

УДК 532.516.5:532.526.7:532.62

## СДВИГОВОЕ ТЕЧЕНИЕ ВЯЗКОЙ ЖИДКОСТИ НАД КАВЕРНОЙ, СОДЕРЖАЩЕЙ ПУЛЬСИРУЮЩИЙ ПУЗЫРЕК ГАЗА

© 2020 г. А. И. Агеев<sup>1,\*</sup>, А. Н. Осипцов<sup>1,\*\*</sup>

Представлено академиком РАН А.Г. Куликовским 08.04.2020 г.

Поступило 08.04.2020 г.

После доработки 08.04.2020 г.

Принято к публикации 09.04.2020 г.

Впервые проанализировано влияние флуктуаций давления на величину осредненного трения в сдвиговом течении вязкой жидкости над двумерной прямоугольной микрокаверной, занятой пульсирующим газовым пузырьком. Такая постановка задачи может моделировать течение в вязком подслое турбулентного потока жидкости вблизи микрокаверн полосчатой супергидрофобной поверхности. Цель работы — анализ возможных нестационарных механизмов, приводящих к осредненному проскальзыванию и снижению трения в турбулентном пограничном слое на супергидрофобной поверхности. Для численного решения уравнений Стокса, описывающих сдвиговое течение в вязком подслое над микрокаверной с пульсирующим газовым пузырьком, применяется метод граничных интегральных уравнений.

*Ключевые слова:* супергидрофобная поверхность, газовый пузырек, снижение трения, граничные интегральные уравнения, осредненное касательное трение

DOI: 10.31857/S2686740020030037

Поверхности, имеющие структурированную шероховатость (текстуру) в сочетании с химической гидрофобностью, принято называть супергидрофобными поверхностями (СГП). В элементах шероховатости (микрокавернах) силами поверхностного натяжения удерживаются микропузырьки газа. Трение на поверхности пузырьков практически отсутствует, что приводит к макроскопическому проскальзыванию жидкости и заметному снижению осредненного трения на СГП. Важной практической задачей является оптимизация текстуры поверхности для минимизации трения при внешнем обтекании СГП или перепада давления в каналах с супергидрофобными стенками. Необходимость решения такой задачи поддерживает интерес к параметрическому численному моделированию течений вязкой жидкости вдоль СГП [1–4]. Механизмы снижения вязкого трения в стационарных потоках, когда форма поверхности микропузырьков не меняется, достаточно подробно изучены, и установлены границы эффективного использования СГП для снижения трения [1, 2]. Для нестационарных и турбулентных течений вдоль СГП

вопрос о возможных механизмах снижения трения остается малоизученным [4], хотя имеются экспериментальные подтверждения снижения трения на СГП в турбулентном потоке [5]. В данной работе на модельном примере проанализирован один из возможных механизмов снижения трения, связанный с пульсациями формы микропузырьков газа в кавернах полосчатой СГП при флуктуациях давления на стенке в турбулентном потоке.

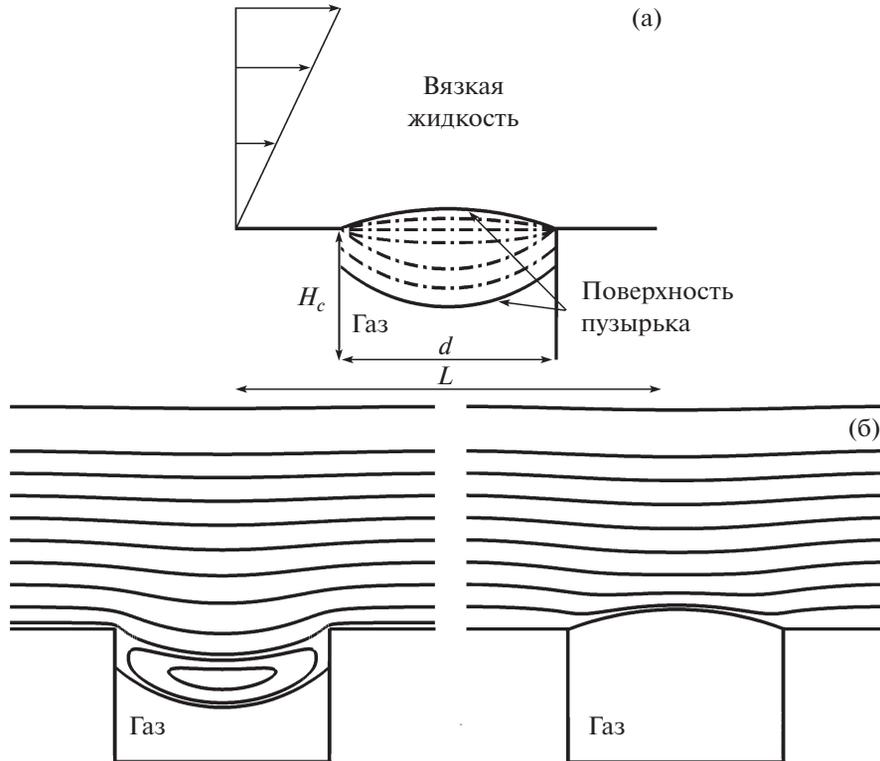
### ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Рассматривается плоское нестационарное сдвиговое течение вязкой жидкости вблизи СГП, текстура которой образована периодически расположенными двумерными прямоугольными кавернами шириной  $d$ , содержащими пузырьки газа (рис. 1). В силу периодичности расположения каверн задача сводится к расчету течения на масштабе одного периода  $L$  в окрестности одиночной каверны, содержащей газовый пузырек. Ставятся периодические граничные условия для скорости на левой и правой границах расчетной области  $u^* = (k^*y^*, 0)$  при наложенных гармонических пульсациях давления  $p^*(t^*) = P_0^* + P^*\sin(\omega^*t^*)$ , где  $P^*$  и  $\omega^*$  — амплитуда и частота пульсаций (звездочки, где необходимо, отмечают размерные переменные). Линейный профиль скорости с высокой точностью удовлетворяет условиям периодичности и гладкости для полосчатых СГП с

