

УДК 532.546

ВОССТАНОВЛЕНИЕ СТРУКТУРЫ ПОРОВОГО ПРОСТРАНСТВА НА ОСНОВАНИИ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ ТОМОГРАФИИ

В. Б. Бетелин, Н. Н. Смирнов, Л. И. Стамов, Е. И. Скрылева

*Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова,
Федеральный научный центр Научно-исследовательский институт системных исследований
Российской академии наук,
betelin@inbox.ru, ebifsun1@mech.math.msu.su, lyubenstamov@mail.ru, jennyne@yandex.ru*

В работе представлены результаты выделения структуры порового пространства из данных, полученных из обработки рентгеновской томографии образца керна, проведения вычислительного моделирования течения вязкой несжимаемой жидкости в образованной системе каналов и пор, и оценки пористости и проницаемости полученной структуры.

Ключевые слова: вычислительное моделирование, керн, данные томографии, фильтрационные течения, проницаемость, пористость.

DEVELOPING THE STRUCTURE OF CORE PORES BASED ON PROCESSING OF TOMOGRAPHY DATA

V. B. Betelin, N. N. Smirnov, L. I. Stamov, E. I. Skryleva

*Lomonosov Moscow State University,
Scientific Research Institute of System Analysis,
betelin@inbox.ru, ebifsun1@mech.math.msu.su, lyubenstamov@mail.ru, jennyne@yandex.ru*

In this work the results of extracting the system of channels and pores from the data processing of the X-ray tomography of the core sample are presented. Based on the developed pores structure numerical 3-D simulations of viscous incompressible fluid flow in this system and evaluating of porosity and permeability of this structure is performed.

Keywords: numerical simulation, core, tomography data, filtration flows, permeability, porosity.

Исследования керна нефтегазоносных пластов являются важными для проведения различных геологических работ на скважинах. Полученные в результате анализа извлеченных пород сведения о геологической структуре пласта позволяют подобрать оптимальную технологию для эффективного ведения геологоразведочных работ, повышения эффективности бурения, гидроразрыва пласта, нефтеотдачи из низкопроницаемых коллекторов [1-7] и т.п. Различные исследования керна представляют собой весьма трудоемкие и сложные задачи, и сопряжены с рядом трудностей. Многие исследования являются «одноразовыми» и приводят к невозможности проведения повторного опыта, либо каких-либо других экспериментов или к полному разрушению изучаемого образца. В связи с этим значительный интерес представляет создание цифровой модели керна. Создание цифровой модели керна основано на данных, полученных при проведении реальных физических экспериментов над извлеченными образцами среды, в том числе на сведениях, полученных с помощью различных устройств, таких как электронные микроскопы, рентгеновские томографы и других приборов, позволяющих проводить наблюдения за микромиром. Вычислительные исследования пласта дают возможность проведения любого количества сложных экспериментов, в том числе тех, провести которые на реальных образцах практически невозможно, и могут быть ограничены лишь применяемой математической моделью, недостаточно точными томографическими данными и вычислительными ресурсами.

В данной работе представлены результаты моделирования течения вязкой несжимаемой жидкости в восстановленной структуре порового пространства образца песчаника из данных его рентгеновской томографии. В качестве исходных данных рассматривался коэффициент поглощения рентгеновского излучения образцом среды, заданный в 16-ти битном формате. Физически исходный образец представлял собой керн песчаника диаметром около 8 мм и длиной около 19 мм. В численном виде после проведения рентгеновской томографии и восстановления коэффициента поглощения рентгеновского излучения образец был разбит квадратной сеткой размерами $2600 \times 2600 \times 6360$ ячеек (около 43 миллиарда ячеек). Размер вокселя при этом составлял 0.0029896 мм.

В дальнейшем из этих данных выделялась структура каналов и пор на основании выбора порогового значения коэффициента поглощения рентгеновского излучения, т.е. считалось, что все, что выше порогового значения является в рассматриваемой области непроницаемым скелетом; а все, что ниже, является пустым поровым пространством. Полученная структура порового пространства для некоторых пороговых значений коэффициента представлена на Рис. 1-2.

