

Проявление механико-химических эффектов при экспериментальных исследованиях изменения упругих и фильтрационно-емкостных свойств пород-коллекторов под воздействием фильтрации воды, насыщенной углекислым газом

С.Н. Попов

Институт проблем нефти и газа РАН, г. Москва
E-mail: popov@ipng.ru

Аннотация. На основе обзора публикаций в статье рассмотрены вопросы, посвященные лабораторным исследованиям влияния воды, насыщенной углекислым газом, на фильтрационно-емкостные и упругие свойства пород-коллекторов. Приведены основные химические реакции взаимодействия растворенного углекислого газа с минералами пород. Показано существенное изменение модуля упругости, модуля объемного сжатия, пористости и проницаемости образцов керна под воздействием воды, насыщенной углекислым газом.

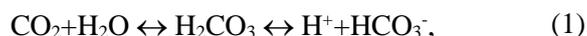
Ключевые слова: углекислый газ, пористость, проницаемость, модуль упругости, модуль объемного сжатия, коэффициент Пуассона.

Для цитирования: Попов С.Н. Проявление механико-химических эффектов при экспериментальных исследованиях изменения упругих и фильтрационно-емкостных свойств пород-коллекторов под воздействием фильтрации воды, насыщенной углекислым газом // Актуальные проблемы нефти и газа. 2021. Вып. 2(33). С. 3–14. <https://doi.org/10.29222/ipng.2078-5712.2021-33.art1>

При взаимодействии физико-химически активных жидкостей (кислоты, щелочи, низкоминерализованная вода и др.) с горными породами возникают синергетические эффекты взаимного влияния химических и механических эффектов друг на друга [1–4]. Подобные явления приводят к вариациям упруго-прочностных и фильтрационно-емкостных свойств. Вполне очевидным является проявление механико-химических эффектов при фильтрации воды, насыщенной углекислым газом в породах-коллекторах [5–18].

Когда данный газ растворяется в пластовой воде, то при определенных

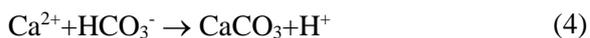
термобарических условиях образуется углекислота:



которая может взаимодействовать с породой, в результате чего одни минералы растворяются, а другие осаждаются. Некоторые из химических реакций имеют весьма серьезные последствия при нагнетании CO_2 , например, растворение кальцита (карбоната кальция):



В породах, состоящих из карбонатных минералов, такие реакции происходят достаточно быстро. В терригенных породах реакции с углекислым газом (CO_2) происходят довольно медленно. Ионы металлов, таких как кальций, магний и железо, входящие в состав терригенных пород, могут взаимодействовать с ионом бикарбоната, в результате чего откладываются карбонатные минералы. Примером служат реакции, приводящие к растворению анортита и отложению кальцита:



Таким образом, фильтрация воды, насыщенной углекислым газом в породах-коллекторах, может привести как к увеличению объема порового пространства, следствием чего будет снижение упругих и прочностных свойств породы, так и к его уменьшению, в результате чего данные параметры могут увеличиться.

Ниже приведен краткий обзор некоторых работ, в которых исследовались взаимосвязанные химические и механические явления, происходящие в породах-коллекторах при фильтрации в них воды, насыщенной углекислым газом.

Авторы работ [5, 6] проводят полный комплекс исследований, включающий лабораторные эксперименты по определению влияния закачки CO_2 на упругие и фильтрационно-емкостные свойства образцов керна терригенных пород-коллекторов и химические анализы воды,

профильтовавшейся через образцы керна, для установления химического взаимодействия флюида, насыщенного углекислым газом, с породой.

Упругие характеристики авторы определяли как динамическим, так и статическим методом, при этом использовались сухие и насыщенные пластовой водой образцы керна [5, 6] (рис. 1). В целом, в результате лабораторных экспериментов были получены корреляционные зависимости между величиной пористости и упругими характеристиками образцов (модуль упругости, коэффициент Пуассона), которые описывались линейной функцией.

В публикациях [5, 6] отмечено, что после насыщения образцов пластовой водой модуль упругости несколько вырос – пропорционально для каждого значения пористости. Также замечено некоторое различие значений данного параметра при статическом и динамическом методах определения (см. рис. 1а). Общая закономерность изменения модуля упругости от пористости вполне естественна – с увеличением пористости модуль упругости снижается [7].

Для коэффициента Пуассона наоборот – наблюдается рост с увеличением пористости образцов керна (см. рис. 1б). Условия эксперимента (сухие или насыщенные образцы) и метод определения данного параметра (динамический или статический) не вносят существенного изменения в полученные закономерности.

