

УДК 532.517.4 : 533.6.071.4

© 1995 г. И. В. ГУДИЛИН, Ю. А. ЛАШКОВ, В. Г. ШУМИЛКИН  
**СОВМЕСТНОЕ ВЛИЯНИЕ ПРОДОЛЬНОГО ОРЕБРЕНИЯ  
И РАЗРУШИТЕЛЕЙ ВИХРЕВЫХ СТРУКТУР  
НА ТУРБУЛЕНТНОЕ ТРЕНИЕ НА ПЛАСТИНЕ**

Приведены результаты экспериментального исследования возможностей снижения турбулентного трения с помощью разрушителей вихревых структур и микрооробрения поверхности. Испытания проводились в малотурбулентной аэродинамической трубе на плоской пластине в диапазоне чисел  $Re = (2-7) \cdot 10^6$ . Местный коэффициент трения измерялся с помощью внутримодельных тензозвесов, а полное сопротивление трения оценивалось методом импульсов. При совместном использовании разрушителей вихрей и микрооробрения максимальное уменьшение полного сопротивления турбулентного трения плоской пластины на длине 1800 мм достигало 16%. Исследовано влияние длины ореренного участка на эффективность снижения трения, а также воздействие разрушителей вихрей и оробрения на структуру турбулентного пограничного слоя.

В настоящее время достаточно подробно исследованы два пассивных способа уменьшения турбулентного трения — применение мелкорребристых поверхностей (риблетов) и использование разрушителей вихревых структур.

Измерения сопротивления трения на мелкорребристых поверхностях с треугольной формой ребра впервые были проведены Уолшем и Вайнштейном [1]. Достаточно подробные исследования аэродинамических характеристик риблетных покрытий описаны как в зарубежной, так и отечественной литературе [2—7]. Наибольшее снижение трения на 7—9% получено на поверхностях с профилем ребра в виде равнобедренного треугольника при  $h^+ \approx s^+ = 12-15$ . Здесь и ниже значения высоты ребра  $h$  и расстояния между ними  $s$  выражены в координатах закона стенки

$$h^+ = \frac{hu_\infty}{\nu} \sqrt{\frac{c_f}{2}}, \quad s^+ = \frac{su_\infty}{\nu} \sqrt{\frac{c_f}{2}}$$

где  $u_\infty$  — скорость в потенциальном ядре потока,  $\nu$  — коэффициент кинематической вязкости,  $c_f$  — местный коэффициент трения плоской пластины. Подробная информация о состоянии исследований риблетных покрытий приведена в обзорной работе [8].

Вторым из рассматриваемых в данной работе методов снижения турбулентного трения является использование разрушителей вихревых структур. Эти устройства представляют собой металлические ленты, располагающиеся вдоль потока, которые помещаются в турбулентном пограничном слое с целью разрушения крупных вихревых (когерентных) структур. Такие устройства, уменьшая характерный масштаб турбулентности, влияют на механизм передачи количества движения из внешней области течения к стенке, за счет чего может уменьшаться число турбулентных выбросов, а следовательно, и поверхность напряжения трения. Следует отметить, что пока не имеется достаточно надежного объяснения механизма воздействия разрушителей вихрей на снижение трения. Обзор исследований по снижению трения с помощью таких устройств содержится в [9, 10].

Отметим также, что результаты опубликованных зарубежных работ носят противоречивый характер и не позволяют сформулировать однозначно рекомендации по выбору оптимальных геометрических параметров разрушителей вихрей. Ранее при проведении исследований по влиянию параметров разрушителей вихрей схемы «тандем» на снижение трения авторами были определены оптимальные значения высоты  $a$  установки лент, расстояния  $b$  между элементами и длины  $l$  хорды лент:  $a = (0,4—0,45)\delta$ ,  $b = (12—13)\delta$  и  $l = (0,7—1)\delta$ , где  $\delta$  — толщина турбулентного пограничного слоя в месте установки первого элемента разрушителя вихрей. При этом получено уменьшение полного сопротивления (включая потери на элементах) на 8% на участке пластины длиной (80—85) $\delta$ .

