

Георгий Николаевич КУСАЙКО<sup>1</sup>  
Дмитрий Евгеньевич ИГОШИН<sup>2</sup>  
Алексей Сергеевич ГУБКИН<sup>3</sup>

УДК 662.5

**АНИЗОТРОПИЯ ПРОНИЦАЕМОСТИ  
В МОДЕЛЬНЫХ ПОРИСТЫХ СРЕДАХ,  
ОБРАЗОВАННЫХ ПЕРИОДИЧЕСКИМИ  
КУБИЧЕСКИМИ СТРУКТУРАМИ\***

- <sup>1</sup> аспирант кафедры фундаментальной математики и механики,  
Институт математики и компьютерных наук,  
Тюменский государственный университет;  
инженер-исследователь, Тюменский филиал Института теоретической  
и прикладной механики им. С. А. Христиановича СО РАН  
gkusayko@gmail.com; ORCID: 0000-0002-0543-0814
- <sup>2</sup> кандидат физико-математических наук, начальник лаборатории физики пласта,  
корпоративный центр исследования пластовых систем (керна и флюиды),  
Газпром ВНИИГАЗ (г. Москва);  
доцент кафедры фундаментальной математики и механики,  
Институт математики и компьютерных наук,  
Тюменский государственный университет  
igoshinde@gmail.com
- <sup>3</sup> младший научный сотрудник, Тюменский государственный университет;  
младший научный сотрудник, Тюменский филиал Института теоретической  
и прикладной механики им. С. А. Христиановича СО РАН  
alexshstil@gmail.com

---

\* Работа выполнена в рамках государственного задания (№ госрегистрации  
121030500156-6).

---

**Цитирование:** Кусайко Г. Н. Анизотропия проницаемости в модельных пористых средах,  
образованных периодическими кубическими структурами / Г. Н. Кусайко, Д. Е. Игошин,  
А. С. Губкин // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математи-  
ческое моделирование. Нефть, газ, энергетика. 2022. Том 8. № 2 (30). С. 101-114.  
DOI: 10.21684/2411-7978-2022-8-2-101-114

---

### Аннотация

Один из способов моделирования пористых сред — использование периодических структур. Преимуществом такого подхода является необходимость описания течения жидкости в объеме одной поры (ячейки). В работе рассмотрены течения вязкой жидкости в периодических канальных моделях пористых сред, образованных структурами трех типов: кубической простой (КП), кубической объемноцентрированной (КОЦ) и кубической гранецентрированной (КГЦ). Указанные структуры позволяют моделировать пористые среды в широком диапазоне значений пористости ( $1 \div 48\%$ ).

В выбранных структурах выделены три особых направления течения: вдоль ребра куба, вдоль диагонали квадрата (основания куба), вдоль диагонали куба. Для выбранных направлений разработана методика построения порового пространства в масштабе одной ячейки. Прямое гидродинамическое моделирование было проведено путем численного решения уравнений Навье — Стокса. Течение жидкости рассчитано во всем диапазоне безразмерного модельного параметра  $\alpha$  — степени пересечения сфер, — который характеризует микронеоднородности пористой среды и позволяет легко воспроизводить геометрию порового пространства.

По результатам расчетов на основе уравнения Дарси определены коэффициенты проницаемости для трех основных направлений течения и проведен анализ анизотропии проницаемости в выбранных структурах. В простой кубической структуре наибольшая проницаемость достигается во 2-м направлении (вдоль диагонали основания куба), наименьшая — вдоль основного направления (вдоль ребра куба). В кубической объемноцентрированной структуре наибольшая проницаемость достигается в 3-м направлении (вдоль диагонали куба), наименьшая — вдоль 2-го направления (вдоль диагонали основания куба). В кубической гранецентрированной структуре наибольшая проницаемость достигается во 2-м направлении (вдоль диагонали основания куба), наименьшая — вдоль 3-го направления (вдоль диагонали куба).

### Ключевые слова

Пористая среда, вычислительная гидродинамика, закон Дарси, объемный расход, пористость, проницаемость, анизотропия проницаемости, OpenFOAM.

DOI: 10.21684/2411-7978-2022-8-2-101-114

### Введение

Основными параметрами, характеризующими пористые среды, являются пористость и проницаемость. Для многофазных течений в них — это функции относительных фазовых проницаемостей (ОФП). Экспериментальное определение ОФП затратно как по времени проведения, так и по стоимости самого оборудования. В связи с этим активно разрабатываются численные и аналитические методы, позволяющие описать течения флюидов в пористых средах. Одним из подходов к моделированию, который впервые был предложен Ч. Сликхтером [14], является представление пористой среды в виде регулярных упаковок

шаров. Основным допущением в таких моделях является то, что скелет породы считается неподвижным и недеформируемым. Описание фильтрационно-емкостных свойств периодической пористой среды происходит в объеме одной поры (ячейки). Обычно, если рассматриваются регулярные упаковки, то полагается, что сферы являются непересекающимися [7-9]. Данный подход облегчает определение характеристик пористой среды, однако не дает возможности варьировать пористость в широком диапазоне значений, соответствующих пористости реальных горных пород.

