

УДК 532.526.4 + 532.546.6 + 532.526.72

Распределение скорости в турбулентном пограничном слое на проницаемой стенке в условиях вдува воздуха

В.И. Корнилов

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

E-mail: kornilov@itam.nsc.ru

Исследована возможность использования простых физических моделей для описания свойств несжимаемого турбулентного пограничного слоя, формирующегося при обтекании проницаемой стенки при варьируемом значении микровдува воздуха. Показано, что масштаб скорости $U_\infty \delta^* / \delta_{99}$ может успешно применяться для аппроксимации распределения скоростей во внешней области пограничного слоя. Использование указанного масштаба создает предпосылки для инвариантности профилей скорости относительно чисел Рейнольдса, что существенно облегчает процесс анализа экспериментальных данных, делая его независимым от условий формирования потока выше области измерений. Распределение скоростей в логарифмической области пограничного слоя над проницаемой поверхностью может описываться модифицированным законом стенки с константой C_0 , равной соответствующему значению в каноническом пограничном слое, и с величиной K , являющейся слабой функцией параметра вдува.

Ключевые слова: несжимаемый турбулентный пограничный слой, проницаемая стенка, микровдув, профили скорости.

Введение

Несмотря на большое количество имеющихся в настоящее время экспериментальных данных, поведение турбулентных пограничных слоев остается не вполне ясным, и, за исключением простейших случаев, точные его предсказания по-прежнему затруднительны. По существу наше понимание механизма пристенных турбулентных сдвиговых течений в основном ограничивается законом стенки и законом дефекта скоростей, которые на эмпирической основе были заложены еще Карманом и Прандтлем. Вместе с тем, в процессе исследований за последние десятилетия обозначились серьезные продвижения в понимании механизма таких течений при наличии даже сложных граничных условий, в частности, градиента давления, шероховатости и кривизны поверхности и т. п. [1–4]. Однако в большинстве случаев при анализе таких течений рассматривались гладкие непроницаемые стенки, в то время как обтекание проницаемых поверхностей (например, пористых, перфорированных) оказалось в значительной степени менее изученным, хотя имеет важные практические приложения. В частности, введение инородного газа в пограничный слой через пористую стенку является эффективным

способом пленочного охлаждения поверхности. Нельзя также не отметить, что за счет активного управления пограничным слоем с помощью микровдува газа через пористую стенку можно достичь существенного снижения сопротивления.

С другой стороны, развитие численных методов расчета предполагает знание характерных особенностей течения вблизи обтекаемой поверхности. Одной из таких особенностей при наличии вдува является формирование существенных поперечных градиентов скорости в пристенной области течения. К тому же, при обтекании пористой (либо любой другой проницаемой) стенки границы деления пограничного слоя на соответствующие области (ламинарный подслой, буферная область и т. д.), в особенности при возрастании массового расхода, могут заметно отличаться от канонического пограничного слоя [5], а справедливость и диапазон применимости некоторых констант при описании свойств такого сдвигового течения вовсе не очевидны [6].

Наконец, ограниченное количество экспериментальных данных создает дополнительные трудности при анализе течений с микровдувом через проницаемую поверхность.

В связи с вышеизложенным возникает потребность в изучении возможности применения относительно несложных физических моделей для описания свойств турбулентного пограничного слоя, формирующегося при обтекании проницаемой стенки, используя для этого полученные автором экспериментальные данные при варьируемом расходе микровдува воздуха, а также при его отсутствии. Здесь под микровдувом понимаются такие значения нормальной к стенке составляющей скорости, которые не превышают сотых долей процента от скорости набегающего потока. Насколько известно автору, строгой классификации, характеризующей понятие сильного, слабого вдува или микровдува, в литературе не приводится.

1. Условия и методика экспериментов

Эксперименты проводились в дозвуковой малотурбулентной аэродинамической трубе Т-324 ИТПМ СО РАН в диапазоне скоростей невозмущенного потока в контрольном сечении U_∞ от 9,7 до 31 м/с, что соответствовало числам Рейнольдса $Re_1 \approx (0,646-2,073) \times 10^6 \text{ м}^{-1}$.

