

УДК 532.526.4 + 532.5.013

Влияние вертикальных устройств разрушения вихрей на аэродинамическое сопротивление плоской пластины

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 полного аэродинамического сопротивления плоской пластины с помощью ориентированных по потоку вертикальных элементов, установленных в несжимаемом равновесном турбулентном пограничном слое нормально к обтекаемой поверхности. Число Рейнольдса, вычисленное по толщине потери импульса пограничного слоя в сечении установки вертикальных элементов, составляло 820. Показано, что в большей части исследованного диапазона чисел Рейнольдса Re_x вертикальные УРВ заданной геометрии не обеспечивают снижения аэродинамического сопротивления плоской пластины. Лишь при очень низких значениях Re_x достигается некоторый выигрыш в полном сопротивлении в сравнении с аналогичной величиной для немодифицированного течения.

Ключевые слова: аэродинамическое сопротивление, поверхностное трение, плоская пластина, вертикальные элементы, тензометрические весы, плавающий элемент.

ВВЕДЕНИЕ

Поиск эффективных путей и методов управления структурой пристенного турбулентного течения на обтекаемых конфигурациях продолжает оставаться одним из важнейших направлений прикладной аэрогидродинамики. Во многих случаях основной составляющей полного сопротивления в общем балансе сопротивлений является составляющая трения, которая, например, для магистрального пассажирского самолета в диапазоне околосвуковых скоростей достигает 50 % [1]. Для подводных лодок и торпед вклад этой величины возрастает до 65–70 %. Отсюда ясно, что уменьшение сопротивления трения летательного аппарата и других движущихся тел представляет собой крупный резерв экономии энергоресурсов. Заметим, кстати, что авиационная корпорация Airbus (EADS) ставит своей целью к 2020 году снизить расход топлива на пассажирокилометр не менее чем на 50 %. Для достижения указанной цели они намерены добиться уменьшения составляющей поверхностного трения на величину порядка 30–50 % в общем балансе сопротивления.

Настоящая работа является логическим завершением начатых в [2] экспериментальных исследований, направленных на изучение возможности снижения сопротивления трения плоской пластины путем использования неподвижных

вертикальных элементов (ВЭ), установленных нормально к обтекаемой поверхности и представляющих собой пассивный способ управления турбулентным пограничным слоем на указанной поверхности.

Напомним, что одним из широко известных пассивных методов управления являются устройства разрушения вихрей (УРВ, Large Eddy BreakUp Devices), которые, как правило, представляют собой ориентированные в направлении потока тонкие пластины (либо другие элементы), расположенные в турбулентном пограничном слое параллельно обтекаемой поверхности и относящиеся к классу т. н. внешних манипуляторов. Подобные УРВ предназначены для разрушения больших вихревых (когерентных) структур, масштаб которых соизмерим с толщиной пограничного слоя, и, как следствие, для уменьшения турбулентного трения. Не останавливаясь на деталях, отметим, что подробный анализ эффективности УРВ, который в большинстве работ ограничивался изучением лишь составляющей поверхностного трения, представлен в [3]. В работе [4] на основе прямого весового эксперимента выявлена область геометрических параметров УРВ, являющихся эффективными с точки зрения уменьшения полного сопротивления применительно к обтеканию тела вращения. В то же время обнаружено, что значительная часть исследованных в отмеченной работе УРВ обеспечивает проигрыш в полном сопротивлении тела вращения.

Один из главных механизмов, предложенных в свое время для объяснения причин снижения трения с помощью указанных устройств, состоит в том, что УРВ прерывает процесс массообмена между различными слоями жидкости (за счет которого вносится основной вклад в осредненные по времени характеристики течения), что в конечном итоге способствует уменьшению поверхностного трения. Действительно, фундаментальные свойства классического турбулентного пограничного слоя на пластине характеризуются формированием короткоживущих (во времени) видов движений (выбросов) жидкости: “sweep”, т. е. движение к стенке, и “ejection”, т. е. движение от стенки [5, 6]. Кроме того, существуют два более слабых движения, характеризующих процесс взаимодействия: внешнее при перемещении высокоскоростной жидкости наружу и внутреннее при перемещении низкоскоростной жидкости внутрь.

