

УДК 532.526.4 + 532.526.72

## **Измерение локального коэффициента поверхностного трения с помощью термоанемометра**

**А.В. Бойко, В.И. Корнилов**

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

E-mail: kornilov@itam.nsc.ru

На основе точного измерения осредненных по времени данных с однониточного датчика термоанемометра вблизи стенки отработана методика определения локальных значений коэффициента поверхностного трения на плоской пористой поверхности, при обтекании которой формируется неканонический турбулентный пограничный слой. Указанная методика может найти применение при изучении эффективности различных способов воздействия на несжимаемый пограничный слой, в частности с помощью микровдува воздуха, где использование прямых методов определения трения затруднительно.

**Ключевые слова:** методика, коэффициент поверхностного трения, термоанемометр, калибровка, турбулентный пограничный слой, пористая стенка.

### **ВВЕДЕНИЕ**

Точное определение локального значения трения является задачей чрезвычайной важности, независимо от того, занимается ли исследователь изучением обтекания самолета, судна или имеет дело с лабораторными фундаментальными исследованиями. Несмотря на впечатляющие успехи, достигнутые в этом вопросе в последние годы, и большое разнообразие доступных методик для измерения трения, по-прежнему существуют проблемы, относящиеся к точности, повторяемости и практическим аспектам определения этой величины. В частности, обращает на себя внимание существенная разница в результатах измерения коэффициента поверхностного трения  $C_f$ , которая имеет место при использовании различных методов. Это особенно заметно в тех случаях, когда указанная величина является определяющей при оценке эффективности того или иного способа управления турбулентным пограничным слоем (риблеты, LEBU и др.).

Мы не ставим здесь своей целью рассматривать все разнообразие существующих в настоящее время методик, поскольку это потребовало бы отдельного обстоятельного обзора. Заинтересованного читателя отсылаем к публикациям [1–5]. Отметим лишь, что при использовании даже традиционных и широко известных методов существуют не только собственные проблемы, присущие данному конкретному методу, например, потребность в калибровке (планка–выступ (sublayer fence),

датчик Стантона, пульсирующий термоанемометр), но и обусловленные условиями эксперимента, например, перепадом давления (трубка Престона, планка–выступ и датчик Стантона) или действующей силой трения (плавающий элемент) и другими особенностями. Дополнительные ошибки в измеряемую величину  $C_f$  могут вносить эффекты трехмерности течения, отклонение от безградиентности и равновесности (по Клаузеру) потока, каждая из которых зависит от конкретно применяемой методики. Напомним, что ряд методов может использоваться лишь в условиях существования закона стенки в турбулентном пограничном слое, т. е. по существу в канонических условиях, что существенно ограничивает возможности их применения. В неканоническом турбулентном пограничном слое, например, развивающемся вдоль пористой или перфорированной стенки, выбор приемлемой методики для определения  $C_f$  невелик. В то же время проблема определения точных значений  $C_f$  в этом случае стоит особенно остро. Она обусловлена тем, что пористая стенка нередко используется для организации процесса управления пограничным слоем при помощи вдува или отсоса газа, что требует точной информации о сопротивлении трения исходной поверхности.

В ряде случаев с самой лучшей стороны зарекомендовал себя LISF (Laser Interferometer Skin Friction) метод (масляной капли или пленки) [6], который может успешно использоваться и в неканонических течениях, однако его применение при наличии пористой и, тем более, шероховатой стенки становится проблематичным. В подобных условиях один из немногих подходов, основанных на данных о распределении скорости в вязком подслое турбулентного пограничного слоя, может оказаться наиболее эффективным. Конечно, при изучении течения, свойства которого априори неизвестны, всегда возникает вопрос о том, имеется ли в таком течении линейная область или ее нет. В этом случае можно сослаться на работу [7], в которой на основании ряда тестовых примеров, включая различные типы градиентных течений, показано, что вязкий подслой вблизи обтекаемой поверхности существует всегда, и распределение скорости в этой области имеет линейный характер.