Из рис. 1б видно, что при увеличении пористости растет коэффициент Пуассона и данная зависимость носит линейный характер.

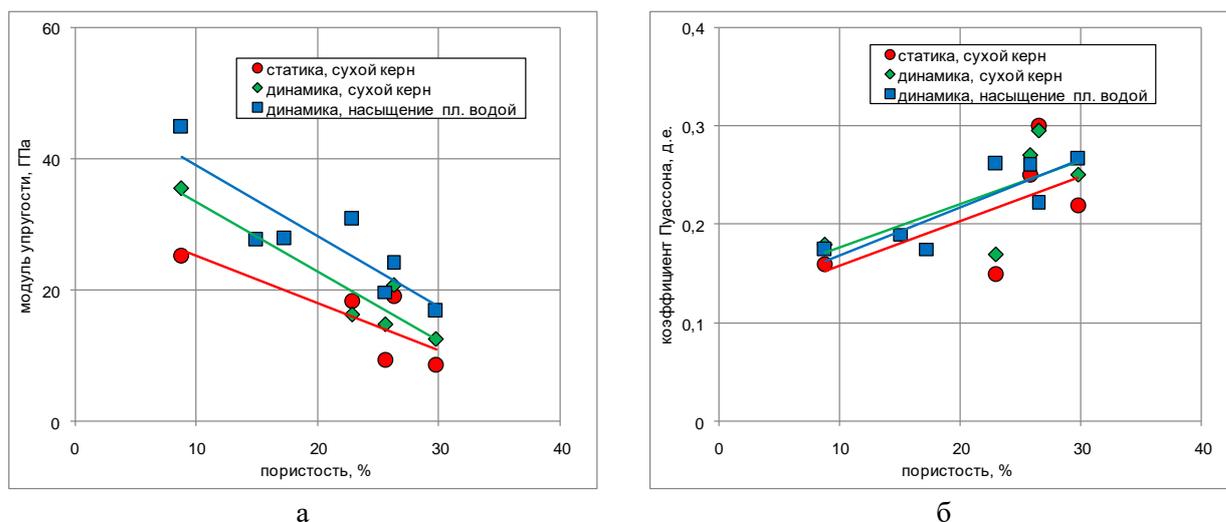


Рис. 1. Изменение модуля упругости (а) и коэффициента Пуассона (б), определенных статическим и динамическим методами, в зависимости от пористости для сухих и насыщенных терригенных образцов керна (по данным работ [5, 6])

Помимо зависимости модуля упругости от пористости, авторы также выявили, что данная величина

изменяется под воздействием эффективных напряжений по степенной зависимости (рис. 2) [8].

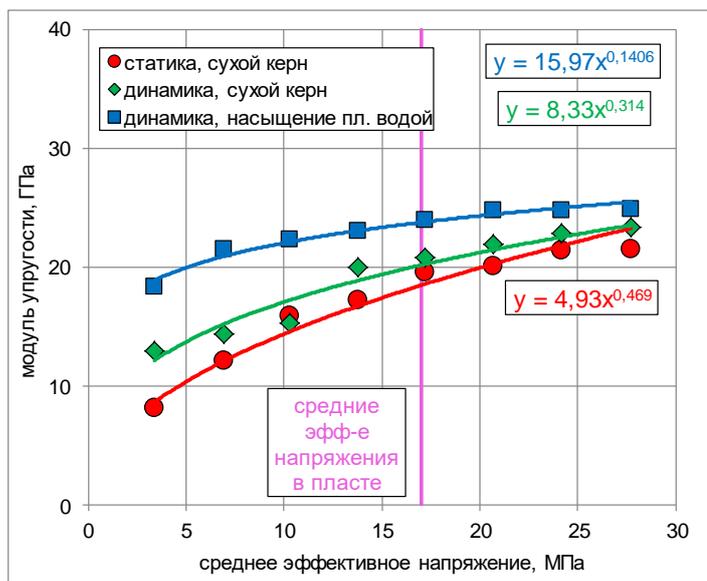


Рис. 2. Изменение модуля упругости, определенного статическим и динамическим методами, в зависимости от средних эффективных напряжений для сухих и насыщенных терригенных образцов керна (по данным работ [5, 6])

Характер увеличения модуля упругости при увеличении напряжений зависит от способа определения данного параметра (динамический или статический) и условий эксперимента (сухие или насыщенные водой образцы) (см. рис. 2).

Так, при росте эффективных напряжений от 3,5 до 28 МПа данная величина увеличивалась от 8,2 до 21,5 ГПа (статический метод, сухой керн) и от 18,4 до 24,9 ГПа (динамический метод, насыщенный керн).

