

Исследование течения жидкости в микроканале с массивом пинов с учетом теплообмена

© А.Д. Низамова, К.А. Галиева, О.А. Солнышкина

Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Россия

E-mail: adeshka@yandex.ru

Поступило в Редакцию 5 мая 2025 г.

В окончательной редакции 19 августа 2025 г.

Принято к публикации 19 августа 2025 г.

Численными методами исследуется влияние изменения внутренней конфигурации микроканалов на особенности тепломассопереноса. Валидация численных модулей проводилась путем сравнения с результатами проведенных лабораторных экспериментов на базе микрофлюидных чипов. Приведены графики зависимости среднего значения температуры и объемного расхода жидкости от перепада давления по сечению канала, распределения скоростей и температурные поля внутри каналов. Исследование показало, что выявленные особенности влияния изменения расположения столбиков внутри микроканала и режима закачки жидкости на гидродинамические и теплофизические параметры системы могут быть использованы при конструировании микротеплообменников.

Ключевые слова: микротеплообменник, кремниевый микроканал, тепломассоперенос, микрофлюидика.

DOI: 10.61011/PJTF.2025.24.61753.8034

В современных теплообменных технологиях все большее значение приобретают микроскопические охлаждающие системы, такие как микроканальные теплообменники. Эти устройства обеспечивают высокоэффективное отведение тепла и поддержание стабильной температуры в микроэлектромеханических системах, интегральных схемах и других микроустройствах, подвергающихся кратковременным высоким тепловым нагрузкам. Их применение охватывает охлаждение электроники [1], управление температурными режимами в аэрокосмической отрасли, а также биологические и химические исследования [2].

Ранее были представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований, направленных на усиление тепло- и массообмена на макро-, микро- и наноуровнях в одно- и двухфазных средах [3]. Важным аспектом в разработке эффективных микротеплообменных устройств является выбор оптимальной геометрии внутренней структуры микроканалов. Поскольку большая часть исследований представлена для микроканалов с характерными размерами в сотни микрометров, детальное понимание особенностей тепло- и массопереноса в микрофлюидных теплообменниках с характерными гидравлическими диаметрами, составляющими десятки микрометров, необходимо для определения оптимальных условий эффективного теплообмена в зависимости от конфигурации микроканала. Этим обусловлена значимость и новизна настоящей работы.

В работе рассматривается численное исследование влияния изменения внутренней конфигурации микроканалов прямоугольного поперечного сечения на особенности тепломассопереноса. Рассмотрено течение холодной жидкости в микроканале с распределенным массивом столбиков (пинов) под действием постоянного перепада давления. Нижняя стенка канала (пластина,

зажимающая столбики) и столбики поддерживаются при постоянной температуре. Верхняя стенка канала (вторая пластина, зажимающая столбики) не подвергается нагреву. Диаметр столбиков d составлял $110\text{ }\mu\text{m}$, а высота микроканала и столбиков — $25\text{ }\mu\text{m}$, длина и ширина элемента микроканала равны 2.5 mm . Расположение столбиков равномерное (см. вставки на рис. 1). Расстояния между столбиками Δ (см. вставки на рис. 1) варьировались от 40 до $50\text{ }\mu\text{m}$.

Для численного моделирования течения жидкости в микроканале с препятствиями с учетом теплообмена использована универсальная лицензионная программная система анализа методом конечных элементов Ansys Fluent. При моделировании использовались теплофизические свойства воды как рабочей жидкости и кремния как материала микроканала. Верификация модулей сравнением с аналитическим решением проводилась для случая плоского микроканала в отсутствие препятствий для изотермического случая и с учетом теплообмена на стенках канала. Кроме того, для валидации получаемых численных данных была проведена серия гидродинамических экспериментов, для которых были разработаны макеты и изготовлены микрофлюидные чипы из оптически прозрачного материала полидиметилсилоксана RT 601 A/B (ELASTOSIL) методом мягкой литографии (рис. 1). Проведены сборка и отладка экспериментальной установки для микрофлюидных исследований, представленной на рис. 1. Потоки жидкости в чипе создавались при помощи контроллера давления VSO-BT — 1. Объемный расход фиксировался с помощью датчика Elveflow — 2. Микрофлюидный чип располагался на базе оптического микроскопа Olympus IX-71 — 3, сопряженного с высокоскоростной видеокамерой Photron FASTCAM SA5 — 4. Более подробно

