

Физическая модель пористой среды с контролируемой проницаемостью на основе полидиметилсилоксана¹

Саметов С.П. *, **

* Институт механики им. Р.Р. Мавлютова УНЦ РАН, Уфа

** Центр микро- и наномасштабной динамики дисперсных систем, БашГУ, Уфа

Для исследований фильтрации в широком диапазоне проницаемости в качестве модели пористой среды был использован пористый сшитый полимер полидиметилсилоксан, проницаемость и пористость которого легко контролируются (0,1–30000 мД). В работе представлено несколько образцов пористой среды из полидиметилсилоксана с различной проницаемостью. Минимально полученное значение фазовой проницаемости для воды в модели пористой среды составляет порядка 0,1 мД.

Ключевые слова: полидиметилсилоксан, закон Дарси, фильтрация, визуализация

1. Введение

Эксперименты, проведенные еще в конце XIX в. и повторяемые до настоящего времени, показывают, что прогнозы, основанные на законе фильтрации Дарси, не оправдываются, если процесс происходит при очень малых скоростях потока. Например, при интерпретации результатов геолого-гидрогеологических работ пренебрежение нелинейностью закона фильтрации может нанести вред качеству теоретических построений и повлечь за собой увеличение трудовых и материальных затрат. В настоящий момент нелинейность закона фильтрации при малых скоростях течения связывают с проявлением неньютоновских свойств фильтрующихся жидкостей, а также других физико-химических эффектов и больших поверхностных сил (сил взаимодействия между жидкостью и твердым скелетом). Неньютоновскими свойствами в пористой среде могут обладать даже ньютоновские жидкости при очень малых скоростях фильтрации. Но с ростом скорости этот эффект в ньютоновских жидкостях исчезает. Принимая во внимание неподвижность приграничного слоя вязкой жидкости у стенок каналов и адсорбированный слой нефти, поверхност-

ный углеводородный слой значительно влияет на фильтрационное поведение жидкости в порах, когда размеры пор соизмеримы с толщиной адсорбированного слоя. Поэтому возникает вопрос об исследовании процессов фильтрации в низкопроницаемых средах с весьма малым пористым пространством. Существует ряд физических моделей пористой среды традиционно используемых в экспериментах по фильтрации, которые включают в себя насыпные модели [1], реальные керны [2,3], модели трещин — ячейки Хеле-Шоу [4] и микрофлюидные системы [5].

2. Методика эксперимента

В работе представлен метод изготовления физической модели пористой среды из сшитого полимера полидиметилсилоксан (ПДМС). ПДМС — химическое соединение, линейный полимер диметилсилоксана, — традиционно используется в технике изготовления так называемых «лабораторий-на-чипах». ПДМС обладает рядом свойств и преимуществ: относительно невысокая цена по сравнению с аналогами, применяемыми в технологиях литографии; нетоксичность; прозрачность; гидрофобность поверхности, которая регулируется с помощью известных разработанных химических методов [6]. Главным преимуществом предлагаемой модели является возможность контроля проницаемости среды (0,1–30000 мД), а физические свойства

¹Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (гранты №№ 16-31-00385-мол_а, 16-31-00294-мол_а).

