

## Гидродинамические течения вблизи супергидрофобных текстур

А. В. Беляев, О. И. Виноградова

Московский Государственный Университет им. М.В. Ломоносова,  
Учреждение РАН Институт физической химии и электрохимии им. А.Н. Фрумкина

Главный макроскопический параметр, характеризующий смачивание, – статический краевой угол, величина которого зависит от ряда факторов, таких как шероховатость поверхности, её химический состав и чистота, температура и т.д. Поверхности с краевым углом от  $150^\circ$  до  $180^\circ$  называют супергидрофобными. В последние годы большое внимание уделяется созданию искусственных микро-/нано-текстурированных гидрофобных поверхностей. Заполнение текстуры газовой фазой (так называемое состояние Касси) приводит к супергидрофобности и повышенной подвижности жидкости на таких текстурах [1].

Кроме макроскопических приложений, таких как супер-водоотталкивающая одежда и самоочищающиеся покрытия, супергидрофобные поверхности являются весьма перспективными для микро-/нанофлюидики, которая рассматривает течения малых объемов вязкой жидкости в очень узких (до нескольких нанометров) каналах, где гигантское сопротивление потоку делает транспорт под действием давления неэффективным. Значительная (и в общем случае анизотропная) подвижность жидкости на супергидрофобных поверхностях может быть особенно перспективна на микро- и наномасштабе в связи с развитием современных микро- и нанофлюидики, где супергидрофобные стенки каналов должны способствовать течению жидкости, а благодаря особым свойствам также необходимому во многих приложениях конвективному перемешиванию жидкостей и/или сепарации нанообъектов [2, 3]. Рациональный дизайн текстуры может значительно уменьшить вязкую диссипацию на относительно больших масштабах.

Композитная природа заполненной газом супергидрофобной текстуры предполагает наличие областей высокого и низкого скольжения. Точные решения задач о течении жидкости вблизи таких поверхностей были известны лишь в частных случаях [4].

Настоящая работа посвящена исследованию и математическому описанию течений жидкости вдоль нано- и микро-текстурированных супергидрофобных поверхностей (как правило, анизотропных). Используемый при формализации задачи и оптимизации свойств супергидрофобных текстур подход предполагает переход от локального описания свойств к эффективным (макроскопическим) характеристикам [5, 6]. Ожидаемое увеличение потока жидкости за счёт скольжения определяется эффективной тензорной величиной длины скольжения, которая является интегральной характеристикой геометрии поверхности и конфигурации канала. Предложены способы оптимизации текстур для различных приложений.

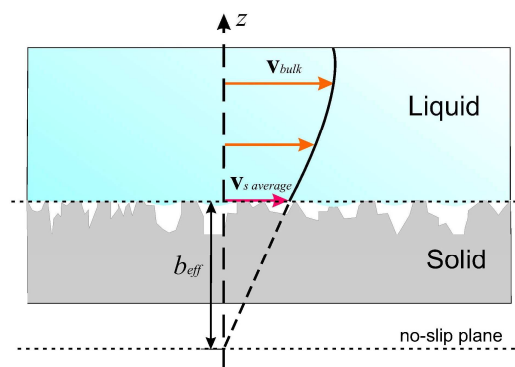


Рис.1. Иллюстрация, поясняющая определение эффективной длины скольжения.

В работе рассмотрено течение жидкости под действием давления в канале произвольной толщины  $H$ , одна из стенок которого покрыта анизотропной текстурой,

представляющей периодический массив полос-бороздок (так называемые «страйпы»). Задача, формализованная указанным способом, состоит в нахождении собственных значений тензора эффективной длины скольжения путем решения краевой задачи, сводимой к системе алгебраических уравнений с двойными тригонометрическими рядами.

