

Влияние напряженно-деформированного состояния на фильтрационные характеристики пород–коллекторов нефтегазовых месторождений

В. И. Карев^{1,2,*}, В. В. Химуля^{1,2†}

¹Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, физический факультет, кафедра физики моря и вод суши
Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2

²Институт проблем механики имени А. Ю. Ишлинского РАН
Россия, 119526, Москва, пр-т Вернадского, д. 101
(Статья поступила 14.05.2018; Подписана в печать 11.09.2018)

В работе представлены результаты изучения влияния напряжений на проницаемость разных типов пород–коллекторов нефтегазовых месторождений. Исследования проводились на испытательном стенде трехосного независимого нагружения Института проблем механики РАН. Установлено, что характер зависимости проницаемости от действующих напряжений для разных пород может быть существенно разным. Результаты исследований подтверждают предложенную ранее классификацию горных пород по их реакции на изменение напряженно–деформированного состояния [1]. Приведены результаты независимых исследований последних лет и их анализ с применением предложенной классификации к представленным в работах результатам испытаний. Они также подтверждают правомочность предложенной классификации.

PACS: 91.50.Sn.

УДК: 550.3

Ключевые слова: фильтрация, напряженно–деформированное состояние, проницаемость, касательные напряжения, горные породы, истинно трехосное нагружение.

ВВЕДЕНИЕ

Важнейшей задачей при разработке месторождений нефти и газа является повышение продуктивности скважин. На величину дебета конкретной скважины значительное влияние оказывает состояние призабойной зоны по отношению к пластовым условиям, а именно ее фильтрационные свойства. Ухудшение проницаемости даже в небольшой окрестности скважины существенно снижает ее продуктивность [2]. Принято считать, что основной причиной падения проницаемости является загрязнение фильтрационных каналов при бурении и в процессе эксплуатации скважины. Однако существует еще одна не менее важная причина сильного изменения проницаемости в окрестности скважины — это влияние механических напряжений на фильтрационные свойства породы. И хотя в нефтегазовой промышленности при разведке и эксплуатации месторождений давно выявлено, что концентрации напряжений в прискважинной зоне существенно влияют на проницаемость пластов и процессы фильтрации, роль этих напряжений, возникающих в окрестности скважины, в настоящее время исследована мало.

В последние годы проводились активные лабораторные испытания ядерного материала из коллекторов различных нефтегазовых месторождений, а также гидродинамические и геофизические исследования скважин с целью выявить закономерности влияния напряжений на проницаемость горных пород [3]. Было уста-

новлено, что в зависимости от структуры и текстуры пород, литологического состава, их деформационных и прочностных свойств, глубины залегания пластов и пластового давления нефти, конструкции забоя скважины и режимов ее эксплуатации, возникающие в породах напряжения могут значительно и необратимо изменять проницаемость пород [4, 5]. Причем проницаемость горных пород, из которых слагаются продуктивные пласты, при изменении напряжений в ходе технологических операций может как увеличиваться, так и уменьшаться.

1. ИСПЫТАТЕЛЬНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

В работе приведены результаты исследований, проведенных на испытательной системе трехосного независимого нагружения (ИСТНН), позволяющей реализовывать любую траекторию нагружения (деформирования) образца, включая процесс разрушения. Эта уникальная научная установка создана в Институте проблем механики РАН и предназначена для изучения деформационных, прочностных и фильтрационных характеристик пород нефтегазовых, рудных и угольных месторождений. Отличительной ее особенностью является возможность нагружать образцы породы, представляющие собой кубики с гранью 40 или 50 мм, независимо по трем осям. Это дает возможность воссоздавать в ходе опытов любые напряженные состояния, возникающие в пласте при бурении скважин, их освоении и эксплуатации, и изучать влияние напряжений на фильтрационные свойства породы. Погрешность измерений при проведении испытаний образцов горных пород не превышает 1%. Более детальное описание

*E-mail: wikarev@ipmnet.ru

†E-mail: valery.khim@gmail.com

экспериментальной установки приведено в [6].