После нагнетания в образцы воды, насыщенной углекислым газом, зависимость модуля упругости от эффективных напряжений поменялась в существенной степени (рис. 3). Так, для одного из образцов при эффективных напряжениях 2 МПа

величина модуля упругости снизилась с 25,1 до 20,4 ГПа; при эффективных напряжениях 27 МПа – произошло снижение с 28,4 до 24,9 ГПа, т.е. в среднем изменилась приблизительно на 20%.

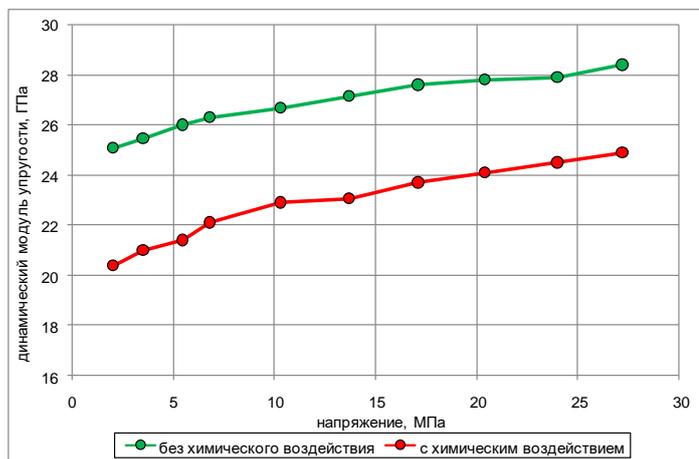


Рис. 3. Изменение модуля упругости, определенного динамическим методом, в зависимости от напряжений до и после химического воздействия углекислого газа на терригенный образец керна (по данным работ [5, 6])

Данный результат является весьма важным, так как изменение упругих констант приводит к изменению поля напряжений в горной породе и, как следствие, к еще более существенному изменению ее фильтрационно-емкостных свойств, в особенности, проницаемости.

Следующим важным этапом экспериментальных исследований, проведенных авторами работ [5, 6], было определение

взаимного влияния углекислого газа и изменения эффективных напряжений на фильтрационно-емкостные свойства пласта. В первой серии экспериментов образцы испытывались только под воздействием увеличивающихся эффективных напряжений. На рис. 4 приведены результаты изменения проницаемости, нормированной относительно начального значения, для различных испытанных образцов.

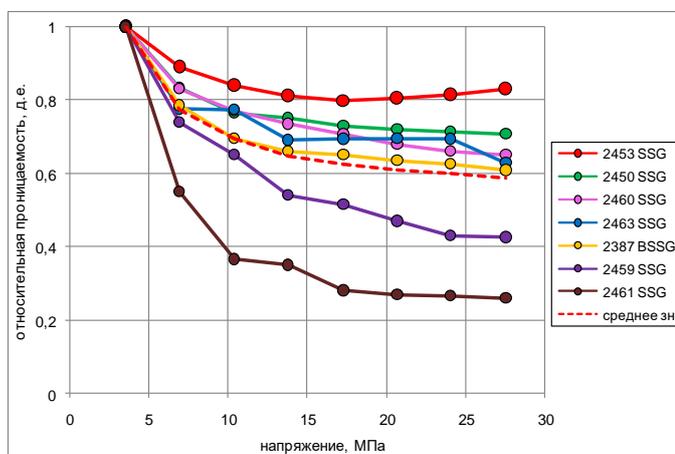


Рис. 4. Изменение относительной проницаемости терригенных образцов керна в зависимости от напряжений (по данным работ [5, 6, 9])

Как видно из рис. 4, при увеличении эффективных напряжений с 3,5 до 27,6 МПа проницаемость образцов снизилась на 17–74%, что говорит о существенном влиянии механических свойств и изменения напряжений на фильтрационные свойства пород-коллекторов.

Во второй серии экспериментов исследовалось взаимное воздействие механической нагрузки и углекислого газа на проницаемость образцов. На рис. 5 приведен пример такого эксперимента для одного из образцов. Как видно из графиков, химические реакции,

происходящие при нагнетании воды, насыщенной CO_2 , существенно ухудшают фильтрационные свойства породы, т.е. в данном случае преобладает отложение, а не растворение минералов или процесс уплотнения породы. При одних и тех же величинах эффективных напряжений под воздействием углекислого газа проницаемость снижалась сначала с 4,9 до 3,9 мД, т.е. на 20,4% (эффективное напряжение равно 2 МПа), затем уменьшалась в еще большей степени – с 3,07 до 1,67 мД, т.е. на 45,6% (эффективное напряжение равно 27,6 МПа).

