УДК 532.546

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ФИЛЬТРАЦИОННЫХ СВОЙСТВ ВЯЗКОУПРУГИХ ПОРИСТЫХ СРЕД ПОД ВЛИЯНИЕМ ВНЕШНЕЙ НАГРУЗКИ

Н.А. Барышников, А.Д. Куприянов, Е.В. Зенченко, С.Б. Турунтаев, А.В. Орлов

ИДГ РАН

Проведена серия опытов по изучению зависимости фильтрационных свойств малопроницаемых вязкоупругих образцов пористой породы под воздействием внешней нагрузки. В ходе опытов наблюдалось скачкообразное падение проницаемости при повышении давления обжатия. На основании предположений о характере деформирования порового пространства предложена аналитическая модель зависимости проницаемости вязкоупругих пористых сред от приложенной нагрузки. При анализе результатов эксперимента проведено попарное сравнение последовательных скачков проницаемости при изменении давления обжатия. Данный способ позволяет, не смотря на сложную историю деформирования, анализировать вид зависимости проницаемости от внешнего давления, что позволяет делать выводы о геометрии порового пространства образца.

Введение

Вопрос зависимости проницаемости горных пород от внешнего давления широко освещался, начиная с 50-х годов прошлого века. Так, например, исследования Уилсона [Wilson, 1956] относительной и абсолютной проницаемости песчаников при различных поровых и горных давлениях показали, что для воды эффективная проницаемость уменьшается с ростом внешнего давления. Тема консолидации – выдавливания воды из слоев почвы под действием внешней нагрузки – изучалась Терцаги [Терцаги, Пек, 1958]. Исследования, проводимые Маттаксом [Mattax et al., 1975] показали, что проницаемость образцов керна, при проведении нескольких циклов нагрузки – разгрузки образца, в значительной степени отличаются от первоначальных значений. Эффект гистерезиса на макро- и микроскопических уровнях отмечался в работе Косси [Coussy, 2010]. Ранее, в ходе исследования зависимости фильтрационных свойств от приложенной внешней нагрузки, нами также наблюдался неполный возврат проницаемости к изначальным значениям при сбросе давления обжатия [Архипов и др., 2017]. Значительные отличия проницаемости при проведении последовательных циклов, в ходе которых давление обжатия сначала поднималось до некоторого максимального значения, а потом сбрасывалось до начальной величины, может быть объяснено влиянием пластических деформаций на фильтрационные свойства образцов.

Целью данной работы является исследование изменения фильтрационных свойств вязкоупругих пористых сред под влиянием внешней нагрузки.

Эксперимент

В ходе работы была использована лабораторная установка (рис. 1), подробное описание которой дано в работе [Барышников и др., 2016]. Исследуемый образец, в плотно прилегающей к нему резиновой манжете, помещается в кернодержатель, в корпусе которого при помощи масляного насоса создаётся необходимое давление обжатия образца. Конструкция кернодержателя такова, что обжатие образца можно в первом приближении считать всесторонним. Фильтрация жидкости через образец происходит при постоянном перепаде порового давления, создаваемого при помощи пневмогидроцилиндра, расположенного на входе в кернодержатель. Поровое давление на выходе из кернодержателя регулируется при помощи обратного клапана. Расход жидкости измеряется путём непрерывного взвешивания ёмкости с жидкостью, прошедшей через образец. Точность измерения расхода жидкости определяется временем, в течение которого производится измерение. Проницаемость исследуемого образца вычисляется по закону Дарси с учётом поправки на нелинейность потока жидкости в образце и температурной зависимости её вязкости и плотности.

В ходе опытов исследовался керамический образец, высверленный изкерамического кирпича. Предварительно обмеренный микрометром, образец в резиновой манжете помещался в кернодержатель, создавалось начальное давление обжатия 2 МПа, после чего образцы вакуумировались и выдерживались в течение трёх суток.

