

УДК 532.526.4

## О ВОЗМОЖНЫХ МЕХАНИЗМАХ ВОЗДЕЙСТВИЯ ПУЗЫРЬКОВ ГАЗА НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ТУРБУЛЕНТНОГО ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ

Л.И. МАЛЬЦЕВ, А.Г. МАЛЮГА, Б.Г. НОВИКОВ

*Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск*

Выявлено два существенно различающихся механизма воздействия пузырьков газа в турбулентном пограничном слое на касательные напряжения у смоченной поверхности. Оба механизма обязаны высокой чувствительности пузырьков даже к очень малым для однородной среды градиентам давления и большим значениям коэффициента присоединенной массы и коэффициента вязкого сопротивления пузырьков. Первый механизм проявляется при взаимодействии вихревых структур с пузырьками в пристенном слое  $y^+ < 250$ . Второй — при наличии градиента давления вдоль смоченной поверхности. Выявление этих механизмов позволило объяснить известные противоречия результатов по газонасыщению, полученных на разных экспериментальных установках.

Газонасыщение, турбулентный пограничный слой, вихревые структуры, пузырьки, градиент давления, снижение трения.

### ВВЕДЕНИЕ

Впервые идея уменьшения трения воды о твердую поверхность путем вдува газа была высказана Фрудом в 1875 г., а запатентована Лавалем в 1883 г. [1]. В 1942–43 гг. К.К. Федяевский и Л.Г. Лойцянский аналитически предсказали возможность уменьшения касательных напряжений на два порядка путем введения в турбулентный пограничный слой пузырьков газа (газонасыщения). В шестидесятых годах прошлого столетия в Институте гидродинамики СО РАН под руководством профессора Г.С. Мигиренко проведены систематические исследования по микропузырьковому газонасыщению турбулентного пограничного слоя и получены весьма обнадеживающие результаты [2, 3]. Их публикация в середине 70-х годов вызвала большой интерес в США, Японии и в других странах [1, 4–7]. В настоящее время насыщение турбулентного пограничного слоя пузырьками газа рассматривается в качестве одного из наиболее перспективных способов уменьшения сопротивления движущихся в воде судов [8].

Во многих исследованиях показано, что газонасыщение турбулентного пограничного слоя способно обеспечить уменьшение касательных напряжений на горизонтальных пластинах до 80–90 %. Однако экспериментальные зависимости относительного уменьшения коэффициента касательных напряжений  $C_f(C_Q, Re_x)/C_f(0, Re_x)$ , полученные на разных установках, не только сильно расслаиваются, но нередко и качественно противоречат друг другу. Здесь  $C_Q = Q/U_\infty S$  — коэффициент расхода подаваемого в пограничный слой воздуха,

$Re_x = U_\infty x / \nu$  — число Рейнольдса,  $Q$  — объемный расход воздуха,  $U_\infty$  — скорость потока,  $S$  — характерная площадь (например, площадь проницаемой вставки [1, 3]),  $x$  — расстояние от кормовой кромки проницаемой вставки,  $\nu$  — кинематическая вязкость воды. Такая противоречивость результатов без выяснения механизмов взаимодействия пузырьковой пелены с турбулентными потоками исключает возможность их прогнозирования как для других условий, так и для крупномасштабных объектов.

Уже с середины 80-х годов внимание исследователей было приковано к изучению механизмов воздействия пузырьковой пелены на касательные напряжения в турбулентном пограничном слое [7]. При этом нигде не учитывалось возможное движение пузырьков относительно прилегающих слоев жидкости под воздействием локальных и интегральных градиентов давления. Целью настоящей работы является выявление механизмов взаимодействия пузырьковой пелены с турбулентным течением в пограничном слое с учетом их высокой чувствительности даже к малым градиентам давления.