В отличие от отмеченных УРВ, в работе [7] изучался отдельный класс генераторов вихрей, представляющих собой ориентированные по потоку тонкие элементы, смонтированные перпендикулярно стенке. Обнаружено, что с точки зрения снижения трения плоской поверхности такие элементы являются существенно более эффективными в сравнении с обычными горизонтальными УРВ, хотя, по свидетельству авторов, и далеки от оптимальных. В последовавшей затем работе [2] удалось подтвердить, что такие устройства действительно являются эффективными, обеспечивая максимальный выигрыш в локальном трении для одного из вариантов ВЭ порядка 27–28 %, что, вообще говоря, превышает соответствующую величину, полученную для горизонтально расположенного УРВ. Обнаружено также существенное влияние ВЭ на подавление поля турбулентных пульсаций скорости, что дало 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. Однако было подчеркнуто, что суммарная омываемая поверхность ВЭ в случае, когда их высота превышает расстояние между ними, больше в сравнении с одиночным параллельным поверхности УРВ. Поэтому, если принять во внимание собственное сопротивление, такие устройства могут оказаться не столь эффективными. Сделан вывод, что этот вопрос должен быть выяснен на основе прямых измерений аэродинамического сопротивления пластины с учетом собственного

сопротивления самих ВЭ. До сих пор такие измерения не предпринимались. Лишь в работе [8] были выполнены предварительные эксперименты в опытовом бассейне, которые, однако, полной ясности в этот вопрос не внесли. Поэтому основной целью настоящей работы является изучение возможности снижения аэродинамического сопротивления плоской пластины при помощи устройств разрушения вихрей варьируемой геометрии, установленных нормально к обтекаемой поверхности.

1. УСЛОВИЯ И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Опыты проводились в дозвуковой малотурбулентной аэродинамической трубе Т-324 ИТПМ СО РАН при скоростях невозмущенного потока в контрольном сечении $U_\infty \approx 2,4, 4,01, 5,49, 7,3, 9,0, 10,42, 15,0$ и $19,9$ м/с, что соответствовало числам Рейнольдса на 1 м $Re_1 = 0,152 \cdot 10^6, 0,254 \cdot 10^6, 0,348 \cdot 10^6, 0,462 \cdot 10^6, 0,571 \cdot 10^6, 0,660 \cdot 10^6, 0,950 \cdot 10^6$ и $1,262 \cdot 10^6$ м⁻¹, и номинально нулевом продольном градиенте давления на поверхности модели. Число Рейнольдса Re^{**} , вычисленное по толщине потери импульса δ^{**} в сечении расположения вертикальных элементов, менялось в зависимости от скорости и при $U_\infty \approx 5$ м/с составляло 820 ± 15 .

В качестве объекта исследования использовалась модель плоской пластины, изготовленная из органического стекла с размерами 1981×993 мм² в плане и толщиной 10,5 мм, установленная горизонтально в рабочей части трубы на боковых направляющих рельсах. На нерабочей стороне пластины имеет продольные ребра жесткости и дополнительные опоры для исключения прогиба в поперечном направлении. Как передняя, так и задняя части пластины выполнены в виде полуэллипса с соотношением полуосей $b/a = 1 : 20$. На расстоянии 882 мм от передней кромки пластины 1 (рис. 1) сделан прямоугольный вырез с размерами 520×270 мм² в плане, в котором с зазором 0,5 мм заподлицо с рабочей поверхностью пластины подвешен плавающий элемент 2, связанный разрезной державкой 3 с тензометрическими весами. В комплексе такая подвеска представляет собой конструкцию в виде классического параллелограммного механизма, состоящую из кронштейнов 4, жестко закрепленных одним концом на нерабочей поверхности плавающего элемента, и тонких струн 5 с винтами 6 и 7, с помощью которых плавающий элемент подвешивается непосредственно к пластине. Дополнительное назначение винтов 6 и 7 состоит в том, что они позволяют регулировать равномерность зазора вокруг плавающего элемента и устанавливать последний заподлицо с рабочей поверхностью пластины. С целью исключения перетекания воздуха через зазор между плавающим элементом и самой пластиной зазор по всему периметру закрывался тонкой, свободно подвешенной Latex-резиной 8 толщиной около 40 мкм. Для того чтобы избежать воздействия потока на нерабочую сторону плавающего элемента, снизу конструкция закрыта съемным прозрачным обтекателем 9. Аналогичная защита с помощью обтекателей 10 и 11 от воздействия потока предусмотрена для элементов подвески и разрезной державки весов.

