УДК 550.8.023

ФИЛЬТРАЦИЯ ЖИДКОСТИ В СРЕДЕ С ПЕРЕМЕННОЙ ПРОНИЦАЕМОСТЬЮ

© 2022 г. Т. М. Торрес[1], Н. А. Юдочкин[2], А. А.Таирова[2]*, Г. В. Беляков[2]

[1]Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)
[2]Институт динамики геосфер имени академика М. А. Садовского РАН, Москва, Россия
**E-mail: moscouposte@gmail.com*

В работе рассматривается лабораторное исследование взаимодействия фильтрационного потока с пороупругой средой. В результате воздействия фильтрационного фронта происходит сжатие скелета, что ведет к изменению проницаемости. Эксперименты проводились на двумерной оптически прозрачной модели при различных давлениях нагнетаемой жидкости. В ходе проведения исследования получена картина фильтрационного процесса и деформации пороупругой среды, определены скорости фильтрационной волны, зависимость изменения скорости фильтрационной волны от времени и ширина ее фронта.

Ключевый слова: фильтрационный фронт, упругая волна, ширина фронта, пороупругая среда.

Для цитирования: *Торрес Т.М., Юдочкин Н.А., Таирова А.А., Беляков Г.В.* Фильтрация жидкости в среде с переменной проницаемостью // Динамические процессы в геосферах, 2022, т. 14, № 2. С. 52–61. http://doi.org/10.26006/29490995_2022_14_2_52

Введение

Проблема взаимодействия фильтрационного потока с пористой проницаемой средой актуальна как в решении научных задач, так и технологических. В результате фильтрации потока жидкости происходит сжатие пористого проницаемого массива. Переупаковка зерен скелета влечет за собой изменение фильтрационных параметров пористой среды. Модели деформируемых пористых сред в результате нагружения часто используются при решении задач геомеханики. Взаимодействие фильтрационного потока жидкости с пористым скелетом рассматривается в работе [Ерофеев, Леонтьева, 2021], где представлена математическая модель, описывающая распространение плоской продольной волны во флюидонасыщенной пористой среде с учетом геометрической нелинейности жидкой компоненты, на примере ударной волны. В изотропных однородных средах существует два типа ударных волн [Блитштейн, 1972]. В насыщенной жидкостью пористой среде существует два типа продольных волн и одна поперечная. Используя математическую теорию разрывов с учетом вязкости жидкости, показано [Кукарских, Поленов, 2012] влияние вязкости жидкости и пористости на процесс распространения волн.

Целью представленной работы являлось исследование взаимодействия фильтрационного фронта с пористой средой. Для этого была создана экспериментальная установка, позволившая визуализировать распространение фильтрационной волны. Фильтрационный фронт гонит перед собой упругую волну, которая сжимает пористый скелет, тем самым происходит изменение его проницаемости. Скорость распространения жидкости в пористой среде пропорциональна проницаемости. Фильтрационный фронт движется вслед за упругой волной со скоростью звука, и этот процесс напоминает распространение ударной волны.

Экспериментальная установка

Эксперименты проводились на оптически прозрачной ячейке Хеле-Шоу (рис. 1), заполненной пористым материалом М1 с проницаемостью $k = 7 \cdot 10^{-5}$ см^2, модулем Юнга $E = 4.5$ кПа и коэффициентом Пуассона $\mu = 0.45$. Зазор между стеклянными пластинами S1, S2 размером 12 на 50 сантиметров составлял 3.5 мм. По бокам пористая среда была изолирована непроницаемым жгутом R1.