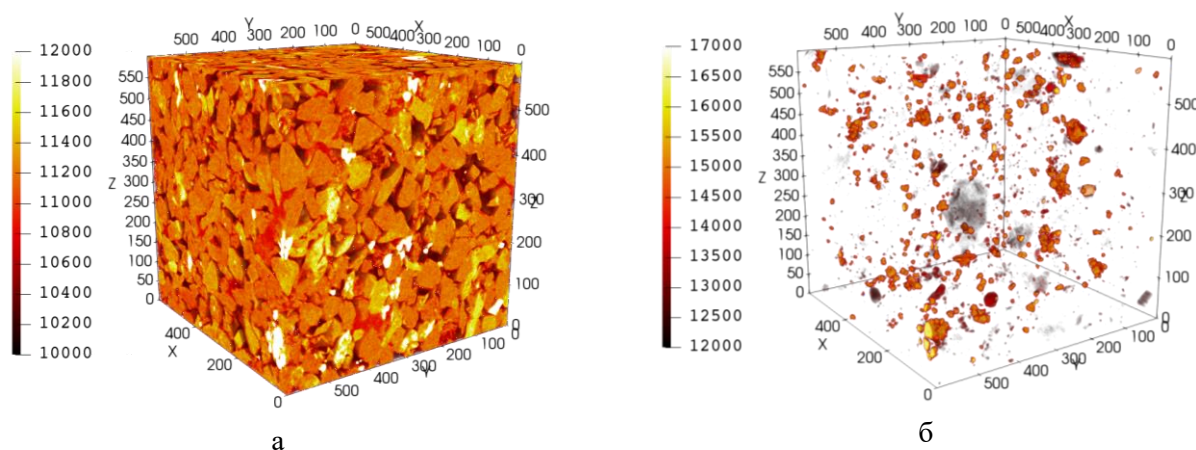


Рис. 1. Выделение веществ с различной плотностью для вырезанной из образца кубической области со стороной 1.79376 мм (600^3 вокселей) и порогового коэффициента поглощения рентгеновского излучения: а) 10000-12000, б) 12000-17000 (высокоплотные вещества)

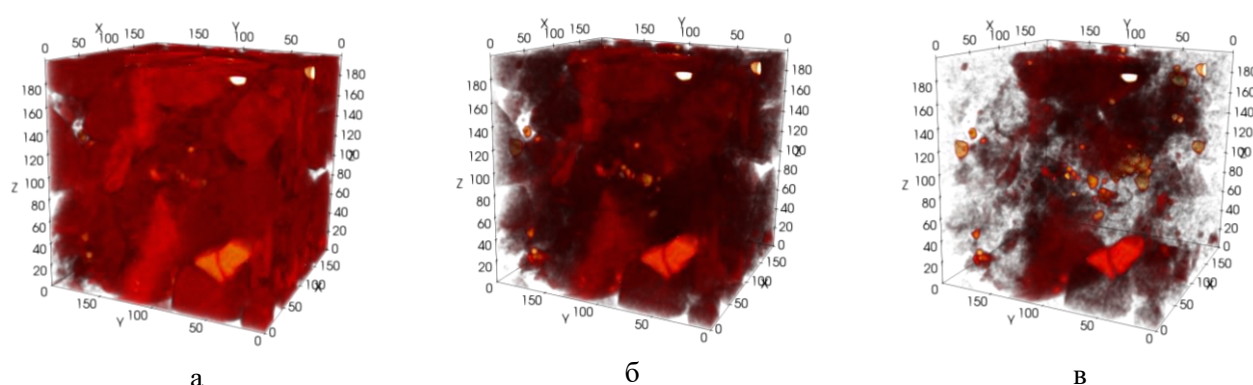


Рис. 2. Восстановленная структура порового пространства для вырезанной из образца кубической области со стороной 0.59792 мм (200^3 вокселей) и порогового коэффициента поглощения рентгеновского излучения: а) 10500, б) 11000, в) 11250

В дальнейшем определялась пористость и проницаемость выделенной структуры, и проводилось моделирование течения вязкой несжимаемой жидкости по полученной системе каналов и пор. Вычисления во многом опирались на результаты и математическую модель, представленные в работах [8-10].

