воздуха и измерения проницаемости. Всего был испытан 21 образец.

Перед испытаниями была определена степень анизотропии упругих свойств исследуемых образцов. Для этого измерялись скорости прохождения упругих продольных волн по трем осям для каждого образца [24]. На всех образцах скорости продольных волн вдоль оси керна были незначительно меньше, чем вдоль двух осей в горизонтальной плоскости. Для примера, в одном из прозвучиваемых образцов скорость распространения волны по оси керна составляла 2631 м/с; вдоль других двух осей — 2703 м/с. Для образца, изготовленного из другого интервала отбора керна, скорость по оси 1 составила 2632 м/с, а по двум другим осям — 2941 м/с. Это является свидетельством того, что иссле-



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

дуемые породы являются трансверсально изотропными с низкой степенью анизотропии.

#### 3. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИСПЫТАНИЙ

В рамках работы проведена серия экспериментов по физическому моделированию механических и фильтрационных процессов в продуктивных пластах ачимовских отложений УГКМ при реализации метода направленной разгрузки пласта.

Ачимовские отложения Уренгойского ГКМ при глубине залегания порядка 3700 м, где горное давление составляет величину порядка 92 МПа, характеризуются аномально высоким пластовым давлением — от 57 до 64 МПа.

Во время испытаний к граням кубических образцов прикладывались напряжения, соответствующие реально возникающим напряженным состояниям, возникающим на стенках скважин при создании депрессии в скважине. Во время нагружения записывались деформации образцов по каждой оси, а также измерялась проницаемость породы в направлении притока флюида к скважине. В ходе эксперимента определялись зависимости проницаемости породы от изменяющегося трехмерного напряженного состояния. Нагружение образцов выполнялось по двум программам нагружения, соответствующих случаю необсаженной скважины, а также случаю перфорационного отверстия в обсаженной скважине. Составление программ нагружения детально описано в [25].

В цилиндрической системе координат на стенках необсаженной скважины действуют три вида напряжений: радиальное  $\sigma_r$ , кольцевое  $\sigma_{\theta}$  и вертикальное  $\sigma_z$  ( $\sigma_i < 0$ ). На рис 1,*a* представлена программа нагруже-

ния образцов при моделировании понижения давления в необсаженной скважине для случая равнокомпонентного горного давления. Изображенные напряжения S<sub>1</sub>,  $S_2, S_3$  — напряжения, прикладываемые к граням образца по осям 1, 2, 3 нагружающего узла ИСТНН. Их значения соответствуют эффективным напряжениям  $S_Z$ ,  $S_{\theta}$ ,  $S_R$ , действующим на контуре скважины  $(S_i = \sigma_i + p_c, S_i < 0, p_c > 0)$ . Данные напряжения определяются из решения задачи Ламе как  $S_R = 0$ ,  $S_{\theta} = 2(q+p), S_Z = q+p_w$ , где q — горное давление (q < 0), положенное равнокомпонентным, а  $p_c$  — давление на забое скважины [26]. При составлении программ была принята изотропная модель среды в силу низкой степени анизотропии упругих свойств пород. В случае отсутствия выраженных геологических нарушений вертикальное горное давление равно весу вышележащих пород, т.е.  $q = -\gamma h$ , где  $\gamma$  — средний удельный вес горных пород, *h* — глубина залегания пласта [27].

Программа нагружения состоит из трех этапов:

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

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



Рис. 2: *а* — Программа нагружения и кривая проницаемости образца А-1, *б* — программа нагружения и кривая проницаемости образца А-9, *в* — кривые деформирования образца А-1, *г* — кривые деформирования образца А-9

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

При построении программы нагружения, модулирующей 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 [28]. В окрестности сферического перфорационного отверстия действуют радиальное  $\sigma_r$  и два кольцевых напряжения  $\sigma_{\theta}$  и  $\sigma_{\omega}$ . Соответствующие им эффективные напряжения  $S_R, S_{\theta}, S_{\varphi}$ , действующие на грунтовый скелет, прикладываются к граням образца в нагружающем узле установки ИСТНН как S<sub>3</sub>, S<sub>1</sub>, S<sub>2</sub> и представлены на рис 1,б. Программа нагружения при моделировании перфорационного отверстия имеет три этапа, аналогичных ранее описанным, однако распределение напряжений меняется.

