

УДК 532.526.4 + 532.526.72

О возможности снижения турбулентного трения с помощью вертикальных устройств разрушения вихрей

А.В. Бойко, В.И. Корнилов

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

E-mail: kornilov@itam.nsc.ru

Экспериментально исследована возможность снижения турбулентного трения с помощью ориентированных по потоку вертикальных устройств разрушения вихрей, установленных в несжимаемом равновесном турбулентном пограничном слое нормально к поверхности плоской пластины при номинально безградиентном ее обтекании. Число Рейнольдса, вычисленное по толщине потери импульса пограничного слоя в сечении установки вертикальных устройств разрушения вихрей, составляло 1099. Показано, что элементы заданной геометрии являются эффективным средством модификации турбулентного пограничного слоя как с точки зрения выигрыша в сопротивлении трения, так и с точки зрения подавления поля турбулентных пульсаций скорости, и могут рассматриваться как один из важнейших факторов управления структурой пристенной турбулентности при обтекании плоских поверхностей.

Ключевые слова: снижение турбулентного трения, вертикальные элементы, несжимаемый турбулентный пограничный слой, плоская пластина.

ВВЕДЕНИЕ

Известно, что при полете современного дозвукового транспортного самолета пограничный слой, по крайней мере, на фюзеляже, находится в турбулентном состоянии. Это обусловлено целым рядом причин: высокими числами Рейнольдса $Re_L = (300-500) \cdot 10^6$, наличием углов наклона поверхности, формой и состоянием поверхности. В настоящее время считается общепринятым, что в таких условиях вряд ли удастся в ближайшем будущем разработать экономичный режим поддержания ламинарной формы течения. Это вынуждает исследователей изыскивать новые способы уменьшения аэродинамического сопротивления летательного аппарата и любого другого движущегося объекта, в частности, за счет разработки пассивных и активных методов управления структурой пристенной турбулентности.

Одним из пассивных методов являются устройства разрушения вихрей (УРВ, Large Eddy BreakUp Devices), которые относятся к классу так называемых внешних манипуляторов. Основное достоинство подобных методов управления (в отличие от тех способов, целью которых является ламинаризация течения) состоит в том, что их применение во многих случаях не требует активного вмешательства

ства, и они могут быть реализованы на уже существующих летательных аппаратах без принципиального изменения их конструкции. Как известно, сущность идеи применения УРВ состоит в использовании тонких пластин (либо других элементов), чаще всего горизонтальных, расположенных в турбулентном пограничном слое в направлении потока и предназначенных для разрушения больших вихревых (когерентных) структур, масштаб которых соизмерим с толщиной пограничного слоя. Классический перечень определяющих параметров для подобных устройств включает [1]: длину l устройства, высоту h его расположения в пограничном слое, толщину t , интервал s между сходными точками переднего и заднего элементов (схема *тандем*), зазор g между задней и передней кромками, толщину пограничного слоя δ_0 в месте расположения первого (или второго) по потоку элемента.

В ряде случаев продемонстрирована исключительно высокая эффективность таких устройств, использование которых позволяет уменьшить локальное значение трения до 10–30 % [2–5]. Что касается полного сопротивления, то в большинстве исследований отмеченный эффект редко превышает 7–8 % [6, 2], а в отдельных случаях никакого эффекта вообще не обнаружено [7, 8]. В работе [9] на основе прямого весового эксперимента на теле вращения выявлена область геометрических параметров УРВ, которые являются эффективными с точки зрения уменьшения полного сопротивления. В то же время обнаружено, что значительная часть исследованных УРВ обеспечивает проигрыш в полном сопротивлении.

Один из главных механизмов снижения трения, предложенный в свое время для объяснения причин снижения трения с помощью УРВ, состоит в том, что с помощью таких устройств прерывается процесс массообмена между различными слоями жидкости (за счет чего вносится основной вклад в осредненные по времени характеристики течения). Смысл данного объяснения вполне понятен. Действительно, фундаментальные свойства классического турбулентного пограничного слоя на пластине характеризуются формированием короткоживущих (во времени) видов движений (выбросов) жидкости: *sweep* — движение к стенке и *ejection* — движение от стенки [10]. Кроме того, существуют два более слабых движения, характеризующих процесс взаимодействия: внешнее при перемещении высокоскоростной жидкости наружу и внутреннее при перемещении низкоскоростной жидкости внутрь.

Однако не так давно была опубликована работа [11], которая является частью общей задачи, направленной на изучение эффективности массива миниатюрных генераторов вихрей для снижения турбулентного трения на плоской поверхности. В рамках этой задачи изучался отдельный класс генераторов вихрей, представляющих собой ориентированные по потоку элементы, смонтированные перпендикулярно стенке. Характерные размеры элементов в единицах закона стенки составляли: высота $h^+ = 200$ (около половины толщины пограничного слоя), хорда $c^+ = 100$ и расстояние между ними в трансверсальном направлении $\lambda^+ = 70$. Обнаружено, что с точки зрения снижения трения такие элементы (в дальнейшем вертикальные УРВ) являются существенно более эффективными в сравнении с обычными горизонтальными, хотя по свидетельству авторов и далеки от оптимальных. Ясно, что подобные элементы не могут прерывать процесс массообмена между внутренними и внешними слоями жидкости, по крайней мере, при движении последней от стенки и к стенке. Если это так, то можно поставить под сомнение факт основополагающего влияния фундаментального механизма *sweep/ejection* на процесс массообмена, по крайней мере, в классическом турбулентном сдвиговом течении. Естественно, что все это требует дополнительных экспериментальных исследований с тем, чтобы подтвердить или опровергнуть приведенные в [11] результаты.