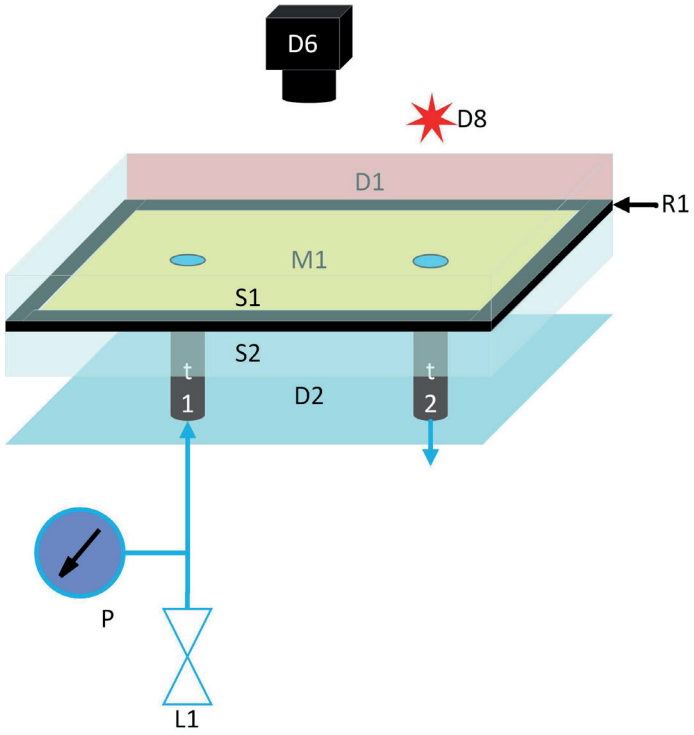


Рис. 1. Схема установки

На пористый массив несмываемыми чернилами была нанесена сетка размером 1×1 см, позволяющая определять изменение напряженно-деформированного состояния скелета. В качестве нагнетаемой жидкости использовался глицерин с вязкостью $\mu \approx 6$ г/см·с, который поступал из L1 в ячейку через трубку 1 и выводился через трубку 2, соединенную с атмосферой. Эксперимент проводился при перепадах давления 2–4 атм. Давление жидкости измерялось на входе в ячейку при помощи преобразователя давления P, подключенного к АЦП. Пористый лист подсвечивался синим светодиодом D2 снизу, что позволяло наблюдать сжатие скелета. Подсветка потока жидкости красным светодиодом D1 контрастно проявляла процесс фильтрации. Для синхронизации получаемых данных с преобразователя давления, видеокамеры и крана использовалась сигнальная лампа D8. Картина происходящих процессов регистрировалась видеокамерой D6.

Методика проведения эксперимента

Первоначально, при достижении пористого массива, жидкость фильтруется в него на небольшую глубину (рис. 2А), что обусловлено пористыми свойствами материала.

Однако из-за большой вязкости жидкости, силы трения достигают значения силы упругости пористой среды, заставляющей ее сжиматься перед фронтом жидкости к точке, где увеличение плотности и уменьшение проницаемости приводит к тому, что жидкость не проходит за пределы этой сжатой области (рис. 2Б). При достижении максимальной деформации, и так как давление жидкости не превосходит прочность материала, а проницаемость настолько велика, что фильтрация минимальна, наступает «переходный момент» (рис. 2В), который продолжается некоторое время.

Затем начинается «чистая фильтрация», когда давление жидкости начинает превосходить упругость материала и поток проходит внутрь пористой среды. Следовательно, далее происходит просто сжатие материала типа гипотетического поршня (рис. 2Г). Эксперимент проходит без разрушения пористого массива при относительно низком давлении нагнетаемой жидкости (менее 3 атм).

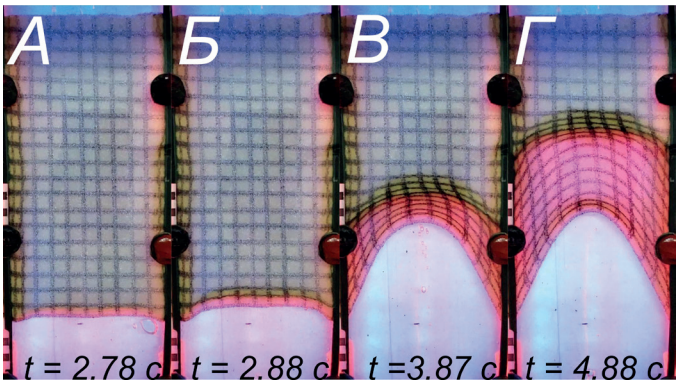
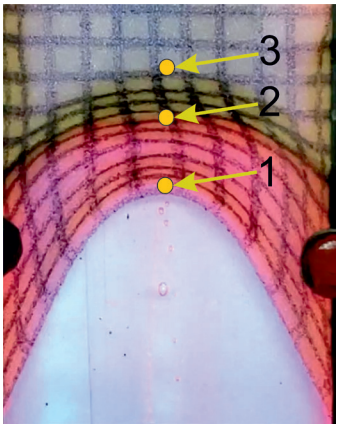


