

В. И. Корнилов, А. В. Бойко

Институт теоретической и прикладной механики
им. С. А. Христиановича СО РАН
ул. Институтская, 4/1, Новосибирск, 630090, Россия
E-mail: kornilov@itam.nsc.ru

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МИКРОВДУВА ВОЗДУХА ЧЕРЕЗ ПОРИСТУЮ СТЕНКУ ДЛЯ СНИЖЕНИЯ ТРЕНИЯ НА ПЛОСКОЙ ПЛАСТИНЕ

Экспериментально исследовано влияние микровдува воздуха через пористую стенку на свойства турбулентного пограничного слоя, формирующегося на плоской пластине при ее обтекании несжимаемым потоком. Число Рейнольдса, вычисленное по толщине потери импульса пограничного слоя впереди пористого образца, составляло 3 900. Массовый расход вдуваемого воздуха Q на единицу площади менялся в пределах от 0 до 0,0488 кг/с/м². Показано, что при увеличении массового расхода коэффициент поверхностного трения существенно уменьшается, и при максимальном значении Q его величина достигает 45–47 %.

Ключевые слова: микровдув, пористая стенка, несжимаемый турбулентный пограничный слой, трение, плоская пластина.

Введение

В последние годы заметно усилился интерес к поиску новых и экономичных способов управления сдвиговым течением с целью уменьшения сопротивления трения и аэродинамических сил, действующих на движущиеся объекты, в частности летательные аппараты, суда и подводные лодки. Неоднократно предпринимались попытки исследовать различные пассивные и активные способы воздействия на турбулентный пограничный слой, включая всевозможные вибраторы, актюаторы, микроэлектромеханические системы, полимерные добавки, микропузырьки газа, поверхностные активные вещества, риблеты, разрушители крупных вихрей и др. Среди других подходов можно также указать отсос из пограничного слоя или вдув, инъекция газов с различной вязкостью или различной температурой.

Повышенный интерес к этому направлению вполне понятен и вызван тем, что уменьшение сопротивления – один из надежных путей, с помощью которого можно улучшить эффективность летательного аппарата. Как следствие, это дает возможность увеличить дальность и полезную нагрузку, снизить затраты на топливо и

уменьшить прямые эксплуатационные расходы летательного аппарата, например самолета. Известно, что при дозвуковом его обтекании около половины полного сопротивления – сопротивление за счет сил давления, тогда как другая половина – сопротивление трения. Первая из перечисленных составляющих фактически снижена до предельной величины за счет совершенства аэродинамических форм современных самолетов и плавного их обтекания. Однако уменьшение второй составляющей по-прежнему остается очень сложной проблемой, особенно в части ее решения для реальных практических приложений.

Мы не ставим здесь своей целью рассматривать все многообразие существующих в настоящее время методов и подходов для уменьшения трения, поскольку это потребовало бы отдельного обстоятельного обзора. Заинтересованного читателя отсылаем к публикациям (например: [1; 2] и др.). Отметим лишь, что один из методов, который в свое время, по-видимому, не нашел должной оценки, – это инъекция, или вдув, газа, поскольку многие исследователи полагали, что энергетические затраты, обусловленные этим процессом, чрезвычайно велики. Несмотря на отмеченное обстоятельство,

в 1970-е гг. был выполнен ряд экспериментов с вдувом [3–12] для случая безградиентного течения на плоской пластине. Однако сколько-нибудь значительных успехов достичь не удалось. Позднее Хванг из NASA Lewis (GRC) [13] выдвинул концепцию, касающуюся использования так называемого микровдува (английская аббревиатура MBT) через пористую стенку, разработанную на основе новейших технологий. Он показал, что чрезвычайно малые расходы газа через маленькие отверстия в стенке способны привести к существенному снижению трения. Таким образом, под термином «микро» подразумевается, что диаметр отверстий существенно меньше толщины пограничного слоя, а расход вдуваемого газа – малая доля расхода в пограничном слое. Хванг [14] установил, что использованные ранее традиционные пористые материалы имели большую эффективную шероховатость. Поэтому они имели высокий в сравнении с гидравлически гладкой пластиной коэффициент трения, который в некоторых случаях был более чем в два раза выше. Ясно, что в этом случае для уменьшения поверхностного трения требовались большие расходы воздуха, а следовательно, и энергетические затраты.

В связи с вышеизложенным возникает потребность в проверке концепции [13], требующей изучения возможности и оценки эффективности способа управления пристенным турбулентным течением при помощи микровдува с малым расходом газа (воздуха), осуществляемого через проникаемую (пористую) стенку больших размеров в плане, удовлетворяющей комплексу необходимых требований:

- высокое качество рабочей поверхности;
- повышенная равномерность расположения пор (отверстий);
- большая степень проницаемости.

