

ЛАБОРАТОРНОЕ ИЗУЧЕНИЕ ФИЛЬТРАЦИОННЫХ СВОЙСТВ НИЗКОПРОНИЦАЕМЫХ ПОРИСТЫХ СРЕД

***Н.А. Барышников, С.В. Елисеев, Е.В. Зенченко,
Ю.В. Лагутин, С.Б. Турунтаев***

В настоящее время одно из главных направлений развития нефтедобычи в России связано с освоением запасов баженовской свиты. Её разработка осложнена из-за крайне низких фильтрационно-емкостных свойств: проницаемостями порядка 0,001 миллидарси и пористостями порядка 3–5%. Важной особенностью подобных коллекторов, требующей детального изучения, является существование режимов фильтрации, не подчиняющихся закону Дарси. Результаты лабораторных экспериментов показывают, что при низких градиентах давления могут наблюдаться нелинейное снижение скорости фильтрации флюида. Подобные эффекты необходимо учитывать при оценке объёмов извлекаемых запасов углеводородов, а также в процессе эксплуатации месторождений, в частности, при построении гидродинамической модели месторождения и при планировании проведения гидроразрыва пласта. Несмотря на актуальность, эффекты, связанные с нелинейностью фильтрации, недостаточно изучены, прежде всего, из-за сложностей, возникающих при проведении лабораторного моделирования. В представленной работе описана новая экспериментальная установка, созданная в ИДГ РАН, позволяющая исследовать фильтрационные свойства ультранизкопроницаемых образцов керна.

Введение

В настоящее время накоплено достаточно фактов, полученных гидрогеологами, показывающих отклонение от линейного закона Дарси в области низких скоростей потока при фильтрации воды [King, 1898; Арье, 1984; Ребиндер и др., 1940; Коробков, Антипин, 1968; Брилинг, 1984]. В работе [Xiong Wei et al., 2009] показано, что фильтрация при определенном градиенте давления не подчиняется линейному закону. Лабораторному исследованию фильтрации в малопроницаемых образцах керна Приобского месторождения посвящены работы [Байков и

др., 2012; 2013]. В них также делается вывод, что зависимость скорости от градиента давления может не удовлетворять закону Дарси. Возникновению эффекта начального градиента давления при фильтрации флюидов через низкопроницаемые пористые коллекторы посвящены работы [Басниев, Дмитриев, 1986; Насберг, Эльбакидзе, 1957; Taha Sochi, 2010; Mu Xueyi, Liu Yongxizng, 2001; Lu Chengyuan et al., 2002; Bear, 1972; Kutilek, 1972]. При этом рассматриваются три варианта проявления подобного эффекта: при фильтрации воды через глинистые породы [Насберг, Эльбакидзе, 1957], фильтрации неньютоновских жидкостей [Taha Sochi, 2010] и фильтрации газа через низкопроницаемые породы с начальной насыщенностью жидкой фазой [Mu Xueyi, Liu Yongxizng, 2001; Lu Chengyuan et al., 2002]. При фильтрации воды через глинистые породы отклонение закона фильтрации от линейного, как правило, обосновывается сильным взаимодействием молекул воды со скелетом. Наличие предельного градиента давления в законе Дарси некоторыми исследователями связывается с появлением мембранного потенциала при движении жидкости в мелкозернистых глинистых породах, что может приводить к слабому противотоку жидкости вдоль стенок поровых каналов [Bear, 1972; Kutilek, 1972]. Обсуждению различных причин проявления нелинейностей в законе Дарси посвящен обзор [Neuzil, 1986]. Различные математические модели фильтрации флюида предложены в работах [Hansbo, 2001; Swartzendruber, 1961; Liu, 2012; Zou, 1996]. В перечисленных работах, как правило, исследуются фильтрационные процессы в образцах с проницаемостями выше 0,1 миллидарси. Экспериментальных работ, исследующих фильтрацию в образцах природного керна с проницаемостями порядка 0,001, до сих пор проведено очень мало. Работа [Akkutlu, Fathi, 2012] посвящена опытам по изучению фильтрационных свойств низкопроницаемых образцов сланца (Bakken, Pierre shale). Фильтрация производилась через цилиндрические образцы породы при различных поддерживаемых объемных расходах жидкости (неочищенная нефть, минеральное масло, соляной раствор). В результате опытов показано, что проницаемость исследованных образцов варьируется в пределах 10^{-5} – 10^{-3} миллидарси в зависимости от используемой жидкости, размера образца и скорости фильтрации. Изучению зависимости проницаемости сланцевой породы от сжимающего напряжения посвящены работы [Heller, 2013; Kwon et al., 2004]. В работе [Kwon et al., 2004] показано, что проницаемость трещиноватой сланцевой породы может быть описана при помощи "bed-of-nails" модели, впервые предложенной Gangi [Gangi, 1978]. В работе Wasaki & Akkutlu [Wasaki, Akkutlu, 2015] представлена обобщённая модель зависимости проницаемости от сжимающего напряжения, учитывающая явления адсорбции/десорбции и диффузии газа.

