

УДК 532.526 + 533.6.013.12

ВЛИЯНИЕ МИКРОВДУВА ГАЗА С ПОВЕРХНОСТИ ПЛАСТИНЫ НА ЕЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ

А. В. Базовкин, В. М. Ковеня, В. И. Корнилов*,
А. С. Лебедев, А. Н. Попков*

Институт вычислительных технологий СО РАН, 630090 Новосибирск

* Институт теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича СО РАН,
630090 Новосибирск

E-mail: kovenya@ict.nsc.ru

Численно моделируются течения газа вблизи пластины при малых скоростях. Исследуется влияние интенсивности микровдува с части поверхности и его распределения на значения локального и интегрального коэффициентов трения. Показано, что при сохранении общей интенсивности вдува интегральное значение трения практически не зависит от распределения участков вдува по поверхности. Полученное в расчетах уменьшение сопротивления трения качественно и количественно согласуется с результатами экспериментальных исследований.

Ключевые слова: уравнения Навье — Стокса, численные методы, моделирование течений газа, микровдув, сопротивление трения.

Введение. Поиск перспективных путей уменьшения аэродинамического сопротивления обтекаемых тел является одной из наиболее актуальных проблем современной прикладной гидро- и аэродинамики. К настоящему времени разработан и апробирован ряд эффективных методов управления течением для уменьшения сопротивления трения. Заметим, что в последние десятилетия определенный прогресс в этом направлении достигнут за счет использования различных подходов к управлению турбулентными пограничными слоями: применения механизма периодического вдува — отсоса, устройств разрушения вихрей и макропористых стенок, а также других пассивных и активных методов с целью модификации пограничного слоя и в конечном счете уменьшения сопротивления трения обтекаемых тел [1–12]. В работах [5–7] предложен метод управления пограничным слоем путем вдува через микропористую проницаемую поверхность, подвергнутую высококачественной обработке. Экспериментальные исследования, выполненные в [5–7], а также в [2–4, 8–10], показали возможность снижения поверхностного трения на 50 %, что свидетельствует о высокой эффективности данного подхода. Заметим, что до настоящего времени в приближении полных уравнений Навье — Стокса рассматриваемый класс задач численно моделировался в отдельных работах лишь в рамках модели сжимаемого газа [11, 12].

В работе с целью исследования влияния интенсивности микровдува с части поверхности и характера его распределения на изменение локального и интегрального коэффициентов трения проведено численное моделирование течения газа вблизи пластины при малых

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 11-01-00294-а) и в рамках Интеграционных проектов СО РАН № 103, 130.

© Базовкин А. В., Ковеня В. М., Корнилов В. И., Лебедев А. С., Попков А. Н., 2012

скоростях. Известно, что в классической постановке такие течения изучаются в приближении пограничного слоя. Однако в зависимости от интенсивности вдува возможны режимы течения, при которых справедливость приближения пограничного слоя может быть нарушена, поэтому в данной работе в качестве математической модели выбраны уравнения Навье — Стокса для вязкой несжимаемой жидкости. Сравнение результатов численных расчетов по модели Навье — Стокса и модели пограничного слоя показывает, что при увеличении расхода микровдува необходимо использовать полные уравнения Навье — Стокса для вязкой несжимаемой жидкости. Результаты проведенных в рамках модели Навье — Стокса для вязкой несжимаемой жидкости расчетов двумерных и пространственных течений вблизи тел с микровдувом газа с части поверхности качественно и количественно согласуются с результатами экспериментов.

1. Постановка задачи и метод решения. Задача об обтекании пластины потоком газа с микровдувом воздуха с части поверхности рассматривалась в двумерном и трехмерном приближениях в рамках двух моделей: пограничного слоя и полных уравнений Навье — Стокса для вязкой несжимаемой жидкости. В приближении уравнений Навье — Стокса

$$M \frac{\partial \mathbf{f}}{\partial t} = -W, \quad W = \sum_{j=1}^N \frac{\partial W_j}{\partial x_j} \quad (1)$$

задача решается в газодинамических переменных скорость — давление; вектор \mathbf{f} и матрицы потоков, например для $N = 3$ (N — размерность задачи по пространству), принимают вид

$$\mathbf{f} = \begin{pmatrix} p \\ v_1 \\ v_2 \\ v_3 \end{pmatrix}, \quad M = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad W_j = \begin{pmatrix} v_j \\ v_1 v_j + \delta_j^1 p - \tau_{j1} \\ v_2 v_j + \delta_j^2 p - \tau_{j2} \\ v_3 v_j + \delta_j^3 p - \tau_{j3} \end{pmatrix},$$

$$\tau_{ij} = \frac{\mu}{\text{Re}} \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right).$$

Здесь v_j — компоненты скорости; p — давление; $\mu = \mu_l + \mu_T$ — вязкость (сумма ламинарной и турбулентной вязкостей); τ_{ij} — тензор напряжений; $\text{Re} = LU_\infty/\mu_\infty$ — число Рейнольдса; U_∞ — скорость набегающего потока; L — характерный размер области. В качестве характерного размера выбрано значение $L = 1$ м. При записи уравнений плотность полагалась постоянной и в дальнейшем исключалась из уравнений. При переходе к безразмерному виду все величины нормировались на их невозмущенные значения. Система уравнений (1) является вырожденной, что накладывает дополнительные требования на применяемые численные методы.

