

УДК 552.5:53

Влияние водонасыщенности на изменение физических свойств коллектора

В.С. Жуков^{1*}, И.В. Плешков¹

¹ ООО «Газпром ВНИИГАЗ», Российская Федерация, 142717, Московская обл., Ленинский р-н, с.п. Развилковское, пос. Развилка, Проектируемый пр-д № 5537, вл. 15, стр. 1

* E-mail: V_Zhukov@vniigaz.gazprom.ru

Тезисы. Экспериментальное определение физических свойств горных пород в условиях, моделирующих пластовые, имеет большое значение как для подсчета запасов и интерпретации данных геофизических исследований скважин, так и для подготовки проектов разработки месторождений углеводородов. Исследование в контролируемых условиях процессов изменения физических свойств коллектора позволяет не только достоверно определять их, но и оценить динамику этих изменений в зависимости от термобарических условий в пласте и водонасыщенности горных пород.

Данная работа посвящена оценке зависимости физических свойств коллекторов дагинского горизонта шельфа Сахалина от их водонасыщенности путем создания в горной породе остаточной водонасыщенности и сопоставления свойств этой породы в состоянии остаточной и полной водонасыщенности. Исследованы изменения петрофизических параметров частично водонасыщенных горных пород в процессе роста эффективного давления и получены оценки этих изменений.

Исследовались 280 образцов песчаников и алевролитов дагинского горизонта, залегающих на глубинах от 2742 до 2900 м: 240 шт. – с полным или частичным насыщением моделью пластовой воды, 40 шт. – сухих, для измерения проницаемости по газу. Диапазон изменений в атмосферных условиях для пористости составлял от 2,9 до 33,4 %, для проницаемости по газу – от 2,91 до 1557 мД.

На основании проведенных исследований можно сделать вывод о том, что в условиях, моделирующих пластовые, с ростом средних значений остаточной водонасыщенности с 0,25 до 1,00 среднее удельное электрическое сопротивление снижается с 19,6 до 2,24 Ом·м (88,6 %), а скорости распространения продольных и поперечных волн растут – с 3,21 до 3,42 км/с (6,54 %) и с 1,68 до 2,08 км/с (23,8 %) соответственно. При росте остаточной водонасыщенности снижается эффективная проницаемость как в атмосферных, так и в пластовых условиях. Необходимо провести дополнительные экспериментальные испытания образцов в термобарических условиях, моделирующих пластовые, для уточнения изменений, которые описываются степенными или экспоненциальными уравнениями. Эти данные могут быть использованы как для оценки изменений пластовых условий в процессе разработки месторождения по данным каротажа, так и для оценки степени изменения продуктивных горизонтов.

В процессе разработки месторождений нефти и газа зачастую увеличивается содержание воды в пласте-коллекторе, что приводит к изменению его физических свойств. Для оценки влияния водонасыщенности на физические свойства коллектора проведены сопоставления физических свойств образцов дагинского горизонта, в которых поровое пространство полностью насыщено моделью пластовой жидкости, и образцов с остаточной водонасыщенностью.

Исследовались образцы (280 шт.) песчаников и алевролитов дагинского горизонта, залегающего на глубинах от 2742 до 2900 м. Диапазон изменений в атмосферных условиях для пористости составил от 2,9 до 33,4 %, для проницаемости по газу – от 2,91 до 1557 мД. Двести сорок образцов насыщали моделью пластовой воды, на 40 образцах измерялась проницаемость по газу.

Коэффициент остаточного водонасыщения породы $K_{во}$, определенный прямым способом (по керну, отобранному при бурении с раствором на безводной основе) или косвенными методами (центрифугированием, с полупроницаемыми мембранами и т.д.), должен быть откорректирован с учетом пластовых условий. Если принять, что основное изменение $K_{во}$ происходит из-за деформации порового пространства

Ключевые слова:

горная порода, пористость, проницаемость, остаточная водонасыщенность, скорость продольных волн, удельное электрическое сопротивление.

породы при выбуривании керна за счет снятия эффективного напряжения, то можно записать:

$$K_{\text{во.пл}} = K_{\text{во.атм}} (K_{\text{п.атм}}/K_{\text{п.пл}}), \quad (1)$$

где $K_{\text{во.пл}}$ – коэффициент остаточной (неснижаемой) водонасыщенности, соответствующий пластовым условиям; $K_{\text{во.атм}}$ – та же величина, определенная прямым или одним из косвенных методов в атмосферных (лабораторных) условиях; $K_{\text{п.атм}}$, $K_{\text{п.пл}}$ – коэффициенты пористости породы соответственно в атмосферных условиях и с учетом эффективного давления на глубине залегания.