Лабораторный стенд для изучения фильтрации жидкости в малопроницаемых образцах керна

В перечисленных выше работах, как правило, исследуются фильтрационные процессы в образцах с проницаемостями выше 0,1 миллидарси. Породы баженновской свиты отличаются гидрофобностью и крайне низкими фильтрационно-емкостными свойствами. Скорость фильтрации жидкости с вязкостью 1 сПз в образце с проницаемостью порядка 0,001 миллидарси при градиенте давления 100 атм/см составляет порядка 10^{-5} сантиметров в секунду. Для изучения столь

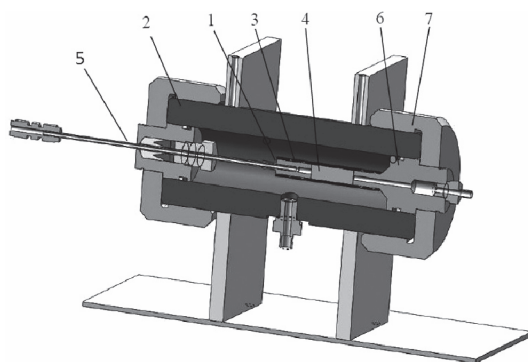


Рис. 1. Схема кернодержателя.

1 – подвижный поршень, 2 – корпус кернодержателя, 3 – манжета, 4 – исследуемый керн, 5 – трубка, 6 – неподвижный поршень, 7 – гайка

низких скоростей фильтрации лабораторный стенд должен позволять проводить непрерывные измерения расхода жидкости в течение продолжительного времени. В ходе опыта необходимо с достаточной точностью поддерживать фиксированную величину перепада давления, прикладываемого к образцу. Кроме того, необходимо обеспечить постоянство условий проведения опыта, в особенности температурного режима.

На точность достоверности результатов опытов по изучению нелинейности закона фильтрации жидкости может повлиять наличие газа в поровом пространстве исследуемого керна. Необходимо проводить вакуумирование исследуемого образца перед его насыщением, после чего исключить его контакт с атмосферой и выделить газ в поровом пространстве в процессе проведения опыта.

Для исследования фильтрации в образцах природного керна с проницаемостями порядка 0,001 миллидарси был создан лабораторный стенд. В качестве основы для стенда был использован кернодержатель КНА-10 (рис. 1). Технические характеристики кернодержателя, заявленные производителем:

Размеры образца: диаметр – $30 \pm 0,5$, длина – 30 ± 5 мм; горное и поровое давление соответственно – 650 и 140 атм; максимальная температура нагрева – 95 °С.

На рис. 2 представлена общая схема лабораторного стенда. Исследуемый образец в резиновой манжете помещается в кернодержатель, в корпусе которого при помощи масляного насоса создаётся необходимое давление обжима (горное давление). Его максимальная величина не должна превышать 650 атм, при этом давление обжима не может быть меньше перепада давления, используемого для прокачки жидкости через образец. Давление обжима измеряется при помощи манометра МЗ.