Точка A соответствует напряженному состоянию в матрице породы до пробуривания скважины, т.е.  $S_1 = S_2 = S_3 = |q| - p_0$ , где  $p_0$  — значение пластового давления. Точка B соответствует состоянию, когда скважина пробурена и давление на забое равно пластовому. При этом прикладываемые напряжения соответствуют решению задачи о распределении напряжений в окрестности сферы:  $S_3 = 0$ ,  $S_1 = S_2 = 3/2(|q| - p_c)$ . Среднее напряжение  $(S_1 + S_2 + S_3)/3$  сохраняется постоянным на протяжении всего этапа 2. Участок программы BC соответствует понижению давления на забое скважины.

### 4. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

На рис. 2 представлены результаты испытаний образцов А-1 и А-9, вырезанных из одного куска керна с глубиной залегания 3766 м. Первый из представленных образцов был испытан по программе открытого ствола скважины, второй — по программе перфорационного отверстия. На рис. 2,*а*, *б* изображены фактические программы нагружения для каждого образца, а также кривые изменения проницаемости в ходе



Рис. 3: *а* — Программа нагружения и кривая проницаемости образца А-61, *б* — программа нагружения и кривая проницаемости образца Ач-7.4, *в* — кривые деформирования образца А-61, *е* — кривые деформирования образца Ач-7.4

эксперимента. Ниже (рис. 2,*в*, *г*) расположены кривые деформирования образцов. Напряжение S<sub>2</sub> монотонно растет в ходе опыта и является параметром нагружения.

Оба образца обладали низкой начальной проницаемостью: порядка миллидарси. Из рис. 2,а видно, что проницаемость образца А-1 не менялась вплоть до этапа понижения давления в скважине. По мере роста касательных напряжений проницаемость менялась незначительно, и при значении  $S_2 = 109 \,\mathrm{M\Pi a}$  образец начал интенсивно деформироваться, что привело к разрушению и к скачкообразному росту проницаемости в силу растрескивания и образования новой сети фильтрационных каналов. Зарегистрировать точное значение конечной проницаемости не всегда представляется возможным, так как при растрескивании нарушается герметичность пленки, покрывающей образец. Однако даже последняя зарегистрированная проницаемость образца составила 130% от начальной. Стоит отметить, что на протяжении опыта порода деформировалась упруго, после чего произошел резкий переход к неупругому состоянию и дальнейшему разрушению. Значение напряжения, при котором произошло растрескивание образца, соответствует депрессии на забое в 26.4 МПа.

Проницаемость образца А-9 (рис. 2,6) также изменялась незначительно в ходе нагружения вплоть до перехода к неупругому деформированию и дальнейшему растрескиванию при напряжении  $S_2 = 105 \,\mathrm{M\Pi a}$ , соответствующему депрессии на забое в 38.8 МПа, что привело к резкому увеличению проницаемости. Образец деформировался практически упруго в ходе нагружения вплоть до разрушения. Таким образом, оба образца проявили хрупкий характер разрушения.

На рис. З представлены результаты испытаний образцов А-61 и Ач-7.4 из двух других скважин (737 и 789 соответственно) с различными глубинами залегания. Образец А-61 был испытан по программе необсаженной скважины. Глубина отбора керна составила 3730.5 м. Образец обладал низкой начальной проницаемостью в 0.5 мД, которая монотонно уменьшалась в ходе нагружения. С учетом малости начального значения проницаемости такое изменение можно считать незначительным, так как даже в минимальной точке кривой проницаемость составляла около 0.3 мД. Однако далее видна предпосылка к скачкообразному увеличению проницаемости при достижении кольцевым напряжением значения 98.5 МПа, соответствующего депрессии 18.6 МПа. При этом порода начала интенсивно ползти, что привело к растрескиванию образца. Стоит также отметить, что до возникновения критических касательных напряжений порода деформировалась упруго, т.е. имеет место хрупкий характер разрушения.



Рис. 4: а — График ползучести образца Ач-7.4, б — график ползучести образца А-17, в — график ползучести образца А-10

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

Для части образцов нагружение приостанавливалось в ходе опыта для определения характера ползучести. В случае отсутствия ползучести в данной точке нагружение возобновлялось. Так, для описанного выше образца Ач-7.4 было выполнено две остановки при значениях кольцевого напряжения 52.5 МПа и 65 МПа. Эти значения напряжений соответствуют депрессиям в 10.1 МПа и 18.4 МПа. На рис. 4,*а* представлены кривые ползучести данного образца. Как видно из графиков, ползучесть при данных значениях напряжений практически отсутствовала. Более показательными являются представленные на рис 3,*б, в* кривые ползучести образцов А-17 и А-10. Для образца A-17 интервал отбора керна из скв. 756 составил 3727 м. Деформации ползучести образца измерялись при значениях кольцевых напряжений 34.1 МПа и 98.5 МПа, соответствующим депрессиям 2.8 МПа и 40.1 МПа. При первой остановке нагружения ползучесть практически отсутствовала в силу малости касательных напряжений. Однако при повторной остановке с существенно большим напряжением наблюдалось интенсивная ползучесть образца с нарастающей скоростью, вследствие которой произошло дальнейшее разрушение.