Остаточная водонасыщенность создавалась в образцах с помощью центрифугирования. В основе метода центрифугирования лежит действие на образец центробежных сил, возникающих при вращении образца керна в центрифуге. Вначале с увеличением числа оборотов ротора центрифуги вода вытесняется из крупных пор. При дальнейшем увеличении частоты вращения ротора вода вытесняется из пор меньшего размера. С некоторого момента повышение числа оборотов перестает влиять на количество воды, остающейся в порах. Эту воду и считают остаточной.

Методики определения физических свойств образцов горных пород в атмосферных условиях и при моделировании пластовых условий подробно описаны в ГОСТах¹ и научной литературе [1, 2]. По этим методикам определяли изменения объема порового пространства, сжимаемости порового пространства, коэффициента пористости при моделировании пластовых условий, объемного веса (плотности) при моделировании пластовых условий, скорости прохождения упругих волн, электрического сопротивления, параметра насыщения.

Результаты экспериментальных исследований. Измеренные и рассчитанные данные, а именно коэффициент пористости, объемная плотность, удельное электрическое сопротивление ($УЭС$), параметр насыщения,

скорости распространения упругих волн, а также $K_{\text{во}}$ образцов, были собраны в сводную таблицу по скважинам в соответствии с условиями измерения (пластовые и атмосферные). Поскольку первичные значения $K_{\text{во}}$ получены в атмосферных условиях, появилась необходимость их пересчета для пластовых условий (рис. 1) в соответствии с формулой (1). Пересчет основан на том, что объем воды в поровом пространстве не изменяется, а пористость при переходе от атмосферных к пластовым условиям немного уменьшается [3–5].

Известно, что $УЭС$ сильно зависит от содержания в поровом пространстве воды. Природные растворы, заполняющие поры и трещины, проводят ток значительно лучше, чем минеральный скелет горных пород, поэтому по мере роста увлажненности электрическое сопротивление уменьшается в разы [6, 7]. Рис. 2 свидетельствует о логичном снижении $УЭС$ с ростом водонасыщенности: достоверность аппроксимации для пластовых условий ($R^2 = 0,71$) выше, чем для атмосферных ($R^2 = 0,46$), возможно, по причине закрытия части трещин и повышения роли межзерновой пористости [8]. Значения R^2 для пластовых условий достаточно высокие. Таким образом, видно, что процесс обводнения пласта (повышения $K_{\text{во}}$) даже при сохраняющемся эффективном давлении приводит к снижению $УЭС$.

Авторами также проведено сопоставление зависимости $УЭС$ при остаточной и 100%-ной

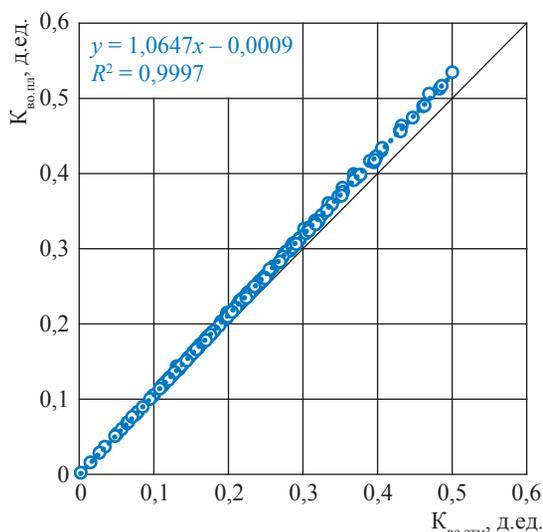


Рис. 1. Взаимосвязь коэффициентов остаточной водонасыщенности в атмосферных и пластовых условиях:
 R – достоверность аппроксимации

¹ См. ГОСТ 26450.1-85. Породы горные. Метод определения коэффициента открытой пористости жидкостенасыщением; ГОСТ 26450.2-85. Породы горные. Метод определения коэффициента абсолютной газопроницаемости при стационарной и нестационарной фильтрации; ГОСТ 25494-82. Породы горные. Метод определения удельного электрического сопротивления; ГОСТ 21153.7-75. Породы горные. Метод определения скоростей распространения упругих продольных и поперечных волн.