Основной целью настоящей работы является изучение возможности снижения турбулентного трения на плоской пластине при помощи вертикальных УРВ, установленных нормально к поверхности, и анализ эффективности таких устройств в сравнении с традиционными. При этом особое внимание уделяется, по возможности, точному моделированию физических и геометрических параметров УРВ, обеспечивших наибольшую эффективность в работе [11]. По нашему мнению, подобные исследования могут быть также чрезвычайно полезными для дальнейшего совершенствования пассивных методов управления структурой пристенной турбулентности.

1. УСЛОВИЯ И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Опыты проводились в дозвуковой малотурбулентной аэродинамической трубе Т-324 ИТПМ СО РАН при скорости невозмущенного потока в контрольном сечении $U_\infty = 5$ м/с, что соответствовало числу Рейнольдса на характерный размер 1 м — $Re_1 \approx 0,307 \cdot 10^6 \text{ м}^{-1}$. Число Рейнольдса Re^{**} , вычисленное по толщине потери импульса δ^{**} в сечении расположения вертикальных элементов, составляло 1099 ± 15 .

Измерения выполнялись на модели плоской пластины из сплава Д16Т с размерами 2500×993 мм² в плане и толщиной 6 мм, установленной вертикально в рабочей части трубы на 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 $r = 0,4$ мм. На оси симметрии пластины выполнено 15 приемников статического давления диаметром 0,4 мм. Задняя часть модели оборудована регулируемым хвостовым закрылком с хордой 100 мм, установленным по всей высоте 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.

Фрагмент поверхности пластины с размещенными на ней вертикальными устройствами разрушения вихрей и системой осей координат представлен на рис. 1. Характерные размеры элементов в единицах закона стенки составляют: высота $h^+ = 194$ ($h = 13,5$ мм) (около половины толщины пограничного слоя), хорда $c^+ = 99$ ($c = 6,8$ мм) и расстояние между ними в трансверсальном направлении $\lambda^+ = 69$

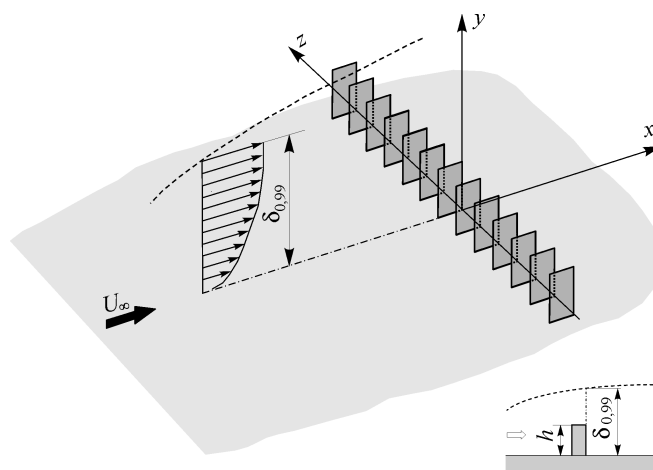


Рис. 1. Фрагмент поверхности модели с размещенными на ней вертикальными УРВ и системой осей координат.

($\lambda = 4,8$ мм) и, как видно, незначительно отличаются от размеров УРВ, используемых в [11].

С целью обеспечения развитого турбулентного течения на большей части модели пограничный слой искусственно турбулирован путем установки в области максимального изменения давления (окрестность передней кромки) проволочного турбулизатора диаметром 3 мм (42,8 в единицах закона стенки $d^+ = dv_* / \nu$), позади которого наклеена полоса крупнозернистой наждачной бумаги (со сглаженными уступами) длиной 40 мм и высотой 1,0 мм. Основное назначение второго элемента турбулизирующего устройства — по возможности уменьшить двумерный характер возмущений, которые могут преобладать позади проволочного турбулизатора, а также повысить эффективность последнего в условиях обтекания пластины потоком малой скорости.

Скоростной напор набегающего потока q_∞ контролировался по перепаду между полным и статическим давлением, измеряемому с помощью трубки Пито–Прандтля, установленной в невозмущенном потоке, и регистрируемому измерителем давления Low Pressure Transducer (Model DX2650). Им же осуществлялся замер барометрического давления. В комплексе с измерениями температуры воздуха, выполняемыми с помощью системы сбора данных и коммутации HP Agilent 34970 A Data Acquisition/Switch Unit, это позволяло определять для каждого эксперимента значение скорости потока и числа Рейнольдса с учетом изменения в рабочей части статического давления, плотности и вязкости воздуха.

Все эксперименты выполнены с помощью управляемого компьютером автоматизированного комплекса пространственно-временной термоанемометрической визуализации полей средней и пульсационной составляющих скорости на базе координатника с тремя степенями свободы, установленного на боковой стенке рабочей части трубы, который после выборки люфта обеспечивал точность перемещения по координатам x, y, z не хуже, чем ± 2 мкм.

Мгновенная скорость U в исследуемой точке поля сдвигового потока измерялась с помощью комплекта термоанемометрической аппаратуры 55M фирмы DANTEC (Дания). Сбор информации осуществлялся следующим образом. Сигнал с выхода термоанемометрического моста 55M01 подавался на многоканальный высокочастотный 16-ти разрядный модуль фирмы National Instruments (США), предназначенный для преобразования входных аналоговых сигналов в цифровую форму, и с его выхода — в персональный компьютер. Сбор информации в каждой измеряемой точке осуществлялся в течение 8 с с частотой 10 кГц. Постоянная составляющая сигнала, соответствующая средней скорости в пограничном слое, параллельно контролировалась вольтметром постоянного тока 55D31. Визуальный контроль характера турбулентного сигнала производился с помощью осциллографа С1–73. В качестве первичного преобразователя использовался миниатюрный датчик 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. Начальное положение нити датчика определялось с помощью измерительного микроскопа по ее отражению от поверхности. Оцениваемая погрешность такой процедуры составляет ± 2 мкм.

