

© К. А. СПАСЕННИКОВА,¹
Б. В. ГРИГОРЬЕВ,² А. А. ШУБИН²

¹Институт криосферы Земли СО РАН (г. Тюмень)

²Тюменский государственный университет
Raskatov_@mail.ru

УДК 622.245.549

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ГЛИНИСТЫХ
МИНЕРАЛОВ НА ПРОНИЦАЕМОСТЬ ГОРНЫХ ПОРОД ПРИ
РАЗЛИЧНОЙ МИНЕРАЛИЗАЦИИ ПЛАСТОВОЙ ВОДЫ**

**STUDY OF IMPACT OF CLAY MINERALS
ON ROCK PERMEABILITY
IN VARYING FORMATION WATER SALINITY**

В работе проведена оценка влияния минерализации прокачиваемой воды на коэффициент проницаемости горных пород в зависимости от минерального состава глинистых частиц. В ходе экспериментов создавались термодинамические условия, эквивалентные пластовым. Через образцы горных пород прокачивалась вода с различной минерализацией — пластовая (16-20 г/л) и 1 г/л, в качестве растворенной соли использовалась NaCl. С использованием результатов рентгенофазового анализа построена зависимость изменения проницаемости от содержания слюд, каолинита, хлорита и отдельных смешанослойных образований (ССО). Установлено, что смешанослойные минералы, близкие по свойствам к минералам смектитовой группы, основным представителем которой является монтмориллонит, оказывают наибольшее влияние на уменьшение проницаемости при смене минерализации воды пластового значения (16-20 г/л) на 1 г/л. Наиболее вероятными причинами такого поведения являются: а) факт разрушения диффузных оболочек связанной воды электролитами высокой концентрации, в результате чего фактор сопротивления потоку водой, связанной с поверхностью минеральных частиц, исключается или снижается; б) набухание глинистых минералов в присутствии воды, что характерно в первую очередь для минералов смектитовой группы.

The paper is devoted to the impact assessment of water salinity on the rock permeability coefficient depending on the mineral composition of clay particles. In the experiments the thermodynamic conditions equivalent to the formation ones were created. Varying-salinity water — stratal water (16-20 g/l), 1 g/l was pumped through rock samples; NaCl was used as a dissolved salt. The dependence of the permeability change on the mica, kaolinite, and chlorite contents and separately on the content of mixed-layer minerals is built using the results of X-ray phase analysis. It is found that the mixed-layer minerals similar in properties to smectite group minerals, the main rep-

representative of which is montmorillonite, have the greatest impact on the reduction of permeability by changing water salinity of stratal water value (16-20 g/l) at 1 g/l. The most likely reasons for this behavior are: a) the fact of the destruction of the diffuse membranes of bound water by high concentration electrolytes, as a result of which the flow resistance factor by water bound to the surface of mineral particles is reduced or eliminated; b) the swelling of clay minerals in the presence of water, which is primarily typical for the minerals of smectite group.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА. Проницаемость горных пород, глинистые минералы, слюды, смешанослойные образования, каолинит, хлорит, связанная вода.

KEY WORDS. Rock permeability, clay minerals, mica, mixed-layer minerals, kaolinite, chlorite, bound water.

В процессе разработки месторождений для поддержания пластового давления (ППД) используется метод заводнения продуктивного пласта. Вследствие этого происходит изменение проницаемости породы — коллектора для нефти и воды. Второй важной особенностью при закачке воды является изменение фильтрационных свойств породы при взаимодействии глины-цемента с водой в процессе катионного обмена между электролитом и минеральной поверхностью. Выбор воды подходящей минерализации для нагнетания в систему ППД до настоящего времени остается проблемой, которой уделяется недостаточно внимания. Вопрос влияния минерализации по проницаемость горных пород рассмотрен в работах В. М. Гольдберга [5, 6], П. Д. Гладкова [4], Г. А. Бабаляна [1], Э. Д. Ершова [8] и др. В. М. Гольдберг указывает на то, что для монтмориллонитовых глин характерно усиление гидратации при фильтрации воды с низкой минерализацией катионов, что приводит к увеличению количества связанной воды и снижению порового пространства, а в результате — к проницаемости породы. На основе экспериментальных исследований П. Д. Гладков показал, что для полимиктовых пород снижение минерализации прокачиваемой воды приводит к повышению коэффициента вытеснения нефти из образцов. Это вызвано выравниванием фазовых проницаемостей водо- и нефтенасыщенных поровых каналов в результате снижения подвижности воды в водонасыщенных каналах из-за понижения их проницаемости в результате гидратации и набухания глин.

Целью данной работы является исследование влияния глинистого цемента горных пород, сложенного слюдами, каолинитом, хлоритом и смешанослойными образованиями на фильтрационные свойства горных пород при различной минерализации прокачиваемой воды.