Для измерения силы поверхностного трения F и полного сопротивления X , действующих на плавающий элемент, использовались двухкомпонентные внеомдельные тензометрические весы с кремниевыми тензорезисторами, закрепленные под пластиной на стреловидном пилоне, установленном на полу рабочей части аэродинамической трубы. Питание мостовой схемы весов осуществлялось стабилизированным источником постоянного тока фирмы Takeda Riken напряжением 2,05 В. Продольная нагрузка от плавающего элемента на тензовесы передается с помощью миниатюрной разрезной державки 3. Такое связующее звено между плавающим элементом и весами вызвано единственным соображением — передать на весы без искажения искомую силу F (или X) за счет сведения к минимуму

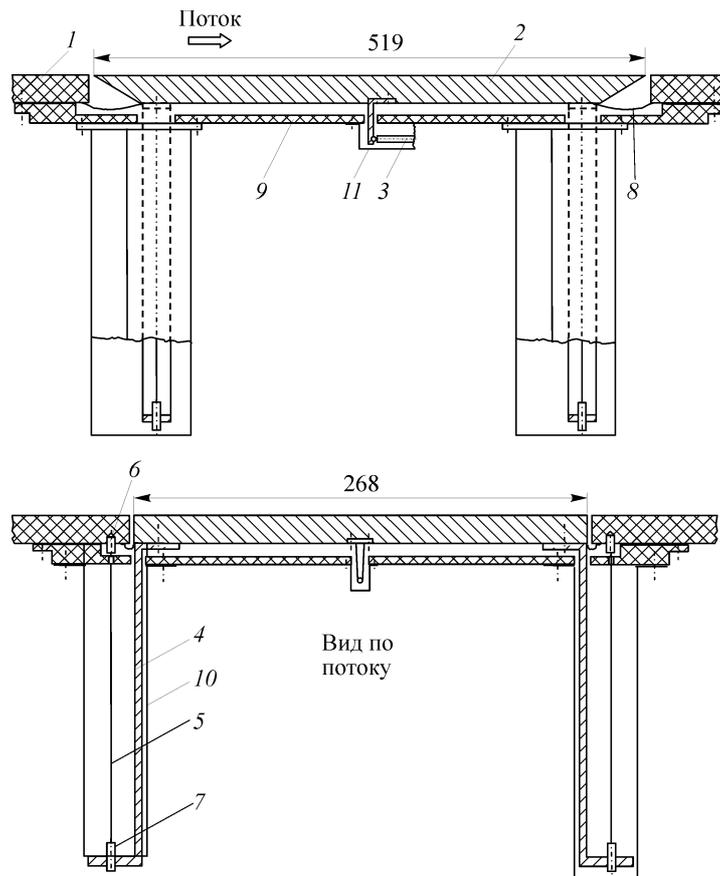


Рис. 1. Схема подвески плавающего элемента:

1 — поверхность плоской пластины, 2 — плавающий элемент, 3 — разрезная державка, 4 — кронштейн, 5 — струна, 6 — винт с эксцентриком, 7 — регулировочный винт, 8 — latex резина, 9 — обтекатель плавающего элемента, 10 — обтекатель подвески, 11 — обтекатель державки.

влияния других аэродинамических сил и моментов. Выполненные калибровки показали, что при использовании разрезной державки удастся на стыке двух ее частей обеспечить пренебрежимо малую величину трения скольжения от имитируемых нагрузок по осям y и z , тем самым, свести к минимуму влияние на компоненты F и X других аэродинамических сил и моментов.

Известно, что кремниевые тензорезисторы весьма чувствительны к изменению температурных условий окружающей среды. Поэтому в процессе измерений весы размещались в специальном изолированном кожухе. Кроме того, с целью компенсации температурной погрешности в одно из плеч мостовой схемы последовательно с тензорезистором включено сопротивление R_T , пропорциональное, но обратное по знаку величине, реализующейся вследствие изменения температуры. Поскольку полностью устранить это явление не удалось, при обработке исходной информации в показания тензосвесов вводилась поправка, обусловленная изменением температуры потока в процессе эксперимента, хотя это изменение составляло доли градуса.

Для определения калибровочных коэффициентов по продольной нагрузке выполнялись многократные статические калибровки тензосвесов. Они проводились непосредственно в рабочей части трубы, т. е. схема измерений в этом случае была в точности такой же, как и в экспериментах. В процессе калибровок фиксирова-

лась зависимость величины напряжения на выходе тензоста E от величины прикладываемой тарной нагрузки G_x и регистрировалась температура воздуха под кожухом весов. Всего было выполнено семь циклов таких калибровок. На основе многократных измерений величины E при конкретном значении G_x определялось среднее арифметическое значение выходного напряжения и его среднее квадратическое отклонение, после чего зависимость $E = f(G_x)$ для каждого цикла калибровок аппроксимировалась полиномом 2-й степени.