Для создания и поддержания постоянной величины давления накачки на входе кернодержателя используется пневмогидроцилиндр (ПГЦ) объёмом 130 см³. ПГЦ представляет из себя цилиндрическую ёмкость, разделённую на две части подвижным поршнем. В верхней части ПГЦ находится закачиваемая жидкость, в нижнюю часть нагнетается газ (азот), давление которого определяет давление накачки жидкости. Максимальное возможное давление накачки составляет 150 атм. Для поддержания давления накачки на необходимом уровне используется

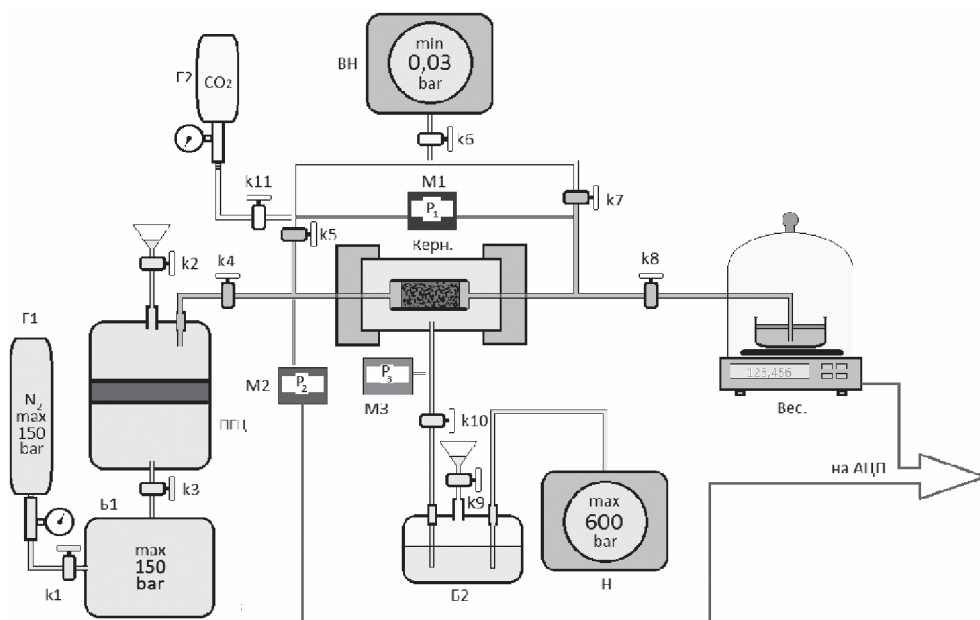


Рис. 2. Схема установки.

Керн. – кернодержатель с образцом; Вес. – весы с кюветой для собранной жидкости; ПГЦ – пневмогидроцилиндр; Н – насос высокого давления; ВН – вакуумный насос; Г1-2 – газовый баллон; Б1-2 – буферные ёмкости; М1-3 – манометры (датчики давления); k1-10 – кран

буферная ёмкость, объём которой (1000 см^3) много больше характерного объёма жидкости, прокачиваемого через образец керна в ходе каждого опыта (порядка $2-3 \text{ см}^3$). Давление накачки жидкости непрерывно регистрируется пьезодатчиком (М2) с точностью 0,5%. На практике, в пределах от 2 до 10 атм абсолютная погрешность измерения давления не превышает 0,05 атм. Подобная схема накачки позволяет поддерживать необходимое давление накачки в течение неограниченного времени.

Существующие в настоящее время серийные потоковые расходомеры не позволяют с достаточной точностью измерять объёмные расходы жидкостей менее $10^{-5} \text{ см}^3/\text{с}$. В созданном лабораторном стенде дебит фильтрующейся жидкости измеряется путём непрерывного взвешивания ёмкости с жидкостью, собранной на выходе из кернодержателя. Для этого применяются электронные лабораторные весы АН-4200СЕ, точность взвешивания – 0,01 грамм. Для защиты от пыли и колебания воздуха весы с кюветой для закачиваемой жидкости помещены под пластиковый колпак. В кювету с жидкостью добавляется небольшое количество минерального масла, которое формирует тонкую плёнку на поверхности жидкости, предотвращающую её испарение. Показания весов непрерывно регистрируется при помощи компьютера. Для регистрации показаний весов и измерения дебита жидкости разработано специальное программное обеспечение. Оно позволяет в реальном времени регистрировать и отображать на экране компьютера показания массы собранной жидкости, текущий объёмный расход, а также скорость изменения показания весов. Последняя величина позволяет наблюдать за уста-

