

УДК 552.1:53.096

О.В. Иселидзе, В.С. Жуков, С.П. Цыбульский, Н.Г. Баянова

Влияние температуры на удельное электрическое сопротивление водонасыщенных образцов песчаника

Ключевые слова:

пористость, песчаник, пластовая вода, удельное электрическое сопротивление, эффективное давление, увеличение температуры, параметр пористости.

Keywords:

porosity, sandstone, formation water, specific electric resistance, effective pressure, temperature increase, formation resistivity factor.

Прямые измерения физических свойств горных пород, в частности пористости и удельного электрического сопротивления (УЭС), используются для разработки петрофизической основы интерпретации геофизических исследований скважин (ГИС), контроля и обоснования достоверности подсчетных параметров, полученных по ГИС, при подсчете запасов, а также проектировании разработки месторождений. Измерения этих параметров проводятся на различных установках моделирования пластовых условий. Основными моделируемыми параметрами являются эффективное давление ($P_{эф}$) как разность между всесторонним и поровым давлениями, действующими в пласте, и температура пласта (T) [1–4]. Исследование изменений УЭС насыщенных раствором NaCl образцов горных пород (песчаника) при увеличении температуры в условиях постоянной величины эффективного давления и являлось предметом рассмотрения в данной статье.

Тепловое расширение породообразующих минералов и рост проводимости насыщающих горную породу растворов различных солей при изменении температуры подробно описаны в работе [5]. С достаточной для практического применения точностью влияние температуры на УЭС раствора солей можно оценить с помощью формулы Арпа [4]:

$$\rho_{\sigma T_2} = \rho_{\sigma T_1} \left(\frac{T_1 + 21,5}{T_2 + 21,5} \right), \quad (1)$$

где $\rho_{\sigma T_1}$ и $\rho_{\sigma T_2}$ – УЭС пластовой воды (Ом·м) при температурах T_1 и T_2 , °С.

Влияние температуры на удельное электрическое сопротивление

Полученные авторами ранее результаты исследования зависимости УЭС от температуры [6] не позволили изучить характер изменений удельного электрического сопротивления образцов горных пород в процессе увеличения температуры, так как исследования проводились при двух фиксированных температурах 22 и 80 °С. Поэтому дополнительно был исследован характер изменений УЭС горных пород, наблюдаемых при повышении их температуры с 22 до 80 °С. Для этого были проведены две серии экспериментов на коллекции из 12 образцов средне- и мелкозернистого песчаника при постепенном повышении их температуры с 22 до 80 °С (рис. 1):

- 1) при $P_{эф} = 2,0$ МПа;
- 2) $P_{эф} = 37,0$ МПа (равном давлению, действующему в пластовых условиях).

На рис. 1 отражено, что УЭС исследованных образцов горных пород закономерно уменьшаются с ростом пористости и значительно отличаются друг от друга. С высокой степенью достоверности аппроксимации ($R^2 = 0,99$) изменения среднего значения УЭС исследованных образцов горных пород при увеличении температуры от 22 до 80 °С можно описать степенным уравнением:

$$\rho = 37,6 T^{-0,65}. \quad (2)$$

Приведенные формулы (1) и (2) охватывают основные причины изменения УЭС горных пород при изменении температуры. В данном случае были исследованы песчаники с гранулярным (межзерновым) типом пористости. Поэтому можно предположить, что основным фактором, влияющим на УЭС при изменении температуры,

будет изменение УЭС пластовой воды, насыщающей поровое пространство.

Как было указано выше, зависимость УЭС пластовой воды от температуры хорошо описывается уравнением Арпа (1). Для проверки этого предположения приведем к одинаковому виду все изменения УЭС исследованных образцов горных пород. Для этого примем значения их УЭС при температуре 22 °С за 100 % и рассчитаем их относительные зна-

чения при увеличении температуры до 80 °С. Сопоставим эти изменения со значениями УЭС горных пород, рассчитанными по формуле Арпа (рис. 2).

При каждом фиксированном значении температуры (от 30 до 80 °С) разброс фактических данных не превышает 7 % (рис. 3), несмотря на имеющиеся различия в литолого-минералогическом составе и пористости исследованных образцов горных пород.