Рис. 2. Последовательные стадии эксперимента

Рис. 3. Анализируемые точки

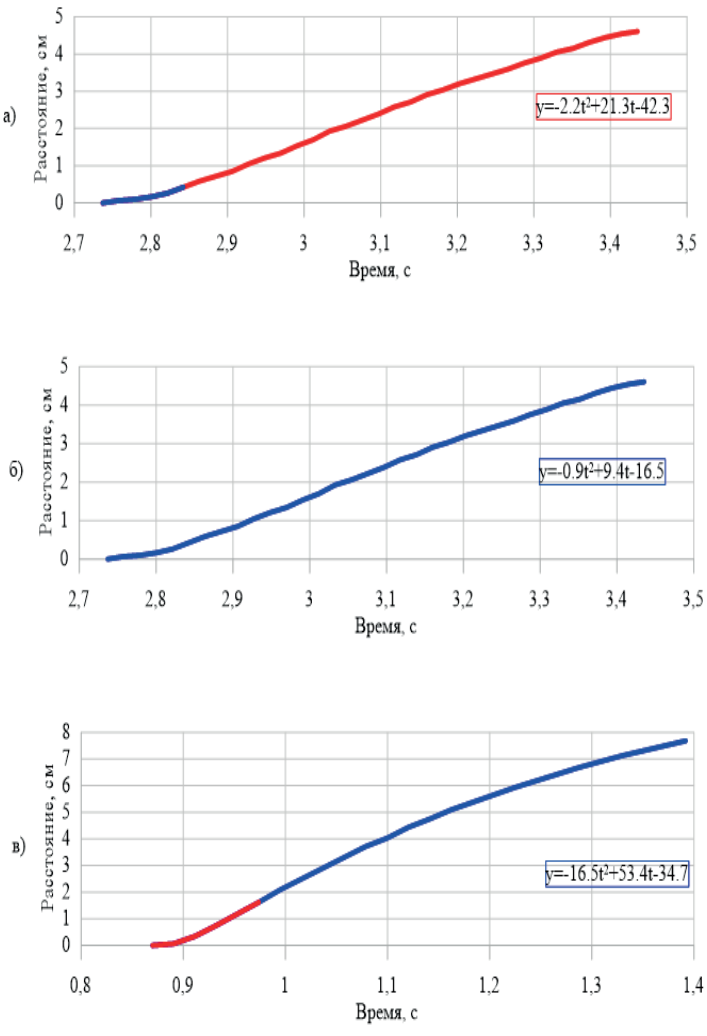


Результаты эксперимента

Рассмотрим подробнее эти процессы. В первую очередь, взяв точку 1 (передний край пористой среды) (рис. 3) за точку для анализа, был построен график ее эволюции во времени. Записав кинематическое уравнение описывающее перемещение точки:

$$S(t) = S(t_0) + v(t_0)\Delta t + \frac{a(t_0)}{2}\Delta t^2 \qquad (1)$$

Видно, что скорость точки 1 стоит в уравнении при слагаемом Δt.



Из графика на рисунке 4а видно, что, за исключением первой миллисекунды (выделена, синим цветом), когда изначально происходит быстрая фильтрация, сжатие протекает с отрицательным ускорением, т.е. в результате трения жидкости о поверхность скелета, наблюдается быстрое затухание фильтрационной волны. Получаем, что экспериментальная скорость сжатия составляет ~21.3 см/с.

Таким образом, получаем, что при давлении P = 3 атм скорость сжатия, или, другими словами, скорость точки 1 составляет ~9.4 см/с (рис. 4б), а при давлении P = 4 атм составляет ~53.4 см/с (рис. 4в).

Стоит отметить, что величина ускорения во всех случаях отрицательна, то есть происходит уменьшение скорости сжатия материала, т.к. на систему действуют силы сопротивления скелета потоку жидкости. Также возникают силы, удерживающие края пористого скелета по бокам. И именно эти возникающие силы растяжения будут заставлять материал рваться в будущем.

Рис. 4. Изменение положения точки 1 со временем при, [атм]: а – 2, б – 3, в) – 4

«Переходный момент»

Вскоре сжатие замедляется, его уже недостаточно, поскольку силы фильтрации не эквивалентны силе сопротивления, создаваемой «поршнем». Следовательно, единственный оставшийся путь для флюида – продолжать фильтроваться в пористую среду. Проникая в пористый массив, жидкость продолжает сжимать скелет слой за слоем, тем самым проталкивая непроницаемый «поршень» вдоль системы. Однако этот «переход» происходит очень плавно, как видно из рисунка 5: процессы проталкивания «поршня» в точке 2 и сжатие скелета в точке 1 происходят одновременно.

На графике, представленном на рис. 6, синим цветом, показана скорость, с которой движется точка 2, а красным — скорость, с которой движется точка 1. Видно, что скорость действительно снижается, так как в случае только сжатия, она была ~21.3 см/с (рис. 4а), а в данном случае ~20.3 см/с (рис. 6а). С другой стороны, скорость, с которой начинается фильтрация, т.е. скорость, с которой движется точка 2, составляет ~4.9 см/с, демонстрирует линейную зависимость.

Также стоит отметить, что скорость фильтрации жидкости внутри пористой среды ниже скорости сжатия материала. То есть сжатие материала происходит легче, чем фильтрация.

В отличие от эксперимента, проведенного при $P = 2$ атм, в опытах, проведенных при давлении 3 и 4 атм, «переходный момент» очень мал и в нем уже можно наблюдать начало разрыва материала вдоль боковых непроницаемых стенок. Так скорости ~10.8 см/с при давлении 3 атм и ~47.8 см/с – при 4 атм.