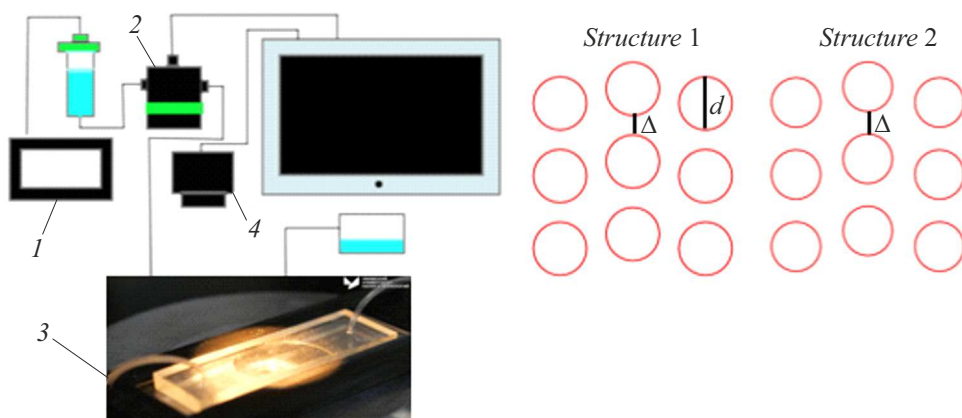


Рис. 1. Схема экспериментальной установки с использованием микрофлюидных чипов. На вставках — варианты расположения столбиков в микроканале.

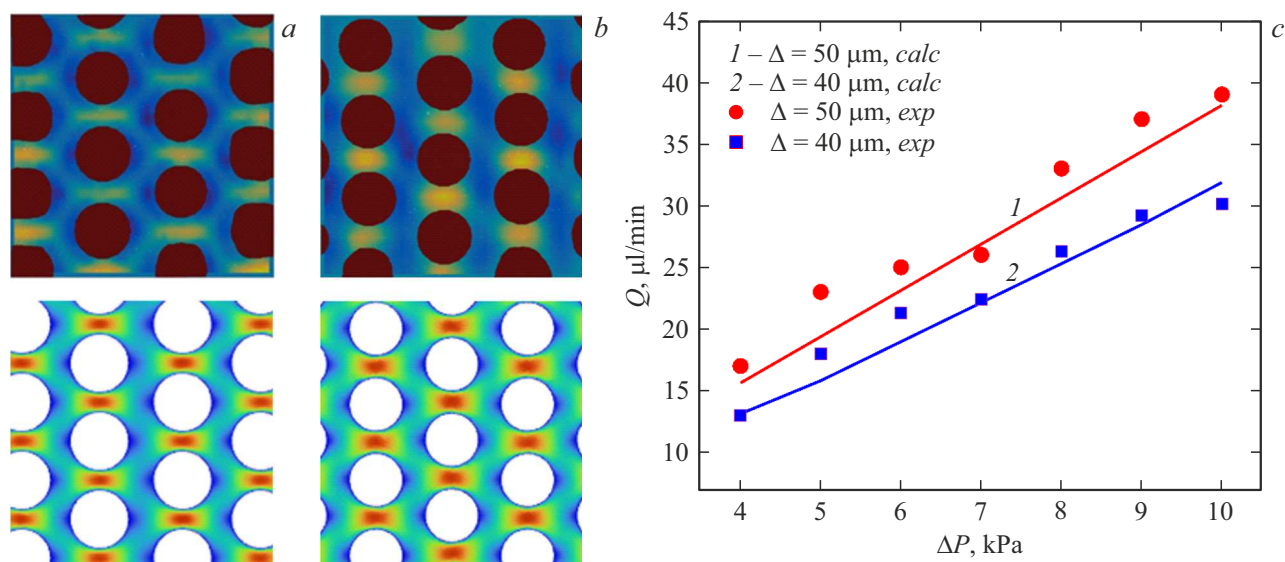


Рис. 2. Сопоставление экспериментальных (exp) и численных (calc) данных для течения жидкости в микроканалах с различной внутренней конфигурацией: поля модуля скорости (a — $\Delta = 40 \mu\text{m}$; b — $\Delta = 50 \mu\text{m}$) и объемного расхода для $\Delta = 40$ и $50 \mu\text{m}$ (c).