Математическая модель задачи представляла собой гидродинамическую модель Стокса для несжимаемой жидкости и установившихся течений. Рассматривалась следующая система безразмерных уравнений:

$$\operatorname{div} \mathbf{u} = 0, \quad \Delta \mathbf{u} = \nabla p, \quad (1)$$

где $\mathbf{u}$ – вектор скорости, p – давление.

На открытых концах каналов, выходящих на край рассматриваемой расчетной области, задавались условия свободной границы для скорости и распределение давления с единичным модулем вектора-градиента и в зависимости от его направления. За нулевой уровень давления принималось давление в точке $O(0,0,0)$, расположенной в одном из углов рассматриваемого куба. На остальных граничных участках расчетной области задавалось условие нулевой скорости по всем компонентам (прилипание к стенкам).

Для определения безразмерной проницаемости использовались следующие соотношения:

$$\Xi = \mathbf{T} \cdot \mathbf{v}, \quad \mathbf{v} = \left(\frac{q_x}{S_{yz}}, \frac{q_y}{S_{xz}}, \frac{q_z}{S_{xy}} \right), \quad \mathbf{T} = \nabla p = (t_x, t_y, t_z), \quad (2)$$

здесь $\mathbf{v}$ – вектор скорости фильтрации, $\mathbf{T}$ – направление градиента давления, $\mathbf{q} = (q_x, q_y, q_z)$ – суммарный входящий поток на гранях, нормальных к соответствующему координатному вектору. Пористость полученной структуры определялась как отношение объема, занимаемого выделенными каналами и порами, задействованными в моделировании, к объему всего вырезанного из исходного образца куска.

Дискретизация производилась на кубической сетке со сложной геометрией. Использовалась схема 2-го порядка на крестообразном шаблоне. Безразмерный поток рассчитывался последовательным интегрированием полученного решения методом трапеций; само же решение получалось итерационным стабилизированным методом бисопряженных градиентов Bi-CGStab [11]. Для хранения значений полей давления и скорости использовалась разнесенная сетка: узлы поля давления располагались в центрах ячеек, узлы полей скорости – в центрах граней, нормальных соответствующей компоненте [12].

Алгоритм решения задачи состоит из следующих шагов. На первом этапе производилось решение уравнения Лапласа для давления:

$$\nabla^2 p = 0,$$

которое получается при применении оператора дивергенции к уравнению закона сохранения импульсов и последующим исключением производных от скорости с помощью уравнения неразрывности. Далее решалось уравнение Пуассона (1) для компонент скорости на основании рассчитанного поля давления. После нахождения поля скорости рассчитывался внешний поток через грани, и по формулам (2) определялась величина безразмерной проницаемости, при этом шкала расстояния выбирается как 20 длин стороны вокселя. Независимо от этих вычислений определялась пористость выделенной структуры.

Результаты моделирования для вырезанного из середины образца куба со стороной $L=1.19584$ мм представлены на Рис. 3. Для восстановления структуры порового пространства использовалось пороговое значение коэффициента поглощения рентгеновского излучения $I_c=11200$. Для данного значения была получена избыточная пористость образца – более 40 %. В дальнейшем были рассмотрены другие пороговые значения для коэффициента поглощения. Например, результаты для $I_c=10500$ представлены на Рис. 4. Видно значительное уменьшение количества пор в восстановленной структуре. Пористость при этом составила около 13 %, что уже ближе соответствует реальной пористости песчаников.

