

УДК 533.6.013.124

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПРОДОЛЬНОГО ОРЕБРЕНИЯ НА СОПРОТИВЛЕНИЕ ТРЕНИЯ ПЛОСКОЙ ПЛАСТИНЫ

ЕНЮТИН Г. В., ЛАШКОВ Ю. А., САМОЙЛОВА Н. В.,
ФАДЕЕВ И. В., ШУМИЛКИНА Е. А.

Для современных самолетов, рассчитанных на большую дальность полета при числе Маха $M_\infty = 0,7-0,8$, сопротивление трения составляет приблизительно 60% от полного сопротивления самолета, причем сопротивление трения фюзеляжа составляет 30%, а крыла — 20–25% от общего сопротивления.

Данная работа посвящена исследованию одного из возможных способов снижения сопротивления трения, состоящего в применении мелкоребристых поверхностей с ребрами, направленными вдоль потока. Этот способ снижения трения описан в зарубежной литературе (см., например, [1]). В отечественной литературе результатов таких исследований не опубликовано.

Уже в 1956 г. экспериментально было показано, что при рассчитанном по гидравлическому диаметру канала числе Рейнольдса $Re = 10^3$ течение в углах оставалось ламинарным на участках до 40% по высоте треугольника [2]. Было высказано предположение, что наблюдаемый эффект обусловлен подавлением турбулентности в угловых областях из-за малости поперечных масштабов. В более поздних работах, например [3], отмечались аналогичные эффекты, приводившие к заметному снижению коэффициента трения при турбулентном режиме течения в эксцентрических кольцевых каналах.

Влияние оребрения на частоту турбулентных выбросов и сопротивление трения при дозвуковой скорости потока впервые было исследовано в 1966 г. [4]. Высота ребер h прямоугольной формы варьировалась в диапазоне $h^+ = 45-111$, а расстояние s^+ между ними изменялось от 190 до 373. Здесь и ниже значения h и s выражены в следующих безразмерных переменных:

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

Здесь u_∞ — скорость набегающего потока, c_f — коэффициент трения, ν — вязкость. Было установлено, что при определенных значениях высоты и расстояния между ребрами частота турбулентных выбросов уменьшается на 20–25%, а сопротивление трения оребренной поверхности — на 3–4% по сравнению с сопротивлением трения гладкой пластины.

В [4] также упомянуто о других экспериментальных исследованиях влияния прямоугольного оребрения на сопротивление, в которых были получены противоположные результаты: при $h^+ = 70-150$ и $s^+ = 50-1100$ оребрение приводило к увеличению силы трения на 10–50%. В этой работе было отмечено, что треугольные ребра при прочих равных условиях меньше увеличивают омываемую потоком поверхность (по сравнению с прямоугольными ребрами) и поэтому могут привести к снижению сопротивления трения на оребренной поверхности.

Наиболее исчерпывающие результаты экспериментального исследования в дозвуковом потоке ($u_\infty \leq 46$ м/с) турбулентного сопротивления трения оребренных поверхностей изложены в [4–6]. Наибольшее снижение трения (~8%) в этих исследованиях было достигнуто на модели с треугольным профилем ребра ($h = s = 0,51$ мм) при $h^+ = s^+ = 12$. Для искусственного утолщения пограничного слоя использовались турбулизаторы.

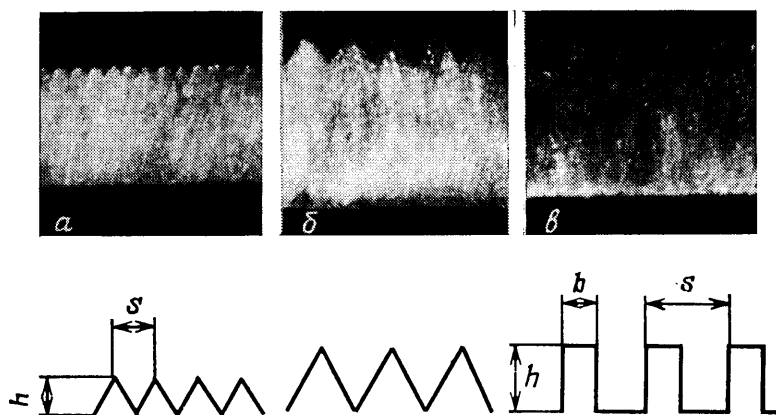
В настоящей работе приведены результаты экспериментального исследования весовым методом влияния продольного оребрения на сопротивление трения плоской пластины. Эти исследования проводились как при естественно развитом турбулентном пограничном слое, так и при наличии турбулизатора в безградиентном потоке.