В то же время измерение скорости в пристенной части пограничного слоя представляет самостоятельную трудность. Например, возможности использования для этой цели LDA или трубки Пито лимитируются тем, что они имеют достаточно большой измерительный объем и, следовательно, им присущи ограничения с точки зрения пространственного разрешения. Известны и другие недостатки при использовании этих методов вблизи стенки: отклонение световых пучков и влияние электронного шума (LDA), возникновение блокинг-эффекта, а также трудности с регистрацией малого перепада давления и инерционность пневмотрасс (трубка Пито). Таким образом, термоанемометр представляет собой один из немногих приемлемых инструментов для точного определения скорости вблизи стенки. Чувствительный элемент термоанемометра имеет сравнительно небольшой измерительный объем, хорошее пространственное и временное разрешение и характеризуется слабой чувствительностью к эффекту трехмерности вблизи стенки и градиенту давления. Однако при всей своей привлекательности данный метод связан с дополнительными погрешностями скорости, обусловленными влиянием близости стенки на показания термоанемометра. Проблема, как известно, состоит в том, что при измерениях в вязком подслое проявляется охлаждающий эффект стенки на показания чувствительного элемента датчика, вследствие чего измеренная величина скорости оказывается выше ее истинного значения (см., например, [8–12]). В целом, по данным разных работ область влияния стенки распространяется до расстояний  $y^+$  порядка 5–6 и выше, и это влияние на локальную скорость потока может быть весьма существенным, особенно в тех случаях, когда стенка

теплопроводна. По этой причине возникает потребность в создании методики, которую можно было бы успешно использовать для корректировки осредненных по времени данных с одноточечного датчика термоанемометра в пристенной части пограничного слоя, позволяющей корректно определять локальное значение трения в неканоническом турбулентном пограничном слое.

В литературе неоднократно предпринимались попытки определения поверхностного трения с использованием для этой цели результатов измерений средней скорости в пристенной части пограничного слоя. Сущность подхода [9] базируется на измерении скорости в линейной области вязкого подслоя при точном позиционировании датчика термоанемометра, соответствующем измеряемой скорости. Известны также попытки выполнить калибровку датчика вблизи стенки для определения охлаждающего влияния стенки [12, 13]. В более ранней работе [8] представлена диаграмма, с помощью которой реальную скорость потока можно приближенно определить на основе данных о напряжении на выходе термоанемометра и расстояния датчика от стенки. В недавней работе [14] выполнена успешная попытка использовать для определения трения логарифмическую и линейную области пограничного слоя. Вместе с тем успех своего подхода авторы прямо связывают с точностью используемых для этой цели экспериментальных профилей, на основе которых ими создан модельный профиль скорости в пограничном слое.

Не вдаваясь в детали, отметим, однако, что при большом разнообразии факторов, влияющих на показания термоанемометра, подобные подходы трудно распространить на случай обтекания произвольных поверхностей, на которых формируется неканоническое течение. К тому же, проблема существенно усугубляется, если область влияния стенки соизмерима или даже превышает протяженность линейной области.

Основной целью настоящей работы как раз и является отработка методики определения локального трения на пористой поверхности, при обтекании которой формируется неканонический турбулентный пограничный слой, на основе точного измерения осредненных по времени данных с одноточечного датчика термоанемометра вблизи стенки.

## 1. УСЛОВИЯ И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Опыты проводились в дозвуковой малотурбулентной аэродинамической трубе Т-324 ИТПМ СО РАН в диапазоне скоростей невозмущенного потока в контрольном сечении  $U_\infty$  от 17 до 24,4 м/с, что соответствовало числам Рейнольдса на 1 м  $Re_1 \approx (1,133-1,627) \cdot 10^6 \text{ м}^{-1}$ .

Измерения выполнялись на модели плоской пластины из дюралюмина Д16Т размерами  $2500 \times 993 \text{ мм}^2$  в плане и толщиной 6 мм, установленной горизонтально в рабочей части трубы на боковых направляющих рельсах. Толщина передней части пластины с нерабочей стороны на длине 70 мм составляет 3 мм, а непосредственно передняя кромка представляет собой полуцилиндр радиусом  $r=1,5$  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 ( $400 \times 230 \text{ мм}^2$ ), что позволяло контролировать локальные свойства течения (среднюю скорость, трение, пульсации скорости)

на значительной их длине. В конечном итоге 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 в единицах числа Рейнольдса определяется следующими величинами:  $Re_x = 1,75 \cdot 10^6$  (начало) и  $2,33 \cdot 10^6$  (конец). Параметры пористого материала составляют: пористость 17,1 %, средний диаметр пор  $D = 0,175$  мм, толщина стенки  $t = 1,1$  мм, удлинение пор  $\lambda = t/D = 6,28$ . Указанные характеристики выбирались на основе анализа литературных данных, показывающих, что подобная конфигурация пор может оказаться перспективной с точки зрения снижения трения при организации управления турбулентным сдвиговым течением.