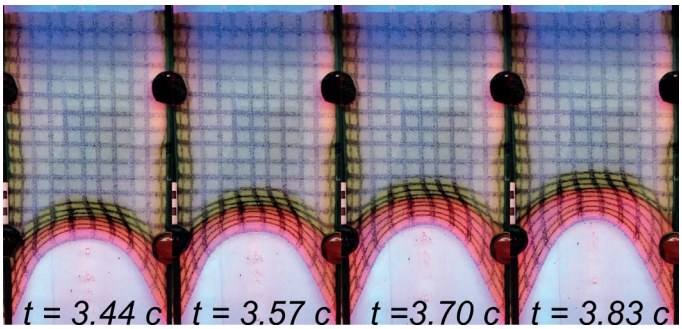


Рис. 5. Стадии «переходного момента»

Фильтрация

После достижения максимального для данного материала сжатия в нижней точке и прохождения «переходного момента» возникает «чистая фильтрация» (рис. 7), то есть происходит течение жидкости в пористом скелете.

Эта фильтрация происходит путем проталкивания «сжатой зоны». Наблюдая за точкой 2, и ее смещением во времени, получена зависимость, представленная на рисунке 8. Поскольку смещение имеет линейный характер, можно определить скорость фильтрации жидкости в пористой среде, которая составляет величину ~3.2 см/с в опыте при 2 атм (рис. 8а).

В экспериментах при давлении 3 атм и выше, за счет увеличения сил, действующих на жидкость, произойдет разрыв пористой среды, так как давление жидкости превышает прочность породы. С началом разрыва пористого массива, глицерин перестает равномерно фильтроваться в скелет,

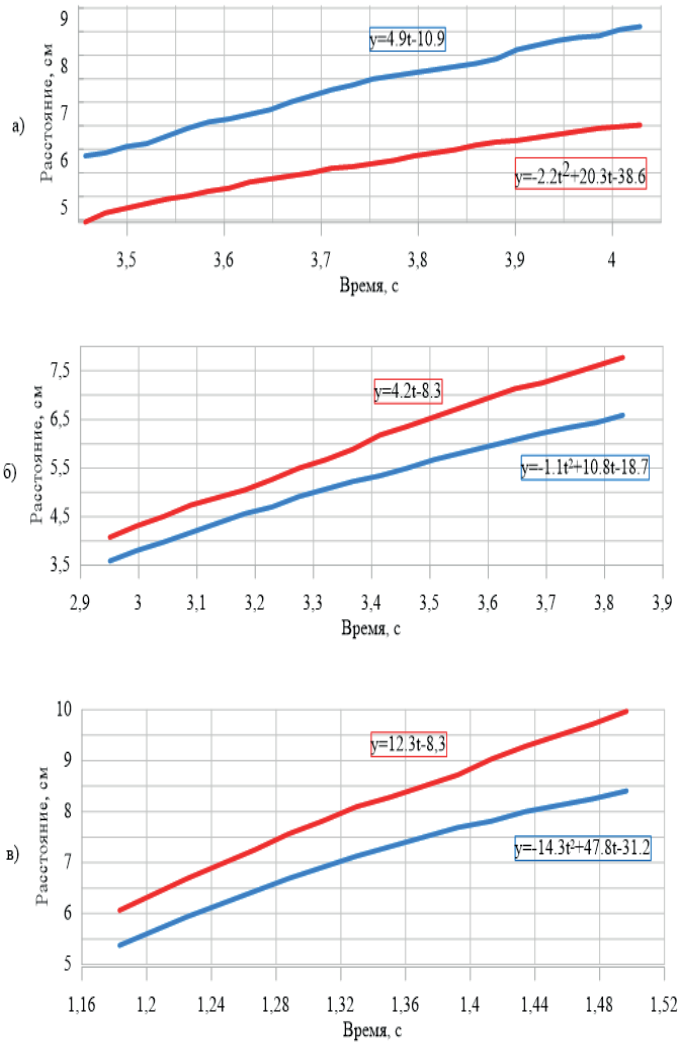


Рис. 6. «Переходный момент» пористой среды в зависимости от точек 1 и 2 в системе при, [атм]: а – 2, б – 3, в – 4

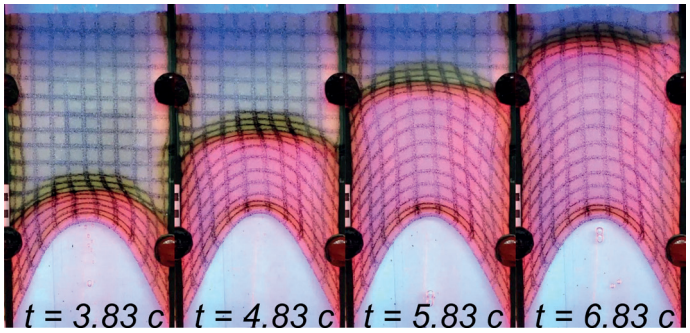


Рис. 7. Фильтрация жидкости

начинает продвигаться в раскрывающееся свободное пространство, т.к. проницаемость там выше.