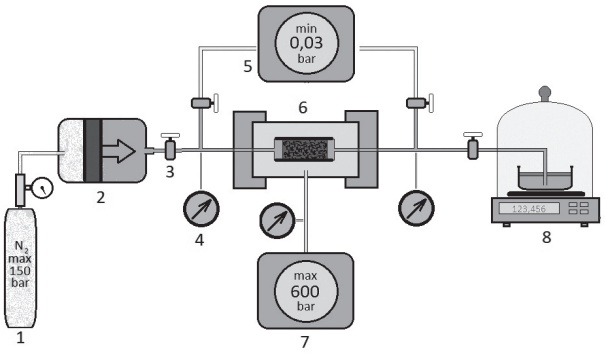

Рис. 1. Схема установки: 1 – буферная ёмкость; 2 – пневмогидроцилиндр; 3 – краны; 4 – датчики давления; 5 – вакуумный насос; 6 – кернодержатель с образцом; 7 – насос высокого давления; 8 – весы с ёмкостью для собранной жидкости

В качестве поровой жидкости в опытах использовалась дистиллированная вода. В начале каждого опыта производилась её длительная прокачка через образец при заданных давлениях на входе и выходе из кернодержателя и давлении обжатия. После чего давление обжатия скачкообразно повышалось и в течение продолжительного времени производилось измерение реакции проницаемости образца на изменение внешней нагрузки. В среднем, время проведения отдельного опыта составило 1 сутки. Предполагалось, что этого времени было достаточно для установления напряжённо-деформированного состояния образца.

Результаты опытов

Над одним и тем же образцом была проведена серия из 6 опытов. В ходе каждого из них давление обжатия повышалось с начального уровня P_0 (порядка 1 МПа) до величины P_1 (2,6–14,6 МПа). Между опытами образец в течение недели

выдерживался при давлении порядка 1 МПа. Во всех опытах наблюдалось скачкообразное падение проницаемости образца, происходящее в момент резкого повышения давления обжатия. Во многих опытах также наблюдалось медленное изменение проницаемости образца со временем в процессе непрерывной прокачки жидкости при постоянных параметрах нагружения (рис. 2).

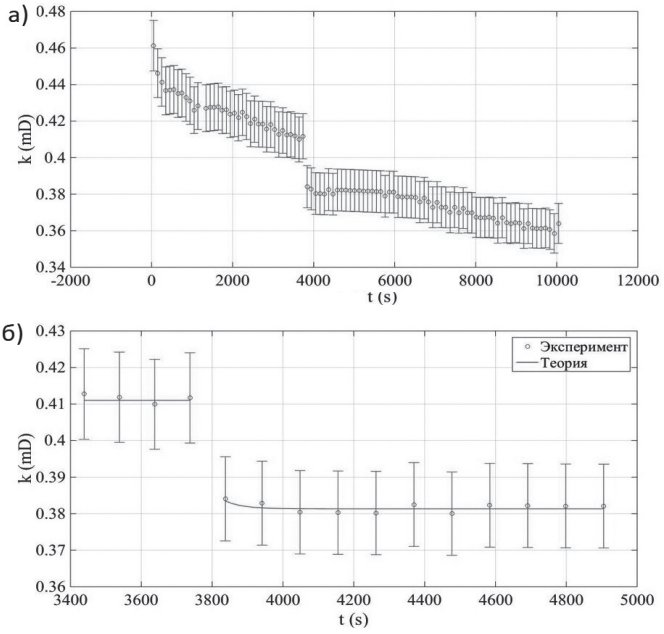

Рис. 2. а) – зависимость проницаемости от времени на протяжении всего опыта (опыт № 1); б) – изменение проницаемости в момент повышения давления обжатия