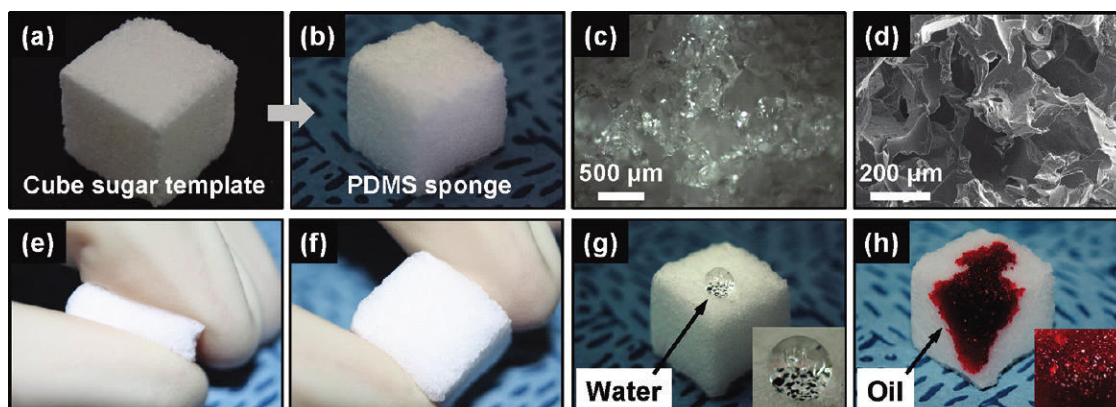


Рис. 1. Пористый полидиметилсилоксан

ПДМС широко известны в литературе [7]. Способ получения модели пористой среды подробно показан в работе [8]. Существуют работы, описывающие применение пористого ПДМС для изучения течения крови в сосудистой сетке [9]. В некоторых работах пористый ПДМС рассматривается в качестве инструмента для избирательной абсорбции масла (нефти) из воды, к примеру, в случае загрязнения водоемов [8], а также для впитывания и переноса жидкостей в микрофлюидных системах [10,11]. Однако идея применения подобной пористой структуры из ПДМС в качестве модели низкопроницаемого нефтеносного керна для исследований фильтрации в литературе не встречается.

В настоящей работе используется полимер марки Sylgard 184 (Dow Corning), состоящий из двух частей: базовая основа и сшиватель, которые традиционно смешиваются в соотношении 10:1. Сахар-рафинад насыщается неспитым полимером под вакуумом таким образом, чтобы пустоты между зернами рафинада заполнились полимером. Для ускорения полимеризации полимер подвергается температурной обработке при 150°C в течение 15 минут, далее сахар вымывается теплой водой (ПДМС не растворим в воде), в итоге остается только «скелет» из сшитого полимера, образующий пористую структуру (рис. 1).

Размеры пор в такой среде порядка нескольких миллиметров (рис. 2), а фазовая проницаемость по воде выше 30 Дарси. Однако, параллелепипед пористого ПДМС достаточно эластичен: изначальная высота параллелепипеда 15 мм может быть сжата до 0,2 мм, что позволяет значительно снизить проницаемость пористой среды.

Для организации фильтрации через пористый ПДМС образец сшитого пористого полимера помещается между двумя пластинами органического стекла, в одной из которых вырезано углубление

параллелепipedной формы (рис. 3). Степень сжатия пористого ПДМС между стеклами напрямую зависит от высоты углубления, и проницаемость пористой структуры определяется степенью сжатия пористого ПДМС в экспериментальной ячейке.

Для фильтрации жидкостей через образцы пористого ПДМС и определения проницаемости среды собрана следующая экспериментальная установка (рис. 4). Дистиллированная вода использовалась после очистки в системе Millipore Milli-Q Gradient A10 (Merck Millipore). Нагнетание воды осуществлялось при постоянном перепаде давления, который поддерживается с помощью контроллера давления 990-005803-050 (0–345 кПа) (Cole-Parmer); воздух в контроллер подается из воздушного компрессора. Регистрация объема дистиллированной воды, проходящей через экспериментальную ячейку, проводится с помощью электронных весов HNR-200 (A&D Weighing) с чувствительностью измерения 0,1 мг, присоединённых к компьютеру. Вес поступающей на электронные весы дистиллированной воды в единицу времени легко пересчитывается в объемный расход воды, проходящей через пористую среду.