### 1. Пузырьковая пелена в градиентном пограничном слое

Воздушные пузырьки обладают пренебрежимо малой по сравнению с водой плотностью. Поэтому их ускорение должно быть весьма чувствительным к воздействию даже пренебрежимо малых для однородной жидкости локальных градиентов давления. С другой стороны, для сферической формы пузырьков характерны большие значения присоединенной массы и большие значения коэффициента вязкого сопротивления. Гидродинамическое сопротивление пузырька, движущегося относительно прилегающих слоев жидкости, вызывает соответствующее изменение количества движения в его следе. При объемной концентрации пузырьков порядка 20–60 % каждый пузырек движется в следе впереди движущейся лавины пузырьков и непрерывно вносит свой вклад в изменение количества движения и средней скорости насыщенного пузырьками слоя жидкости. Под воздействием положительного или отрицательного градиента давления вдоль смоченной поверхности насыщенный пузырьками пристенный слой жидкости движется, соответственно, с меньшей или большей скоростью, чем тот же слой без пузырьков. В результате изменяются полнота профиля средней скорости и, соответственно, касательных напряжений на смоченной поверхности. Кроме того, при движении пузырьков в сдвиговом потоке на них действует сила Жуковского, направленная по нормали к скорости движения пузырька и пропорциональная произведению плотности жидкости, относительной скорости его движения и интегральной завихренности потока в объеме пузырька [9]. При отрицательном градиенте давления силы Жуковского прижимают пузырьки к смоченной поверхности. Поджатие к смоченной поверхности насыщенного пузырьками и движущегося с большей скоростью слоя жидкости увеличивает время нахождения пузырьков в пристенном слое и одновременно касательные напряжения на смоченной поверхности. При положительном градиенте давления пузырьки оттесняются от смоченной поверхности. Скорость наполненного пузырьками слоя жидкости уменьшается. Уменьшаются полнота профиля средней скорости и касательные напряжения. Результаты таких воздействий на касательные напряжения газонасыщенного турбулентного пограничного слоя на горизонтальной пластине показаны на рис. 1, заимствованном из [1].

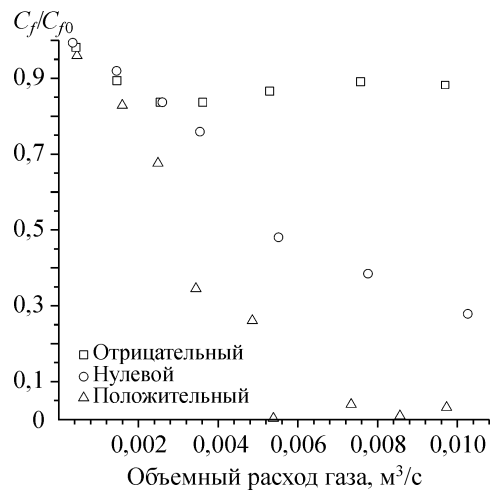


Рис. 1. Зависимость относительного уменьшения касательных напряжений  $C_f/C_{f0}$  от объемного расхода воздуха  $Q$  м³/с при наличии отрицательного, нулевого и положительного градиентов давления [1].

## 2. Взаимодействие вихревых структур с пузырьковой пленой

Большинство экспериментальных исследований по газонасыщению пограничного слоя выполнено в номинально безградиентных турбулентных пограничных слоях на или под горизонтальными пластинами. В строго безградиентных потоках однородной среды касательные напряжения на смоченной поверхности полностью определяются развитием в пограничном слое вихревых структур [12–14]. Поэтому естественно ожидать, что при газонасыщении безградиентных потоков касательные напряжения на смоченной поверхности должны существенно зависеть от взаимодействия вихревых структур с пузырьками в пограничном слое. Анализ ранних [12] и более поздних [13, 14] исследований генерации вихревых структур в безградиентных потоках выявляет периодическое движение всех типов вихревых структур от смоченной поверхности. Процессы формирования пелены продольных вихрей, вихревых шпилек и их пакетов протекают преимущественно в слое  $y^+ < 250$ . Вне этого слоя пузырьки и вихревые структуры слабо влияют на величину касательных напряжений на смоченной поверхности [14].