Среднее арифметическое значение калибровочного коэффициента тензовесов в диапазоне нагрузок, имеющих место непосредственно в эксперименте, составляет $K_{\text{хсп}} = 84$ г/мВ, а дорожка разброса $\pm 2\sigma K_{\text{хсп}} = 0,17$ г/мВ, т. е. порядка 0,2 % от величины $K_{\text{хсп}}$.

При вычислении среднего коэффициента поверхностного трения C_F , а также полного аэродинамического коэффициента сопротивления C_x , характеризующего сумму сопротивления УРВ и поверхностного трения, сила трения F и сила сопротивления X , измеренные в скоростной системе координат, относились к величине $q_\infty S$, где q_∞ — скоростной напор, а S — площадь плавающего элемента в плане.

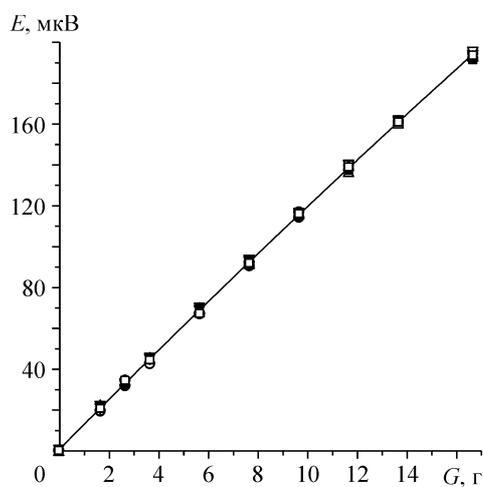
Случайная погрешность определения коэффициента аэродинамического сопротивления σC_x определялась по результатам семикратных измерений силы сопротивления плавающего элемента, с установленным на нем одним из вариантов вертикальных УРВ.

На рис. 2 в качестве иллюстрации приведена калибровочная зависимость выходного напряжения тензоста E от величины тарной нагрузки G_x , прикладываемой вдоль направления действия силы X . Видно, что в ожидаемом диапазоне нагрузок зависимость $E = f(G_x)$ имеет слабонелинейный характер и аппроксимируется полиномом 2-й степени.

Группа дренажных отверстий диаметром 0,5 мм выполнена перед плавающим элементом и позади него, а также в сходственных точках, расположенных сбоку, т. е. на траверзе плавающего элемента. Модель в потоке ориентировалась таким образом, чтобы перепад давления, измеренный в точках, расположенных впереди и позади плавающего элемента, равнялся нулю. Это достигалось за счет незначительного изменения угла установки направляющих рельсов пластины. В итоге этот угол составлял около $20'$. Задняя часть модели оборудована регулируемым хвостовым закрылком с хордой 175 мм, установленным по всей ширине рабочей части трубы, с помощью которого осуществлялось управление характером течения в окрестности носика.

С целью обеспечения развитого турбулентного течения на большей части модели пограничный слой искусственно турбулизован путем установки на расстоянии 70 мм от передней кромки пластины проволочного турбулизатора диаметром $d = 3$ мм (43,5 в единицах закона стенки $d^+ = dv_* / \nu$ при $U_\infty \approx 5$ м/с), позади которого наклеена полоса крупнозернистой наждачной бумаги (со сглажен-

Рис. 2. Калибровочная зависимость используемых тензовесов (семикратные измерения).



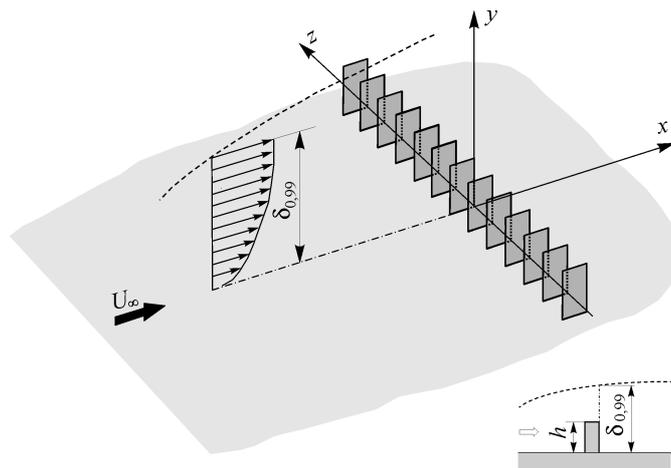


Рис. 3. Фрагмент поверхности плавающего элемента с размещенными на нем вертикальными УРВ и системой осей координат.