Методика проведения экспериментов

Эксперименты проводятся согласно требованиям ОСТ 39-235-89 [10] и ГОСТ 26450.2-85 [7]. В ходе экспериментов образец кернового материала подвергается воздействию пластовых величин температуры и давления при помощи установки ТЕХ-КПР. Далее, через образец, проводится фильтрация воды с различной минерализацией: пластовой воды — 16-20 г/л и 1 г/л, с последующим определением проницаемости образцов горных пород. Для создания модельных образцов воды с различной минерализацией используется NaCl.

Коэффициент проницаемости рассчитывается по формуле Дарси [3, 10]:

$$K_{np} = Q \cdot \mu \frac{L}{\Delta P \cdot F}, \quad (1)$$

где μ — вязкость флюида (мПа·с), ΔP — перепад давления (10^5 Па), L — длина образца (см), F — площадь поперечного сечения образца (см²), $K_{пр}$ — проницаемость (Д).

Относительное изменение проницаемости равно отношению снижения проницаемости и приведено к 100%:

$$\Delta K_{отн}, \% = \left(\frac{K_{пр.пласт} - K_{пр(1г/л)}}{K_{пр.пласт}} \cdot 100\% \right), \quad (2)$$

где $\Delta K_{отн}$ — относительное изменение проницаемости при смене минерализации %, $K_{пр.пласт}$, $K_{пр(1г/л)}$ — коэффициент проницаемости при фильтрации воды с пластовой минерализацией и 1 г/л соответственно [мД].

Результаты эксперимента

Для исследуемых образцов, представленных породами терригенного типа пластов групп АС Приобского месторождения, сложенных из мелко- и тонкозернистых песчаников, разномерных алевролитов с глинистым цементом, были определены значения проницаемости по воде с различной минерализацией. Методом рентгенофазового анализа установлен качественный и количественный состав глинистых минералов размером менее 0,005 мм: слюды, каолинита, хлорита и смешанослойных образований (ССО).

Наибольший интерес представляют результаты зависимости проницаемости от минерализации для минералов с электрически неуравновешенной кристаллической решеткой, с избытком отрицательных зарядов. Таковыми являются слюды с дефицитом межслоевых катионов (илит), смектиты (монтмориллонит) и, как в нашем случае, смешанослойные образования. Недостаток положительных зарядов в этих минералах компенсируется за счет обменных катионов (Na⁺, K⁺, Ca²⁺ и т. д.) и пластовой воды. Отличие в том, что для слюд с дефицитом межслоевых катионов активными для катионного обмена являются внешние поверхности базальных граней, в то время как для монтмориллонита — это внешние и внутренние поверхности, а также краевые участки [5]. Ниже представлена зависимость изменения проницаемости при смене минерализации прокачиваемой воды от пластовых величин (16-20 г/л) до 1 г/л для смешанослойных образований.

График на рис. 1 показывает, на сколько процентов снизилась проницаемость при уменьшении минерализации до 1 г/л в зависимости от содержания ССО. Чем больше ССО в составе глинистого цемента, тем сильнее изменение (снижение) коэффициента проницаемости.

Для слюд с дефицитом межслоевых катионов наблюдается похожая зависимость, представленная на рис. 2.

Чем больше содержание слюд с дефицитом межслоевых катионов, тем больше снижение проницаемости при снижении минерализации от пластовых значений (16-20 г/л) до 1 г/л.

Во второй группе минералов представлены каолинит и хлорит, как правило, с электрически нейтральными кристаллическими решетками. Для катионного обмена этих минералов доступны только краевые участки базальных граней в местах дефектов. По этой причине не следует ожидать четко прослеживающейся зависимости проницаемости от содержания минералов при различной минерализации прокачиваемой воды (рис. 3).

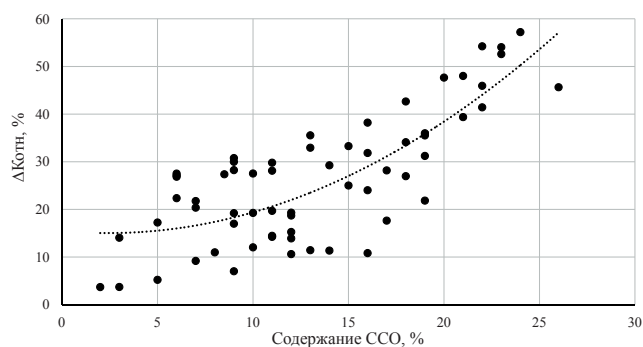


Рис. 1. Влияние смешанослойных образований* на изменение проницаемости при смене минерализации от 1 г/л до пластовых значений (16-20 г/л)