Первые экспериментальные исследования совместного влияния риблетов и разрушителей вихрей выполнены в [1], где показано, что эффекты от применения таких устройств в первом приближении суммируются. Возможно, это обусловлено тем, что разрушители вихрей воздействуют на крупные вихревые структуры, расположенные во внешней области турбулентного пограничного слоя, а оребрение влияет в первую очередь на пристеночную область течения. Отметим, что число зарубежных публикаций по рассматриваемой проблеме весьма невелико [12—13].

Настоящая работа посвящена экспериментальному изучению совместного влияния разрушителей вихрей и риблетов на турбулентное трение и является продолжением исследований, опубликованных в (единственной в отечественной литературе) работе [14], в которой показано, что использование разрушителей вихрей и риблетов приводит к суммированию эффектов снижения трения, обусловленных применением указанных элементов порознь. Достигнуто суммарное снижение полного коэффициента трения на 12% при  $Re = (2—3) \cdot 10^6$ . При этом в [14] отмечено, что полученное относительно небольшое (~4%) уменьшение сопротивления с помощью разрушителей вихрей (по сравнению с ранее достигнутым снижением трения около 8%) обусловлено неоптимальностью параметров использованного разрушителя. Это было учтено при проведении настоящих испытаний.

**1. Постановка исследований.** Испытания проводились в малотурбулентной аэродинамической трубе с размерами рабочей части  $1 \times 1 \times 4$  м<sup>3</sup>. Скорость потока варьировалась в пределах 10—50 м/с, при этом интенсивность продольных пульсаций скорости составляла 0,02—0,04%.

Измерения проводились на плоской пластине с размерами в плане  $1 \times 3,38$  м<sup>2</sup> и толщиной 75 мм. Носовая часть пластины в сечении имела форму полуэллипса с отношением осей 1 : 12, задняя часть была выполнена в виде оживала длиной 275 мм. Пластина устанавливалась в горизонтальной плоскости, проходящей через ось симметрии рабочей части трубы.

Турбулентный режим течения в пограничном слое создавался за счет наклейки турбулизаторов (наждачной бумаги) со средним размером зерен 32 мкм на носовую часть. Турбулизатор с размерами  $50 \times 1000$  мм<sup>2</sup> располагался вдоль оси  $z$  на расстоянии 150 мм от передней кромки пластины. Измерения параметров пограничного слоя при скоростях потока  $u_\infty = 10—50$  м/с показали, что подобный турбулизатор создает развитый пограничный слой при  $x = 800—2800$  мм.

Для измерения параметров пограничного слоя пластина была оборудована двумя внутримодельными микрокоординатниками, в которых закреплялись насадки полного давления. Координаты приемных отверстий этих насадок  $x_0 = 835$  мм и  $x = 2635$  мм. Минимальный шаг перемещения насадка по оси  $y = 0,1$  мм.

Для прямого измерения силы поверхностного трения пластина была оборудована плавающим элементом с полупроводниковым тензосенсорным преобразователем. Площадь омываемой поверхности плавающего элемента  $285 \times 285$  мм<sup>2</sup>. Центр плавающего элемента располагался на расстоянии  $x = 2000$  мм от передней кромки пластины. Среднеквадратичная погрешность измерения силы трения с помощью плавающего элемента составляла 0,3%.

В эксперименте использовалась ребристая поверхность со следующей геометрией: ребро имело в поперечном сечении форму равнобедренного треугольника с углом при вершине  $\alpha = 53^\circ$ , высота ребра  $h = 0,14$  мм, расстояние между вершинами  $s = 0,32$  мм (форма «через зуб»). Оребрение было нанесено на одной стороне пластин из магниевого сплава МА-8 толщиной 0,5 мм. При измерении полного сопротивления методом импульсов ребристые пластины с размерами  $322,5 \times 380$  мм<sup>2</sup> наклеивались непосредственно на поверхность модели. Использовались шесть пластин, которые образовывали «дорожку» шириной 380 мм и общей длиной 1935 мм. Дорожка начиналась с линии  $x = 765$  мм. Передняя кромка ребристой пластины имела форму клина длиной 5 мм.