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. Передняя 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 $r = 0,4 \text{ мм}$. Задняя часть модели оборудована регулируемым хвостовым закрылком, с помощью которого осуществлялось управление характером течения в окрестности носика.

Конструкция пластины предусматривает возможность установки заподлицо с основной ее поверхностью сменных плоских образцов (как непроницаемого, так и проницаемого) больших размеров в плане ($420 \times 250 \text{ мм}^2$), что позволяло контролировать локальные свойства течения (среднюю скорость, трение) на значительной ее длине.

Параметры проницаемого образца составляют: пористость (суммарная площадь проходного сечения отверстий) 17,1 %, средний диаметр микроотверстий $D = 0,175 \text{ мм}$, толщина стенки $t = 1,1 \text{ мм}$, относительная высота отверстий $t/D = 6,28$.

Вдув воздуха в камеру давления и из нее через проницаемый образец в поток осуществлялся с помощью компрессора СБ4/С-100.АВ510 производительностью 338 л/мин через 13 подводящих штуцеров, размещенных равномерно на дне камеры. В процессе экспериментов массовый расход вдуваемого воздуха на единицу площади Q менялся в пределах от 0 до 0,05 кг/с/м², что соответствовало изменению параметра вдува v/v_* от 0 до 0,06713, где v — скорость вдува, а $v_*^2 = \tau_w/\rho$ — динамическая скорость.

С целью обеспечения развитого турбулентного течения по длине пластины пограничный слой был искусственно турбулирован путем установки в области максимального изменения давления (окрестность передней кромки) полосы крупнозернистой наждачной бумаги (со сглаженными уступами) длиной 30 мм и высотой $h = 0,8$ мм.

Скоростной напор набегающего потока q_∞ контролировался по перепаду между полным P_0 и статическим давлением P_∞ , измеряемому с помощью трубки Пито–Прандтля, установленной в невозмущенном потоке, и регистрируемому наклонным спиртовым микроанометром системы DISA, а также дублировался путем измерения перепада ($P_{0ф} - P_{рч}$), где $P_{0ф}$ и $P_{рч}$, соответственно, давление торможения в форкамере трубы и статическое давление в рабочей части.

Сбор и обработка регистрируемой в ходе эксперимента информации осуществлялись непосредственно в темпе эксперимента и оперативно анализировались программными средствами, разработанными на базе пакета MatLab.

Мгновенная локальная скорость u в исследуемой точке поля сдвигового потока измерялась с помощью комплекса термоанометрической аппаратуры 55M0 фирмы DANTEC. Блок-схема измерений включала термоанометрический мост 55M10, к выходу которого подключен линейризатор 55D10. Сигнал с выхода линейризатора подавался на многоканальный высокочастотный 14-ти 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 с с частотой 10 кГц.

В качестве первичного преобразователя использовался миниатюрный датчик термоанометра, 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.

Коэффициент поверхностного трения C_f определялся по методике [7], предусматривающей выполнение точных измерений осредненных по времени данных вблизи стенки, при помощи одноточечного датчика термоанометра. При этом вся процедура определения C_f базируется на комплексе программ, отлаженных в рамках пакета MatLab, и практически не зависит от пользователя. В качестве примера на рис. 1 приведен экспериментальный профиль скорости (символы) над пористой поверхностью в координатах закона стенки при нулевом значении массового расхода воздуха. Строго говоря, речь идет об обтекании мелкоперфорированной поверхности, с помощью которой, используя малые расходы газа через маленькие отверстия (микроотверстия), можно существенно снизить турбулентное трение. В дальнейшем мы будем именовать такую поверхность более общим термином — проницаемой, тем более что в литературе нередко под пористой поверхностью понимается поверхность с глухими отверстиями, которая на самом деле является непроницаемой.

