

К ВОПРОСУ О ВАРИАЦИЯХ ПРОНИЦАЕМОСТИ ТРЕЩИННО-ПОРИСТОГО КОЛЛЕКТОРА В РЕЗУЛЬТАТЕ ДИНАМИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

Е.А. Виноградов, В.К. Марков, Д.В. Марков

gian.vin@gmail.com

В работе приводятся результаты экспериментов по фильтрации воды, осложненной частицами перлита, через трещинно-поровое пространство в плоско-радиальной постановке задачи. Отмечены как типичные закономерности, связанные с декольматацией пласта, так и неожиданное снижение проницаемости под действием ударов. В работе делается вывод о том, что в первое время после изменения состояния коллектора он находится в существенно нестабильном состоянии и может нетипично реагировать на внешнее воздействие.

Введение

Изменение проницаемости коллектора в результате внешнего воздействия известно достаточно давно. Исследователи отмечали повышение и понижение уровня воды в скважинах, изменение дебита нефти, появление новых источников и исчезновение имеющихся после прохождения волн сильных землетрясений, появление депрессионных воронок в результате подземных взрывов [Manga, Wang, 2007; Roeloffs, 1998; Doan, 2007; Горбунова, Свинцов, 2010]. Более полувека при нефтедобыче применяют методику вибрационного воздействия на пласт для повышения отдачи [Дыбленко и др., 2000]. Конкретные механизмы реакции пласта на воздействие в значительной мере разнятся в зависимости от удаленности коллектора от источника колебаний, характеристик пласта, свойств флюида и т.д. В работе [Kocharyan et al., 2011], опубликованной совместно с авторами настоящей статьи, приводится подробный анализ имеющихся на настоящий момент гипотез, объясняющих наблюдаемые эффекты. Там же авторы предлагают модель реакции коллектора, основанную на разрушении микробарьеров, образующихся в ходе течения воды с присутствующими в ней частицами микронного размера.

В настоящей работе мы представляем результаты лабораторного моделирования реакции флюидонасыщенного пласта на динамическое воздействие в плоско-радиальной постановке задачи и сравниваем их с ранее проведенными экспериментами.

Методика

Для моделирования проницаемого пласта мы использовали диски диаметром 270 и толщиной 20 мм, изготовленные из смеси цемента М500, перлита и строительного песка. Предварительные эксперименты показали, что оптимальное соотноше-

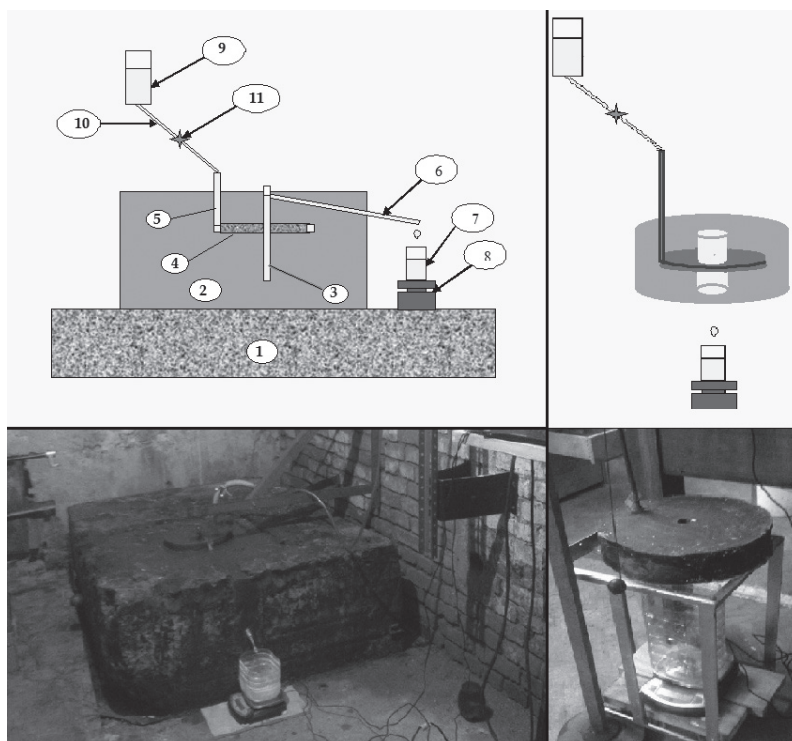


Рис. 1. Схема и фото экспериментальных установок в большом (образец 1) и малом (образец 3) блоках пластилина.