Условия и методика экспериментов

Опыты проводились в дозвуковой малотурбулентной аэродинамической трубе Т-324 ИТПМ СО РАН в диапазоне скоростей невозмущенного потока в контрольном сечении U_∞ от 10 до 23 м/с, что соответствовало числам Рейнольдса на 1 м $Re_1 \approx (0,667–1,533) \cdot 10^6 \text{ м}^{-1}$.

Измерения выполнялись на модели плоской пластины из дюралюмина Д16Т с размерами $2204,5 \times 993 \text{ мм}^2$ в плане и толщиной 6 мм, установленной горизонтально в рабочей части трубы на боковых направляющих рельсах. Как передняя, так и задняя части пластины с нерабочей стороны выполнены в виде полуэллипса с соотношением полуосей $b/a = 1 : 12$. Форма собственно передней кромки характеризуется радиусным скруглением $r = 0,4 \text{ мм}$. На оси симметрии пластины выполнено 13 приемников статического давления диаметром 0,4 мм. Задняя часть модели оборудована регулируемым хвостовым закрылком с хордой 170 мм, установленным по всей ширине рабочей части трубы, с помощью которого осуществлялось управление характером течения в окрестности носика. Распределение давления на остальной части пластины могло корректироваться за счет незначительного изменения угла установки направляющих рельсов.

Конструкция пластины предусматривала возможность установки заподлицо с основной ее поверхностью сменных плоских образцов (как непроницаемого, так и пористого) больших размеров в плане ($420 \times 250 \text{ мм}^2$), что позволяло контролировать локальные свойства течения (среднюю скорость, трение, пульсации скорости) на значительной их длине. В отличие от [14] такой подход дает возможность получать не только интегральное значение трения, но и распределенную величину и, как следствие, вносить соответствующие изменения в конструкцию для достижения максимальной эффективности разрабатываемого метода управления.

Положение образцов по длине пластины определяется следующими величинами:

$$\bar{x}_н = x_н / L = 0,468 \text{ (начало)},$$

$$\bar{x}_к = x_к / L = 0,668 \text{ (конец)}.$$

Параметры пористого материала составляют: пористость 17,1 %, средний диаметр пор $D = 0,175 \text{ мм}$, толщина стенки $t = 1,1 \text{ мм}$, удлинение пор $\lambda = t/D = 6,28$. Соотношение между диаметром пор и толщиной исходного пограничного слоя перед пористым образцом составляет 1/133. Указанные геометрические характеристики были выбраны на основе анализа литературных данных [15], показывающих, что подобная конфигурация пор может оказаться перспективной с точки зрения снижения трения при организации

управления турбулентным сдвиговым течением.

Микровдув воздуха через пористый образец осуществлялся через 13 подводящих штуцеров, размещенных равномерно на дне камеры давления, с помощью компрессора СБ4/С-100.АВ510 производительностью 338 л/мин. Камера давления располагалась непосредственно под пористым образцом, охватывая площадь несколько большую, чем сам образец. С целью обеспечения равномерности распределения расхода воздуха по длине и ширине пористого образца апробировались различные проницаемые материалы, которые последовательно устанавливались в камере давления непосредственно под самим образцом без какого-либо зазора. Смысл такого подхода состоял в том, чтобы найти материал, который не только обеспечивал бы равномерность расхода, но и обладал бы низким собственным сопротивлением. В конечном счете предпочтение было отдано микрофibre. В процессе экспериментов массовый расход вдуваемого воздуха на единицу площади менялся в пределах от 0 до 0,0488 кг/с/м². При этом средний коэффициент вдува $\rho v / \rho U_\infty$ не превышал величины 0,04.

С целью обеспечения развитого турбулентного течения на большей части модели пограничный слой был искусственно турбулизован путем установки в области максимального изменения давления (окрестность передней кромки) полосы крупнозернистой наждачной бумаги (со сглаженными уступами) длиной 30 мм и высотой 0,8 мм.

Скоростной напор набегающего потока q_∞ контролировался по перепаду между полным P_0 и статическим P_∞ давлением, измеряемому с помощью трубки Пито – Прандтля, установленной в невозмущенном потоке, и регистрируемому наклонным спиртовым микроманометром системы DISA. В качестве дополнительного контроля измерялся перепад между давлением торможения в форкамере трубы $P_{0ф}$ и статическим давлением в рабочей части $P_{рч}$.

