

Отчёт о проделанной работе с использованием оборудования ИВЦ НГУ

1. Аннотация

Проблема вязкого трения существенно затрудняет разработку эффективных микросистем для промышленного применения, например, в химическом анализе или охлаждении микроэлектроники. Для того, чтобы существенно продвинуться в области увеличения пропускной способности микроканалов и применении их в инженерных областях, важно разработать ряд методик, позволяющих, наиболее точно моделировать физические процессы внутри микроканалов. В отличие от обычной гидродинамики в микрофлюидике граничные условия являются более существенным фактором, влияющим на течение. В работе проведено экспериментальное исследование и трехмерное численное моделирование потока в прямоугольном микроканале с гладкими стенками, а также в микроканале с гидрофобными структурами на границах. Предложен способ задания длины проскальзывания на границе и оценки длины проскальзывания для задач, в которых неизвестны граничные условия, но известен перепад давления и расход жидкости. Численные расчеты верифицированы – проверена сходимость, получено сравнение с аналитическими расчетами, также расчеты валидированы на данных из эксперимента и показали хорошее соответствие.

2. Тема работы

Оптимизация граничных условий в микроканале с целью минимизации перепада давления.

3. Состав коллектива

1. Глуздов Дмитрий Сергеевич - Аспирант физического факультета университета НГУ кафедры неравновесных процессов, форма обучения очная, специальность 01.04.14 - Теплофизика и теоретическая теплотехника. Лаборатория интенсификации процессов теплопереноса 6.6 института теплофизики СО РАН, м.н.с. Контакты: gluzdov1@yandex.ru, d.gluzdov@g.nsu.ru, 8-953-790-60-03.
2. Гатапова Елизавета Яковлевна - Научный руководитель к.ф.-м.н, старший научный сотрудник. Контакты руководителя: gatapova@itp.nsc.ru, 8-913-464-66-79.

4. Информация о гранте

Работа выполняется для кандидатской диссертации.

5. Научное содержание работы

1. Постановка задачи

Изучить параметры течения в микроканале с гладкими стенками при различных характеристиках используемых жидкостей и характеристиках граничных условий, при разных размерах микроканала. Исследовать влияние структур поверхностей микроканала на снижение гидравлического сопротивления. Определить числа Рейнольдса и параметры расчета при которых можно использовать численные вычисления в микроканале с приемлемой точностью. Разработать способ получения длины проскальзывания на границах микроканала.

2. Современное состояние проблемы

Микроканалы используются, в основном, в таких системах, как лаборатории на чипе (Lab-on-Chip) и в системах охлаждения [1-7]. С уменьшением гидравлического диаметра канала, в разы растёт перепад давления, что приводит к усложнению систем для прокачки жидкости и ограничивает области применения лабораторий на чипах и водных систем охлаждения. Чтобы уменьшить перепад давления, применяются гидрофобные поверхности [8-12]. Такие гидрофобные поверхности возможно создавать при помощи изменения топологии или структуры границ микроканала [8-15]. Например, в работе [8] было достигнуто уменьшение гидравлического сопротивления в микроканале на 40% благодаря добавлению на стенки микроканала гидрофобной структуры методом фотолитографии. Для того чтобы лучше разобраться в границах применимости данного метода уменьшения перепада давления в микроканалах, ведется текущая работа.

1. O. du Roure, A. Lindner, E. N. Nazockdast, and M. J. Shelley, "Dynamics of flexible fibers in viscous flows and fluids," *Annu. Rev. Fluid Mech.* 51, 539–572 (2019).
2. N. Kavokine, R. R. Netz, and L. Bocquet, "Fluids at the nanoscale: From continuum to subcontinuum transport," *Annu. Rev. Fluid Mech.* 53, 377–410 (2021).
3. J. Singh, A. Montesinos-Castellanos, and K. D. Nigam, "Process intensification for compact and micro heat exchangers through innovative technologies: A review," *Ind. Eng. Chem. Res.* 58, 13819–13847 (2019).
4. N. Convery and N. Gadegaard, "30 years of microfluidics," *Micro Nano Eng.* 2, 76–91 (2019).
5. M. E. Steinke and S. G. Kandlikar, "Single-phase liquid friction factors in microchannels," *Int. J. Therm. Sci.* 45, 1073–1083 (2006).
6. D. B. Tuckerman and R. F. W. Pease, "High-performance heat sinking for VLSI," *IEEE Electron Device Lett.* 2, 126–129 (1981).
7. J. Mo, Y. Ding, N. Xiang, S. Zhu, J. Zeng, K. Bi, J. Ma, J. Sha, and Y. Chen, "Fluid release pressure for micro-/nanoscale rectangular channels," *J. Appl. Phys.* 127, 114302 (2020).
8. J. Ou, B. Perot, and J. P. Rothstein, "Laminar drag reduction in microchannels using ultrahydrophobic surfaces," *Phys. Fluids* 16, 4635–4643 (2004).
9. J. P. Rothstein, "Slip on superhydrophobic surfaces," *Annu. Rev. Fluid Mech.* 42, 89–109 (2010).
10. S. Raayai-Ardakani and G. H. McKinley, "Geometric optimization of riblettextured surfaces for drag reduction in laminar boundary layer flows," *Phys. Fluids* 31, 053601 (2019).
11. M. Z. Hossain and J. M. Floryan, "On the role of surface grooves in the reduction of pressure losses in heated channels," *Phys. Fluids* 32, 083610 (2020).
12. C. Lee, C. Choi, and C. Kim, "Superhydrophobic drag reduction in laminar flows: A critical review," *Exp. Fluids* 57, 176 (2016).
13. F. Feuillebois, M. Z. Bazant, and O. I. Vinogradova, "Effective slip over superhydrophobic surfaces in thin channels," *Phys. Rev. Lett.* 102, 026001 (2009).
14. E. S. Asmolov, A. V. Belyaev, and O. I. Vinogradova, "Drag force on a sphere moving toward an anisotropic superhydrophobic plane," *Phys. Rev. E* 84, 026330 (2011)