Экспериментальные исследования газонасыщения турбулентного пограничного слоя показывают, что пузырьки, как правило, не могут проникнуть, по крайней мере, в слой  $y^+ < 10$ , где формируется пелена продольных вихрей [1, 2, 15]. Поэтому при наличии в слое  $y^+ < 250$  пузырьков оттесняемая от смоченной поверхности пелена продольных вихрей, вихревые шпильки и их пакеты при своем движении от смоченной поверхности должны наталкиваться на пузырьковую пелену. Характерной особенностью всех известных вихревых структур является наличие минимума давления в их ядрах [13]. При наличии же локальных градиентов давления вне и внутри вихревых структур возможно всасывание мелких пузырьков в ядра этих структур со всеми вытекающими из этого последствиями.

Для выяснения таких возможностей в прямоугольном баке  $7,7 \times 2,8 \times 2$  дм<sup>3</sup> с плоскими прозрачными стенками исследовано прохождение кольцевых вихрей через пузырьковую пелену. Кольцевые вихри использованы потому, что аналогично им должны взаимодействовать с пузырьками и головы вихревых шпилек, и их

ноги и вихревые пары пелены продольных вихрей. В центре одной из торцевых стенок бака был установлен стандартный генератор кольцевых вихрей с выходным диаметром сопла 5,5 мм. Жидкость внутри генератора подкрашивалась спиртовым раствором уранина. Формирование кольцевого вихря с четко окрашенным тороидальным ядром завершалось на расстоянии 30–40 мм от генератора. Диаметр тела кольцевого вихря составлял около 12 мм. На расстоянии 60–70 мм от торцевой стенки создавалась вертикальная пузырьковая пелена из всплывающих микропузырьков (пузырьковый туман) при гидролизе и сравнительно крупных (до трех миллиметров) пузырьков при подаче воздуха через пористый материал. Толщина пузырьковой пелены изменялась от 7 до 60 мм. Наблюдения показали, что все кольцевые вихри пересекали пузырьковую пелену не разрушаясь. Из пузырьковой пелены они выходили с пузырьками примерно одинакового диаметра, равномерно распределенными вдоль оси тороидального ядра. Пузырьки никогда не покидали ядра вихря вплоть до его разрушения в результате столкновения с противоположной стенкой бака.

Для моделирования взаимодействия кольцевого вихря с пузырьками, размер которых равен или превосходит размер тела вихря, были использованы пластмассовые шарики диаметром 10 мм. Испытаны как сплошные шарики с плотностью, близкой к плотности воды, так и полые с тонкой и легкой оболочкой. Во всех случаях при лобовом столкновении кольцевые вихри передавали шарикам импульс в направлении своего движения, а сами разрушались.

Типичный диапазон диаметров воздушных пузырьков в пограничном слое находится в пределах от 100 до 250 пристенных единиц длины ( $100 < d^+ < 250$ ). Типичный поперечный размер вихревых пар в пелене продольных вихрей однородной среды (масштаб вихревых пар  $h$ ) считается равным  $h^+ \approx 100$ . При аккуратном введении пузырьков в пограничный слой концентрация пузырьков в полосе  $y^+ < 250$  достигает 20–60 %. При указанных выше соотношениях масштабов вихревых структур и пузырьков, их взаимодействие должно приводить к оттеснению пузырьковой пелены от смоченной поверхности и разрушению вихревых структур. По мере вытеснения пузырьков из слоя  $y^+ < 250$  постепенно восстанавливаются процессы формирования вихревых структур.

### **3. Газонасыщение номинально безградиентных турбулентных потоков**

Для выяснения причин различий и прямых противоречий между собственными результатами и результатами [2, 3], авторы [1] воспроизвели технологию изготовления и характеристики используемых в [2, 3] проницаемых вставок. Однако это не помогло устранить имеющиеся противоречия. Сравнение же параметров экспериментальных установок, используемых в [1] и [2, 3], показывает, что при прочих равных условиях в [1] вдоль оси потока существовал пренебрежимо малый для однородной среды отрицательный градиент давления, тогда как в [2, 3] столь же малый, но положительный градиент давления. Учитывая высокую чувствительность пузырьков даже к очень малым градиентам давления, вполне естественно предположить, что расслоения и противоречия полученных в [1] и в [2, 3] результатов вызваны именно различием в знаках малых градиентов давления вдоль осей используемых установок.

