

Влияние пространственного распределения элементов внутренней структуры микроканала на гидродинамические характеристики потока жидкости

© Н.Б. Фаткуллина, С.С. Курбанова, О.А. Солнышкина

Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Россия
E-mail: sabina_kurbanova_2004@mail.ru

Поступило в Редакцию 3 мая 2024 г.
В окончательной редакции 11 июля 2024 г.
Принято к публикации 30 октября 2024 г.

Применен численный подход к описанию поведения потока в микроканале с недеформируемыми структурными элементами. Изучено влияние пространственного распределения элементов внутренней структуры канала на интегральные характеристики системы. В частности, рассмотрено изменение проницаемости модели при различных значениях удельной поверхности элементов канала и при переходе ко второму масштабу пористости с сохранением общей пористости системы. Получены картины течения и поля скоростей в каналах сложной геометрии. Также определена зависимость проницаемости среды от пространственного распределения микроразмерных столбиков внутри канала.

Ключевые слова: гидродинамика, течения Стокса, двойная пористость, микроканалы.

DOI: 10.61011/PJTF.2024.23.59399.6505k

Электронная промышленность в последние годы характеризуется активным развитием производства трехмерных чипов, где несколько подложек с электронными компонентами устанавливаются параллельно на расстоянии 50–100 μm . Трехмерная структура устройств усложняет процесс отвода тепла. Это приводит к повышенному интересу инженеров к разработке жидкостных микромасштабных охлаждающих систем [1]. Для создания таких систем необходимо детальное понимание гидродинамических процессов в микроканалах. В работе [2] представлен подход к совместному проектированию микрофлюидных систем и электроники и продемонстрированы результаты измерений эффективности микроканального теплообменника, интегрированного в конструкцию трехмерных чипов. В случае применения микротеплообменников в сравнении с обычными возникают особенности, которые требуют более детального изучения. Одним из важных факторов, который необходимо учитывать при конструировании микротеплообменников, является геометрия структуры, поскольку она должна обеспечить максимально возможную поверхность теплообмена при приемлемых гидродинамических потерях.

В литературе довольно подробно изучено влияние вариации поперечного сечения канала и добавления ребрения на скорость теплопередачи [3,4]. Для повышения эффективности теплообменников в наши дни также активно применяются микроканалы со сложной внутренней структурой. Например, плоские микроканалы, содержащие массивы распределенных столбиков. Основной особенностью конфигурации является увеличение площади контакта поверхности с охлаждающей жидкостью и осуществление лучшего перемешивания в потоке. В большинстве рассмотренных работ варьировалась форма элементов [5] и исследовались простые слу-

чай пространственного расположения столбиков: рядами или в шахматном порядке [6] с равным расстоянием между столбиками. В то же время остается открытым вопрос об эффективности двух масштабов упаковки этих элементов.

В связи с этим целью настоящей работы является численное исследование влияния пространственного распределения столбиков внутри плоского микроканала на гидродинамические потоки вязкой жидкости и интегральные характеристики течения.

Рассматривается периодическое течение вязкой жидкости при постоянном перепаде давления в микроканале прямоугольного сечения со сложной внутренней структурой, состоящей из недеформируемых цилиндрических элементов, расположенных поперек потока. Предполагается, что инерционными силами можно пренебречь в связи с медленным течением жидкости, характерным для процессов на микромасштабе. Таким образом, установившееся течение жидкости можно описать уравнением Стокса и уравнением неразрывности

$$-\nabla p + \mu \left(\frac{\partial^2 u_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u_z}{\partial z^2} \right) = 0,$$

$$\frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial y} + \frac{\partial u_z}{\partial z} = 0, \quad (1)$$

где p — давление, u_x , u_y , u_z — компоненты вектора скорости, μ — динамическая вязкость. На удельной поверхности канала S_s (совокупность площадей стенок канала и недеформируемых столбиков) задается условие прилипания. На входе и выходе микроканала задается условие периодичности

$$\mathbf{u}|_{x=0} = \mathbf{u}|_{x=L} = \mathbf{u}_s, \quad \mathbf{f} = \boldsymbol{\sigma} \cdot \mathbf{n},$$