1 – бетонное основание, 2 – массив пластилина, 3 – скважина, 4 – проницаемый пласт, 5 – входная трубка, 6 – сливная трубка, 7 – сосуд для сбора флюида, 8 – электронные весы, 9 – емкость для флюида, 10 – подводящий шланг, 11 – затвор

ние проницаемости и прочности дисков достигается при соотношении компонентов 1:8:2 и использовании перлита М100 с гранулярным составом 0,16–1,25 мм. В центре диска оставлялась скважина диаметром 25 мм. Равномерная подача воды в коллектор осуществлялась через металлическое распределительное кольцо, установленное по периметру диска. Готовый бетонный диск с кольцом заливался техническим пластилином, моделирующим непроницаемый массив, изолирующий пласт.

Эксперименты проводились на двух аналогичных образцах с условными номерами 1 и 3, один из которых, образец 1, был залит в большой блок пластилина размером 1,5х1,5х0,6 м., а второй – в малый пластилиновый дискообразный блок диаметром 340 и толщиной 80 мм. Схемы и фото установок представлены на рис. 1.

Проницаемость вычислялась по формуле Дюпюи

$$K_{\phi} = \frac{Q \mu \ln\left(\frac{R_e}{R_i}\right)}{2\pi h (P_e - P_i)} \quad (1),$$

где Q – поток воды через образец [$\text{м}^3/\text{с}$], μ – динамическая вязкость [$\text{Па}\cdot\text{с}$], R_e, R_i – радиус диска и внутренний радиус скважины соответственно [м], h – толщина образца [м], $P_e - P_i$ – перепад давления в пласте [Па]. Для моделирования динамиче-

ского воздействия на пласт по боковой и верхней частям большого блока, а также по верхней поверхности малого блока наносились удары металлическими шарами различной массы и молотком.

Сразу после заливки бетонных дисков пластилином и первоначальной фильтрации воды через бетон мы резко повысили давление в системе, чтобы создать трещину в образцах по аналогии с проведением гидроразрыва пласта. Резкое повышение проницаемости (с сотых долей до первых единиц Дарси) стало индикатором успешного трещинообразования. Начиная с этого момента образцы 1 и 3 уже нельзя считать идентичными, поскольку трещинообразование не контролировалось, и состояние трещинного-порового пространства пластов принципиально различно.

В ходе фильтрации воды в результате суффозии вымывались частицы перлита, непрочно связанные с пластом. Мы использовали эту воду циклично, снова пропускав ее через образец, таким образом, после нескольких циклов эксперимента в фильтрате установилось относительно постоянное количество примесей. Преимущество этой схемы заключалось в том, что размер частиц *a priori* был того же порядка, что и характерная пористость образца.

Результаты экспериментов

На рис. 2 представлены результаты двух экспериментальных серий по фильтрации воды через образец 1. Одна точка на графике соответствует средней проницаемости, вычисленной по объему воды, отфильтрованному через образец за 700 секунд, по формуле (1). Первая серия экспериментов проводилась сразу после заливки образца в блок, суммарно в течение 15 дней, от 0 до 3 экспериментов в день. Между экспериментами пласт оставался целиком в воде при перекрытом затворе 11 (рис. 1), время между двумя экспериментами могло достигать 6 суток. Систематического влияния времени покоя на проницаемость образца не обнаружено. Так, между измерениями №№ 4 и 5 прошло четыре дня, проницаемость уменьшилась с $K_{\phi} = 1,5\text{Д}$ до $K_{\phi} = 1,42\text{Д}$, тогда как между №№ 6 и 7 (6 дней «покоя») отмечено лишь слабое увеличение проницаемости от $K_{\phi} = 1,44\text{Д}$ до $K_{\phi} = 1,47\text{Д}$, лежащее в пределах погрешности измерений.

Динамическое воздействие на пласт привело к довольно неожиданным результатам. Каждый раз, после ударов в боковую или верхнюю грань блока (штрихованные и полые стрелки на рис. 2 соответственно) мы отмечали снижение проницаемости пласта, суммарно на величину $\Delta K_{\phi} = 0,4\text{Д}$ за пять опытов (три в боковую и два в верхнюю грань блока) и составила $K_{\phi} = 1,08\text{Д}$.