На установке истинно трехосного нагружения в Институте проблем механики РАН было проведено детальное изучение влияния неравнокомпонентного трехосного напряженного состояния на проницаемость горных пород [3]. Были испытаны образцы пород-коллекторов разного литологического состава, взятые из нескольких десятков месторождений во многих регионах РФ, в различных пластовых условиях. В работе представлены новые результаты испытаний пород-коллекторов Приразломного и Киринского месторождений. Всего было исследовано 26 образцов пород Приразломного и 23 образца пород Киринского месторождения.

2. МЕТОДИКА ПРОВОДИМЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Из kernового материала вырезаются кубические образцы с ребром 40 мм. Образцы изготавливаются с высокой точностью на созданном в ИПМех РАН специальном обрабатывающем комплексе, непараллельность граней образцов не превышает 20 мкм.

Напряжения, которые действуют в окрестности открытого ствола скважины, определяются известным решением задачи Ламе для цилиндрической полости, находящейся под действием всестороннего сжатия внешним давлением и внутреннего давления заполняющей ее жидкости [7]. На его основе была построена программа нагружения образцов, отвечающая напряжениям, действующим на контуре необсаженной скважины (рис. 1). Здесь S_i — напряжения, прикла-

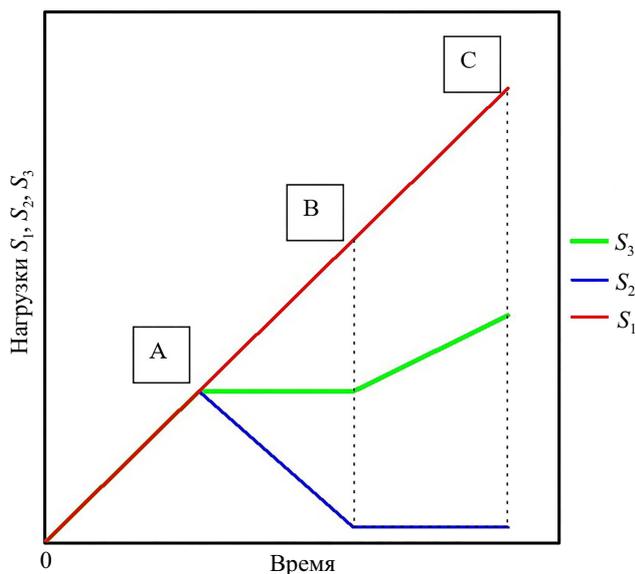


Рис. 1: Программа нагружения образцов на ИСТНН

дываемые в машине к граням образца. Эти напряжения соответствуют эффективным главным напряжениям, действующим на грунтовый скелет в окрестности

скважины: $S_1 - S_\theta$ (тангенциальное); $S_2 - S_R$ (радиальное); $S_3 - S_Z$ (вертикальное).

Программа включает в себя три этапа.

Этап 1. Образец обжимается равномерно со всех сторон до напряжения, равного разности между значением горного давления и величиной пластового давления, соответствующего эффективному начальному напряжению, действующему на грунтовый скелет породы (отрезок ОА на рис. 1). Точка А соответствует состоянию с напряжениями, действовавшими в грунтовом скелете до пробуривания скважины при условии равенства вертикального и бокового горного давления.

Этап 2. На этом этапе нагружения (отрезок АВ) компонента напряжения ($S_1 = S_\theta$) продолжает расти, вторая компонента ($S_1 = S_Z$) остается постоянной, а третья ($S_2 = S_R$) убывает, причем нагрузка меняется так, что объемное сжатие в каждой точке пласта сохраняется $S = (S_1 + S_2 + S_3)/3$. Конечная точка этапа (точка В) соответствует состоянию, когда скважина пробурена и давление на забое равно пластовому.