С целью обеспечения развитого турбулентного течения на большей части модели пограничный слой 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  $q_\infty$  контролировался перепадом между полным  $P_0$  и статическим  $P_\infty$  давлениями, измеряемым с помощью трубки Пито–Прандтля, установленной в невозмущенном потоке, и регистрируемым наклонным спиртовым микроманометром системы DISA (Defense Information Systems Agency), 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.

Основные измерения выполнены с помощью нового полностью автоматизированного дистанционно управляемого координатного устройства для зондирования структуры потока на обтекаемой поверхности, перемещение которого осуществлялось по заранее заданной программе, предусматривающей выбор требуемого шага (до 1 мкм), а также потребные параметры сбора всей необходимой информации о полях средней скорости и параметрах турбулентности. При этом как сбор, так 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 (Дания). 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 (Россия), предназначенный для преобразования входных аналоговых сигналов в цифровую форму, и с его выхода через USB (Universal Serial Bus) порт передавался в персональный компьютер. Сбор информации в каждой измеряемой точке поля потока осуществлялся в течение 10 с 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  $5^\circ$  к вектору скорости набегающего потока. Тем самым, при движении к стенке (отрицательное направление оси  $y$ ) датчик касался поверхности 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  $\pm 2$  мкм.

## 2. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

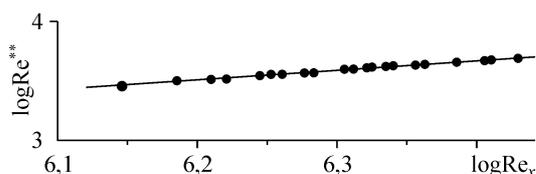
### 2.1. Характеристики пограничного слоя

Целью начальной стадии экспериментов был анализ состояния пограничного слоя на исследуемой плоской пластине. Как показали результаты измерений распределения статического давления на поверхности модели, непосредственно в рабочей области исследований ( $0,1 \leq x/L \leq 0,9$ ) реализуется участок практически безградиентного течения, на котором статическое давление в пределах погрешности эксперимента можно считать почти постоянным. Это достигалось за счет установки пластины на небольшой (порядка  $10^\circ$ ) положительный угол атаки и регулировкой 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 12 поперечных сечениях по длине модели как в центральной плоскости симметрии ( $z = 0$ ), так и на расстоянии  $z/b = 0,25$  от нее, где  $b$  — ширина пластины. Анализ показывает, что характеристики сдвигового потока на сплошной поверхности полностью соответствуют физическим представлениям о свойствах турбулентного пограничного слоя, формирующегося на плоской пластине при номинально безградиентном ее обтекании. Например, распределения интегральных характеристик пограничного слоя и, в частности, толщины потери импульса  $\delta^{**}$ , обнаруживают ожидаемые свойства течения. В качестве примера на рис. 1 приведена зависимость  $\log Re_x^{**} = f(\log Re_x)$ , характеризующая изменение толщины потери импульса  $\delta^{**}$  от числа Рейнольдса  $Re_x$ , вычисленного по скорости на внешней границе пограничного слоя, и координаты  $x = x_{\text{eff}}$ . (Здесь  $x_{\text{eff}}$  — эффективное начало развития турбулентного пограничного слоя, которое определялось из условия совпадения в первом измерительном сечении экспериментально найденного значения  $\delta^{**}$  и вычисленного по методике Сполдинга [16] 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, при скорости потока, изменяющейся от 17 до 24,4 м/с, данная зависимость имеет в представленных координатах линейный характер, что свидетельствует о формировании развитого турбулентного течения, в том числе и на нижней границе указанного диапазона.

Рис. 1. Изменение толщины потери импульса пограничного слоя в зависимости от числа Рейнольдса.



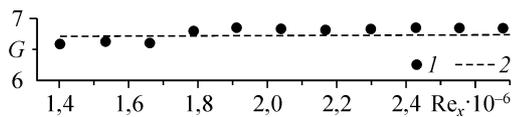


Рис. 2. Изменение параметра неравно-  
весности Клаузера в зависимости от  
числа Рейнольдса: настоящий экспе-  
римент (I), расчет по методике [17] (2).

Другим примером является распределение параметра неравно-  
весности Клаузера

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

который сохраняет практически постоянное значение по длине рабочей области (рис. 2), что свидетельствует о формировании равновесного турбулентного течения, начиная с первого измерительного сечения. При учете очень слабого продольного градиента давления, который имел место в экспериментах, отклонение полученных значений  $G$  от эмпирической кривой из работы [17], характеризующей равновесное состояние в турбулентном течении на плоской пластине, составляет не более  $\pm 2\%$ .