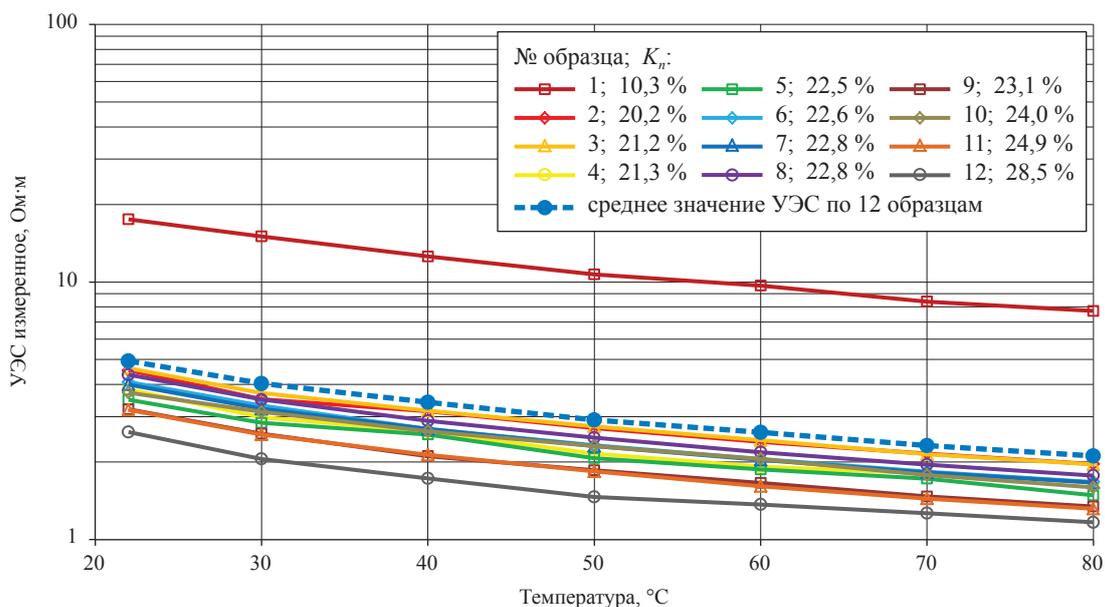


Рис. 1. Изменения УЭС образцов горных пород при увеличении температуры (K_n – коэффициент пористости образцов)

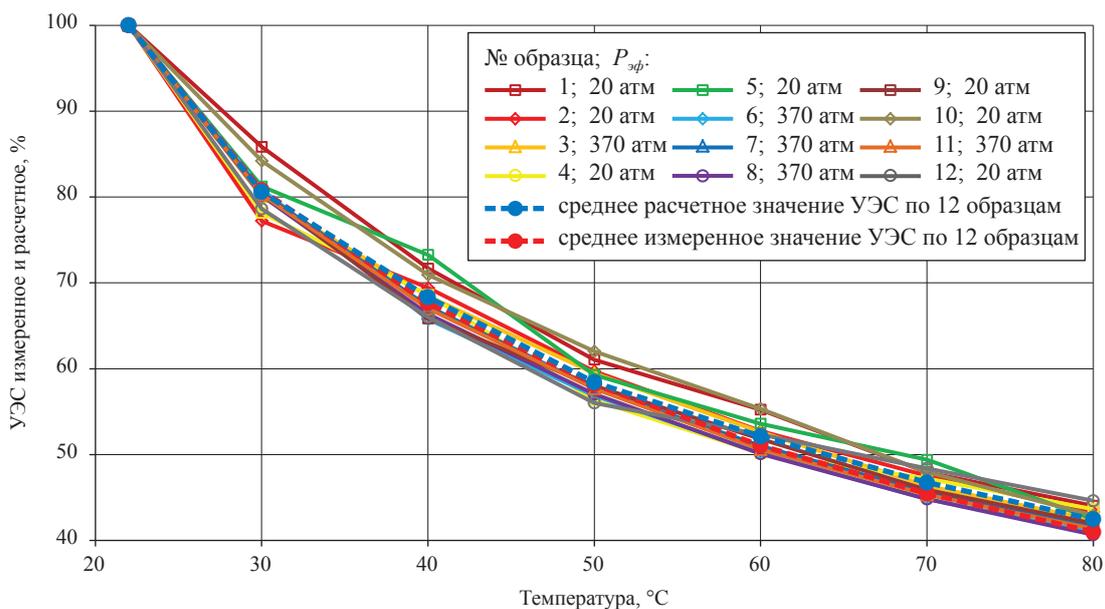


Рис. 2. Сопоставление фактически измеренных и рассчитанных по уравнению Арпа относительных значений УЭС образцов горных пород при увеличении температуры