Разрушители вихревых структур изготавливались из плоской стальной ленты толщиной  $t = 0,15$  мм. Длина хорды первой ленты составляла  $l_1 = 20$  мм, второй ленты  $l_2 = 25$  мм. Передняя и задняя кромки лент имели клиновидную форму с углом при вершине  $15^\circ$ . Ленты натягивались поперек потока параллельно поверхности модели. Высота установки лент над поверхностью модели составляла 8 мм для первой ленты и 10 мм — для второй. Расстояние между лентами равнялось 250 мм. Координата передней кромки первой ленты  $x = 835$  мм.

При исследовании эффективности разрушителей вихрей и риблетов методом импульсов оценка толщины потери импульса  $\delta^{**}$  находилась аппроксимацией кубическим сплайном значений скорости в пограничном слое, измеренных с помощью насадка полного давления. По измеренному профилю скорости помимо  $\delta^{**}$  находилась толщина вытеснения  $\delta^*$ , первый формпараметр  $H = \delta^*/\delta^{**}$ , а также коэффициент местного трения  $c_f$  по известным в литературе зависимостям. Использовались соотношения, в которых  $c_f$  определялся непосредственно по параметрам пограничного слоя: Людвига—Тилмана, Кармана—Шехнера, Шлихтинга, Фокнера [15]. Кроме того, использовались зависимости, позволяющие оценить  $c_f$  через число  $Re$ , вычисленное по длине (формулы Шульца—Грунова, Шлихтинга, Никурадзе, Сивелса—Пейна [15, 16]).

В качестве значения числа  $Re$  при определении  $c_f$  по последним четырем соотношениям использовалось так называемое эквивалентное число Рейнольдса  $Re_e$ , которое вычислялось как число  $Re$  турбулентного пограничного слоя на гладкой пластине с началом турбулентного режима течения на передней кромке и с интегральными параметрами  $\delta^*$  и  $\delta^{**}$ , равными измеренным значениям в данном эксперименте. При этом  $Re_e$  бралось как среднее арифметическое значений  $Re$ , рассчитанных по соотношениям Никурадзе, Прандтля и Сивелса—Пейна [15, 16].

Известно, что в безградиентном двумерном потоке толщина потери импульса пропорциональна полному сопротивлению трения пластины. В этом случае в качестве критерия эффективности разрушителей вихрей, оребрения или их совместного влияния на снижение полного сопротивления трения обычно берут величину  $\Delta C_F$  [9, 10]

$$\Delta C_F = \frac{Re^{**}(x) - Re^{**}(x_0)}{Re^{**}(x) + Re^{**}(x_0)} \quad (1.1)$$

Здесь  $Re_0^{**}$  и  $Re^{**}$  — числа Рейнольдса, вычисленные по толщине потери импульса на гладкой пластине и по  $\delta^{**}$  на пластине при наличии устройства снижения трения в сечениях  $x_0$  и  $x$ , где  $x_0$  — координата передней кромки первого элемента разрушителя,  $x$  — координата приемного отверстия насадка полного давления, расположенного во втором координатнике. Таким образом определяется изменение полного сопротивления (включая потери на разрушителе вихрей) поверхности модели на участке  $x - x_0$ . В настоящих исследованиях  $x_0 = 835$  мм,  $x = 2635$  мм, соответственно уменьшение полного коэффициента трения определялось на длине 1800 мм.

2. Результаты исследований. Начальный этап испытаний посвящен выявлению характера течения в пограничном слое на модели без разрушителя вихрей и оребрения при установке на носовой части турбулизатора с песочной шероховатостью. Измерения профилей скорости в сечениях  $x_0$  и  $x$  показали, что профили скорости в пограничном слое, построенные в универсальных координатах  $u/u_*$  ( $u_*/v$ ), подобны ( $u_*$  — динамическая скорость). Значения эквивалентного числа Рейнольдса  $Re_e$ , вычисленного по параметрам пограничного слоя, оказались близки к соответствующим значениям числа  $Re$ , оцениваемого по расстоянию от передней кромки модели. Результаты измерения местного коэффициента трения  $c_f$  весовым способом, а также по профилям средней скорости в пограничном слое, практически совпали между собой и хорошо аппроксимировались зависимостью Сивелса—Пейна [16]