Профили турбулентных пульсаций скорости в переменных закона стенки  $\sqrt{u'^2}/v_* = f(\log y^+)$  также подтверждают, что характеристики сдвигового течения не противоречат физическим представлениям о свойствах турбулентного пограничного слоя, формирующегося на плоской пластине в условиях безградиентного течения.

Характеристики течения в центральной плоскости симметрии пластины ( $z=0$ ) и на расстоянии  $z/b=0,25$  от нее отличаются друг от друга на величину, практически соизмеримую с погрешностью эксперимента, свидетельствуя, тем самым, о равномерности потока при изменении трансверсальной координаты  $z$ .

## 2.2. Процедура определения поверхностного трения

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, как отмечалось выше, существующие методы вызывают определенное сомнение в их надежности при проведении подобного рода экспериментов, особенно в условиях микровдува через пористую стенку. При использовании же термоанемометра основная проблема состоит в том, что при измерениях в вязком подслое проявляется охлаждающий эффект стенки на показания нагретой нити датчика, вследствие чего измеренная величина скорости оказывается выше ее истинного значения. К тому же, широкий диапазон параметров, используемых в исследованиях разных авторов, таких как геометрия датчика, термическая проводимость стенки, перегрев нити и другие затрудняют возможность использования имеющихся литературных данных для создания сколь угодно универсального подхода для корректировки скорости.

На рис. 3 представлен пример измеренного перед пористым образцом экспериментального профиля скорости в поперечном сечении, соответствующем числу Рейнольдса  $Re_x = 1,4 \cdot 10^6$ , в переменных закона стенки  $U^+ = f(\log y^+)$ :

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

где  $v_*$  — динамическая скорость, а  $\nu$  — коэффициент кинематической вязкости. Здесь для сравнения показан также профиль скорости  $U^+ = A \log y^+ + B$  (сплошная линия) с коэффициентами  $A=5,62$  и  $B=5,0$ , рекомендованными в качестве канони-

Рис. 3. Экспериментальный профиль скорости в переменных закона стенки при  $Re_x = 1,4 \cdot 10^6$ .

$U^+ = 5,62 \log_{y^+} + 5,0$  (1),  $y^+$  (2), настоящий эксперимент (3).

ческих материалами известной Стэнфордской конференции 1968 г. [15]. Как видно, экспериментальное распределение скорости в этой области не содержит ничего необычного и вполне соответствует классическому, что в первом приближении свидетельствует о том, что пористый образец находится в условиях

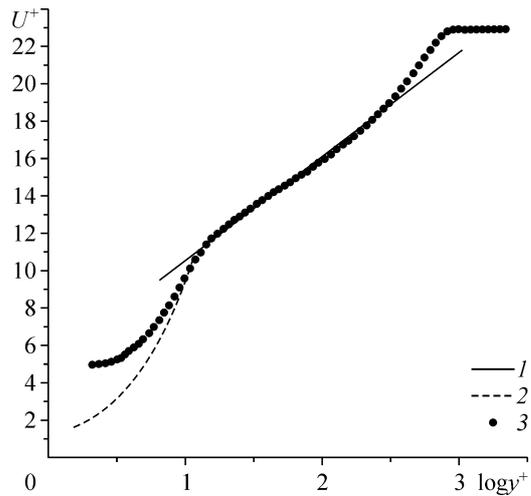
развитого турбулентного пограничного слоя. Однако распределение скорости в ламинарном подслое, где проявляется охлаждающий эффект стенки, не соответствует условию  $U^+ = y^+$  (2). Причем диапазон значений  $y^+$ , в котором имеет место отклонение от линейной зависимости  $U^+ = y^+$ , охватывает практически всю область вязкого подслоя. Таким образом, по существу, выпадает из рассмотрения значительная часть профиля скорости вблизи стенки, непригодная для оценки  $C_f$ , где необходима корректировка скорости. Конечно, диапазон значений  $y^+$  с нелинейным распределением скорости при использовании термоанемометра зависит от ряда факторов. В частности, как было установлено ранее (см. подборку работ в [9]), этот процесс в значительной степени определяется, например, материалом стенки. Это означает, что протяженность указанной области в направлении оси  $y$  по сути является индивидуальной.