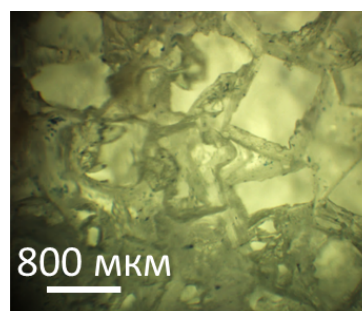


Рис. 2. Фотография пористого ПДМС под микроскопом

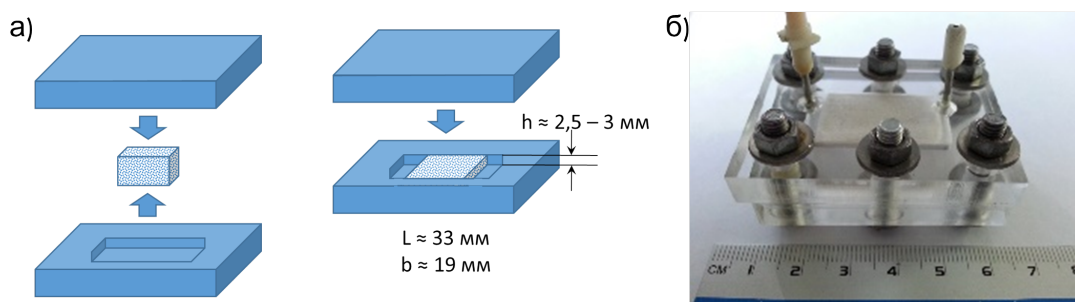


Рис. 3. Схема сборки (а) и фотография (б) экспериментальной ячейки

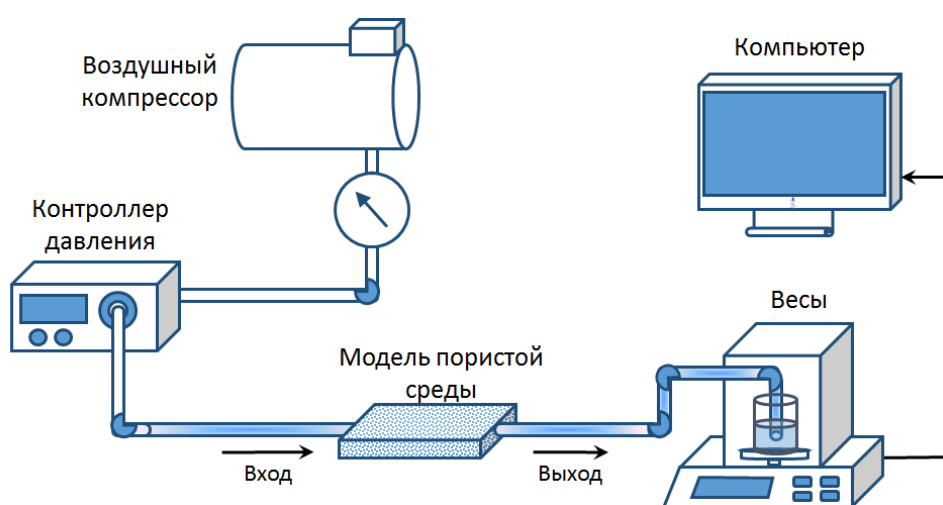


Рис. 4. Схема экспериментальной установки

3. Результаты

Изменяя ступенчато перепад давления, изменен объемный расход дистиллированной воды в нескольких образцах пористого ПДМС различной проницаемости. На рис. 5 представлены графики зависимости объемного расхода от перепада давления для двух образцов пористого полимера, которые показали наименьшую проницаемость.

Видно, что, при заданных перепадах давления, расход протекающей воды достаточно мал и не превышает 5 мкл/с. Так, например, для первого образца (рис. 5, слева) при перепаде давления 350 кПа расход воды равен 4,5 мкл/с. В диапазоне перепадов давления 75–350 кПа зависимость расхода от перепада давления носит практически линейный характер. Несмотря на недостаток экспериментальных точек в промежутке 30–75 кПа можно заметить, что угол наклона отличен от угла наклона линейного участка графика (75–350 кПа). На участке перепада давления до 20 кПа чувствительности измерительной системы не хватает. Подобные

наблюдения зарегистрированы и на втором образце пористого ПДМС (рис. 5, справа): до значения 75 кПа показания весов равны нулю, в диапазоне 80–350 кПа кривая экспериментальных точек практически линейна.

