

УДК 550.8.08

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ
ГЛИНИСТОЙ КОРКИ НА ОБРАЗЦАХ ПЕСЧАНИКА
С НИЗКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТЬЮ**

Д. М. Евменова¹, Н. А. Голиков^{1,3,4}, И. Н. Ельцов^{1,2,3}

¹*Институт нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН,*

E-mail: PavlovaDM@ipgg.sbras.ru, просп. Коптюга, 3, 630090, г. Новосибирск, Россия

²*Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН,*

E-mail: igor_el@mail.ru, просп. Академика Лаврентьева, 6, 630090, г. Новосибирск, Россия

³*Новосибирский государственный технический университет,*

ул. Немировича-Данченко, 136, 630087, г. Новосибирск, Россия

⁴*Новосибирский государственный университет,*

E-mail: GolikovNA@ipgg.sbras.ru, ул. Пирогова, 1, 630090, г. Новосибирск, Россия

Показано, что учет характеристик зоны проникновения, образующейся в процессе фильтрации бурового раствора в пласт, позволяет повысить достоверность геоинформационной системы данных геолого-геофизических исследований в скважинах. Разработана методика интерпретации данных с учетом гидродинамических и геомеханических аспектов бурения. В качестве части зоны проникновения рассмотрена глинистая корка, при которой пористость и проницаемость невозможно напрямую измерить. Представлены результаты экспериментальных исследований динамики роста глинистой корки на образцах низкопроницаемого песчаника коллектора юрского возраста с помощью оригинальной установки. Определена неоднородность глинистой корки по петрофизическим свойствам. При повторных измерениях выявлена зона кольматации.

Глинистая корка, породный образец, проницаемость, пористость, эксперимент, интерпретация данных геоинформационной системы, зона кольматации, зона проникновения

DOI: 10.15372/FTPRPI20230506

Для повышения достоверности определения фильтрационно-емкостных параметров продуктивного пласта (пористости, проницаемости, нефтенасыщенности) разрабатываются инновационные подходы к интерпретации данных геоинформационной системы (ГИС) для геофизических и геолого-технологических исследований в скважинах на основе многофизичной модели нефтяного пласта [1 – 3]. В число модельных параметров входят проницаемость и пористость глинистой корки, которые значительно влияют на результаты фильтрационного моделирования, но не измеряются и не определяются при геофизических и геолого-технологических исследованиях.

При фильтрации через пористую проницаемую горную породу бурового раствора, содержащего глинистую компоненту, вблизи стенки скважины происходит захват и накопление твердых мелкодисперсных частиц в поровом пространстве. Проницаемость этой зоны по отношению к проницаемости коллектора снижается на два-три порядка. Так формируется глинистая корка, препятствующая дальнейшему проникновению фильтрата в проницаемый пласт. Ее характеристики (пористость, проницаемость) входят в число модельных параметров для интерпретации данных ГИС на основе многофизической модели пласта. Они существенно влияют на результат гидродинамического моделирования, поэтому необходимо измерять их экспериментально в условиях, приближенных к пластовым.

Учеными и практиками активно изучаются процессы формирования глинистой корки, механизмы фильтрации и захвата частиц, а также изменение структуры пористого пространства. Наиболее полно современные модели формирования глинистой корки описаны в [4, 5]. В результате проведения эксперимента с кальцитом плотностью 2655 кг/м^3 и каолиновыми корками плотностью 2704 кг/м^3 получены эмпирические зависимости сопротивления корки, а также доли объема твердых частиц от давления суспензии.

В [6–9] исследуется фильтрация бурового раствора при постоянном перепаде давления, в [10, 11] рассмотрен случай изменения свойств корки при переменном давлении. Для моделирования закачки суспензии в пористый образец в [12] использовалась конечно-разностная схема для решения системы уравнений, включающей законы сохранения массы для твердых частиц и жидкой фазы. Предполагалось, что интенсивность удержания частиц в пористой среде пропорциональна скорости фильтрации и их концентрации. Для описания движения суспензии через образец применялся закон Дарси. В образце поддерживался постоянный перепад давления и концентрация твердых частиц суспензии. Впервые исследовано влияние смыва и изменения расхода фильтрующейся жидкости на скорость роста корки в [13].