Для образца A-10 глубина отбора керна составила 3794.2 м. В ходе нагружения образца было сделано несколько остановок, однако ползучести не наблюдалось вплоть до значения  $S_2=76.1$  МПа, соответствующего депрессии  $\Delta_p = 24.7$  МПа (рис. 4,s). При таком напряженном состоянии наблюдалась незначительная затухающая ползучесть. На следующей остановке нагружения при  $S_2 = 82$  МПа и депрессии  $\Delta_p = 25.4$  МПа проявлялась интенсивная ползучесть с возрастающей скоростью, вследствие которой произошло разрушение образца.

Сводные результаты испытаний пород ачимовских отложений представлены в табл. 1. Для каждого образца указаны: номер скважины; программа нагружения; глубина отбора керна; критические значения кольцевой составляющей напряжений; депрессии, приводящие к разрушению; начальная проницаемость.

Следует отметить, что увеличение проницаемости, вызванное ростом количества микротрещин в хруп-

Nº	Номер образца	Скважина №	Программа нагружения	Глубина отбора, м	$S_{ heta},$ МПа	$\Delta p,$ МПа	k₀,мД
1.	A-6	737	Открытый ствол	3836	115	24	3.7
2.	A-11	737	Перфорация	3836	85	21.6	0.2
3.	A-4	737	Перфорация	3825	90	30	0.18
4.	A-5	737	Открытый ствол	3825	92	16	0.13
5.	A-8	737	Открытый ствол	3825	113	26.5	0.14
6.	A-10	737	Перфорация	3794	82	25.4	2.41
7.	A-3	737	Открытый ствол	3794	63	22	2.41
8.	A-2	737	Открытый ствол	3793	68	4.8	1.61
9.	A-7	737	Открытый ствол	3793	81	11.3	1.61
10.	A-1	737	Открытый ствол	3766	110	26.4	2.02
11.	A-9	737	Перфорация	3766	105	38.8	2.04
12.	A-17	756	Перфорация	3727	98.5	40.1	0.027
13.	A-22	756	Перфорация	3730	98.5	40.1	0.1
14.	A-32	756	Перфорация	3740	не разруш		0.001
15.	A-42	756	Открытый ствол	3730	88.3	33.3	0.1
16.	A-52	756	Перфорация	3749	не разруш		0.013
17.	A-61	756	Открытый ствол	3730	98.5	18.6	0.5
18.	Ач-6	789	Открытый ствол	3625	61.6	5.5	34.8
19.	Ач-7.3	789	Открытый ствол	3628	74.6	12.4	18.9
20.	Ач-7.4	789	Перфорация	3628	71	22.4	24.1
21.	Ач-10	789	Перфорация	3630	85.5	31.7	22.5

Таблица I: Сводные результаты испытаний

ком материале, описанное в статье [29], не наблюдалось в ходе опытов. В упомянутой работе описываются механизмы роста проницаемости при нагружении хрупких материалов, одним из первых среди которых является рост числа микротрещин, по мере которого инициируется постепенное улучшение фильтрационных свойств. Ориентация, рост и связность таких трещин зависит от свойств материала и способа нагружения. Как видно из проведенных экспериментов, увеличение проницаемости для исследуемых пород происходило в основном скачкообразно, что можно связать лишь с появлением макротрещин. Влияние этапа развития микротрещин в изучаемых породах может быть незначительным в силу его кратковременности и стремительного роста, раскрытия микротрещин или особенностей ориентации возникающих трещин вследствие специфической траектории нагружения. Роль данного этапа может заметнее проявляться при длительной выдержке породы на докритических нагрузках.