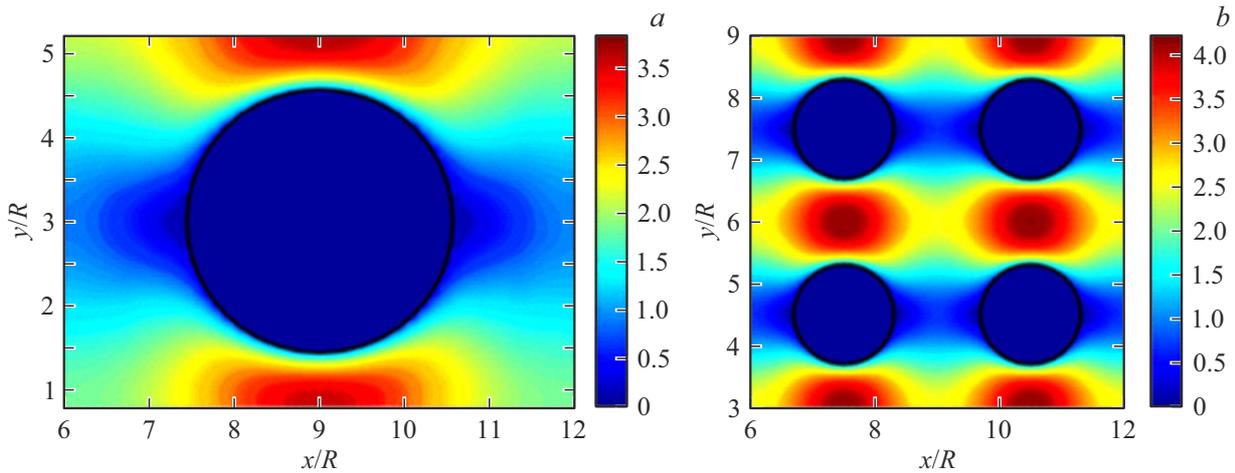


Рис. 1. Поля осредненного модуля скорости в канале при $k_s = 1$ (a) и 0.25 (b).

$$\mathbf{f}|_{x=L} = -\mathbf{f}|_{x=0} + \mathbf{f}_p = -\mathbf{f}_S + \mathbf{f}_p, \quad \mathbf{f}_p = \mathbf{i}_x \Delta p, \quad (2)$$

где \mathbf{n} — нормаль к поверхности; \mathbf{x} — радиус-вектор рассматриваемой точки; \mathbf{f} — разность векторов нормальных напряжений; σ — тензор напряжений; L — длина фрагмента расчетной области или длина периодичности по направлению x ; S — индекс входного сечения канала; p обозначает добавку к вектору напряжений, ассоциированную с заданным перепадом давления.

При реализации вычислительных экспериментов применяется разработанный ранее авторами трехмерный метод граничных элементов, ускоренный с помощью быстрого метода мультиполей на гетерогенных вычислительных архитектурах [7,8]. Этот метод позволяет покрывать сеткой не всю расчетную область, а только поверхности рассматриваемых элементов, что значительно снижает вычислительную сложность при решении трехмерных задач. Ранее авторами было проведено сопоставление результатов, полученных с помощью реализованных программных модулей, с экспериментальными данными по течению жидкости в микроканалах с двойной пористостью [7]. Было показано хорошее согласие между экспериментальными и вычислительными данными.

В рамках исследования проведены численные эксперименты по течению вязкой несжимаемой жидкости в плоских микроканалах с различным распределением столбиков (длина канала $180 \mu\text{m}$, ширина $120 \mu\text{m}$, высота $10 \mu\text{m}$). При одном масштабе пористости менялось их количество и пространственное распределение. Для создания второго масштаба пористости при одинаковом количестве столбиков их расположение изменялось путем выделения групп по девять столбиков и варьирования расстояния как между группами, так и между столбиками в группе. Общая пористость постоянна, она определяется как отношение объема свободного пространства к объему всего канала вместе с элементами и составляет $m = 0.8$. В первом варианте число структурных элементов варьировалось от 1 до 4.