$$c_f = \frac{0,088 (\lg Re - 2,3686)}{(\lg Re - 1,5)^3}$$

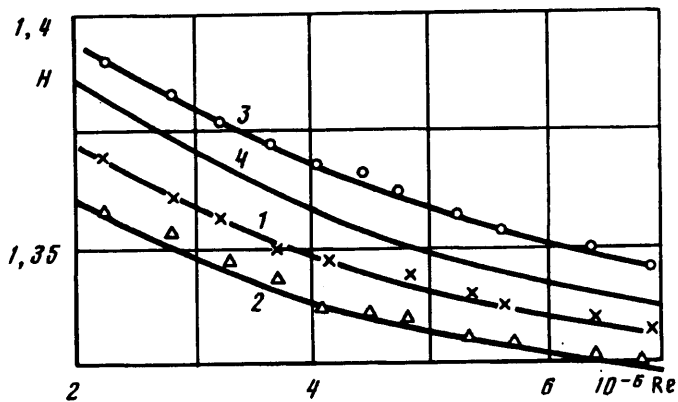
Характер поведения зависимости формпараметра  $H$  от числа Рейнольдса  $Re$  соответствовал развитому пограничному слою. В целом измерения показали, что на модели с данным турбулизатором в диапазоне чисел  $Re = (1,5-7,5) \cdot 10^6$  имеет место развитый турбулентный пограничный слой.

Следует отметить, что пограничные слои на гладкой пластине и на дорожке из гладких пластин толщиной 0,5 мм и с размерами в плане  $380 \times 1940$  мм<sup>2</sup> оказались эквивалентными.

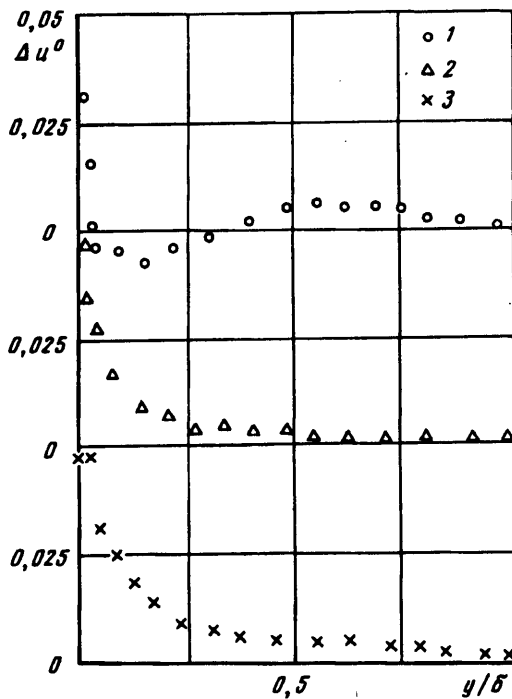
3. Влияние длины оребренного участка на эффективность риблетов. На первом этапе с помощью плавающего элемента исследовалось влияние длины оребренного участка поверхности на сопротивление трения оребренной плоской пластины, располагавшейся ниже по потоку. При проведении испытаний ребристая поверхность, геометрические параметры которой указаны выше, наклеивалась на плавающий элемент, а перед весами находилась либо гладкая поверхность, либо последовательно наклеивались от одной до четырех оребренных пластин с таким же профилем ребра, что и у поверхности на весах. Размеры наклеиваемых оребренных поверхностей 320 мм по потоку и 380 мм поперек потока, толщина листа 0,5 мм. Передняя кромка первой из наклеиваемых пластин имела форму клина длиной 5 мм. Поверхность на весах устанавливалась заподлицо с поверхностью перед весами.

Результаты измерений показали, что наличие оребренной поверхности перед располагавшейся на весах такой же ребристой поверхностью не влияет на коэффициент местного трения последней. Все экспериментальные точки группировались в интервале  $\pm 0,5\%$  относительно зависимости  $c_f(Re)$ , полученной для варианта, в котором перед весами располагалась гладкая поверхность. Аналогичные результаты наблюдались и при испытаниях ребристой поверхности с более крупным шагом оребрения ( $h = 0,22$  мм,  $s = 0,53$  мм). Таким образом, проведенные исследования однозначно показали, что накопление эффекта снижения турбулентного трения на мелкоребристых поверхностях не происходит.