<sup>1</sup> Научно-исследовательский институт механики Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

\*E-mail: aaiageev@mail.ru

\*\*E-mail: osiptsov@imec.msu.ru



**Рис. 1.** Схема сдвигового течения жидкости в вязком подслое над каверной, содержащей газовый пузырек: сплошные линии – предельные формы пузырька, штрихпунктирные – промежуточные формы границы пузырька (а); мгновенные картины линий тока для предельных форм пузырька в каверне (б).

разреженной системой каверн ( $d/L \leq 0.6$ ) [1]. На внешней границе ( $y^* = L$ ) задана скорость  $\mathbf{u}^* = (k^*L, 0)$ , на твердых стенках ставится условие прилипания, а на границе пузырька – условия непротекания и отсутствия касательных напряжений. При наличии пульсаций давления происходит периодическое изменение объема пузырька, удерживаемого каверной. Диффузионные эффекты, связанные с растворимостью газа в жидкости, не учитываются, поэтому масса газа в каверне считается неизменной. Течение описывается в декартовой системе координат  $x^*Oy^*$  с началом в середине отрезка, проходящего через угловые точки каверны (рис. 1). Вводятся безразмерные переменные:  $\mathbf{x}^* = \mathbf{x}L$ ,  $\mathbf{u}^* = \mathbf{u}U$ ,  $t^* = t/\omega^*$ ,  $p^* = p\rho^*U/L$ , где  $U = k^*L$  – скорость на верхней границе, а  $\mu^*$  – динамическая вязкость жидкости.

Для характерных значений  $L \sim 10^{-5}$  м,  $U \sim 10^{-3}$  м/с и  $\omega^* \sim 10^3$  с $^{-1}$ , соответствующих практически важным случаям течений вдоль СГП, числа Рейнольдса настолько малы, что для описания локального течения жидкости применимо квазистационарное приближение Стокса:  $\Delta \mathbf{u} - \nabla p = 0$ ,  $\nabla \cdot \mathbf{u} = 0$ . Время входит как параметр в уравнение, описывающее форму и положение мениска в каверне. Форма мениска считается квазистатической (дуга окружности), при этом радиус мениска, смещенного

внутрь каверны, определяется заданным углом смачивания, а для мениска, закрепленного в углах каверны, радиус определяется мгновенным объемом пузырька. Мгновенный объем газового пузырька находится из условия постоянства массы газа при наличии баротропии с учетом скачка давления на границе пузырька, связанного с поверхностным натяжением. За начальную форму поверхности пузырька и положение мениска принимается статическая форма поверхности, выпуклая внутрь каверны, и параметры СГП из [6] (см. рис. 1).