Местный коэффициент поверхностного трения C_f в исходном (немодифицированном) сдвиговом течении определялся из условия наилучшего согласия в логарифмической области пограничного слоя (область существования закона стенки), экспериментально измеренного профиля скорости и классического профиля скорости $U^+ = A \log y^+ + B$ с известными коэффициентами A и B . Пример такого подхода продемонстрирован на рис. 2, на котором в полулогарифмических

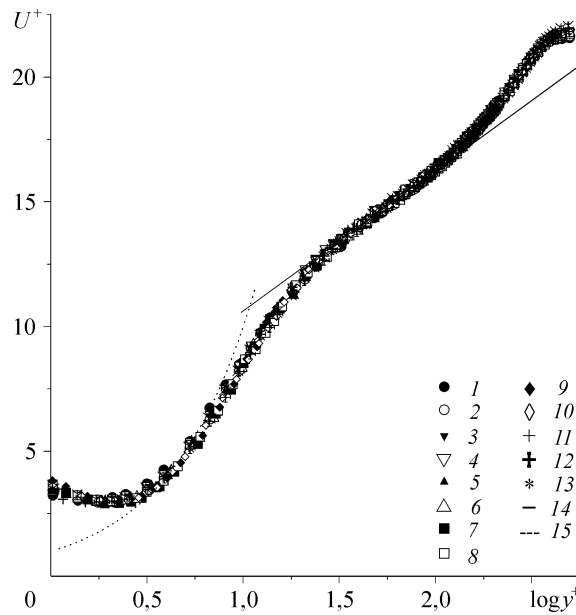


Рис. 2. Экспериментальные профили скорости в переменных закона стенки (исходное течение).

$x/\delta = -2,564$ (1), 0,073 (2), 0,183 (3), 0,366 (4), 0,733 (5), 1,282 (6), 1,832 (7), 2,381 (8), 2,930 (9), 3,663 (10), 4,762 (11), 6,044 (12), 7,326 (13).

координатах представлены экспериментальные профили скорости в пограничном слое в переменных закона стенки $U^+ = f(\log y^+)$:

$$U^+ = U / v_*, \quad y^+ = yv_* / \nu \quad (1)$$

в 13 поперечных сечениях по длине пластины. (Здесь и далее продольная координата x нормируется на величину δ_0 в сечении расположения вертикальных УРВ. Индекс 0 при величине δ в дальнейшем для простоты опущен.) 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 канонических материалами известной Стэнфордской конференции 1968 г. [12], и профиль скорости в ламинарном подслое (пунктирная линия), удовлетворяющий условию $U^+ = y^+$.

Видно, что экспериментальное распределение скорости в пограничном слое не содержит ничего необычного и свидетельствует о справедливости в таком течении закона стенки, откуда легко определяется динамическая скорость, а из нее C_f .

В модифицированном пограничном слое указанный подход для определения C_f не является приемлемым, поскольку область существования закона стенки заметно искажена воздействием вертикальных элементов. В этом случае местный коэффициент поверхностного трения определялся по градиенту скорости вблизи стенки $(\partial U / \partial y)_{y=0}$. Однако при использовании датчика термоанемометра данный метод дает дополнительные погрешности, обусловленные влиянием близости стенки. Проблема, как известно, состоит в том, что при измерениях в вязком подслое проявляется охлаждающий эффект нагретой нити термоанемометра от стенки, вследствие чего измеренная величина скорости оказывается выше ее истинного значения (см., например, [13–15]). В целом по данным разных работ область влияния стенки распространяется до расстояний y^+ порядка 6, и это влияние

на локальную скорость потока может быть весьма существенным, особенно в тех случаях, когда стенка теплопроводна. Это подтверждают наши данные, приведенные на рис. 3 в координатах закона стенки, ограниченные областью течения вблизи поверхности ($y^+ < 14$). Здесь, кроме основной калибровки датчика термоанемометра (во внешнем потоке), выполнялась также тщательная его калибровка вблизи стенки в зависимости от поперечной координаты y как при отсутствии скорости потока ($U_\infty = 0$), так и при различных ее значениях. Для сравнения показаны также результаты измерений [15], полученные при обтекании стенки, выполненной из аналогичного материала. Прямая линия характеризует линейную зависимость $U^+ = y^+$, полученную из условия наилучшего согласования с измеренными экспериментальными данными (метод наименьших квадратов). Пересечение этой линии с осью абсцисс не проходит строго через ноль, что связано, очевидно, с некоторой погрешностью определения начального положения датчика вблизи стенки. Координата y^+ , при которой начинается отклонение от линейной зависимости, может рассматриваться как начало области влияния стенки. В нашем случае эта величина приблизительно равна 3,9. Предельное значение y^+ , при котором еще существует линейная зависимость, составляет величину порядка 5,9. Таким образом в диапазоне $3,9 \leq y^+ \leq 5,9$ можно быть уверенным, что в нашем случае реализуется линейная зависимость $U^+ = y^+$. Данный факт использовался в дальнейшем для определения местного коэффициента поверхностного трения C_f , суть которого состояла в том, что, располагая тремя-четырьмя точками в линейной части профиля, можно с приемлемой точностью определять истинные значения C_f . Конечно, всегда остается вопрос о том, имеется ли в исследуемом течении линейная область или ее нет. Правда, в работе [16] утверждается, что вязкий подслои вблизи обтекаемой поверхности существует всегда, и распределение скорости в этой области имеет линейный характер.

