

ИЗМЕНЕНИЕ ФИЛЬТРАЦИОННЫХ СВОЙСТВ МАЛОПРОНИЦАЕМЫХ ПОРИСТЫХ СРЕД ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ ВНЕШНЕЙ НАГРУЗКИ

Я.Д. Архипов, Н.А. Барышников, Е.В. Зенченко, С.Б. Турунтаев

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт динамики геосфер Российской академии наук

В процессе добычи углеводородов в прискважинном пространстве пласта возникают различного рода напряжения и деформации, которые оказывают значительное влияние на его фильтрационные свойства. Цель исследования состояла в изучении зависимости фильтрационных свойств низкопроницаемой пористой породы от приложенного внешнего давления. Была проведена серия опытов по измерению проницаемости модельных образцов керна при различных давлениях обжатия, результаты эксперимента сопоставлены с существующими моделями стресс-зависимой проницаемости. Показано что на основании сопоставления модели с данными опыта можно судить о структуре порового пространства и характере проницаемости.

Введение

Сланцевая революция в США спровоцировала всплеск интереса к нетрадиционным запасам углеводородов во всем мире, в том числе и в России. Особый интерес с этой точки зрения представляют отложения баженовской свиты, содержащие по оценкам Агентства энергетической информации (EIA) около 10 млрд тонн технически извлекаемой традиционной и нетрадиционной нефти, что ставит Россию на первое место в мире по этому показателю. Вместе с тем высокий ресурсный потенциал осложнен техническими проблемами, связанными, главным образом, с низкой проницаемостью коллекторов. Важным свойством плотных пород и нефтеносных сланцев, к которым относятся породы баженовской свиты, является высокая зави-

симость их проницаемости от горного давления [Dobrynin, 1962; Gangi, 1978; Lei et al., 2007]. Циклы нагрузки-разгрузки также влияют на свойства подобных пород и их чувствительность к приложенному внешнему давлению [Zhu, 2013].

Сама по себе проблема зависимости проницаемости пористых сред от внешнего давления не нова и рассматривалась, начиная с 50-х годов прошлого века. Исследования Уилсона [Wilson, 1956] относительной и абсолютной проницаемости песчаников при разном поровом и горном давлении показали, что для воды эффективная проницаемость уменьшается с ростом внешнего давления. Исследования [Ali et al., 1987] влияния внешнего гидростатического давления на проницаемость образцов Верийских песчаников показали схожие результаты. Было обнаружено падение проницаемости для жидких углеводородов с ростом эффективного давления.

Модели, описывающие стресс-зависимую проницаемость, можно разделить на две группы: 1) модели, основанные на физическом представлении о фильтрации через определенный тип пористой структуры с соответствующими допущениями [Dobrynin, 1962; Gangi, 1978; Jennings et al., 1981], и 2) эмпирические модели, базирующиеся в первую очередь на виде экспериментальных кривых для некоторых конкретных типов породы (например, [Jones, 1975; Jones, Owens, 1980]). Ниже приводится краткое описание моделей, рассмотренных в настоящем исследовании.

Модель Добрынина. Одной из первых попыток теоретического описания зависимости проницаемости от эффективного внешнего давления является работа Добрынина [Dobrynin, 1962]. Данная работа базируется на экспериментальных данных исследования образцов гомогенных кварцевых песчаников, при этом учитывается эмпирическая зависимость сжимаемости порового пространства от эффективного внешнего давления P :

$$C_p = \frac{1}{dP} \frac{dV_p}{V_p} = -\frac{C_p^{\max}}{\log \frac{P_{\max}}{P_{\min}}} \log \frac{P_{\max}}{P} \quad (1)$$

где V_p – поровый объем, C_p^{\max} – максимальная величина, получаемая экстраполяцией графика сжимаемости до $P = 0$, P_{\max} и P_{\min} – верхняя и нижняя граница интервала давлений, при которых сжимаемость наиболее заметно меняется в зависимости от давления. Поровое пространство породы представляется в виде множества каналов разного радиуса. После ряда преобразований автор приходит к выражению для относительного изменения проницаемости в виде:

$$\frac{\Delta k}{k} = 2(1 + \gamma) \int_0^P C_p dP \propto a_1 + a_2 P + a_3 P \lg P, \quad (2)$$

где γ – коэффициент, определяемый распределением размеров пор.