Таблица. Параметры опытов

№	P_0, МПа	k_0 мД ± 5%	P_1, МПа	k_1 мД ± 5%	k_∞ мД ± 5%	dP_{pore} МПа	E_D ГПа	E_S ГПа	μ c^{-1}	α
1	1.11	0.411	2.68	0.384	0.382	0.17	2.14	1.99	0.02	–
2	1.36	0.288	3.14	0.268	0.265	0.09	2.17	2.04	–	3.14
3	0.81	0.321	6.12	0.244	0.224	0.24	2.02	1.53	0.02	3.05
4	1.39	0.313	8.06	0.254	0.247	0.09	2	1.85	–	3.03
5	5.39	0.228	14.62	0.211	0.211	0.13	2.27	2.06	–	2.96
6	1.53	0.251	5.18	0.228	0.227	0.08	2.16	1.86	–	2.95

Мы предполагаем, что это может быть связано с деформациями, происходящими на масштабе отдельных пор и поровых каналов. Характерные времена этих изменений на несколько порядков превышают оценки для времени установления фильтрационного потока в задаче о пороупругости для параметров описанных опытов [Барышников и др., 2016]. Это явление сильно затрудняет интерпретацию изменений проницаемости, происходящих в результате изменения внешней

нагрузки, и требует дальнейшего изучения. Параметры проведённых опытов показаны в Таблице. В данной Таблице показаны давления обжатия P_0 до скачка и P_1 сразу после скачка, значения проницаемости до k_0, сразу после k_1 и спустя длительное время после скачка k_∞ , а также разница поровых давлений на входе и выходе dP_{pore} из кернодержателя.

Анализ результатов и обсуждение

Для теоретического описания зависимости проницаемости от времени для вязкоупругого образца при скачкообразном повышении всестороннего давления обжатия могут быть сделаны следующие предположения: 1) материал пористого скелета и жидкость будем считать малосжимаемыми, деформация образца происходит за счет изменение объёма его порового пространства; 2) все изменения пористости в процессе деформирования будем считать малыми ($\varepsilon << 1$, $\Delta m << m$).

Задачу нахождения зависимости проницаемости образца от времени в процессе вязкоупругого деформирования целесообразно разбить на две подзадачи: зависимость проницаемости образца от деформации и зависимость деформации образца от времени.

Зависимость проницаемости образца от деформации. Будем считать, что изменение проницаемости и пористости образца в процессе деформирования описывается степенной зависимостью от характерного размером пор r :

$$k = k_0 \left(\frac{r}{r_0} \right)^{\gamma} \quad m = m_0 \left(\frac{r}{r_0} \right)^{\chi}$$

где γ, χ – параметры, определяющие геометрию порового пространства. Величины с индексом относятся к недеформированному состоянию. Нетрудно убедиться, что данные соотношения с учётом сделанных ранее предположений о характере деформирования справедливы для различных модельных сред. Так, для пористой среды, состоящей из множества капилляров с радиусом r показатели степени $\gamma = 4$, а $\chi = 2$. Для слоистой или трещиноватой среды показатели $\gamma = 3$, а $\chi = 1$. Для среды, представленной в виде плотной упаковки отдельных частиц $\gamma = 4$, а $\chi = 3$. Подобный подход можно встретить в различных работах, например, [Gangi, 1978], посвящённой построению модели стресс-зависимой проницаемости.

Так как, согласно нашим предположениям, деформирование пористой среды происходит за счёт изменения объёма порового пространства, мы можем записать следующее соотношение для деформации ε пористого образца: $3\varepsilon = m - m_0$. Откуда, с учётом степенных законов изменения проницаемости и пористости можно получить соотношение для зависимости проницаемости среды от деформации:

$$k = k_0 \left(1 + \frac{3\varepsilon}{m_0} \right)^{\alpha} \tag{1}$$

где $\alpha = \gamma - \chi$ – параметр, определяемый геометрией порового пространства.