Полученные результаты хорошо коррелируют с представленными исследованиями базальтовых хрупких пород в [30], несмотря на различия приложенных полей напряжений. Авторы описывают изменение проницаемости образцов в три этапа по мере приложения неравномерной нагрузки: незначительное уменьшение проницаемости, связанное с изначальной закрытостью микротрещин в породе и/или их малой исходной плотностью; отсутствие изменения проницаемости, связанное с упругим деформированием образцов; значительное постепенное увеличение проницаемости, вызванное раскрытием, слиянием микротрещин и их соединением с сетью исходных фильтрационных каналов. Как было описано ранее, стремительное развитие третьего этапа и резкий переход к возникновению макротрещин в изучаемых породах ачимовских отложений может быть связан как с особенностями внутренней структуры исследуемой породы, так и с существенной неравномерностью поля напряжений при реализации метода НРП.

Результаты физического моделирования процессов деформирования и фильтрации в породах ачимовских отложений Уренгойского ГКМ показывают, что путем создания необходимого напряженного состояния в окрестности скважины с помощью метода направленной разгрузки пласта возможно вызвать растрескивание породы, приводящее к значительному увеличению проницаемости. При эксплуатации скважин депрессия на забое составляет 24-26 МПа. Кроме того согласно принятой технологии освоения скважин на Уренгойском ГКМ после освоения скважина ставится на продувку — она работает на факел или через штуцер, или через открытый конец. При этом депрессия на забое достигает 50 и более МПа. Поэтому полученные в результате испытаний кернового материала на установке ИСТНН величины депрессий, необходимые для реализации метода НРП — 20– 40 МПа, вполне достижимы для условий Уренгойского ГКМ. Вывод о возможности увеличения проницаемости призабойной зоны путем создания депрессии достаточно высокого уровня подтверждается также наблюдавшимися на практике случаями, когда в процессе бурения (скважины при этом еще не обсажены) возникали аварийные ситуации, связанные со значительным поглощением бурового раствора на забое скважины и, как следствие, значительным понижением забойного давления. Это приводило к выносу породы из скважин и резкому росту дебита скважин. В результате дебит аварийных скважин при эксплуатации достигал 2 млн. м<sup>3</sup> газа при обычных дебитах на порядок меньше.

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

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Эксперименты по изучению деформационных, фильтрационных и реологических свойств низкопроницаемых пород ачимовских отложений Уренгойского газоконденсатного месторождения и физического моделирования деформационных процессов в окрестности скважины при реализации метода направленной разгрузки пласта показали следующее. Фильтрационные свойства исследуемых пород незначительно зависят от напряженно-деформированного состояния, однако при достижении касательными напряжениями критических значений может происходить скачкообразное и необратимое увеличение проницаемости, вызванное растрескиванием породы и образованием новой сети фильтрационных каналов. Исследуемым породам присущ хрупкий характер разрушения. Ползучесть в ходе роста депрессии на забое скважины практически отсутствует, однако по достижении касательными напряжениями критических значений наблюдается интенсивная нарастающая ползучесть, приводящая к разрушению породы и росту проницаемости.

Таким образом, результаты исследований показали, что метод направленной разгрузки может быть реализован для низкопроницаемых пород ачимовских отложений в условиях как открытого ствола скважины, так и обсаженного ствола с перфорацией. Сделана предварительная оценка величин депрессий, необходимых для реализации метода. Разрушение образцов, испытанных по программе открытого ствола скважины, в основном происходило при меньших значениях депрессий, но для однозначного вывода о предпочтительной геометрии забоя для данных условий необходимо проведение дальнейших исследований данных пород.

Обобщая результаты экспериментов, можно сделать вывод, что физическое моделирование процессов деформирования, разрушения и фильтрации в пласте в рамках геомеханического подхода может служить основой для разработки новых эффективных и экологически чистых технологий повышения продуктивности скважин и увеличения нефтеотдачи низкопроницаемых пластов.

Работа выполнена по теме государственного задания (№ госрегистрации АААА-А20-120011690133-1)

- [1] 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.
- [2] Василькова Н.А., Горева А.А., Данильченко В.А. и др. Государственный доклад «О состоянии и использовании минерально-сырьевых ресурсов Российской Федерации в 2016 и 2017 годах». Министерство природных ресурсов и экологии Российской Федерации, 2018.
- [3] Ященко И.Г. // Вестник Института геологии Коми НЦ УрО РАН. 2014. 11 Р. 239.
- [4] 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.
- [5] Повжик П. П., Сердюков Д. В., Демяненко Н. А. и др. // Neftegaz.ru. 2018. № 6. С. 648.