Для удобства введен коэффициент, равный отношению площади поперечного сечения одиночного столбика к общей площади поперечных сечений всех элементов (k_s). Во втором случае для оценки гидравлического радиуса образованных каналов используются ширины широких (w_b) и узких (w_s) поровых каналов:

$$r_b = hw_b/2(h + w_b), \quad r_s = hw_s/2(h + w_s),$$

где h — высота канала. Отношение гидравлического радиуса широкого канала к гидравлическому радиусу узкого канала k_r является геометрическим коэффициентом, изменение которого влияет на картину течения в канале в целом. Для рассматриваемых в настоящей работе вариантов структур отношение гидравлического радиуса широких поровых каналов к узким варьируется от 1 до 2.5. Были получены картины течения вязкой несжимаемой жидкости в каналах при $k_s = 0.25-1$. На рис. 1 представлены поля осредненной абсолютной скорости потока в каналах с коэффициентом $k_s = 1$ и 0.25. Диаметры цилиндрических элементов d в каналах составили 30.27 и $15.13 \mu\text{m}$ соответственно.

Показано, что с увеличением коэффициента k_s , а следовательно, с возрастанием удельной поверхности элементов при сохранении пористости максимальная скорость течения жидкости увеличивается. Основной поток жидкости приходится на продольные области между элементами, а максимум скорости наблюдается в центре между столбиками. Подобные вычисления поля скорости проведены для каналов с двумя масштабами пористости (рис. 2). Получены картины течения для каналов с отношением гидравлических радиусов $k_r = 1$ и 2.5. При переходе ко второму масштабу пористости происходит перераспределение потока. Появляются зоны с существенно большими скоростями потока, образующиеся в продольных каналах между массивами столбиков.

Немаловажную роль для эффективного применения разрабатываемых структур в микротеплообменниках играет их проницаемость, которая определяет пропускную

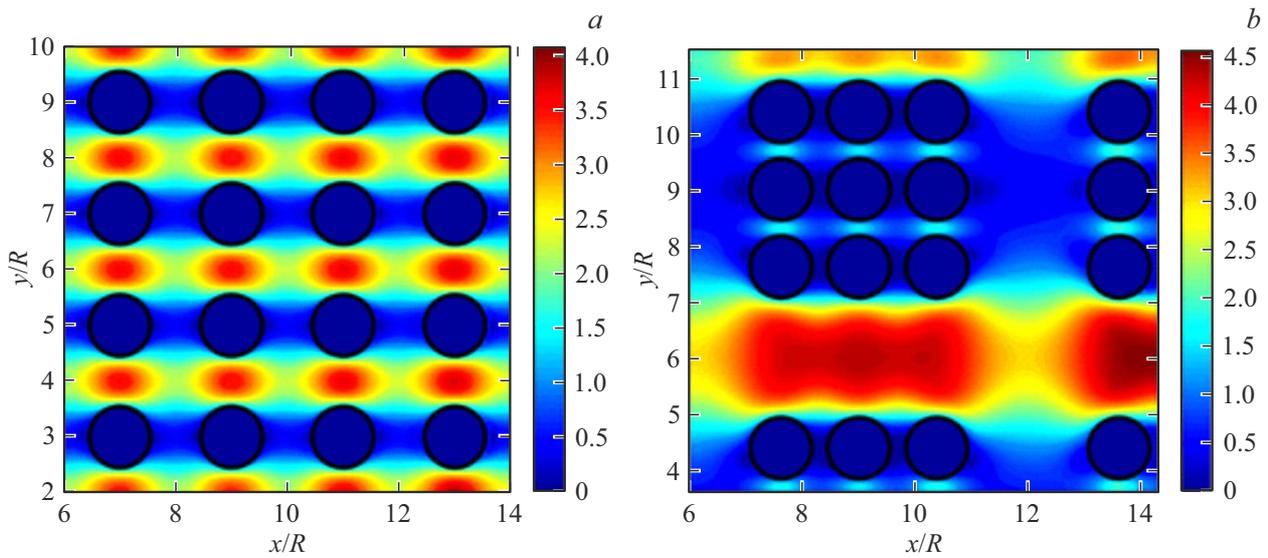


Рис. 2. Поля осредненного модуля скорости в канале при $k_r = 1$ (a) и 2.5 (b).

