

Экспериментальное исследование формирования глинистой корки и ее характеристик на кернах юрского нефтяного коллектора

Д. М. Евменова^{1,2}, И. Н. Ельцов^{1,2,3}, Н. А. Голиков^{1,2}*

¹ Институт нефтегазовой геологии и геофизики м. А.А. Трофимука СО РАН, г. Новосибирск, Российская Федерация

² Новосибирский национальный исследовательский государственный университет, г. Новосибирск, Российская Федерация

³ Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск, Российская Федерация

* e-mail: PavlovaDM@ipgg.sbras.ru

Аннотация. Для сужения области эквивалентности и повышения достоверности определения параметров продуктивного пласта, таких как пористость, проницаемость и нефтенасыщенность в ИНГГ СО РАН разработана методика интерпретации данных ГИС на основе многофизической модели пласта. В число ее входных параметров входят проницаемость и пористость глинистой корки, которые значительно влияют на результат фильтрационного моделирования, но не определяются в ходе бурения. Для изучения процесса образования глинистой корки, исследования её свойств и определения основных параметров авторами статьи была проведена серия экспериментов на установке, собранной в ИНГГ СО РАН, на образцах керна низкопроницаемого песчаника, извлечённого из пласта ЮС₂. Полученные результаты были успешно использованы при интерпретации данных ГИС с Тевлинско-Русскинского и Русскинского месторождений.

Ключевые слова: геофизические исследования скважин, интерпретация каротажных данных, зона проникновения, фильтрационное моделирование, глинистая корка, ВИКИЗ, БКЗ

Experimental study of the formation of a mud cake and its characteristics on the example of the Jurassic oil reservoir

D. M. Evmenova^{1,2}, I. N. Yeltsov^{1,2,3}, N. A. Golikov^{1,2}*

¹ Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation

² Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russian Federation

³ Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russian Federation

* e-mail: PavlovaDM@ipgg.sbras.ru

Abstract. Using the geophysical and hydrodynamic compatibility model allows to reduce ambiguity of the solution of the inverse problem and to increase the reliability of productive layer parameters definition. It includes the parameters of permeability and porosity of the filter cake, which significantly affect the result of filtration modeling, but are not determined during the drilling. To investigate the process of formation of a mud cake, to study its properties and to determine the main parameters, the authors of the article carried out a series of experiments on a setup assembled at IPGG SBRAS, on core samples of low-permeability sandstone extracted from the YUS₂ collector. The results of experiment with core samples from the Tevlinsko-Russinskoe and Russinskoe oil fields.

Keywords: geophysical logging data, interpretation of logging data, penetration zone, filtration modeling, mud cake, high-frequency induction isoparametric wireline logging (VIKIZ), Russian lateral logging (RLL).

Введение

Для исследования особенностей образования глинистой корки, исследования её свойств и определения основных параметров авторами работы была проведена серия экспериментов на образцах керна. Использовалась оригинальная установка, собранная в ИНГГ СО РАН [3].

Основная особенность экспериментальной установки, отличающая её от известных аналогов [6, 8] – реализация в работе стационарной фильтрации, позволяющей регистрировать измерения в режиме реального времени. В ходе экспериментов в течение всей продолжительности роста глинистой корки было обеспечено постоянное движение бурового раствора, имитирующее его циркуляцию в скважине. Кроме того, была реализована возможность измерения толщины корки во время эксперимента. Эксперимент проведен на образцах керна песчаника, извлечённого из пласта ЮС₂, который характеризуется низкими значениями пористости и проницаемости.

Параметры глинистой корки необходимо использовать при интерпретации данных ГИС на основе многофизической модели пласта. Для интерпретации использован программный комплекс GENM [7], разработанный в ИНГГ СО РАН. Процесс интерпретации состоит из последовательных этапов: первый этап – геомеханическое моделирование, второй этап – гидродинамическое моделирование и этап сравнения полученных в результате инверсии данных ВИКИЗ и БКЗ и рассчитанных в программном комплексе GENM кривых радиального распределения УЭС.

Входными параметрами для проведения гидродинамического моделирования являются свойства продуктивного пласта и пластовых флюидов (воды и нефти), а также характеристики глинистой корки (ее пористость и проницаемость), бурового раствора и данные ГТИ (геологотехнологических исследований). Данные о параметрах глинистой корки не содержатся в журналах бурения, не измеряются в процессе бурения, а могут быть определены только экспериментально с использованием образцов керна и бурового раствора с месторождения (или детальных сведений о его составе). Поэтому для достоверного определения фильтрационно-емкостных свойств (ФЕС) коллектора необходимо определить параметры глинистой корки, задаваемые в гидродинамической модели, используемой для интерпретации на ее втором этапе.