Зависимость деформации образца от времени. Для описания зависимости проницаемости от времени воспользуемся реологической моделью Пойтинга-Томаса, которая представляет из себя комбинацию параллельного соединения упругого и

вязкого элементов с последовательным соединением с упругим элементом (рис. 3). Зависимость деформации от времени в модели Пойтинга-Томаса при скачкообразном изменении напряжения с σ_0 до σ_1 описывается следующим выражением [Кочарян, 2009]:

$$\varepsilon(t) = \begin{cases} s \\ \dfrac{\sigma_1 - \sigma_0}{E_s}\left[1 - \left(1 - \dfrac{E_s}{E_D}\right)e^{-\mu(t-t^*)}\right] + \dfrac{\sigma_0}{E_s}, t \geq t^* \end{cases} \quad (2)$$

где t^*– момент скачкообразного повышения напряжения, $E_D = E_1$ – «динамический» модуль, $E_S = (E_1 + E_2)/E_1E_2$– «статический» модуль, $\mu = E_2/\eta$ – параметр вязкости среды (рис. 3).

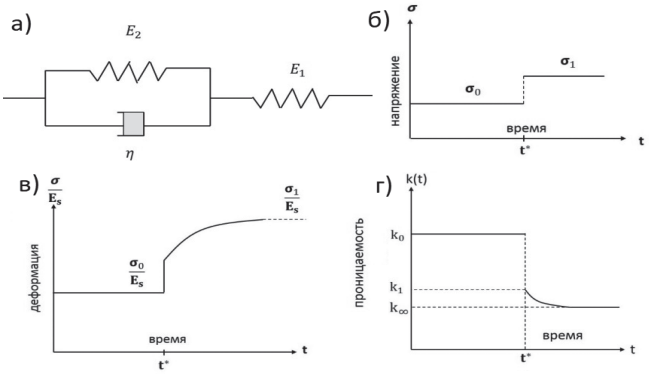

Рис. 3. а) – модель Пойтинга–Томаса; б) – зависимости напряжения; в) – деформации от времени для модели Пойтинга–Томаса; г) – зависимость проницаемости от времени при деформировании образца согласно модели

Зависимость проницаемости деформированного образца от времени. Объединяя вместе решения (1) и (2) можно получить зависимость проницаемости пористого образца при однократном скачкообразном изменении давления всестороннего сжатия:

$$k(t) = \begin{cases} k_0, t \prec t^* \\ k_0\left\{1 - \dfrac{3\Delta P}{m_0 E_s}\left[1 - \left(1 - \dfrac{E_s}{E_D}\right)e^{-\mu(t-t^*)}\right]\right\}^{\alpha}, t \geq t^* \end{cases} \quad (3)$$

где $\Delta P = \sigma_1 - \sigma_0$ – разница эффективных напряжений до и после скачка. Так как поровое давление всё время остаётся неизменным, изменение эффективных напряжений численно равно разности давлений обжатия. Также можно записать выражения для проницаемости образца сразу после скачка давления k_1 и проницаемости через продолжительный промежуток времени k_∞:

$$k_1 = k_0\left(1 - \frac{3\Delta P}{m_0 E_D}\right)^{\alpha} \qquad k_\infty = k_0\left(1 - \frac{3\Delta P}{m_0 E_S}\right)^{\alpha} \quad (4)$$

Сопоставление модели и результатов экспериментов. Соотношение (3) содержит ряд неизвестных параметров: параметры реологической модели E_D, E_S, μ, а

также параметр структуры порового пространства α. Совместное их нахождение путём аппроксимации экспериментальных данных представляется затруднительным. Однако мы можем воспользоваться соотношениями (4) для нахождения параметра структуры порового пространства отдельно от прочих. Для этого рассмотрим изменение проницаемости при скачке давления для пары последовательных опытов. Обозначим параметры первого опыта индексами *a*, а параметры второго – *b*. Исключив динамический модуль E_D из выражения для величин проницаемости, получим уравнение относительно параметра α :

$$\frac{1}{\Delta P_a}\left(1-\left[\frac{k_{1a}}{k_{0a}}\right]^{\frac{1}{\alpha}}\right)=\frac{1}{\Delta P_b}\left(1-\left[\frac{k_{1b}}{k_{0b}}\right]^{\frac{1}{\alpha}}\right)$$

Решая численно данное уравнение, получим значения параметра α для каждой последовательной пары опытов (Табл.). Можно видеть, что для проделанных опытов этот параметр близок к 3, что говорит о трещиноватом характере геометрии порового пространства исследуемого образца. Данный вывод хорошо соотносится с результатами, полученными нами ранее [Архипов и др., 2016]. Величина параметра α мало меняется на протяжении всей серии опытов. Незначительное её снижение может быть связано с необратимым закрытием некоторой доли проводящих трещин, тем не менее, общий трещиноватый характер структуры его порового пространства остался неизменным.