Этап 3. На третьем этапе моделируется процесс создания депрессии, т.е. понижения давления в забое (отрезок ВС). При этом радиальное напряжение S_R в грунтовом скелете по мере роста депрессии остается практически равным нулю, а кольцевые и вертикальные напряжения S_θ и S_Z растут.

В процессе опытов измерялась деформация образца в трех направлениях и регистрировалась его проницаемость в направлении радиуса скважины. Более детальное описание используемого метода исследований представлено в [6].

Измерение проницаемости осуществлялось с помощью системы автоматизированного измерения проницаемости, входящей в состав ИСТНН. Через образец вдоль одной из осей в ходе нагружения пропусклся воздух и измерялся его расход. Конструкция нагружающего узла, обеспечивающая равномерный поток газа через образец, и перепад давления, не превышающий 0.2 ат, позволяли определять проницаемость породы по закону Дарси. На четыре грани образца, параллельные оси фильтрации, наносилась непроницаемая оболочка из полимеризующегося при комнатной температуре раствора на латексной основе.

3. ЛАБОРАТОРНЫЕ ИСПЫТАНИЯ ОБРАЗЦОВ ПОРОД С РАЗЛИЧНЫМИ СТРУКТУРНО-ЛИТОЛОГИЧЕСКИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ

Проведенные в ИПМех РАН эксперименты позволили установить, что изменение проницаемости горных пород при создании в них неравнокомпонентного поля напряжений определяется как величиной среднего давления, так и уровнем возникающих в породе касательных напряжений. На упругой стадии деформирования проницаемость образцов исследуемых пород или не менялась, или уменьшалась, но обратимо, т.е. при

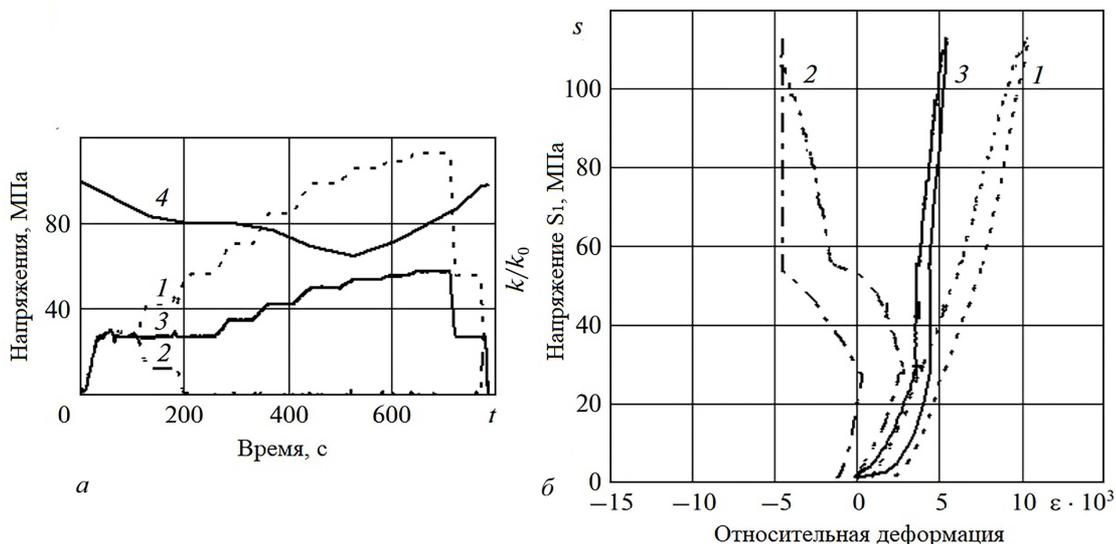


Рис. 2: *a* — Программа нагружения (1–3) и кривая изменения проницаемости (4); *b* — кривые деформирования по трем осям образца породы, отобранного из ачимовских отложений Уренгойского газоконденсатного месторождения [1]

разгрузке она восстанавливалась.