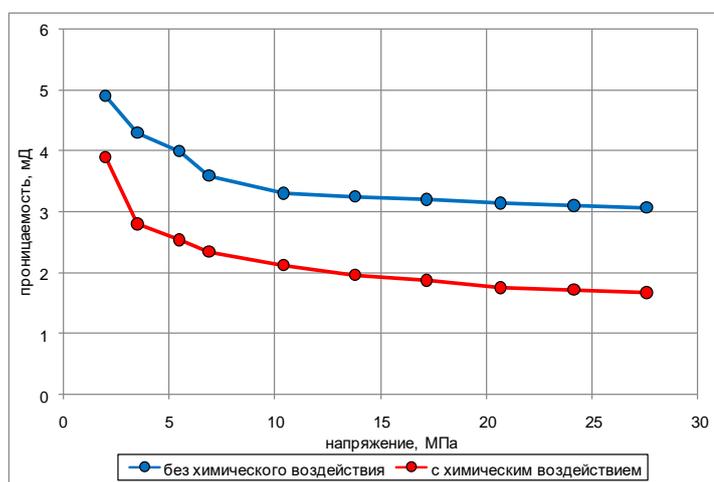
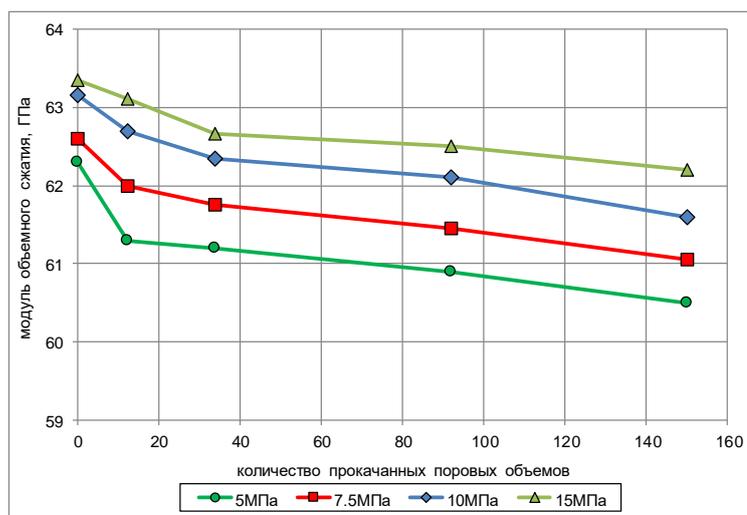


Рис. 5. Изменение проницаемости терригенного образца керна в зависимости от напряжений до и после химического воздействия углекислым газом (по данным работ [5, 6, 9])

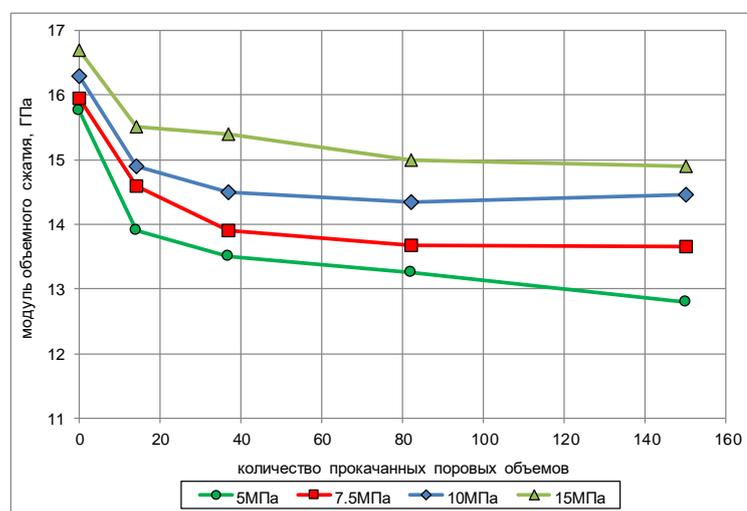
Таким образом, вышеприведенные результаты исследований показывают, что при фильтрации воды, насыщенной углекислым газом, нельзя рассматривать отдельно только химические, физические или механические эффекты. Все эти процессы являются взаимосвязанными и оказывают взаимное воздействие на физико-механические и фильтрационно-емкостные свойства пород-коллекторов.

Аналогичные исследования были выполнены G. Mavko и его коллегами [10],

при этом изучение проводилось на образцах карбонатных пород (прочный известняк и мягкий известняк, обогащенный микритом). Достоинством данной работы является то, что авторы рассмотрели влияние нагнетания воды, насыщенной углекислым газом, на фильтрационно-емкостные и физико-механические свойства не только в зависимости от эффективных напряжений, но и от количества прокачанного поровых объемов воды, насыщенной CO_2 (рис. 6, 7).