Здесь также наблюдаются линейные зависимости. Скорости для точки 2 составляют ~ 2.9 и ~13 см/с – для эксперимента, проведенного при давлении 3 атм (рис. 8б) и 4 атм (рис. 8в), соответственно. Однако, продифференцировав по времени полученные данные о положении точки, мы наблюдаем изменение скорости от времени. Глядя на линейную форму тренда полученных значений скорости (рис. 9), приходим к выводу, что значения скоростей точки 2: ~5.8 см/с (рис. 9а), ~3.5 см/с (рис. 9б), ~11 см/с (рис. 9в) являются очень близкими, полученных ранее.

Колебания скорости можно объяснить тем, что с каждой новой порцией жидкости сжатая область накапливает за собой давление жидкости, затем значение давления становится достаточным, чтобы профильтровать жидкость в эту область. После проникновения жидкости далее давление

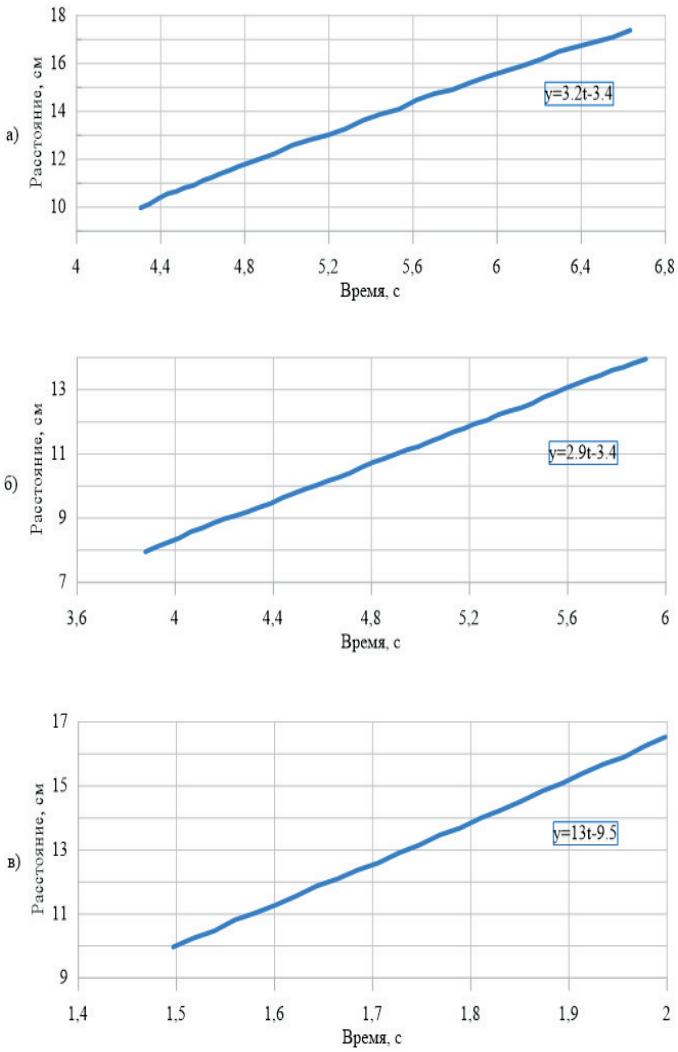


Рис. 8. Изменение положения точки 2 со временем при, [атм]: а – 2, б – 3, в – 4

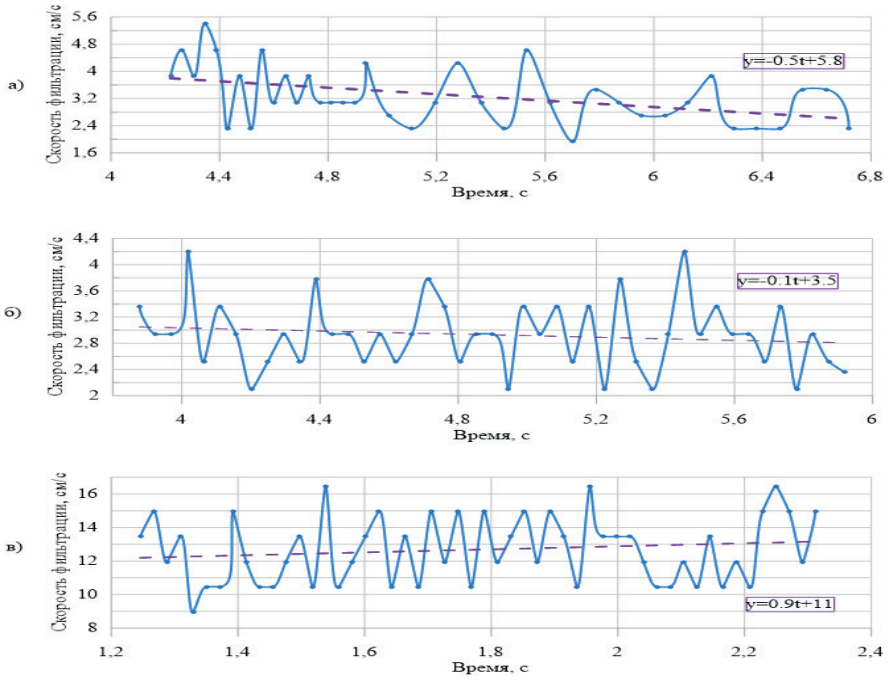


Рис. 9. Изменение скорости фильтрации от времени при, [атм]: а – 2, б – 3, в – 4

выравнивается до следующего накопления. Таким образом, изменение фильтрации жидкости носит импульсивный характер.