Большинство экспериментальных работ посвящено анализу фильтрации коллоидных частиц с размером значительно меньшим, чем характерный размер пор, либо процессу коагуляции в образцах модельных насыпных сред [14–16]. Эксперименты проводились на образцах песчаника с высокой проницаемостью или искусственных высокопроницаемых образцах в Новосибирском технологическом центре Baker Hughes, в компании Schlumberger и др. [15, 17]. В меньшей степени экспериментально исследовались образцы керна горных пород, особенно с низкой проницаемостью. Кроме того, в перечисленных работах не удалось реализовать измерение характеристик глинистой корки в процессе непрерывной циркуляции бурового раствора, так как регистрировались только конечные параметры корки.

В настоящей работе наряду с измерением параметров глинистой корки исследовался процесс ее роста. Выполнена серия экспериментов на оригинальной установке в режиме реального времени [18]. В отличие от исследований [4, 5, 17, 19, 20], реализован метод стационарной фильтрации. В эксперименте обеспечивалось стационарное движение жидкости, имитирующее циркуляцию бурового раствора в скважине. Использовались образцы песчаника с низкой проницаемостью ($< 10 \text{ мД}$). Определены итоговые пористость, проницаемость и толщина глинистой корки, а также их изменения в ходе эксперимента. По результатам предлагается экспериментально определять параметры глинистой корки на образцах керна, полученных на Тевлинско-Русскинском и Русскинском месторождениях из целевых горизонтов, и использовать их при интерпретации данных ГИС на этих объектах.

Учет напряженно-деформированного состояния массива горных пород и наличие в скважине естественного или специально приготовленного бурового раствора меняет динамику формирования прискважинной зоны. Данный факт полезен при бурении не только нефтяных и газовых скважин, но и скважин, которые бурятся при геологоразведке и оконтуривании месторождений твердых полезных ископаемых. В работе проанализированы низкопористые и низкопроницаемые образцы керна, для которых стандартные методики оценки фильтрационно-емкостных свойств и параметров зоны колюматации малоэффективны. Сделана попытка экспериментального решения этой задачи.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ РАБОТ

Для исследования процесса образования глинистой корки на образцах горных пород применялась оригинальная установка (рис. 1) [18].