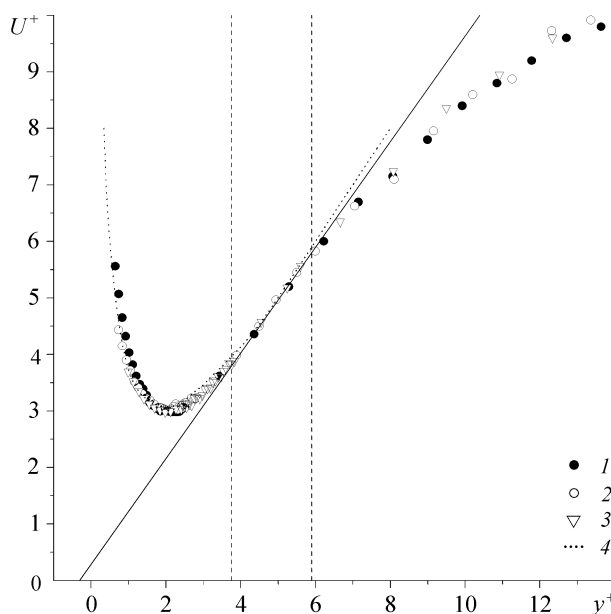


Рис. 3. Экспериментальные профили скорости в переменных закона стенки вблизи поверхности (исходное течение).

$U_\infty = 2,95$ м/с (1), 3,5 м/с (2), 5,0 м/с (3), данные [15] (4).

Пример указанного подхода продемонстрирован в разделе 3А, откуда следует, что найденные таким образом значения касательного напряжения удовлетворительно согласуются с данными, полученными другим способом, подтверждая тем самым, что использование величины $(\partial U / \partial y)_{y=0}$ позволяет определять C_f с приемлемой точностью. В частности, обработка пристенной части экспериментального профиля с применением различного вида аппроксимаций дает возможность утверждать, что в модифицированном пограничном слое величина C_f определена с точностью не хуже, чем 10 %.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Характеристики исходного течения

Для понимания характера исходного (немодифицированного) течения выполнен достаточно подробный анализ профилей средней скорости в пограничном слое, мгновенных значений ее продольных пульсаций, а также поверхностного трения в 13 поперечных сечениях по длине модели. Он показывает, что характеристики исходного сдвигового потока полностью соответствуют физическим представлениям о свойствах турбулентного пограничного слоя, формирующегося на пластине при номинально безградиентном ее обтекании.

В качестве примера на рис. 4 приведена зависимость $\delta^{**} = f(x/\delta)$, характеризующая изменение толщины потери импульса δ^{**} по длине рабочей области исследований, где координата x отсчитывается от задней кромки УРВ. Отклонения экспериментальных значений δ^{**} (1) от расчетных результатов (2), вычисленных по программе, отлаженной авторами в рамках методики, разработанной в [17], не превышает $\pm 1,5$ %.

Другим примером являются сравнительные данные об изменении коэффициента поверхностного трения C_f по длине модели, приведенные на рис. 5 в виде зависимости $C_f = f(x/\delta)$. Здесь значения C_f получены двумя способами: из условия наилучшего соответствия экспериментального и классического профилей скорости в логарифмической части пограничного слоя (темные кружки) и по градиенту скорости вблизи стенки (светлые кружки). Можно отметить вполне удовлетворительное соответствие полученных экспериментальных данных как между собой, так и с результатами расчета (штриховая линия) по методике из работы [17]. Обе группы данных находятся в пределах погрешности, не превышающей 3 % (вертикальная черта). Ясно, что отмеченное расхождение вполне допустимо для такой характеристики как C_f .

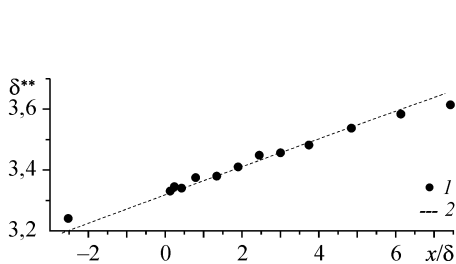


Рис. 4. Изменение толщины потери импульса δ^{**} по длине исследуемой области в исходном пограничном слое.

Эксперимент (1) и расчет по методике [17] (2).

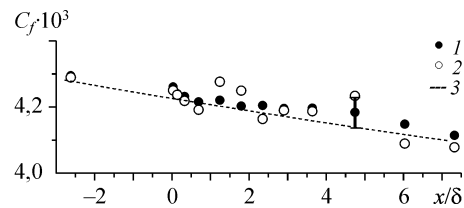


Рис. 5. Сравнительные данные об изменении коэффициента поверхностного трения по длине модели (исходное течение): из условия наилучшего соответствия экспериментального и классического профилей скорости в логарифмической части пограничного слоя (1), по градиенту скорости вблизи стенки (2) и расчет по методике [17] (3).

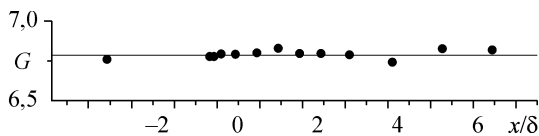


Рис. 6. Параметр неравновесности Клаузера в исходном пограничном слое.