Рис. 2. Влияние содержания слюд** на изменение проницаемости при смене минерализации от 1 г/л до пластовых значений (16-20 г/л)

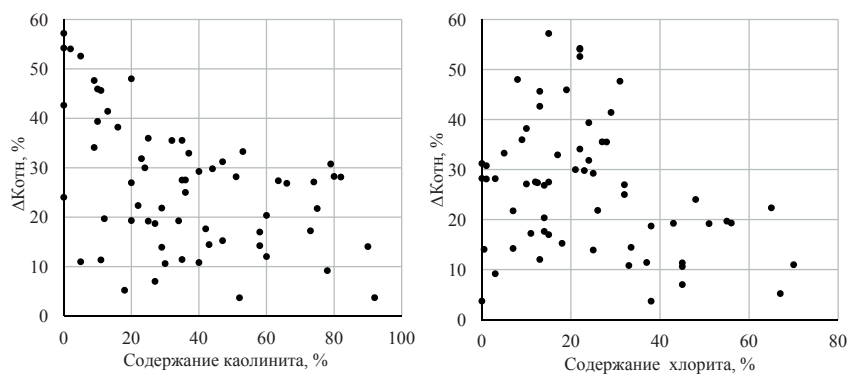


Рис. 3. Влияние каолинита и хлорита на изменение проницаемости при смене минерализации от 1 г/л до пластовых значений (16-20 г/л)

* Массовая доля, отношение массы ССО к массе всех глинистых минералов в образце, %

** Массовая доля, отношение массы слюды к массе всех глинистых минералов в образце, %

Из рис. 3 видно, что чем выше доля в составе глинистого цемента каолинита и хлорита, тем менее порода чувствительна к смене минерализации пластовой воды.

Для каолинита и хлорита, вероятнее всего, основным фактором, влияющим на изменение проницаемости, будет являться только размер частиц, с уменьшением которых будет увеличиваться число краевых дефектов, что приведет к увеличению емкости катионного обмена.

Ключевым фактором в интерпретации полученных результатов является, как сказано ранее, катионный обмен между пластовым флюидом и активной поверхностью глинистых минералов. Механизм выглядит следующим образом: при фильтрации низкоминерализованной воды в результате катионного обмена увеличивается площадь активной поверхности для связывания диполей воды, что приводит к заполнению порового пространства диффузными оболочками связанной воды, отличающейся вязкостью, во много превосходящей вязкость свободной воды [5, 6]. В случае фильтрации высокоминерализованной воды, в результате компенсации отрицательного заряда твердой фазы катионами флюида, катионный обмен снижается, и, как следствие, снижается интенсивность связывания катионами молекул воды, что сокращает объем связанной воды, увеличивая тем самым гидропроводность породы.

Необходимо упомянуть про набухаемость глин, в первую очередь смектитов (монтмориллонита) и в меньшей мере — смешанослойных образований, слюд с дефицитом межслоевых катионов и каолинита. Особенно интенсивно набухание минералов происходит в присутствии воды с низкой минерализацией. Это приводит к уменьшению порового пространства и снижению проницаемости породы. [2, 9].

Исходя из сказанного, можно сделать вывод, что оптимальной для проницаемости породы по воде для песчаников и разномерных алевролитов Приобского месторождения, пластов групп АС, является закачка высокоминерализованной воды в систему ППД. При этом необходимо учитывать минеральный состав глин-цементов и способность некоторых глин к активному набуханию в водной среде.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бабалян Г. А. Физико-химические процессы в добыче нефти / Г. А. Бабалян. М.: Недра, 1974. 200 с.
2. Булатов А. И. Буровые промывочные и тампонажные растворы: учеб. пособие для вузов / А. И. Булатов, П. П. Макаренко, Ю. М. Проселков. М.: Недра, 1999. 424 с.
3. Гиматудинов Ш. К. Физика нефтяного и газового пласта: учебник / Ш. К. Гиматудинов. изд. 2-е, перераб. и доп. М.: Недра, 1971. 312 с.
4. Гладков П. Д. Обоснование технологий физико-химического воздействия на низкопроницаемые полимиктовые коллектора: автореф. дис. канд. тех. наук / П. Д. Гладков. СПб, 2012. 20 с.
5. Гольдберг В. М. Проницаемость и фильтрация в глинах / В. М. Гольдберг, Н. П. Скворцов. М.: Недра, 1986. 160 с.
6. Гольдберг В. М. Гидрогеологические прогнозы качества подземных вод на водозаборах / В. М. Гольдберг. М., Недра, 1976.