В работах [1-4] были рассмотрены периодические структуры с возможностью задавать требуемую пористость. В [1, 3, 4] скелет пористой среды образован примыкающими друг к другу шаровыми сегментами с различной степенью перекрытия, которую можно интерпретировать как цементированность частиц горной породы между собой. Радиус и степень перекрытия определяются следующим образом:

$$r = \frac{r_0}{1 - \alpha}, \quad (1)$$

$$\alpha = \frac{\delta}{r}, \quad (2)$$

где  $r_0$  — радиус, соответствующий случаю касания сфер;  $\delta$  — разница между текущим радиусом и радиусом в случае касания сфер. В таблице 1 приведена связь длины ребра куба  $L$  с радиусом сфер в случае касания.

Пористость в структурах, описанных в [1, 3], определена аналитически. Значения пористости представлены в таблице 2, где  $\alpha_*$  — предельное значение параметра перекрытия сфер, при котором поры становятся замкнутыми. В кубической объемноцентрированной структуре из-за особого расположения сфер появляются дополнительные пересечения при  $\alpha = 0,134$ , что при переходе через это значение ведет к дополнительному понижению пористости и проницаемости в меньшую сторону.

На рис. 1 приведена зависимость пористости от параметра  $\alpha$  для каждой из кубических структур.

Таблица 1

Связь длины ребра куба с радиусом сфер в случае касания

Table 1

Relation of the edge length of the cube to the radius of the spheres in the case of tangency

Структура	$L$
КП	$2r_0$
КОЦ	$4r_0/\sqrt{2}$
КГЦ	$4r_0/\sqrt{3}$

В настоящей работе исследуется анизотропия проницаемости модельных пористых сред, построенных на основе рассмотренных в [1, 3] кубических структур трех типов: кубической простой, кубической объемноцентрированной и кубической гранецентрированной.

Таблица 2

Пористость в зависимости от безразмерного параметра перекрытия сфер  $\alpha$

Table 2

Porosity depending on the dimensionless sphere overlap parameter  $\alpha$

Структура	Пористость, $m = m(\alpha)$	$m(0)$	$\alpha_*$	$m(\alpha_*)$
КП	$1 - \frac{\pi(2 - 3\alpha^2(3 - \alpha))}{12(1 - \alpha)^3}$	0,4764	0,2929	0,0349
КОЦ	$1 - \frac{\pi\sqrt{3}(1 - 2\alpha^2(3 - \alpha))}{8(1 - \alpha)^3}$	0,3198	0,1340	0,0605
	$1 - \frac{\pi\sqrt{3}(1 - 2\alpha^2(3 - \alpha))}{8(1 - \alpha)^3} + \frac{\pi(\sqrt{3} - 2(1 - \alpha))^2(\sqrt{3} - (1 - \alpha))}{8(1 - \alpha)^3}$		0,1835	0,0055
КГЦ	$1 - \frac{\pi(1 - 3\alpha^2(3 - \alpha))}{3\sqrt{2}(1 - \alpha)^3}$	0,2595	0,1340	0,0359

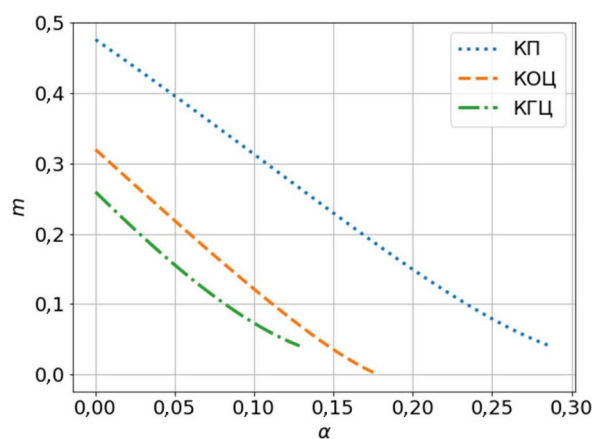


Рис. 1. Пористость в зависимости от безразмерного параметра перекрытия сфер  $\alpha$  для кубических структур

Fig. 1. Porosity depending on the dimensionless sphere overlap parameter  $\alpha$  for cubic structures

### Методика построения порового пространства

Для определения анизотропии проницаемости пористой среды были выделены особые направления течения флюида в рассмотренных периодических структурах: вдоль ребра куба, вдоль диагонали квадрата (основания куба), вдоль диагонали куба.