ными уступами) длиной 30 мм. Основное назначение второго элемента турбулизующего устройства — по возможности уменьшить двумерный характер возмущений, которые могут преобладать позади проволочного турбулизатора. К тому же, как показали результаты предварительных экспериментов, наличие лишь одного турбулизатора оказалось недостаточным для достижения равновесного (по Клаузеру) турбулентного пограничного слоя на нижней границе исследуемого диапазона скоростей. Комплексный турбулизатор позволил эту проблему успешно решить.

Фрагмент поверхности плавающего элемента с размещенными на нем вертикальными УРВ и системой осей координат представлен на рис. 3. Характерные геометрические параметры исследованных УРВ приведены в таблице, где h — высота, c — хорда, λ — расстояние (шаг) между элементами в трансверсальном направлении и t — их толщина. Соответствующие параметры в единицах закона стенки h^+ , c^+ , λ^+ представлены для $U_\infty \approx 5$ м/с, для чего были измерены характеристики пограничного слоя в сечении расположения УРВ. Каждый из исследуемых УРВ изготовлен на подложке толщиной 0,1 мм и перед экспериментом наклеивался на омываемую поверхность плавающего элемента по всей его ширине. Для исключения возможного эффекта, обусловленного влиянием подложки, на поверхности элемента сделана выемка глубиной 0,1 мм. Диапазон анализируемых геометрических параметров УРВ расширен, с тем чтобы охватить, по возможности, более широкий спектр исследуемых условий в сравнении с экспериментами [7, 2].

Таблица

Основные геометрические и физические параметры УРВ

№ п/п	0	1	2	3	4	5	6	7	8
h , мм	0	13,5			7	7	2	2	7,5
c , мм	0	6,7							17,4
λ , мм	0	4	5	6	4	5	4	5	4
t , мм	0	0,1							
h^+	0	194			100	100	29	29	108
c^+	0	96							250
λ^+	0	57	72	86	57	72	57	72	57

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 ($P_{0ф}-P_{рч}$).

2. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Для достижения приемлемой точности эксперимента и, тем самым, получения достоверных результатов все измерения среднего значения сопротивления трения, а также полного аэродинамического сопротивления плоской пластины выполнены в одном цикле испытаний. При этом представленные ниже результаты являются результатом осреднения не менее чем трехкратных измерений силы сопротивления каждого из исследованных УРВ.

На начальной стадии экспериментов выполнены тщательные многократные измерения среднего коэффициента поверхностного трения C_F исходного плавающего элемента (при отсутствии УРВ), результаты которых представлены на рис. 4 (I) в виде зависимости $C_F = f(Re_x)$. (Здесь и далее число Рейнольдса достигалось за счет изменения скорости потока, а в качестве характерного размера при его вычислении использовалось расстояние x от эффективного начала развития пограничного слоя до середины плавающего элемента.) В целом представленная зависимость не содержит ничего необычного и имеет классический характер, отражающий процесс уменьшения C_F по мере увеличения Re_x . Для сравнения здесь представлены также результаты расчета (2) по программе, отлаженной нами ранее в рамках методики, разработанной Себеси [9], которые получены путем интегрирования распределения местного коэффициента поверхностного трения C_f по длине l плавающего элемента по формуле

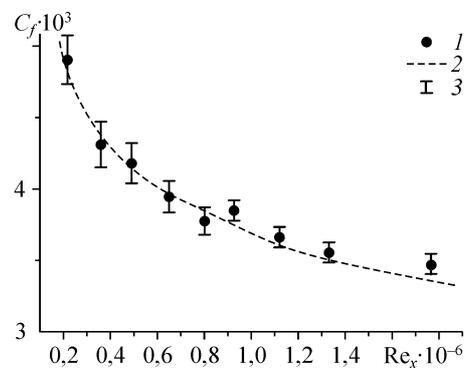
$$C_F = \frac{1}{l} \int_{x_H}^{x_K} C_f(x) dx,$$

где x_H и x_K — соответственно продольная координата, характеризующая положение передней и задней кромок плавающего элемента вдоль оси x . Как видно, отклонения экспериментальных значений C_F от расчетных результатов в большинстве точек находятся в пределах погрешности измерений, характеризующейся величиной $\pm 2\sigma_{C_F}$ (при доверительной вероятности 95 %) и показанной здесь вертикальными отрезками (3). Естественно, что с уменьшением числа Re_x уменьшается не только сила сопротивления, но и скоростной напор набегающего потока, поэтому погрешность измерений возрастает.