После измерения № 16 пласт оставался в покое в течение 2 месяцев, после чего проницаемость оказалась существенно выше той, что была отмечена до перерыва в экспериментах – $K_{\phi} = 1,38\text{Д}$, – причем в двух последующих экспериментах, проведенных в течение 24 часов после первого, она продолжала расти и достигла исходных значений до ударного воздействия $K_{\phi} = 1,52\text{Д}$.

Длительная фильтрация через образец (12,6 литра воды с содержащимися микрочастицами перлита) привела к падению проницаемости до $K_{\phi} = 0,9\text{Д}$. Следующее заметное изменение проницаемости на $\Delta K_{\phi} = 0,2\text{Д}$ было отмечено в ходе измерения № 26, которое проводилось через двое суток после предыдущего, причем никаких дополнительных воздействий в это время на пласт не оказывалось. Дальнейшие измерения, проведенные подряд в течение суток, продемонстрировали относительно устойчивое значение проницаемости с незначительным трен-

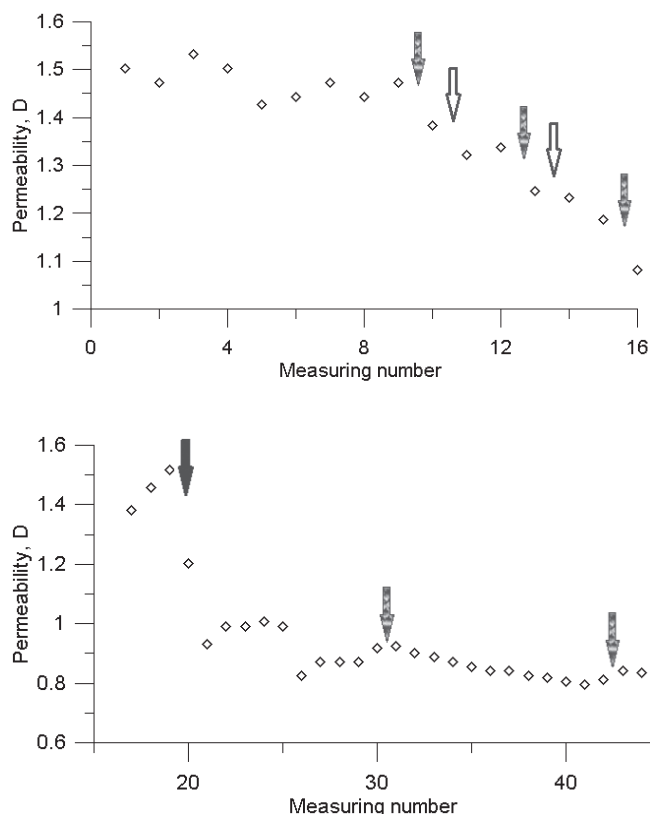


Рис. 2. Фильтрационные эксперименты, проведенные на образце 1, заключенном в большом пластилиновом блоке размером 1,5х1,5х0,6 м.

Полые стрелки – удары по верхней поверхности блока шаром массой 500 г; штрихованные стрелки – удары в боковую поверхность блока массивным ударником; темная стрелка – пролив через систему 12,6 литров воды

дом на снижение, удары в боковую стенку блока никак не повлияли на состояние пласта.

На рис. 3 приведены результаты экспериментов по фильтрации воды через образец 3 в малом пластилиновом блоке. Одна точка на графике соответствует средней проницаемости, вычисленной по объему воды, отфильтрованному через образец за 200 секунд, одинаковые символы соответствуют измерениям, проведенным между динамическим воздействием на образец, черные кресты – испытание № 1. В ходе проведения экспериментов также не было обнаружено никакого изменения проницаемости от времени «покоя» между экспериментами, но отмечено ее снижение в зависимости от общего количества жидкости, профильтрованной через образец. В логарифмических осях полученные значения хорошо аппроксимируются прямыми линиями, что согласуется с зависимостями, описывающими снижением проницаемости при фильтрации малоconцентрированных суспензий [Шехтман, 1961].