В двумерном приближении расчетная область имела форму прямоугольника, основанием которого служила пластина конечной длины. На части поверхности этой пластины задавался микровдув газа. В трехмерном приближении решение уравнений находилось в параллелепипеде, нижним основанием которого служила пластина, а вдув осуществлялся на участке прямоугольной формы. Параметры течения во входном сечении определялись из решения двумерных уравнений пограничного слоя [13]. Задавались следующие условия: на верхней границе области, расположенной вне пограничного слоя, — условия невозмущенного потока; в выходном сечении — “мягкие” условия для вектора скорости [14]; на поверхности пластины, кроме ее части, с которой осуществлялся вдув, — условия прилипания. При решении трехмерной задачи на боковых границах расчетной области дополнительно

задавались условия симметрии. Положение верхней границы менялось в зависимости от интенсивности микровдува. Установлено, что для исключения влияния верхней границы на решение, получаемое вблизи пластины, необходимо эту границу располагать на расстоянии, равном 10–20 толщинам пограничного слоя. Интенсивность микровдува менялась в диапазоне $0 \leq C_b \leq 10^{-2}$, включающем диапазон значений вдува в экспериментах [8].

Уравнения (1) решались численно с использованием конечно-разностных методов. Поскольку наибольшие градиенты решения имеют место в тонком слое вблизи пластины, для обеспечения достаточной точности вводилось сгущение расчетной сетки. С этой целью использовалось преобразование координат, переводящее расчетную область в единичный квадрат (при $N = 2$) или параллелепипед (при $N = 3$), после чего уравнения решались в этих преобразованных координатах. В вертикальном направлении преобразование координат (сгущение) задавалось формулой

$$x_2(k) = Z_0 + (Z_{\max} - Z_0)(q^{k/k_{\max}} - 1)/(q - 1), \quad q > 1, \quad (2)$$

где $Z_{\max} - Z_0$ — высота расчетной области в исходных координатах. Формула (2) обеспечивала сгущение сетки по нормали к пластине, причем шаг сетки вблизи поверхности пластины приблизительно в q раз мельче шага вблизи верхней границы. Параметры сгущения выбирались таким образом, чтобы в области пограничного слоя находилась примерно половина узлов. В продольном направлении x_1 использовалась равномерная сетка, при этом в области вдува могла применяться более мелкая сетка. Для повышения достоверности расчетов решение уравнений (1) находилось с использованием двух численных алгоритмов. Первый алгоритм основан на методе приближенной факторизации при специальном расщеплении исходных уравнений по физическим процессам и пространственным направлениям (подробнее см. [14]). Во втором алгоритме, использующем разнесенную сетку и метод искусственной сжимаемости, давление на новом временном слое и компоненты скорости, удовлетворяющие уравнению неразрывности, находятся с помощью внутренних итераций. Оба алгоритма аппроксимируют исходные уравнения со вторым порядком точности по пространственным координатам.

Для проверки точности предложенных алгоритмов в диапазоне чисел Рейнольдса $10^3 \leq \text{Re} \leq 10^6$ проведены расчеты обтекания пластины на сетках, обеспечивающих выполнение закона сохранения массы с погрешностью $10^{-4} \div 10^{-6}$ (как правило, для этого достаточно задать неравномерную сетку размером 100×100 узлов).

2. Результаты численных расчетов. В двумерной постановке численные расчеты проводились для ламинарного и турбулентного режимов течения. Также был проведен один трехмерный расчет.

2.1. Ламинарный режим течения. В случае ламинарного режима течения результаты расчетов обтекания пластины, выполненных на основе двумерных модели пограничного слоя и модели Навье — Стокса, в отсутствие вдува практически совпадают во всем диапазоне чисел Рейнольдса Re . Однако при наличии вдува в картине распределения коэффициента трения появляются различия, которые увеличиваются с ростом интенсивности вдува. На рис. 1 приведено распределение местного коэффициента трения для значений вдува $C_b = 10^{-3}$; $3 \cdot 10^{-3}$ при $\text{Re} = 10^5$. Область вдува располагалась в интервале $0,70 \leq x_1 \leq 0,91$ и на рис. 1–5, 7 обозначена вертикальными линиями. В модели Навье — Стокса, в отличие от модели пограничного слоя, влияние вдува распространяется вверх по потоку, вследствие чего значения коэффициента трения различаются. Однако при небольших интенсивностях вдува интегральный коэффициент трения, вычисленный по модели пограничного слоя, близок к значению, полученному при решении уравнений Навье — Стокса. Например, при $C_b = 10^{-3}$ по мере удаления от участка вдува значения коэффициентов трения различаются в меньшей степени, а в окрестности области вдува (на участке