Модель Ганги. Одна из наиболее применимых моделей стресс-зависимой проницаемости предложена Энтони Ганги [Gangi, 1978]. Она включает в себя две основных модели: деформируемых сфер для описания изменения проницаемости однородных пород и модель «Bed of nails» для трещиноватых пород.

Если представить пористую породу как структуру, составленную сферическими частицами одинакового размера, то проницаемость такой структуры будет пропорциональна отношению радиусов пор r_p и сфер R как $k \propto \frac{r_p^4}{R^2}$.

Согласно теории Герца при деформации (сжатии) сфер их линейные размеры меняются как

$$\frac{\alpha}{2R} = (P / P_0)^{2/3}, \quad P_0 = 4E / 3\pi(1 - \nu^2),$$

где α – изменение расстояния между центрами сфер, P – внешнее давление, E – модуль Юнга частиц, ν – коэффициент Пуассона. При этом размер пор между сферическими частицами меняется как

$$r_p \approx r_i \cdot \left[1 - C_0 \cdot (P / P_0)^{2/3} \right],$$

где r_i – начальный размер пор, $C_0 \approx 2$ – константа, зависящая от упаковки шаров. С учётом этого выражение для проницаемости можно записать в виде

$$k(P) = k_0 \left\{ 1 - C_0 [(P + P_i) / P_0]^{2/3} \right\}^4, \quad (3)$$

где k_0 – проницаемость ненагруженной структуры, C_0 – константа, зависящая от типа упаковки, P_i – начальное давление. Данная модель применима при значениях внешнего давления P не больше 3–5% от эффективного модуля упругости материала P_0 .

Для описания стресс-зависимой проницаемости в трещиноватых структурах Ганги предложена другая модель – «Bed of nails». В ней предполагается, что течение жидкости происходит сквозь плоскую трещину с относительно небольшими неровностями, линейные размеры которой много больше ширины зазора. Неровности краев трещины представляются как множество деформируемых стержней разной длины между плоскими поверхностями. Зависимость проницаемости от приложенного давления аналогично случаю со сферическими частицами может быть выражена в виде:

$$k = k_0 \left[1 - (P / P_1)^m \right]^3, \quad (4)$$

где k_0 – проницаемость ненагруженной трещины, m – константа, определяемая распределением стержней по длине, P_1 – предельное давление смыкания трещины. Данная модель применима в диапазоне давлений $0.001 < P/P_1 < 0.1$.

Модель Дженингса. Похожий подход при описании щелевой проницаемости использован в работе Дженингса [Jennings et al., 1981]. Представленная им модель строится на предположении о том, что течение происходит сквозь трещины прямоугольного сечения, деформируемые в соответствии с классической теорией упругости. Полученное в результате подобного подхода выражение для зависимости проницаемости от приложенного внешнего давления будет иметь вид:

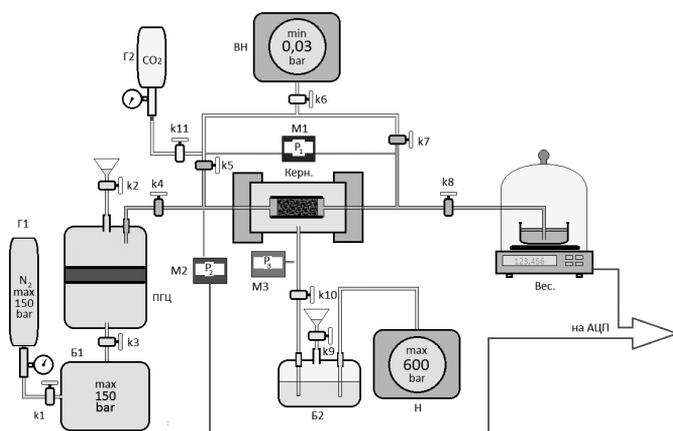
$$k = a_0 + a_1 P + a_2 P^2 + a_3 P^3 \quad (5)$$

Во всех перечисленных моделях деформация образцов рассматривается в упругом приближении. При этом до сих пор не предложено ни одной модели стресс-зависимой проницаемости, учитывающей пластические свойства породы. Цель данного исследования состояла в изучении реакции фильтрационных свойств различных пород на циклическое нагружение. Также в ходе работы исследовалась применимость существующих моделей для описания фильтрации в образцах с низкой проницаемостью.