Первоначальная проницаемость образца $K_{\phi} = 11,5Д$, в ходе фильтрации 16,8 литра жидкости за полтора часа (черные кресты на рис. 3) падение составило $K_{\phi} = 5,8Д$, при этом полученные значения аппроксимируются зависимостью

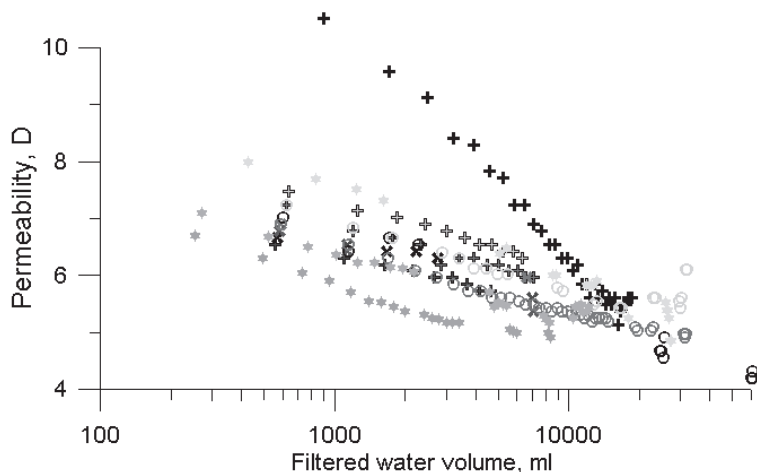


Рис. 3. Фильтрационные эксперименты, проведенные на образце 3.

Различные значки – серии измерений проницаемости между динамическим воздействием на пласт, черные кресты – первоначальная серия измерений. Отсчет по оси абсцисс ведется от момента динамического воздействия на пласт

$K_{\phi} = -1,83 \cdot \lg(V) + 23,2$ с коэффициентом детерминации $R^2 \approx 0,98$. Динамическое воздействие на образец привело к росту проницаемости до $K_{\phi} = 6,5Д$.

Всего нами было проведено 14 экспериментов с динамическим воздействием на пласт в ходе фильтрации. Каждый раз наблюдалось явное увеличение проницаемости на величину $\Delta K_{\phi} = 1 \div 2Д$, в подавляющем числе экспериментов значение проницаемости сразу после ударов составляло $K_{\phi} = 7 \pm 0,2Д$, в двух экспериментах было достигнуто $K_{\phi} = 8,0Д$ и $\Delta K_{\phi} = 7,5Д$. Все удары наносились металлическим молотком при свободном падении его головки с высоты 3 см., за один эксперимент наносилось 30 ударов с интервалом 5 секунд, за исключением четырех экспериментов, описанных ниже.

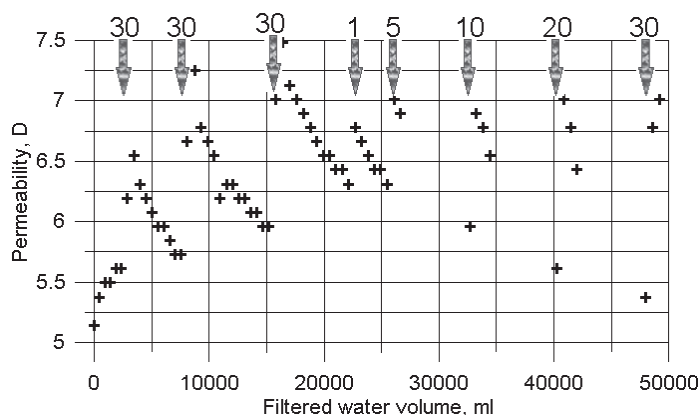


Рис. 4. Динамическое воздействие на образец 3 в ходе фильтрации.

Числа при стрелках соответствуют числу ударов по образцу металлическим ударником с высоты 3 см

Падение проницаемости после ударов аппроксимировалось логарифмической зависимостью вида $K_{\phi} = -k'' \cdot \lg(V) + K_0$ при всех измерениях, при этом коэффициент k'' во всех экспериментах был существенно меньше изначального и варьировался в пределах $k'' = 0,45 \div 0,7$.

На рис. 4 показано изменение проницаемости образца при различном количестве ударов одинаковой силы по поверхности образца в ходе фильтрации. Можно видеть, что в устоявшемся режиме как 5, так и 30 ударов приводит к возрастанию проницаемости до значений близких к $K_{\phi} = 7$ Д. Чуть меньшая величина $K_{\phi} = 6,8$ Д, достигнутая при одном ударе, лежит в пределах погрешности эксперимента. Отдельно необходимо отметить, что изначальной величины проницаемости $K_{\phi} = 11,5$ Д, которая была зафиксирована сразу после начала экспериментов, ударным воздействием достичь не удалось.