Принимая во внимание недостаточную чувствительность измерительных приборов, все же можно говорить о нелинейной зависимости расхода от перепада давления при малых перепадах до 100 кПа, что, в свою очередь, требует более детального изучения на этом участке перепадов давления с применением более точного оборудования.

Исходя из закона линейной фильтрации Дарси, можно определить фазовую проницаемость пористых образцов:

$$v = k \frac{\Delta p}{\mu l} = \frac{Q}{S} \rightarrow k = \frac{Q \mu l}{S \Delta p},$$

где v — скорость фильтрации воды; Q — объемный расход воды; S — площадь поперечного сечения образца ПДМС (определяется из геометрии углубления, образованного в оргстекле); k — проница-

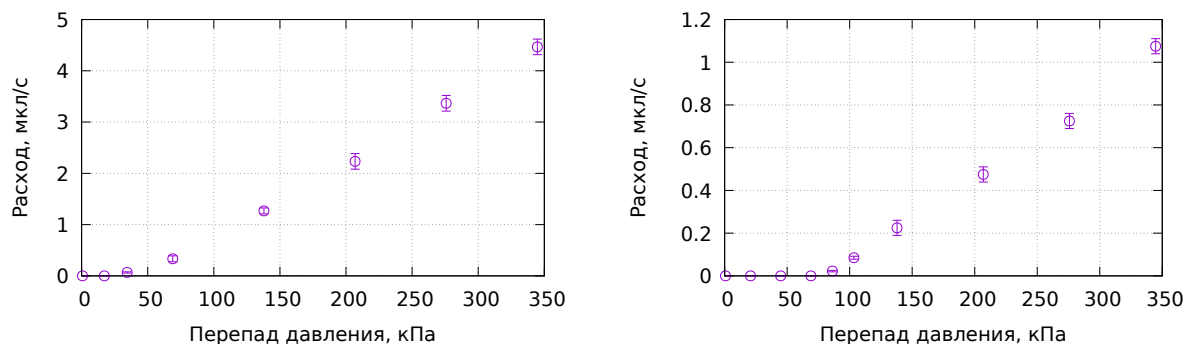


Рис. 5. Зависимость расхода протекающей дистиллированной воды через две модели пористой среды от перепада давления

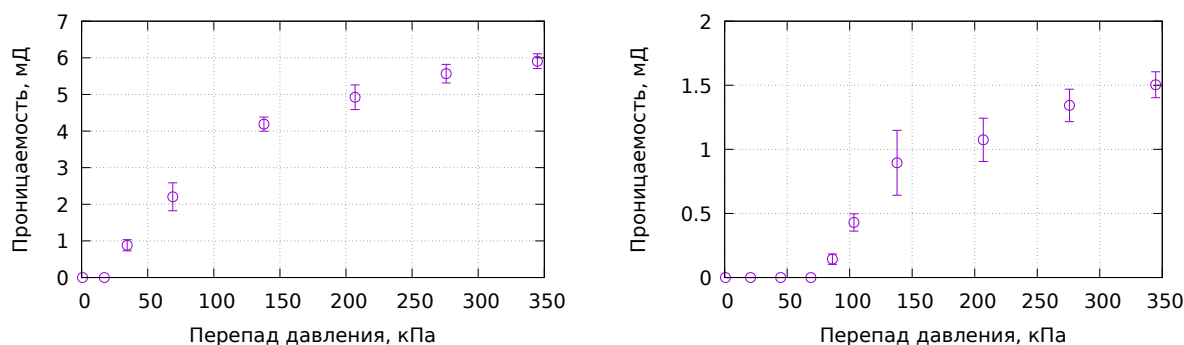


Рис. 6. Зависимость коэффициента фазовой проницаемости по воде от перепада давления для соответствующих образцов (рис. 5)

есть образца; μ — динамическая вязкость воды; Δp — перепад давления; l — длина образца ПДМС.