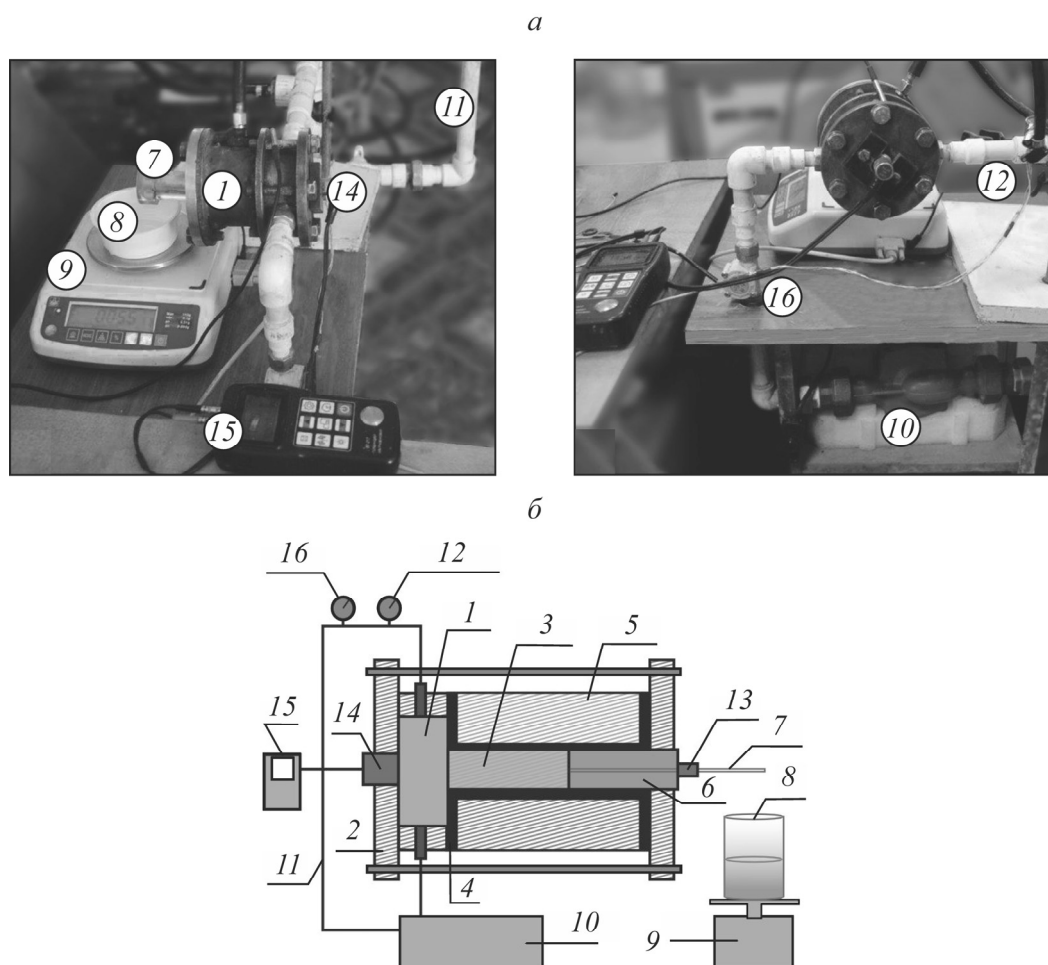


Рис. 1. Установка (а) для исследования процесса образования глинистой корки и схема (б): 1 — камера, где циркулирует раствор; 2 — фланец; 3 — образец; 4 — резиновая манжета; 5 — корпус; 6 — проставка; 7 — капилляр, по которому проходит фильтрат; 8 — стакан; 9 — весы; 10 — циркуляционный насос; 11 — система трубопроводов; 12 — манометр; 13 — измерительная ячейка; 14 — датчик измерения толщины глинистой корки; 15 — толщиномер; 16 — расходомер

В экспериментах использовались образцы низкопроницаемого песчаника юрского возраста. Образец цилиндрической формы помещался в резиновую манжету для герметизации боковой поверхности. Вдоль торца циркулировал буровой раствор при избыточном давлении и задан-

ной скорости потока с возможным изменением давления и расхода во время эксперимента. Фильтрат бурового раствора, прошедший через образец, собирался в канал дистанционной проставки и аккумулировался в стаканчике на весах. Взвешивание проходило в автоматическом режиме. Глинистые частицы формировали на торце образца корку, толщина которой измерялась с помощью толщиномера, вмонтированного во фланец циркуляционной камеры.

Эксперимент проводился с использованием глинисто-полимерного бурового раствора с минерализацией 3.9 г/л. Исследовались образцы керна низкопроницаемого коллектора Тевлинско-Русскинского месторождения. Процедура измерений включала:

1) насыщение образцов раствором NaCl с минерализацией 30 г/л, измерение веса, диаметра, длины и электрического сопротивления образцов до эксперимента;

2) определение проницаемости образца по воде, для чего через систему пропускался первоначальный (пластовый) минерализованный раствор с непрерывным измерением расхода фильтрующейся через образец жидкости с помощью весов с заданным интервалом между замерами;

3) измерение проницаемости системы “образец – глинистая корка” при циркуляции бурового раствора. Расход фильтрующейся жидкости пересчитывался в проницаемость образца согласно закону Дарси. Пересчет изменения проницаемости корки в изменение толщины корки проводился из предположения о ее однородности по пористости и проницаемости;

4) измерение толщины нарастающей глинистой корки во время эксперимента с помощью ультразвукового толщиномера “Восток В7-217” с частотой зондирующего импульса 5 МГц и точностью измерения 0.01 мм;

5) определение итоговой толщины корки, а также ее веса, который по плотности бурового раствора пересчитывался в пористость корки;

6) проведение эксперимента с повторным пропуском через образец со счищенной внешней коркой раствора NaCl для определения изменения проницаемости образца, а значит, наличия или отсутствия зоны кольтатации.