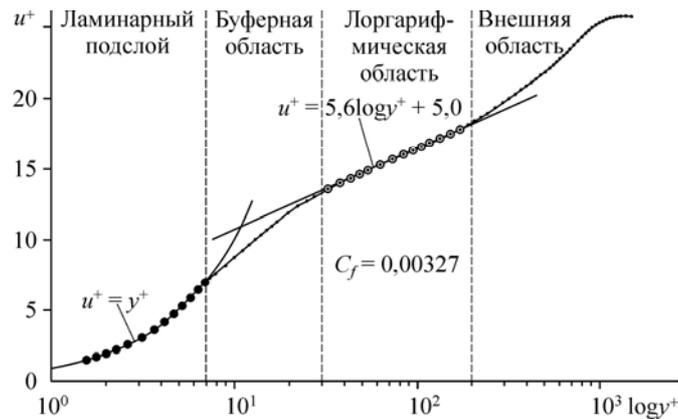


Рис. 1. Характерные области турбулентного пограничного слоя над проницаемой стенкой.
 $Re_x = 1,6 \times 10^6$; $v^+ = 0$.

Как видно, при нулевом значении микровдува воздуха через указанную стенку распределение скорости в логарифмической области пограничного слоя (обведенные символы) вполне удовлетворительно описывается классическим законом стенки $u^+ = A \log y^+ + C$, где

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

с коэффициентами $A = 5,62$ и $C = 5,0$, рекомендованными в качестве канонических материалами известной Стэнфордской конференции [8]. Полученные в рамках методики [7] опытные данные (темные символы) хорошо описываются также линейным законом распределения скоростей. Все это оказалось возможным благодаря тому, что сам материал изготовлен с использованием новейших технологий и имеет хорошее качество обработки. Как следствие, локальное трение при обтекании такой поверхности практически не отличается от гидравлически гладкого аналога. Не случайно протяженность характерных областей пограничного слоя, по крайней мере в первом приближении, вполне ожидаема.

Более подробно методика эксперимента изложена в работе [6].

2. Результаты исследований

Аналізу характеристик турбулентного пограничного слоя при варьируемом расходе микровдува воздуха через проницаемую стенку предшествовали достаточно подробные измерения профилей средней скорости и мгновенных значений ее продольных пульсаций, а также поверхностного трения в исходном (без микровдува) пограничном слое, которые были выполнены в 15 поперечных сечениях по длине пластины в условиях безградиентного ее обтекания. Не вдаваясь в детали, отметим, что характеристики сдвигового потока на проницаемой поверхности полностью соответствуют физическим представлениям о свойствах турбулентного пограничного слоя, формирующегося на гидравлически гладкой плоской пластине при номинально безградиентном ее обтекании.

Внешняя область пограничного слоя

Под внешней областью здесь понимается та часть пограничного слоя, которая в традиционном смысле описывается дефектом скорости, нормированным на толщину пограничного слоя.

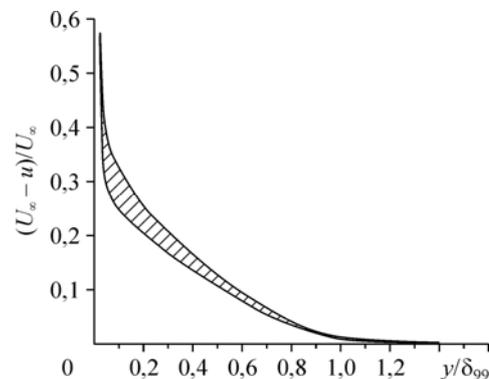
На рис. 2 представлены заимствованные из [9] экспериментальные профили скорости $(U_\infty - u)/U_\infty = f(y/\delta_{99})$, полученные при обтекании гладкой непроницаемой плоской пластины, где в качестве масштаба длины использовалась толщина пограничного слоя, определенная при условии $u/U_\infty = 0,99$. Поскольку воспроизведение экспериментальных точек с 14-ти профилей скорости из оригинальной журнальной статьи оказалось затруднительным, здесь верхней и нижней ограничительными линиями показаны предельные границы их разброса. Необходимость использования этих данных вызвана тем, что авторам удалось более чем на порядок изменить диапазон значений Re^{**} , где Re^{**} — число Рейнольдса, определенное по толщине потери импульса, что дает хорошую возможность для проверки эффективности такой нормировки. Справедливости ради отметим, что для получения профилей скорости в цитируемой работе использовался плоский микронасадок, что могло внести дополнительную ошибку в величину измеряемой скорости.