Основная идея применявшейся здесь методики корректировки скорости основана на использовании так называемой интерполяционной таблицы (таблицы соответствия). Для получения интерполяционных данных использовались результаты калибровки датчика термоанемометра при нескольких скоростях потока, отличных от режимной скорости. Основное назначение отмеченной калибровки состоит в поиске соответствия между измеренным  $U_{изм}(y)$  и реальным  $U_{реал}(y)$  распределением средней скорости потока в пограничном слое. В простейшем случае для нахождения указанного соответствия необходимо выполнить измерения полных профилей скорости в каноническом течении, т. е. в сдвиговом турбулентном потоке, свойства которого хорошо известны. Таким каноническим течением может служить равновесный безградиентный турбулентный пограничный слой на плоской пластине, изготовленной из того же материала, что и исследуемая (тестовая) поверхность, например, пористая стенка.

Сущность процедуры состоит в следующем. Для каждой выбранной скорости внешнего потока  $U_\infty$  находились пристенные части профилей над калибровочной поверхностью  $U_{реал}(y)$  в тех же точках, что и  $U_{изм}(y)$ , с привлечением для этой цели классического метода Клаузера, базирующегося на логарифмическом законе распределения скоростей. Эти данные позволяют получить два вида зависимостей:

$$U_{реал} = f(U_{изм}, y) \text{ или } \Delta U = f(U_{изм}, y), \text{ где}$$

$$\Delta U = U_{реал}(U_{изм}, y) - U_{изм}(y)$$

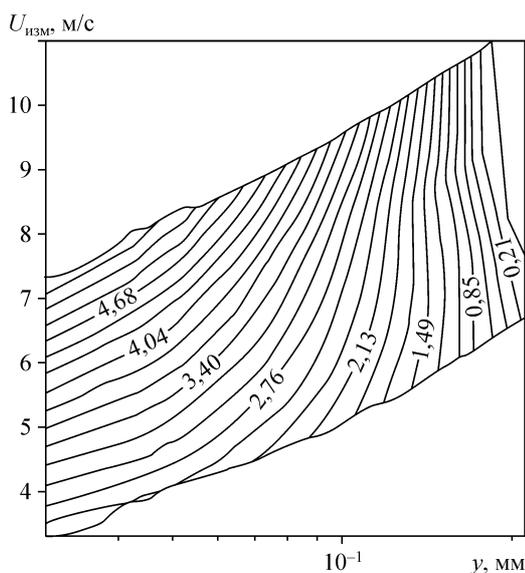


в узлах сетки ( $U_{\text{изм}}, y$ ). Любая из указанных выше дискретных зависимостей называется интерполяционной таблицей  $U_{\text{реал}} = f(U_{\text{изм}}, y)$  или  $\Delta U = f(U_{\text{изм}}, y)$ , используемой для последующей процедуры.

Типичный пример такой таблицы, полученной по пяти профилям скорости, приведен на рис. 4 в виде изолиний  $\Delta U$  в координатах  $U_{\text{изм}}$  и  $y$ . Измеряя теперь в реальном эксперименте локальную скорость  $U_{\text{изм}}(y)$  на некотором расстоянии  $y$  от стенки, такую, что ее значение оказывается внутри или на границе значений, задаваемых таблицей (см. рис. 4), можно найти скорость  $U_{\text{реал}}(y)$  путем интерполяции известных значений в соседних узлах. В данном случае использовался двумерный кубический сплайн.

Положительной стороной метода является то, что его можно применять для калибровки практически над любыми поверхностями, например, над криволинейными, а также проводить саму калибровку в любых (необязательно канонических) пристенных течениях при условии, что каким-либо способом найдена зависимость  $U_{\text{реал}}(y)$ . (Примером указанного подхода является выполненная в настоящей работе дополнительная калибровка над пористой поверхностью.) Причем точность метода существенно повышается, если точно известно расстояние от стенки до нити датчика или хотя бы, если соблюдается равенство этого расстояния при измерениях над калибровочной и тестовой поверхностью. Другим достоинством метода является тот факт, что трение можно определить не только на основе данных в логарифмической или линейной области, но и используя для этой цели распределение скорости по всей толщине пограничного слоя. Вся процедура определения  $C_f$  базируется на комплексе программ, отлаженных в рамках пакета MatLab, и практически не зависит от пользователя.