Запуск измерений, передача и визуализация экспериментальных данных осуществлялась с помощью аппаратно-программного комплекса, разработанного на основе пакета виртуального приборостроения Lab View.

В результате экспериментальных работ определены: проницаемость глинистой корки (и ее изменение во время эксперимента); толщина глинистой корки (и рассчитанное по изменению проницаемости и измеренное преобразование во время эксперимента); пористость глинистой корки; изменение проницаемости, веса и электрического сопротивления образца керна после фильтрации бурового раствора. Согласно закону Дарси, из количества фильтрующейся жидкости рассчитывается проницаемость системы “образец – корка”. Проницаемость глинистой корки рассчитывается из условия аддитивности фильтрационного сопротивления (сумма проницаемостей образца и корки равна общей проницаемости системы) [21, 22]. Пористость рассчитывается по измеренной после эксперимента плотности глинистой корки.

По изменению проницаемости корки во времени, а также итоговым значениям ее толщины и проницаемости рассчитывалось изменение толщины глинистой корки во времени в предположении об однородности (пористость и проницаемость корки одинаковы на любой толщине). Данная зависимость затем сравнивалась с экспериментальной.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 2 представлен один из результатов эксперимента — изменение проницаемости системы “образец – глинистая корка”. Наблюдается нелинейная зависимость, которая указывает на неоднородную структуру глинистой корки.

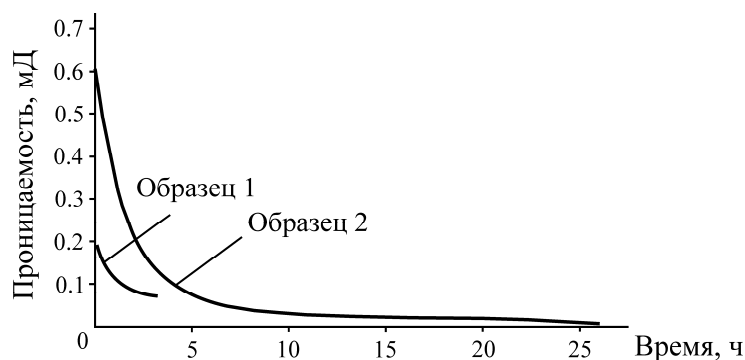


Рис. 2. Проницаемость системы “образец – глинистая корка” при разной длительности проведения эксперимента

В таблице приведены результаты экспериментов при разном давлении, расходе фильтрующей жидкости и времени проведения эксперимента. Для примера даны измерения на образцах 1, 2, 3 проницаемостью 2.4, 4.2 и 5.6 мД соответственно.

Результаты эксперимента при разных параметрах, моделирующих режим бурения

Номер образца	Расход, мл/с	Давление, атм	Время, ч	Толщина корки, мм	Проницаемость корки, мД	Пористость корки, %
1	40	2	3	0.4	0.020	78
1	10	2	3	1.1	0.004	67
2	40	2	3	1.0	0.080	65
2	10	2	3	2.3	0.010	54
3	40	2	3	1.2	0.020	73
3	10	2	3	1.7	0.010	66
1	40	4	3	1.8	0.020	84
2	40	4	3	1.2	0.190	79
1	10	2	48	4.5	0.070	71
2	10	2	48	4.9	0.020	78

В ходе эксперимента установлено:

- увеличение расхода приводит к большим значениям пористости и проницаемости глинистой корки;
- повышение давления увеличивает толщину глинистой корки и уменьшает пористость;
- с увеличением времени проведения эксперимента наблюдается замедление формирования корки; на рис. 2 отмечается второй перегиб кривой зависимости проницаемости корки от времени.

Одна из задач эксперимента — определить наличие зоны кольтматации, т. е установить, насколько изменится проницаемость образцов после фильтрации через них бурового раствора. Для этого повторно проведены замеры по описанной схеме. По результатам исследований,

проведенных на спектрометре ядерного магнитного резонанса МСТ-05, зона кольматации не обнаруживается. Точности оборудования недостаточно для решения данной задачи, однако можно предполагать образование зоны кольматации у образцов с относительно высокой проницаемостью. У образцов с изменившейся проницаемостью наблюдается трещиноватость с заполненными соединениями трехвалентного железа.