4. Влияние разрушителей вихрей и оребрения на структуру турбулентного пограничного слоя. В зависимости от скорости внешнего потока  $u_\infty$  безразмерные геометрические параметры разрушителей вихрей схемы «тандем» таковы:  $a_1/\delta_1 = 0,39 - 0,43$ ,  $a_2/\delta_2 = 0,41 - 0,43$ ,  $b/\delta_1 = 12,2 - 13,5$ ,  $l_1/\delta_1 = 0,98 - 1,08$ ,  $l_2/\delta_2 = 1,02 - 1,07$ ,  $t_1/\delta_1 = 0,07 - 0,08$  и  $t_2/\delta_2 = 0,006 - 0,0065$ . Отметим, что эти параметры соответствовали оптимальным значениям, найденным ранее авторами при проведении исследований по оптимизации параметров таких устройств. Безразмерное расстояние от задней кромки второй ленты до сечения измерения профиля средней скорости  $u(y)$  в конце исследуемого участка пластины в настоящих испытаниях составляло  $\Delta x/\delta_1 = 74 - 82$  и соответственно до центра плавающего элемента — 43—48.

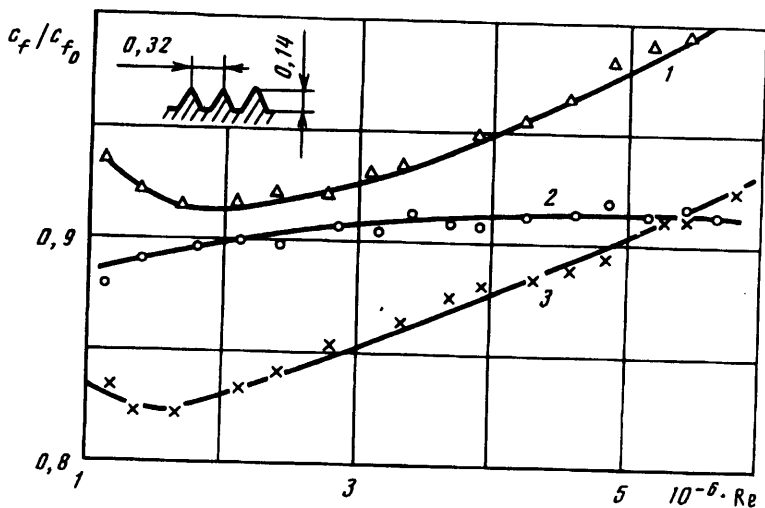


Фиг. 1



Фиг. 2

О воздействии разрушителей вихрей и оребрения на профиль средней скорости можно судить по результатам, представленным на фиг. 1, 2. На фиг. 1 показаны зависимости формпараметра  $H = \delta^*/\delta^{**}$  от числа  $Re$  в сечении  $x = 2635$  мм для гладкой (кривая 1) и ребристой (кривая 2) пластин без разрушителя, а также для гладкой и ребристой пластин с разрушителем вихрей (кривые 3 и 4). Видно, что использование разрушителей вихрей приводит к небольшому увеличению формпараметра по сравнению с соответствующим значением на пластине без разрушителя. Это свидетельствует о меньшей наполненности профиля скорости за разрушителем вследствие его «тормозящего» воздействия на пограничный слой. Оребрение поверхности приводит к противоположным эффектам: профиль  $u(y)$  становится более наполненным, вследствие чего зависимость  $H(Re)$  в этом