Следует отметить, что на представляемые в интерполяционной таблице данные может влиять дрейф показаний термоанемометра. Это известная проблема, которая носит общий характер практически для любых термоанемометрических измерений, когда имеет место загрязнение нити датчика или изменение температуры потока. Как и в обычных условиях, уменьшение ошибки, обусловленной указанными факторами, достигалось калибровкой датчика перед проведением основной серии измерений и после нее, а иногда и чаще. В нашей ситуации было замечено, что измерения трения, выполненные спустя 1-2 дня после проведения калибровки, могут внести дополнительную погрешность в измерении  $C_f$ , которая



достигает 5–6 %. Эта погрешность носит комплексный характер и включает ошибки, обусловленные не только загрязнением нити датчика и слабым изменением температуры потока, но и другими случайными погрешностями, происхождение которых иногда трудно установить (например, наводки из-за внешних помех). Учитывая это, измерения ежедневно начинались с проведения калибровки.

Рис. 4. Типичный пример интерполяционной таблицы, полученной по калибровочным данным, в виде изолиний  $\Delta U$  в координатах  $U_{\text{изм}}$  и  $y$ .

Основной отрицательной стороной метода является невозможность корректировки исходных данных (по крайней мере, в отдельных точках профиля) за пределами интерполяционной таблицы. Поэтому, если калибровочное и тестовое течения сильно различаются, возможно, потребуется более детальная калибровка, что, естественно, приводит к дополнительным временным и финансовым затратам.

### 2.3. Распределение трения

Пример указанного подхода продемонстрирован на рис. 5, *a–d*, на котором в координатах закона стенки  $u^+ = f(y)$  приведены скорректированные в пристенной части экспериментальные профили скорости (все кружки), полученные при выборочных значениях числа  $Re_x$ , а именно, перед пористым образцом ( $Re_x = 1,53 \cdot 10^6$ ), позади него ( $Re_x = 2,56 \cdot 10^6$ ) и непосредственно в пределах самого пористого образца ( $Re_x = 1,91 \cdot 10^6, 2,04 \cdot 10^6$ ). Распределение скорости в логарифмической части пограничного слоя и в области вязкого подслоя, характеризующееся известными классическими соотношениями, применяемыми для описания средней скорости в указанных областях, показано линиями 1, 2 (см. рис. 5, *a*). Видно, что измеренные профили скорости хорошо коррелируют с классическим не только в логарифмической области пограничного слоя (показаны кружками 3), но и в ламинарном подслое (также показаны кружками 4), где имеет место линейный характер распределения скорости  $U^+ = y^+$ . Это дает возможность находить локальное значение