После завершения первой серии экспериментов повторно проводились измерения с пропуском раствора с минерализацией 30 г/л в обратном направлении для промывки. Затем определялась проницаемость образцов, осуществлялась повторная промывка. Далее фильтрация минерализованного раствора повторялась до приближения значений проницаемости образца к первоначальным. Результаты повторных измерений представлены на рис. 3.

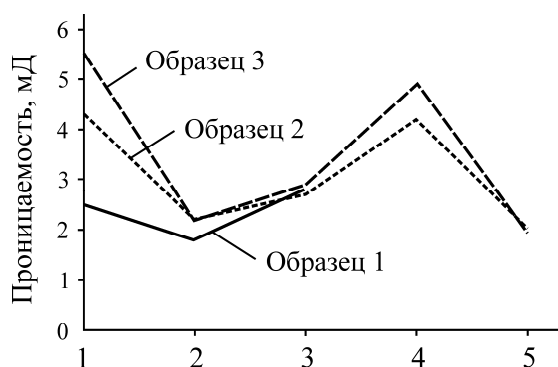


Рис. 3. Результаты повторных измерений проницаемости образцов. По оси абсцисс приведены этапы: 1 — до эксперимента; 2 — после пропускания бурового раствора; 3, 4 — промывание; 5 — после второго пропускания бурового раствора

На основании анализа полученных материалов представляется возможным учет параметров глинистой корки при интерпретации данных ГИС и бурения. Для этого необходимо:

- провести экспериментальные измерения параметров глинистой корки в условиях, наиболее приближенных к пластовым, на образцах керна с фильтрационно-емкостными параметрами, которые соответствуют исследуемому пласту, с применением бурового раствора, аналогичного используемому на данной скважине при бурении;
- по экспериментальным данным рассчитать пористость и проницаемость глинистой корки, а также эмпирические коэффициенты для зависимости толщины корки от времени;
- использовать полученные значения и экспериментальную зависимость толщины глинистой корки от времени при интерпретации данных ГИС.

ВЫВОДЫ

Экспериментально исследовано образование глинистой корки и рассмотрены ее свойства. Определены такие основные параметры, как пористость, проницаемость и толщина (итоговая и по измерениям толщиномера). Метод стационарной фильтрации позволил регистрировать измерения в режиме реального времени, поэтому реализована регистрация изменения толщины глинистой корки во время эксперимента.

Изучено влияние расхода и давления на образование глинистой корки. У образцов с относительно высокой первоначальной проницаемостью установлена зона кольматации, приводящая к уменьшению проницаемости и проявляющаяся при повторных экспериментах.