новлением фильтрационных потоков с объёмным расходом менее 10^{-3} см³/с. При помощи данного способа измерения может быть зарегистрирован сколь угодно малый расход. При этом точность измерения расхода жидкости определяется временем в течение которого производится измерение.

Методика подготовки образцов и измерения фильтрации вязкой жидкости в образцах керна

Подготовленный и измеренный образец керна в резиновой манжете помещается в кернадержатель, после чего в корпусе кернадержателя создаётся минимальное давление обжима (для нашего лабораторного стенда 20 атм). Далее на входе кернадержателя создаётся минимальное давление (для нашего лабораторного стенда 2 атм), рабочая жидкость начинает поступать в образец керна, после чего проводится прокачка жидкости в количестве 2–3 суммарного объёма порового пространства образца. Необходимо дождаться появления жидкости на выходе из образца, после чего оставить образец под давлением для донасыщения на 48 часов.

В ходе измерения проницаемости образца производится прокачка жидкости при фиксированных величинах давлений накачки и обжима. Объёмный расход жидкости вычисляется исходя из изменения массы жидкости на весах за время проведения измерения. В ходе одного измерения через образец керна при точности используемых весов 0,001 грамма должно быть прокачено не менее 0,1 грамма жидкости. Время одного измерения не должно быть меньше 100 секунд. Между измерениями при различных давлениях накачки для установления потока рекомендуется прокачать через образец количество жидкости, соответствующее одному суммарному объёму порового пространства образца. Для образцов керна баженовской свиты этот объём примерно равен 1 см³. В нашем лабораторном стенде предусмотрена возможность наблюдения за скоростью изменения показаний весов. Постоянство этой скорости даёт возможность судить об установлении потока, и позволяет уменьшить время прокачки жидкости между измерениями.

По измеренному массовому расходу жидкости, исходя из закона Дарси, вычисляется его проницаемость. При этом необходимо учитывать температурную поправку к величине вязкости рабочей жидкости.

Фильтрационные и упругие свойства образца породы баженовской свиты

В ходе отработки методики была проведена серия опытов по измерению расхода вязкой жидкости в образце керна баженовской свиты в процессе установления фильтрационного течения. В качестве жидкости использовался керосин ТС-1 с вязкостью $\mu = 9,1 \cdot 10^{-3}$ г/см·с и плотностью $\rho = 0,78$ г/см³. В ходе каждого опыта в образце керна устанавливалось определённое поровое давление выше атмосферного. В начальный момент времени давление на выходе образца мгновенно сбрасывалось до атмосферного. При этом производилось измерение расхода фильтрующейся жидкости. На рис. 3 представлен график изменения расхода со временем в ходе установления фильтрационного течения для одного из опытов. Давление обжатия керна составляло 112 атмосфер, перепад порового давления 60 атмосфер.