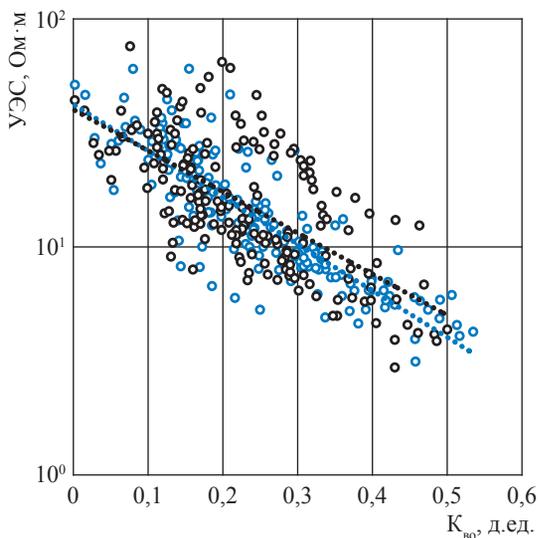
водонасыщенности от пористости в пластовых условиях (рис. 3). В данном случае хорошая достоверность аппроксимации ($R^2 = 0,90$) отмечена только для УЭС образцов со 100%-ной водонасыщенностью, а для УЭС образцов с частичной водонасыщенностью достоверность аппроксимации низкая ($R^2 = 0,09$). Это связано с неполным заполнением порового пространства водой и сложной структурой токопроводящих каналов. Рис. 3 еще раз подтверждает высказанное выше предположение о том, что процесс обводнения пласта (повышения $K_{во}$) даже при сохраняющемся эффективном давлении приводит к снижению УЭС. Проведенные исследования показывают, что в условиях, моделирующих пластовые, с ростом средних значений водонасыщенности с остаточной (25,0) до полной (1,00) среднее значение УЭС снижается с 19,6 до 2,24 Ом·м (88,6 %).

Порода, содержащая нефть и/или газ, будет иметь более высокое удельное сопротивление, чем та же самая порода, насыщенная только пластовой водой, и чем выше насыщенность пор водой, тем ниже удельное сопротивление породы. Данная связь удельного сопротивления

породы с ее водонасыщенностью, выражаемая параметром насыщения, широко используется для выделения зон, содержащих углеводороды.

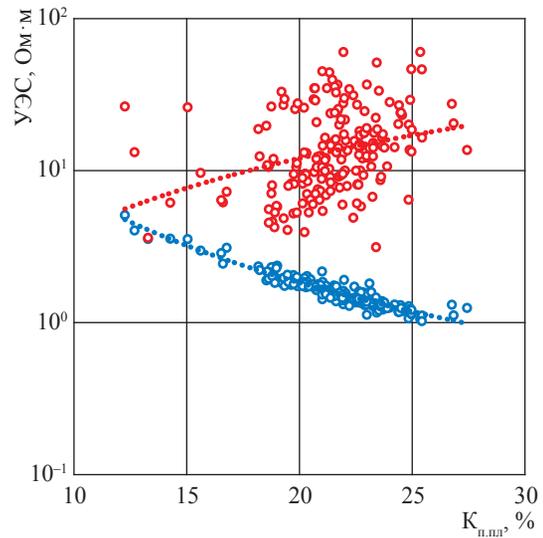
На рис. 4 показано влияние остаточной водонасыщенности на параметр насыщения в атмосферных и пластовых условиях. Параметр насыщения, предложенный В.Н. Дахновым [6], показывает, во сколько раз возрастает величина удельного сопротивления частично водонасыщенной породы, по сравнению с ее УЭС при полном насыщении водой объема пор. А поскольку при переходе от атмосферных условий к пластовым объем воды в порах образцов горных пород не изменяется, то и зависимости параметра насыщения от водонасыщенности в данном случае оказались близки друг другу. Незначительное расхождение обусловлено изменением структуры порового пространства при воздействии пластовых условий.

Рассмотрим также влияние водонасыщенности на скорости распространения упругих продольных и поперечных волн (рис. 5, 6). Частичное наличие в поровом пространстве пластовой воды должно привести к тому, что скорость продольной волны в образце горной



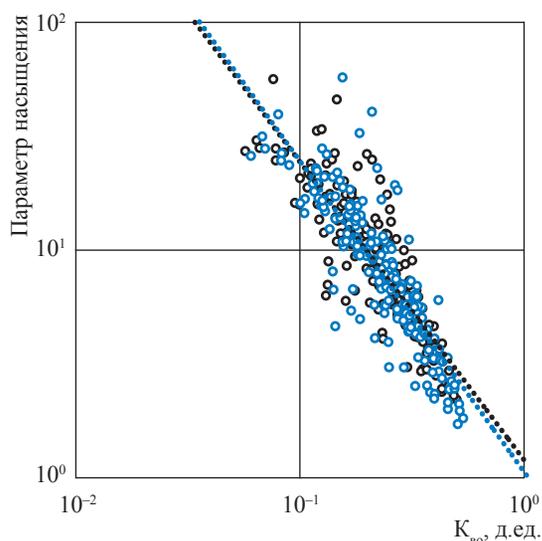
Пластовые условия:
 ○ замеры, $n = 184$
 ●●● аппроксимация: $y = 42,16e^{-4,7x}$, $R^2 = 0,71$
 Атмосферные условия:
 ○ замеры, $n = 184$
 ●●● аппроксимация: $y = 40,04e^{-4,15x}$, $R^2 = 0,46$