Данные результаты необходимы для интерпретации практических данных ГИС на основе многофизической модели пласта. Предложен алгоритм учета экспериментально определенных параметров глинистой корки, таких как ее пористость и проницаемость при интерпретации данных ГИС. Разработанная методика может применяться для испытаний разных образцов бурового раствора с целью проведения сценарных расчетов и выбора оптимальных композиций буровых жидкостей и технологий первичного вскрытия продуктивных интервалов. Результаты могут быть полезны при бурении скважин на месторождениях твердых полезных ископаемых с применением естественных и специальных буровых растворов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Назарова Л. А., Назаров Л. А., Эпов М. И., Ельцов И. Н. Эволюция геомеханических и электрогидродинамических полей в массиве горных пород при бурении скважин // ФТПРПИ. — 2013. — № 5. — С. 37–49.
2. Павлова Д. М., Сухорукова К. В., Нестерова Г. В., Ельцов И. Н. Геоэлектрические, гидродинамические и геомеханические характеристики юрского нефтяного коллектора по данным скважинной геоэлектрики и численного моделирования // Каротажник. — 2018. — № 4 (286). — С. 36–46.
3. Свидетельство о гос. регистрации программ для ЭВМ № 2012619496 РФ. ГЕНМ / Л. А. Назаров, Л. А. Назарова, Г. В. Нестерова, И. Н. Ельцов. Правообладатель ИНГиГ им. А. А. Трофимука СО РАН, № 2012619496 от 19.10.2012.
4. Tien C. Introduction to cake filtration, Elsevier Sci., 2006. — 292 p.
5. Tien C., Teoh K., and Tan R. B. H. Cake filtration analysis — the effect of the relationship between the pore liquid pressure and the cake compressive stress, Chem. Eng. Sci., 2001, No. 56. — P. 5361–5369.
6. Chin W. C. Formation Invasion with Applications to Measurement — While-Drilling, Time-Lapse Analysis, and Formation Damage, Houston, Gulf Publish. Company, 1995. — 240 p.
7. Dewan J. T. and Chenevert M. E. A model for filtration of water-base mud during drilling: determination of mud cake parameters, Petrophysics, 2001, Vol. 42, No. 3. — P. 237–250.
8. Salazar J., Torres-Verdín C., Alpak F. O., Habashy M., and Klein D. J. Estimation of permeability from borehole array induction measurements: Application of petrophysical appraisal of tight gas sands, Petrophysics, 2006, Vol. 47, No. 6. — P. 527–544.
9. Sherwood J. D. and Meeten G. H. The filtration of compressible mud filtercakes, J. Petroleum Sci. Eng., 1997, No. 18. — P. 73–81.
10. Зайцев М. В., Михайлов Н. Н. Влияние околоскважинной зоны на продуктивность скважины // Нефт. хоз-во. — 2004. — № 1. — С. 64–66.
11. Михайлов Н. Н. Изменение физических свойств горных пород в околоскважинной зоне. — М.: Недра, 1987. — 152 с.
12. Голубев В. И., Михайлов Д. Н. Моделирование динамики фильтрации двухчастичной суспензии через пористую среду // Тр. МФТИ. — 2011. — Т. 3. — № 2. — С. 143–147.
13. Collins R. E. Flow of fluids through porous materials, New York, Reinhold Publish. Corporation, 1961. — 350 p.
14. Xu S., Gao B., and Sayers J. E. Straining of colloidal particles in saturated porous media, Water Resources Res., 2006, Vol. 42. — W12S16.
15. Димов С. В., Кузнецов В. В., Рудяк В. Я., Тропин Н. М. Экспериментальное изучение фильтрации микросуспензии в высокопроницаемой пористой среде // МЖГ. — 2012. — № 2. — С. 47–56.

16. Башкатов А. Д. Прогрессивные технологии сооружения скважин. — М.: ООО “Недра-Бизнесцентр”, 2003. — 554 с.
17. Михайлов Д. Н., Рыжиков Н. И., Шако В. В. Экспериментальное исследование процесса переноса и накопления суспензии твердых частиц и взвеси глины в образцах горных пород // Механика жидкости и газа. — 2015. — № 5. — С. 107–122.
18. Евменова Д. М., Голиков Н. А., Юркевич Н. В., Ельцов И. Н. Экспериментальное исследование глинистой корки в условиях циркуляции бурового раствора // Каротажник. — 2021. — Т. 3. — № 309. — С. 100–108.
19. Jaffar A., Mohtar C. S., and Gray K. E. Modeling of filtration and mudcake buildup: An experimental investigation, J. Natural Gas Sci. Eng., 2017, No. 38. — P. 1–11.
20. Fattah K. A. and Lashin A. Investigation of mud density and weighting materials effect on drilling fluid filter cake properties and formation damage, J. African Earth Sci., 2016, No. 117. — P. 346–357.
21. Амикс Д., Басс Д., Уайтинг Р. Д. Физика нефтяного пласта. — М.: Гостоптехиздат, 1962. — 569 с.
22. Бжицких Т. Г., Санду С. Ф., Пулькина Н. Э. Определение физических и фильтрационно-емкостных свойств горных пород. — Томск: ТПУ, 2008. — 95 с.

Поступила в редакцию 23/III 2023

После доработки 25/VIII 2023

Принята к публикации 15/IX 2023