Основные измерения выполнены с помощью полностью автоматизированного дистанционно управляемого координатного устройства для зондирования структуры потока на обтекаемой поверхности. Перемещение рабочего органа координатника по высоте пограничного слоя осуществлялось по заранее заданной программе, преду-

сматривающей выбор требуемого шага (до 1 мкм), а также потребные параметры сбора всей необходимой информации о полях средней скорости и значениях турбулентности. При этом и сбор, и обработка регистрируемой в ходе эксперимента информации осуществлялись непосредственно в темпе эксперимента и оперативно анализировались программными средствами, разработанными на базе пакета MatLab.

Мгновенная скорость u в исследуемой точке поля сдвигового потока измерялась с помощью комплекса термоанемометрической аппаратуры 55M0 фирмы DANTEC. Блок-схема измерений включала термоанемометрический мост 55M10, к выходу которого подключен линейаризатор 55D10. Сбор измеряемой информации осуществлялся следующим образом. Сигнал с выхода линейаризатора подавался на многоканальный высокочастотный 14-разрядный внешний модуль E-440 фирмы L-CARD, предназначенный для преобразования входных аналоговых сигналов в цифровую форму, и с его выхода через USB порт передавался в персональный компьютер. Сбор информации в каждой измеряемой точке поля потока осуществлялся в течение 15 секунд с частотой 10 кГц. Постоянная составляющая сигнала, соответствующая средней скорости в пограничном слое, параллельно контролировалась вольтметром постоянного тока 55D31. Визуальный контроль за характером турбулентного сигнала производился с помощью осциллографа С1-73. В качестве первичного преобразователя использовался миниатюрный датчик, известный в литературе как датчик пограничного слоя, с чувствительным элементом в виде вольфрамовой нити диаметром 5 мкм и длиной 1,2 мм, который эксплуатировался в режиме постоянной температуры при перегреве 1,7. В процессе измерений корпус датчика ориентировался под углом примерно 5° к вектору скорости набегающего потока. Тем самым при движении к стенке (отрицательное направление оси y) датчик касался поверхности пластины концами токоподводов. Торцы токоподводов используемого датчика представляют собой «пяточки» диаметром 56–58 мкм. Таким образом, в момент касания, который контролировался по контакту, расстояние от стенки до середины диаметра нити было постоянным и равным 28–29 мкм. При движении датчика от стенки (положительное

направление оси y) момент его отрыва от поверхности происходит лишь после выборки естественного механического люфта, который составляет около 10 мкм. Ложные (в пределах отмеченного люфта) отсчеты отбраковывались. Оцениваемая погрешность такой процедуры составляет ± 2 мкм.

Известно, что одной из основных определяющих величин при оценке эффективности различных способов управления турбулентным пограничным слоем, в том числе и при обтекании проницаемых стенок, является местный коэффициент поверхностного трения C_f . Однако многие из существующих методов вызывают определенное сомнение в их надежности при использовании в условиях вдува через пористую стенку. Поэтому в [16] на основе точного измерения осредненных по времени данных с однониточного датчика термоанемометра вблизи стенки усовершенствована методика определения величины C_f в неканоническом турбулентном течении. Суть методики состоит в том, что кроме основной калибровки датчика термоанемометра (во внешнем потоке) выполняется также тщательная его калибровка в зависимости от поперечной координаты y при различных значениях скорости потока U_∞ в окрестности ее режимного значения. Это позволяет учитывать охлаждающий эффект стенки на показания термоанемометра и корректно описывать распределение скорости в пристенной части профиля и, как следствие, определять C_f не только по логарифмической части профиля скорости (если таковая имеется), но и используя для этой цели область ламинарного подслоя турбулентного пограничного слоя. При этом вся процедура определения C_f базируется на комплексе программ, отлаженных в среде MatLab, и практически не зависит от пользователя.

Результаты экспериментов Характеристики исходного течения

Целью начальной стадии экспериментов был анализ состояния пограничного слоя на исследуемой плоской пластине при отсутствии микровдува. Как показали результаты измерений распределения статического давления на поверхности модели, непосредственно в рабочей области исследований ($0,4 \leq x/L \leq 0,9$) реализуется участок практи-

чески безградиентного течения, на котором статическое давление в пределах погрешности эксперимента можно считать почти постоянным. Это достигалось за счет установки пластины на небольшой (порядка 10°) положительный угол атаки и регулировки характера обтекания в окрестности носика с помощью хвостового закрылка.

Для понимания характера течения выполнены достаточно подробные измерения профилей средней скорости в пограничном слое и мгновенных значений ее продольных пульсаций в рабочей полосе частот, а также поверхностного трения в 15 поперечных сечениях по длине модели в центральной ее плоскости симметрии ($z = 0$). Анализ показывает, что характеристики сдвигового потока на пористой поверхности полностью соответствуют физическим представлениям о свойствах турбулентного пограничного слоя, формирующегося на непроницаемой плоской пластине при номинально безградиентном ее обтекании. Например, распределения интегральных характеристик пограничного слоя, и в частности толщины потери импульса δ^{**} , обнаруживают ожидаемые свойства течения.