Эффективность воздействия пузырьковой пелены на профиль средней скорости в пограничном слое определяется скоростью  $u$  движения пузырьков относительно прилегающих к нему слоев жидкости. При заданном нормированном градиенте гидродинамического давления силы плавучести, воздействующие на

пузырьки, пропорциональны квадрату скорости потока  $U_\infty$  и кубу диаметра пузырьков  $d$ . В квазистационарном режиме силы плавучести равны силам сопротивления. При малой скорости движения микропузырьков (при малых числах Рейнольдса) силы сопротивления движению пузырьков относительно прилегающих слоев жидкости пропорциональны вязкости  $\mu$ , относительной скорости пузырьков  $u$  и их диаметру  $d$ . Следовательно, скорость движения пузырьков относительно прилегающих слоев жидкости  $u$  пропорциональна квадрату скорости потока  $U_\infty$  и квадрату диаметра пузырьков  $d^2$ . Силы Жуковского пропорциональны относительной скорости движения пузырька  $u$ , объему пузырька и завихренности потока. Таким образом, эффективность воздействия градиента давления на пузырьки, а следовательно, и на касательные напряжения, пропорциональна квадратам размеров пузырьков в пелене и скорости набегающего потока.

Сравнение результатов исследований [1] и [2, 3] показывает, что все имеющиеся в них несовпадения и противоречия действительно являются следствием различия знаков пренебрежимо малых для однородных сред градиентов давления вдоль смоченных поверхностей. Поджатие пузырьков к смоченной поверхности в [1] и, наоборот, оттеснение пузырьков от смоченной поверхности в [2, 3] приводит к тому, что в [1] протяженность области, где  $C_f(C_Q, Re_x)/C_f(0, Re_x) < 1$ , достигает 35, а в [2, 3] всего 15–20 толщин пограничного слоя. При этом одинаковое уменьшение касательных напряжений в [1] достигается при несколько больших расходах воздуха, чем в [2, 3].

Различие воздействий скорости потока на эффективность газонасыщения обязано тому, что имеет место положительный или отрицательный знак градиента давления вдоль смоченной поверхности. Воздействующие на пузырьки силы плавучести пропорциональны квадрату скорости потока. Поэтому, с увеличением скорости потока эффективность газонасыщения в [1] должна существенно уменьшаться, а в [2, 3], напротив, возрастать. Это и происходит. В [1] при подаче в пограничный слой пузырьков через крупнопористый материал с эффективным диаметром отверстий  $100 \mu m$  при скорости потока  $U_\infty = 4,8$  м/с уменьшение касательных напряжений достигает 80 %, тогда как при  $U_\infty = 16,7$  м/с — всего 50 %. В [3] же на расстоянии 65 мм от пористой вставки, при значениях скорости потока  $U_\infty = 2, 4, \text{ и } 6$  м/с, уменьшение касательных напряжений достигает 40, 55 и 80 %, а на расстоянии 115 мм — 25, 45 и 60 % соответственно. Зависимость эффективности газонасыщения от диаметра пузырьков иллюстрируют результаты [1]. При подаче воздуха через пористую пластину с эффективным диаметром  $0,5 \mu m$ , в отличие от пористой пластины с диаметром  $100 \mu m$ , все результаты измерений, независимо от скорости потока, аппроксимируются единой кривой  $C_f(C_Q, Re_x)/C_f(0, Re_x)$ . При этом микропузырьки обеспечивают максимальную эффективность, достигнутую при подаче пузырьков через пористую пластину с эффективным диаметром  $100 \mu m$  при самой малой скорости потока  $U_\infty = 4,8$  м/с. При отрицательном градиенте давления касательные напряжения зависят и от взаимодействия вихревых структур с пузырьками в слое  $y^+ < 250$ , и от воздействия на пузырьковую пелену продольного градиента давления. При положительном градиенте давления пузырьки быстро изгоняются из слоя  $y^+ < 250$ . Касательные напряжения зависят, прежде всего, от воздействия продольного градиента давления на пузырьковую пелену.

