Письма в ЖЭТФ, том 101, вып. 3, с. 176 – 180

О снижении гидравлического сопротивления при двухфазном течении

Е. Я. Гатапова[+1)], *В. С. Ажаев* [+*], *О. А. Кабов* [+×∘]

[+]*Институт теплофизики им. Кутателадзе СО РАН, 630090 Новосибирск, Россия*

[*]*Southern Methodist University, 75275 Dallas, Texas, USA*

[×]*Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 634050 Томск, Россия*

[∘]*Новосибирский государственный университет, 630090 Новосибирск, Россия*

Поступила в редакцию 25 сентября 2014 г.
После переработки 1 декабря 2014 г.

Экспериментально зарегистрированы пузыри, собирающиеся на локальной гидрофобной поверхности с нанопокрытием при двухфазном течении в миниканале. Предложено использовать эффект концентрации газовых пузырей на гидрофобных участках поверхности канала с контрастным смачиванием для обеспечения снижения гидравлического сопротивления. Двумерная модель течения с условием Навье в зоне пузырьковой прослойки дает критерии снижения гидравлического сопротивления в зависимости от длины скольжения, размера пузырей и размера участка с нанопокрытием. Присутствие пузырьковой прослойки на половине поверхности канала может повысить расход прокачиваемой жидкости через канал на 40 % при фиксированном градиенте давления.

DOI: 10.7868/S0370274X15030054

Одним из важнейших препятствий на пути внедрения и распространения микросистем с протяженными микроканалами является значительный перепад давления вдоль канала, который может достигать 10 атм. Необходимость поддержания таких высоких перепадов давлений связана с проблемой транспорта жидкости в устройствах малого размера, использующихся в микрофлюидике и микросистемах [1, 2]. Поскольку силы вязкого сопротивления велики, для перекачки жидкости в микроканале требуется очень большой градиент давления. Решением данной проблемы может быть изменение свойств твердой поверхности канала, по которому течет жидкость, с помощью микро/наноструктурирования. При этом должен увеличиваться расход жидкости при фиксированном градиенте давления [3]. Исследования таких поверхностей в контакте с жидкостями показали, что канавки, каверны или промежутки между цилиндрическими элементами структуры заполнены либо жидкостью (решение Венцеля), либо газовой фазой (решение Касси). Последнее представляет особый интерес с точки зрения снижения вязкого сопротивления в микроканалах, поскольку наличие газовой фазы позволяет жидкости проскальзывать на участках контакта с газом [4]. При этом вязкое сопротивление может быть уменьшено более чем на 40 % [5]. Однако в случае использования микроканавок в качестве структур возникает две проблемы: поддержание газа в канавках [6] и проблема устойчивости течения по структурированным поверхностям [7, 8].

Одним из естественных способов решения указанных проблем и обеспечения снижения сопротивления является использование поверхности с контрастной смачиваемостью, где на гидрофобных участках концентрируются пузыри газовой фазы. Это позволяет жидкости проскальзывать на участках контакта с пузырьковой прослойкой.

В данной работе экспериментально зарегистрированы пузыри, собирающиеся на локальной гидрофобной поверхности с нанопокрытием при двухфазном течении в миниканале. Схема эксперимента и течения в канале приведены на рис. 1. Здесь H – высота канала, D – длина участка с нанопокрытием, L – длина участка без покрытия. Жидкость (дистиллированная вода) поступала из предварительного подогревателя и прокачивалась насосом через горизонтальный миниканал высотой 2 мм, шириной 30 мм и длиной 66 мм. Канал был образован кремниевой пластиной толщиной 800 мкм и стеклом. Кремниевая пластина прикреплялась к несущей пластине из нержавеющей стали толщиной 2.8 мм с помощью

[1)]e-mail: gatapova@itp.nsc.ru

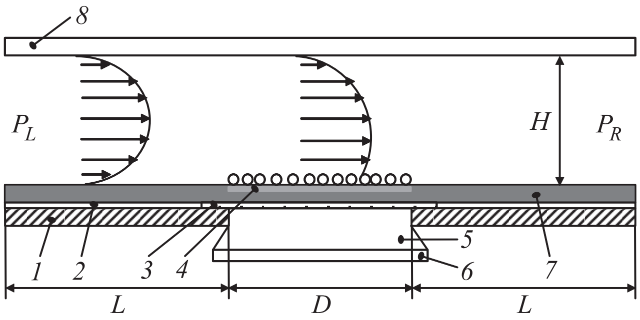

Рис. 1. Схема эксперимента и течения жидкости: *1* – пластина из нержавеющей стали, *2* – теплопроводная клеющая пленка, *3* – термопаста (30 мкм), *4* – поверхность с нанопокрытием, *5* – медный стержень, *6* – нагреватель, *7* – кремниевая пластина, *8* – стекло