Обсуждение результатов

На изменение проницаемости пласта в ходе фильтрации жидкости с присутствующими в ней микрочастицами перлита через образец 3 влияют одновременно два фактора. Кольматация трещинного пространства подчиняется известным логарифмическим законам фильтрации малоконцентрированных суспензий [Шехтман, 1961] и наблюдается в ходе всего эксперимента. После нанесения ударов мы видим резкий рост проницаемости, что связано с разрушением микробарьеров, образованных частицами. В [Кочарян и др., 2010] предлагается также другой возможный механизм роста проницаемости пласта в результате динамического воздействия – эффект накопления остаточных деформаций на нарушениях сплошности геоматериала, однако в нашем случае его действие если и имеет место, то в значительно меньшей степени, поскольку реакция пласта как на одиночный удар, так и на серию из 30 последовательных ударов практически не отличается, то есть накопления не происходит.

Авторы настоящего исследования участвовали в эксперименте по фильтрации жидкости с частицами корунда через трещину, разделяющую два блока плексигласа [Kocharyan et al., 2011]. В ходе опыта под действием периодических ударов постепенно размывался заполнитель трещины и образовывался канал. После прекращения ударов канал кольматировался снова. Существенное отличие от настоящего исследования состоит в зависимости изменения проницаемости от количества ударов, накоплением эффекта, тогда как в этой работе один удар привел к почти таким же результатам, как и 30. При этом мы снова наблюдали «цикличность» процесса, когда декольматированный пласт снова загрязнялся частицами в процессе фильтрации, то есть все процессы были обратимыми. По всей видимости, здесь нам удавалось сразу же «выбить» застрявшие частицы в поток, тогда как в экспериментах на блоках плексигласа более слабое воздействие только раздвигало их.

Второй фактор изменения проницаемости в экспериментах – это плавный ее рост, наиболее отчетливо заметный до нанесения первых ударов на рис. 4, обусловленный раскрытием трещинного пространства под действием гидравлического давления в ходе эксперимента. По прошествии шести месяцев и промывки установки чистой водой для удаления частиц перлита мы вновь провели измерение проницаемости, причем измерения расхода велись при помощи прецизионных электронных весов OHAUS Scout Pro производства США с точностью 1 г и частотой опроса 5 с, в качестве фильтрата использовалась чистая вода. Результаты эксперимента приведены на рис. 5. В ходе этого эксперимента проницаемость пласта постепенно

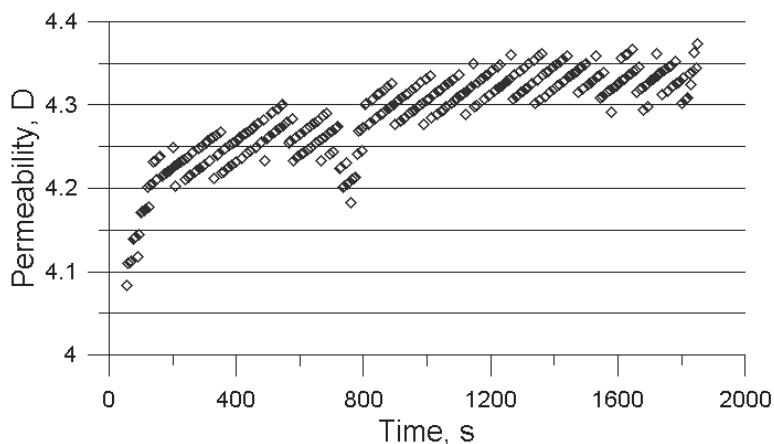


Рис. 5. Проницаемость образца 3 с течением времени при фильтрации чистой водой

увеличивалась с выходом на асимптоту, снижения проницаемости, обусловленной кольтматацией, как и реакции на удары не наблюдалось. После некоторого времени покоя, проницаемость снова демонстрирует плавный рост со значений меньших, чем установившиеся при предыдущей фильтрации.

Подробное исследование эффекта изменения проницаемости в условиях меняющегося пластового давления выходит за рамки данной статьи и будет описано в наших следующих работах.

Снижение проницаемости, наблюдаемое нами в результате динамического воздействия на образец 1 в пластилиновом блоке, по-видимому, связано с неустойчивым состоянием модели пласта в первое время после трещинообразования. Новообразованные трещины легко видоизменяются в результате ударов и занимают более энергетически выгодное положение, очевидно, демонстрируя тенденцию к смыканию. После перехода пласта в более устойчивое напряженно-деформированное состояние отклик на динамическое воздействие прекращается. Релаксационными процессами объясняется и, казалось бы, ни с чем не связанное падение проницаемости пласта, зафиксированное во время измерения № 26.