Рис. 2. Влияние остаточной водонасыщенности на УЭС в атмосферных и пластовых условиях: n – количество образцов



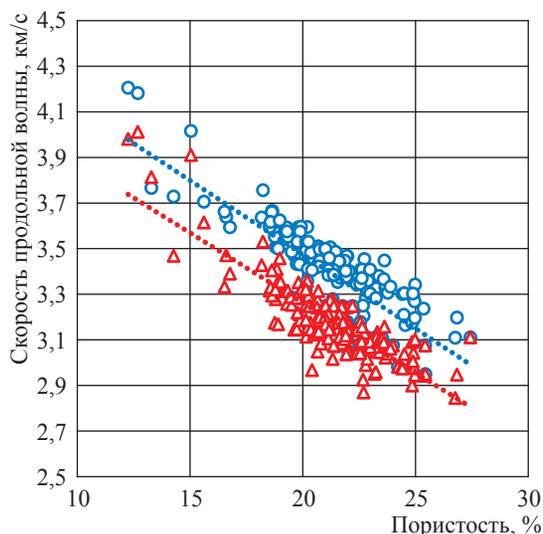
Остаточная водонасыщенность:
 ○ замеры, $n = 184$
 ●●● аппроксимация: $y = 0,11x^{1,57}$, $R^2 = 0,09$
 100%-ная водонасыщенность:
 ○ замеры, $n = 184$
 ●●● аппроксимация: $y = 641,53x^{-1,96}$, $R^2 = 0,90$

Рис. 3. Зависимость УЭС в пластовых условиях от пористости при 100%-ной и частичной насыщенности водой



Пластовые условия:
 ○ замеры, $n = 184$
 ●●● аппроксимация: $y = 1,06x^{-1,36}$, $R^2 = 0,73$
 Атмосферные условия:
 ○ замеры, $n = 184$
 ●●● аппроксимация: $y = 1,20x^{-1,31}$, $R^2 = 0,75$

Рис. 4. Влияние остаточной водонасыщенности на параметр насыщения в атмосферных и пластовых условиях



Остаточная водонасыщенность:
 ▲ замеры, $n = 184$
 ●●● аппроксимация:
 $y = -0,0614x + 4,4911$, $R^2 = 0,7424$
 100%-ная водонасыщенность:
 ○ замеры, $n = 184$
 ●●● аппроксимация:
 $y = -0,065x + 4,7735$, $R^2 = 0,6383$

Рис. 5. Зависимость скорости распространения продольной волны от пористости при остаточной и 100%-ной насыщенности водой образцов горных пород в условиях, моделирующих пластовые

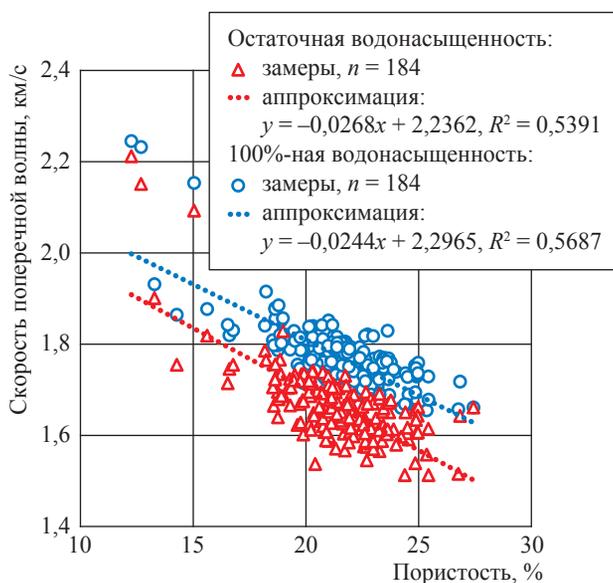


Рис. 6. Зависимость скорости распространения поперечной волны от пористости при остаточной и 100%-ной насыщенности водой образцов горных пород в условиях, моделирующих пластовые

породы с остаточной водонасыщенностью будет меньше, чем в этом же образце, но с поровым пространством, полностью насыщенным пластовой водой (см. рис. 5). На рис. 5 видно, что скорость продольной волны как при остаточной, так и при 100%-ной водонасыщенности снижается с увеличением пористости образцов. График изменения скорости продольной волны в образцах с остаточной водонасыщенностью лежит на координатной плоскости чуть ниже, и обусловлено это тем, что часть порового пространства заполнена воздухом, а, как известно, скорость распространения упругих волн в воздухе ниже, чем в воде.