теплопроводной клеящей пленки толщиной 30 мкм. В пластину из нержавеющей стали был запрессован квадратный медный стержень высотой 7.3 мм с поперечным сечением $10 \times 10\,мм^2$. К стержню присоединялся электрический нагреватель. В теплопроводной клеящей пленке был сделан квадратный вырез размером $14 \times 14\,мм^2$, который заполнялся теплопроводящей пастой, что обеспечивало хороший тепловой контакт нагревателя с кремниевой пластиной. На участок в центральной части кремниевой пластины было нанесено нанопокрытие площадью $10 \times 10\,мм^2$. Для создания контрастной смачиваемости использовался метод, описанный в [9]: на основную поверхность химическим способом наносился монослой молекул другого вещества. Визуализация течения проводилась с помощью CCD-камеры Sony XC-ST30CE с разрешением 26 мкм/пиксель. Поле зрения объектива составляло $20 \times 15.5\,мм^2$ поперек и вдоль течения соответственно. Визуализация начиналась с верхнего (по течению) края зоны с нанопокрытием.

Эксперимент проводился в ходе параболических полетов Европейского космического агентства (52-я компания, Франция, аэропорт Мариньяк) совместно с другими исследованиями [10]. Компания длилась три дня, в каждый из которых самолет Airbus A300 совершал 31 параболический маневр. Один маневр дает около 22 с микрогравитации. В течение этой фазы полета достигается гравитация порядка $\pm 0.03\,м/с^2$ в направлении вертикальной оси самолета и $\pm 0.01\,м/с^2$ в двух других направлениях. Периоду микрогравитации предшествует период гипергравитации до $1.8g$ длительностью около 20 с (g – земная гравитация). Аналогичный период гипергравитации следует после периода микрогравитации. Подложка с нанопокрытием ориентировалась так, что вектор силы тяжести был направлен перпендикулярно к ней.

Исследовались два режима течения с концентрацией пузырей на гидрофобной области. Первый из них – режим без нагрева, когда находящиеся в потоке мелкие пузырьки газа осаждались на гидрофобной зоне (рис. 2a). Штриховой линией на рисунке помечена область с гидрофобным покрытием. Граница контрастного смачивания удерживала пузырьки и препятствовала их распространению вдоль потока. Нанопокрытие обеспечивало контраст смачиваемости порядка 20–25 град между поверхностью кремниевой пластины и покрытием [11].

Второй режим создавался специально для усиления эффекта: включался нагреватель, установленный под гидрофобной зоной, и начинался процесс нуклеации пузырей. Видно, что пузыри оказываются сконцентрированы в зоне с гидрофобным покрытием. Факт концентрации пузырей на гидрофобной зоне был подтвержден экспериментально для условий земной гравитации (рис. 2a), гипергравитации (до $1.8g$, рис. 2b) и микрогравитации (рис. 2c). Эксперименты показывают, что для условий земной и гипергравитации гидрофобная зона покрыта пузырями с размером, как правило, не превышающим 1 мм. Уровень гравитации в экспериментах, т.е. массовая сила, изменялся в 600 раз (от $0.03\,м/с^2$ до $1.8g$). При этом область пузырей была четко ограничена границей контрастного смачивания, что свидетельствует об устойчивости данного типа течения и возможности его практического использования.

Таким образом, в зоне нанесения нанопокрытия образуется слой из пузырьков, поверх которого жидкость начинает проскальзывать. Возникает вопрос о том, когда такие пузырьки представляют эффективный механизм снижения сопротивления. Для ответа на него рассмотрим двумерную модель течения, предполагая, что ось x направлена вдоль канала по направлению течения, а ось y – перпендикулярно ему. При описании течения классическое условие прилипания в зоне пузырьков следует заменить на более общее условие Навье с некоторой эффективной длиной скольжения β:

$$u = \beta \frac{\partial u}{\partial y}.$$

Ясно, что критерии снижения гидравлического сопротивления будут зависеть от длины скольжения и размера пузырей. Пусть δ – диаметр пузыря. Скорость течения потока жидкости при отсутствии пу-