Другая картина наблюдалась при возникновении в породе пластических деформаций. При этом в зависимости от типа породы и величины создаваемых напряжений проницаемость могла, как уменьшаться, так и увеличиваться, причем необратимо.

Обобщая результаты испытаний на установке ИС-ТНН, в [1] впервые было предложено условное разделение горных пород на три категории с точки зрения характера изменения проницаемости при создании в них напряжений.

Породы первой категории

К первой категории относятся прочные породы, деформирующиеся под действием приложенных напряжений чисто упруго. Это, как правило, плотные крепко сцементированные мелкозернистые песчаники, аргиллиты, доломиты и т.п. Их проницаемость уменьшается по мере роста напряжений, но обратимо, т.е. при разгрузке она практически восстанавливается. При создании в них касательных напряжений, соответствующих даже максимально возможным в реальных условиях депрессиям в скважинах, этап пластического деформирования и необратимого уменьшения проницаемости в таких породах не наблюдается. Об этом можно судить по кривым деформирования, полученным при испытаниях. В качестве примера пород, относящихся к первой категории, в статье [1] приведены результаты испытания образца породы, отобранного из ачимовских отложений Уренгойского газоконденсатного месторождения (рис. 2).

Такое поведение горных пород было также зафиксировано в [8]. Авторы данной статьи описывают резуль-

таты экспериментальных исследований по изменению фильтрационно–емкостных свойств коллекторов газоконденсатного месторождения при длительном воздействии повышенных напряжений, вызванных снижением пластового давления. Эксперименты были проведены в два этапа: компрессионные испытания образцов без трещин и нагружение образцов с искусственно созданной трещиной методом раскалывания. Выдержка под нагрузкой образцов кубической формы с искусственно созданными трещинами проводилась в течение 60 часов. По результатам данных экспериментов наблюдается снижение как пористости, так и проницаемости всех образцов по мере возрастания эффективных напряжений и постоянного длительного нагружения. На рис. 3 представлен график зависимости проницаемости одного из образцов, испытанных в работе, от величины приложенных напряжений.

Кривая отчетливо показывает незначительное падение проницаемости в процессе нагрузки. Однако даже после длительной выдержки образца под нагрузкой, проницаемость вернулась практически на исходный уровень, пройдя цикл разгрузки. Аналогичное поведение горных пород было описано в недавних работах как зарубежных, так и отечественных авторов [9–13].

Породы второй категории

Вторую категорию составляют породы, проницаемость которых может как уменьшаться, так и увеличиваться (причем необратимо) в зависимости от уровня создаваемых в них касательных напряжений и интенсивности вызванных ими неупругих деформаций. К этой категории обычно относятся мелко- и средне-

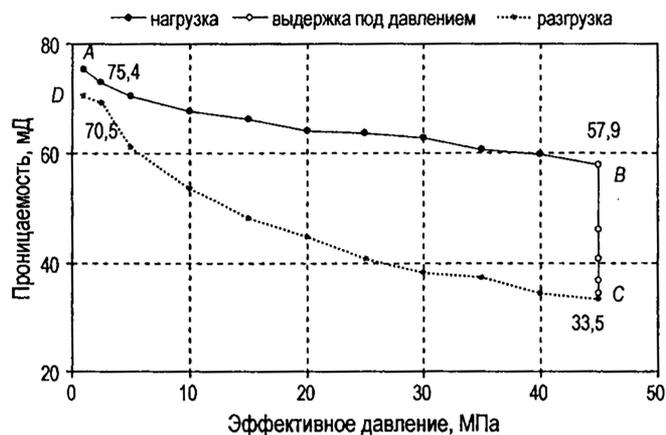


Рис. 3: Зависимость проницаемости от напряжения в испытанном образце [8]

зернистые песчаники с небольшим содержанием глины, алевролиты и известняки. В начале упругопластического деформирования породы ведут себя аналогично породам первой категории, т.е. их проницаемость практически не меняется.