1. Испытания проводились в малотурбулентной аэродинамической трубе с закрытой рабочей частью с поперечным сечением 1×1 м и длиной 4 м. Скорость потока u_∞ в рабочей части изменялась в опытах от 5 до 100 м/с, при этом уровень

среднеквадратичных пульсаций продольной составляющей скорости не превышал 0,02–0,04%.

Базовая модель, на которой проводились исследования, представляла собой пластину с хордой, равной 3,4 м, размахом 1 м, максимальной толщиной 110 мм. Носок пластины выполнен в виде полуэллипса (отношение осей 1:12), хвостовая часть имела оживальную форму. В аэродинамической трубе пластина устанавливалась горизонтально в среднем по высоте сечения рабочей части. Передняя кромка пластины удалена на 460 мм от сечения сопряжения сопла трубы с ее рабочей частью.

В пластине был вырезан люк размером 285×285 мм, в котором размещались одноконтентные тензометрические весы для измерения силы трения. Элементы исследуемых поверхностей наклеивались на подвижную («плавающую») пластину весов, которая также имела форму квадрата со стороной 285 мм и устанавливалась в люке заподлицо с неподвижной базовой пластиной. Рабочая поверхность пластины весов и прилегающая неподвижная поверхность с погрешностью не более 0,02 мм



Фиг. 1

были плоскими. Зазор между плавающей и неподвижной пластинами составлял 0,03–0,06 мм у передней кромки и 0,1–0,15 мм у задней и боковых кромок.

На фиг. 1 даны фотографии исследованных моделей ребристых поверхностей с увеличением в 25 раз. Модели были выбраны так, чтобы оценить влияние размеров ребер и их формы на силу поверхностного трения. Две ребристые поверхности имели профиль ребра, близкий к треугольному: модель А с высотой ребер $h=0,078$ мм и расстоянием между ними $s=0,097$ мм (фиг. 1, а) и модель В с $h=0,17$ мм, $s=0,25$ мм (фиг. 1, б). Следует отметить, что у модели А ребро изготовлено с большим притуплением вершины, чем у модели В, и поэтому в большей степени отличалось от треугольного. Отношение h/s у моделей А и В равно 0,8 и 0,68 соответственно. Третья ребристая поверхность (модель С) – с ребром прямоугольной формы: $h=0,215$ мм, $s=0,26$ мм, ширина площадки на вершине ребра $b=0,096$ мм (фиг. 1, в). Исследованные поверхности были изготовлены из листового материала толщиной 0,8 мм.

На весах была измерена также сила сопротивления трения эталонной гладкой пластины.

2. В процессе испытаний на каждом режиме при фиксированной скорости потока в трубе измерялись: сила трения F , действующая на поверхность установленной на весах пластины, скоростной напор Δp в рабочей части в зоне весов, полное давление p_0 в форкамере, статическое давление p в контрольном сечении трубы и температура потока.

При измерении силы сопротивления трения ребристых и гладкой поверхностей требовалось обеспечить безградиентное поле течения с естественно развитым турбулентным пограничным слоем. В ранее проведенных исследованиях было установлено, что в зоне расположения весов при скорости потока $u_\infty < 25$ м/с режим течения в пограничном слое – ламинарный. Измеренные с помощью термоанемометра профили скоростей и пульсаций при $u_\infty > 25$ м/с полностью соответствуют естественно развитому турбулентному пограничному слою. Толщина пограничного слоя в зоне исследуемой поверхности составляла примерно 20–25 мм при турбулентном режиме течения. Число Рейнольдса изменялось от $6 \cdot 10^5$ до

$1,2 \cdot 10^7$ при изменении скорости потока в трубе u_∞ от 5 до 100 м/с (в качестве характерной длины взято расстояние от носка модели до центра пластины весов, равное 2 м).