Скорость распространения поперечной волны в пластовых условиях, так же как и в случае продольной волны, выше, чем в атмосферных условиях. Но достоверность аппроксимации линейной зависимостью (см. рис. 6) существенно ниже, чем для продольной волны (см. рис. 5). Связано это, возможно, с тем, что поперечные волны в жидкости не распространяются,

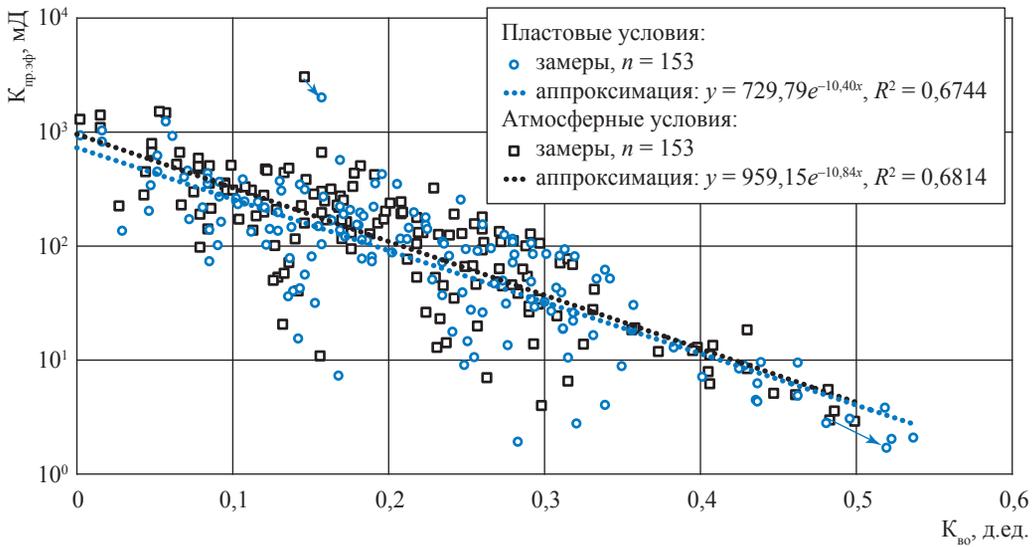


Рис. 7. Зависимость эффективной проницаемости образцов от их остаточной водонасыщенности в атмосферных и пластовых условиях

а наличие в образцах горных пород частичной водонасыщенности усложняет пути (вероятно, из-за разбухания глинистой компоненты) распространения поперечных волн по сравнению с путями в образцах со 100%-ной водонасыщенностью.

Проведенные исследования показали, что в условиях, моделирующих пластовые, с ростом средних значений водонасыщенности с остаточного уровня 0,25 до 1,00 растут скорости продольных и поперечных волн соответственно с 3,21 до 3,42 км/с (6,54 %) и с 1,68 до 2,08 км/с (23,8 %). Рис. 5 и 6 дают возможность высказать предположение о том, что процесс обводнения пласта (повышения $K_{во}$) даже при сохраняющемся эффективном давлении приводит к снижению скоростей распространения упругих продольных и поперечных волн.

Наиболее интересно исследовать влияние $K_{во}$ на эффективную проницаемость образцов горных пород, которая непосредственно влияет на дебиты скважин. На рис. 7 показана зависимость эффективной² проницаемости ($K_{пр.эф}$) от $K_{во}$ в пластовых и атмосферных условиях для всех образцов без разделения на классы.

Далее коллекторы были сгруппированы по классам (с 1-го по 5-й по Ханину) согласно средним значениям эффективной проницаемости по газу, и построена зависимость, позволяющая предсказать изменение эффективной проницаемости по классам (рис. 8). Анализируя