Эксперимент по изучению фильтрационных свойств пористых образцов под воздействием внешней нагрузки

Для исследования фильтрации в образцах керна была использована лабораторная установка (рис. 1), подробно описанная в работе [Барышников и др., 2016]. Исследуемый образец в резиновой манжете помещается в кернодержатель, в корпусе которого создавалось необходимое давление обжима (горное давление). Для измерения проницаемости образца через него производилась прокачка жидкости (дистиллированная вода) при фиксированном перепаде давления. Расход жидкости измерялся путём непрерывного взвешивания ёмкости с жидкостью, собранной на выходе из кернодержателя. По измеренному массовому расходу жидкости, исходя из закона Дарси, вычислялась проницаемость образца. Эксперименты проводились последовательными циклами, в ходе которых давление обжатия сначала поднималось до некоторого максимального значения, а затем сбрасывалось до начальной величины. Были получены экспериментальные зависимости проницаемости от приложенного внешнего давления для трех образцов: цилиндрического керна 30×30 мм, вырезанного из керамического кирпича, двух образцов известняка из скважины ГФО «Михнево». Перепад порового давления в образцах составлял порядка 2 атм. Измерения проводились в интервале давлений обжатия от 25 до 300 атм.

Рис. 1. Схема установки. КERN – кернодержатель с образцом; Вес – весы с кюветой для собранной жидкости; ПЦ – пневмоцилиндр; Н – насос высокого давления; ВН – вакуумный насос; Г1-2 – газовый баллон; Б1-2 – буферные ёмкости; М1-3 – манометры (датчики давления); к1-10 – кран



На рис. 2 показан график зависимости проницаемости от давления обжатия для керамического образца для двух последовательных циклов нагружения-разгрузки. Следует отметить резкое падение проницаемости в интервале от 50 до 150 атм и более плавное в интервале от 150 до 300 атм. Также для данного образца характерно весьма значительное восстановление проницаемости при сбросе давления обжатия. Тем не менее, наблюдаются необратимые изменения проницаемости, выражающиеся в падении начальных значений проницаемости от серии к серии нагружений.

Для известняковых образцов характерна меньшая чувствительность проницаемости к изменению давления обжатия с равномерным падением во всем интервале давлений (рис. 3). Кроме того, наблюдалось практически полное отсутствие возврата проницаемости к изначальным значениям при сбросе давления обжатия.

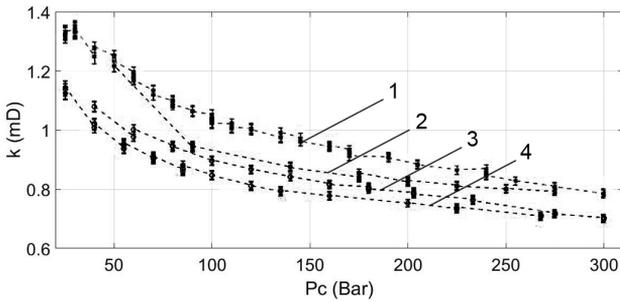


Рис. 2. Зависимость проницаемости от давления обжатия для керамического образца для двух последовательных циклов нагружения (1, 3) и разгрузки (2, 4)

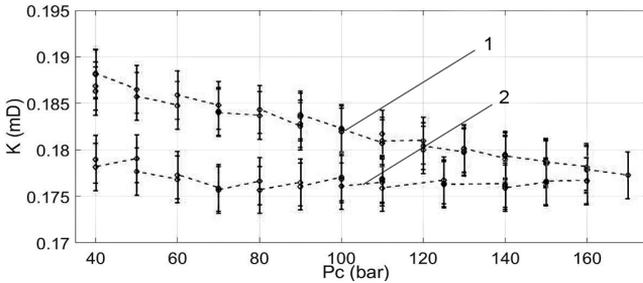


Рис. 3. Зависимость проницаемости от давления обжатия для известнякового образца: 1 – кривая нагружения, 2 – кривая разгрузки

Анализ результатов

Результаты проведённых опытов были сопоставлены с несколькими теоретическими моделями зависимости проницаемости от приложенного внешнего давления. На рис. 4 представлены результаты аппроксимации экспериментальных данных моделью Ганги для проницаемости с преимущественной фильтрацией через поры (3) и через трещины (4). Анализ графиков и оценки аппроксимационных коэффициентов (табл. 1) позволяют говорить о том, что модель Ганги для трещин лучше описывает экспериментальные точки, а также выдвинуть предположение о трещиноватом характере проницаемости керамического образца.