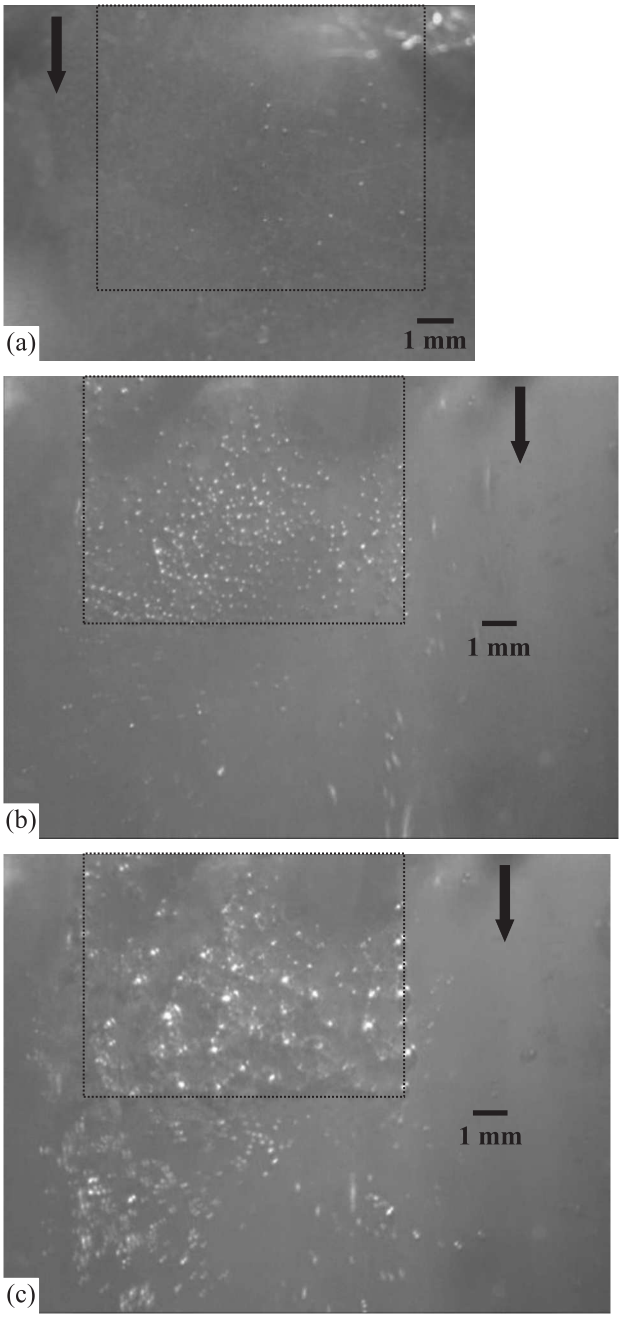

Рис. 2. Фотографии пузырей на кремниевой пластине с контрастной смачиваемостью при течении воды в канале с нагревателем (граница гидрофобной зоны обведена штриховой линией, стрелка указывает направление течения). (a) – Нагреватель не включен. Оседание имеющихся пузырьков газа. (b) – Нагреватель включен. Начало процесса нуклеации, гипергравитация. (c) – Нагреватель включен. Кипение, микрогравитация

зырьков с условием прилипания на обеих стенках имеет известный вид:

$$u_1 = \frac{1}{2\mu}\frac{\partial p}{\partial x}y(y-H). \tag{1}$$

При наличии же пузырьков с условием Навье на нижней стенке скорость течения записывается следующим образом:

$$u_2 = \frac{1}{2\mu}\frac{\partial p}{\partial x}\Big|_\beta\Big[y^2 - \frac{H^2-\delta^2+2\delta\beta}{H-\delta+\beta}y - \\ - H\frac{\beta(H-2\delta)-\delta(H-\delta)}{H-\delta+\beta}\Big], \tag{2}$$

где $\partial p/\partial x$ и $\partial p/\partial x\Big|_\beta$ – градиенты давлений на участке без пузырьков и на участке с пузырьковой прослойкой соответственно.