Скорость фильтрации

Для параметров приведенной модели $Re << 1$, поэтому для оценки скорости фильтрации был использован закон Дарси:

$$\vec{V} = -\frac{k}{\mu}\vec{\nabla}P \tag{2}$$

Так как рассматривается только одномерный случай, то перепишем закон Дарси в следующем виде в направлении потока:

$$V = -\frac{k}{\mu}\left(\frac{\partial P}{\partial x}\right) \tag{3}$$

Скорость фильтрации была оценена несколькими способами для 2–4 атм соответственно. Полученные значения приведены в Таблице 1.

Таблица 1.

Скорости фильтрации при различных перепадах давления, полученные экспериментально и аналитически

Способ/эксперимент	2 атм	3 атм	4 атм
v_1, см/с	3.1	2.9	13
v_2, см/с	1.6	1	10.3
v_3, см/с	5.7	3.5	11

Первый способ заключался в определении скорости v_1 по перемещению точки 2 во времени (1) и определении ее из графиков, представленных на рисунке 8. Второй способ оценки скорости фильтрации v_2 подразумевал подстановку в закон Дарси (3) полученных данных с манометров и значений коэффициентов вязкости и проницаемости, измеренных в предварительных экспериментах. В третьем способе значение скорости v_3 было получено дифференцированием положения точки 2 по времени (рис. 9).

Оценка ширины фронта фильтрационной волны

Проведем анализ ширины фронта фильтрационной волны или «сжатой зоны» (рис. 10) в зависимости от значений давления, измеренных манометрами, подключенными к системе. Таким образом, можно оценить упругие свойства материала и то, как выбранное давление P влияет на сжатие скелета до «непроницаемой стенки» и как оно будет вести себя в течение времени.

Определим сжатую, несмоченную жидкостью, среду, как δ. Проницаемость в этой зоне будет минимальной до такой степени, что в этой части материала не будет мгновенной фильтрации.

Графики, приведенные на рисунке 11, дают общее представление о том, насколько увеличивается значение δ по мере увеличения давления внутри системы. Стоит отметить, что по мере прохождения жидкости по подводящим трубкам происходит потеря давления, и оно не превышает ~1.5 атм.

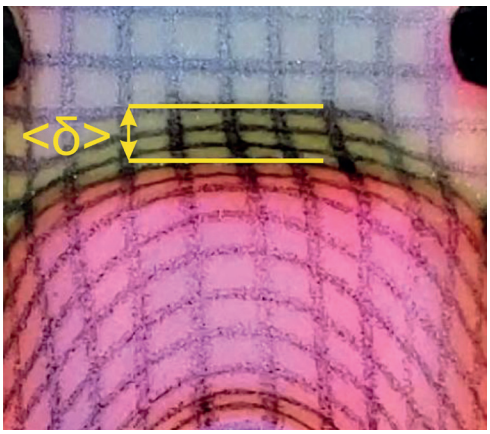


Рис. 10. Ширина сжатой области

Ширина фронта при «сжатии»

На рисунке 12 представлена зависимость, иллюстрирующая то, что с ростом давления растет и толщина δ, так как изначально происходит небольшая фильтрация жидкости, то есть, несмотря на уже начавшийся процесс образования низко проницаемой «стенки», эта зона еще формируется.

Тем не менее, замечено, что даже при увеличении δ в какой-то момент это значение начинает стабилизироваться.

Ширина фронта в «переходном моменте»

Как видно на графиках, представленных на рисунке 13, в момент перехода наблюдается уменьшение δ даже при увеличении давления.