Параметр неравновесности Клаузера

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

сохраняет практически постоянное значение по длине рабочей области (рис. 6), что свидетельствует о формировании равновесного турбулентного течения, начиная с первого измерительного сечения. Отклонение полученных значений G от эмпирической кривой из работы [18], характеризующей равновесное состояние в безградиентном турбулентном течении на плоской пластине, составляет не более 4 %.

Профили турбулентных пульсаций скорости также подтверждают, что характеристики исходного течения не противоречат физическим представлениям о свойствах турбулентного пограничного слоя, формирующегося на плоской пластине в условиях безградиентного течения. Представление полученных результатов в переменных закона стенки $\sqrt{u'^2}/v_* = f(\log y^+)$ обнаруживает разумную (в пределах погрешности эксперимента) автомодельность свойств течения по длине исследуемой области даже во внешней области пограничного слоя, что объясняется, по-видимому, тем, что диапазон чисел Re_x относительно невелик.

Характеристики модифицированного течения

Свойства модифицированного течения можно наиболее наглядно видеть на примере распределений средней скорости U/U_e и продольной компоненты пульсаций скорости $\sqrt{u'^2}/U_e$ в сравнении с аналогичными характеристиками для исходного течения. На рис. 7 приведено распределение средней скорости в трансверсальном направлении $U/U_e = f(z/\delta)$ в сечении $x = 0,183\delta$ ($x^+ = 71,3$) при выборочных значениях поперечной координаты y^+ . Горизонтальными линиями показаны соответствующие значения U/U_e в исходном течении. Положение двух соседних вертикальных элементов изображено вертикальными отрезками на оси абсцисс.

Естественно, что из-за потери кинетической энергии средним течением на преодоление локального сопротивления, вызванного элементом, непосредственно позади него ($z/\delta = 0,077$ и $0,254$), поток затормаживается, вследствие чего в этой области имеет место отчетливо выраженный дефект скорости. Напротив, между элементами поток разгоняется, из-за чего позади этой области формируется течение с более высокой скоростью. Характерно, что указанное превышение скорости уменьшается при увеличении координаты y^+ . Это обусловлено, очевидно, тем, что потеря кинетической энергии на преодоление локального сопротивления при приближении к вершине элемента уменьшается. Аналогичный эффект наблюдается по мере увеличения продольной координаты x (не показано), где дефект скорости формируется даже в области течения между элементами. При этом распределение скорости в трансверсальном направлении в значительной степени выравнивается. В целом, динамика процесса такова, что при увеличении продольной координаты x распределение средней поперек модифицированного пограничного слоя плавно релаксирует к распределениям, свойственным равновесному состоянию.

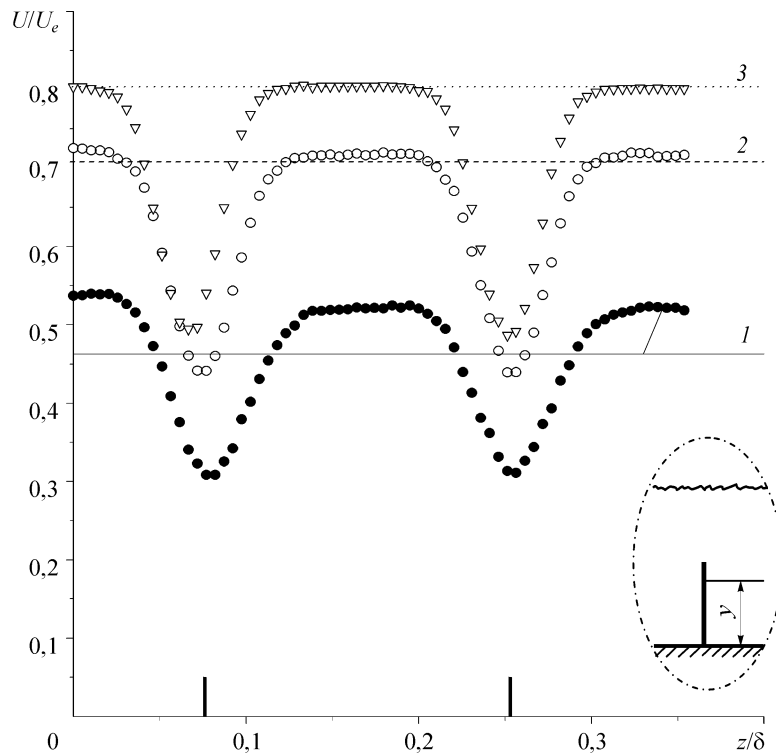


Рис. 7. Распределение средней скорости в трансверсальном направлении в сечении $x^+ = 71,3$.
 $y^+ = 14,3$ (1), $71,3$ (2), $142,6$ (3), линии относятся к немодифицированному течению.

Характерной особенностью распределения интегральной по спектру средне-квадратичной пульсации скорости $\sqrt{u'^2}/U_e = f(z/\delta)$ является тот факт, что уровень турбулентных пульсаций понижается в сравнении с исходным течением не только непосредственно позади элементов ($z/\delta = 0,077$ и $0,254$), но и в области течения между ними (рис. 8). Причем, подобная ситуация наблюдается и при движении вниз по потоку вплоть до последнего измерительного сечения. Исключение составляет узкая область, формирующаяся непосредственно позади вертикального элемента (преимущественно при обтекании его вершины), где уровень пульсаций при равных значениях координаты y повышается в сравнении с исходным состоянием. Можно предположить, что в этом случае с конца элемента срывается вихрь. Данный факт наиболее наглядно виден на примере рассмотрения изоповерхности $(u'_m - u'_0)/U_e = \text{const}$ (рис. 9), характеризующей изменение модифицированного поля турбулентности в сравнении с исходным, где показаны уменьшение турбулентных пульсаций скорости на величину $0,0187$ и рост на ту же величину. (Здесь оси координат масштабированы по толщине немодифицированного пограничного слоя в сечении расположения устройства разрушения вихрей).