Для случая бесконечно широкого канала получены приближенные аналитические выражения для эффективной длины скольжения в случаях, когда градиент давления направлен вдоль и поперек полос текстуры соответственно (здесь  $L$  – период текстуры,  $\delta$  – ширина скользкой фазы,  $b$  – локальная длина скольжения на границе жидкость-газ, пропорциональная глубине бороздок) [7]:

$$b_{\text{eff}}^{\parallel} = \frac{L}{\pi} \frac{\ln\left(\sec\frac{\pi\delta}{2L}\right)}{1 + \frac{L}{\pi b} \ln\left(\sec\frac{\pi\delta}{2L} + \tan\frac{\pi\delta}{2L}\right)}; \quad b_{\text{eff}}^{\perp} = \frac{L}{2\pi} \frac{\ln\left(\sec\frac{\pi\delta}{2L}\right)}{1 + \frac{L}{2\pi b} \ln\left(\sec\frac{\pi\delta}{2L} + \tan\frac{\pi\delta}{2L}\right)}.$$

Результаты расчетов для произвольной толщины канала показывают, что эффективное скольжение заметно растет вместе с  $H$  и достигает постоянного значения в широком канале ( $H \gg L$ ), совпадая с аналитическими решениями, указанными выше. В пределе тонкого ( $H \ll L$ ) канала главные значения тензора  $b_{\text{eff}}$  достигают границ Винера [5]. Рассматривая зависимости эффективной длины скольжения вдоль и поперек полос от толщины канала  $H$ , локальной длины скольжения  $b$  и доли «скользкой» фазы  $\delta/L$  (где  $L$  – характерный масштаб текстуры, период полос), можно заключить, что поток жидкости контролируется наименьшим масштабом длины системы.

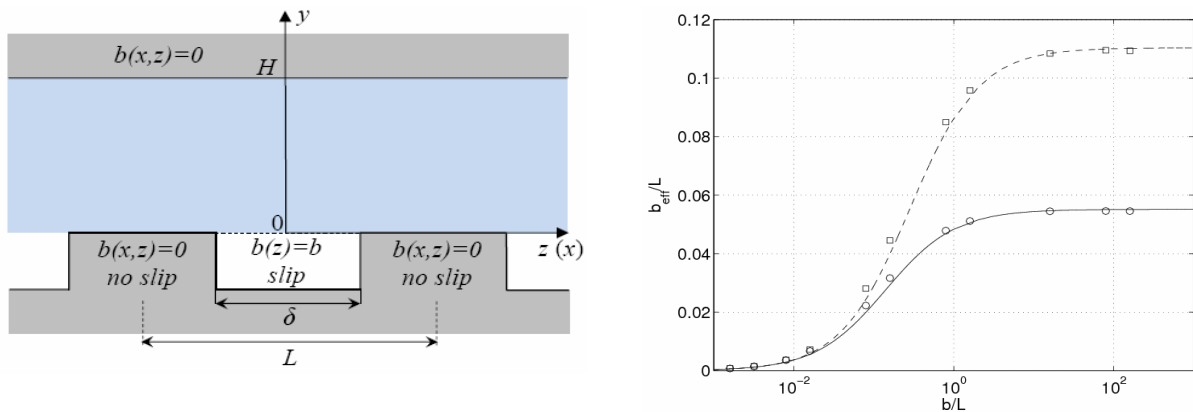


Рис. 2. Схематическое представление «страйп»-текстуры в состоянии Касси (слева) и главные значения тензора эффективной длины скольжения вдоль такой текстуры в зависимости от локальной длины скольжения при  $H \gg L$  (справа).

Также рассмотрена задача о гидродинамическом взаимодействии с супергидрофобными текстурами и рассчитана сила сопротивления, действующая на тело (диск или сферу), погруженное в жидкость и приближающееся к текстуре. В случае диска выражение для силы найдено аналитически и сформулировано в терминах поправочного множителя  $f_{\text{eff}}^*$  к классической формуле Рейнольдса для гидрофильных поверхностей без скольжения [8]. Эта поправка в общем случае представляет собой среднее гармоническое двух поправок для изотропной поверхности с эффективным скольжением, соответствующим главным направлениям текстуры:

$$f_{\text{eff}}^* = 2 \cdot \left[ \frac{H + 4b_{\text{eff}}^{\parallel}(H)}{H + b_{\text{eff}}^{\parallel}(H)} + \frac{H + 4b_{\text{eff}}^{\perp}(H)}{H + b_{\text{eff}}^{\perp}(H)} \right]^{-1} \quad (1)$$

Основное отличие от простой модели с постоянной длиной скольжения, использованной ранее для гладких изотропных гидрофобных поверхностей, состоит в том, что эффективная длина скольжения зависит от толщины зазора.