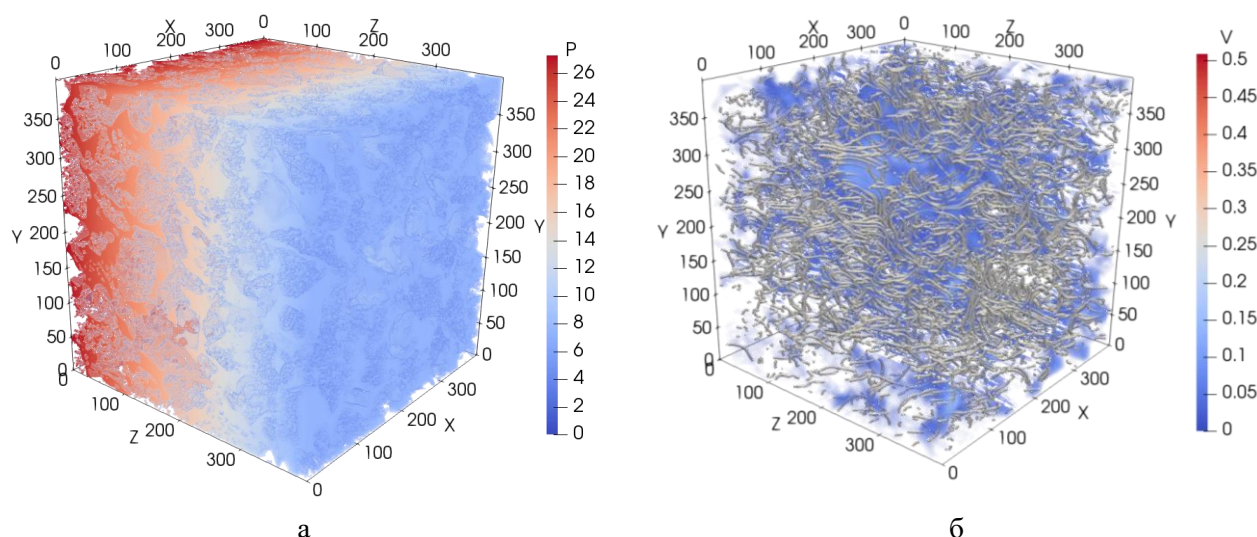


Рис. 3. Распределение безразмерных параметров: давления (а) и скорости с наложенными линиями тока (б) для вырезанного из образца куба со стороной 1.19584 мм (400^3 вокселей). $I_c=11200$