Фиг. 3

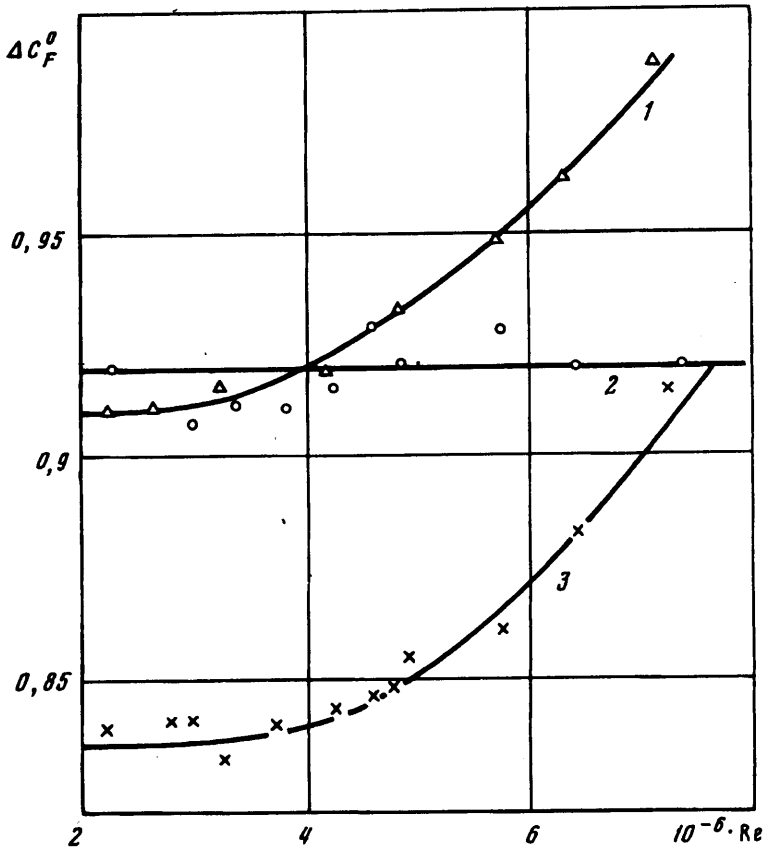
случае располагается ниже аналогичной зависимости для гладкой поверхности. При одновременном использовании разрушителей вихрей и оребрения отклонения зависимостей  $H(Re)$  для поверхностей с исследуемыми устройствами от кривой  $H(Re)$  на гладкой пластине практически аддитивно складываются.

На фиг. 2 приведены типичные примеры отклонения  $\Delta u^\circ$  профиля средней скорости  $u(y)$  турбулентного пограничного слоя при наличии разрушителя вихрей и оребрения от профиля  $u_0(y)$  на гладкой пластине  $\Delta u^\circ = [u/u_0 - 1]$ . Видно, что профиль  $u(y)$  за разрушителем вихрей (точки 1) при  $y/\delta > 0,3$ , т. е. во внешней части пограничного слоя, располагается выше профиля  $u_0(y)$ . Это и приводит к меньшим значениям толщины потери импульса  $\delta^{**}$  при использовании таких устройств. На ребристой поверхности (точки 2) основное положительное отклонение профиля  $u(y)$  от  $u_0(y)$  наблюдается в основном в пристеночной области ( $y/\delta < 0,3$ ), что также приводит к уменьшению  $\delta^{**}$ . При совместном использовании разрушителей вихрей и риблетов (точки 3) значения отклонений скорости  $\Delta u^\circ$  практически суммируются, что приводит к отмеченному выше характеру поведения зависимостей  $H(Re)$ .

5. Влияние разрушителей вихрей и оребрения на сопротивление трения. На фиг. 3 приведены зависимости относительного коэффициента местного трения  $c_f/c_{f0}$  для ребристой поверхности (точки 1), а также для гладкой и ребристой поверхностей с разрушителями вихрей (точки 2 и 3), от числа  $Re$ , вычисленного по расстоянию до центра плавающего элемента. Эти результаты получены непосредственным измерением силы трения с помощью плавающего элемента. Из приведенных данных видно, что использование разрушителей вихрей как на гладкой, так и на оребренной пластинах приводит к снижению местного коэффициента трения на 9—10%. Аналогичные результаты наблюдались и в случае риблетов с более крупным шагом ( $h = 0,22$  мм,  $s = 0,53$  мм).

Таким образом, при одновременном использовании разрушителей вихрей и риблетов снижение  $c_f$  практически является суммой воздействий от каждого из устройств в отдельности. Этот вывод полностью согласуется с результатами, полученными авторами ранее при исследовании совместного влияния разрушителей вихрей и риблетов с другими геометрическими параметрами [14].

Исследование совместного влияния рассматриваемых устройств на полное сопротивление трения осуществлялось методом импульсов. При этом оценка эффективности снижения турбулентного трения находилась согласно соотношению (1.1).