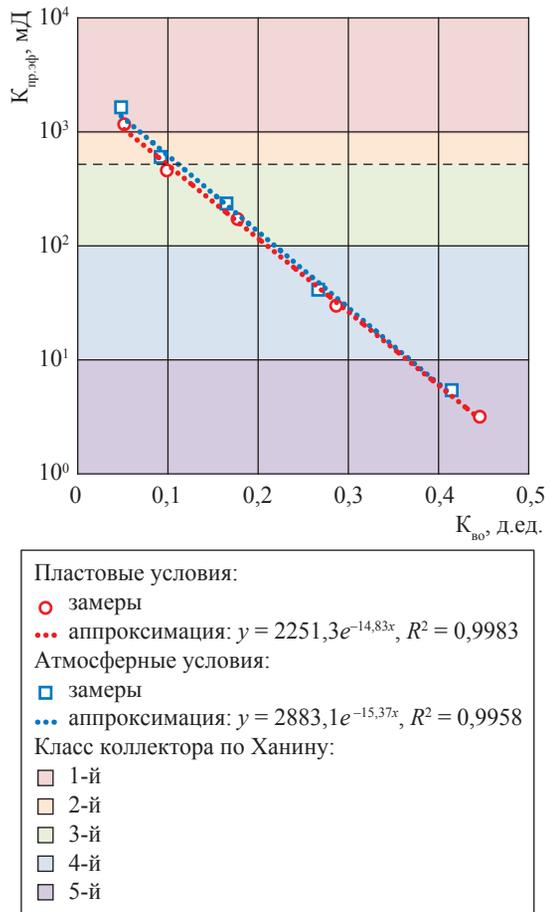


Рис. 8. Влияние остаточной водонасыщенности коллекторов на их проницаемость

² Эффективной называется проницаемость образцов с частичной водонасыщенностью порового пространства.

рис. 8, можно сделать вывод о том, что с увеличением водонасыщенности образцов горных пород от 0 до 54,0 % снижается их эффективная проницаемость по газу как в атмосферных, так и в пластовых условиях, и, следовательно, будет происходить переход от более высоких классов проницаемости по Ханину к более низким. Справедливости ради нужно отметить, что данный график отражает влияние на проницаемость не только остаточной водонасыщенности, но также пористости и структуры порового пространства.

Рассмотрим изменения проницаемости сухих образцов ($K_{пр}$) и образцов с частичной водонасыщенностью ($K_{пр.эф}$) относительно их проницаемости в атмосферных условиях ($K_{пр} = 1$) в процессе увеличения эффективного давления, а также проследим изменение $K_{во}$. Графики на рис. 9 показывают, что при увеличении эффективного давления проницаемость породы ощутимо снижается, что является

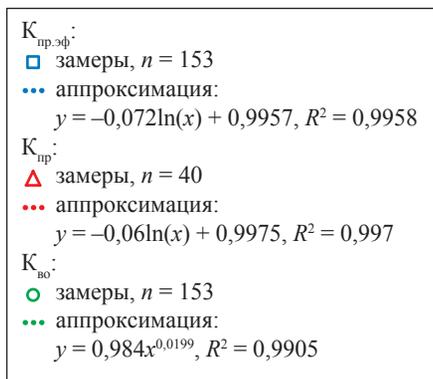
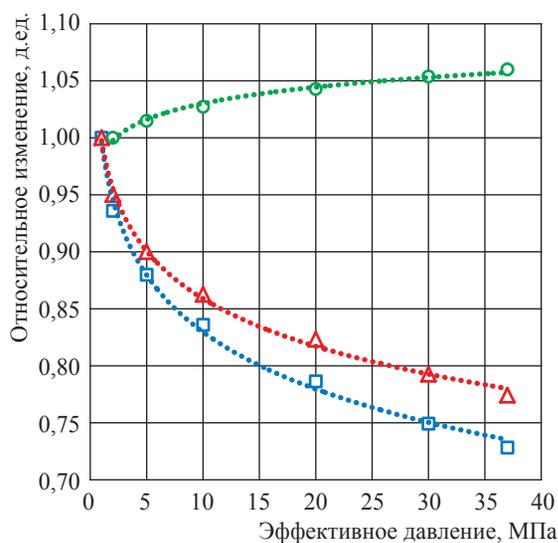


Рис. 9. Изменение проницаемости и остаточной водонасыщенности при увеличении эффективного давления

логичным. Также видно, что $K_{пр.эф}$ по газу частично водонасыщенных образцов снижается сильнее, чем $K_{пр.эф}$ сухих образцов. При максимальном эффективном давлении проницаемость снижается в среднем на 23 и 27 % соответственно на сухих и частично насыщенных образцах. Снижение происходит равномерно даже при различных значениях проницаемости. $K_{во}$ при этом увеличивается, что обусловлено уменьшением объема порового пространства с ростом эффективного давления.

Создание контролируемых условий позволило не только достоверно определить физические свойства коллекторов дагинского горизонта, но и оценить динамику их изменений в зависимости от термобарических условий в пласте и водонасыщенности горных пород. Так, сопоставление петрофизических параметров образцов, исследованных в условиях, моделирующих пластовые, показало, что с ростом средних значений $K_{во}$ от остаточной 25,0%-ной водонасыщенности до полной 100%-ной среднее значение УЭС снижается с 19,6 до 2,24 Ом·м (88,6 %), а скорости продольных и поперечных волн растут с 3,21 до 3,42 км/с (6,54 %) и с 1,68 до 2,08 км/с (23,8 %) соответственно.