Методика проведения экспериментальных работ

Перед экспериментом образец предварительно насыщался раствором NaCl с минерализацией 30г/л. Насыщенный образец взвешивался, измерялось его электрическое сопротивление.

До начала эксперимента с циркуляцией бурового раствора проводилось измерение проницаемости образца по воде. Для этого через образец пропускался солевой раствор с минерализацией 30 г/л без глинистой фракции. В процессе измерялся вес фильтрата, проходящего через образец, который по закону Дарси пересчитывался в проницаемость чистого образца без глинистой корки.

В процессе эксперимента он вытеснялся фильтратом бурового раствора, что приводило к увеличению электрического сопротивления фильтрующейся жидкости. Фильтрат бурового раствора собирался через капилляр в стакан, стоящий на весах. Взвешивание прошедшего через образец флюида и измерение электрического сопротивления фильтрующейся жидкости шло в непрерывном автоматическом режиме с задаваемым интервалом времени между замерами. Схема установки приведена в работах [3, 4].

Контрольно-измерительная часть установки представляет собой аппаратно-программный комплекс, разработанный на основе пакета виртуального приборостроения Lab View фирмы National Instruments (США). Разработанный виртуальный прибор позволяет регистрировать и визуализировать данные в процессе эксперимента. Измерительная часть построена с использованием микроконтроллера Arduino Nano со встроенным 8-канальным АЦП.

В результате эксперимента были получены следующие данные:

- Изменение веса фильтрующейся через образец жидкости.
- Изменение толщины глинистой корки.
- Итоговый вес глинистой корки.

Затем изменение веса фильтрующейся жидкости пересчитывается в проницаемость системы «образец+глинистая корка» по закону Дарси. Способ применим для случая, когда фильтрат собирается со всей поверхности образца в капилляр, через который фильтрующаяся жидкость попадает на весы. В данном случае делается естественное допущение о том, что содержание глинистой составляющей в образце пренебрежимо мало.

Плотность глинистой корки рассчитывается из её толщины, веса и диаметра образца. Здесь предполагается, что корка растёт только на поверхности образца и её толщина по радиусу одинаковая (со временем увеличивается равномерно). Если данное предположение не выполняется, но необходимо рассматривать зависимость пористости и проницаемости корки от её толщины.

Пористость глинистой корки рассчитывается из её плотности при известной средней плотности глинистых частиц в растворе. Для корректного расчёта определялся минеральный состав раствора и плотности составляющих его глинистых частиц.

Проницаемость глинистой корки рассчитывается из проницаемости системы «образец+корка» из условия аддитивности фильтрационного сопротивления (сумма проницаемостей образца и корки отдельно равна общей проницаемости системы) [1, 2].

Реальное изменение толщины глинистой корки сравнивается с рассчитанным с допущением, что корка однородна по толщине, проницаемости и пористости, а изменение её проницаемости во времени связано только с изменением толщины, по изменению проницаемости корки во времени, а также значениям толщины глинистой корки и её проницаемости в конце эксперимента.

Затем проводился эксперимент с повторным пропуском через образец со счищенной внешней коркой раствора NaCl с целью определения изменения проницаемости образца, а значит наличия или отсутствия зоны коагуляции.

По итогам работы были получены проницаемость глинистой корки и ее рассчитанное изменение во время эксперимента, итоговая толщина и ее изменение, итоговая пористость корки и проницаемость образца после эксперимента (за счет повторных измерений). Измерения проводились при различных значениях давления и расхода фильтрующейся жидкости. Время проведения варьировалось от 3-х часов до двух суток.

Результаты экспериментальных работ

В результате исследования были получены параметры глинистой корки, такие как пористость, проницаемость и толщина, а также установлено влияние расхода и давления на ее образование (табл. 1, 2). Увеличение расхода приводит к образованию более пористой и проницаемой глинистой корки. Повышение давления приводит к образованию менее пористой корки с большей толщиной.

Для измерения роста глинистой корки использован ультразвуковой толщиномер Восток В7-217 с частотой зондирующего импульса 5 МГц и точностью измерения 0,01 мм. Эксперимент с его использованием был проведен на образце с более высокой проницаемостью (по воде 28.17 мД). Полученная проницаемость корки – 0.1 мД, толщина корки 3.2 мм, пористость корки – 30%.