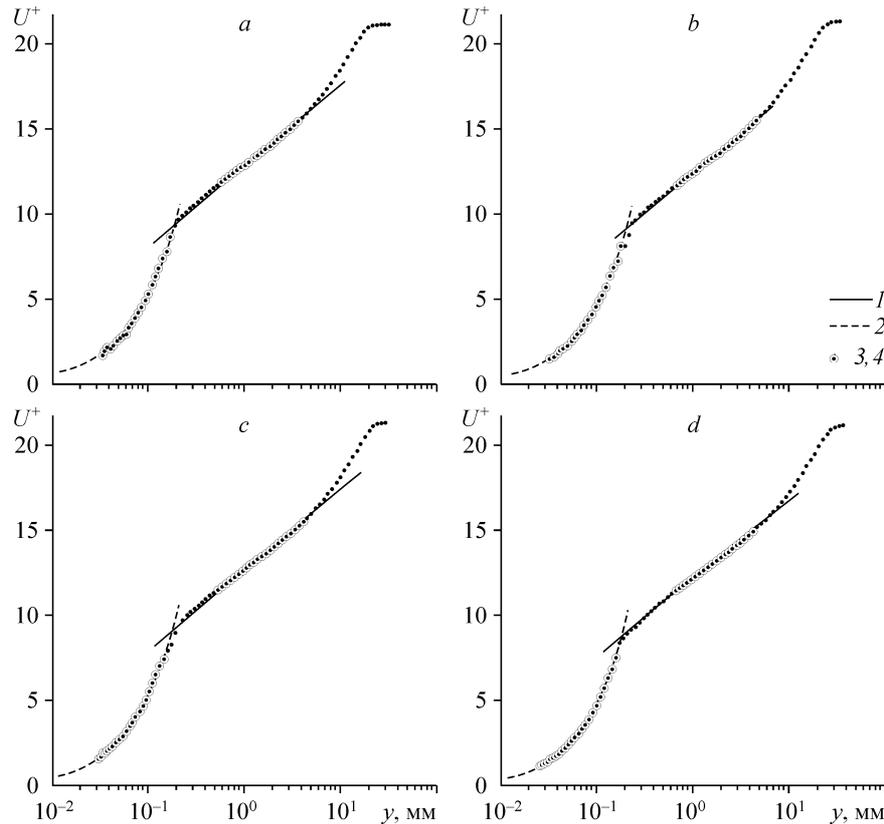


Рис. 5. Скорректированные в пристенной части экспериментальные профили скорости.  $Re_x \cdot 10^{-6}$ : 1,53 (*a*), где  $U^+ = 5,62 \log y^+ + 5,0$  (1),  $y^+$  (2),  $Re_x \cdot 10^{-6}$ : 1,91 (*b*), 2,04 (*c*), 2,56 (*d*), где логарифмическая часть профиля (1) и ламинарный подслой (2).

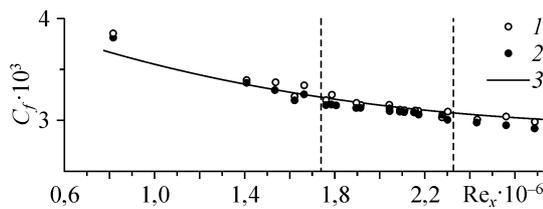


Рис. 6. Сравнительные данные об изменении коэффициента поверхностного трения в зависимости от числа Рейнольдса, полученные: из условия наилучшего соответствия экспериментального и классического профилей скорости в логарифмической части пограничного слоя (метод Клаузера) (1), по настоящей методике (2) и расчет по методике [16] (3).

коэффициента поверхностного трения  $C_f$ , используя как часть пограничного слоя, так и всю его толщину. Что касается ламинарного подслоя, то погрешность определения  $C_f$  можно уменьшить за счет увеличения количества экспериментальных значений скорости в этой области. В то же время, даже единичные, но тщательно выполненные измерения скорости в этой области способны обеспечить точность определения  $C_f$  на уровне порядка  $\pm 3\%$ . Это свидетельствует о том, что локальное значение коэффициента поверхностного трения можно определять с точностью, соизмеримой с той, которая достигается независимыми прямыми методами измерения этой величины. Применяя аналогичный подход для области течения с неканоническими свойствами, можно успешно учитывать охлаждающий эффект стенки, и в пределах указанной точности находить локальное значение коэффициента поверхностного трения  $C_f$  на пористом образце или ниже по потоку (см. рис. 5, *b-d*).

Найденные в линейной области значения касательного напряжения удовлетворительно согласуются с данными, полученными методом Клаузера, не только в области течения с известными свойствами, но и при обтекании пористой стенки, подтверждая тем самым, что использование такого подхода, позволяет определять  $C_f$  с приемлемой точностью. Действительно, подтверждением этому являются сравнительные данные об изменении коэффициента поверхностного трения по длине модели, приведенные на рис. 6 в виде зависимости  $C_f = f(Re_x)$ . Здесь передняя и задняя границы пористого образца показаны вертикальными штриховыми линиями.

Как видно, практически во всей исследуемой области результаты измерений двумя способами согласуются друг с другом в пределах погрешности, не превышающей  $\pm 3\%$ . Отметим также вполне удовлетворительное соответствие полученных экспериментальных данных с результатами расчета (линия), выполненного по методике [16], разработанной в рамках уравнений пограничного слоя. Максимальное расхождение также не превышает  $\pm 3\%$ . Исключение составляют результаты экспериментов при  $Re_x \leq 0,75 \cdot 10^6$ , вызванные тем, что пограничный слой, формирующийся вблизи передней кромки пластины, еще не находится в равновесном состоянии. И, наконец, особенно важным результатом является то, что местный коэффициент поверхностного трения при обтекании пористой стенки практически не отличается от соответствующих значений при обтекании гидравлически гладкой непроницаемой поверхности. Лишь в отдельных точках величина  $C_f$  в первом случае несколько выше, но, в целом, имеющаяся разница не превышает погрешности измерений.