Результаты исследования изменений петрофизических параметров частично водонасыщенных горных пород в процессе роста эффективного давления от атмосферного до пластового показали, что с увеличением эффективного давления $K_{во}$ растет в среднем на 6 % относительно атмосферных условий. Это сопровождается ростом скорости продольных (в среднем на 51,9 %) и поперечных волн (в среднем на 37,1 %). Уменьшается проницаемость по газу как сухих образцов (в среднем на 23 %), так и образцов с остаточной водонасыщенностью (эффективная проницаемость в среднем снижается на 27 %). Эти данные могут быть использованы при проектировании разработки месторождения как для оценки изменений пластовых условий коллектора, так и для оценки степени изменения продуктивных горизонтов.

Экспериментальное определение физических свойств горных пород в условиях, моделирующих пластовые, имеет большое значение с точки зрения подсчета запасов и интерпретации данных геофизических исследований скважин, а также при подготовке проектов разработки месторождений углеводородов. Следует

отметить необходимость дополнительных экспериментальных исследований образцов в термобарических условиях, моделирующих

пластовые, для уточнения изменений, которые описываются степенными или экспоненциальными уравнениями.

Список литературы

1. Жуков В.С. Определение фильтрационно-емкостных и упругих свойств и электрических параметров образцов горных пород при моделировании пластовых условий: уч.-метод. пособие / В.С. Жуков, Д.В. Люгай. – М.: Газпром ВНИИГАЗ, 2016. – 56 с.
2. ГСССД МЭ 257. Методика экспериментального исследования значений некоторых характеристик образцов горных пород, получаемых при поиске углеводородов, в диапазоне температур 0...100 °С и давлений до 85 МПа / В.С. Жуков, О.В. Иселидзе, Е.Б. Григорьев. – М.: Государственная служба стандартных справочных данных, 2016. – 31 с.
3. Жуков В.С. Лабораторное моделирование снижения пластового давления при разработке месторождений нефти и газа / В.С. Жуков // Бурение и нефть. – 2006. – № 1. – С. 8–9.
4. Жуков В.С. Оценка влияния пластовых условий на пористость при подсчете запасов свободного газа / В.С. Жуков // Материалы Международной конференции «Петрофизика: современное состояние, проблемы, перспективы» 27–28 мая 2010 г. – М.: РАЕН: Российский университет нефти и газа им. И.М. Губкина, 2010. – С. 30–33.
5. Жуков В.С. Оценка изменений физических свойств коллекторов, вызванных разработкой месторождений нефти и газа / В.С. Жуков // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2010. – № 6. – С. 341–349.
6. Дахнов В.Н. Геофизические методы определения коллекторских свойств и нефтегазонасыщенности горных пород / В.Н. Дахнов. – М.: Недра, 1975. – 334 с.
7. Магид М.Ш. Физические свойства горных пород и полезных ископаемых (петрофизика). Справочник геофизика / М.Ш. Магид, Г.М. Авчян, Н.Б. Дортман и др.; под ред. Н.Б. Дортман, – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Недра, 1984. – 455 с.
8. Жуков В.С. Изменения структуры порового пространства коллекторов дагинского горизонта при моделировании пластовых условий / В.С. Жуков, Ю.М. Чуриков, В.В. Моторыгин // Вести газовой науки: Проблемы ресурсного обеспечения газодобывающих районов России. – М.: Газпром ВНИИГАЗ, 2017. – № 3 (31). – С. 238–246.

Water saturation impact to changing of physical properties of a reservoir

V.S. Zhukov^{1*}, I.V. Pleshkov¹

¹ Gazprom VNIIGAZ LLC, Bld. 1, Estate 15, Proyektiruemyy proezd no. 5537, Razvilka village, Leninskiy district, Moscow Region, 142717, Russian Federation

* E-mail: V_Zhukov@vniigaz.gazprom.ru

Abstract. Tests of physical properties of rocks in modeled in-situ conditions are very important in cases of reserves calculation, interpretation of well logs, and preparation of design projects aimed at development of hydrocarbon fields. Studying changes of reservoir's physical properties, which have occurred within known and controlled situation, enables both valid determination of these changes, and estimation of their dynamics depending on the thermobaric conditions and water saturation of rocks.

This paper deals with estimation of a dependency between the physical properties of Dagi reservoirs at the Sakhalin shelf and their water saturation by creating residual water saturation in rock samples and comparison of rocks' characteristics for cases of partial and full water saturation. Authors have studied and estimated the changes of the petrophysical parameters of the partially water-saturated rock samples when the effective pressure has been growing.

The test array has included 280 samples of Dagi-horizon sandstones and siltstones occurring at depths of 2742...2900 m, whereof 240 samples have been charged with modeled in-situ water, 40 samples have been applied for measurements of permeability to gas. Measurement ranges in the atmospheric conditions have constituted from 2,9 to 33,4 % in respect to porosity, and from 2,91 to 1557 mD in respect to permeability to gas.