Таблица 1

Результаты эксперимента при двух различных значениях расхода, давление 2 атмосферы

| Номер образца | Толщина корки расход 40 м ³ /с, мм | Проницаемость корки расход 40 м ³ /с, мД | Пористость корки расход 40 м ³ /с, % | Толщина корки расход 10 м ³ /с, мм | Проницаемость корки расход 10 м ³ /с, мД | Пористость корки расход 10 м ³ /с, % |
|---------------|---|---|---|---|---|---|
| 6102-3 | 0.4±0.05 | 0.02±0.003 | 92±4 | 1.1±0.05 | 0.004±0.003 | 67±4 |
| 6101-8 | 1±0.05 | 0.08±0.003 | 95±4 | 2.3±0.05 | 0.01±0.003 | 54±4 |
| 6118-4 | 1.2±0.05 | 0.02±0.003 | 73±4 | 1.7±0.05 | 0.01±0.003 | 66±4 |

Таблица 2

Результаты эксперимента при давлении 4 атмосферы, расход - 40 м³/с

| Номер образца | Толщина корки, мм | Проницаемость корки, мД | Пористость корки, % |
|-------------------|-------------------|-------------------------|---------------------|
| 6102-3 (скв 114) | 1.8±0.05 | 0.02±0.003 | 84±4 |
| 6101-8 (скв. 114) | 1.2±0.05 | 0.19±0.003 | 79±4 |

По мере увеличения времени наблюдается не только замедление роста глинистой корки, но и второй перегиб кривой зависимости проницаемости корки от времени (рис. 1).

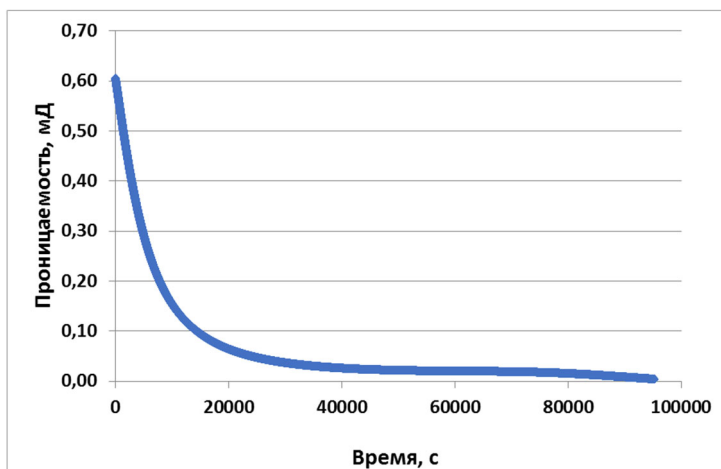


Рис. 1. Изменение проницаемости глинистой корки в ходе эксперимента при его длительности двое суток, образец № 6101-8

Изменение толщины глинистой корки показано на рис. 2. Наблюдается расхождение расчетных в предположении однородности глинистой корки по проницаемости и толщине данных с измеренными. Таким образом, показано, что в дальнейших исследованиях необходимо учитывать неоднородное по проницаемости и пористости строение глинистой корки. В данном эксперименте впервые показан реальный рост глинистой корки в процессе фильтрации бурового раствора через образец. Разница итоговых значений толщины глинистой корки устраняется калибровкой прибора.

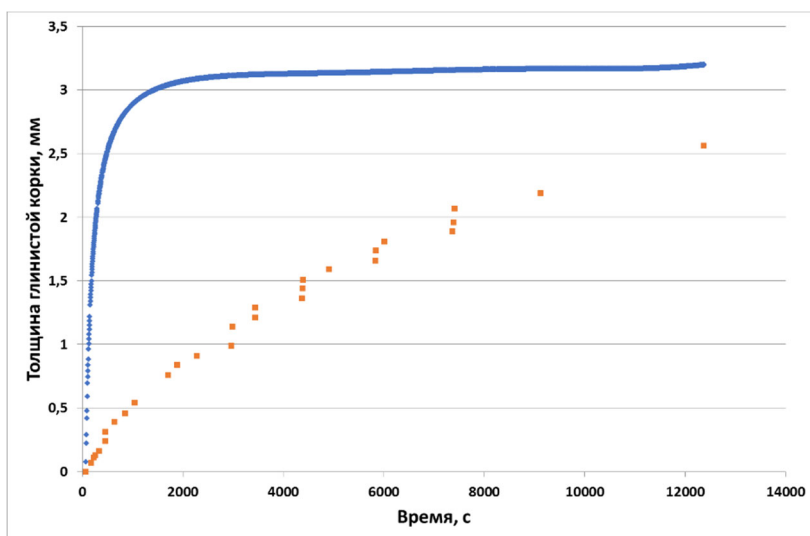


Рис. 2. Изменение толщины глинистой корки во время эксперимента. Синий – расчетное по итоговой толщине глинистой корки, оранжевый – замеры толщиномера

Результаты экспериментальных работ были использованы для интерпретации практических данных ГИС на основе многофизической модели пласта по методике, описанной в работах [5, 7], как показано в табл. 3.

Использованные параметры корки: проницаемость - $2 \cdot 10^{-3}$ мД, пористость – 60%. Изначально при интерпретации данных ГИС на основе многофизической модели пласта использовались другие параметры - $1 \cdot 10^{-3}$ мД, пористость – 20%.