Из соотношений (1) и (2) путем интегрирования скорости u_1 можно получить расход жидкости на участке без пузырьков:

$$Q_1 = -\frac{1}{12\mu}\frac{\partial p}{\partial x}H^3, \tag{3}$$

а также путем интегрирования скорости u_2 расход на участке с пузырьками:

$$Q_2 = -\frac{1}{12\mu}\frac{\partial p}{\partial x}\Big|_\beta\frac{(H-\delta)^3(H-\delta+4\beta)}{H-\delta+\beta}. \tag{4}$$

Из закона сохранения массы, $Q_1 = Q_2$, получаем соотношение между градиентами давлений на разных участках:

$$G_p = \frac{\dfrac{\partial p}{\partial x}}{\dfrac{\partial p}{\partial x}\Big|_\beta} = \frac{(H-\delta)^3(H-\delta+4\beta)}{H^3(H-\delta+\beta)}. \tag{5}$$

Предполагая, что диаметр пузыря соотносится с высотой канала как $\delta = KH$, где $K < 1$, выражение (5) можно записать в виде

$$G_p = \frac{(1-K)^3(1-K+4\frac{\beta}{H})}{1-K+\frac{\beta}{H}}, \tag{6}$$

Случай, когда длина скольжения равна высоте канала ($\beta = H$), представлен на рис. 3, где приведена зависимость соотношения между перепадами давления от K. Видно, что при размерах пузыря, меньших 0.3 высоты канала, можно ожидать снижения гидравлического сопротивления.

Мы полагаем, что коэффициент скольжения пропорционален размеру пузыря, $\beta = C\delta$, причем коэффициент C пропорционален отношению вязкостей жидкости и газа в пузыре, $C \sim \mu/\mu_g$. Последнее следует из решения задачи об обтекании пузыря (см., например, [12]). При этом численное значение коэффициента C может быть достаточно большим, порядка 10^3. Отметим, что течение в канале может приводить к деформации пузырей [13], а также к их слиянию. Однако в наших оценках эти эффекты не учитываются. На рис. 4 приведена зависимость отноше-

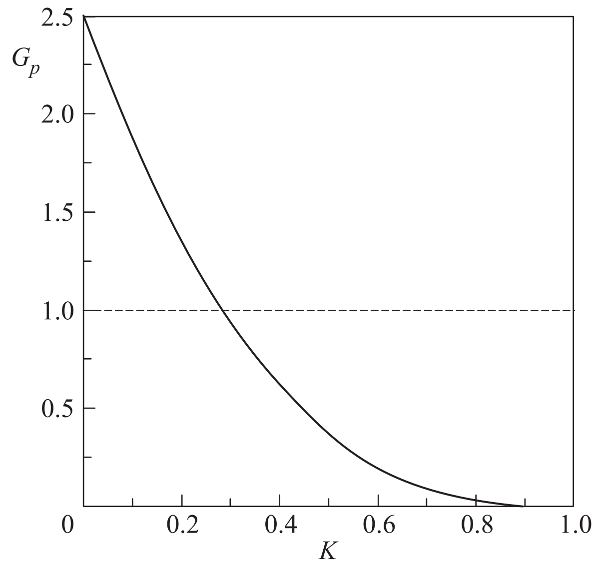

Рис. 3. Отношение градиентов давления при $\beta = H$

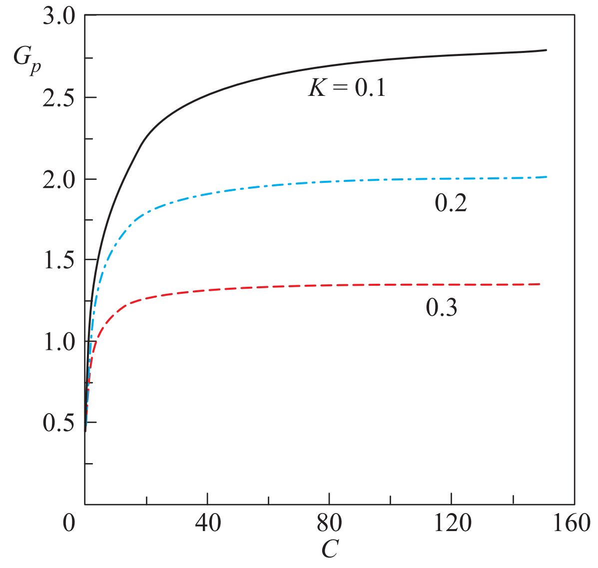

Рис. 4. Отношение градиентов давления при $\beta = C\delta$ в зависимости от коэффициента пропорциональности для разных значений K

ния давлений G_p от коэффициента пропорциональности C. Видно, что наличие пузырей способствует снижению гидравлического сопротивления. При этом при уменьшении размеров пузыря до 0.1 по отношению к высоте канала можно ожидать уменьшения перепада давления до двух раз.