Судя по дорожке разброса (заштрихованная область), создается впечатление, что имеет место явно выраженное влияние числа Рейнольдса. Это, казалось бы, подтверждает и более детальное рассмотрение данных работы [9], откуда следует, что профили скорости асимптотически приближаются к единой зависимости. В целом, представленные результаты наводят на мысль, что в исследованном диапазоне Re^{**} распределение скоростей, даже на непроницаемой поверхности, не носит вполне универсального характера, и традиционно используемый способ нормировки, по-видимому, нуждается в корректировке.

Учитывая вышеизложенное, за основу был взят подход, разработанный в работе [10], где для внешней области пограничного слоя предложен масштаб скорости в виде $U_\infty \delta^*/\delta_{99}$. (Здесь δ^* — толщина вытеснения, а δ_{99} , как и ранее, — толщина пограничного слоя, определенная из условия $u/U_\infty = 0,99$.) Позднее исследованиями [11] в рамках принципа подобия были подтверждены справедливость и обоснованность предложенного масштаба, на основе использования которого удалось показать, что изменение характерных параметров пограничного слоя обусловлено в основном особенностями формирования потока выше области измерений, а не изменением локального числа Рейнольдса. Важно отметить, что в эксперименте подобные особенности практически всегда имеют место, в частности, из-за конечности притупления передней кромки пластины, наличия локального градиента давления и т. п. А раз так, то возможность использования указанного масштаба, позволяющего избежать влияния числа Рейнольдса на распределение скоростей во внешней области, становится особенно привлекательным. В нашем случае наличие микровдува через проницаемую стенку является дополнительным осложняющим фактором, поэтому обобщение профилей скорости с использованием нового масштаба вызывает особый интерес.

На рис. 3 представлены экспериментальные профили скорости $(U_\infty - u)/(U_\infty \delta^*/\delta_{99}) = f(y/\delta_{99})$ в пограничном слое проницаемой плоской пластины и нормированные с использованием масштаба скорости для внешней

Рис. 2. Предельные отклонения экспериментальных профилей скорости на непроницаемой плоской пластине, нормированных в традиционных переменных внешней области: $Re^{**} = (3,0 - 48,3) \times 10^3$, $U_\infty = (44,2 - 92,4)$ м/с [9].



