



## Numerical Simulation of Non-Stationary Fluid Filtration in a Digital Model of a Synthetic Porous Medium

E.A. Marfin [1, 2], A.A. Abdrashitov [1], D.V. Chachkov [3], M.A. Vasileva [2]

[1] IPEAT FRC Kazan Scientific Center of RAS, [2] Kazan Federal University, [3] Joint Supercomputer Center, Branch of Federal Scientific Center «Research Institute for System Studies of the RAS»

### Summary

---

The paper studies the influence of superimposed oscillations on the flow of a liquid in a porous medium. The object of the study is a three-dimensional pore space, obtained by the results of X-ray microtomography of a synthetic porous medium. Physically, models of porous samples are created from microscopic glass beads by sintering in a muffle furnace. The flow of fluid in the pore space is described by the continuity and Navier-Stokes equations. Computer modeling was carried out for both stationary flow and flow with superimposed oscillations. The regularities of the flow and the influence of superimposed vibrations on them are determined. The obtained data can be used to improve the methods of wave action on productive formations for oil production.

## Численное моделирование нестационарной фильтрации жидкости в цифровой модели синтетической пористой среды

Е.А. Марфин\* (ИЭПТ ФИЦ КазНЦ РАН, КФУ), А.А. Абдрашитов (ИЭПТ ФИЦ КазНЦ РАН), Д.В. Чачков (ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН), М.А. Васильева (КФУ)

### Введение

Моделирование течений в микроканалах является актуальной задачей, что обусловлено их инженерными приложениями. Особенно эта тема актуальна в технологии «цифрового ядра», активно применяемой для исследования фильтрационных свойств образцов горных пород методами вычислительного эксперимента. Наблюдаемые расхождения в расчетных и экспериментальных значениях проницаемости пористых сред объясняются эффектом проскальзывания на твердой границе, что наиболее характерно при фильтрации газов. Степень разреженности определяется пространственным масштабом задачи и длиной свободного пробега молекул. Течения флюидов моделируются уравнениями Навье-Стокса с адаптированными условиями прилипания. В работе [1] представлен обзор различных моделей и методов, применяемых для более точного описания процессов течения.

Настоящая работа посвящена исследованию нестационарного течения в поровом пространстве. Многочисленные натурные эксперименты, проводимые в лабораторных и промышленных условиях, свидетельствуют о влиянии акустических колебаний на проницаемость пористых сред [2, 3]. Эти и подобные явления, интенсифицирующие внутрипластовые процессы, являются обоснованием методов акустического воздействия на процесс добычи нефти. Применение их в промышленных условиях позволяет увеличить дебит нефти, снизить обводненности и уменьшить энергетические затраты [4-7]. Результаты проводимых авторами работы лабораторных экспериментов свидетельствуют о двух механизмах влияния упругих колебаний на проницаемость пористой среды [3]. В начале волновое воздействие ослабляет скелет пористой среды. Мелкие частицы породы отрываются и выносятся фильтрационным потоком. При этом происходит необратимое изменение проницаемости. Второй механизм имеет гидродинамический характер и заключается в том, что при воздействии упругими колебаниями проницаемость пористой среды увеличивается, а после прекращения воздействия возвращается к начальным значениям. Изучению этого механизма численными методами в микроканалах различной геометрии изучалось нами ранее [8-11], где в качестве объектов исследования были капиллярные трубки, поровое пространство между правильно уложенными сферами и области, полученные по результатам компьютерной микротомографии реальных кернов. Основным результатом численных исследований является установление факта формирования направленного течения при наложении колебаний, скорость которого зависит от амплитуды и частоты колебаний и, главным образом, от геометрии канала. Целью настоящей работы является численное моделирование нестационарного течения в поровом пространстве синтетической пористой среды, для последующего сопоставления результатов с данными натурального эксперимента.

### Метод

В качестве объекта исследования была использована модель синтетической пористой среды, полученной по данным рентгеновской томографии. Вначале были созданы физические модели образцов из синтетической пористой среды, которые были получены при спекании стеклянных микрошариков в муфельной печи. Методика создания таких образцов и их фильтрационные характеристики представлены нами в работе [12]. Исходным материалом были стеклошарики диаметром от 0,01 мм до 0,6 мм, применяемые при нанесении дорожной разметки. Исходные стеклошарики с помощью калиброванных сит были разделены по фракциям. Помещенные в стальные формы стеклошарики нагревались до фиксированных температур, спекались, образуя

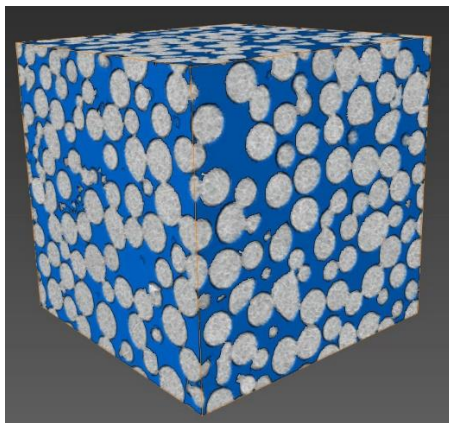
пористую среду, и медленно охлаждались для предотвращения разрушения при термической деформации. Полученные пористые образцы извлекались и после придания им цилиндрической формы исследовались на томографе.