Пользуясь полученными значениями параметра α, с помощью соотношений (4) для каждого опыта можно вычислить значения параметров реологической модели E_D, E_S. После чего, с помощью приближения методом средних квадратов зависимостью (3), можно вычислить параметр μ. Вычисленные параметры представлены в Табл.

На графике (рис. 4) представлена зависимость проницаемости образца до и сразу после скачка от давления обжатия для всей серии опытов. Экспериментальные точки приближены зависимостью вида (4), в качестве параметров модели в которой взято среднее значение для всех пар опытов. Данный способ позволяет, не смотря на сложную историю деформирования, анализировать вид зависимости проницаемости от внешнего давления, что позволяет делать выводы о геометрии порового пространства образца.

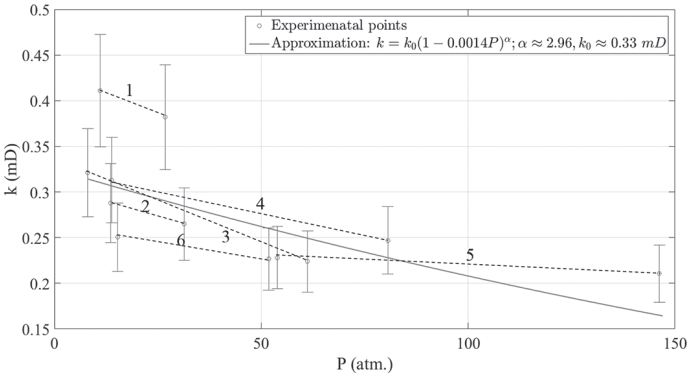

Рис. 4. Зависимости проницаемости образца от давления обжатия для 6 опытов. Точки для каждого скачка давления соединены попарно пунктирной линией.

Выводы

Проведена серия опытов по изучению зависимости фильтрационных свойств малопроницаемых вязкоупругих образцов пористой породы под воздействием внешней нагрузки. На основании предположений о характере деформирования порового пространства предложена аналитическая модель зависимости проницаемости вязкоупругих пористых сред от приложенной нагрузки. При анализе результатов эксперимента проведено попарное сравнение последовательных скачков проницаемости при изменении давления обжатия. Данный способ позволяет анализировать вид зависимости проницаемости от внешнего давления при сложной истории деформирования.

Исследования

Литература

Архипов Я.Д., Барышников Н.А., Зенченко Е.В., Турунтаев С.Б. Изменение фильтрационных свойств малопроницаемых пористых сред под воздействием внешней нагрузки // Динамические процессы в геосферах. № 9. ИДГ РАН. М. : Графитекс. 2017. С. 68–75.

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. № 8. ИДГ РАН. М. : ГЕОС. 2016. С. 35–42.

Кочарян Г.Г. Деформационные процессы в массивах горных пород. М.: МФТИ, 2009. – 378 с.

Терцаги К., Пек Р. Механика грунтов в инженерной практике. Государственное издательство литературы по строительству, архитектуре и строительным материалам. Москва, 1958.

Coussy O. Mechanics and physics of porous solids Wiley, 2010, 281 pages, ISBN: 0470721359.

Gangi, A.F. Variation of whole and fractured porous rock permeability with confining pressure. United States: N. p., 1978. Web. doi:10.1016/0148-9062(78)90957-9.

Mattax, C.C., McKinley, R.M., & Clothier, A.T. (1975, December 1). Core Analysis of Unconsolidated and Friable Sands. Society of Petroleum Engineers. doi:10.2118/4986-PA.

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