Зависимости фактических и рассчитанных по формуле Арпа относительных значений УЭС образцов горных пород с увеличением температуры (при $R^2 = 0,999$) описываются степенными уравнениями:

$$\rho = 760,1 T^{-0,66} \text{ (фактические данные),} \quad (3)$$

$$\rho = 834,0 T^{-0,68} \text{ (расчет по формуле Арпа).} \quad (4)$$

Среднее значение УЭС исследованной коллекции образцов горных пород уменьшилось на 58,5 % при увеличении температуры с 22 до 80 °С. В этом интервале изменений температуры градиент уменьшения УЭС можно оценить в первом приближении средней величиной 58,5 % / 58 °С, что означает его снижение примерно на 1 % при росте температуры на 1 °С. А так как зависимость УЭС от температуры хорошо описывается степенным уравнением, то градиент уменьшения УЭС исследованной коллекции образцов горных пород снижается с 2,42 % / 1 °С в интервале 22–30 °С до 0,43 % / 1 °С в интервале 70–80 °С. Сопоставление результатов экспериментальных исследований зависимости УЭС от температуры и рассчитанных по формуле Арпа при постоянном эффективном давлении и для температуры 80 °С показало, что они отличаются друг от друга не более чем на 5 %.

На основании полученных результатов были построены зависимости параметра пористости (P_n) от пористости для 12 исследованных образцов по фактическим и расчетным

данным (рис. 3). Наглядно отражено, что зависимости, построенные по фактическим данным, полученным при температурах 22 и 80 °С, практически совпадают:

$$P_n = 0,796 K_n^{-1,93} \text{ при } T = 22 \text{ °С,} \quad (5)$$

$$P_n = 0,756 K_n^{-1,96} \text{ при } T = 80 \text{ °С.} \quad (6)$$

Также близки зависимости P_n от пористости (6) значениям УЭС исследованных образцов горных пород, рассчитанным по формуле (1):

$$P_n = 0,681 K_n^{-2,00} \text{ при } T = 80 \text{ °С.} \quad (7)$$

Это подтверждает вывод В.Н. Дахнова [7] о том, что основное влияние на УЭС горной породы оказывает изменение УЭС насыщающего ее раствора. А так как при расчете параметра пористости учитывается изменение УЭС раствора с ростом температуры, то и уравнение зависимости параметра пористости от пористости слабо изменяется с ростом температуры. Обусловлено это тем, что влияние температуры на величину пористости по данным [7, 8] незначительно и им можно пренебречь при изменениях температуры от 20 до 80 °С.

Таким образом, полученные экспериментальные результаты показали, что влияние температуры на УЭС водонасыщенного песчаника в условиях постоянного эффективного давления может быть описано степенной зависимостью и учтено с использованием формулы Арпа.

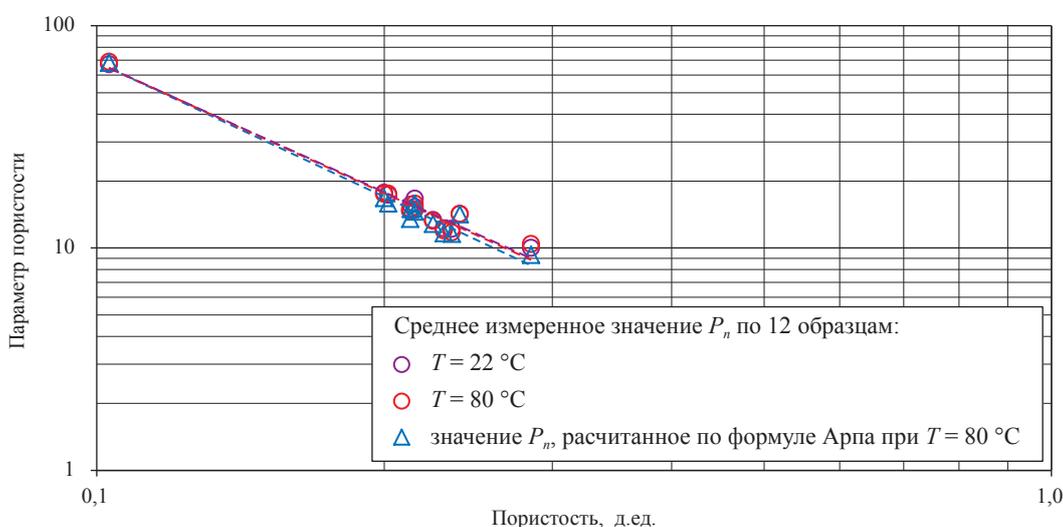


Рис. 3. Сопоставление зависимостей параметра пористости от пористости образцов горных пород при температурах 20 и 80 °С