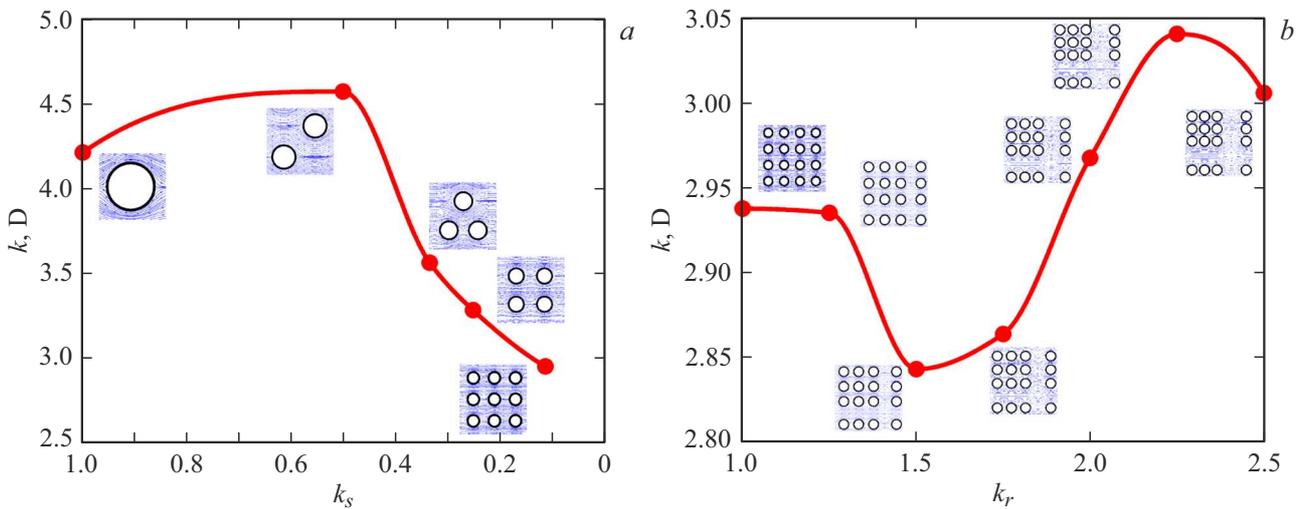


Рис. 3. *a* — зависимость проницаемости от коэффициента k_s в модели с одним масштабом пористости. Блоки на рисунке связаны с коэффициентом k_s : чем он меньше, тем больше элементов в блоке. *b* — зависимость проницаемости от отношения гидравлических радиусов k_r в модели двойной пористости. Блоки на рисунке связаны с k_r : с увеличением этого параметра расстояние между массивами в канале увеличивается, а расстояние между элементами массива уменьшается.

способность. Следовательно, чем выше проницаемость среды, тем больше жидкости можно пропустить через нее при минимальных затратах мощности и тем выше эффективность охлаждения микрочипов. Известно, что величина удельной поверхности, через которую проходит поток, напрямую влияет на абсолютную проницаемость среды. Чем больше удельная поверхность, тем больше поверхности контакта между фазами, что может увеличить проницаемость среды. Однако в некоторых случаях увеличение удельной поверхности может привести к уменьшению проницаемости из-за капиллярных эффектов. Кроме того, существенное влияние на изменение интегральных характеристик среды оказывает пространственное распределение ее удельной поверхности.

Была проведена оценка абсолютной проницаемости всех моделей. На рис. 3 представлены зависимости величины абсолютной проницаемости канала от коэффициента k_s в случае модели с одним масштабом пористости (a) и от отношения гидравлических радиусов k_r в случае двойной пористости (b).