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

Дальнейшее увеличение касательных напряжений влечет за собой увеличение скорости ползучести таких пород и, когда деформация достигает критической величины, порода начинает растрескиваться и разрушаться, что сопровождается резким скачкообразным увеличением ее проницаемости даже по сравнению с первоначальным значением. Характер разрушения образцов при этом различен. В более прочных породах разрушение образцов происходит путем образования в них макро- и микротрещин. Менее прочные породы, такие как, например, слабосцементированные средне- и крупнозернистые песчаники, при разрушении практически превращаются в песок (дезинтегрируются). В качестве примера породы, относящейся ко второй категории, в [1] приводится график испытаний образца из коллектора Киринского месторождения.

Такого рода поведение горных пород также установлено указанными выше авторами [9–13], описывается в недавних трудах [14, 15], а также детально изучалось в работах исследователей из Института проблем механики РАН [2–5, 16].

Например, в статье [10] описано изменение проницаемости насыщенного керосином образца Зуевского месторождения семилукского горизонта при его всестороннем нагружении напряжениями до 31 МПа (рис. 4, а). В экспериментах была реализована схема

нагружения, включающая как нагрузку, так и разгрузку образцов. Из графика видно, что изменение проницаемости происходит нелинейно с ростом эффективного давления. Прямой и обратный ход эксперимента образуют неполную петлю гистерезиса, что указывает на наличие остаточных деформаций и значительное уменьшение проницаемости. Такие скачкообразные изменения проницаемости авторы связывают с тем, что в процессе нагружения (и разгрузки) одни микротрещины уменьшаются (смыкаются), другие же открываются или, вполне возможно, образуются новые.

В качестве примера свойств пород второй категории, можно привести новые результаты, полученные при испытаниях образца породы одного из пропластков коллектора Приразломного месторождения, проведенных в лаборатории геомеханики ИПМех РАН на ИСТНН. Образец был изготовлен из керна с глубины 2548.5 м и обладал начальной проницаемостью в 8.5 мД. На рис. 4, б представлен график изменения проницаемости от времени в ходе нагружения образца. Из графика видно, что проницаемость сильно падала в процессе нагружения вплоть до значений 0.15 от начальной. Однако при достижении касательными напряжениями критического значения произошло растрескивание породы и образование новой системы фильтрационных каналов. На графике видна предпосылка к резкому увеличению проницаемости образца. Измерить итоговую проницаемость не удалось из-за нарушения герметичности пленки, покрывавшей образец и необходимой для измерения расхода в данном направлении. Аналогичная картина изменения проницаемости с ростом напряжений наблюдалась при испытаниях 12 образцов из продуктивного пласта Приразломного месторождения и 14 образцов Киринского месторождения.

Породы третьей категории

К третьей категории относятся горные породы, проницаемость которых при росте действующих в них напряжений падает вплоть до полного исчезновения. Это падение проницаемости носит необратимый характер, то есть при снятии напряжений она не увеличивается. Подобные свойства часто наблюдаются в породах с большим содержанием глины. При возникновении в таких породах даже небольших касательных напряжений начинается их интенсивное пластическое деформирование. Даже при значительных деформациях разрушение образцов не наступает, они продолжают деформироваться практически как пластилин, проницаемость при этом падает до нуля.

Свойства пород этой категории иллюстрируют образцы из Киринского и Приразломного месторождений, кривые проницаемости которых представлены на рис. 5.