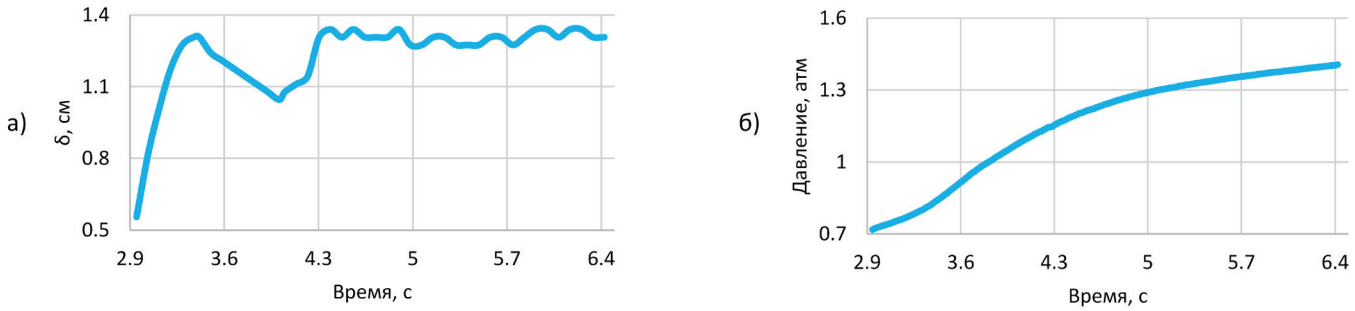


Рис. 11. а) изменение ширины фронта от времени; б) изменение давления от времени

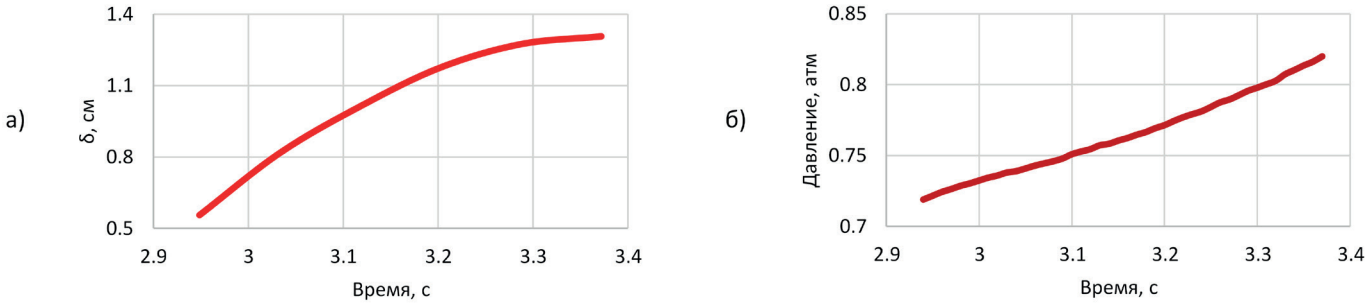


Рис. 12. а) изменение ширины фронта при сжатии; б) изменение давления при сжатии

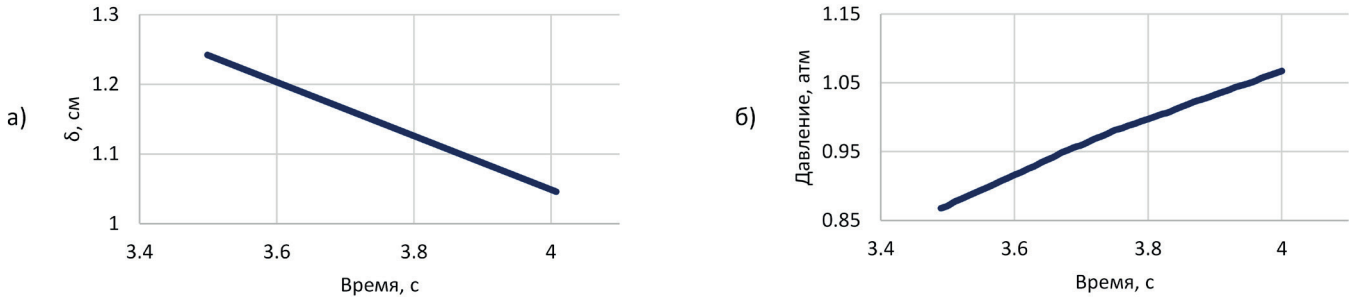


Рис. 13. а) изменение ширины фронта при «переходном моменте»; б) изменение давления при «переходном моменте»

Одним из объяснений уменьшения «сжатой зоны» может быть то, что часть энергии жидкости все еще используется для сжатия скелета, то есть остальная часть энергии продолжает формировать «сжатую зону», но не так быстро и эффективно, как раньше.

Ширина фронта при «фильтрации»

Как мы видим из рис. 14, несмотря на постоянное повышение давления, значение δ колеблется вокруг одного и того же значения.