Обращает на себя внимание, что течение имеет явно трехмерный характер, сопровождающийся процессом усиления турбулентности позади вершины элементов и ее ослаблением по мере приближения к поверхности. Причем пониженный уровень турбулентности в окрестности стенки распространяется и на область течения, расположенную ниже по потоку вплоть до последнего измерительного сечения. Представляется, что единственным механизмом, обуславливающим этот процесс, являются вторичные течения, формирующиеся в областях сопряжений

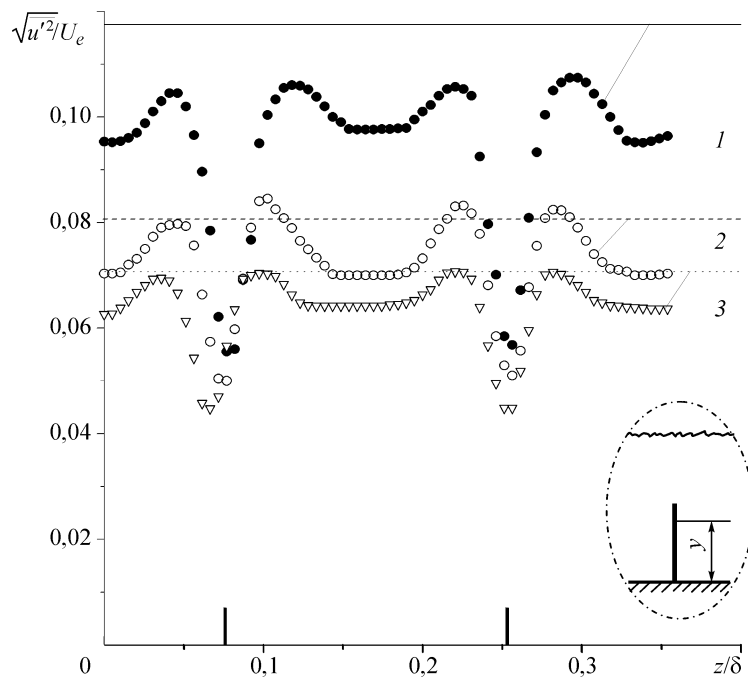


Рис. 8. Распределение интегральной по спектру интенсивности пульсаций скорости в трансверсальном направлении в сечении $x^+ = 71,3$. $y^+ = 14,3$ (1); 71,3 (2); 142,6 (3), линии относятся к немодифицированному течению.

элементов с плоской стенкой [19], которые осуществляют перенос масс газа из внешней области, характеризующейся пониженным уровнем турбулентности, к внутренним слоям, тем самым уменьшая здесь уровень пульсаций.

Сравнение спектров пульсаций в модифицированном (рис. 10, *b*) и исходном (рис. 10, *a*) течениях ясно указывает на снижение энергии пульсаций непосредственно позади элементов ($z/\delta = 0,077$ и $0,254$), которое в начальной части спектра (область низких частот) достигает нескольких раз. В модифицированном течении

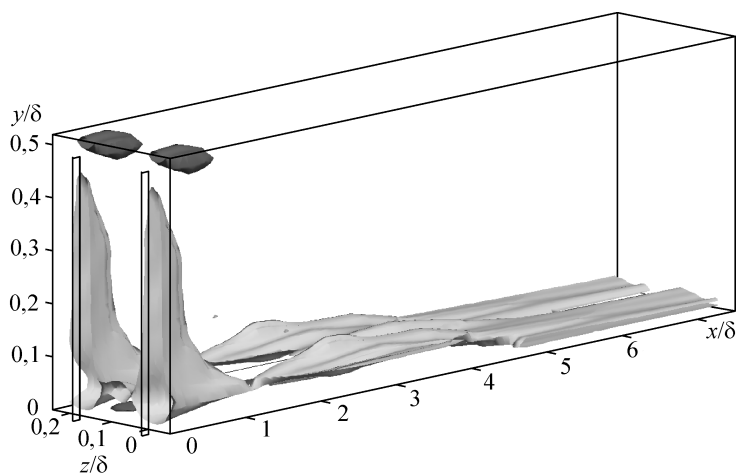


Рис. 9. Изоповерхность $(u'_m - u'_0)/U_e = \text{const}$. Светлые области — уменьшение турбулентных пульсаций скорости на величину 0,0187, темные — рост на ту же величину.

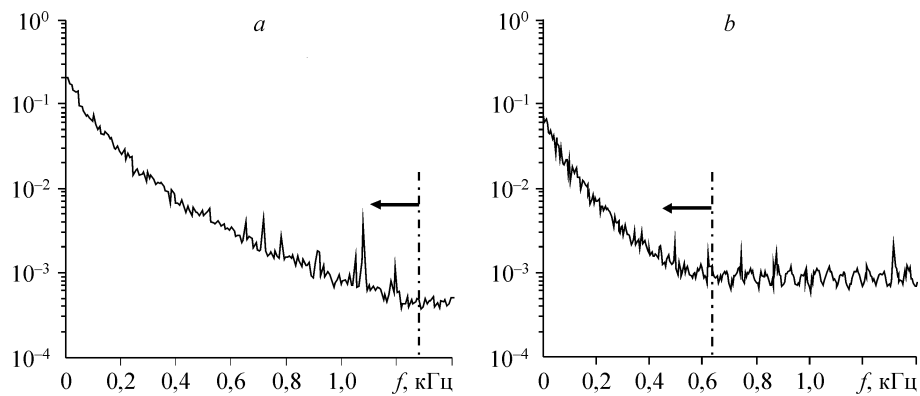


Рис. 10. Сравнение спектров пульсаций в немодифицированном (а) и модифицированном (b) течениях.