На рис. 2-3 изображены данные структуры, где сплошным цветом окрашены поровые каналы, а цифры указывают на выделенные особые направления течения. Следует отметить, что для первых двух направлений течения в качестве ячейки

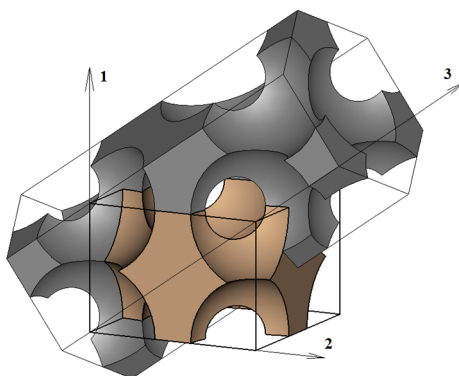


Рис. 2. Кубическая простая структура с направлениями течения: 1 — вдоль ребра куба; 2 — вдоль диагонали квадрата (основания куба); 3 — вдоль диагонали куба

Fig. 2. Cubic simple structure with flow directions: 1 — along the edge of the cube; 2 — along the diagonal of the square (base of the cube); 3 — along the diagonal of the cube

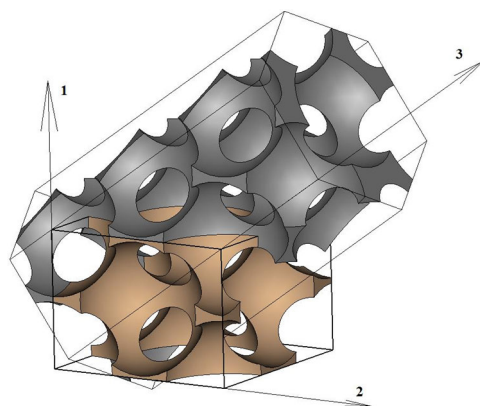


Рис. 3. Кубическая объемноцентрированная (слева) и кубическая гранецентрированная (справа) структуры с направлениями течения: 1 — вдоль ребра куба; 2 — вдоль диагонали квадрата (основания куба); 3 — вдоль диагонали куба

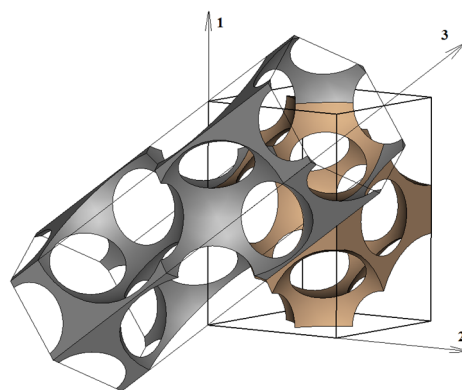


Fig. 3. Cubic body-centered (left) and cubic face-centered (right) structures with flow directions: 1 — along the edge of the cube; 2 — along the diagonal of the square (base of the cube); 3 — along the diagonal of the cube

используется параллелепипед, а для третьего — призма с шестиугольником в основании (соответствующие контуры ячеек выделены сплошной линией). Построение порового пространства выполняется с помощью ядра Open Cascade Technology [12], предназначенного для операций со сплошной конструктивной геометрией.

Основные геометрические параметры представлены в таблице 3, где  $S_i$  — площадь поперечного сечения ячейки для выбранного направления;  $H_i$  — длина ячейки вдоль выбранного направления течения;  $L$  — длина ребра куба.

Для повышения стабильности и скорости сходимости численного решения были применены скругления каналов. Данный подход обусловлен тем, что большинство острых элементов полученной геометрии негативно влияет в итоге на качество вычислительной сетки, а сами узкие места не вносят существенного вклада в однофазное течение жидкости. Радиусы скругления каналов в структурах определены аналитически путем вписывания окружности в наименьшее сечение канала и представлены в таблице 4.