Данные образцы были испытаны на установке ИСТНН по описанной выше схеме. Образец породы Приразломного месторождения (рис. 5, а) взят с глуби-

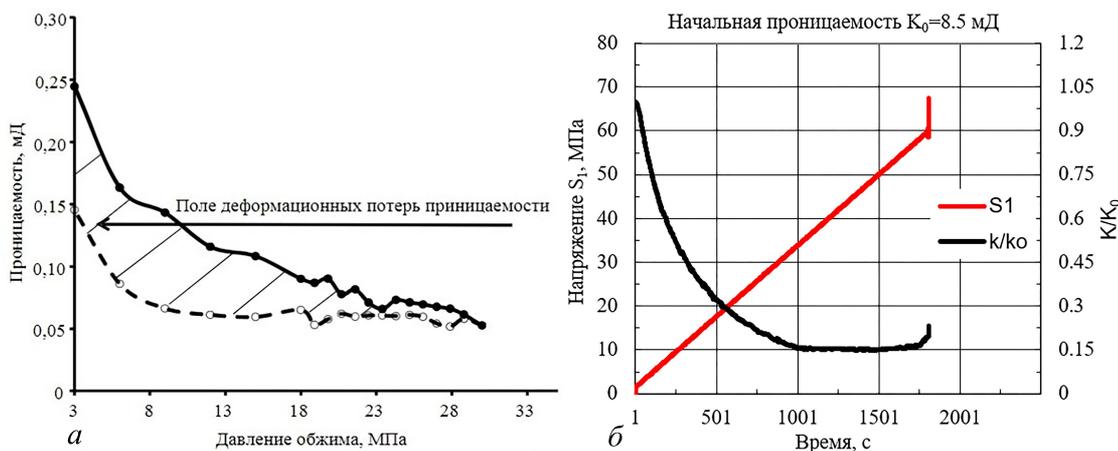


Рис. 4: а — Зависимость проницаемости от приложенных напряжений для образца [10] из Зуевского месторождения: при повышении давления на образец (сплошная линия) и при снижении давления (пунктирная линия); б — кривая проницаемости при нагружении для образца керна Приразломного месторождения с глубины 2548.5 м

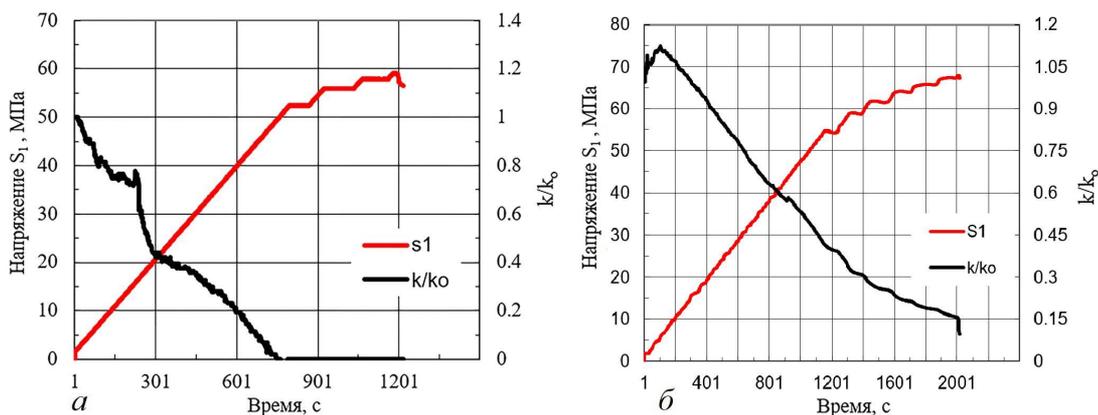


Рис. 5: Кривые проницаемости при нагружении для образцов керна а — Приразломного месторождения, б — Киринского месторождения

ны 2514.75 м и обладал начальной проницаемостью 1.2 мД. Образец из коллектора Киринского месторождения (рис. 5, б) был отобран с глубины 2776 м. Его начальная проницаемость составляла 5566 мД. На графиках красной линией показано монотонно возрастающее в процессе эксперимента тангенциальное напряжение. Как видно из графиков, проницаемость пород по мере роста напряжений падает практически до нуля, т. е. происходит полное закупоривание, заплывание фильтрационных каналов.