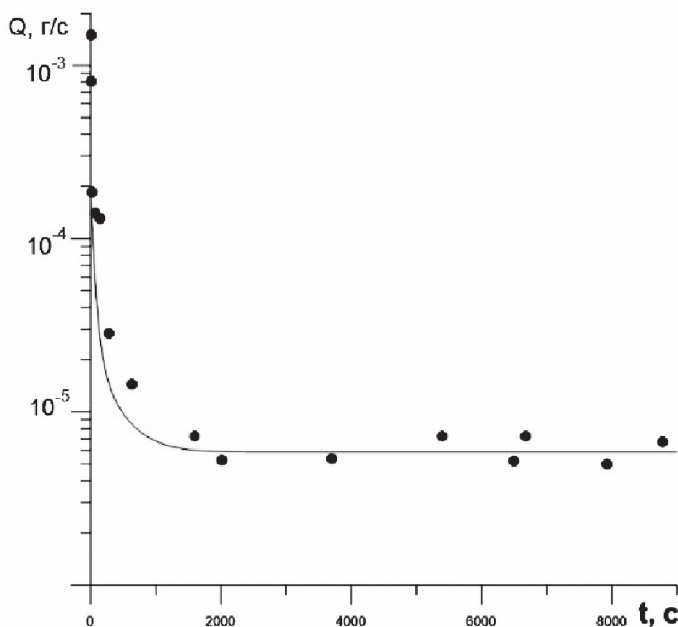


Рис. 3. Изменение расхода жидкости со временем при установлении фильтрационно-го потока в образце керна баженовской свиты.
Экспериментальные точки приближены зависимостью вида (1)

Изменение расхода со временем в образце может быть получено при помощи уравнения пьезопроводности

$$\frac{\partial p}{\partial t} = \chi \frac{\partial^2 p}{\partial x^2}$$

при начальных и граничных условиях

$$\begin{cases} p(x, 0) = p_H, t = 0 \\ p(0, t) = p_H, t > 0 \\ p(L, t) = p_A, t \geq 0 \end{cases}$$

где p_H – начальное поровое давление, p_A – атмосферное давление на выходе из керна, L – длина образца керна. Решая это уравнение методом разделения переменных можно получить закон изменения порового давления в каждой точке образца со временем

$$p(x, t) = p_H + (p_A - p_H) \left[\frac{x}{L} + 2 \sum_{i=1}^{\infty} \frac{1}{\lambda_i} \sin(\lambda_i \frac{x}{L}) \exp(-\lambda_i^2 \frac{\chi t}{L^2}) \right],$$

где $\lambda_i = \pi i$, $i = 1, 2, 3 \dots$

Пользуясь законом Дарси можно записать выражение изменения со временем для массового расхода жидкости $Q(t)$ на выходе из керна

$$Q(t) = -\rho \cdot \omega \frac{k}{\mu} \frac{\partial p}{\partial x} \Big|_{x=L} = \rho \cdot \omega \frac{k}{\mu} \frac{p_H - p_A}{L} \left(1 + 2 \sum_{i=1}^{\infty} \exp\left(-\frac{\pi^2 i^2 \chi}{L^2} t\right) \right) \quad (1)$$

где ω – площадь сечения керн, k – его проницаемость.

Характерная величина коэффициента пьезопроводности для низкопроницаемых пород баженовской свиты составляет порядка $\chi = 10^{-4}$ см²/с. Следовательно, на временах порядка десятка секунд, за которые регистрируется изменение расхода жидкости в наших опытах, для описания изменения расхода можно ограничиться первыми тремя членами ряда (1). На рис. 3 эта зависимость показана сплошной линией.

В результате сопоставления экспериментальной кривой изменения расхода жидкости с зависимостью, полученной при решении уравнения пьезопроводности для данного образца породы баженовской свиты, получены величины проницаемости $k = 0,5 \cdot 10^{-4}$ миллидарси, коэффициента пьезопроводности $\chi = 2,65 \cdot 10^{-3}$ см²/сек. Пользуясь данными величинами можно получить значение для коэффициента упругости скелета пористого вещества керн

$$\beta_c = \frac{k}{\chi \mu} - m \beta_{жс} \approx 2,2 \cdot 10^{-4} \text{ МПа}^{-1}.$$

При вычислениях использованы значения пористости $m = 0,05$ и сжимаемость керосина $\beta_{жс} = 6,87 \cdot 10^{-4}$ МПа⁻¹. Величина проницаемости и сжимаемости скелета пористого образца, измеренные в ходе опытов близки к величинам, полученным другими исследователями [Чирков, Сонич, 2010].

Выводы

Создан стенд для изучения фильтрационных свойств низкопроницаемых пористых сред. Показана возможность применения разработанной экспериментальной методики для проведения исследований на образцах керн с проницаемостями порядка 10^{-5} миллидарси. В ходе дальнейшей работы методика может быть использована для получения новых данных о характерных особенностях нелинейной фильтрации жидкости в низкопроницаемой пористой среде.