Также разработанную методику можно применять и для испытаний на новых образцах бурового раствора с целью определения того, как будет проходить кольматация, какая корка будет образовываться.

Таблица 3

Фильтрационно-емкостные свойства коллектора ЮС₂

| Параметр пласта | Скважина 134 без учета полученных параметров | Скважина 134 с учетом полученных параметров | Скв. 133 без учета | Скв. 133 с учетом | Русскинское мест., скв 1 без учета | Русскинское мест., скв 1 с учетом |
|----------------------|--|---|--------------------|-------------------|------------------------------------|-----------------------------------|
| Пористость, % | 17 ± 1 | 18 ± 1 | 19 ± 1 | 20 ± 1 | 17 ± 1 | 19 ± 1 |
| Нефтенасыщенность, % | 75 ± 2 | 78 ± 2 | 75 ± 2 | 78 ± 2 | 90 ± 1 | 95 ± 1 |

Учитывать параметры глинистой корки при интерпретации данных ГИС на основе многофизической модели пласта необходимо следующим образом:

1. Провести эксперимент в условиях, приближенных к пластовым, на образцах керна с ФЕС, соответствующими пласту, с использованием бурового раствора, соответствующего используемому на месторождении.
2. Рассчитать параметры глинистой корки по изложенной выше методике.
3. Использовать полученные параметры при интерпретации данных ГИС на основе многофизической модели пласта.

Заключение

Проведены экспериментальные исследования для изучения особенностей образования глинистой корки в условиях, близких к пластовым. Измерения проводились при двух значениях расхода фильтрующейся жидкости и давления. В экспериментах обеспечивалась циркуляция бурового раствора, то есть обеспечивалось постоянное движение раствора в процессе роста глинистой корки. Реализован метод стационарной фильтрации, позволяющий регистрировать измерения в режиме реального времени, впервые реализована регистрация изменения толщины глинистой корки во время эксперимента, что позволило доказать ее неоднородность. Изучены свойства глинистой корки и определены её основные параметры.

В экспериментах использованы шесть образцов керна низкопроницаемого песчаника, извлечённого из пласта ЮС₂. Определены итоговые пористости и про-

нищаемости глинистой корки, а также их изменения в ходе эксперимента. Изучена зависимость давления и расхода фильтрующейся жидкости от времени эксперимента. Проведены повторные измерения, позволившие выявить наличие зоны кольматации

Полученные параметры глинистой корки были учтены при интерпретации данных ГИС на основе многофизической модели пласта. Без учета параметров глинистой корки, определенных экспериментально, получались заниженные на 3-5% значения нефтенасыщенности и заниженные на 1-2% значения пористости.

Перед проведением интерпретации данных ГИС на основе многофизической модели пласта рекомендуется провести экспериментальные работы по определению параметров глинистой корки и учитывать их при оценке фильтрационно-емкостных параметров для повышения достоверности их определения, задавая в качестве входных параметров при гидродинамическом моделировании.

Благодарности

Авторы работы выражают благодарность ИНГГ СО РАН за поддержку проведенных исследований в рамках проекта FWZZ-2022-0025.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Амикс Д., Басс Д., Уайтинг Р. Д. Физика нефтяного пласта. – М.: Гостоптехиздат, 1962 – 569 с.
2. Бжицких Т.Г., Санду С.Ф., Пулькина Н.Э. Определение физических и фильтрационно-емкостных свойств горных пород. – Томск: Издательство Томского политехнического университета, 2008 – 95 с.
3. Евменова Д.М., Голиков Н.А., Ельцов И.Н. Разработка установки для моделирования процесса образования глинистой корки в условиях циркуляции бурового раствора // Интерэкспо ГЕО-Сибирь - "Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Экономика. Геоэкология": Материалы XVI международной научной конференции (г. Новосибирск, 20-24 апреля 2020 г.) – ИНГГ СО РАН – Новосибирск. – 2020. – С.393-400.
4. Евменова Д.М., Голиков Н.А., Юркевич Н.В., Ельцов И.Н. Экспериментальное исследование глинистой корки в условиях циркуляции бурового раствора // Каротажник – том 3. – № 309. – 2021. – С.100-108.
5. Ельцов И.Н., Нестерова Г.В., Кашеваров А.А. Моделирование зоны проникновения при использовании буровых растворов на водной и нефтяной основе // ПМТФ. – 2012. – Т. 53. – № 4. – С.97-104.
6. 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. – №5. – 2015. – С.107-122.
7. 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 – № 4 (286) – 2018 – С.36-46.
8. Fattah K.A., Lashin A. Investigation of mud density and weighting materials effect on drilling fluid filter cake properties and formation damage // Journal of African Earth sciences. – №117 – 2016 – P.346-357.

© Д. М. Евменова, И. Н. Ельцов, Н. А. Голиков, 2022