На рис. 5 и в табл. 2 представлены результаты аппроксимации данных опыта моделями Добрынина [Dobrynin, 1962], Дженнинга [Jennings et al., 1981], Джонса [Jones, 1975] и Джонса и Оуэнса [Jones, Owens, 1980]. Наилучшим образом экспериментальные точки аппроксимируются моделями 2 и 3. Данный результат служит еще одним доводом в пользу трещиноватого характера керамического образца: модель Jennings была построена на рассмотрении фильтрации через деформируемую трещину прямоугольного сечения; эмпирическая модель Jones & Owens – на осно-

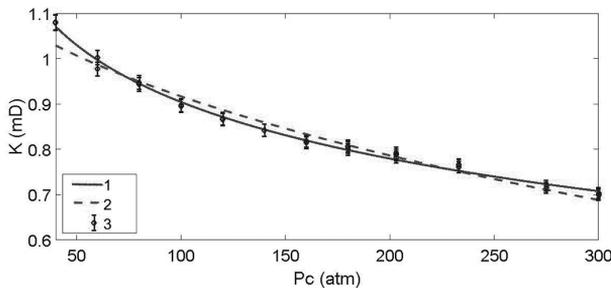


Рис. 4. Аппроксимация данных керамического образца моделями Gangi: 1 – модель для трещин, 2 – модель для пор, 3 – экспериментальные точки

Рис. 5. Аппроксимация данных керамического образца модели: 1 – Эксперимент; 2 – Jennings J. (1981); 3 – Jones F. & Owens W. (1980); 4 – Dobrynin V. (1962); 5 – Jones F. (1975)

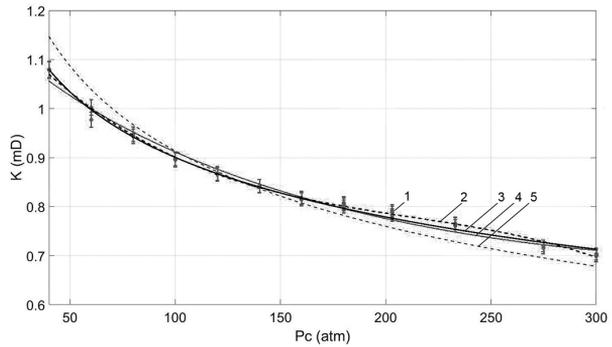


Таблица 1. Аппроксимация данных, полученных для керамического образца

Преимущественная фильтрация	1. Через трещины	2. Через поры
Вид зависимости	$k = k_0 [1 - (P/P_0)^m]^3$	$k = k_0 [1 - c_0 (P/P_0)^{2/3}]^4$
Коэффициенты	$k_0 = 3.358 \text{ мД}$ $m = 0.1217$ $P_0 = 5.059e + 0.5 \text{ атм}$	$k_0 = 1.175 \text{ мД}$ $m = 2.404$ $P_0 = 2.254e + 04 \text{ атм}$
Применимость	R-квадрат = 0.99	R-квадрат = 0.96

Таблица 2. Аппроксимация данных керамического образца

Модель	Вид зависимости	R-квадрат
1. Dobrynin V. 1962	$k = a_1 + a_2 P + a_3 P \lg P$	0.98
2. Jennings J. 1981	$k = a + a_1 P + a_2 P^2 + a_3 P^3$	0.99
3. Jones F. 1975	$k = k_0 (1 - s \lg P_0/P)^3$	0.91
4. Jones F. & Owens W. 1980	$k = k_{100} [1 - s \lg (P/100)]^3$	0.99

ве данных измерения проницаемости низкопроницаемых трещиноватых образцов формации Mesaverde и Frontier.

Проницаемость известняковых образцов в гораздо меньшей степени подвержена влиянию внешнего давления. Падение проницаемости на исследованном интервале давлений составило порядка 5%, что сопоставимо с погрешностью измерений. Кроме того, в данных образцах особенно сильно проявился эффект падения проницаемости с течением времени, связанный с пластической деформацией пористого образца. На рис. 6 показаны зависимости проницаемости от времени в процессе нагружения – сброса внешнего давления в интервале 40–200 атм, а также при постоянном давлении 50 атм. Конечное значение проницаемости в цикле нагружения – сброса хорошо согласуется со значениями, которые можно получить при экстраполяции падения проницаемости при постоянном давлении.