а



б

Рис. 6. Изменение модуля объемного сжатия образцов керна в зависимости от количества прокачанных поровых объемов воды, насыщенной CO₂, и эффективных напряжений для прочного (а) и зернистого известняка, обогащенного микритом (б) (по данным работы [10])

На рис. 6 представлены результаты определения закономерностей изменения модуля объемного сжатия в зависимости от эффективных напряжений и профильтровавшихся поровых объемов воды, насыщенной CO₂. Как видно из рис. 6, наиболее интенсивное снижение данного параметра происходит на начальной стадии эксперимента.

Затем происходит монотонное уменьшение величины модуля объемного сжатия в зависимости от нагнетаемых

поровых объемов, которое можно описать зависимостью, близкой к линейной. Следует отметить, что снижение данного параметра не завершилось, т.е. влияние нагнетания воды, обогащенной углекислым газом, на механические свойства породы носит длительный характер.

Определенное влияние оказывает и воздействие эффективных напряжений, прикладываемых к исследуемым образцам (см. рис. 6).

Так, для прочного известняка (см. рис. 6а) модуль объемного сжатия в начале экспериментов увеличился от 62,3 до 63,4 ГПа, т.е. на 1,8% при увеличении эффективных напряжений от 5 до 15 МПа. В конце экспериментов значение данного параметра увеличилось с 60,5 до 62,2 ГПа, т.е. на 2,8% при таком же увеличении напряжений.

Более существенное изменение модуля объемного сжатия было получено для мягкого известняка, обогащенного микритом (см. рис. 6б). В начале эксперимента

увеличение данного параметра составило от 15,8 до 16,7 ГПа, т.е. на 5,7% при увеличении эффективных напряжений от 5 до 15 МПа. В конце экспериментов значение модуля объемного сжатия увеличивалось с 12,8 до 14,9 ГПа, т.е. на 16,4% при таком же увеличении напряжений.

На следующем этапе авторы работы [10] исследовали изменение пористости образцов керна под воздействием нагнетаемой воды, насыщенной CO₂, и увеличивающихся эффективных напряжений (см. рис. 7).

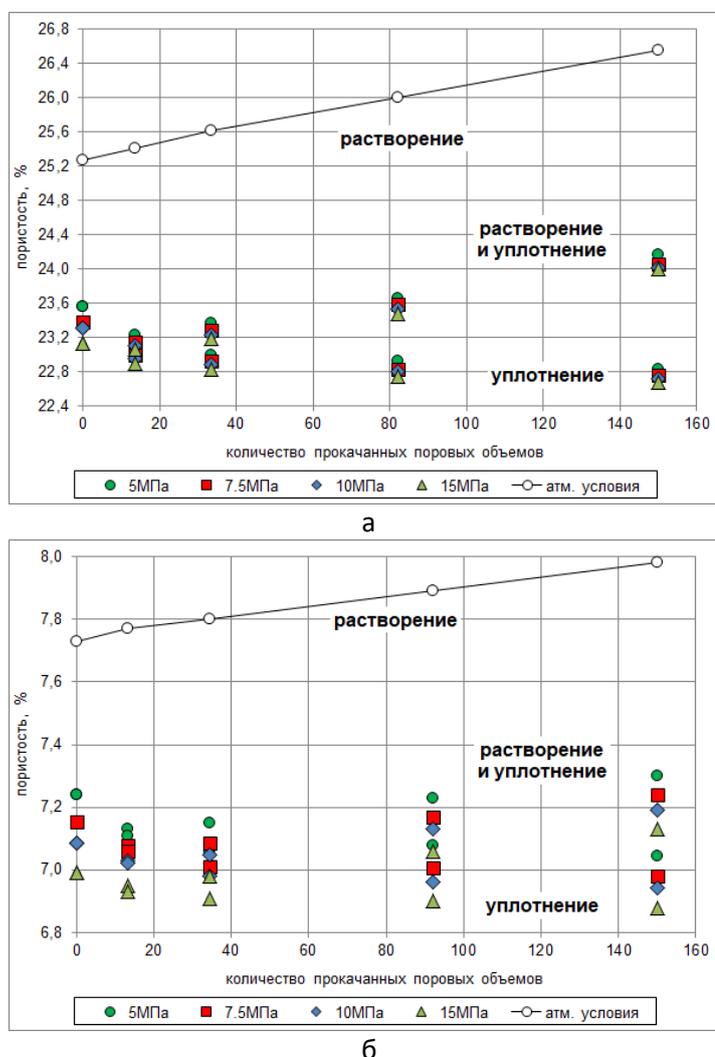


Рис. 7. Изменение пористости образцов керна в зависимости от количества прокачанных поровых объемов воды, насыщенной CO₂, и эффективных напряжений для прочного (а) и зернистого известняка, обогащенного микритом (б) (по данным работы [10])

Результаты экспериментов можно разделить на три типа, классифицируя их по происходящим в них эффектам:

1. *Растворение.* Преимущественное воздействие химических эффектов, в результате чего происходит увеличение пористости за счет растворения и вымывания твердых частиц скелета породы. Такие результаты были получены только при условиях, близких к атмосферным, т.е. когда отсутствует воздействие эффективных напряжений.