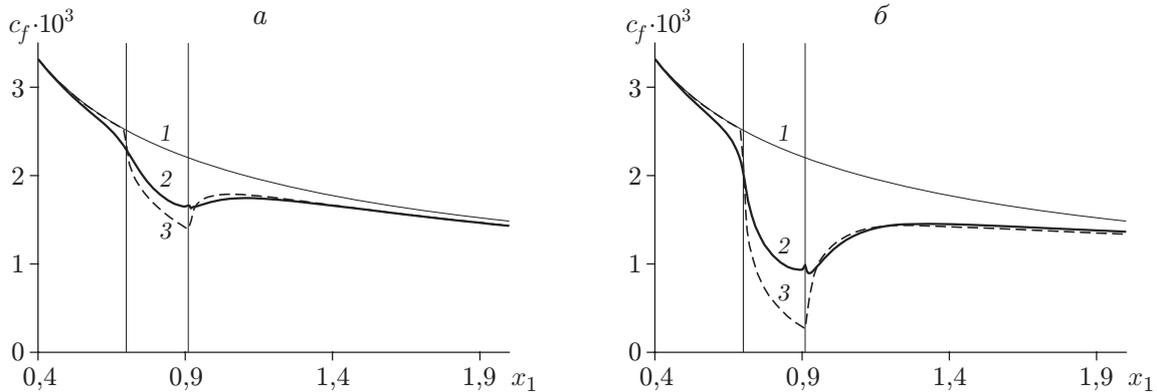


Рис. 1. Распределение коэффициента трения на пластине для ламинарного режима течения при $Re = 10^5$:
 а — $C_b = 10^{-3}$, б — $C_b = 3 \cdot 10^{-3}$; 1 — расчет в отсутствие вдува, 2 — расчет по модели Навье — Стокса, 3 — расчет по модели пограничного слоя

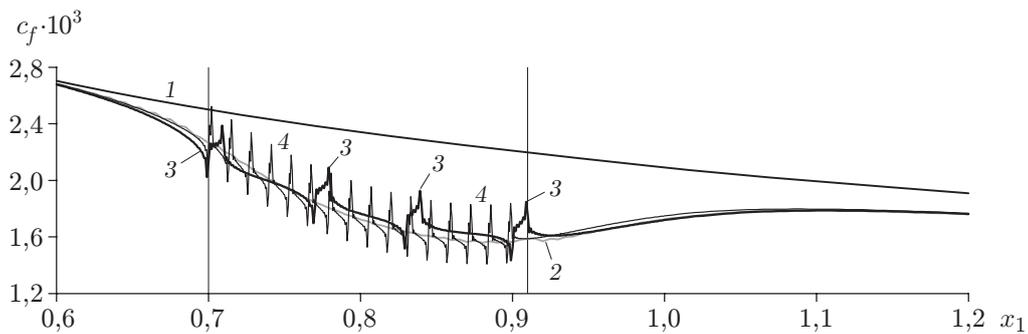


Рис. 2. Распределение коэффициента трения c_f для ламинарного режима течения при $Re = 10^5$, $C_b = 10^{-3}$ и различном числе участков вдува:
 1 — течение в отсутствие вдува, 2 — равномерный вдув, 3 — дискретный вдув с 4 участков, 4 — дискретный вдув с 16 участков

$0,4 \leq x_1 \leq 1,4$) значения интегральных коэффициентов трения различаются менее чем на 0,5 %. Увеличение интенсивности вдува приводит к увеличению различий в поведении зависимости коэффициентов трения от продольной координаты и несовпадению их интегральных значений, что объясняется неприменимостью модели пограничного слоя для течений со вдувом газа с поверхности. Аналогичные результаты получены в расчетах с другим размером и положением области вдува (вдув осуществлялся с части поверхности, площадь которой составляла 55,6 % общей площади поверхности).

Для сравнения коэффициентов трения при различных режимах вдува проведены расчеты, в которых в одном случае вдув задавался равномерным по всей подобласти, в другом — осуществлялся с последовательно расположенных в области вдува участков, количество которых варьировалось, но их общая площадь не менялась и составляла 19 % площади равномерно распределенного вдува. При изменении пространственной структуры интенсивность вдува газа менялась таким образом, чтобы массовый расход сохранялся. Область вдува (как в случае равномерного вдува со всего участка, так и при вдуве с отдельных участков) располагалась в интервале $0,70 \leq x_1 \leq 0,91$.

На рис. 2 приведено распределение коэффициента трения c_f для ламинарного режима течения при $Re = 10^5$, $C_b = 10^{-3}$. При расчете течения с несколькими подобластями вдува

Таблица 1

Относительное отклонение δ значения интегрального коэффициента трения пластины C_f от значения коэффициента C_{fu} при ламинарном и турбулентном режимах течения

Количество участков вдува	$\delta, \%$	
	Ламинарный режим	Турбулентный режим
4	-0,45	-0,09
8	—	-0,04
16	-0,35	-0,04

использовались более мелкие сетки, так чтобы на каждую подобласть вдува приходилось от 4 до 8 узлов (ячеек). Этого оказалось достаточно, чтобы в зоне вдува распределение коэффициента трения не зависело от числа узлов сетки. Расчеты показывают, что при увеличении числа участков вдува (при сохранении массового расхода) значение интегрального коэффициента трения приближается к соответствующему значению при равномерном вдуве. В табл. 1 приведены значения относительного отклонения $\delta = (C_f - C_{fu})/C_{fu}$ значения интегрального коэффициента трения пластины C_f при различном количестве участков вдува от значения коэффициента C_{fu} в случае равномерного вдува при $Re = 10^5$, $C_b = 10^{-3}$. Интегральные коэффициенты трения вычислялись в интервале $0,6 \leq x_1 \leq 1,2$,

т. е. во всей области, где распределения коэффициентов трения различны: $C_f = \int_{0,6}^{1,2} c_f dx_1$.