В случае с одним масштабом пористости наблюдается тенденция снижения проницаемости канала с увеличением удельной поверхности, т.е. с уменьшением коэффициента k_s . Однако из этой закономерности исключается $k_s = 0.5$, что связано с увеличением гидравлического сопротивления при подобном расположении структур. Для наглядности на рис. 3, a представлены вставки с изображениями каналов в соответствии с коэффици-

ентом k_s . В модели с двойной пористостью ситуация складывается иначе. При $k_r = 1.25$ модель проявляет свойства среды с одним масштабом пористости, абсолютная проницаемость практически не изменяется. При увеличении отношения гидравлических радиусов расстояние между массивами столбиков увеличивается, при этом сами элементы становятся ближе друг к другу. Пропускная способность узких каналов между столбиками минимизируется, а основной поток жидкости проходит в широких каналах между массивами. При $k_r = 2.5$ пространство в массивах элементов становится критически малым, что вызывает перераспределение потока и сопровождается уменьшением проницаемости системы. Это явление в значительной мере влияет на величину абсолютной проницаемости канала. Наблюдается тенденция возрастания проницаемости с увеличением коэффициента k_r , что можно увидеть из рис. 3, *b*, где показаны вставки с изображениями каналов при увеличении отношения гидравлических радиусов.

Таким образом, показано, что величина удельной поверхности среды играет важную роль в определении ее проницаемости, и влияние может быть разнообразным в зависимости от конкретного типа среды и условий ее функционирования. С учетом значения проницаемости канала и осредненной скорости течения жидкости наиболее оптимальной конфигурацией обладает канал с одним масштабом пористости при $k_s = 0.5$ (два диагонально расположенных цилиндра с диаметром поперечного сечения $d = 21.4 \mu\text{m}$). Подобная структура микроканала является эффективной при конструировании, например, микротеплообменников за счет высокой скорости поперечных потоков и хорошей проницаемости системы для оптимального функционирования таких устройств и минимизации гидродинамических потерь в совокупности с повышением эффективности отвода тепла.

Финансирование работы

Исследование выполнено при поддержке гранта Российского научного фонда № 24-19-00697 (<https://rscf.ru/project/24-19-00697/>).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] W. He, J. Zhang, R. Guo, C. Pei, H. Li, S. Liu, J. Wei, Y. Wang, *Appl. Energy*, **327**, 120048 (2022). DOI: 10.1016/j.apenergy.2022.120048
- [2] R. van Erp, R. Soleimanzadeh, L. Nela, G. Kampitsis, E. Matioli, *Nature*, **585**, 211 (2020). DOI: 10.1038/s41586-020-2666-1
- [3] M.Q. Ansari, G. Zhou, *Chem. Eng. Process.: Process Intensif.*, **156**, 108066 (2020). DOI: 10.1016/j.cep.2020.108066
- [4] K. Derakhshanpour, R. Kamali, M. Eslami, *Int. Commun. Heat Mass Transfer*, **119**, 104928 (2020). DOI: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2020.104928
- [5] N. Zhang, B. Jiao, Y. Ye, Y. Kong, X. Du, R. Liu, B. Cong, L. Yu, S. Jia, K. Jia, *Energy Convers. Manag.*, **253**, 115124 (2022). DOI: 10.1016/j.enconman.2021.115124
- [6] W. Yubing, J. Li, D. Zhang, W. Chen, G. Zhu, *Heat Mass Transfer*, **59**, 1543 (2023). DOI: 10.1007/s00231-023-03353-z
- [7] О.А. Солнышкина, Э.С. Батыршин, Ю.А. Питюк, *Изв. РАН. Механика жидкости и газа*, № 4, 9 (2021). DOI: 10.31857/S0568528121040113 [O.A. Solnyshkina, E.S. Batyrshin, Yu.A. Pityuk, *Fluid Dyn.*, **56** (4), 451 (2021). DOI: 10.1134/S001546282104011X
- [8] Y.A. Pityuk, O.A. Abramova, N.B. Fatkullina, A.Z. Bulatova, in *Recent research in control engineering and decision making*, ed. by O. Dolinina, A. Brovko, V. Pechenkin, A. Lvov, V. Zhmud, V. Kreinovich, *Studies in Systems, Decision and Control* (Springer, Cham, 2019), vol. 199, p. 338–352. DOI: 10.1007/978-3-030-12072-6_28