Основные полученные результаты представлены на рис. 5 в виде зависимости коэффициента аэродинамического

Рис. 4. Изменение среднего коэффициента поверхностного трения в зависимости от числа Рейнольдса.

Эксперимент (1), расчет по методике [9] (2), случайная погрешность измерений $\pm 2\sigma_{C_F}$ (3).



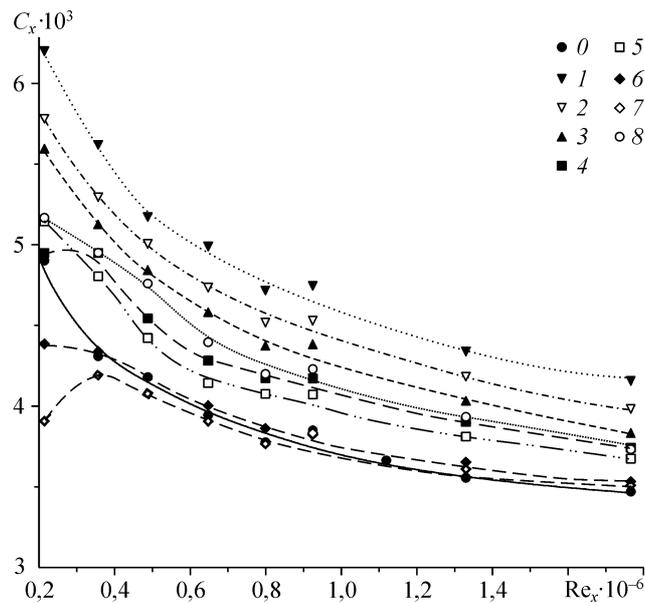


Рис. 5. Изменение коэффициента аэродинамического сопротивления в зависимости от числа Рейнольдса при варьируемой геометрии вертикальных УРВ.
Варианты: 0 (0), 1 (1), 2 (2), 3 (3), 4 (4), 5 (5), 6 (6), 7 (7), 8 (8).

сопротивления плавающего элемента C_x от числа Рейнольдса Re_x и основных параметров, характеризующих геометрию УРВ (варианты 1–8). Для сравнения здесь показаны также результаты измерений среднего коэффициента сопротивления трения (осредненные данные) для плавающего элемента без УРВ (вариант 0). Как видно, для большинства исследованных геометрий УРВ характер зависимости $C_x = f(Re_x)$ сходный и в принципе не отличается от того, который имеет место для исходного варианта 0. Он обусловлен уменьшением C_x при увеличении числа Re_x . Что касается влияния геометрии УРВ, то отчетливо просматривается следующая тенденция. Максимальный коэффициент аэродинамического сопротивления пластины вызывают УРВ с наибольшей высотой h (варианты 1–3). При этом по мере увеличения расстояния λ между соседними элементами величина C_x уменьшается, но остается выше соответствующих значений C_F для исходного варианта 0. Так, в случае $\lambda = 4$ мм (вариант 1) C_x в среднем на 20–25 % (в зависимости от Re_x) превышает соответствующие значения C_F . При дальнейшем возрастании величины λ (варианты 2, 3) C_x плавно уменьшается, но его величина также сохраняется более высокой, чем в случае отсутствия УРВ. Например, для варианта 3 C_x в среднем на 10–14 % превышает соответствующие значения C_F .

Отмеченная тенденция имеет место и для УРВ с меньшей высотой h (варианты 4, 5) с той лишь разницей, что в этом случае коэффициент сопротивления C_x заметно ниже, но тем не менее, остается более высоким, чем для исходного варианта 0. Например, даже в случае $\lambda = 5$ мм C_x превышает C_F примерно на 6 %.

При дальнейшем уменьшении высоты h (варианты 6, 7) C_x продолжает падать и его величина в пределах погрешности эксперимента становится соизмеримой с соответствующими значениями C_F в значительной части диапазона Re_x . Лишь в начальном диапазоне чисел Рейнольдса ($Re_x \leq (0,6-0,7) 10^6$) наблюдаются снижения (в сравнении с исходными) значений C_x , достигающее 20 %, что явно

находится за пределами погрешности эксперимента. Вместе с тем отсутствие здесь достаточного количества экспериментальных точек не позволяет в полной мере судить о характере изменения C_x в этой области значений Re_x .