Таблица 3

**Основные геометрические параметры для периодических структур**

Table 3

**Basic geometric parameters for periodic structures**

Структура	Направления течения					
	Вдоль ребра куба		Вдоль диагонали квадрата		Вдоль диагонали куба	
	$H_1$	$S_1$	$H_2$	$S_2$	$H_3$	$S_3$
КП	$L$	$2L^2$	$L\sqrt{2}$	$L^2\sqrt{2}$	$L\sqrt{3}$	$L^2\sqrt{3}$
КОЦ	$L$	$L^2/2$	$L/\sqrt{2}$	$L^2/\sqrt{2}$	$L\sqrt{3}$	$L^2\sqrt{3}$
КГЦ	$L$	$2L^2$	$L/\sqrt{2}$	$L^2\sqrt{2}$	$L\sqrt{3}$	$L^2\sqrt{3}$

Таблица 4

**Радиусы скругления каналов для периодических структур**

Table 4

**Channels rounding radiuses for periodic structures**

Структура	Радиус скругления
КП	$r_0 \left( \sqrt{2} - \frac{1}{1-\alpha} \right)$
КОЦ	$r_0 \left( \frac{2\sqrt{3}}{3} - \frac{1}{1-\alpha} \right)$
КГЦ	$r_0 \left( \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{1 - \cos(\pi - 2 \arccos \sqrt{2/3})}} - \frac{1}{1-\alpha} \right)$

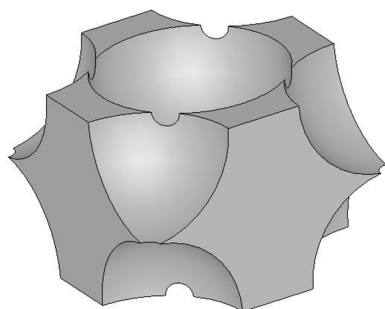


Рис. 4. Простая кубическая структура без скруглений каналов (слева) и со скруглениями (справа)

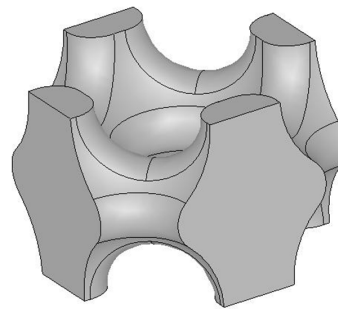


Fig. 4. A simple cubic structure without channel fillets (left) and with fillets (right)

Пример применения скруглений каналов для простой кубической структуры изображен на рис. 4. Доля пористости в структурах со скруглениями каналов составляет в среднем  $86 \div 91\%$  от исходных значений.

#### Математическая постановка

В построенных каналах пористой среды рассматривается ламинарное течение несжимаемой линейно-вязкой изотропной жидкости. В объеме одной поры решается система уравнений Навье — Стокса в стационарной постановке:

$$(\vec{v} \cdot \nabla)\vec{v} = \nu \Delta \vec{v} - \frac{1}{\rho} \nabla p, \quad (3)$$

$$\nabla \cdot \vec{v} = 0, \quad (4)$$

где  $\vec{v}$  — векторное поле скорости;  $p$  — давление;  $\rho$  — плотность;  $\nu$  — кинематическая вязкость.

Граничные условия соответствуют условию прилипания на стенках, заданному перепаду давления на входе и выходе из ячейки и отсутствию течения через плоскости симметрии (боковые горловины):

— вход:

$$\frac{d\vec{v}}{dn} = 0, \quad p = p_1; \quad (5)$$

— выход:

$$\frac{d\vec{v}}{dn} = 0, \quad p = p_2; \quad (6)$$

— стенки:

$$\vec{v} = 0; \quad (7)$$

— горловины:

$$\frac{d\vec{v}}{dn} = 0, \quad \frac{dp}{dn} = 0. \quad (8)$$

По результатам численного решения определяется объемный расход флюида  $Q_i$  через поперечное сечение канала. Далее на основе определения скорости фильтрации и уравнения Дарси с учетом геометрии находится проницаемость структуры в рассматриваемом направлении:

$$\frac{Q_i}{S_i} = \frac{k_i \Delta p}{\mu H_i}, \quad (9)$$

$$k_i = \frac{\mu H_i Q_i}{S_i \Delta p}, \quad (10)$$

где  $\Delta p = p_1 - p_2$  — перепад давления;  $k_i$  — проницаемость среды для выбранного направления;  $\mu$  — динамическая вязкость флюида.

### Численная реализация расчетов

Дискретизация расчетных областей в выбранных структурах производилась с помощью генератора сеток Netgen [13]. Ввиду сложности геометрии были построены нерегулярные сетки, образованные тетраэдрами. Также стоит отметить, что в зависимости от увеличения параметра пересечения сфер  $\alpha$  возникают геометрические особенности, при разрешении которых увеличивается общее число контрольных объемов.