2. *Растворение и уплотнение.* Равная степень воздействия химических и механических эффектов. Несмотря на начальное снижение пористости, вызванное воздействием механической нагрузки, в дальнейшем происходит увеличение данного параметра за счет химического воздействия нагнетаемой воды, насыщенной углекислым газом.

3. *Уплотнение.* В экспериментах происходит постепенное уменьшение величины пористости, вызванное воздействием эффективных напряжений. В таком случае преобладающую роль играет механическая нагрузка, создаваемая в образце, и растворение твердого скелета породы не может компенсировать снижение пористости.

Все три типа результатов были получены как для прочного, так и для мягкого известняка, обогащенного микритом. Следует добавить, что эффект увеличения пористости за счет растворения породы оказывает более существенное влияние на процесс фильтрации воды, насыщенной CO_2 . Такой вывод можно сделать, сравнив начальное и конечное значения пористости в экспериментах.

Например, для образца, результаты испытаний которого представлены на рис. 6б, увеличение пористости за счет растворения (атмосферные условия)

составило 1,3% абсолютной величины или 5,1% в относительных единицах. Под воздействием максимальных эффективных напряжений (15 МПа) значение пористости снижается на 0,45% абсолютной величины или 1,9% в относительных единицах. Т.е. эффект воздействия механической нагрузки уменьшает пористость почти в 3 раза, по сравнению с тем, как она возрастает при растворении.

Кроме того, если уменьшение величины пористости, вызванное эффективными напряжениями, стремится к какому-то предельному значению, то под воздействием растворения наблюдается постоянный рост данной характеристики, который, судя по графикам (см. рис. 7), может быть описан по линейному закону.

Выводы

1. Взаимодействие воды, насыщенной углекислым газом, происходит наиболее интенсивно с минералами, в которых присутствует кальций. В таком случае может происходить как растворение, так и переотложение минералов горных пород-коллекторов.

2. Результаты лабораторных экспериментов показали, что при фильтрации воды с растворенным CO_2 весьма существенно снижаются упругие характеристики (модуль упругости и модуль объемного сжатия).

3. На основе лабораторных исследований с образцами карбонатных пород показано, что при фильтрации воды, насыщенной CO_2 , может происходить как уменьшение, так и увеличение фильтрационных характеристик породы, что связано либо с преобладанием механического процесса уплотнения при воздействии эффективных напряжений, либо с химическим эффектом растворения минералов.

4. Ввиду весьма активного влияния пород-коллекторов необходимым является взаимодействие породы с водой, учет таких эффектов при насыщенной углекислым газом, на моделировании захоронения CO₂ в упругие и фильтрационные свойства водоносные горизонты.

Статья в рамках выполнения государственного задания (тема «Исследование термодинамических свойств углеводородных смесей, моделирование гидротермодинамических, физико-химических и геомеханических процессов в геосредах с целью повышения эффективности разработки трудноизвлекаемых запасов нефти и газа», № АААА-А19-119030690057-5).