Аналогичные механизмы работали и в первой серии измерений на образце 3, демонстрирующие существенно более резкое падение проницаемости по сравнению с последующими экспериментами. В данном случае фактором воздействия являлись не удары, а сам процесс движения жидкости через пласт. После того как трещинное пространство пришло в устойчивое состояние, на него влияли преимущественно процессы кольтматации-декольтматации, в результате чего соответствующий коэффициент снижения проницаемости от профильтрованного объема менялся незначительно. Подтверждением служит тот факт, что изначальной проницаемости, $K_{\phi} = 11,5Д$, в ходе эксперимента достичь не удалось, то есть ее падение до уровня $K_{\phi} = 7 \div 7,5Д$ объясняется необратимыми процессами, не связанными с кольтматацией.

Требуется объяснения и отсутствие явных кольтматационных/декольтматационных эффектов в экспериментах на образце 1. После вышеописанных переходных процессов проницаемость образца установилась в границах $K_{\phi} = 0,8 \div 0,9Д$, что существенно ниже, чем у образца 3, то есть эффективная апертура трещин пласта ниже.

Крупные частицы перлита при этой апертуре не могут профильтроваться через образец, даже при динамическом воздействии на него, оставаясь прочно связанными со скелетом коллектора, тогда как более мелкие частицы проходят свободно, не коагулируя пласт. Поскольку перлит – это твердое вещество, слипания и агрегации микрочастиц в процессе фильтрации не происходит, и этот тип взаимодействия пласт-флюид в нашем случае следует исключить из рассмотрения.

Выводы

Проведенные эксперименты показали, что в первое время после образования трещинного пространства пласт находится в существенно гидродинамически неустойчивом состоянии, вследствие чего проницаемость может нехарактерно реагировать на прилагаемое воздействие. В экспериментах отмечен как рост проницаемости под действием ударов, что находится в соответствии с современными представлениями о декольматационных процессах, так и ее необратимое падение, что, по-видимому, связано с перестройкой трещинно-порового состояния и смыканием трещин.

Обнаруженный эффект постепенного роста проницаемости стабильного пласта сразу после начала фильтрации и выход ее на постоянный уровень, также наблюдаемый в экспериментах, связан с расширением трещинного пространства под действием гидравлического давления и требует отдельного исследования, выходящего за рамки настоящей работы.

Авторы выражают глубокую благодарность с.н.с. Института динамики геосфер Э.М. Горбуновой за плодотворные обсуждения экспериментальных данных и ценные замечания в ходы работы.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 14-05-31225.

Литература

Горбунова Э.М., Свинцов И.С. Ретроспективный анализ режима подземных вод при проведении крупномасштабных экспериментов // Мониторинг ядерных испытаний и их последствий. Тезисы докладов. VI Международная конференция. 09–13 августа 2010 г. Курчатов, Казахстан: НЯЦ РК. 2010. С. 72–75.

Дыбленко В.П., Камалов Р.Н., Шариффулин Р.Я., Туфанов И.А. Повышение продуктивности и реанимация скважин с применением виброволнового воздействия. М.: Недра. 2000. 381 с.

Кочарян Г.Г., Марков В.К., Марков Д.В., Перник Л.М. О механизме вариаций флюидодинамического режима подземных коллекторов под действием слабых возмущений // Физические поля и динамика взаимодействующих геосфер. Сб. научных трудов ИДГ РАН. М.: ГЕОС, 2007. С. 56–66.

Шехтман Ю.М. Фильтрация малоконцентрированных суспензий. Москва. Изд-во Академии Наук СССР. 1961.

Doan M.L., Cornet F.H. Small pressure drop triggered near a fault by small teleseismic waves // Earth and Planetary Science Letters. 2007. V. 258. N 1–2. P. 207–218.

Kocharyan G.G., Vinogradov E.A., Gorbunova E.M., Markov V.K., Markov D.V., Pernik L.M. Hydrological Response of Underground Reservoirs to Seismic Vibrations // Izvestiya. Physics of the Solid Earth, 2011, Vol. 47, No 12, p. 1071–1082.

Manga, M., C.-Y. Wang. Earthquake hydrology // Treatise on Geophysics, 2007. V. 2. P. 293–320.

Roeloffs E.A. Persistent water changes in a well near Parkfield, California, due to local and distant earthquakes // J. Geophys. Res. 1998. V. 103. P. 869–889.