Поскольку в работе [8] зафиксирован факт уменьшения сопротивления для УРВ с довольно большой хордой ($c^+ = 350$), на рис. 5 приведены также экспериментальные данные для варианта 8 с увеличенной хордой. Полученные результаты занимают некое промежуточное положение и характеризуются повышенными значениями C_x . И в этом случае никакой тенденции к уменьшению сопротивления не обнаруживается.

Таким образом, в целом результаты эксперимента свидетельствуют о том, что в большей части исследованного диапазона чисел Рейнольдса вертикальные УРВ заданной геометрии не обеспечивают снижения аэродинамического сопротивления плоской пластины. Возможная причина данного факта состоит в следующем. Судя по результатам физических экспериментов [7, 2], область влияния вертикальных УРВ, высота h которых порядка половины толщины пограничного слоя δ , может заметно превышать длину используемого здесь плавающего элемента. Поэтому естественно предположить, что выигрыш в C_x может быть достигнут либо на поверхности больших продольных размеров, либо при других комбинациях h/δ . Однако наиболее важным является обеспечение такой ситуации, когда при высоте вертикальных элементов, не превышающей расстояния λ между ними, достигается максимальное снижение C_f . Лишь в этом случае суммарная омываемая поверхность ВЭ не будет превышать соответствующую величину для одиночного горизонтального УРВ той же геометрии.

С другой стороны полученные результаты дают также основание для следующего соображения. Ясно, что вертикальные элементы могут быть эффективными, главным образом, в том случае, когда преимущественное значение имеет процесс развития вихрей в трансверсальном направлении. Если этот процесс не играет сколько-нибудь существенной роли, а ключевым является фундаментальный механизм “sweep/ejection”, то ясно, что вертикальные УРВ не будут иметь преобладающего значения в сравнении с горизонтальными УРВ. Подтверждением этому являются результаты работы [6], в которой изучалось воздействие УРВ на мгновенную структуру течения. Эти результаты ясно показывают, что развитие т.н. кольцевых вихрей (ring-like vortices) в трансверсальном направлении действительно имеет место. Однако судя по всему массобмен в трансверсальном направлении является существенно более слабым в сравнении с тем, который определяется движением жидкости от стенки и к ней.

Отмеченное в определенной степени находит свое подтверждение при анализе местного коэффициента поверхностного трения C_f вниз по потоку от вертикального УРВ высотой $h = 2$ мм, целостная картина распределения которого в исследуемой области значений x/δ и z/δ представлена на рис. 6 (вариант б) в виде изоповерхности $C_f = f(x/\delta, z/\delta)$ (1) при $Re_x = 0,29 \cdot 10^6$. Здесь положение двух соседних ВЭ соответствует безразмерной трансверсальной координате $z/\delta = 0$ и 0,21. Для наглядности показана также изоповерхность $C_{f0} = f(x/\delta, z/\delta)$ для исходного варианта (2). Методика измерения величины C_f подробно изложена в [2]. Обращает на себя внимание, что непосредственно позади ВЭ ($z/\delta = 0$ и 0,21) имеет место заметное уменьшение трения, тогда как в окрестности плоскости симметрии ($z/\delta = 0,105$) наблюдается даже некоторое возрастание этой величины. Однако по мере удаления вниз по потоку уменьшение коэффициента поверхностного трения по сравнению с исходным течением начинает проявляться во всем диапазоне значений z . Важно отметить, что в этом случае собственное сопротивление ВЭ,

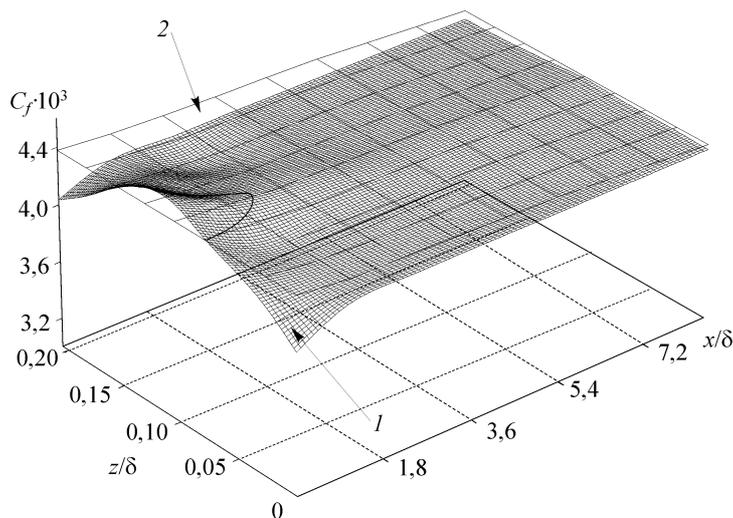


Рис. 6. Иповерхность местного коэффициента поверхностного трения позади вертикальных УРВ (вариант б).