Из табл. 1 следует, что если область вдува состоит из большого числа участков, то значение коэффициента сопротивления приближается к значению, соответствующему равномерному вдуву, при условии сохранения массового расхода вдуваемого газа. Приведенные результаты расчетов позволяют сделать вывод о правомерности замены дискретного вдува при большом числе участков на равномерный вдув в данной подобласти. Это упрощает решение задачи, так как дает возможность использовать сетку с меньшим числом узлов при сохранении точности расчетов.

2.2. Турбулентный режим течения. Серия расчетов посвящена исследованию влияния турбулентности на течение газа вблизи пластины со вдувом с части поверхности. Для расчета турбулентного режима течения использовалась алгебраическая модель турбулентности — модель пути перемешивания Прандтля [13]. В исходных уравнениях к вязкости добавляется турбулентная вязкость $\mu_T = l^2 |dv_1/dx_2|$, где l — длина пути перемешивания, во внешней области равная $l = 1,1875 \int_0^\infty v_1(1 - v_1) dx_2$, а в пристенной области —

$l = 0,4 [1 - \exp(-x_2 \sqrt{Re(0,25 dv_1/dx_2 + 0,75 dv_1/dx_2|_{x_2=0})/26})] x_2$. Переход от одной формулы к другой осуществлялся таким образом, чтобы соблюдалось условие непрерывности турбулентной вязкости. На рис. 3 показано распределение коэффициента трения при турбулентном обтекании пластины для различного числа участков вдува при $Re = 10^5$, $C_b = 10^{-3}$.

В табл. 1 приведено отклонение $\delta = (C_f - C_{fu})/C_{fu}$ интегрального коэффициента трения для 4, 8 и 16 участков вдува. Данные, представленные в табл. 1 и на рис. 3, свидетельствуют о том, что в случае турбулентного течения с увеличением числа участков вдува значение интегрального коэффициента поверхностного трения также стремится к его значению при равномерном вдуве. Это позволяет в дальнейших исследованиях ограничиться расчетами для случая равномерно распределенного вдува.

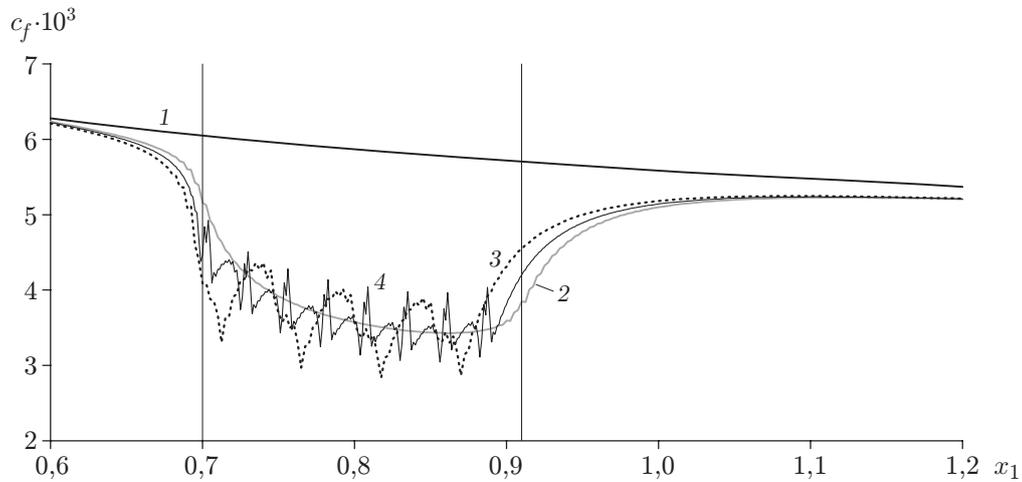


Рис. 3. Распределение коэффициента трения c_f для турбулентного режима течения при $Re = 10^5$, $C_b = 10^{-3}$ и различном числе участков вдува: 1 — течение в отсутствие вдува, 2 — равномерный вдув, 3 — дискретный вдув с 4 участков, 4 — дискретный вдув с 8 участков

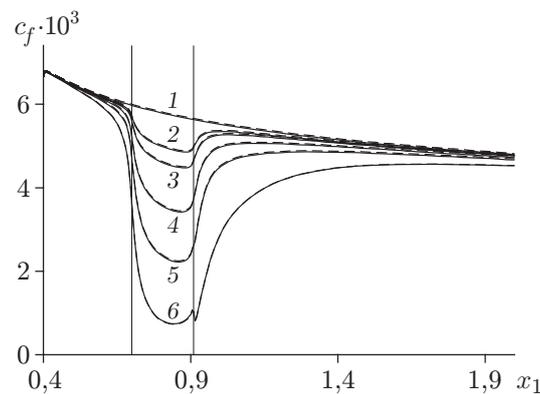


Рис. 4. Распределение коэффициента поверхностного трения для различных интенсивностей вдува, полученное с использованием различных численных алгоритмов при $Re = 10^5$: сплошные линии — метод искусственной сжимаемости, штриховые — метод расщепления; 1 — $C_b = 0$, 2 — $C_b = 10^{-3}$, 3 — $C_b = 1,5 \cdot 10^{-3}$, 4 — $C_b = 3,0 \cdot 10^{-3}$, 5 — $C_b = 5,1 \cdot 10^{-3}$, 6 — $C_b = 10^{-2}$