В качестве примера на рис. 1 приведена зависимость $\log Re^{**} = f(\log Re_x)$, характеризующая изменение числа Рейнольдса по толщине потери импульса δ^{**} от числа Рейнольдса Re_x , вычисленного по скорости на внешней границе пограничного слоя U_e и координате $x = x_{eff}$, в диапазоне скоростей потока от 10 до 23 м/с. (Здесь x_{eff} – эффективное начало развития турбулентного

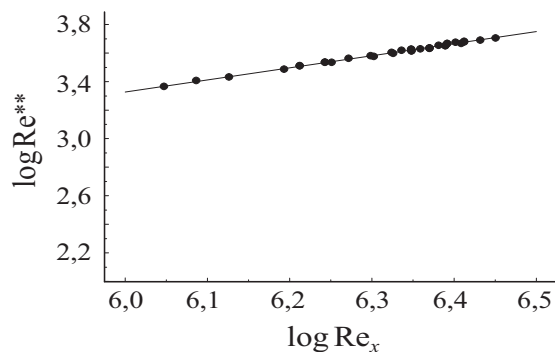


Рис. 1. Изменение числа Рейнольдса по толщине потери импульса в зависимости от числа Рейнольдса по началу развития турбулентного пограничного слоя при $Q = 0$

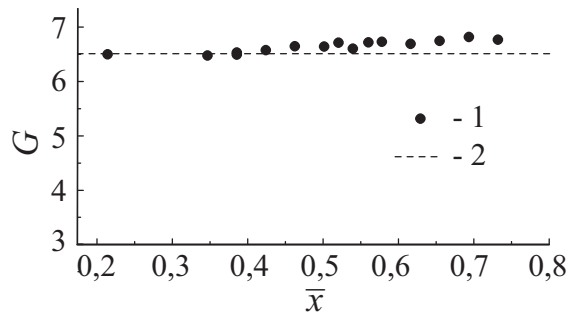


Рис. 2. Изменение параметра неравновесности Клаузера по длине пластины при $Q = 0$: 1 – настоящий эксперимент; 2 – расчет по методике [18]

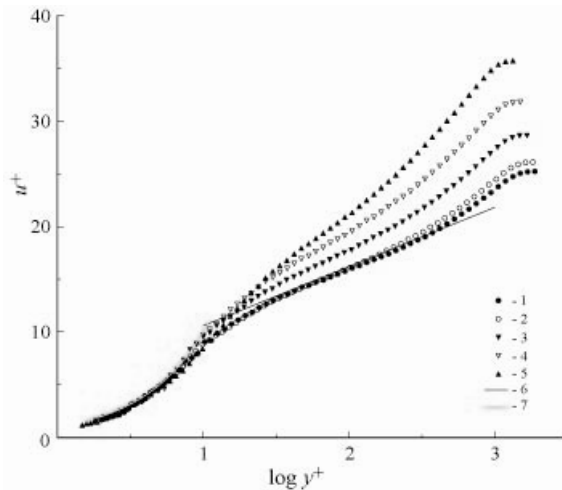


Рис. 3. Профили скорости в переменных закона стенки при $Re_x = 2,345 \cdot 10^6$. Значения Q , кг/с/м²: 0 (1); 0, 0,0047 (2); 0,0164 (3); 0,0309 (4); 0,0488 (5); $u^+ = 5,6 \log y^+ + 5$ (6); $u^+ = y^+$ (7)

пограничного слоя, которое определялось из условия совпадения в первом измерительном сечении экспериментально найденного значения δ^{**} и вычисленного по методике Сполдинга [17] и последующего расчета вверх по течению до точки x , в которой величина $\delta^{**} = 0$. Для простоты изложения здесь и далее индекс «eff» будет опускаться.)

Как видно, данная зависимость имеет в представленных координатах линейный характер, в том числе и в пределах пористого образца, что свидетельствует о формировании развитого турбулентного течения даже

на нижней границе исследованного диапазона скоростей набегающего потока.

Другим примером является распределение параметра неравновесности Клаузера

$$G = \sqrt{2/C_f} [(H-1)/H],$$

который сохраняет практически постоянное значение по длине рабочей области (рис. 2). При учете очень слабого продольного градиента давления, который имел место в экспериментах, отклонение полученных значений G от эмпирической кривой Nash [18], характеризующей равновесное состояние в турбулентном течении на плоской пластине, составляет не более 4%. Все это также указывает на формирование равновесного (по Клаузеру) турбулентного течения, начиная с первого измерительного сечения.