Для исследования использовалась система промышленной рентгеновской микротомографии Phoenix V|tome|X S 240, оснащенная двумя рентгеновскими трубками: микрофокусной с максимальным ускоряющим напряжением 240kV/мощностью 320W и нанофокусной с максимальным ускоряющим напряжением 180kV/мощностью 15W. Для первичной обработки данных и создания объемной модели образца на базе рентгеновских снимков (проекций) использовалось ПО datos|x reconstruction. Для визуализации и анализа данных по элементам объемного изображения используется ПО VG Studio MAX 2.1 и Avizo Fire 7.1. В нашем случае при исследовании использовалась нанофокусная трубка. Разрешение при съёмке составило 10.3 мкм (объем 1-го вокселя).

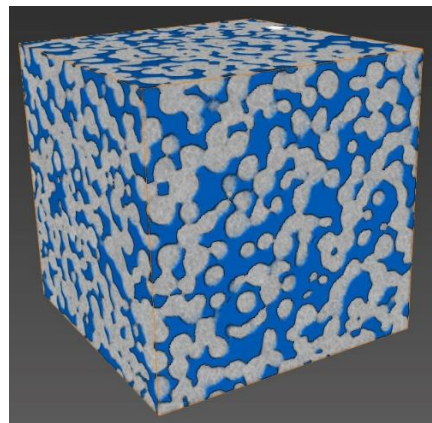
На основе полученной объемной модели образца была создана трехмерная модель порового пространства, которая является расчетной областью. Численное моделирование гидродинамики жидкости в поровом пространстве проводилось с использованием программного комплекса FlowVision, основанном на конечно-объемном методе решения уравнений Навье-Стокса и неразрывности.

## Результаты

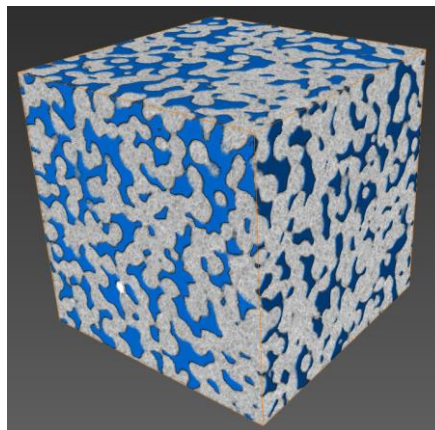
Были созданы различные образцы синтетических пористых сред при различном фракционном составе и температурах спекания. На рисунке 1 представлены полученные объемные модели различных образцов. Синим цветом выделены пустоты между стеклошариками.



Образец №1



Образец №2



Образец №3

**Рисунок 1.** Рентгеновская микросъемка синтетических пористых сред.

Образец №1 был получен при температуре спекания 735°C. Он имеет большую пористость 35,9 % и высокую проницаемость – 8,69 мкм<sup>2</sup>. На рисунке 1 видно, что зона контакта между стеклошариками маленькая, а их форма практически не изменилась. Образец №2 получен при температуре на 5°C больше. Это привело к большему спеканию стеклошариков, в результате чего пористость образца стала меньше – 28,2%, а проницаемость существенно уменьшилась до 3,25 мкм<sup>2</sup>. Тем не менее, на объемной модели можно выделить сферическую форму твердых частичек среды. Образец №3 получен при температуре 742 °C. Пористость его составила 25,4%, а проницаемость – 2,34 мкм<sup>2</sup>.

На основании полученных данных с использованием ПО VG Studio MAX 2.1 была создана трехмерная модель порового пространства образца №2. Загрузка полученного файла в программный комплекс трехмерного моделирования течения жидкости и газа FlowVision позволила создать математическую модель процесса течения жидкости в поровом пространстве, которая включает модель ламинарного течения жидкости и граничные условия. Рабочим телом использовался газ азот. Граничными условиями на входе были стационарная скорость, на выходе – свободный выход. На стенках порового пространства задавалось условие прилипания.

На первом этапе численный расчет проводился на стационарном стационарного режима течения. В результате расчета были получены поля скорости и давления в образце. Измерение перепада давления на образце на входе и выходе позволили получить градиент давления, и по известной формуле Дарси была рассчитана средняя проницаемость образца, которая составила 3,04 мкм<sup>2</sup>, что близко по значению с фактической проницаемостью.