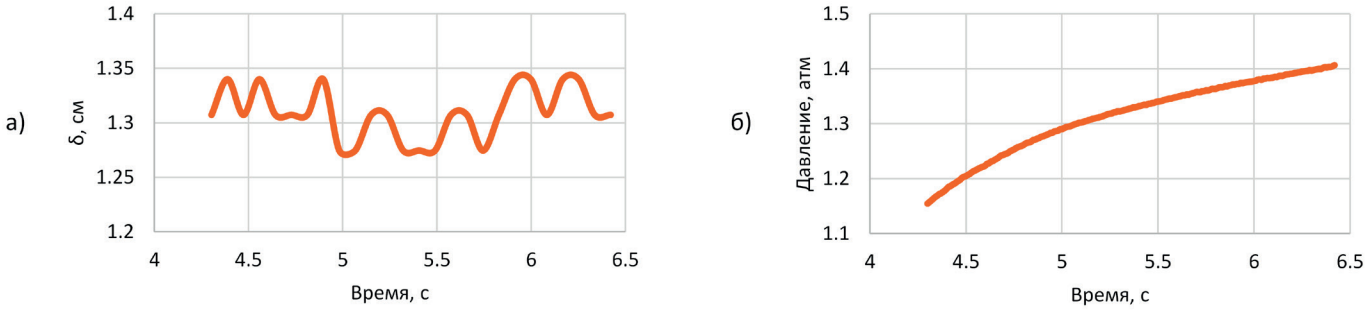


Рис. 14. а) изменение ширины фронта при фильтрации; б) изменение давления при фильтрации

На основании этого эксперимента можно сделать вывод, что среднее значение толщины «сжатой зоны» составляет $< \delta > \sim 1.3$ см и это значение сохраняется в «чистой фильтрации». Получаемое δ равно δmin, так что в этом небольшом скоплении массы пористого массива имеется непроницаемость вдоль оси y, образующая «стенку» толщиной δmin, а также поршень, который будет толкать вдоль направления потока. Таким образом, мы наблюдаем, что полученные значения на самом деле очень близки друг другу, тем самым демонстрируя правильность эксперимента и использование уравнения Дарси в этом случае.

Обсуждение результатов и заключение

В работе приведена физическая модель, представляющая визуальную картину распространения фильтрационного потока в пороупругой среде. Процессы, наблюдаемые в эксперименте, напоминают ударную волну, когда головная ударная волна сжимает пористую среду, а далее следует фильтрационный фронт [Милявский и др., 2010]. В ходе проведения экспериментов была измерена скорость распространения фильтрационного фронта в пороупругом скелете: ~3.1, ~2.9, ~13 см/с при перепадах давления 2, 3, 4 атм соответственно (Таблица 1). Учитывая, что $Re \ll 1$, используя закон Дарси (2), была произведена оценка скоростей распространения фильтрационного фронта, значения которых ~1.6, ~1.02, ~10.3 см/с при перепадах давления 2–4 атм. Также произведена оценка скоростей фронта фильтрации жидкости путем дифференцирования его координаты по времени: ~5.7, ~3.5, ~11 см/с, для 2–4 атм. Приведенные оценки показывают хорошее соответствие с экспериментом. По результатам опытов была измерена ширина фронта фильтрационной волны, и она составила величину ~1.3 см/с при давлении 2 атм. Полученные результаты могут быть использованы при последующем изучении фильтрации в среде с переменной проницаемостью.

Финансирование

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № 122032900167-1).

Список литературы

Ерофеев В.И., Леонтьева А.В. Плоские продольные волны во флюидонасыщенной пористой среде с

нелинейной связью между деформациями и перемещениями жидкой фазы // Вычислительная механика сплошных сред. 2021, т. 14, вып. 1, с. 5–11. DOI:10.7242/1999-6691/2021.14.1.1.

Блитштейн Ю.М., Мешков С.И., Чигарев А.В. Распространение волн в линейной вязкоупругой неоднородной среде // Изв. АН СССР. МТТ. 1972. № 3. С. 40–47.

Кукарских Л.А., Поленов В.С. О распространении упругих волн в насыщенной жидкостью пористой среде // Вестник ВГУ. Серия: Физика. Математика. 2012. № 2. С. 146–150.

Милявский В.В., Фортов В.Е., Фролова А.А., Хищенко К.В., Чарахчьян А.А., Шуршалов Л.В. О механизме усиления давления при увеличении пористости сред, ударно сжимаемых в конических и цилиндрических мишенях // Ж. вычисл. матем. и матем. физ. 2010, том 50, № 12, с. 2195–2207.

FLUID FILTRATION IN A MEDIUM WITH VARIABLE PERMEABILITY

T. M. Torres[1], N. A. Iudochkin[2], A. A. Tairova[2]*, G. V. Belyakov[2]

[1]*Moscow Institute of Physics and Technology* (*National Research University*)

[2]*Sadovsky Institute of Geospheres Dynamics of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

**E-mail: moscouposte@gmail.com*

The paper considers a laboratory study of the interaction of a filtration flow with a poroelastic medium. As a result of the action of the filtration front, the skeleton is compressed, which leads to a change in permeability. The experiments were carried out on a two-dimensional optically transparent model at various pressures of the injected fluid. In the course of the study, a picture of the filtration process and deformation of the poroelastic medium was obtained, the velocities of the filtration wave, the dependence of the change in the speed of the filtration wave on time, and the width of its front were determined.

Keywords: filtration front, elastic wave, front width, poroelastic medium.