Полученные путем пересчета значения фазовой проницаемости по воде представлены на рис. 6. Результаты показывают весьма низкую проницаемость образцов: при максимальном рабочем перепаде давления проницаемость не превышает 6 мД для первого образца и 2 мД — для второго. При использовании описанных в работе измерительных приборов, в максимально сжатом состоянии пористого полимера, удалось зарегистрировать фазовую проницаемость по воде порядка 0,1 мД, что соответствует плохопроницаемым горным породам [12]. Нелинейность зависимости расхода от перепада давления явно просматривается на графиках (рис. 6).

ПДМС также является относительно прозрачным для проведения визуализации фильтрации. Серия фотографий иллюстрирует движение фронта подкрашенной воды в срезе пористого полимера (движение слева направо) (рис. 7). Неровность профиля фронта воды указывает на неоднородность плотности пористого ПДМС, где фильтрующаяся вода, главным образом, движется по верхней части

образца пористой среды. Однако, можно говорить, что ПДМС также подходит для визуализаций течения. Шкала в левом нижнем углу на фотографиях соответствует 10 мм.

4. Заключение

В ходе исследований была изготовлена физическая модель пористой среды на основе спитого полимера ПДМС. Главным преимуществом данной модели является возможность контролировать проницаемость среды (0,1–30000 мД), а физические свойства полимера широко известны в литературе. Кроме того, свойства поверхности пористой среды можно модифицировать известными разработанными химическими методами.

Фильтрация дистиллированной воды через изготовленную среду в ходе ступенчатого изменения перепада давления в диапазоне 0–30 кПа показала нелинейную зависимость расхода воды от перепада давления. Проведена визуализация течения подкрашенной воды через пористый ПДМС.

Минимально полученное значение фазовой проницаемости для воды в модели пористой среды составило 0,1 мД. Усовершенствование техники