Численное моделирование течения несжимаемой жидкости выполнялись с помощью программного пакета OpenFOAM [5, 6, 11, 15] с использованием алгоритма SIMPLE.<sup>1</sup> Для численного решения системы уравнений Навье — Стокса [10] применялись: при аппроксимации градиента давления — линейная схема Гаусса; для оператора дивергенции — линейная правосторонняя схема Гаусса; для оператора Лапласа — линейная схема Гаусса с коррекцией; для интерполяции — линейные схемы. Также при аппроксимации диффузионных членов были использованы неортогональные корректоры. Перед основным расчетом был задействован решатель potentialFoam, позволяющий на основе уравнения Лапласа или Пуассона задать внутренние поля, которые используются в качестве начального приближения и увеличивают скорость сходимости решения.

### Анализ результатов

В расчетах были использованы следующие значения геометрических параметров:  $r_0 = 10^{-5}$ . Параметры флюида:  $\rho = 10^3$  кг/м<sup>3</sup>,  $\mu = 10^{-3}$  Па · с. Давление на входе и выходе:  $p_1 = 1$  Па,  $p_2 = 0$  Па.

Введем безразмерный коэффициент анизотропии как отношение проницаемости в дополнительном направлении к проницаемости в основном:

$$K_{m,n} = \frac{k_m}{k_n}, \quad n = 1, \quad m = 2,3. \quad (11)$$

<sup>1</sup> SIMPLE (semi-implicit method for pressure linked equations) — метод численного решения уравнений Навье — Стокса (англ.).



В простой кубической структуре наибольшая проницаемость достигается во 2-м направлении (вдоль диагонали основания куба), наименьшая — вдоль основного направления (вдоль ребра куба) (рис. 5). В кубической объемноцентрированной структуре наибольшая проницаемость достигается в среднем в 3-м направлении (вдоль диагонали куба), наименьшая — вдоль 2-го направления (вдоль диагонали основания куба) (рис. 6). В кубической гранецентрированной структуре наибольшая проницаемость достигается во 2-м направлении (вдоль диагонали основания куба), наименьшая — вдоль 3-го направления (вдоль диагонали куба) (рис. 7). Осредненные значения безразмерного параметра анизотропии для каждой из структур представлены в таблице 5.