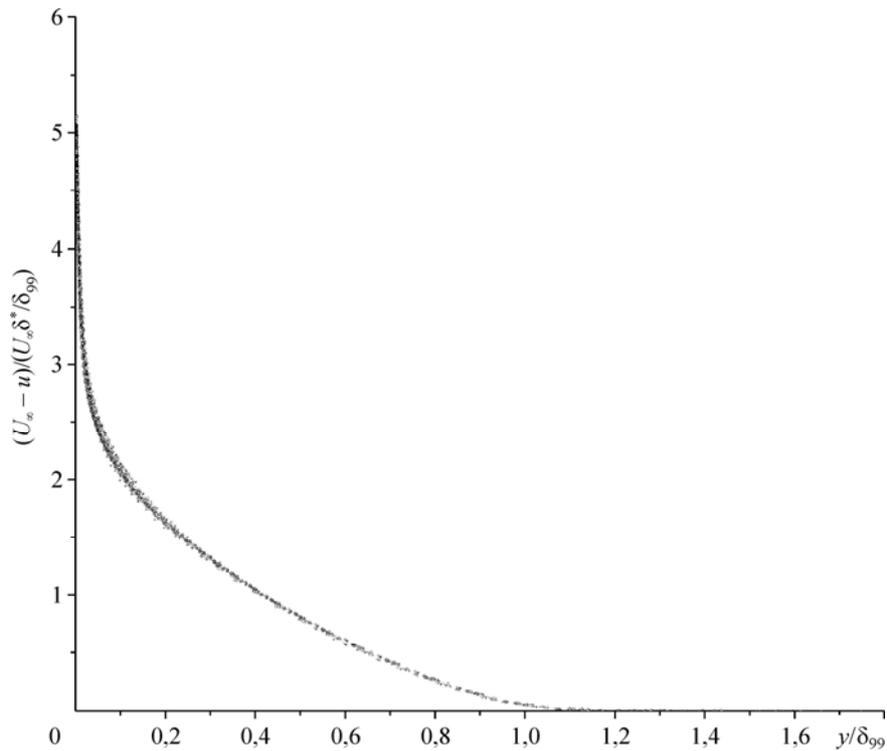


Рис. 3. Экспериментальные профили скорости на проницаемой плоской пластине, нормированные с использованием масштаба скорости для внешней области $U_\infty \delta^*/\delta_{99}$.

$$\text{Re}^{**} = (3,372 - 5,415) \times 10^3, U_\infty = (9,7 - 31,0) \text{ м/с}, v^+ = 0 - 0,0671.$$

области $U_\infty \delta^*/\delta_{99}$. В общей сложности здесь использовалось порядка 35 профилей скорости, полученных в различных поперечных сечениях по длине модели при варьированном расходе воздуха через проницаемую стенку и его отсутствии. Нет сомнения, что при такой нормировке приведенные профили стремятся к единой зависимости несравненно более успешно, если иметь в виду наличие осложняющего фактора в виде микровдува воздуха. Это дает основание полагать, что распределение скоростей во внешней области турбулентного пограничного слоя на проницаемой поверхности может успешно описываться с использованием масштаба скорости $U_\infty \delta^*/\delta_{99}$.

Внутренняя область пограничного слоя

Не менее важным является также изучение возможности описания свойств течения на проницаемой поверхности при наличии микровдува путем использования переменных закона стенки. Стивенсоном (см. ссылку в работе [12]) в рамках решения уравнения импульсов предложено следующее уравнение для гладкой плоской пластины с массообменом:

$$u_p^+ \equiv (2/v^+)[(1 + v^+ \cdot u^+)^{1/2} - 1] = (1/\kappa) \cdot \ln y^+ + C, \quad (1)$$

где κ — константа Кармана, $v^+ = \nu/\nu_*$ — параметр вдува или относительная компонента скорости по нормали к стенке, а $C = (C_1 - 2/v^+)$ — эмпирический коэффициент. Нетрудно заметить, что при отсутствии вдува через проницаемую стенку ($v^+ = 0$), это уравнение, вообще говоря, имеет особенность, вследствие чего его

использование становится затруднительным. Поэтому преобразуем левую часть уравнения (1) следующим образом:

$$u_p^+ \equiv (2u^+)/[(1 + v^+ \cdot u^+)^{1/2} + 1],$$

которая при $v^+ = 0$ принимает вид $u_p^+ \equiv u^+ = u/u_*$, типичный для логарифмического закона стенки на гладкой непроницаемой поверхности. Представим теперь правую часть уравнения (1) следующим образом:

$$u_p^+ \equiv (1/\kappa) \cdot \ln y^+ + C_0 + K v^+.$$

Ясно, что в частном случае, когда $v^+ = 0$, эмпирическая константа C_0 должно быть равна 5 [8], а K являться функцией параметра вдува. Анализ показывает, что эта зависимость слабая и K вполне может быть принят равным 9,6, что довольно близко к значению 11, рекомендуемому Стивенсоном (см. ссылку в работе [12]), и к значению 10,8, полученному автором [13]. Таким образом, распределение скоростей в логарифмической области пограничного слоя над проницаемой стенкой может описываться уравнением вида

$$(2u^+)/[(1 + v^+ \cdot u^+)^{1/2} + 1] = (1/\kappa) \cdot \ln y^+ + C_0 + K v^+. \quad (2)$$