## МЕТОД РЕШЕНИЯ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

Ниже приводятся результаты расчетов для наиболее показательного случая изменения формы границы пузырька, совершающей периодические колебания между предельными положениями, показанными на рис. 1. При повышении давления выше значения, соответствующего начальной форме поверхности пузырька, радиус кривизны не меняется, газ сжимается, и точки закрепления мениска сдвигаются в каверну. Затем при понижении давления точки закрепления мениска движутся вверх, к углам каверны, и при достижении некоторого значения давления поверхность пузырька

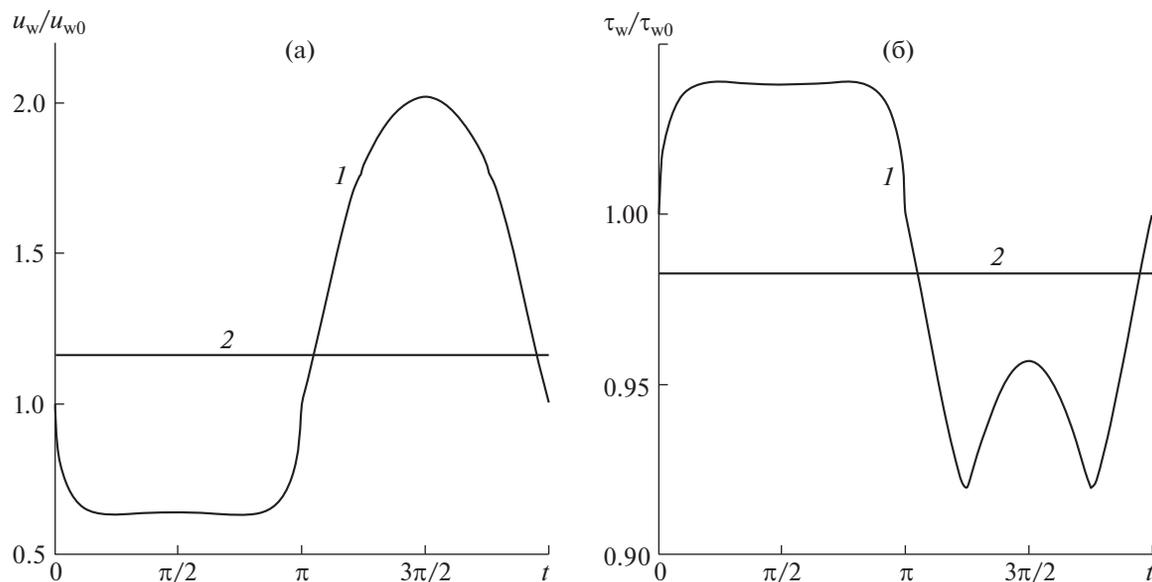


Рис. 2. Зависимость  $u_w/u_{w0}$  (а) и  $\tau_w/\tau_{w0}$  (б) от  $t$ : 1 – мгновенные значения, 2 – значения, осредненные по времени.

начинает выступать во внешний поток. Поскольку существует предельное положение мениска, выступающего в поток, при котором снижение осредненного трения сменяется его увеличением [7], в наших расчетах рассматривался лишь диапазон амплитуд давления, при которых снижение трения имеет место для всех положений мениска.

Для мгновенного положения мениска решается задача о стоксовом течении жидкости в области со смешанными граничными условиями: на части границы заданы обе компоненты скорости, а на другой части (поверхности пузырька) – нулевая нормальная скорость и отсутствие касательных напряжений. Для нахождения численного решения использовался вариант метода граничных интегральных уравнений [1, 2]. Указанный метод позволяет заменить решение уравнений Стокса решением системы граничных интегральных уравнений для “плотностей” фундаментальных решений оператора Стокса (“стокслетов” и “стресслетов”) [8]. Искомые значения данных плотностей находятся из решения методом коллокаций граничных интегральных уравнений, записанных для точек границы расчетной области, при удовлетворении исходным граничным условиям задачи. Разработанный алгоритм численного решения граничных интегральных уравнений позволяет проводить расчеты параметров течения с контролируемой точностью (детали см. в [1, 2]). После нахождения плотностей фундаментальных решений вычисляется поле скорости и скорость проскальзывания на поверхности пузырька. Осредненное по пространственному периоду касательное напряжение вычисляется из решения осредненной одномерной задачи о течении в эффек-

тивном плоском канале с условием скольжения на его нижней стенке. После вычисления мгновенных значений скорости скольжения и трения на нижней границе канала выполняется их осреднение по периоду пульсаций потока.

На рис. 2 представлены результаты расчетов мгновенных значений (осредненных по пространственному периоду  $L$ ) относительной скорости скольжения  $u_w/u_{w0}$  и относительного касательного трения на нижней стенке  $\tau_w/\tau_{w0}$ . Индексы ноль здесь относятся к исходным значениям в отсутствие наложенных пульсаций давления. Приведены расчеты для СГП с  $L = 200$  мкм,  $H_c = 180$  мкм,  $d/L = 0.5$  и  $P_0^* = 1$  атм,  $T = 293$  К [6]. Для заданного значения давления начальный статический угол смачивания выбирался как в [6]. Для выбранных параметров вычислялась масса воздуха, удерживаемого в каверне. Амплитуда пульсаций давления составляла 12% от  $P_0^*$ .