Профили турбулентных пульсаций скорости в переменных закона стенки

$$\sqrt{u'^2 v_*} = f(\log y^+),$$

где $v_* = \sqrt{\tau_w / \rho}$ – динамическая скорость, также подтверждают, что характеристики сдвигового течения не противоречат физическим представлениям о свойствах турбулентного пограничного слоя, формирующегося на плоской пластине в условиях безградиентного течения.

Характеристики модифицированного течения

Поведение локальных характеристик турбулентного пограничного слоя в условиях воздействия микровдыва можно рассмотреть на примере выборочных профилей скорости, представленных на рис. 3 в координатах закона стенки $u^+ = f(\log y^+)$:

$$u^+ = u / v_*, \quad y^+ = y v_* / \nu,$$

при переменном значении массового расхода Q , где ν – коэффициент кинематической вязкости. Здесь для сравнения показан также профиль скорости $u^+ = A \log y^+ + B$ с коэффициентами $A = 5,62$ и $B = 5,0$, рекомендованными в качестве канонических материалами известной Стэндфордской конференции [19]. Данные получены в сечении x , соответствующем середине пористого образца. Пристенная часть профилей скорректирована в соответствии с методикой [16], кратко изложенной выше.

Видно, что при нулевом значении массового расхода Q распределение скорости в логарифмической области пограничного слоя вполне удовлетворительно описывается классическим соотношением [19]. По мере возрастания Q наблюдается явно выраженное увеличение безразмерной скорости u^+ в сравнении с каноническими значениями. Это объясняется тем, что при возрастании величины Q динамическая скорость v_* , по которой обезразмеривается локальная скорость потока, как будет показано ниже, существенно уменьшается.

На рис. 4 представлены результаты измерений локальных значений коэффициента поверхностного трения C_f вдоль плоской пластины при промежуточном значении массового расхода Q , составляющего $0,038 \text{ кг/с/м}^2$. (Здесь передняя и задняя границы пористого образца показаны вертикальными штриховыми линиями.) Для сравнения приведены также соответствующие данные при отсутствии микровдува ($Q = 0$), которые удовлетворительно согласуются с результатами расчета по методике [17], разработанной в рамках уравнений пограничного слоя. При этом, как показано в [16], местный коэффициент поверхностного трения при обтекании пористой стенки практически не отличается от соответствующих значений при обтекании гидравлически гладкой непроницаемой поверхности.

В целом поведение зависимости

$$C_f = f(x/L)$$

при $Q \neq 0$ носит примерно такой же характер, как и при отсутствии микровдува. Это и понятно, поскольку в условиях равномерного вдува вновь сформировавшийся пограничный слой развивается в соответствии с изменением числа Re_x . Имеющийся разброс экспериментальных значений C_f вызван не столько погрешностью измерения этой величины, сколько ошибкой в определении массового расхода, обусловленной тем, что эта величина контролировалась в процессе эксперимента не совсем точно, а именно по темпу опорожнения ресивера компрессора.

Более важным представляется следующее. Микровдув воздуха через пористую поверхность существенно уменьшает коэффициент поверхностного трения и эта область охватывает всю длину пористого образца. Отмеченный эффект также находит свое подтверждение на рис. 5, где представ-

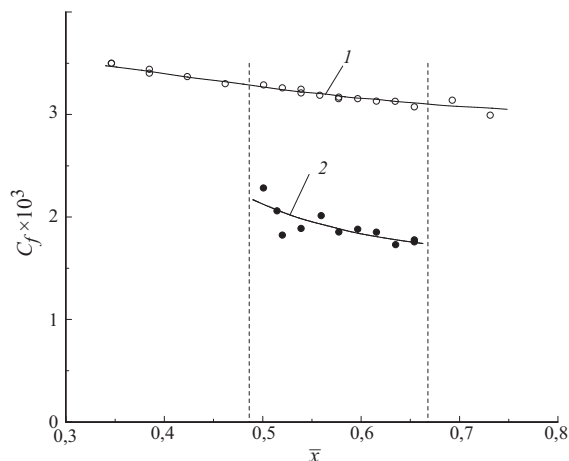


Рис. 4. Изменение коэффициента поверхностного трения по длине модели. Значения Q , кг/с/м^2 : 0 (1); 0,038 (2)