В качестве примера на рис. 4 приведены экспериментальные профили скорости в пограничном слое проницаемой стенки в виде зависимости $u_p^+ = f(\ln y^+)$ при нескольких значениях параметра вдува v^+ . Для сравнения показаны также результаты

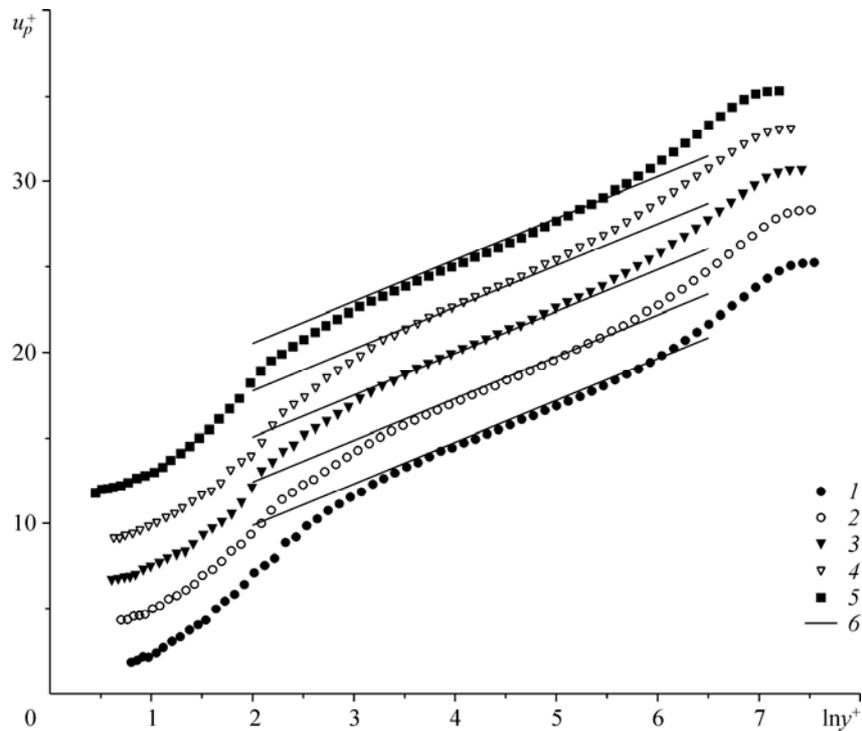


Рис. 4. Экспериментальные профили скорости в координатах закона стенки $u_p^+ = f(\ln y^+)$. Значение v^+ : 0 (1), 0,00475 (2), 0,01824 (3), 0,03823 (4), 0,06713 (5), расчет по уравнению (2) (6).

расчета распределения скоростей, полученные из правой части уравнения (2) (линии). Как видно, согласие между экспериментом и расчетом вполне удовлетворительное, по крайней мере, в исследованном диапазоне параметра вдува. Обращает также на себя внимание тот факт, что представленные в таком виде результаты весьма близки к тем, которые имеют место для канонического пограничного слоя. Как отмечалось выше, диапазон значений U^+ ограничивался здесь малыми расходами (микровдувом), поэтому дать четкое заключение об изменении протяженности характерных областей пограничного слоя при изменении U^+ затруднительно.