используемая установка и методика проведения эксперимента представлены в предыдущих работах авторов [4,5].

Проведена серия экспериментов для двух структур (рис. 1) при постоянном перепаде давления в диапазоне от 4 до 10 кПа с шагом 1 кПа. Измерения проводились при полном насыщении модели жидкостью после прокачки нескольких поровых объемов. Для каждого перепада давления значение объемного расхода фиксировалось после установления стационарного значения, в качестве рабочей жидкости использовалась вода. Для визуализации потока в флюид добавлены полимерные частицы диаметром $1 \mu\text{m}$. С использованием методов определения скорости по анализу динамики трассерных частиц с помощью программного пакета PIVlab были построены поля скоростей при одинаковом объемном расходе $1 \mu\text{l/min}$.

На рис. 2, a, b представлено качественное сопоставление полей скоростей для структур с $\Delta = 40$ и $50 \mu\text{m}$, полученных экспериментально (верхний ряд) и численно (нижний ряд). Жидкость течет слева направо. Также были сопоставлены полученные экспериментально (точки) и численно (линии) значения объемного расхода для обеих конфигураций чипа (рис. 2, c). Как видно из рис. 2, получено хорошее согласование результатов.

В рамках настоящей работы проведено многопараметрическое исследование течения жидкости в микроканале с распределенным массивом цилиндрических пинов с учетом теплообмена. При постоянной температуре нижней стенки канала и пинов $T = 323 \text{ K}$ и подаваемой жидкости $T = 300 \text{ K}$ рассматривалось изменение распределения температурного поля и скорости жидкости в диапазоне перепадов давления ΔP от 1.25