Далее в расчетах исследовалось влияние интенсивности вдува на коэффициент поверхностного трения. Как и ранее, вдув осуществлялся с участка $0,70 \leq x_1 \leq 0,91$. На рис. 4 приведено распределение локального коэффициента трения c_f для различных интенсивностей вдува C_b при $Re = 10^5$. Видно, что результаты, полученные с использованием двух различных алгоритмов, хорошо согласуются.

На рис. 5 приведено распределение локального коэффициента трения, полученное в расчетах с использованием уравнений Навье — Стокса и уравнений пограничного слоя. Видно, что при увеличении интенсивности вдува различие значений коэффициента трения, вычисленных по различным математическим моделям, возрастает, причем при использовании модели пограничного слоя коэффициент трения уменьшается менее существенно

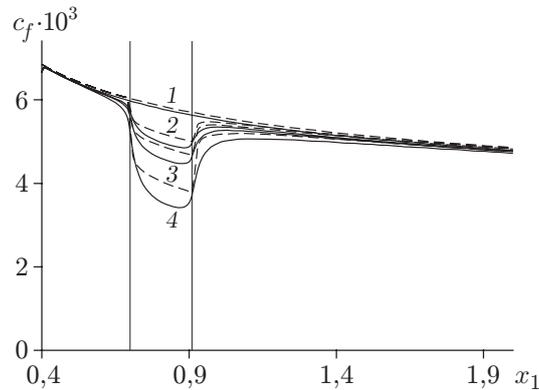


Рис. 5. Распределение коэффициента поверхностного трения для различных интенсивностей вдува, полученное с использованием различных моделей: сплошные линии — модель Навье — Стокса, штриховые — модель пограничного слоя; 1 — $C_b = 0$, 2 — $C_b = 10^{-3}$, 3 — $C_b = 1,5 \cdot 10^{-3}$, 4 — $C_b = 3,0 \cdot 10^{-3}$

(для ламинарных течений использование модели пограничного слоя, наоборот, предсказывало большее падение).

В следующей серии расчетов проведено сравнение численных решений уравнений Навье — Стокса с результатами натурального эксперимента [8]. Начало пористой вставки, из которой осуществлялся поверхностный вдув, находилось на расстоянии 1181,3 мм от передней кромки пластины. Длина пористой вставки составляла 400 мм, а общая длина пластины — 2313,6 мм. Эксперименты проводились при скорости невозмущенного потока $U_\infty = 21,2$ м/с, что соответствовало числу Рейнольдса $Re_1 = 1,4 \cdot 10^6$ м⁻¹. При отсутствии вдува значения коэффициентов трения, полученные путем решения уравнений Навье — Стокса и уравнений пограничного слоя, совпадают. На рис. 6 приведен профиль скорости при $Re_x = 2,1 \cdot 10^6$, полученный путем решения уравнений Навье — Стокса (кривая 1) и представленный в универсальных переменных закона стенки $u^+ = f(\log y^+)$, где u^+ , y^+ в безразмерных переменных имеют вид

$$u^+ = v_1 / \sqrt{(dv_1/dx_2)|_{x_2=0} / Re}, \quad y^+ = x_2 \sqrt{Re (dv_1/dx_2)|_{x_2=0}}.$$

Для сравнения на рис. 6 приведены также профиль $u^+ = y^+$, соответствующий линейному распределению скорости в вязком подслое (кривая 2), и профиль $u^+ = 5,75 \log y^+ + 5,5$ [15], соответствующий логарифмическому участку пограничного слоя (кривая 3). Видно, что профиль скорости, полученный в расчетах по модели Навье — Стокса, хорошо согласуется с классическими данными. Это свидетельствует о высокой точности численных расчетов.

На рис. 7 представлено распределение коэффициента трения c_f для режимов течения без вдува (кривые 1–3, 8) и со вдувом (кривые 4–7), интенсивность которого равна $C_b = 0,00148$, что в эксперименте соответствовало массовому расходу $Q = 0,038$ кг/(с · м²). Продольная координата нормирована следующим образом: $\bar{x} = (x_1 - 0,1091)/(L - 0,1091)$, где $L = 2,3136$ — длина пластины. Различие значений рассчитанного и экспериментально полученного коэффициентов трения c_f составляет приблизительно 7%.

На рис. 8 представлена зависимость коэффициента трения в середине пористой вставки от интенсивности поверхностного вдува. Заметим, что при увеличении интенсивности вдува результаты расчетов по модели Навье — Стокса становятся близкими к экспериментальным данным. При максимальной интенсивности вдува уменьшение трения достигает 45–47%.