Фиг. 4

Снижение сопротивления участка поверхности пластины на длине  $x-x_0 = 1800$  мм с данными устройствами порознь и совместно показано на фиг. 4 в виде зависимой относительного выигрыша в полном сопротивлении  $\Delta C_F^0$  от числа  $Re$ . Из приведенных результатов видно, что эффективность разрушителей вихрей (кривая 2) составляет 8% во всем исследованном диапазоне чисел  $Re = (2-7,5) \cdot 10^6$ . Максимальное уменьшение коэффициента трения на ребристой поверхности (кривая 1) составляет 8—9% (при  $s^+ = 12-15$ ). Общее снижение сопротивления трения участка пластины практически оказалось равно сумме соответствующих значений от каждого из устройств в отдельности (кривая 3). При числах Рейнольдса  $2 \cdot 10^6 < Re < 5 \cdot 10^6$  суммарное снижение турбулентного трения на участке длиной 1800 мм составило около 16%.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Walsh M. J., Weinstein L. M. Drag and heat transfer on surfaces with small longitudinal fins//AIAA Pap. 1978. № 1161. 11 p.
2. Walsh M. J. Turbulent boundary layer drag reduction using riblets//AIAA Pap. 1982. № 169. 8 p.
3. Енютин Г. В., Лашков Ю. А., Самойлова Н. В. и др. Экспериментальное исследование влияния продольного оребрения на сопротивление трения плоской пластины//Изв. АН СССР. МЖГ. 1987. № 2. С. 140—145.
4. Енютин Г. В., Лашков Ю. А., Самойлова Н. В. и др. Влияние скоса потока на аэродинамическую эффективность мелкорребристых поверхностей//Изв. АН СССР. МЖГ. 1991. № 1. С. 37—41.

5. Енютин Г. В., Лашков Ю. А., Самойлова Н. В. и др. Экспериментальное исследование турбулентного трения на поверхностях с прерывистым продольным оребрением//Уч. зап. ЦАГИ. 1991. Т. 22. № 3. С. 43—50.
6. Енютин Г. В., Лашков Ю. А., Самойлова Н. В. и др. Влияние внешней турбулентности и градиента давления на эффективность снижения турбулентного трения на мелкоробристой поверхности//Уч. зап. ЦАГИ. 1991. Т. 22. № 4. С. 33—38.
7. Coustols E., Gleyzes C., Schmitt V., Berrue P. Etude experimentale de la reduction du frottement turbulent du moyen de parois rainurees//24-eme Colloque d'Aerodynamique appliquee. Poitiers, 1987.
8. Walsh M. J. Riblets//Progr. in Astronaut. and Aeronaut. 1990, v. 123. P. 203—261.
9. Хефнер Н., Вайнштейн М., Бушнел М. Уменьшение турбулентного сопротивления трения с помощью разрушения больших вихрей//Снижение вязкостного трения. М.: Машиностроение, 1984. С. 130—147.
10. Bushnell D. M. Turbulent drag reduction for external flows//AIAA Pap. 1983. № 227. 20 p.
11. Walsh M. J., Lindemann A. M. Optimization and application of riblets for turbulent drag reduction//AIAA Pap. 1984. № 347. 10 p.
12. Savill A. M., Koury E., Sebastian W., Squire L. C. Local drag balance measurements for the combination of Hoecht U-groove riblets with flat plate manipulators//Pap. Turb. Drag Reduction Working Party, 3rd Conf. ONERA-Chatillon, Paris, 1988.
13. Savill A. M. Effect of turbulent boundary layer structure of longitudinal riblets alone and in combination with outer layer devices//Pap. Intern. Sympos. on flow Visualization 4th. Paris, 1986. P. 303—308.
14. Гудилин И. В., Енютин Г. В., Ким А. Ю. и др. Экспериментальное исследование совместного влияния продольного оребрения и разрушителей вихревых структур на турбулентное трение//Уч. зап. ЦАГИ. 1989. Т. 20. № 6. С. 8—14.
15. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. М.: Наука, 1974. 711 с.
16. Турбулентные течения в пограничном слое. Ч. 2. Расчетные и экспериментальные исследования//Обзор ОНТИ ЦАГИ. 1980. № 575. 187 с.

Москва

Поступила в редакцию  
1.II.1994