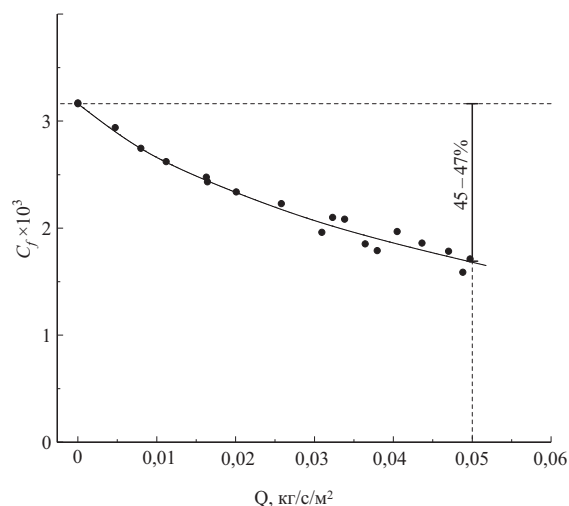


Рис. 5. Изменение коэффициента поверхностного трения в зависимости от массового расхода

лены аналогичные данные об изменении C_f в зависимости от величины массового расхода. Как видно, при увеличении Q коэффициент поверхностного трения C_f существенно уменьшается, и при максимальном значении Q относительная его величина

$$\frac{\Delta C_f}{C_{f_0}} = \left(\frac{C_f - C_{f_0}}{C_{f_0}} \right) \times 100 \%$$

составляет 45–47%. Это подтверждает результаты прямых измерений трения, выполненных Хвангом [14] с помощью аэродинамических весов, хотя и при несколько отличающемся числе Маха ($M_\infty = 0,3$). К сожалению, возможности компрессора не по-

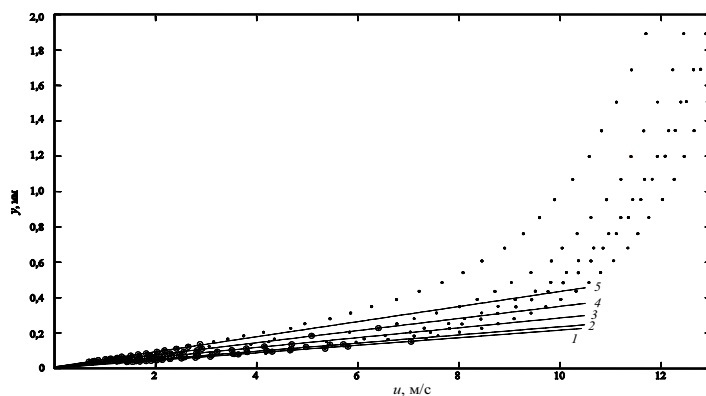


Рис. 6. Профили скорости в пристенной части слоя. Значения Q , кг/с/м²: 0 (1); 0, 0,0047 (2); 0,0164 (3); 0,0309 (4); 0,0488 (5)

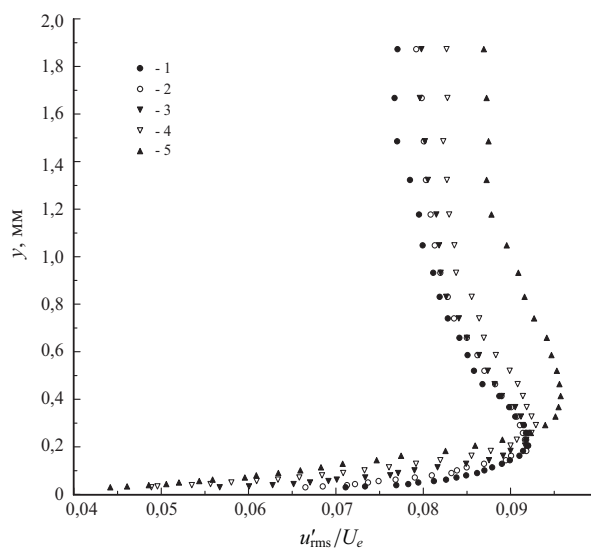


Рис. 7. Профили интегральной интенсивности пульсаций скорости в пристенной части слоя. Значения Q , кг/с/м²: 0 (1); 0,0047 (2); 0,0164 (3); 0,0309 (4); 0,0488 (5)

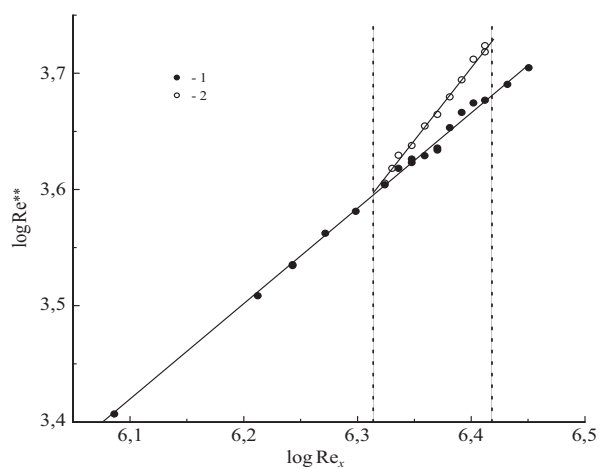


Рис. 8. Изменение числа Рейнольдса по толщине потери импульса в зависимости от числа Рейнольдса по началу развития турбулентного пограничного слоя. Значения Q , кг/с/м²: 0 (1); 0,038 (2)

зволили расширить диапазон значений Q , однако, судя по характеру зависимости $C_f = f(Q)$, резерв снижения поверхностного трения еще не исчерпан.