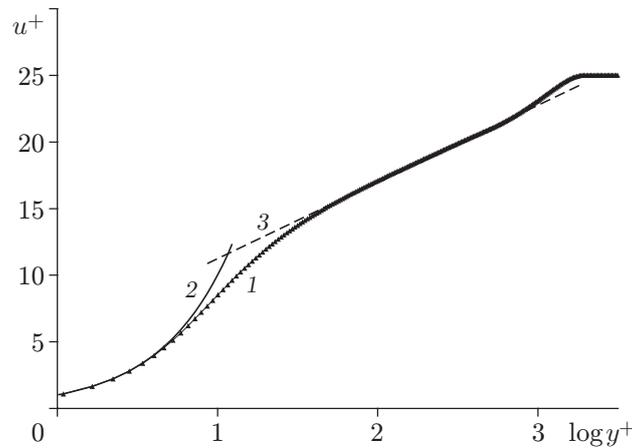


Рис. 6. Профиль скорости в переменных закона стенки при $Re = 2,1 \cdot 10^6$:
 1 — распределение, полученное из решения уравнений Навье — Стокса, 2 — линейное распределение в вязком подслое, 3 — логарифмическое распределение по формуле $u^+ = 5,75 \log y^+ + 5,5$

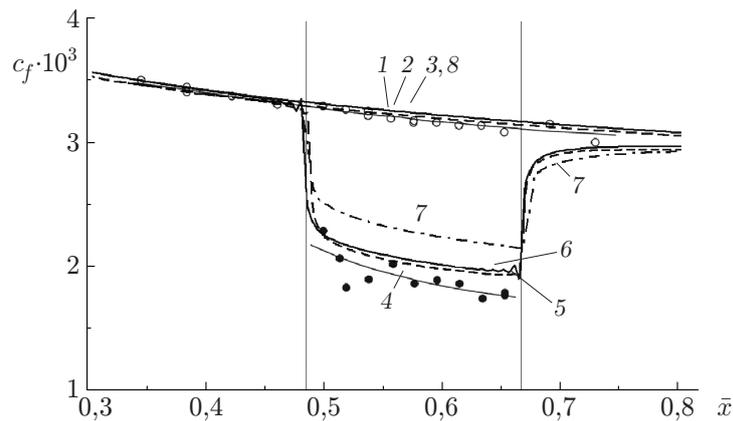


Рис. 7. Распределение коэффициента трения c_f по длине модели при $C_b = 0,00148$:
 1–3, 8 — течение в отсутствие вдува, 4–7 — течение со вдувом; 1, 4 — данные эксперимента [8], 2, 5 — расчет по модели Навье — Стокса методом искусственной сжимаемости, 3, 6 — расчет по модели Навье — Стокса методом расщепления, 7, 8 — расчет по модели пограничного слоя

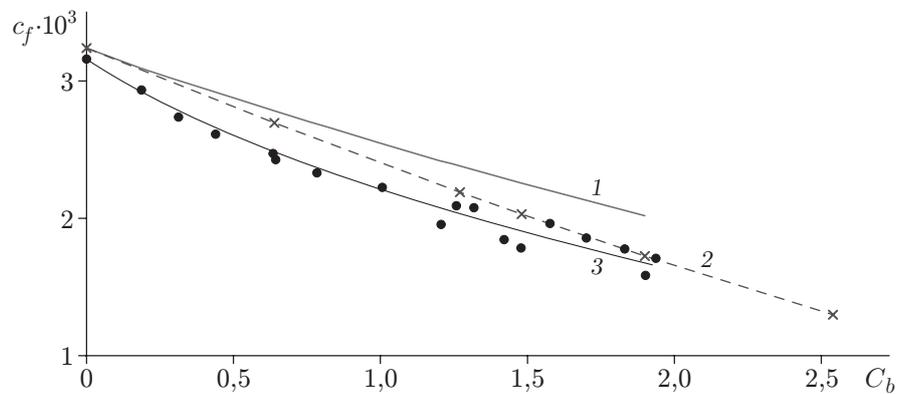


Рис. 8. Зависимость коэффициента трения c_f от интенсивности вдува:
 1 — расчет по модели пограничного слоя, 2 — расчет по модели Навье — Стокса, 3 — данные эксперимента