Далее возникает вопрос о том, какова должна быть длина обрабатываемой поверхности D для обеспечения увеличения расхода прокачиваемой жидкости при заданном перепаде давления. Для того чтобы участок был плотно покрыт пузырями, возможно, не вся поверхность должна быть обработана нанопокрытием. Обозначим через $d = D/(2L + D)$ долю области с нанопокрытием относительно общей длины канала. Предположим, что давления на входе и выходе канала известны и равны P_L, P_R соответственно (рис. 1). Тогда отношение расходов жидкости (Q_1 – расход жидкости в отсутствие поверхности с нанопокрытием, Q_2 – расход жидкости при наличии поверхности с нанопокрытием) выглядит следующим образом:

$$\frac{Q_2}{Q_1} = \frac{1}{1 + d(1/G_p - 1)}. \tag{7}$$

Если на половину поверхности нанесено нанопокрытие ($d = 0.5$), то при отношении градиента давления на участке без покрытия к градиенту давления на участке с покрытием $G_p = 2.2$ расход возрастает на 40 %. На рис. 5 приведены зависимости отношения расходов прокачиваемой жидкости от отношения градиентов давления для случаев, когда область с покрытием составляет 20, 50, 80 и 100 %.

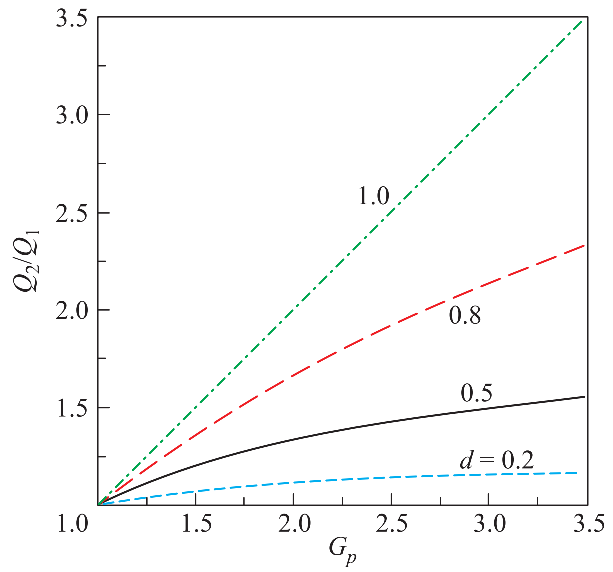

Рис. 5. Зависимости отношения расходов прокачиваемой жидкости от отношения градиентов давления

Теоретическая часть исследования и анализ выполнены за счет гранта Российского научного фонда (проект # 14-19-01755). Авторы благодарят Европейское космическое агентство за поддержку экспериментальных исследований, а также Dr. Romain Rioboo за помощь в изготовлении поверхности с нанопокрытием.

1. T. M. Squires and S. R. Quake, Rev. Mod. Phys. **77**, 977 (2005).

2. H. A. Stone, A. D. Stroock, and A. Ajdari, Annu. Rev. Fluid Mech. **36**, 381 (2004).
3. J. Ou, B. Perot, and J. P. Rothstein, Phys. Fluids **16**, 4635 (2004).
4. E. Karatay, A. S. Haase, C. W. Visser, C. Sun, D. Lohse, P. A. Tsai, and R. G. H. Lammertnik, Proc. Nat. Acad. Sci. **110**, 8422 (2013).
5. J. P. Rothstein, Annu. Rev. Fluid Mech. **42**, 89 (2010).
6. D. Byun, J. Kim, H. S. Ko, and H. C. Park, Phys. Fluids **20**, 113601 (2008).
7. V. S. Ajaev, E. Y. Gatapova, and O. A. Kabov, Phys. Rev. E **84**, 041606 (2011).
8. C. Ketelaar, Interfacial Phenomena and Heat Transfer **2**, 181 (2014).
9. *European patent EP 2028432A1* (2009).
10. O. A. Kabov, V. Cheverda, F. Biondi, D. Zaytsev, S. Chikov, P. Queeckers, M. Marengo, L. Araneo, R. Rioboo, J. de Coninck, A. Glushchuk, E. Bykovskaya, C. Iorio, B. Bourdon, and M. Memoli, *Fifth International Topical Team Workshop on Two-Phase Systems for Ground and Space Applications*, Book of Abstracts, Kyoto, Japan (2010).
11. R. Rioboo, M. Marengo, S. Dall'Olio, M. Voue, and J. De Coninck, Langmuir **25**, 6005 (2009).
12. Д. А. Лабунцов, В. В. Ягов, *Механика двухфазных систем*, Изд. дом МЭИ, М. (2007), с. 384.
13. D. Brutin, V. S. Ajaev, and L. Tadrist, Appl. Therm. Eng. **51**, 1317 (2013).