по-видимому, существенно уменьшается, а поскольку основным фактором является выигрыш в сопротивлении трения, то и удастся достичь некоторого снижения полного сопротивления. К сожалению, это происходит при низких числах Рейнольдса ($Re_x \leq (0,6-0,7) \cdot 10^6$), которые, с точки зрения целей рассматриваемой задачи, большого практического значения не имеют.

ВЫВОДЫ

Выполнена серия экспериментальных исследований, направленных на изучение возможности снижения аэродинамического сопротивления плоской пластины с помощью установленных по нормали к ее поверхности вертикальных УРВ в условиях формирования вдоль пластины несжимаемого равновесного турбулентного пограничного слоя. Полученные данные позволяют сделать следующие выводы:

- отлажена методика измерения среднего коэффициента поверхностного трения, а также полного аэродинамического сопротивления плавающего элемента с установленными на нем вертикальными УРВ варьируемой геометрии, которая дает возможность изучать интегральную эффективность таких устройств как средства модификации турбулентного пограничного слоя на обтекаемой поверхности. Указанная методика может быть успешно использована при изучении эффективности других способов воздействия на пограничный слой;

- в целом результаты эксперимента свидетельствуют о том, что в большей части исследованного диапазона чисел Рейнольдса, УРВ заданной геометрии не обеспечивают снижения аэродинамического сопротивления плоской пластины. Лишь при низких значениях чисел Рейнольдса ($Re_x \leq (0,6-0,7) \cdot 10^6$) появляется выигрыш в полном сопротивлении в сравнении с аналогичной величиной для немодифицированного течения, достигающий 20 %, что явно находится за пределами погрешности эксперимента. Вместе с тем отмеченный диапазон чисел Re_x вряд ли может иметь сколько-нибудь существенное значение с точки зрения практической аэродинамики;

- сравнение спектров пульсаций в модифицированном и исходном течении, выполненное на этапе физических исследований, ясно указывает на снижение энергии пульсаций непосредственно позади элементов, которое в начальной части

спектра (область низких частот) достигает нескольких раз. В модифицированном течении полоса частот примерно в два раза уже, чем в исходном течении. Таким образом, влияние вертикальных элементов на поле турбулентных пульсаций скорости весьма существенно и, по-видимому, может рассматриваться как один из важнейших факторов управления структурой пристенной турбулентности на плоской поверхности.

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. Бойко А.В., Корнилов В.И. О возможности снижения турбулентного трения с помощью вертикальных устройств разрушения вихрей // Теплофизика и аэромеханика. 2009. Т. 16, № 4. С. 583–596.
3. Корнилов В.И. Уменьшение турбулентного трения активными и пассивными методами (обзор) // Теплофизика и аэромеханика. 2005. Т. 12, № 2. С. 183–208.
4. 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.
5. Wallace J.M.H., Eckelmann H., Brodkey R.S. The wall region in turbulent shear flow // J. Fluid. Mech. 1972. Vol. 54. P. 39–48.
6. Borodulin V.I., Kachanov Y.S., Roschektayev A.P. Investigation of LEBU-device effect on turbulent boundary layer structure by means of 'deterministic turbulence method' // Proc. of XIV Inter. Conf. Methods Aerophysical Research, June 30–July 6, 2008, Novosibirsk. ITAM SB RAS 2008. Section 2. CD-диск.
7. 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 Europ. Drag Reduction Meeting, Denmark 2002.
8. Lee I., Hyun A.N., Chun H.H. Assessment of drag reducing efficiency of outer-layer vertical blades // Proc. of the 12th Asian Congress of Fluid Mechanics 18–21 August 2008, Daejeon, Korea. P. 1/4–4/4.
9. Cebeci T. An engineering approach to the calculation of aerodynamic flows. Berlin: Springer-Verlag, 1999. 470 p.

Статья поступила в редакцию 8 октября 2009 г.