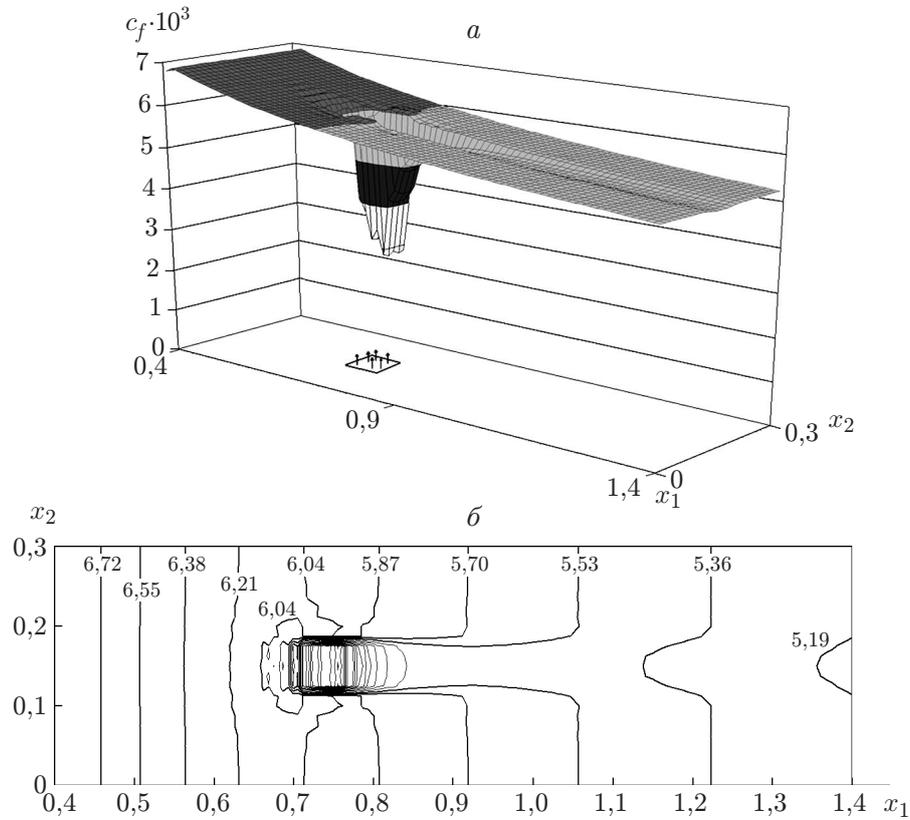


Рис. 9. Распределение коэффициента трения c_f (а) и изолинии $10^6 c_f$ (б) на пластине при интенсивности вдува $C_b = 0,0051$

2.3. *Моделирование пространственных течений.* При моделировании пространственных течений с поверхностным вдувом задача рассматривалась в следующей постановке. На продольно обтекаемой пластине имеется квадратный участок, через который осуществляется равномерный микровдув газа. Набегающий поток движется в направлении x_1 . В начальном сечении задаются давление и вектор скорости, полученный из решения уравнений двумерного пограничного слоя, на боковых границах — условия симметрии

$$v_2 = \frac{\partial v_1}{\partial x_2} = \frac{\partial v_3}{\partial x_2} = \frac{\partial p}{\partial x_2} = 0,$$

а на верхней и выходной границах — “мягкие” условия. Проведены расчеты пространственных турбулентных течений газа при $Re = 10^5$ и различных интенсивностях вдува. Вдув осуществлялся с участка $0,705 \leq x_1 \leq 0,765$, $0,12 \leq x_2 \leq 0,18$ при общих размерах обтекаемой пластины $1,4 \times 0,3$. Расчеты пространственных течений показали, что, как и в двумерном случае, сопротивление трения уменьшается с ростом интенсивности вдува.

В качестве примера на рис. 9,а представлено распределение локального коэффициента трения c_f на пластине при интенсивности вдува $C_b = 0,0051$. Для тех же параметров течения на рис. 9,б представлены изолинии коэффициента трения, характеризующие снижение сопротивления трения при наличии вдува. В табл. 2 приведено относительное изменение интегрального коэффициента трения пластины при различных значениях интенсивности вдува. Следует отметить, что площадь участка микровдува составляет приблизительно 1,2 % общей площади пластины. В расчетах также получено, что уже при $C_b = 0,03$ происходит отрыв пограничного слоя за область вдува ($x_1 \approx 0,79$). На

Таблица 2

Относительное изменение интегрального коэффициента трения
при различной интенсивности вдува

C_b	$(C_f - C_{f0})/C_{f0}, \%$
10^{-3}	-0,25
$5 \cdot 10^{-3}$	-1,19
10^{-2}	-2,17
$3 \cdot 10^{-2}$	-4,50

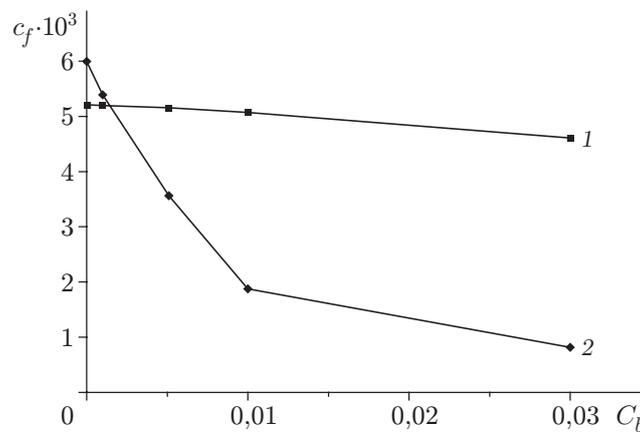


Рис. 10. Зависимость коэффициента трения c_f от интенсивности вдува на конце пластины (1) и в середине участка вдува (2)

рис. 10 приведена зависимость местного коэффициента трения от интенсивности вдува для двух точек в плоскости пластины. Кривая 1 соответствует точке $x_1 = 1,4, x_2 \approx 0,15$, расположенной в конце пластины, а кривая 2 — точке $x_1 = 0,735, x_2 \approx 0,15$, находящейся в середине области вдува. Более подробная информация о течении для двух описанных точек представлена в табл. 3, где приведено относительное изменение коэффициента трения $\delta = [(c_{fb} - c_f)/c_f] \cdot 100 \%$ для различных интенсивностей вдува по отношению к течению без вдува (значение δ_1 соответствует середине пористой вставки, значение δ_2 — концу пластины). Подобное уменьшение коэффициента трения имеет место и при других режимах вдува.