Литература

- Akkutlu, I.Y., & Fathi, E. (2012, December 1). Multiscale Gas Transport in Shales With Local Kerogen Heterogeneities. Society of Petroleum Engineers. Doi:10.2118/146422-PA.
- Арбе А.Г. Физические основы фильтрации подземных вод. М.: Недра, 1984. 101 с.
- Байков В.А., Галеев Р.Р., Колонских А.В. и др. Нелинейная фильтрация в низкопроницаемых коллекторах. Влияние на технологические показатели разработки месторождений // Вестник ОАО «НК «Роснефть». 2013. Вып. 2. С. 17–19.
- Байков В.А., Галеев Р.Р., Колонских А.В. и др. Нелинейная фильтрация в низкопроницаемых коллекторах. Анализ и интерпретация результатов лабораторных исследований керн Приобского месторождения // Вестник ОАО «НК «Роснефть». 2013. Вып. 2. С. 8–12.
- Басниев К.С., Дмитриев Н.М. О построении определяющих уравнений теории фильтрации для течений с начальным градиентом // Задачи рациональной разработки нефтяных месторождений и вопросы теории фильтрации. Ч. I: сб. тр. Казань, 1986. С. 35–38.

- Брилинг И.А.* Фильтрация в глинистых породах (1972). М.: Недра, 1984. 57 с.
- Коробов К.Я., Антипин Ю.В.* О нарушении линейного закона фильтрации при низких градиентах давления // Нефтяное хозяйство. 1968. № 8. С. 26–28.
- Насберг Б.М., Эльбакидзе М.Г.* О начальном градиенте при фильтрации воды // Гидротехнологическое строительство. 1957. № 6. С. 62–65.
- Чирков В.Л., Сонич В.П.* Степень геологической изученности баженовской свиты на территории деятельности ОАО «Сургутнефтегаз», 2010.
http://www.petroleumengineers.ru/sites/default/files/bazhenovskaya_svita_v_surgutneftegaz.pdf.
- Bear J.* Dynamics of Fluids in Porous Media. New York: Elsevier. 764 p.
- Gangi A.F.* Variation of whole and fractured porous rock permeability with confining pressure // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts. 1978. V. 15 (5). P. 249–257.
- Hansbo S.* Consolidation equation valid for both Darcian and non-Darcian flow // Geotechnique. 2001. T. 51. № 1. P. 51–54.
- Heller R., Zoback M.* Laboratory Measurements of Matrix Permeability and Slippage Enhanced Permeability in Gas Shales. Society of Petroleum Engineers. (2013, August 12). Doi:10.1190/URTEC2013-144.
- King F.H.* Principles and conditions of the movement of groundwater // U.S. Geological Survey. 19-th Annual Report. 2. 1898. P. 59–297.
- Kutilek M.* Non-Darcian flow of water in soils – Laminar region, a review, in Fundamentals of Transport Phenomena in Porous Media / Ed. by Int. Assoc. for Hydraulic Res. New York: Elsevier, 1972. P. 327–340.
- Kwon O., Kronenberg A.K., Gangi A.F., Johnson B., Herbert B.E.* Permeability of illite-bearing shale: 1. Anisotropy and effects of clay content and loading // J. Geophys. Res. 2004. V. 109. B10205, doi:10.1029/2004JB003052.
- Liu H.H., Birkholzer J.* On the relationship between water flux and hydraulic gradient for unsaturated and saturated clay // J. Hydrology. 2012. T. 475. P. 242–247.
- Lu Chengyuan, Wang Jian, Sun Zhigang.* An experimental study on starting pressure gradient of fluids flow in low permeability sandstone porous media // Petroleum Exploration and Development. 2002. Vol. 29. № 2. P. 86–89.
- Mu Xueyi, Liu Yongxizng.* Study of starting pressure gradient in low-permeability oilfield // Petroleum Geology and Recovery Efficiency. 2001. Vol. 8. № 5. P. 58–59.