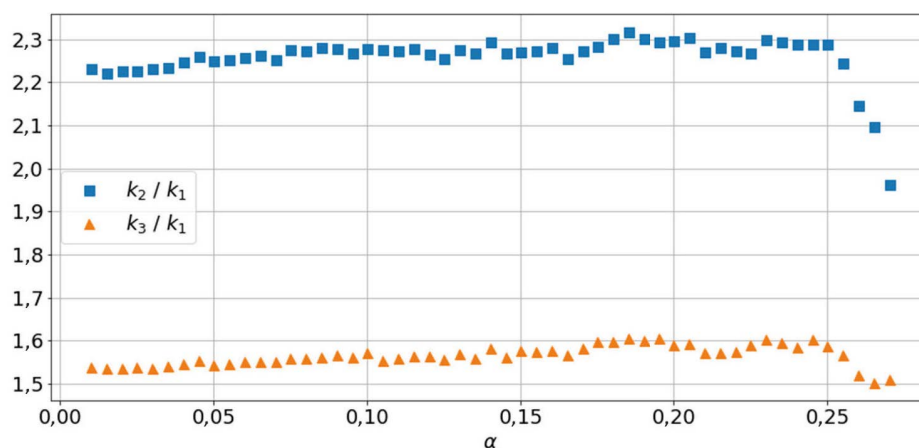


Рис. 5. Анизотропия проницаемости для простой кубической структуры

Fig. 5. Permeability anisotropy for a simple cubic structure

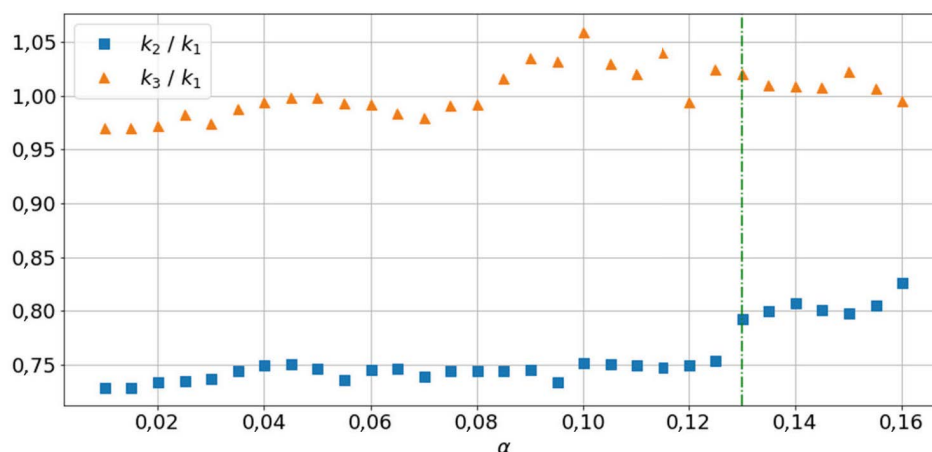


Рис. 6. Анизотропия проницаемости для кубической объемноцентрированной структуры

Fig. 6. Permeability anisotropy for a cubic body-centered structure

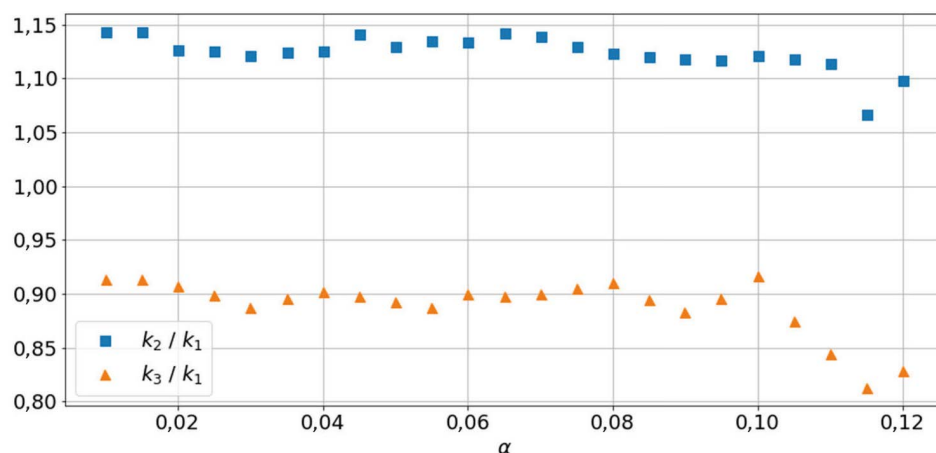


Рис. 7. Анизотропия проницаемости для кубической гранецентрированной структуры

Fig. 7. Permeability anisotropy for a cubic face-centered structure

Таблица 5

Осредненные значения безразмерного параметра анизотропии для кубических структур

Table 5

Averaged values of the dimensionless anisotropy parameter for cubic structures

Структура	$\tilde{K}_{2,1}$	$\tilde{K}_{3,1}$
КП	2,259 1	1,566 0
КОЦ	0,757 1	1,003 6
КГЦ	1,131 2	0,914 8

## Выводы

Рассмотрены модели периодических пористых сред на основе трех кубических структур: простой, объемноцентрированной и гранецентрированной. Для каждой из указанных структур рассчитано стационарное течение ньютоновской жидкости по трем особым направлениям: по основному направлению (вдоль ребра куба), по двум дополнительным направлениям (вдоль диагонали основания куба и вдоль диагонали куба) во всем диапазоне значений безразмерного параметра пересечения сфер. На основе уравнения Дарси определены коэффициенты проницаемости для рассмотренных направлений течения. Самым высоким значением коэффициента анизотропии проницаемости характеризуется простая кубическая структура. Этот факт следует учитывать при моделировании сложных пространственных течений в периодических кубических структурах как с целью увеличения, так и с целью уменьшения проницаемости среды в зависимости от направления течения.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Игошин Д. Е. Моделирование пористой среды регулярными упаковками пересекающихся сфер / Д. Е. Игошин, О. А. Никонова, П. Я. Мостовой // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. 2014. № 7. С. 34-42.
2. Игошин Д. Е. Основные фильтрационные свойства пористой среды, образованной сообщающимися осесимметричными каналами / Д. Е. Игошин, Н. А. Хромова // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. 2015. Том 1. № 4 (4). С. 69-79.
3. Игошин Д. Е. Проницаемость пористой среды периодической структуры с разветвляющимися каналами / Д. Е. Игошин, О. А. Никонова // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. 2015. Том 1. № 2 (2). С. 131-141.
4. Игошин Д. Е. Фильтрационно-емкостные свойства периодической пористой среды ромбоэдрической структуры со скелетом из шаровых сегментов / Д. Е. Игошин, Н. А. Хромова // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. 2016. Том 2. № 3. С. 107-127. DOI: 10.21684/2411-7978-2016-2-3-107-127
5. Игошин Д. Е. Численное исследование зависимости проницаемости от пористости среды, образованной каналами регулярной структуры / Д. Е. Игошин, Р. С. Сабуров // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. 2015. Том 1. № 1 (1). С. 84-90.
6. Игошин Д. Е. Численное определение проницаемости в среде периодической структуры, образованной разветвляющимися каналами / Д. Е. Игошин // Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности. 2015. № 12. С. 30-33.
7. Лейбензон Л. С. Движение природных жидкостей и газов в пористой среде / Л. С. Лейбензон. М.: Гос. изд-во технико-технической лит-ры, 1947. С. 11-24.
8. Маскет М. Течение однородных жидкостей в пористой среде / М. Маскет. М.; Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2006. 640 с.
9. Ромм Е. С. Структурные модели порового пространства горных пород / Е. С. Ромм. Л.: Недра, 1985. 240 с.
10. Anderson J. D. Computational Fluid Dynamics: The Basics with Applications / J. D. Anderson. McGraw-Hill Science, 1995. 574 p.
11. Igoshin D. E. Permeability calculation in periodic porous medium based on rhombohedral structure / D. E. Igoshin, A. S. Gubkin, P. A. Ignatev, A. A. Gubaidullin // Journal of Physics: Conference Series. 2018. Vol. 1128. Paper 012002. DOI: 10.1088/1742-6596/1128/1/012002
12. Open Cascade Technology: Collaborative Development Portal // Open Cascade SAS. 2022. URL: <https://dev.opencascade.org>
13. Schöberl J. An advancing front 2D/3D-mesh generator based on abstract rules / J. Schöberl // Computing and Visualization in Science. 1997. Vol. 1. No. 1. Pp. 41-52. DOI: 10.1007/s007910050004
14. Slichter C. S. Theoretical investigations of the motion of ground waters // C. S. Slichter // U.S. Geological Survey 19<sup>th</sup> Annual Report. 1899. Part II. Pp. 295-384.
15. Weller H. G. A tensorial approach to computational continuum mechanics using object-oriented techniques / H. G. Weller, G. Tabor // Computers in Physics. 1998. Vol. 12. No. 6. Pp. 620-631. DOI: 10.1063/1.168744