Основной причиной уменьшения поверхностного трения является увеличение толщины ламинарного подслоя, оттеснение пристенных слоев пограничного слоя от стенки и, как следствие, уменьшение скорости вблизи обтекаемой поверхности. Это наглядно видно из рис. 6, на котором представлены сравнительные профили скорости $u = f(y)$ при выборочном значении расхода вдуваемого воздуха Q . (Здесь для сравнения приведен также профиль скорости при отсутствии микровдува.) При этом для большей наглядности результаты измерений ограничены пристенной частью слоя, где происходят наибольшие изменения локальной скорости потока. Из рисунка следует, что по мере увеличения массового расхода, локальная скорость вблизи стенки действительно уменьшается, и при максимальном значении Q градиент скорости $(du/dy)_{y=0}$ снижается примерно вдвое.

В виде зависимости $u'_{rms}/U_e = f(y)$ на рис. 7 представлены также профили среднеквадратичных значений продольной компоненты пульсаций скорости для тех же, как и на рис. 6, значений Q . Причем, как и ранее, результаты измерений ограничены пристенной частью слоя, где происходят наибольшие изменения турбулентных пульсаций скорости. Заслуживает внимания тот факт, что при увеличении массового расхода, максимум турбулентных пульсаций скорости смещается в сторону больших значений y . Это дает основание полагать, что при наличии микровдува толщина ламинарного подслоя возрастает, что, как следствие, должно способствовать снижению поверхностного трения.

Следует, однако, заметить, что этот процесс сопровождается существенным ростом интегральных характеристик пограничного слоя, в частности толщин вытеснения и потери импульса, формпараметра пограничного слоя и толщины δ последнего. В качестве примера на рис. 8 приведена зависимость $\log Re^{**} = f(\log Re_x)$, характеризующая изменение числа Рейнольдса по толщине потери импульса δ^{**} от числа Рейнольдса Re_x вдоль пористого образца, для случая, когда массовый расход Q составлял $0,038 \text{ кг/с/м}^2$ (2). Здесь для сравнения показана также аналогичная зависимость при $Q = 0$ (1). Как и ранее, передняя и задняя границы пористого

образца показаны вертикальными штриховыми линиями.

Обращает на себя внимание, что, как и при $Q = 0$, анализируемая зависимость (2) имеет в представленных координатах линейный характер. Это свидетельствует о том, что развитие вновь сформировавшегося пограничного слоя в принципе следует тем же законам, что и при $Q = 0$. Однако темп нарастания пограничного слоя существенно более высокий.

Выводы

Проведена серия экспериментальных исследований, направленных на изучение влияния микровдува воздуха через пористую стенку на свойства турбулентного пограничного слоя, формирующегося на плоской пластине при ее обтекании несжимаемым потоком. Полученные результаты позволяют сделать следующие выводы.

В исследованном диапазоне значений массового расхода микровдув воздуха через пористую стенку заданной геометрии является эффективным средством модификации турбулентного пограничного слоя, обеспечивающим выигрыш в сопротивлении трения в сравнении с аналогичной величиной для немодифицированного течения. При увеличении массового расхода Q коэффициент поверхностного трения C_f существенно уменьшается, и при максимальном значении Q снижение C_f достигает 45–47 %.

Процесс вдува сопровождается существенным ростом интегральных характеристик пограничного слоя, в частности толщин вытеснения, потери импульса и формпараметра пограничного слоя, хотя их развитие вдоль пористого образца происходит по тем же законам, что и при отсутствии микровдува.

Окончательный вывод об эффективности данного способа управления и ожидаемой тенденции при возрастании скорости потока может быть сделан лишь на базе методики, учитывающей энергетические затраты на производство самого процесса вдува. Подобные исследования должны стать предметом дальнейшего рассмотрения.

Список литературы

1. Coustols E., Savill A. M. Turbulent Skin-Friction Drag Reduction by Active and Passive Means. Part 1, 2 // Paper Reprinted from AGARD Report 786. 1992. P. 8-1–8-80.