полоса частот примерно в два раза уже, чем в исходном. В области течения между элементами существенной разницы в спектрах в сравнении с исходным течением не обнаружено.

Таким образом, влияние вертикальных УРВ на поле турбулентных пульсаций скорости весьма существенно и, по-видимому, может рассматриваться как один из важнейших факторов управления структурой пристенной турбулентности на плоской поверхности. При этом эффективность управления может быть повышена путем дальнейшей оптимизации исследованных элементов, в частности, за счет изменения геометрии вершины таких элементов.

Одной из основных определяющих величин при оценке эффективности используемых УРВ, как средства модификации турбулентного течения, является местный коэффициент поверхностного трения C_f . Целостная картина распределения этой величины вниз по потоку от вертикальных УРВ представлена на рис. 11 в виде зависимости $C_f = f(x/\delta, z/\delta)$ (1) в исследуемой области значений x/δ и z/δ . Здесь для наглядности показана также зависимость $C_{f0} = f(x/\delta, z/\delta)$ для исходного течения (2). Обращает на себя внимание явно неравномерный характер распределения C_f как в трансверсальном, так и в продольном направлениях. Непосредственно

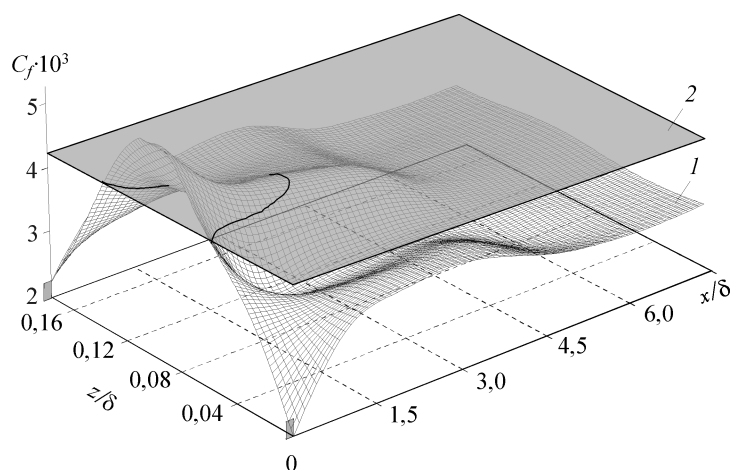


Рис. 11. Распределение местного коэффициента поверхностного трения в исследуемой области значений x/δ и z/δ .

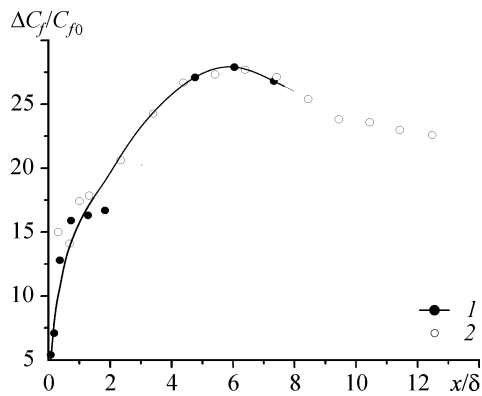


Рис. 12. Изменение коэффициента поверхностного трения (в процентах), нормализованное по соответствующим значениям в исходном течении.

Настоящий эксперимент (1), данные [11] (2).

позади вертикальных УРВ ($z/\delta = 0$ и $0,177$) имеет место существенное уменьшение трения, тогда как в окрестности плоскости симметрии ($z/\delta = 0,089$) наблюдается возрастание этой величины. Однако по мере удаления вниз по потоку уменьшение коэффициента

трения по сравнению с исходным течением начинает проявляться во всем диапазоне значений z . Можно обратить также внимание на слабый волнообразный характер распределения C_f в трансверсальном направлении, что наводит на мысль о формировании в области, расположенной между элементами, вторичных течений, о которых упоминалось выше.

На рис. 12 в виде зависимости $\Delta C_f/C_{f0} = f(x/\delta)$ представлены данные об изменении коэффициента поверхностного трения, характеризующие выигрыш (в процентах) C_f в сравнении с соответствующими значениями в исходном течении. Здесь $\Delta C_f = (C_{fm} - C_{f0})$, где индексы m и 0 относятся соответственно к модифицированному и исходному пограничным слоям. Значения C_{fm} для каждого сечения x получены как результат интегрирования распределения этой величины в трансверсальном направлении. Для сравнения показаны также результаты измерений, заимствованные из [11]. Хотя наши данные получены в ограниченном диапазоне значений x/δ , тем не менее, в целом результаты двух групп экспериментов находятся в удовлетворительном соответствии. Максимальный выигрыш в локальном трении составляет порядка 27–28 %. В принципе это подтверждает факт, отмеченный в [11], о том, что вертикальные УРВ являются более эффективными в сравнении с элементом, расположенным параллельно поверхности. Действительно, в известной нам литературе столь высокий эффект не обнаружен ни в одной работе. Надо, однако, иметь в виду, что суммарная омываемая поверхность вертикальных УРВ в случае, когда их высота превышает расстояние между ними, больше в сравнении с одиночным параллельным поверхности элементом. Поэтому, если принять во внимание собственное сопротивление УРВ, такие устройства могут оказаться не столь эффективными. Этот вопрос требует дополнительных исследований.