3. Выводы. Проведенное исследование позволяет сделать следующие выводы.

Как и предполагалось, модель пограничного слоя справедлива лишь при относительно небольшой интенсивности вдува. При увеличении интенсивности вдува в случае ламинарной вязкости уменьшение коэффициента трения в модели пограничного слоя было более существенным, чем в модели Навье — Стокса, при турбулентных течениях, наоборот, в модели Навье — Стокса уменьшение коэффициента трения более значительное, чем в модели пограничного слоя.

Результаты, полученные при моделировании турбулентных течений со вдувом газа с части поверхности в приближении уравнений Навье — Стокса для вязкой несжимаемой жидкости, близки к результатам эксперимента. Это свидетельствует о том, что уменьшение сопротивления трения обтекаемых поверхностей в случае микровдува с части поверхности является эффективным способом управления турбулентным пограничным слоем.

Таблица 3

Относительное изменение коэффициента трения при различной интенсивности вдува		
C_b	$\delta_1, \%$	$\delta_2, \%$
10^{-3}	-10,58	-0,19
$5,1 \cdot 10^{-3}$	-42,92	-0,96
10^{-2}	-71,89	-2,54
$3 \cdot 10^{-2}$	-88,51	-11,43

Влияние микровдува на область, расположенную ниже по течению, является более существенным, чем влияние на область, расположенную выше по потоку, и это влияние возрастает при увеличении интенсивности вдува. Данный результат может быть использован при создании более эффективного метода уменьшения турбулентного трения.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Корнилов В. И.** Проблемы снижения турбулентного трения активными и пассивными методами (обзор) // Теплофизика и аэромеханика. 2005. Т. 12, № 2. С. 183–208.
2. **Kornilov V. I., Boiko A. V.** Periodic forcing of the turbulent boundary layer on a body of revolution // AIAA J. 2008. V. 46, N 3. P. 653–663.
3. **Бойко А. В., Корнилов В. И.** Влияние периодического вдува/отсоса через последовательно расположенные кольцевые щели на турбулентный пограничный слой тела вращения // Теплофизика и аэромеханика. 2008. Т. 15, № 1. С. 11–29.
4. **Шиплюк А. Н., Буров Е. В., Маслов А. А., Фомин В. М.** Влияние пористых покрытий на устойчивость гиперзвуковых пограничных слоев // ПМТФ. 2004. Т. 45, № 2. С. 169–176.
5. **Hwang D. P.** A proof of concept experiment for reducing skin friction by using a micro blowing technique. S. l., 1997. (Paper / AIAA; N 97-0546).
6. **Hwang D. P.** An experimental study of turbulent skin friction reduction in supersonic flow using a microblowing technique. Reno, 2000. (Paper / AIAA; N 2000-0545).
7. **Hwang D. P.** Review of research into the concept of micro-blowing technique for turbulent skin friction reduction // Progr. Aerospace Sci. 2004. V. 40, iss. 8. P. 559–575.
8. **Корнилов В. И., Бойко А. В.** Использование микровдува воздуха через пористую стенку для снижения трения на плоской пластине // Вестн. Новосиб. гос. ун-та. Сер. Физика. 2010. Т. 5, вып. 3. С. 38–46.
9. **Корнилов В. И., Бойко А. В., Попков А. Н.** Влияние микровдува воздуха через пронцаемую стенку на турбулентный пограничный слой // Вестн. Новосиб. гос. ун-та. Сер. Физика. 2011. Т. 6, вып. 1. С. 77–83.
10. **Lin Y. L., Chyu M. K., Shih T. I. P., et al.** Skin friction reduction through micro blowing. Reno, 1998. (Paper / AIAA; N 98-0359).
11. **Kudriavtsev V., Braun M. J., Hendricks R. C.** Computational study of micro-blowing for shear force reduction // Computational technologies for fluid/thermal/structural/chemical systems with industrial applications: Proc. of the ASME pressure vessels and piping conf., Atlanta, July 22–26, 2001. S. l.: ASME, 2001. V. 2. P. 163–170.
12. **Li Jian, Lee Chun-Hian, Jia Liping, Li Xuzhi.** Numerical study on flow control by micro-blowing // Proc. of 47th AIAA aerospace sciences meeting including the new horizons forum and aerospace exposition, Orlando, Florida (USA), 5–8 Jan. 2009. S. l., 2009. P. 1–19.

13. Гапонов С. А., Павлюченко А. М., Попков А. Н. Эффективность инвариантного градиентного критерия устойчивости для натуральных условий обтекания осесимметричных тел в зонах начала перехода и реламинаризации // ПМТФ. 1999. Т. 40, № 1. С. 89–100.
14. Базовкин А. В., Вавилова О. М., Ковеня В. М. Метод факторизации для численного решения уравнений вязкой несжимаемой жидкости // Вычисл. технологии. 2009. Т. 14, № 2. С. 13–31.
15. Лойцянский Л. Г. Механика жидкости и газа. М.: Наука, 1978.

Поступила в редакцию 28/XI 2011 г.