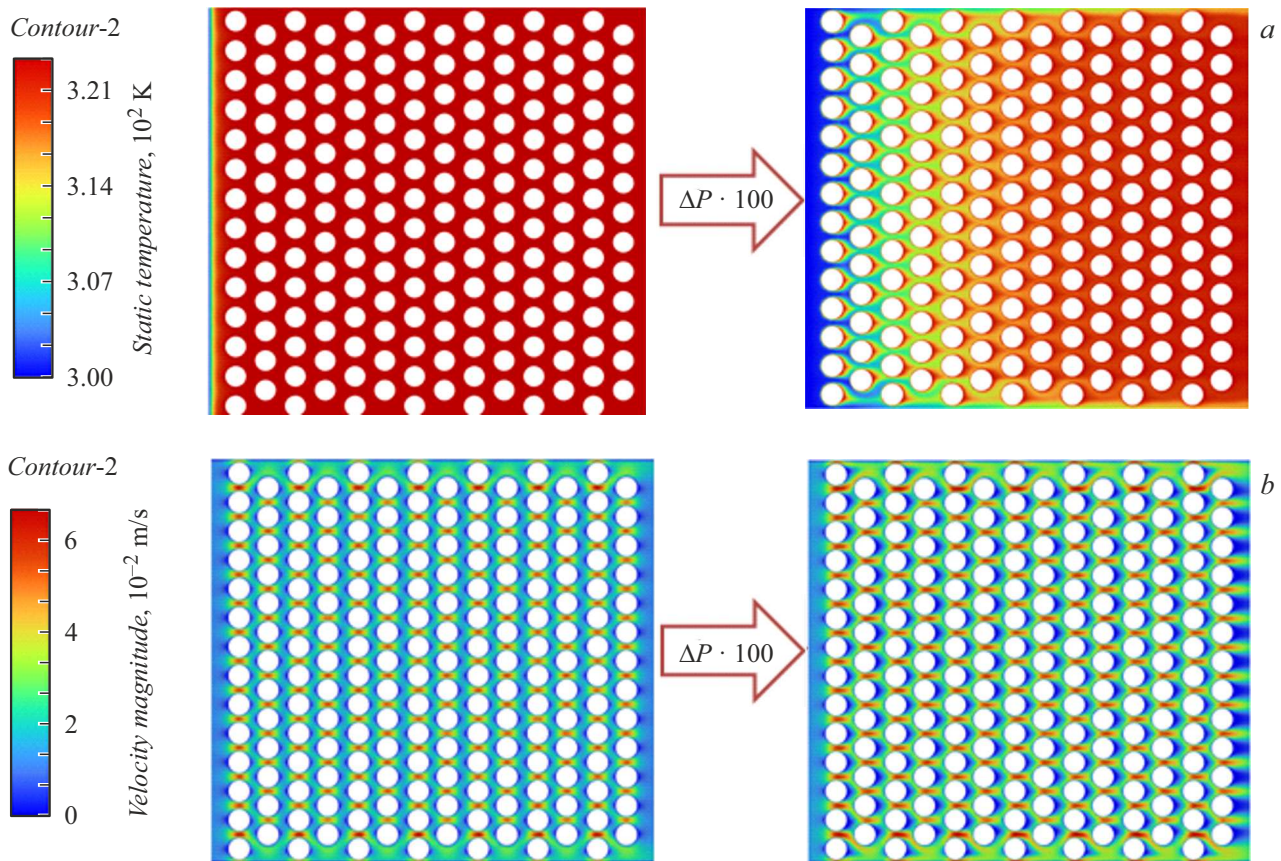


Рис. 3. Изменение распределения температурного поля (*a*) и модуля скорости (*b*) в структуре с расстояниями между пинами $\Delta = 40 \mu\text{m}$ в средней плоскости микроканала при изменении перепада давления в 100 раз (от 1.25 до 125 kPa).

до 125 kPa. На рис. 3 приведены поля температуры (*a*) и скоростей (*b*) в средней плоскости микроканала для равномерного расположения столбиков, расстояние между которыми равно $40 \mu\text{m}$, для перепадов давления 1.25 и 125 kPa.

При рассмотрении случаев перепада давления меньше 20 kPa наблюдается прогрев жидкости до максимальной температуры в самом начале структуры до контакта со столбиками. При увеличении ΔP зона полного прогрева жидкости уменьшается, но увеличивается мощность, необходимая для прокачивания охлаждающей жидкости. След с практически нулевой скоростью за столбиками на выходе из микроканала для разных перепадов давления также имеет различную длину. Для конфигурации микроканала при расстоянии между столбиками в $50 \mu\text{m}$ результаты имеют схожую картину. Исследование гидродинамических характеристик течения в аналогичных структурах ранее было выполнено авторами с использованием численного подхода на основе метода граничных элементов, ускоренного быстрым методом мультиполей на гетерогенных вычислительных архитектурах [4,6], но без учета теплообмена и в меньшем диапазоне перепадов давления. Полученное распределение скоростей для меньших перепадов давления (рис. 2) дает качественное

сходство с полученными ранее результатами без учета теплообмена [4,6].

Построена зависимость среднего значения температуры от перепада давления для двух структур (рис. 4, *a*). Из полученных результатов видно, что при малом перепаде давления жидкость в канале с большим расстоянием между пинами нагревается больше, однако с увеличением перепада давления характер распределения меняется. Кроме того, для подбора оптимальной геометрии микрофлюидного теплообменника важным аспектом является объем прокачиваемой жидкости через структуру. Для оценки изменения пропускной способности участков рассмотренных микроканалов была построена зависимость объемного расхода флюида от перепада давления (рис. 4, *b*). Видно, что для низких перепадов давления пропускная способность структур практически совпадает, но при повышении ΔP наблюдается существенное увеличение гидродинамического сопротивления микроканала со структурой $\Delta = 40 \mu\text{m}$. Следует отметить нелинейность в зависимости между расходом и перепадом давления. Таким образом, на основе полученных интегральных кривых можно сделать вывод, что возможно подобрать оптимальные условия для наилучшего прогрева жидкости с учетом внутренней конфигурации микроканала.