Результаты исследований дают также основание для следующего соображения. Ясно, что вертикальные УРВ могут быть эффективными главным образом в том случае, когда преимущественное значение имеет процесс развития вихрей в трансверсальном направлении. Учитывая полученные результаты, это означает, что фундаментальный механизм sweep/ejection в классическом турбулентном сдвиговом течении, по-видимому, вовсе не обязательно должен быть ключевым, в том смысле, что в таком течении преобладающее значение могут иметь не движения жидкости от стенки и к ней, а массообмен в трансверсальном направлении.

ВЫВОДЫ

Выполнена серия экспериментальных исследований, направленных на изучение возможности снижения турбулентного трения с помощью вертикальных УРВ, установленных в несжимаемом равновесном турбулентном пограничном слое нормально к поверхности плоской пластины при номинально безградиентном ее обтекании. Полученные данные позволяют сделать следующие выводы:

– вертикальные УРВ заданной геометрии являются достаточно эффективным средством модификации турбулентного пограничного слоя, обеспечивая выигрыш в сопротивлении трения в сравнении с аналогичной величиной для немодифицированного течения. Начиная с расстояния от УРВ, составляющего десятые доли толщины пограничного слоя δ и далее вниз по течению вплоть до $(7-8)\delta$, наблюдается устойчивое снижение сопротивления трения, максимальная величина которого достигает 27–28 % при $x/\delta \approx 6$,

– влияние вертикальных УРВ с точки зрения подавления поля турбулентных пульсаций скорости существенно. Это дает основание для осторожного вывода о том, что подобные УРВ, по-видимому, могут рассматриваться как один из важнейших факторов управления структурой пристенной турбулентности при обтекании плоских поверхностей,

– результаты экспериментов указывают на возможность дальнейшей оптимизации вертикальных УРВ, в частности, за счет изменения геометрии верхней части устройств, что может обеспечить дополнительный эффект снижения турбулентных пульсаций скорости и сопротивления трения,

– окончательный вывод об эффективности таких устройств и об ожидаемой тенденции при возрастании скорости потока может быть сделан лишь на базе методики, учитывающей собственное сопротивление вертикальных УРВ. 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 // Paper Reprinted from AGARD Report 786. Pt 1 and 2. 1992. P. 8–1 – 8–80.
2. Guezennec Y.G., Nagib H.M. Mechanisms leading to net drag reduction in manipulated turbulent boundary layers // AIAA J. 1990. Vol. 28, No. 2. P. 245–252.
3. Plesniak M.W., Nagib H.M. Net drag reduction in turbulent boundary layers resulting from optimized manipulation // AIAA Paper. 1985. No. 0518. 11 p.
4. Savill A.M., Mumford J.C. Manipulation of turbulent boundary layers by outer-layer devices: skin-friction and flow-visualization results // J. Fluids. Mech. 1988. Vol. 191. P. 389–418.
5. Кузнецов В.К., Левицкий В.Н., Репик Е.У. и др. Исследование механизма снижения турбулентного поверхностного трения с помощью разрушителей вихревых структур // Изв. РАН. МЖГ. 1996. № 5. С. 80–89.
6. Wark C.E., Naguib A.M., Nagib H.M. Effect of plate manipulators on coherent structures in a turbulent boundary layer // AIAA J. 1990. Vol. 28, No. 11. P. 1877–1884.
7. Sahlin A., Alfredsson P.H., Johansson A.V. Direct drag measurement for a flat plate with passive boundary layer manipulators // J. Phys. Fluids. 1986. Vol. 29, No. 3. P. 696–700.
8. Bertelrud A., Truong T.V., Avellan F. Drag reduction in turbulent boundary layers using ribbons // AIAA 9th Atmospheric Flight Mechanics Conf.: Proc. San Diego, 1982. No. 82–1370.
9. Корнилов В.И. Прямые измерения сопротивления тела вращения в несжимаемом потоке в условиях воздействия устройств разрушения вихрей // Теплофизика и аэромеханика. 2006. Т. 13, № 4. С. 541–550.
10. Wallace J.M.H., Eckelmann H., Brodkey R.S. The wall region in turbulent shear flow // J. Fluids Mech. 1972. Vol. 54. P. 39–48.

11. **Hutchins N., Choi K.-S.** The use of sub-boundary layer flow-aligned vertical elements to achieve turbulent skin friction reduction // Proc. of the 12th European Drag Reduction Meeting, Denmark 2002.
12. **Computation of Turbulent Boundary Layer** // Proc. Stanford Conf. AFOSR — IFP, 1968–1969. Stanford University. Vol. 2. 519 p.
13. **Oka S., Kostic Z.** Influence of wall proximity on hot-wire velocity measurements // DISA Information. 1972. No. 13. P. 29–33.
14. **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.
15. **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.
16. **Azad R.S., Burhanuddin S.** Measurements of some features of turbulence in wall proximity // Exp. Fluids. 1983. Vol. 1. P. 149–160.
17. **Cebeci T.** An engineering approach to the calculation of aerodynamic flows. Berlin: Springer-Verlag, 1999. 470 p.
18. **Nash J.F.** A note on skin-friction laws for the incompressible turbulent boundary layer // Aeronautical Research Council. C.P. 1966. No. 862.
19. **Корнилов В.И.** Пространственные пристенные турбулентные течения в угловых конфигурациях. — Новосибирск, Изд-во "Наука", 2000. 400 с.

Статья поступила в редакцию 29 сентября 2008 г.