**George N. KUSAYKO<sup>1</sup>**  
**Dmitry E. IGOSHIN<sup>2</sup>**  
**Alexey S. GUBKIN<sup>3</sup>**

UDC 662.5

## **PERMEABILITY ANISOTROPY IN MODEL POROUS MEDIA FORMED BY PERIODIC CUBIC STRUCTURES\***

<sup>1</sup> Postgraduate Student, Department of Fundamental Mathematics and Mechanics,  
Institute of Mathematics and Computer Science, University of Tyumen;  
Research Engineer, Tyumen Branch Institute of Theoretical and Applied Mechanics  
named after S. A. Khristianovich, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences  
gkusayko@gmail.com; ORCID: 0000-0002-0543-0814

<sup>2</sup> Cand. Sci. (Phys.-Math.), Head of the Reservoir Physics Laboratory,  
Corporate Center for the Study of Reservoir Systems (Core and Fluids),  
Gazprom, All-Union Research Institute of Natural Gases (Moscow);  
Associate Professor, Department of Fundamental Mathematics and Mechanics,  
Institute of Mathematics and Computer Science, University of Tyumen  
igoshinde@gmail.com

<sup>3</sup> Junior Researcher, University of Tyumen;  
Junior Researcher, Tyumen Branch Institute of Theoretical and Applied Mechanics  
named after S. A. Khristianovich, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences  
alexshstil@gmail.com

### **Abstract**

One way to model porous media is to use periodic structures. The advantage of this approach is the need to describe the fluid flow in the volume of one pore (cell). The flows of a viscous fluid in periodic channel models of porous media formed by structures of three

---

\* The research was carried out within the state assignment of Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (project No. 121030500156-6).

---

**Citation:** Kusayko G. N., Igoshin D. E., Gubkin A. S. 2022. "Permeability anisotropy in model porous media formed by periodic cubic structures". Tyumen State University Herald. Physical and Mathematical Modeling. Oil, Gas, Energy, vol. 8, no. 2 (30), pp. 101-114.  
DOI: 10.21684/2411-7978-2022-8-2-101-114

---

types — cubic simple (CS), cubic body-centered (BCC), and cubic face-centered (FCC) are considered. These structures make it possible to simulate porous media in a wide range of porosity values ( $1 \div 48\%$ ).

In the selected structures, three special flow directions are distinguished — along the edge of the cube, along the diagonal of the square (the base of the cube), along the diagonal of the cube. For the chosen directions, the fluid flow was calculated over the entire range of the dimensionless parameter  $\alpha$  — the degree of intersection of the spheres, which is a model parameter that characterizes the microheterogeneities of the porous medium and makes it easy to reproduce the geometry of the pore space in the numerical solution of the Navier-Stokes equations in direct hydrodynamic modeling.