Выводы

Проведены экспериментальные и расчетные исследования, направленные на изучение возможности использования простых физических моделей для описания свойств турбулентного пограничного слоя, формирующегося при обтекании проницаемой стенки с варьируемым расходом микровдува воздуха. Полученные результаты позволяют сделать следующие выводы:

– эмпирический масштаб скорости $U_\infty \delta^* / \delta_{99}$, найденный в работе [10] для гладкой плоской непроницаемой стенки и в дальнейшем обоснованный на основе использования принципа подобия в [11], может успешно применяться для аппроксимации распределения скоростей во внешней области турбулентного пограничного слоя вдоль проницаемой стенки с микровдувом. Использование указанного масштаба создает предпосылки для инвариантности профилей скорости относительно числа Рейнольдса, что существенно облегчает процесс анализа экспериментальных данных, делая его независимым от условий формирования потока выше области измерений;

– распределение скоростей в логарифмической области пограничного слоя над проницаемой стенкой может успешно описываться модернизированным законом стенки с эмпирической константой C_0 , равной соответствующему значению в классическом пограничном слое, и величиной K , являющейся слабой функцией параметра вдува;

– представляется важным расширение диапазона измерений как с точки зрения увеличения локальных чисел Рейнольдса, так и увеличения параметра микровдува с тем, чтобы более точно установить границы применимости закона стенки и закона внешней области для аппроксимации профилей скорости над проницаемой поверхностью. Получение таких данных имеет существенное значение для отработки численных методов расчета и для изучения эффективности микровдува как средства уменьшения трения на обтекаемой поверхности.

Использовавшиеся для анализа экспериментальные данные получены совместно с А.В. Бойко, за что автор выражает ему искреннюю признательность.

Список литературы

1. Murlis J., Tsai H., Bradshaw P. The structure of turbulent boundary layers at low Reynolds numbers // J. Fluid Mech. 1982. Vol. 122. P. 13–56.
2. Balint J.L., Wallace J.M., Vukoslavcevic P. The velocity and vorticity vector fields of a turbulent layer. Part 2. Statistical properties // J. Fluid Mech. 1991. Vol. 228. P. 53–86.
3. Spalart P., Watmuff J. Experimental and numerical study of a turbulent boundary layer with pressure gradients // J. Fluid Mech. 1993. Vol. 249. P. 337–371.

4. **Osterlund J.M.** Experimental studies of zero pressure-gradient turbulent boundary layer / Doctoral Thesis, Royal Institute of Technology, Stockholm, 1999.
5. **Cuhadaroglu B.** An analysis of the turbulent boundary layer on a porous wall with transpiration // ARI — Bulletin of the Istanbul Technical University. 1997. Vol. 50. P. 127–130.
6. **Корнилов В.И., Бойко А.В.** Использование микровдува воздуха через пористую стенку для снижения трения на плоской пластине // Вестник НГУ. Серия: Физика. 2010. Т. 5, Вып.3. С. 38–44.
7. **Бойко А.В., Корнилов В.И.** Измерение локального коэффициента поверхностного трения с помощью термоанемометра // Теплофизика и аэромеханика. 2010. Т. 17, № 4. С. 613–624.
8. **Computation of Turbulent Boundary Layer** / Eds. D.E. Coles, E.A. Hirst // Proc. Stanford Conf. AFOSR-IFP, Stanford University, 1968 – 1969. Vol. 2. 519 p.
9. **Smith D.W., Walker J.H.** Skin-friction measurements in incompressible flow // NACA TN. 1972. No. 4231.
10. **Zagarola M.V., Smits A.J.** A new mean velocity scaling for turbulent boundary layers // Proc. 1998 ASME Fluids Engng Division Summer Meeting, June 21–25, 1998, Washington DC. P. 1–6.
11. **Castillo L., Walker D.J.** Effect of upstream conditions on the outer flow of turbulent boundary layers // AIAA J. 2002. Vol. 40, No. 7. P. 1292–1299.
12. **Cebeci T.** Analysis of turbulent flows. Oxford: Elsevier Ltd, 2004. 376 p.
13. **Coles D.** A survey of data for turbulent boundary layers with mass transfer // Proc. AGARD Conf. on Turbulent Shear Flows, London. AGARD-CP-93, 1971.

Статья поступила в редакцию 16 декабря 2010 г.