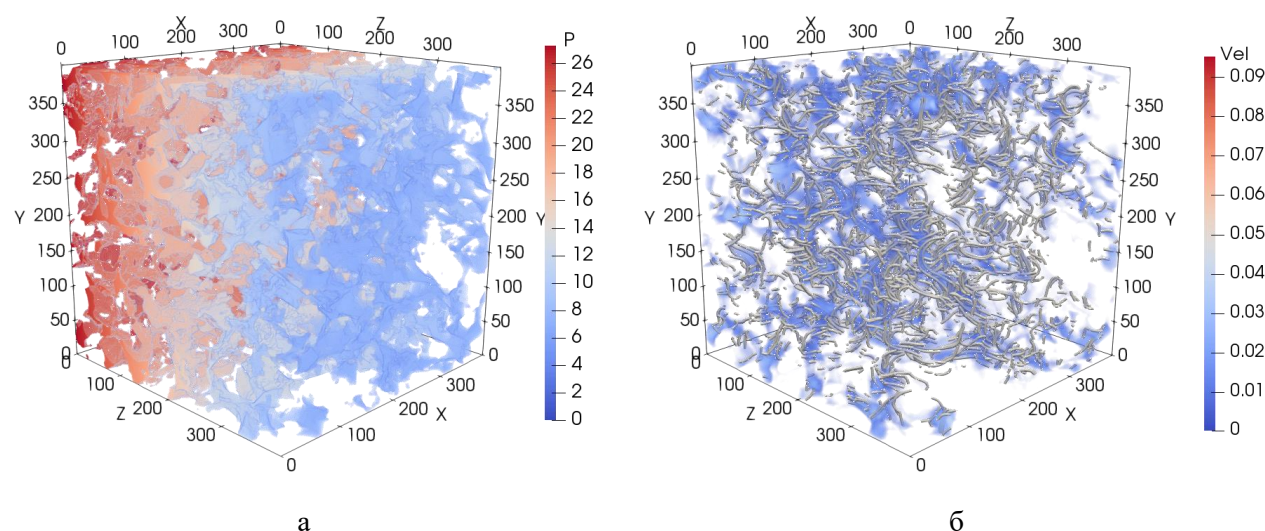


Рис. 4. Распределение безразмерных параметров: давления (а) и скорости с наложенными линиями тока (б) для вырезанного из образца куба со стороной 1.19584 мм (400^3 вокселей). $I_c=10500$

Для этой же вырезанной области зерна было рассмотрено, как изменяется проницаемость и пористость восстанавливаемой структуры в зависимости от выбора порогового значения коэффициента поглощения рентгеновского излучения (Рис. 5). Проводя дополнительные физические эксперименты с данным образцом можно провести калибровку модели и подобрать пороговое значение коэффициента, которое и использовать для дальнейших исследований над рассматриваемым образцом зерна. Из графика видно, что значения параметра поглощения, соответствующие реальной пористости, составляют не более $I_c=11000$.

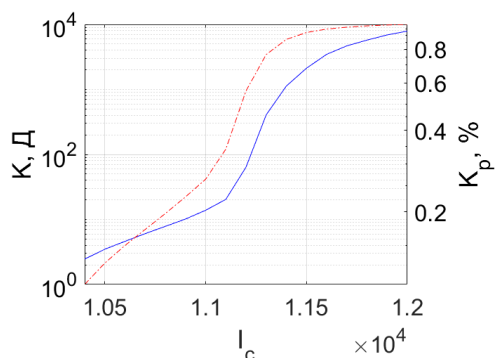


Рис. 5. Проницаемость K (синяя, сплошная, шкала слева) и пористость K_p (красная, штрихпунктирная, шкала справа) восстановленной структуры порового пространства в логарифмическом масштабе в зависимости от выбора порогового значения коэффициента поглощения рентгеновского излучения для куба со стороной 1.19584 мм (400^3 вокселей)

При рассмотрении восстановленной структуры для области, случайным образом вырезаемой из всего образца, было получено, что при увеличении размера вырезаемой области вычисленное значение проницаемости находится в достаточно широком диапазоне (Рис. 6). Всего было проведено несколько серий численных экспериментов для кубов со стороной 0.59792, 0.89688, 1.19584, 1.4948, 1.79376 и 2.09272 мм по сотне случайных вырезок для каждого размера.

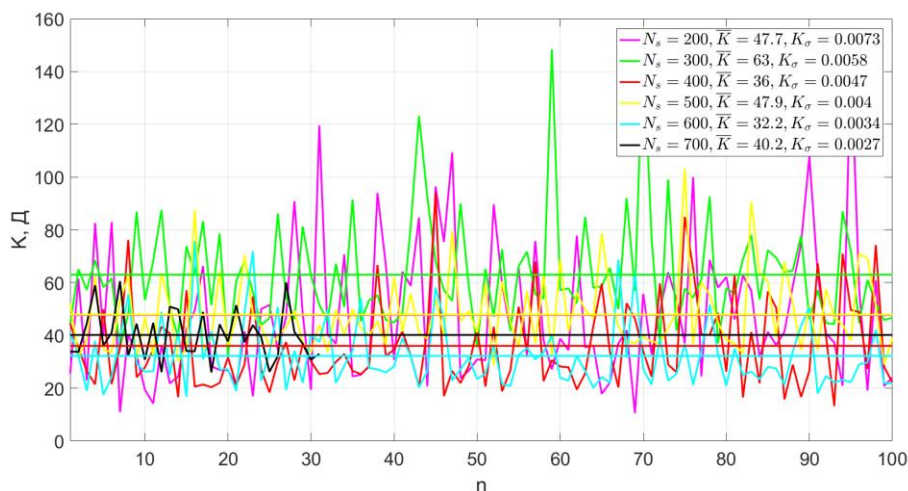


Рис. 6. Проницаемость восстановленной структуры порового пространства для нескольких случайных выборок. Пороговое значение коэффициента поглощения рентгеновского излучения $I_c=11200$