Литература

1. Михайлов Н.Н., Попов С.Н. Экспериментальные и теоретические исследования влияния механико-химических эффектов на фильтрационно-емкостные, упругие и прочностные свойства пород-коллекторов // Георесурсы, геоэнергетика, геополитика. 2015. Вып. 1(11). С. 8. http://oilgasjournal.ru/vol_11/popov.html (Дата обращения 15.06.2021).
2. Попов С.Н. Влияние механохимических эффектов на проницаемость трещин при моделировании циклической закачки воды в карбонатные коллекторы // Нефтяное хозяйство. 2015. № 8. С. 77–79.
3. Попов С.Н. Аномальные проявления механико-химических эффектов при разработке залежей нефти и газа: Автореф. дис. ... докт. техн. наук. М., 2019. 52 с.
4. Абрамова О.П., Абукова Л.А., Попов С.Н. Проблемы повышения достоверности компьютерных моделей природного и техногенного солеотложения в геологической среде // Современные проблемы науки и образования. 2011. № 4. С. 68.
5. Olden P., Pickup G., Jin M. et al. Use of rock mechanics laboratory data in geomechanical modeling to increase confidence in CO₂ geological storage // International Journal of Greenhouse Gas Control. 2012. Vol. 11. P. 304–315. <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2012.09.011>
6. Smith M., Campbell D., Mackay E., Polson D. CO₂ aquifer storage site evaluation and monitoring. SCCS, 2012. 200 p.
7. Попов С.Н., Кусайко А.С., Озун И.А. Исследование компрессионных свойств пород-коллекторов нефтяных месторождений, разрабатываемых ООО «ЛУКОЙЛ-Коми» // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. 2016. № 7. С. 31–35.
8. Попов С.Н. Разработка модели изменения проницаемости трещин под воздействием механохимических эффектов при нагнетании воды в карбонатный коллектор // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. 2016. № 5. С. 28–35.
9. Михайлов Н.Н., Попов С.Н. Вариации фильтрационно-емкостных и физико-механических свойств пород-коллекторов под воздействием механохимических эффектов // Вестник ЦКР Роснедра. 2015. № 3. С. 17–29.
10. Mavko G., Vanorio T., Benson S. et al. Linking the chemical and physical effects of CO₂ injection to geophysical parameters: Stanford Global Climate and Energy Program (GCEP) technical report, 2013. 20 p.
11. Qiao X., Li G. Factors influencing the safety of CO₂ geological storage in deep saline aquifers // Environmental Engineering and Management Journal. 2014. Vol. 13, No. 12. P. 2917–2928. <https://doi.org/10.30638/eemj.2014.329>

12. *Hangx S., van der Linden A., Marcelis F., Bauer A.* The effect of CO₂ on the mechanical properties of the Captain Sandstone: Geological storage of CO₂ at the Goldeneye field (UK) // International Journal of Greenhouse Gas Control. 2013. Vol. 19. P. 609–619. <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2012.12.016>

13. *Perera M.S.A.* Investigation of the effect of carbon dioxide sequestration on coal seams: a coupled hydro-mechanical behavior: Thesis summary of Rocha Medal, 2014. 32 p.

14. *Vilarrasa V., Carrera J., Olivella S.* Hydromechanical characterization of CO₂ injection sites // International Journal of Greenhouse Gas Control. 2013. Vol. 19. P. 665–677. <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2012.11.014>

15. *Rahmer J., Seyedi D.M.* Coupled large scale hydromechanical modeling for caprock failure risk assessment of CO₂ storage in deep saline aquifer // Oil & Gas Science and Technology. 2010. Vol. 65, No. 3. P. 503–517. <https://doi.org/10.2516/ogst/2009049>

16. *Olabode A.* Experimental investigation in CO₂ sequestration and shale caprock integrity: A thesis submitted to the graduate faculty of the Louisiana State University and Agricultural and Mechanical college in partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science in Petroleum Engineering. Obafemi Awolowo University, Nigeria, 2008. 136 p.

17. *Vilarrasa V.* Thermo-hydro-mechanical impacts of carbon dioxide (CO₂) injection in deep saline aquifers: Ph.D. thesis. GHS, UPC-Barcelona Tech, IDAEA, CSIC, 2012. 198 p.

18. *Zemke K., Liebscher A., Wandrey M.* Petrophysical analysis to investigate the effects of carbon dioxide storage in a subsurface saline aquifer at Ketzin, Germany (CO₂SINK) // International Journal of Greenhouse Gas Control. 2010. Vol. 4, No. 6. P. 990–999. <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2010.04.008>

Manifestation of coupled mechanical and chemical effects in experimental studies of changes in elastic properties, porosity and permeability of reservoir rocks under the influence of filtration of water saturated with carbon dioxide

S.N. Popov

Oil and Gas Research Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow
E-mail: popov@ipng.ru

Abstract. The article provides an overview of publications devoted to laboratory studies of the effect of water saturated with carbon dioxide on the porosity, permeability and elastic properties of reservoir rocks. The main chemical reactions of the interaction of dissolved carbon dioxide with rock minerals are presented. A significant change in the modulus of elasticity, modulus of volumetric compression, porosity and permeability of core samples under the influence of water saturated with carbon dioxide is shown.

Keywords: carbon dioxide, porosity, permeability, elastic modulus, bulk modulus, Poisson's ratio.

Citation: *Popov S.N.* Manifestation of coupled mechanical and chemical effects in experimental studies of changes in elastic properties, porosity and permeability of reservoir rocks under the influence of filtration of water saturated with carbon dioxide // Actual Problems of Oil and Gas. 2021. Iss. 2(33). P. 3–14. <https://doi.org/10.29222/ipng.2078-5712.2021-33.art1> (In Russ.).