15. T. J. Kim and C. Hidrovo, "Pressure and partial wetting effects on superhydrophobic friction reduction in microchannel flow," Phys. Fluids 24, 112003 (2012).

3. Подробное описание работы, включая используемые алгоритмы

В данной работе моделировалось трёхмерное ламинарное течение в прямоугольном микроканале с различным диаметром и различными характеристиками жидкости, чисел Рейнольдса и свойств поверхности. Использовалось ПО Ansys Fluid. При помощи параметрического расчета определены границы применения численного решения для ламинарного течения, для задач уменьшения перепада давления в микроканале.

В задачах использовался алгоритм SIMPLE, полученные результаты верифицированы и валидированы (пример на рисунке 1).

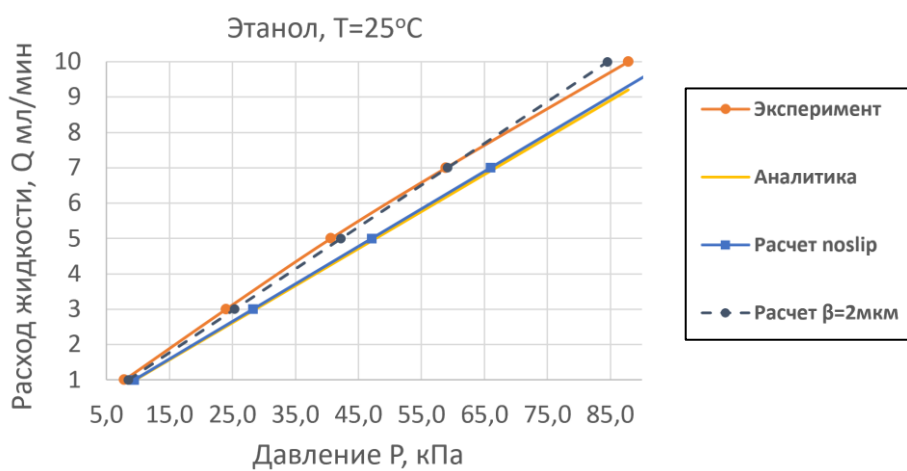


Рисунок 1 — Зависимость расхода жидкости от перепада давления для этанола.

Решены параметрические задачи для трехмерной геометрии гладкого микроканала и микроканала с гидрофобными структурами, написан UDF скрипт для fluent для задания длины проскальзывания на границе.

4. Полученные результаты

Значимость работы связана с получением данных характеристик течения и параметров граничных условий, которые могут быть использованы при проектировании микроканальных систем, а также с разработкой и проверкой методов численного поиска параметров граничных условий в микроканалах.

6. Эффект от использования кластера в достижении целей работы

В ходе работы использовался доступ к лицензионному пакету Ansys Fluid flow, до 60Гб для постоянного хранения, 20Гб для временного и до 16Гб оперативной памяти. Доступ к лицензии позволил выполнять работу в коммерческом ПО Ansys для научных исследований, что, в свою очередь, очень сильно помогло сэкономить время получения численных результатов.

7. Перечень публикаций, содержащих результаты работы

1. Gluzdov, Dmitry S., and Elizaveta Ya Gatapova. "Friction reduction by inlet temperature variation in microchannel flow." Physics of Fluids 33.6 (2021): 062003. (Импакт фактор: 3.521)

2. Gluzdov, D. S., and E. Ya Gatapova. "A friction factor in rectangular microchannel of 100 μm depth." *Journal of Physics: Conference Series*. Vol. 1677. No. 1. IOP Publishing, 2020. (Импакт фактор: 0.55)
3. Gluzdov, D. S., and E. Ya Gatapova. "Modelling corners flow in rectangular microchannel." *Journal of Physics: Conference Series*. Vol. 2119. No. 1. IOP Publishing, 2021. (Импакт фактор: 0.55)
4. Также готовится текст диссертации и ещё одна публикация в Q1.