2. Корнилов В. И. Проблемы снижения турбулентного трения активными и пассивными методами (обзор) // Теплофизика и аэромеханика. 2005. Т. 12, № 2. С. 183–208.
3. Jeromin L. O. F. The Status of Research in Turbulent Boundary Layers with Fluid Injection // Progress in Aeronautical Sciences / Ed. by D. Kuchemann. N. Y.: Pergamon Press, 1966. P. 65–189.
4. Voisinnet R. L. P. Influence of Roughness and Blowing on Compressible Turbulent Boundary Layer Flow / Rep. Naval Surface Weapons Center. 1979. No. NSWC/TR-79-153.
5. Healzer J. M., Moffat R. J., Kays W. M. The Turbulent Boundary Layer on a Porous Rough Plate: Experimental Heat Transfer with Uniform Blowing // ASME Paper. 1974. No. 74-HT-14.
6. Dahm T. J., Kendall R. M., Mendenhall M. R., Rubesin M. W. Mass, Momentum, and Heat Transfer within a Turbulent Boundary Layer with Foreign Gas Mass Transfer at the Surface. Part 1: Constant Fluid Properties Final Report. 1964. No. 65N34889.
7. Goodwin B. M. The Transpired Turbulent Boundary Layer with Zero Pressure Gradient: Doctor of Science Thesis. Massachusetts, 1961.
8. Simpson R. L., Moffat R. J., Kays W. M. The Turbulent Boundary Layer on a Porous Plate: Experimental Skin Friction with Variable Injection and Suction // Intern. J. Heat Mass Transfer. 1969. Vol. 12 (7). P. 771–789.
9. Dershin H., Gallaher W. H., Leonard C. A. Direct Measurement of Skin Friction on a Porous Flat Plate with Mass Injection // AIAA J. 1967. Vol. 5. P. 1934–1939.
10. Simpson R. L. Characteristics of Turbulent Boundary Layers at Low Reynolds Numbers with and without Transpiration // J. Fluid Mech. 1970. Vol. 42 (4). P. 769–802.
11. Jeromin L. O. F. An Experimental Investigation of the Compressible Turbulent Boundary Layer with Air Injection // ARC Reports and Memoranda. L., UK, 1968. No. 3526.
12. Wilkinson S. P. Influence of Wall Permeability on Turbulent Boundary-Layer Properties // AIAA Paper №83-0294. 1983.
13. Hwang D. P. A Proof of Concept Experiment for Reducing Skin Friction by Using a Micro-Blowing Technique // NASA Technical Memorandum 107315 / AIAA-97-0546. 1997. 12 p.
14. Hwang D. Review of Research into the Concept of the Microblowing Technique for Turbulent Skin Friction Reduction // Progress in Aerospace Sciences. 2004. Vol. 40. P. 559–575.
15. Hwang D. Experimental Study of Characteristics of Micro-Hole Porous Skins for Turbulent Skin Friction Reduction // 23rd Congress of International Council of the Aeronautical Sciences, 8–13 September, 2002. Toronto, Canada, 2002. P. 2101.7–2101.7.
16. Бойко А. В., Корнилов В. И. Измерение локального коэффициента поверхностного трения с помощью термоанемометра // Теплофизика и аэромеханика. 2010. Т. 17, № 4.
17. Spalding D. B. A New Analytical Expression for the Drag of a Flat Plate Valid for Both the Turbulent and Laminar Regimes // Intern. J. Heat and Mass Transfer. 1962. Vol. 5. P. 1133–1138.
18. Nash J. F. Turbulent Boundary Layer Behaviour and the Auxiliary Equation // NPL Aeron. Rep. 1965. No. 1137.
19. Computation of Turbulent Boundary Layer: Proc. Stanford Conf. AFOSR-IFP, 1968–1969 / Eds. D. E. Coles, E. A. Hirst. Stanford, 1969. Vol. 2. 519 p.

Материал поступил в редколлегию 05.07.2010

V. I. Kornilov, A. V. Boiko

APPLICATION OF AIR MICROBLOWING THROUGH A POROUS WALL FOR SKIN FRICTION REDUCTION ON A FLAT PLATE

The effect of air microblowing through a porous wall on the properties of a turbulent boundary layer formed on a flat plate in an incompressible flow is studied experimentally. The Reynolds number based on the momentum thickness of the boundary layer in front of the porous insert is 3 900. The mass flow rate of the blowing air per unit area was varied within $Q = 0-0.0488 \text{ kg/s/m}^2$. A consistent decrease in local skin friction, reaching up to 45–47 %, is observed to occur at the maximal blowing air mass flow rate studied.

Keywords: microblowing, porous wall, incompressible turbulent boundary layer, skin friction, flat plate.