#### ВЫВОДЫ

Проведена серия экспериментальных исследований несжимаемого сдвигового течения в условиях формирования на поверхности плоской пластины канонического и неканонического турбулентного пограничного слоя, и на основе точного измерения осредненных по времени данных с однопочечного датчика термоане-

мометра выполнен анализ течения вблизи стенки. Полученные результаты позволяют сделать следующие выводы:

– отлажена методика измерения локальных значений коэффициента поверхностного трения на обтекаемой поверхности при формировании на ней неканонического турбулентного пограничного слоя, которая может использоваться для определения трения на пористой, перфорированной или другой проницаемой поверхности. Указанная методика найдет применение при изучении эффективности различных способов воздействия на пограничный слой, где использование других методов затруднительно;

– сравниваемые локальные значения коэффициента поверхностного трения на пористом и гидравлически гладком непроницаемом образце обнаруживают несомненную близость друг другу. Это свидетельствует в пользу пористой поверхности исследуемой геометрии, которая, по-видимому, может быть с успехом использована для управления пограничным слоем.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Winter K.G.** An outline of the techniques available for the measurement of skin friction in turbulent boundary layers // *Prog. Aerospace Sci.* 1977. Vol. 18. P. 1–57.
2. **Fernholz H.H., Janke G., Schober M., Wagner P.M., Warnack D.** New developments and applications of skin-friction measuring techniques // *Meas. Sci. Technol.* 1996. Vol. 7. P. 1396–1409.
3. **Nitsche W., Haberland C., Thunker R.** Comparative investigations of friction drag measuring techniques in experimental aerodynamics // *Proc. 14th Cong. of the Inter. Council of the Aeronautical Sci.*, Sept. 9–14, 1984, Toulouse. 1984. P. 391–403.
4. **Корнилов В.И., Литвиненко Ю.А.** Измерения поверхностного трения в несжимаемом турбулентном пограничном слое. Ч. 1. Неблагоприятный градиент давления // *Теплофизика и аэромеханика.* 2001. Т. 8, № 4. С. 507–524.
5. **Корнилов В.И., Литвиненко Ю.А.** Измерения поверхностного трения в несжимаемом турбулентном пограничном слое. Ч. 2. Благоприятный градиент давления // *Теплофизика и аэромеханика.* 2002. Т. 9. С. 167–180.
6. **Корнилов В.И., Меклер Д.К., Павлов А.А.** К методике измерения поверхностного трения однолучевым лазерным интерферометром // *Тр. V школы “Методы аэрофизических исследований”*. Абакан, 7–16 июля 1989. Новосибирск. 1990. С. 144–151.
7. **Azad R.S., Burhanuddin S.** Measurements of some features of turbulence in wall proximity // *Exp. in Fluids.* 1983. Vol. 1. P. 149–160.
8. **Oka S., Kostic Z.** Influence of wall proximity on hot-wire velocity measurements // *DISA Information.* 1972. No. 13. P. 29–33.
9. **Hutchins N., Choi K.-S.** Accurate measurements of local skin friction coefficient using hot-wire anemometry // *Progress in Aerospace Sciences.* 2002. Vol. 38. P. 421–446.
10. **Polayakov A.F., Shindin S.A.** Peculiarities of hot-wire measurements of mean velocity and temperature in the wall vicinity // *Letter Heat Mass Transfer.* 1978. Vol. 5. P. 53–58.
11. **Бойко А.В., Корнилов В.И.** О возможности снижения турбулентного трения с помощью вертикальных элементов // *Теплофизика и аэромеханика.* 2009. Т. 16, № 4. С. 583–596.
12. **Durst F., Zanoun E.-S., Pashtrapanska M.** In situ calibration of hot wires to highly heat-conducting walls // *Exp. in Fluids.* 2001. Vol. 31. P. 103–110.
13. **Khoo B.C., Chew Y.T., Li G.L.** Time-resolved near-wall hot-wire measurements: use of laminar flow wall correction curve and near-wall calibration technique // *Meas. Sci. Technol.* 1996. Vol. 7. P. 564–575.
14. **Kendall A., Koochesfahani M.** A method for estimating wall friction in turbulent wall-bounded flows // *Exp. in Fluids.* 2008. Vol. 44. P. 773–780.
15. **Computation** of turbulent boundary layer // *Proc. Stanford Conf. AFOSR-IFP.* 1968. 1969. Stanford University. Vol. 2. 519 p.
16. **Spalding D.B.** A new analytical expression for the drag of a flat plate valid for both the turbulent and laminar regimes // *Inter. J. of Heat and Mass Transfer.* 1962. Vol. 5. P. 1133–1138.
17. **Nash J.F.** Turbulent boundary layer behaviour and the auxiliary equation // *NPL Aeron. Rep.* 1965. No. 1137.

*Статья поступила в редакцию 10 декабря 2009 г.*