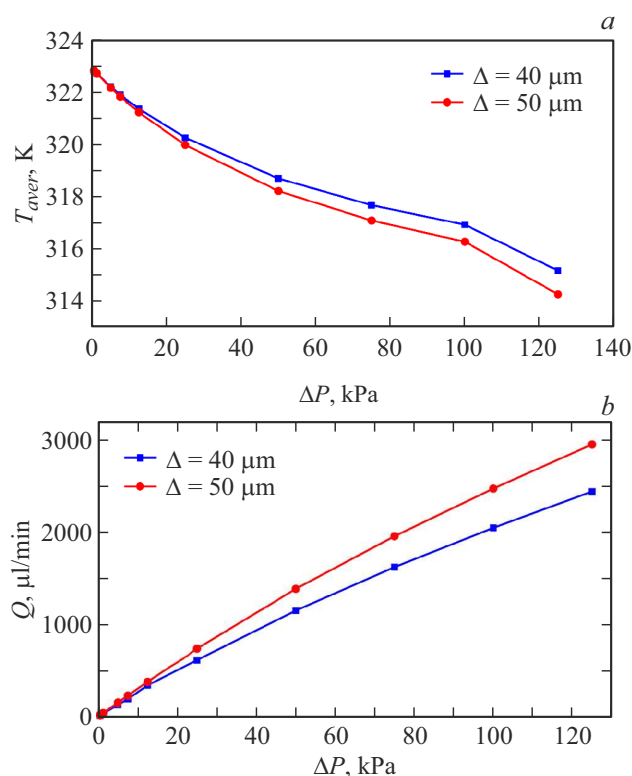


Рис. 4. Зависимость среднего значения температуры (а) и объемного расхода флюида (b) в микроканале от перепада давления.

В настоящей работе проведено численное и экспериментальное исследование течения жидкости в микроканале с массивом пинов, учитывающее теплообмен. Основное внимание уделено влиянию внутренней конфигурации микроканала, в частности расположению пинов, на характеристики тепло-массообмена. Использование трехмерного моделирования в Ansys Fluent и проведение серии экспериментов на микрофлюидных чипах позволили получить достоверные данные, подтвержденные валидацией численных результатов с экспериментальными. Результаты исследования показали, что изменение расстояния между столбиками (40 и 50 μm) и перепада давления (от 1.25 до 125 kPa) существенно влияет на распределение скорости и температуры жидкости.

Выявленные особенности влияния изменения расположения столбиков внутри микроканала и режима закачки жидкости на гидродинамические и теплофизические параметры системы могут быть использованы при конструировании микротеплообменников. В дальнейшем планируется расширить исследование, включив нестационарные режимы, учет постоянного теплового потока, а также варьирование таких параметров, как шероховатость стенок и дополнительные конфигурации расположения пинов. Это позволит углубить понимание процессов теплообмена в микроканалах и оптимизировать конструкции микротеплообменных устройств.

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] R. Van Erp, R. Soleimanzadeh, L. Nela, G. Kampitsis, E. Matioli, *Nature*, **585**, 211 (2020). DOI: 10.1038/s41586-020-2666-1
- [2] С.И. Фадеев, Э.Г. Косцов, Д.О. Пиманов, *Сиб. журн. промышленной математики*, **17** (4), 120 (2014). [S.I. Fadeev, E.G. Kostsov, D.O. Pimanov, *J. Appl. Ind. Math.*, **9**, 47 (2015). DOI: 10.1134/S1990478915010068]
- [3] Б.В. Дзюбенко, Ю.А. Кузма-Кичта, А.И. Леонтьев, И.И. Федик, Л.П. Холпанов, *Интенсификация тепло- и массообмена на макро-, микро- и наномасштабах* (ЦНИИАТОМИНФОРМ, 2008).
- [4] 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. Batyrrshin, Yu.A. Pityuk, *Fluid Dyn.*, **56**, 451 (2021). DOI: 10.1134/S001546282104011X]
- [5] Э.С. Батыршин, О.А. Солнышкина, Ю.А. Питюк, *ЖТФ*, **91** (4), 553 (2021). DOI: 10.21883/JTF.2021.04.50617.244-20 [E.S. Batyrrshin, O.A. Solnyshkina, Yu.A. Pityuk, *Tech. Phys.*, **66**, 543 (2021). DOI: 10.1134/S1063784221040034]
- [6] Н.Б. Фаткуллина, С.С. Курбанова, О.А. Солнышкина, *Письма в ЖТФ*, **50** (23), 46 (2024). DOI: 10.61011/PJTF.2024.23.59399.6505k [N.B. Fatkullina, S.S. Kurbanova, O.A. Solnyshkina, *Tech. Phys. Lett.*, **50** (12), 41 (2024). DOI: 10.61011/TPL.2024.12.60348.6505k]