Аналогичная картина изменения проницаемости с ростом напряжений наблюдалась при испытаниях 14 образцов из продуктивного пласта Приразломного месторождения и 9 образцов Киринского месторождения. Подобный характер поведения проницаемости наблюдался во время испытаний различных пород в выше упомянутых работах [8–10], а также описывался авторами [17–23] при изучении влияния напряженно-деформированного состояния на фильтрационные и емкостные свойства пород различного типа.

4. ПРАКТИЧЕСКИЕ ВЫВОДЫ

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

Иначе обстоит дело для пород второй и третьей категорий. Обнаруженное в опытах свойство пород второй категории сильно деформироваться («ползти») под действием возникающих в призабойной зоне скважины касательных напряжений в сочетании с уменьшением при этом их проницаемости может приводить к значительному падению дебета скважин. При увеличении депрессии на забое вокруг открытого ствола скважины или вокруг перфорационных отверстий образуется зона пониженной проницаемости, своего рода низко проницаемая «пробка», затрудняющая фильтрацию в скважину. Причем во многих случаях такая пробка образуется в окрестности скважины при создании эксплу-

атационных депрессий. Возникает ситуация, когда по данным геофизических исследований нефти в пласте много, но она оттуда не идет. При дальнейшем увеличении депрессии, когда деформация достигает некоторой критической величины, порода в призабойной зоне скважины может начать растрескиваться. В результате в окрестности скважины возникает искусственная разветвленная система трещин, которая играет роль новой системы фильтрационных каналов. Это приводит к тому, что проницаемость призабойной зоны резко увеличивается, причем необратимо, и фильтрационные свойства породы в окрестности скважины не только восстанавливаются, но и значительно улучшаются. Таким образом способность пород второй категории резко увеличивать свою проницаемость может быть использована на практике для повышения продуктивности скважин [3, 24].

Если продуктивный пласт месторождения сложен породами третьей категории, единственным возможным выходом для сохранения естественной проницаемости является разгрузка пласта в окрестности скважины от касательных напряжений, что для открытого ствола может быть обеспечено нарезанием щелей, ориентированных вдоль оси скважины.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом анализ результатов по экспериментальному изучению влияния напряженно-деформированного состояния на фильтрационные характеристики пород подтверждает вывод о том, что это влияние значительно, что различные по своему литологическому составу, текстуре и структуре породы обладают различной реакцией на изменение напряжений с точки зрения проницаемости. Предложенная классификация горных пород подтверждается работами многих авторов: как зарубежных, так и отечественных.

Знание зависимости фильтрационных характеристик пород-коллекторов нефтегазовых месторождений от напряженно-деформированного состояния необходимо для создания геомеханических и гидродинамических моделей месторождения, на основе которых создается проект его разработки.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ, проект No 16-11-10325.