- [6] Букатов М. В., Пескова Д. Н., Ненашева М. Г., Погребнюк С. А. и др. // Профессионально о нефти. 2018 № 2(8). С. 16.
- [7] Mohammad N., Antonin S., Wan R. // SPE Hydraulic Fracturing Technology Conference, The Woodlands, Texas, USA, February 2012.
- [8] Boronin S. A., Tolmacheva K. I., Osiptsov A. A. et al. // SPE Russian Petroleum Technology Conference, Moscow, Russia, October 2017.
- [9] *Reed M. G. //* SPE Centennial Symposium at New Mexico Tech, Socorro, New Mexico, October 1989.
- [10] Davies J. P., Davies D. K. // SPE J. 2001. 6. P. 224.
- [11] Fatt I., Davis D. H. // J. Pet. Technol. 1952. 4. P. 16.
- [12] Nguyen T. S., Li Z., Su G., Nasseri M. H. B., Young R. P. // Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. 2018.
- [13] Yang S., Hu B. // Sci. Rep. 2020.10. P. 1900.

- [14] Hu W., Wei Y., Bao J. // Petroleum Exploration and Development. 2018. 45, N 4. P. 685.
- [15] Holt R. M. // SPE Formation Evaluation. 1990. 5, N 04. P. 444.
- [16] Jia Q., Liu D., Cai Y. et al. // Front. Earth Sci. 2020.
- [17] *Shi J.-Q., Durucan S. //* SPE Rocky Mountain Petroleum Technology Conference. 2009.
- [18] *Карев В.И., Химуля В.В.* // Учен. зап. физ. фак-та Моск. ун-та. 2018. № 4.
- [19] Христианович С.А., Коваленко Ю.Ф., Кулинич Ю.В., Карев В.И. // Нефть и газ Евразия. 2000. № 2. С. 90.
- [20] *Коваленко Ю. Ф., Карев В. И.* // Технологии ТЭК. 2003. № 1. С. 31.
- [21] *Яркеева Н.Р., Хазиев А.М.* // Нефтегазовое дело. 2018. № 5. С. 30.
- [22] Karev V., Kovalenko Yu., Ustinov K. Geomechanics of Oil and Gas Wells. 2020. Springer Nature Switzerland AG. 166 p.
- [23] 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.

- [24] 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. 166 p.
- [25] Karev V. I., Klimov D. M., Kovalenko Yu. F. Modeling // Phys. and Math. Modeling of Earth and Environment Proc. Springer, 2018. pp. 336–350.
- [26] Ляв А. Математическая теория упругости. М.-Л.: ОН-ТИ НКГиП. СССР, 1935.
- [27] Klimov D. M., Karev V. I., Kovalenko Y. F. Mechanics of Solids. 2015. 50. № 6. P. 633.
- [28] Тимошенко С. П. Теория упругости. Издание второе исправленное. Л.: Ленгорлит, 1937.
- [29] Maleki K., Pouya A. // Computers and Geotechnics. 2010.
  37, N 5. P. 619. doi:10.1016/j.compgeo.2010.03.009
- [30] Jiang T., Shao J. F., Xu W. Y., Zhou C. B. // Int. J. of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2010. 47, N 5. P. 703.

# Filtration and rheological characteristics of low-permeability reservoir rocks when modeling directional unloading method

V. I. Karev<sup>a</sup>, Yu. F. Kovalenko<sup>b</sup>, V. V. Khimulia<sup>c</sup>

Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics of the Russian Academy of Sciences Moscow, 119526, Russia

E-mail: <sup>a</sup>wikarev@ipmnet.ru, <sup>b</sup>perfolinkgeo@yandex.ru, <sup>c</sup>valery.khim@gmail.com

This work is devoted to the study of rheological, deformation and filtration properties of low-permeability rocks of Achimov deposits of the Urengoy gas condensate field using the directional unloading method. As part of the study, physical modeling of the real stresses in the vicinity of the well was carried out when implementing the directional unloading method. Experiments were conducted by using the unique facility, Triaxial Independent Load Test System of the Institute for Problems in Mechanics of the Russian Academy of Sciences. Modeling was carried out for two types of bottomhole design: an open hole and a perforation tip in a cased hole. The dependence of the filtration properties of rocks on the type of stress-strain state is shown; conclusions are drawn about the nature of creep. The values of pressure drawdown, which leads to an increase in the permeability, are determined. The results obtained indicate that the directional unloading method can be successfully applied to wells drilled in the Achimov deposits.

#### PACS: 91.60.-x

*Keywords*: rocks, Achimov deposits, true triaxial loading, stress-strain state, creep, filtration, permeability. *Received 13 January 2021*.

#### Сведения об авторах

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