References

1. *Mikhailov N.N., Popov S.N.* Experimental and theoretical study of influence of mechanochemical effects on porosity, permeability, elastic and strength properties of reservoir rocks // Georesources, Geoenergetics, Geopolitics. 2015. Iss. 1(11). P. 8. http://oilgasjournal.ru/vol_11/popov.html (Accessed on 15.06.2021). (In Russ.).
2. *Popov S.N.* Influence of mechanochemical effects on elastic and strength properties of reservoir rocks // Neftyanoe Khozyaystvo – Oil Industry. 2015. No. 8. P. 77–79. (In Russ.).
3. *Popov S.N.* Abnormal manifestations of mechanical and chemical effects during the development of oil and gas deposits: Synopsis of Doctoral thesis. Moscow, 2019. 52 p. (In Russ.).
4. *Abramova O.P., Abukova L.A., Popov S.N.* Problems of increasing reliability of computer models natural and man-made scaling in the geological environment // Modern Problems of Science and Education. 2011. No. 4. P. 68. (In Russ.).
5. *Olden P., Pickup G., Jin M.* et al. Use of rock mechanics laboratory data in geomechanical modeling to increase confidence in CO₂ geological storage // International Journal of Greenhouse Gas Control. 2012. Vol. 11. P. 304–315. <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2012.09.011>
6. *Smith M., Campbell D., Mackay E., Polson D.* CO₂ aquifer storage site evaluation and monitoring. SCCS, 2012. 200 p.
7. *Popov S.N., Kusaiko A.S., Ozun I.A.* Researching of reservoir-rocks compaction properties of oil fields, developed by LLC “LUKOIL-Komi” // Geology, Geophysics and Development of Oil and Gas Fields. 2016. No. 7. P. 31–35. (In Russ.).

8. *Popov S.N.* Development of the model of fracture permeability change under the influence of mechanical-chemical effects when injecting water into a carbonate reservoir // *Geology, Geophysics and Development of Oil and Gas Fields*. 2016. No. 5. P. 28–35. (In Russ.).
9. *Mihailov N.N., Popov S.N.* Variation of permeability, porosity and physical and mechanical properties of reservoirs under mechanical and chemical impact // *Bulletin of the CDC Rosnedra*. 2015. No. 3. P. 17–29. (In Russ.).
10. *Mavko G., Vanorio T., Benson S.* et al. Linking the chemical and physical effects of CO₂ injection to geophysical parameters: Stanford Global Climate and Energy Program (GCEP) technical report, 2013. 20 p.
11. *Qiao X., Li G.* Factors influencing the safety of CO₂ geological storage in deep saline aquifers // *Environmental Engineering and Management Journal*. 2014. Vol. 13, No. 12. P. 2917–2928. <https://doi.org/10.30638/eemj.2014.329>
12. *Hangx S., van der Linden A., Marcelis F., Bauer A.* The effect of CO₂ on the mechanical properties of the Captain Sandstone: Geological storage of CO₂ at the Goldeneye field (UK) // *International Journal of Greenhouse Gas Control*. 2013. Vol. 19. P. 609–619. <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2012.12.016>
13. *Perera M.S.A.* Investigation of the effect of carbon dioxide sequestration on coal seams: a coupled hydro-mechanical behavior: Thesis summary of Rocha Medal. 2014. 32 p.
14. *Vilarrasa V., Carrera J., Olivella S.* Hydromechanical characterization of CO₂ injection sites // *International Journal of Greenhouse Gas Control*. 2013. Vol. 19. P. 665–677. <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2012.11.014>
15. *Rahmer J., Seyedi D.M.* Coupled large scale hydromechanical modeling for caprock failure risk assessment of CO₂ storage in deep saline aquifer // *Oil & Gas Science and Technology*. 2010. Vol. 65, No. 3. P. 503–517. <https://doi.org/10.2516/ogst/2009049>
16. *Olabode A.* Experimental investigation in CO₂ sequestration and shale caprock integrity: A thesis submitted to the graduate faculty of the Louisiana State University and Agricultural and Mechanical college in partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science in Petroleum Engineering. Obafemi Awolowo University. 136 p.
17. *Vilarrasa V.* Thermo-hydro-mechanical impacts of carbon dioxide (CO₂) injection in deep saline aquifers: Ph.D. thesis. GHS, UPC-Barcelona Tech, IDAEA, CSIC, 2012. 198 p.
18. *Zemke K., Liebscher A., Wandrey M.* Petrophysical analysis to investigate the effects of carbon dioxide storage in a subsurface saline aquifer at Ketzin, Germany (CO₂SINK) // *International Journal of Greenhouse Gas Control*. 2010. Vol. 4, No. 6. P. 990–999. <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2010.04.008>