-
- [1] Карев В. И., Коваленко Ю. Ф. Нефтесервис. 2006. № 6. С. 59.
- [2] Костерин А. В., Скворцов Э. В., Торопова М. М. Вычислительные технологии. 1999. 4, № 2. С. 42.
- [3] Климов Д. М., Карев В. И., Коваленко Ю. Ф. Механика твердого тела. 2015. № 6. С. 39.
- [4] Коваленко Ю. Ф., Карев В. И. Технологии ТЭК. 2003. № 1. С. 31.
- [5] Христианович С. А., Коваленко Ю. Ф., Кулинич Ю. В., Карев В. И. Нефть и газ Евразия. 2000. № 2. С. 90.
- [6] Karev V., Kovalenko Yu. True triaxial testing of rocks. 2013. Leiden: CRC Press/Balkema, pp. 301-310.
- [7] Ляв А. Математическая теория упругости. М.–Л.: ОНТИ НКГП. СССР, 1935.
- [8] Кашиников Ю. А., Ашихмин С. Г., Обшаров П. А. Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. 2008. № 8.
- [9] Ковхуто А. М., Кибаиш М. Ф., Зайцев А. И., Евтушенко Н. Н., Лобова Н. Л., Лобов К. А. Материалы международной научно-практической конференции в рамках XVII сессии Межправительственного совета стран Содружества Независимых Государств по разведке, использованию и охране недр. Минск, 13–15 ноября 2013 г.
- [10] Ковхуто А. М., Кибаиш М. Ф., Зайцев А. И., Евтушенко Н. Н., Лобова Н. Л., Лобов К. А. Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. 3. 2015 г.
- [11] Selvadurai A. P. S. Geofluids. 2015. 15. P. 37.
- [12] Nasser M. H. B., Young R. P. Final Report, University of Toronto Rock Fracture Dynamics Facility, 2016.
- [13] Карев В. И., Коваленко Ю. Ф., Журавлев А. Б., Устинов К. Б. Процессы в геосредах. 2015. № 4, С. 34.
- [14] Wang X., Chalaturnyk R., Huang H., Leung J. 49th U.S. Rock Mechanics/Geomechanics Symposium, 28 June - 1 July 2015, San Francisco, California.
- [15] Михайлов Н. Н., Попов С. Н. Георесурсы, геоэнергетика, геополитика. 2015. № 1(11).
- [16] Карев В. И., Коваленко Ю. Ф., Сидорин Ю. В., Устинов К. Б. Мониторинг. Наука и технологии. 2016. № 3. С. 85.
- [17] Лобов К. А. Современные проблемы геологического картирования: материалы X Университетских геол. чтений, 14-15 апр. 2016 г. — Минск: Изд. центр БГУ, 2016.
- [18] Abasov M. T., Dzhevanshyre R. D., Imanov A. A., Dzhalalov G. I. Oil and gas geology. 1997. N 05.
- [19] Кук Дж., Фредериксен Р. А., Хасбо К., Грин С., Джадзис А., Мартин Дж. У., Суарес-Ривера Р., Хервангер Й., Хойман П., Ли Д. и др. Нефтегазовое обозрение. осень 2007 г.
- [20] Wenlu Zhu, Montesi L. G. J., Teng-Fong Wong London Geological Society special publication. 2002. № 200. pp. 119-136.
- [21] Жуков В. С. Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2010. № 6, С. 341.
- [22] Карманский А. Т. Записки Горного института. 2009. № 183. с. 289-292.
- [23] Рыжов А. Е., Перунова Т. А., Орлов Д. М. Вести газовой науки. 2011. 1(6). С. 162.
- [24] Карев В. И., Дмитриевский А. Н., Климов Д. М., Максимова В. М. XI Всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики, Казань, 20–24 августа 2015 года. С. 1719–1722.

The influence of the stress-strain state on the filtration characteristics of reservoir rocks

V. I. Karev^{1,2,a}, V. V. Khimulia^{1,2,b}

¹*Department of Marine and Inland Water Physics, Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University, Moscow, 119991, Russia*

²*Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics of the Russian Academy of Sciences, Moscow, 119526, Russia*
E-mail: ^awikarev@ipmnet.ru, ^bvalery.khim@gmail.com

The paper presents the results of studying the influence of stresses on the permeability of different types of reservoir rocks in oil and gas fields. The investigations were carried out at the Triaxial Independent Load Testing Facility of the Institute of Problems in Mechanics of the Russian Academy of Sciences. It is established that the character of the dependence of the permeability on the acting stresses for different rocks can be significantly different. The results of the studies confirm the classification of rocks [1] proposed earlier on their reaction to the change in the stress-strain state. The results of independent studies of recent years and their analysis with application of the proposed classification to the test results presented in the works are given. They also confirm the validity of the proposed classification.

PACS: 91.50.Sn.

Keywords: filtration, stress-strain state, permeability, tangential stresses, rocks, true triaxial loading.

Received 14 May 2018.

Сведения об авторах

1. Карев Владимир Иосифович — доктор тех. наук, заместитель директора ИПМех РАН; тел.: (495) 434-35-56, e-mail: wikarev@ipmnet.ru.
 2. Химуля Валерий Владимирович — студент; e-mail: valery.khim@gmail.com.
-