На втором этапе численных исследований в качестве граничного условия была задана зависимость нормальной скорости от времени в виде суммы стационарной составляющей и переменной, описываемой синусоидой с фиксированной частотой и амплитудой, влияние который исследовалось. В качестве рабочего тела использовалась вода.

На основе полученных распределений скорости и давления в расчетной области установлено, что давление внутри пор распределено практически равномерно. Значительный перепад давления наблюдается у узкой части канала, соединяющего поры по направлению течения. Для понимания характера пульсирующего течения были сняты временные характеристики скорости в центральной части канала. Оно представляет собой пульсирующее течение с частотой пульсаций скорости, задаваемой на входе. Усреднение значений пульсаций скорости позволяет заключить, что эти пульсации наложены на некоторое стационарное течение. Численное значение осредненного значения скорости на порядок ниже амплитуды пульсаций, однако, оно сопоставимо со значениями скорости фильтрационного течения жидкости.

Расчетные данные, осредненные по целому числу периодов колебаний, показали, что при наложении колебаний давления в отсутствии стационарного течения формируется направленный от источника излучения поток жидкости. Распределение скорости по сечению канала аналогично стационарному течению при некотором перепаде давления.

## Выводы

На основе рентгеновской микротомографии созданных синтетических пористых сред получены трехмерные области порового пространства. Проведенные численные исследования в полученных расчетных областях показали, что при наложении пульсаций скорости приводит к увеличению средней скорости течения жидкости в синтетической пористой среде. Установлено, что прибавка к скорости зависит от амплитуды и частоты наложенных колебаний. Полученные результаты открывают новое направление исследований в области воздействия колебаний давления на течение жидкости в каналах сложной формы и практического его применения при фильтрации в пористых средах и могут быть использованы при совершенствовании методов волнового воздействия на продуктивные пласты.

## Благодарности

Исследования выполнены при финансовой поддержке РФФИ в рамках научных проектов №16-29-15118, №18-48-16001 и №18-08-01047. Авторы выражают благодарность научно-исследовательской лаборатории Рентгеновской компьютерной томографии КФУ за помощь в проведении исследований.

## Библиография / References

1. Zhang, W.-M., Meng, G., Wei, X. [2012] A review on slip models for gas microflows. *Microfluidics and Nanofluidics*, **13** (6), 845-882.
2. Manga, M., Beresnev, I., Brodsky, E.E., Elkhout, J.E., Elsworth, D., Ingebritsen, S.E., Mays, D.C. and Wang, C.-Y. [2012]. Changes in permeability caused by transient stresses: Field observations, experiments, and mechanisms. *Reviews of Geophysics*, **50**, 2, RG2004.
3. Mardegalyamov, M.M., Marfin, E.A., Vetoshko, R.A. [2018] Change in permeability of a porous medium at ultrasonic action. *Saint Petersburg 2018: Innovations in Geosciences & Time for Breakthrough*, 44532.
4. Beresnev, I.A., and Johnson, P.A. [1994]. Elastic-wave stimulation of oil production: A review of methods and results. *Geophysics*, **59** (6), 1000-1017.
5. Marfin, E.A., Kravtsov, Y.I., Abdrashitov, A.A., Gataullin, R.N., and Galimzyanova, A.R. [2015]. Elastic-Wave Effect on Oil Production by In Situ Combustion: Field Results. *Petroleum Science and Technology*, **33** (15-16), 1526-1532.
6. Lo, W.-C., Sposito, G. and Huang, Y.-H. [2012]. Modeling seismic stimulation: Enhanced non-aqueous fluid extraction from saturated porous media under pore-pressure pulsing at low frequencies. *Journal of Applied Geophysics*, **78**, 77-84.
7. Elshehawey, E.F., El-Saman, A.E.-R., El-Shahed, M. and Dagher, M. [2005]. Peristaltic transport of a compressible viscous liquid through a tapered pore. *Applied Mathematics and Computation*, **169** (1), 526-543
8. Marfin, E.A., and Abdrashitov, A.A. [2016]. Modeling of unsteady flow of viscous fluid in the channel of complex geometry. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, **158**, 012066.
9. Marfin, E.A., Chachkov, D.V., Abdrashitov, A.A. [2017] X-ray microtomography core and numerical simulation of fluid flow in the pore space. *Engineering Geophysics 2017*.
10. Abdrashitov, A.A., Gavrilov, A.G., Galimzyanova, A.R., Marfin, E.A. [2018] Acoustic flow of reservoir fluids in the pore space. *Engineering and Mining Geophysics 2018 - 14th Conference and Exhibition*.
11. Marfin, E.A., Abdrashitov, A.A. [2019] Investigation of fluid flow in a digital core model. *Journal of Physics: Conference Series*, **1158** (3), 032029.
12. Marfin, E., Abdrashitov, A. and Galimzyanova A. [2019] Creating samples of porous media of glass beads for geophysical modeling of filtration processes. *Engineering and Mining Geophysics 2019 15th Conference and Exhibition*.