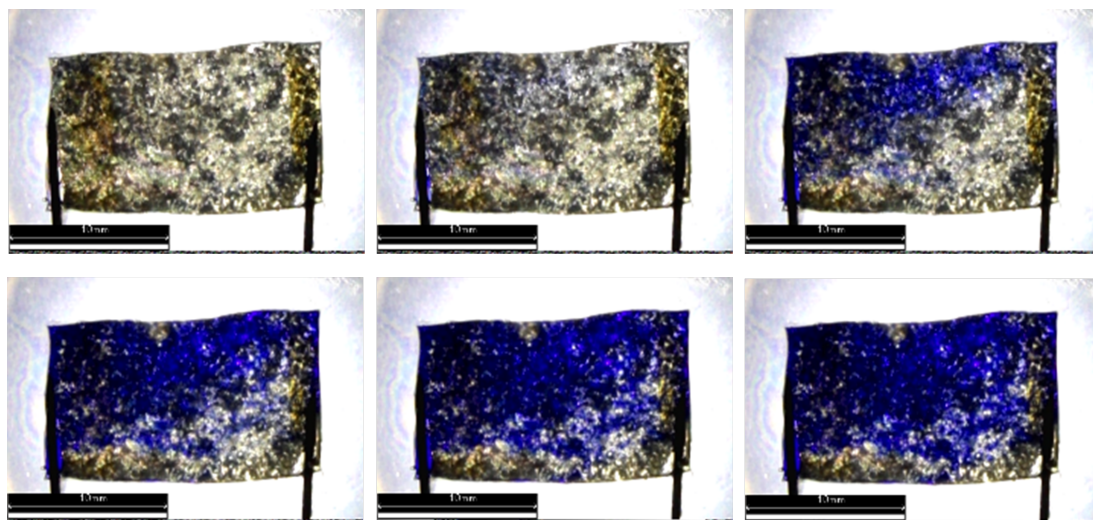


Рис. 7. Визуализация фильтрации подкрашенной воды в пористом полимере

эксперимента, использование более точных измерительных приборов (расходомер, датчик давления и др.), улучшение методики приготовления образцов (дегазация флюида, конструкция экспериментальной ячейки) должны повысить качество эксперимента и зафиксировать меньшие значения коэффициента проницаемости среды, изготовленной из сшитого полимера полидиметилсилоксан.

Список литературы

- [1] Fair G.M., Hatch L.P., Hudson H.E. Fundamental factors governing the streamline flow of water through sand [with discussion] // *Journal (American Water Works Association)*. 1933. Т. 25, No 11. С. 1551–1565.
- [2] Standnes D.C., Austad T. Wettability alteration in chalk: 1. Preparation of core material and oil properties // *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2000. Т. 28, No 3. С. 111–121.
- [3] Standnes D.C., Austad T. Wettability alteration in chalk: 2. Mechanism for wettability alteration from oil-wet to water-wet using surfactants // *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2000. Т. 28, No 3. С. 123–143.
- [4] Saffman P.G., Taylor G. The penetration of a fluid into a porous medium or Hele-Shaw cell containing a more viscous liquid // *Proceedings of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*. The Royal Society. 1958. Т. 245, No 1242. С. 312–329.
- [5] de Haas T.W. et al. Steam-on-a-chip for oil recovery: the role of alkaline additives in steam assisted gravity drainage // *Lab on a Chip*. 2013. Т. 13, No 19. С. 3832–3839.
- [6] Zhou J., Ellis A.V., Voelcker N.H. Recent developments in PDMS surface modification for microfluidic devices // *Electrophoresis*. 2010. Т. 31, No 1. С. 2–16.
- [7] Mata A., Fleischman A.J., Roy S. Characterization of polydimethylsiloxane (PDMS) properties for biomedical micro/nanosystems // *Biomedical microdevices*. 2005. Т. 7, No 4. С. 281–293.
- [8] Choi S.J. et al. A polydimethylsiloxane (PDMS) sponge for the selective absorption of oil from water // *ACS applied materials & interfaces*. 2011. Т. 3, No 12. С. 4552–4556.
- [9] Bellan L.M. et al. Fabrication of an artificial 3-dimensional vascular network using sacrificial sugar structures // *Soft Matter*. 2009. Т. 5, No 7. С. 1354–1357.
- [10] Yang W. et al. Fabrication of a Hydrophilic Poly (dimethylsiloxane) Microporous Structure and Its Application to Portable Microfluidic Pump // *Japanese Journal of Applied Physics*. 2010. Т. 49, No 6S. С. 06GM01.
- [11] Cha K.J. et al. Effect of Replicated Polymeric Substrate with Lotus Surface Structure on Adipose-Derived Stem Cell Behaviors // *Macromolecular bioscience*. 2011. Т. 11, No 10. С. 1357–1363.
- [12] Большая энциклопедия нефти и газа // URL: <http://www.ngpedia.ru/id510023p1.html> (дата обращения 01.10.2016).

Physical model of porous medium with controlled permeability based on PDMS

Sametov S.P. *,**

* Mavlyutov Institute of Mechanics, Ufa

** Center for Micro- and Nanoscale Dynamics of Dispersed Systems, Bashkir State University, Ufa

For filtration studies in a wide range of permeability a model of porous medium was used a porous cross-linked polymer polydimethylsiloxane. Its permeability and porosity is well-controlled in a range of 0.1–30 000 mD. In the work several samples of porous media with various permeability are presented. Obtained minimal relative permeability for water is order of 1 mD in the porous medium model.

Keywords: polydimethylsiloxane, Darcy law, filtration, visualization