Снижение сопротивления особенно заметно на малом (по сравнению с периодом текстуры) расстоянии между поверхностями. Было показано, что величина  $f_{\text{eff}}^*$  не очень чувствительна к геометрии текстуры, но сильно зависит от доли поверхности жидкости в контакте с газовой фазой и локального скольжения жидкости на пузырьках газа [9].

В случае взаимодействия сферы большого радиуса с супергидрофобной стенкой в состоянии Касси кривизна гладкой поверхности приводит к дополнительной трудности: эффективные условия скольжения не только анизотропны, но и неоднородны вдоль текстуры, т.к. толщина зазора изменяется. Приближенные аналитические решения найдены в предельных случаях больших и малых расстояний между сферой и текстурой. В последнем случае  $f_{\text{eff}}^*$  асимптотически стремится к значениям для диска. Тем не менее, численное решение показывает, что в общем случае поправка для сферы не может быть вычислена как гармоническое среднее.

Согласно полученным результатам, супергидрофобные поверхности, содержащие стабилизированные текстурой пузырьки газа, способны существенно уменьшить гидродинамические силы сопротивления и обеспечить более эффективный транспорт жидкости в микро-каналах.

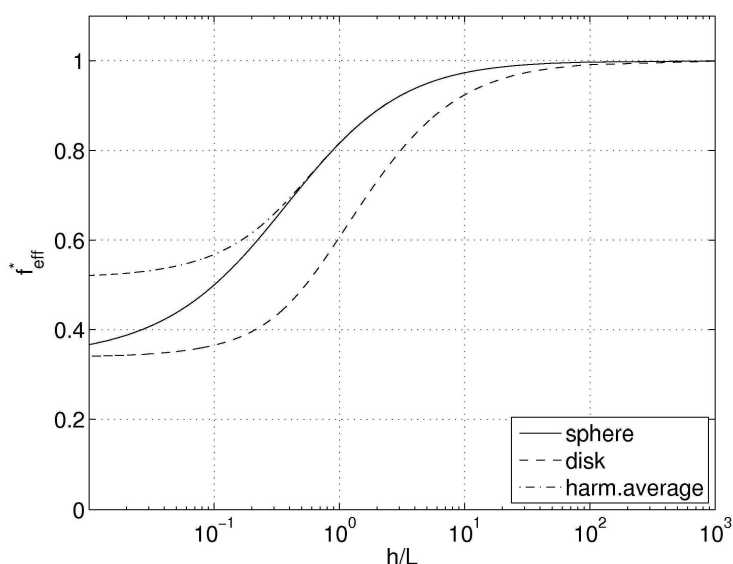


Рис. 3. Поправка на эффективное скольжение для гладкой сферы (сплошная линия) и диска (пунктирная), взаимодействующих с шероховатой текстурой в виде периодических полос с локальной длиной скольжения на границе жидкости с газом  $b/L=100$ , и долей скользких участков поверхности текстуры  $\delta/L=0.8$ . Штрих-пунктирная кривая соответствует гармоническому среднему поправок в двух главных направлениях.

1. Quere D., *Rep. Prog. Phys.*, 2005, **68**, 2495
2. Stone H. A., Stroock A. D. and Ajdari A., *Annu. Rev. Fluid Mech.*, 2004, **36**, 381.
3. Squires T. M. and Quake S. R., *Rev. Mod. Phys.*, 2005, **77**, 977.
4. Lauga E. and Stone H. A., *J. Fluid Mech.*, 2003, **489**, 55
5. Feuillebois F., Bazant M. Z. and Vinogradova O. I., *Phys. Rev. Lett.*, 2009, **102**, 026001.
6. Bazant M.Z. and Vinogradova O.I., *J. Fluid Mech.*, 2010, **613**, 125–134.
7. Belyaev A. V. and Vinogradova O. I., *J. Fluid Mech.*, 2010, **652**, 489–499
8. Reynolds O., *Philos. Trans. R. Soc. London*, 1886, **177**, 157–234.
9. Belyaev A. V. and Vinogradova O. I., *Soft Matter*, 2010, **6**, 4563–4570