7. ГОСТ 26450.2-85. Породы горные. Методы определения коллекторских свойств. Введ. 1985-02-27. М.: Государственный стандарт Союза ССР.
8. Ершов Э. Д. Общая геокриология / Э. Д. Ершов. М.: Недра, 1990. 559 с.
9. Маслов Н. Н. Основы механики грунтов и инженерной геологии: учеб. для транспорт. вузов / Н. Н. Маслов. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Высшая школа, 1968. 628 с.
10. ОСТ 39-235-89. Нефть. Метод определения фазовых проницаемостей в лабораторных условиях при совместной стационарной фильтрации. Введ. 1989-02-06. Типография ХОЗУ Миннефтепрома, 1989. 35 с.
11. Guggenheim S. Summary of recommendations of nomenclature committees relevant to clay mineralogy: report of the association internationale pour l'etude des argiles (aiepa) nomenclature committee / S. Guggenheim, J. M. Adams, D. C. Bain // Clays and Clay Minerals. 2006. Vol. 54. No 6. Pp. 761-772.

REFERENCES

1. Babaljan G. A. Fiziko-himicheskie processy v dobyche nefi [Physico-chemical Processes in Oil Production]. М.: Nedra, 1974. 200 p. (In Russian)
2. Bulatov A. I., Makarenko P. P., Proselkov Ju. M. Burovye promyvochnye i tamponazhnye rastvory. Uchebnoe posobie dlja VUZov [Drilling Washing Solutions and Cementing Slurries. Textbook for universities and colleges]. М.: Nedra, 1999. 424 p. (In Russian)
3. Gimatudinov Sh. K. Fizika neftjanogo i gazovogo plasta: uchebnik [Physics of Oil and Gas Reservoirs: Textbook]. М.: Nedra, 1971. 312 p. (in Russian)
4. Gladkov P. D. Obosnovanie tehnologij fiziko-himicheskogo vozdejstvija na nizkopronicaemye polimiktovye kolektora [Substantiation of Technologies of Physical and Chemical Effects on Low-permeability Polymictic Reservoirs] // avtoref. dis. kand. teh. nauk [Abstract of Diss. Cand. Sci. (Engin.)]. SPb., 2012. 20 p. (In Russian)
5. Gol'dberg V. M., Skvorcov N. P. Pronicaemost' i fil'tracija v glinah [Permeability and Filtration of Clays]. М.: Nedra, 1986. 160 p. (In Russian)
6. Gol'dberg V. M. Gidrogeologicheskie prognozy kachestva podzemnyh vod na vodozaborah [Hydrogeological Predictions of Groundwater Quality in Water Intakes]. М.: Nedra, 1976. (In Russian)
7. ГОСТ 26450.2-85. Породы горные. Методы определения коллекторских свойств. — Введ. 1985-02-27 [Rocks. Methods for Determination of Reservoir Properties — Effective 02/27/1985]. М.: Gosudarstvennyj standart Sojuza SSR [USSR State Standard]. (In Russian)
8. Ershov Je. D. Obshhaja geokriologija [General Geocryology] / Je. D. Ershov (Ed.). М.: Nedra, 1990. 559 p. (In Russian)
9. Maslov N. N. Osnovy mehaniki gruntov i inzhenernoj geologii: ucheb. dlja transport. Vuzov [Fundamentals of Soil Mechanics and Engineering Geology: Textbook for Transport Universities]. М.: Vysshaja shkola [Higher School], 1968. 628 p. (In Russian)
10. ОСТ 39-235-89. Нефть. Метод определения фазовых проницаемостей в лабораторных условиях при совместной стационарной фильтрации. — Введ. 1989-02-06 [OST 39-235-89. Oil. Method for Determination of Effective Permeability in Laboratory Conditions at Combined Stationary Filtration. — Effective 02/06/1989]. Типография ХОЗУ Миннефтепрома [Printing Office of Administration and Maintenance, Ministry of Oil Industry of the USSR], 1989. 35 p. (In Russian)

11. Guggenheim S., Adams J. M., Bain D. C. Summary of recommendations of nomenclature committees relevant to clay mineralogy: report of the association internationale pour l'etude des argiles (aipea) nomenclature committee // Clays and Clay Minerals. 2006. Vol. 54. No 6. Pp. 761-772.

Авторы публикации

Спасенникова Клавдия Анатольевна — программист Института криосферы Земли СО РАН (г. Тюмень)

Григорьев Борис Владимирович — кандидат технических наук, доцент кафедры механики многофазных систем Физико-технического института Тюменского государственного университета

Шубин Александр Алексеевич — магистр Тюменского государственного университета

Authors of the publication

Klavdija A. Spasennikova — Programmer at the Earth Cryosphere Institute, Siberian Branch of Russian Academy of Science

Boris V. Grigorjev — Cand. Sci. (Engin.), Associate Professor at the Department of Mechanics of Multiphase Systems Physico-Technical Institute, Tyumen State University

Aleksandr A. Shubin — Magister at the Tyumen State University