Based on the results of calculations based on the Darcy equation, the permeability coefficients for the three main flow directions were determined and an analysis was carried out on the permeability anisotropy in the selected structures. In a simple cubic structure, the greatest permeability is achieved in the 2<sup>nd</sup> direction (along the diagonal of the base of the cube), the smallest — along the main direction (along the edge of the cube). In a cubic body-centered structure, the highest permeability is achieved in the 3<sup>rd</sup> direction (along the diagonal of the cube), the lowest — along the 2<sup>nd</sup> direction (along the diagonal of the base of the cube). In a cubic face-centered structure, the highest permeability is achieved in the 2<sup>nd</sup> direction (along the diagonal of the base of the cube), the smallest — along the 3<sup>rd</sup> direction (along the diagonal of the cube).

#### **Keywords**

Porous media, computational fluid dynamics, Darcy's law, volume flow, porosity, permeability, permeability anisotropy, OpenFOAM.

**DOI: 10.21684/2411-7978-2022-8-2-101-114**

#### **REFERENCES**

1. Igoshin D. E., Nikonova O. A., Mostovoy P. Ya. 2014. "Simulation of porous medium in the form of systematically packed intersecting spheres". Tyumen State University Herald. Physical and Mathematical Modeling. Oil, Gas, Energy, vol. 7, pp. 34-42. [In Russian]
2. Igoshin D. E., Khromova N. A. 2015. "Main filtration properties of porous medium formed by communicating axisymmetrical channels". Tyumen State University Herald. Physical and Mathematical Modeling. Oil, Gas, Energy, vol. 1, no. 4 (4), pp. 69-79. [In Russian]
3. Igoshin D. E., Nikonova O. A. 2015. "The permeability of the porous medium with a periodic structure branching channels". Tyumen State University Herald. Physical and Mathematical Modeling. Oil, Gas, Energy, vol. 1, no. 2 (2), pp. 131-141. [In Russian]
4. Igoshin D. E., Khromova N. A. 2016. "Filtration-capacitive properties of the periodic porous medium rhombohedral structure of the skeleton of the ball segments". Tyumen State University Herald. Physical and Mathematical Modeling. Oil, Gas, Energy, vol. 2, no. 3, pp. 107-127. DOI: 10.21684/2411-7978-2016-2-3-107-127 [In Russian]

5. Igoshin D. E., Saburov R. S. 2015. "Numerical research of permeability dependence of porosity in the media formed by regular structure channels". Tyumen State University Herald. Physical and Mathematical Modeling. Oil, Gas, Energy, vol. 1, no. 1 (1), pp. 84-90. [In Russian]
6. Igoshin D. E. 2015. "Numerical determination of permeability in cyclic structure media formed by branching channels". Automation, Telemechanization and Communication in Oil Industry, no. 12, pp. 30-33. [In Russian]
7. Leybenzon L. S. 1947. Movement of natural liquids and gases in a porous medium. Moscow: State publishing house of technical literature. Pp.11-24. [In Russian]
8. Masket M. 2006. The flow of homogeneous liquids in a porous medium. Moscow; Izhevsk: Institute for Computer Research. 640 p. [In Russian]
9. Romm E. S. 1985. Structural models of the pore space of rocks. Leningrad: Nedra. 240 p. [In Russian]
10. Anderson J. D. 1995. Computational Fluid Dynamics: The Basics with Applications. McGraw-Hill Science. 574 p.
11. Igoshin D. E., Gubkin A. S., Ignatev P. A., Gubaidullin A. A. 2018. "Permeability calculation in periodic porous medium based on rhombohedral structure". Journal of Physics: Conference Series, vol. 1128, paper 012002. DOI: 10.1088/1742-6596/1128/1/012002
12. Open Cascade SAS. 2022. Open Cascade Technology: Collaborative Development Portal. <https://dev.opencascade.org>
13. Schöberl J. 1997. "An advancing front 2D/3D-mesh generator based on abstract rules". Computing and Visualization in Science, vol. 1, no. 1, pp. 41-52. DOI: 10.1007/s007910050004
14. Slichter C. S. 1899. "Theoretical investigations of the motion of ground waters". U. S. Geological Survey 19<sup>th</sup> Annual Report, part 2, pp. 295-384.
15. Weller H. G., Tabor G. 1998. "A tensorial approach to computational continuum mechanics using object-oriented techniques". Computers in Physics, vol. 12, no. 6, pp. 620-631. DOI: 10.1063/1.168744