При этом было получено, что значение самой проницаемости колеблется в достаточно широком диапазоне значений, а среднеквадратичное отклонение для каждой серии численных экспериментов с увеличением размера рассматриваемого куба уменьшается. Таким образом, можно сделать вывод, что при рассмотрении области слишком малого размера оценка проницаемости может быть не объективна в связи с сопоставимыми размерами пор и самой области. Для адекватной оценки проницаемости всего образца по вырезаемой малой области необходимо рассмотреть область достаточного объема. Для рассмотренного образца при вырезании кубической области ее сторона должна составлять не менее 2 мм.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 16-29-15080-офи_м).

Литература

1. Смирнов Н. Н., Тюренкова В. В., Киселев А. Б., Никитин В. Ф. Фильтрационные течения в пористой среде // Северный регион: наука, образование, культура. 2015. №2 (32), том 2. С. 74-86.
2. Dushin V. R., Nikitin V. F., Legros J. C., Silnikov M. V. Mathematical modeling of flows in porous medium // WSEAS Transactions on Fluid Mechanics. 2014. Vol. 9. P. 116-130.
3. Smirnov N. N., Nikitin V. F., Maximenko A., Thiercelin M., Legros J. C. Instability and mixing flux in frontal displacement of viscous fluids from porous media // Physics of Fluids. 2005. Vol. 17. 084102.
4. Smirnov N. N., Legros J. C., Nikitin V. F., Istasse E., Schramm L., Wassmuth F., Darcy H. Filtration in artificial porous media and natural sands under microgravity conditions // Microgravity Science and Technology. 2003. 14 (2), P. 3-28.
5. Вольпин С. Г., Смирнов Н. Н., Кравченко М. Н., Диева Н. Н. Моделирование импульсно-волновой обработки нефтяных пластов методом термогазохимического воздействия // Сборник научных трудов ОАО «Всероссийский нефтегазовый научно-исследовательский институт им. акад. А.П. Крылова». 2013. Вып. 149. С. 127-137.
6. Вольпин С. Г., Сайтгареев А. Р., Смирнов Н. Н., Кравченко М. Н., Корнаева Д. А., Диева Н. Н. Перспективы применения волновой технологии термогазохимического воздействия для повышения нефтеотдачи пластов // Нефтяное хозяйство. 2014. №1. С. 62-66.
7. Вольпин С. Г., Смирнов Н. Н., Кравченко М. Н., Диева Н. Н. Оптимизация условий безопасного проведения ТГХВ на нефтяных месторождениях // Экологический вестник России. 2014. № 3. С. 17-21.
8. Никитин В. Ф., Стамов Л. И. Трехмерное вычислительное моделирование течения вязких жидкостей в канальной модели керноsimулятора // Вестник кибернетики. 2016. № 4. С. 7-17.
9. Никитин В. Ф., Стамов Л. И., Михальченко Е. В. Трехмерное математическое моделирование течения вязких жидкостей в многосвязной системе каналов и пор // Вестник кибернетики. 2016. № 2. С. 127-137.
10. Бетелин В. Б., Никитин В. Ф., Смирнов Н. Н., Михальченко Е. В., Скрылева Е. И., Стамов Л. И., Тюренкова В. В. Компьютерный керноsimулятор – подходы и методы // Вестник кибернетики. 2015. № 4(20). С. 33-44.
11. Saad Y. Iterative methods for sparse linear systems. Philadelphia: SIAM, PA, 2003.
12. Ferziger J. H., Peric M. Computational methods for fluid dynamics, 3d edition. Berlin: Springer, 2002.