#### 4. Требования к подаче пузырьков в пограничный слой

Уменьшение касательных напряжений на пористой вставке в несколько раз меньше, чем за ней [11]. Поэтому при газонасыщении пограничного слоя на телах конечной длины желательно минимизировать площадь пористой вставки и располагать их ближе к носовой кромке. В номинально безградиентных потоках существенное влияние на касательные напряжения оказывают пузырьки в слое  $y^+ < 250$ . Поэтому желательна такая организация подачи пузырьков в пограничный слой, при которой основная масса пузырьков за вставкой остается в слое  $y^+ < 250$ . Однако чем меньше площадь пористой вставки, тем больше скорость выброса пузырьков. В [1] показано, что при уменьшении длины некоторой пористой вставки в два раза для получения того же уменьшения касательных напряжений требуется в два раза увеличить объемный расход подаваемого воздуха. Аналогичные результаты получены и в [10, 11]. Скорость выброса пузырьков и их размер зависят и от гидрофильности поверхности пористой вставки [11].

Большая скорость выброса пузырьков через пористые вставки может привести даже к отрыву потока с образованием так называемой застойной области. В [11] на горизонтальной пластине на расстоянии  $0 < x < 2L_p$  от кормовой кромки пористой вставки длиной  $L_p$  без подачи воздуха имел место пренебрежимо малый положительный градиент давления, а при  $2L_p < x < 3,6L_p$  — столь же малый, но отрицательный градиент давления (рис. 2). При  $C_Q \leq 0,007$  подача воздуха в пограничный слой не влияла на распределение давления. При  $C_Q = 0,012$  и  $C_Q = 0,022$  в промежутке  $0 < x < 1,2L_p$  формируется значительный положительный градиент давления и достигается максимальное уменьшение касательных напряжений. При  $x > 3,6L_p$  касательные напряжения и давление вдоль смоченной поверхности при всех  $C_Q$  неотличимы от аналогичных характеристик потока однородной среды.

В связи с этим на телах конечной длины подавать пузырьки в пограничный слой целесообразно перед сечением минимального давления [10, 11]. Небольшой отрицательный градиент давления вблизи кормовой кромки проницаемой вставки препятствует выбросу пузырьков из слоя  $y^+ < 250$ . За сечением минимального давления желательно иметь оптимальное значение положительного градиента давления.

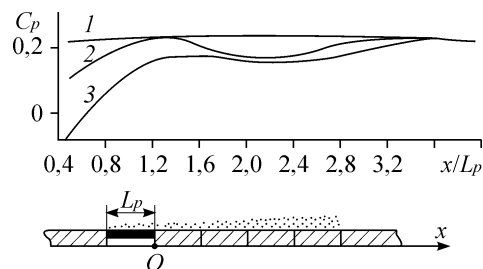


Рис. 2. Распределение давления за пористой вставкой на горизонтальной пластине при трех значениях объемного расхода воздуха:  $C_Q = Q/U_\infty L_p = 0,007, 0,012$  и  $0,022$ .

$Q$  — объемный расход воздуха,  $U_\infty$  — скорость потока,  $L_p$  — длина пористой вставки.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В турбулентном пограничном слое, насыщенном микропузырьками газа, важную роль играет наличие даже малого градиента давления вдоль смоченной поверхности. В безградиентных потоках на касательные напряжения эффективно воздействуют только пузырьки, находящиеся в подслое  $y^+ < 250$ , диаметр которых соизмерим с толщиной этого подслоя. При наличии градиента давления вдоль смоченной поверхности на касательные напряжения воздействуют пузырьки, находящиеся во всей толще пограничного слоя. Поэтому требования к их размеру становятся более мягкими. При положительном градиенте давления насыщение пузырьками пограничного слоя жидкости приводит к уменьшению касательных напряжений на стенке. И наоборот, при отрицательном градиенте давления введение микропузырьков газа в пограничный слой приводит к увеличению касательных напряжений.

## СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

$U_\infty$ — скорость основного потока, м/с,	$C_Q = Q/U_\infty S$ — коэффициент расхода газа,
$\nu$ — коэффициент кинематической вязкости, м <sup>2</sup> /с,	$v^* = \sqrt{\tau/\rho}$ — динамическая скорость, м/с,
$Q$ — объемный расход газа, м <sup>3</sup> /с,	$Re_x = (v_\infty x)/\nu$ — число Рейнольдса,
$\tau$ — касательное напряжение, Н/м <sup>2</sup> ,	$y^+ = (y v^*)/\nu$ — пристенный масштаб длины.
$S$ — характерная площадь, м <sup>2</sup> ,	
$\rho$ — плотность жидкости, кг/м <sup>3</sup> ,	
$C_f = \tau/(1/2)\rho U_\infty^2$ — коэффициент касательного напряжения,	

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Merkle C.L., Deutsch S. Drag reduction in liquid boundary layers by gas injection / Ed: Bushnell D. M. and Hefner J. N. Viscous drag reduction in boundary layers // Тоже: Progress in Astronautics and Aeronautics. Vol. 123. — Washington: American Institute of Aeronautics and Astronautics Publishing, 1990. — P. 351–413.
2. Мигиренко Г.С., Евсеев А.Р. Турбулентный пограничный слой с газонасыщением // Проблемы теплофизики и гидродинамики. — Новосибирск: Наука, 1974. — С. 132–144.
3. Богдевич В.Г., Малюга А.Г. Распределение поверхностного трения в турбулентном пограничном слое за местом вдува газа // Исследования по управлению пограничным слоем. — СО АН СССР. Ин-т теплофизики, 1976. — С. 62–70.
4. Kato H., Miyahara M., Haramoto Y., Guin M.M. Frictional drag reduction by injecting bubbly water into turbulent boundary layer // Cavitation and Gas-Liquid Flow in Fluid Machinery and Devices ASME. — 1994. — P. 185–194.
5. Guin M.M., Kato H., Yamaguchi H. et al. Reduction of skin friction by microbubbles and its relation with near-wall bubble concentration in a channel // J. of Marine Science and Technology. — 1996. — № 1. — P. 241–254.
6. Olivieri A., Jacob B., Canello A. et al. The effect of microbubbles on a flat plate turbulent boundary layer // Proc. of the 2nd Intern. Symp. on Seawater Drag Reduction, Busan, Korea, 23-26 May 2005. — P. 145–154.
7. Ferrante A., Elghobashi S. On the physical mechanisms of drag reduction in a spatially developing turbulent boundary layer with microbubbles // J. Fluid Mech. — 2004. — Vol. 503. — P. 345–355.
8. Kodama Y., Kakugawa A., Takahashi T. et al. A full-scale experiment on microbubbles for skin friction reduction using seiun-maru. pt 1: the preparatory study // J. of the Society of Nave Architects of Japan. — 2002. — Vol. 192. — P. 1–14.
9. Микута В.И., Новиков Б.Г. Обтекание профилей круговым потоком // ПИМТФ. — 1960. — № 3. — С. 97–101.
10. Maltsev L.I. Jet methods of gas injection into fluid boundary layer for drag reduction // Applied scientific research. — 1995. — № 54. — P. 281–291.

11. **Bogdevich V.G., Maltzev L.I., Maluga A.G.** Optimisation of the distributed gas injection into a turbulent boundary layer for the drag reduction // Proc. of the Intern. Symp. on Seawater Drag Reduction, July 1998. — Newport, Rhode Island. — P. 327–330.
12. **Кантуэлл Б.Дж.** Организованные движения в турбулентных потоках // Вихри и волны. — М., Мир. 1984. — С. 9–79 (Механика. Новое в зарубежной науке. 33).
13. **Robinson S.K., Kline S.J. and Spalart P.R.** A review of quasi-coherent structures in a numerically simulated turbulent boundary layer // NASA Technical Memorandum. May, 1989. — 40 p.
14. **Adrian R.J., Meinhart C.D., Tomkins C.D.** Vortex organisation in the outer region of the turbulent boundary layer // J. Fluid Mech. — 2000. — Vol. 422. — P. 1–54.

*Статья поступила в редакцию 18 апреля 2006 г.*