Список литературы

1. Жуков В.С. Динамика физико-механических свойств горных пород (динамическая петрофизика) / В.С. Жуков // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2002. – № 9. – С. 59–63.
2. 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.
3. Кузьмин Ю.О. Современная геодинамика и вариации физических свойств горных пород / Ю.О. Кузьмин, В.С. Жуков. – М.: Горная книга, 2004. – 262 с.
4. Тиаб Дж. Петрофизика. Теория и практика изучения коллекторских свойств горных пород и движения пластовых флюидов / Дж. Тиаб, Эрл.Ч. Доналдсон; пер. с англ. – 2-е изд. – М.: Премиум Инжиниринг, 2011. – 868 с.
5. Жуков В.С. Основные причины изменения комплекса физических свойств коллекторов при разработке месторождений углеводородов / В.С. Жуков // Вести газовой науки: Проблемы разработки газовых, газоконденсатных и нефтегазоконденсатных месторождений. – М.: Газпром ВНИИГАЗ, 2014. – № 4 (20). – С. 174–183.
6. Рыжов А.Е. Влияние пластовых термобарических условий на петрофизические характеристики образцов горных пород ачимовской толщи / А.Е. Рыжов, В.С. Жуков, О.В. Иселидзе и др. // Актуальные вопросы исследований пластовых систем месторождений углеводородов: сб. науч. ст. – М.: ВНИИГАЗ, 2010. – С. 145–156.
7. Дахнов В.Н. Геофизические методы определения коллекторских свойств и нефтегазонасыщения горных пород / В.Н. Дахнов. – М.: Недра, 1985.
8. Авчян Г.М. Петрофизика осадочных пород в глубинных условиях / Г.М. Авчян, А.А. Матвиенко, З.Б. Стефанкевич. – М.: Недра, 1979. – 224 с.

References

1. Zhukov V.S. Dynamics of physical and mechanical rock properties (dynamic petrophysics) / V.S. Zhukov // Mining informational analytical bulletin. – 2002. – № 9. – P. 59–63.
2. Zhukov V.S. Laboratory modeling of stratal pressure reduction during oil and gas field development / V.S. Zhukov // Drilling and Oil. – 2006. – № 1. – P. 8–9.
3. Kuzmin Yu.O. Recent geodynamics and variations of physical rock properties / Yu.O. Kuzmin, V.S. Zhukov. – Moscow, 2004. – 262 p.
4. Tiab J. Petrophysics. Theory and practice of study of reservoir rock properties and stratal fluid motion / J. Tiab, Earl.Ch. Donaldson; translated from English. – 2nd ed. – Moscow: Premium Engineering, 2011. – 868 p.
5. Zhukov V.S. Principal causes of change of a complex of physical properties of producing formation by oil and gas fields development / V.S. Zhukov // Vesti gazovoy nauki: Problems of development of gas, gas condensate and oil/gas/condensate fields. – Moscow: Gazprom VNIIGAZ, 2014. – № 4 (20). – P. 174–183.
6. Ryzhov A.E. Impact of stratal thermobaric conditions on petrophysical properties of rock specimens from the Achimovskaya stratum / A.E. Ryzhov, V.S. Zhukov, O.V. Iselidze et al. // Actual problems of research of stratal hydrocarbon field systems: collection of scientific papers. – Moscow: VNIIGAZ, 2010. – P. 145–156.
7. Dakhnov V.N. Geophysical methods of determination of reservoir properties and oil and gas content of rocks / V.N. Dakhnov. – Moscow: Nedra, 1985.
8. Avchyan G.M. Petrophysics of sedimentary rocks in deep conditions / G.M. Avchyan, A.A. Matviyenko, Z.B. Stefankevich. – Moscow: Nedra, 1979. – 224 p.