Промежуток  $0 \leq t \leq \pi$  соответствует увеличению давления и сжатию воздуха;  $t > \pi$  – уменьшению мгновенного значения давления и расширению воздуха. При сжатии газа снижается мгновенное проскальзывание жидкости на СГП и увеличивается осредненное трение, а при расширении пузырька – проскальзывание увеличивается до значения, соответствующего предельной форме пузырька, выступающего в основной поток, а трение понижается до значения, соответствующего прямолинейной поверхности пузырька и возрастает при дальнейшем выпячивании пузырька в поток.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные численные расчеты показали, что максимальные и минимальные значения осредненного по периоду текстуры касательного напряжения лежат между значениями, соответствующими стационарному течению над каверной с предельным положением поверхности пузырька, выпуклой вниз, и течению с плоской границей пузырька, закрепленной в углах каверны. Наиболее существенным результатом является демонстрация того, что наложенные колебания давления могут приводить к увеличению осредненного скольжения и снижению трения, т.е. в турбулентном пограничном слое над СГП трение может быть даже ниже, чем в ламинарном течении с аналогичными параметрами. Для выбранных значений параметров снижение среднего за период пульсаций трения на СГП составляет 10% по сравнению с течением вблизи гладкой плоской стенки.

## ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена по госбюджетному плану МГУ имени М.В. Ломоносова при частичной поддержке гранта РФФИ № 20–01–00103.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ageev A.I., Golubkina I.V., Osiptsov A.N. Application of boundary element method to Stokes flows over a striped superhydrophobic surface with trapped gas bubbles // *Physics of Fluids*. 2018. V. 30. 012102.
2. Ageev A.I., Осипцов А.Н. Стоксово течение в микроканале с супергидрофобными стенками // *Известия РАН. Механика жидкости и газа*. 2019. № 2. С. 59–71.
3. Javaherchian J., Moosavi A. Pressure drop reduction of power-law fluids in hydrophobic microgrooved channels // *Physics of Fluids*. 2019. V. 31. № 7. 073106.
4. Cartagena E.J.G., Arenas I., Bernardini M., et al. Dependence of the drag over super hydrophobic and liquid infused surfaces on the textured surface and Weber number // *Flow, Turbulence and Combustion*. 2018. V. 100. № 12. P. 945–960.
5. Henoeh C., Krupenkin T.N., Kolodner P., et al., Turbulent drag reduction using superhydrophobic surfaces // *Collection of Technical Papers: Third AIAA Flow Control Conference*. 2006. V. 2. P. 840.
6. Ling H., Katz J., Fu M., et al. Effect of Reynolds number and saturation level on gas diffusion in and out of a superhydrophobic surface // *Physical Review Fluids*. 2017. V. 2. № 12. 124005.
7. Davis A.M.J., Lauga E. Geometric transition in friction for flow over a bubble mattress // *Physics of Fluids*. 2009. V. 21. 011701.
8. Pozrikidis C. *Boundary integral and singularity methods for linearized viscous flow*. N.Y.: Cambridge University Press; 1992.

## SHEAR FLOW OF A VISCOUS FLUID OVER A CAVITY WITH A PULSATING GAS BUBBLE

A. I. Ageev<sup>a</sup> and A. N. Osiptsov<sup>a</sup>

<sup>a</sup> *Institute of Mechanics, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russian Federation*  
Presented by Academician of the RAS A.G. Kulikovskii

For the first time, the effect of pressure fluctuations on the averaged shear stress in a shear viscous flow over a two-dimensional rectangular microcavity containing a pulsating gas bubble is studied. This problem formulation can be regarded as a model of a fluid flow in a viscous sublayer of a turbulent boundary layer in a vicinity of microcavities of a striped superhydrophobic surface. The aim of the study is to analyze possible non-stationary mechanisms resulting in an average velocity slip and a friction reduction in a turbulent boundary layer on a superhydrophobic surface. The method of boundary integral equations is used to solve numerically the Stokes equations describing a shear-driven viscous flow in a viscous sublayer over a single microcavity containing a compressible gas bubble.

*Keywords:* superhydrophobic surface, gas bubble, friction reduction, boundary integral equation method, averaged shear stress