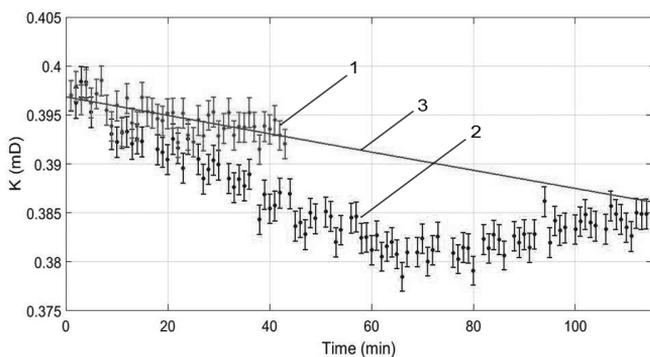


Рис. 6. Зависимость проницаемости образца М6 от времени: 1 – при постоянном внешнем давлении; 2 – при последовательном изменении внешнего давления; 3 – экстраполяция падения проницаемости при постоянном давлении

Таким образом, учет временного тренда в отдельных сериях экспериментов объясняет слабую динамику возврата значений проницаемости к исходным значениям при сбросе давления обжатия.

Выводы

Несмотря на то, что основными объектами исследования являлись модельные образцы, не имеющие непосредственного отношения к нефтеносным породам, эксперименты позволили качественно отработать методику изучения зависимости проницаемости от горного давления, и, кроме того, выявить важные эффекты, оказывающие значительное влияние на фильтрационные процессы, учет которых необходим при последующем исследовании уже реальных кернов. В частности, установлено, что на основании сопоставления модели с данными опыта можно судить о трещинном характере проницаемости. Однако значения проницаемости, получаемые в различных сериях измерений даже одних и тех же образцов, сильно отличаются, и, как следствие, отличаются коэффициенты при аппроксимации этих серий.

Это может быть объяснено значительным влиянием пластических деформаций на фильтрационные свойства образцов, что требует дальнейшего исследования.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проекты №№ 16-05-00869, 16-05-00605) и в рамках программы Гос. задания (проект № -146-2014-0012).

Литература

Барышников Н.А., Елисеев С.В., Зенченко Е.В., Лагутин Ю.В., Турунтаев С.Б. Лабораторное изучение фильтрационных свойств низкопроницаемых пористых сред // Динамические процессы в геосферах. Вып. 8: сб. научн. тр. ИДГ РАН. М.: ГЕОС. 2016. С. 35–42.

Ali, H.S., Al-Marhoun, M.A., Abu-Khamsin, S.A., & Celik, M.S. (1987, January 1). The Effect of Overburden Pressure on Relative Permeability. Society of Petroleum Engineers. doi:10.2118/15730-MS.

Dobrynin, V.M. (1962, December 1). Effect of Overburden Pressure on Some Properties of Sandstones. Society of Petroleum Engineers, doi:10.2118/461-PA.

Gangi A.F. Variation of whole and fractured porous rock permeability with confining pressure, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, Volume 15, Issue 5, 1978, Pages 249–257, ISSN 0148-9062.

Jennings, J.B., Carroll, H.B., & Raible, C.J. (1981, January 1). The Relationship of Permeability to Confining Pressure in Low Permeability Rock. Society of Petroleum Engineers, doi:10.2118/9870-MS.

Jones, F.O. (1975, January 1). A Laboratory Study of the Effects of Confining Pressure on Fracture Flow and Storage Capacity in Carbonate Rocks. Society of Petroleum Engineers, doi:10.2118/4569-PA.

Jones, F.O., & Owens, W.W. (1980, September 1). A Laboratory Study of Low-Permeability Gas Sands. Society of Petroleum Engineers, doi:10.2118/7551-PA.

Lei, Q., Xiong, W., Yuang, J., Cui, Y., & Wu, Y-S. (2007, January 1). Analysis of Stress Sensitivity and Its Influence on Oil Production From Tight Reservoirs. Society of Petroleum Engineers, doi:10.2118/111148-MS.

Wilson, J.W. (1956), Determination of relative permeability under simulated reservoir conditions. AICHE J., 2: 94–100, doi:10.1002/aic.690020120.

Zhu, S. (2013, September 30). Experiment Research Of Tight Sandstone Gas Reservoir Stress Sensitivity Based On The Capillary Bundle Mode. Society of Petroleum Engineers, doi:10.2118/167638-STU.