According to the test results it can be concluded that in modeled in-situ conditions, when the residual water saturation rises from 0,25 to 1,00, an average value of specific electric resistance drops from 19,6 to 2,24 Ω·m (88,6%), and P-wave and S-wave velocities increase from 3,21 to 3,42 km/s (6,54%) and from 1,68 to 2,08 km/s

(23,8%) correspondingly. If the residual water saturation increases, the efficient permeability decreases both in atmospheric and in-situ conditions. To define more accurately the changes being described with power and exponential functions, it is necessary to carry out additional tests of samples in the modeled in-situ thermobaric conditions. These data could help either to estimate by well logs the real in-situ conditions during development of fields, or assess the changes of productive horizons.

Keywords: rock, porosity, permeability, residual water saturation, velocity of p-waves, specific electrical resistance.

References

1. ZHUKOV, V.S., D.V. LYUGAY. *Determination of the filtration-volumetric and electric characteristics of rock samples while modelling the in-situ conditions* [Opredeleniye filtratsionno-yemkostnykh i uprugikh svoystv i electriceskikh parametrov obraztsov gornykh porod pri modelirovaniy plastovykh usloviy]: learning guide. Moscow: Gazprom VNIIGAZ, 2016. (Russ.).
2. STATE SERVICE OF STANDARD REFERENCE DATA. GSSSD ME 257. *Test procedure for studying several characteristics of hydrocarbon-promising rock samples within the temperature range of 0–100 °C and under pressures up to 85 MPa* [Metodika eksperimentalnogo issledovaniya znacheniy nekotorykh kharakteristik obraztsov gornykh porod, poluchayemykh pri poiske uglevodorodov, v diapazone temperatur 0...100 °C i davleniy do 85 MPa]. Authors: V.S. ZHUKOV, O.V. ISELIDZE, Ye.B. GRIGORYEV. Moscow: All-Russia Scientific Research Institute of Metrological Service (VNIIMS), 2016. (Russ.).
3. ZHUKOV, V.S. Laboratory modelling of the pore pressure decrease at development of oil and gas fields [Laboratornoye modelirovaniye snizheniya plastovogo davleniya pri razrabotke mestorozhdeniy nefi i gaza]. *Burennye i Neft*. 2006, no. 1, pp. 8–9. ISSN 2072-4799. (Russ.).
4. ZHUKOV, V.S. Estimating porosity impact of in-situ conditions at calculating free gas reserves [Otsenka vliyaniya plastovykh usloviy na poristost pri podschete zapasov svobodnogo gaza]. In: *Proc. Of the International conf. "Petrophysics: contemporary state, challenges, outlooks" May 27–28, 2010*. Moscow: Russian Academy of Natural Sciences, I.M. Gubkin Russian University of Oil and Gas, 2010, pp. 30–33. (Russ.).
5. ZHUKOV, V.S. Estimating changes of reservoirs' physical properties due to development of the oil and gas fields [Otsenka izmeneniy fizicheskikh svoystv kollektorov, vyzvannykh razrabotkoy mestorozhdeniy nefi i gaza]. *Gornyy Informatsionno-Analiticheskiy Byulleten*. 2010, no. 6, pp. 341–349. ISSN 0236-1493. (Russ.).
6. DAKHNOV, V.N. Geophysical methods for determination of reservoir quality and oil-gas-bearing capacity of rocks [Geofizicheskiye metody opredeleniya kollektorskikh svoystv i neftegazonasyshchennosti gornykh porod]. Moscow: Nedra, 1975. (Russ.).
7. MAGID, M.Sh., G.M. AVCHYAN, N.B. DORTMAN (ed.) et al. *Physical properties of rocks and mineral deposits (petrophysics). Reference book of a geophysicist* [Fizicheskiye svoystva gornykh porod i poleznykh iskopyemykh. Spravochnik geofizika]. 2nd ed., revised. Moscow: Nedra, 1984. (Russ.).
8. ZHUKOV, V.S., Yu.M. CHURIKOV, V.V. MOTORYGIN. Modification of porous space structure in reservoirs of Dagi horizon at transition from atmospheric conditions to in-situ ones [Izmeneniya struktury porovogo prostranstva kollektorov daginskogo gorizonta pri modelirovaniy plastovykh usloviy]. *Vesti Gazovoy Nauki: collected scientific technical papers*. Moscow: Gazprom VNIIGAZ, 2017, no. 3 (31): Issues for resource provision of gas-extractive regions of Russia, pp. 238–246. ISSN 2306-9849. (Russ.).