Ряд опытов был проведен с использованием турбулизатора, что обеспечивало турбулентный режим течения в пограничном слое во всем исследованном диапазоне скоростей потока. При этом при тех же скоростях u_∞ число Рейнольдса Re_x , соответствующее увеличенной толщине пограничного слоя, возрастало примерно вдвое. Турбулизатор представлял собой барьер высотой 7 мм, установленный по нормали к поверхности пластины по всей ее ширине на расстоянии 1,8 м вверх по потоку от исследуемой поверхности.

Турбулизатор такого типа позволяет заметно увеличить толщину пограничного слоя при сохранении его характеристик, близких к естественным [7], что подтвердилось термоанемометрическими измерениями. В проведенных исследованиях не удалось обеспечить нулевой продольный градиент давления. Давление вдоль пластины слабо падало. Это падение давления на длине исследуемого образца составляло менее 1% от скоростного напора и оставалось неизменным во всех опытах.

В весовых испытаниях возмущения в пограничный слой могут быть внесены за счет вдува или отсоса пограничного слоя через щели между «плавающей» пластиной весов и неподвижной базовой пластиной. В данных опытах давление в зоне весов в полости пластины поддерживалось близким к статическому давлению на ее поверхности (разность давлений не превышала 1 мм водяного столба). Это практически исключало перетекание газа через щель.

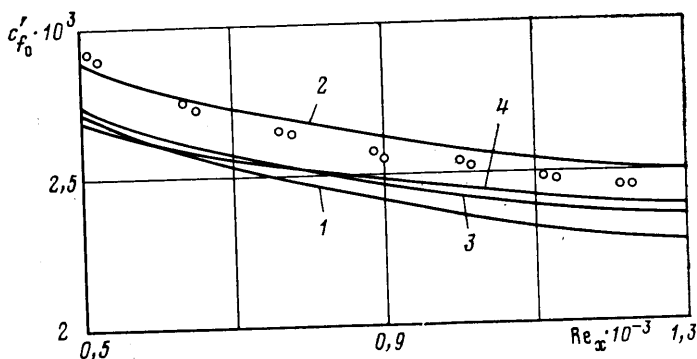
Для обеспечения достаточной точности измерения силы трения очень важно установить поверхность подвижной пластины весов строго заподлицо с неподвижной пластиной. В данных опытах погрешность установки исследуемых поверхностей относительно кромок базовой пластины не превышала 0,03 мм. При определении силы сопротивления контрольной гладкой пластины проводились две серии испытаний — с турбулизатором и без него. При этом гладкую пластину неоднократно удаляли из трубы, а затем устанавливали вновь на весах. Результаты измерений сопротивления турбулентного трения гладкой пластины воспроизводились с точностью $\pm 2\%$. Значения коэффициента трения гладкой пластины c_{f0}' аппроксимировались зависимостями вида $c_{f0}' = A [\lg(u_\infty - u_0)]^m$. Константы A , u_0 , m определялись методом наименьших квадратов.

Можно ожидать, что если при испытаниях ребристая поверхность устанавливается вровень с неподвижной гладкой пластиной по вершинам ребер, то измеряемое сопротивление трения занижается, а если по основаниям ребер, то завышается. Наиболее точный результат, очевидно, может быть получен, когда неподвижная пластина также является ребристой. В данных исследованиях таких опытов не проводилось, по-видимому, так же как и в исследованиях [4–6], где нет никаких указаний на это. Более того, в [4–6] не оговорено, каким именно образом ребристая поверхность устанавливалась по отношению к базовой пластине. В настоящей работе проводились испытания с ребристыми поверхностями, установленными заподлицо с гладкой базовой пластиной, а также выступавшими над ней: ребристые поверхности с треугольной формой ребра выступали на высоту ребра h , а с прямоугольной формой — на половину высоты ребра $h/2$.

Ниже для каждой исследованной ребристой поверхности приведены результаты, полученные при всех способах установки, поскольку истинная величина измеренного коэффициента трения находится, по-видимому, в пределах соответствующих экспериментальных значений c_f' . Для поверхности A с $h=0,078$ выступ на высоту ребра практически не влияет на результаты. Для двух других ребристых поверхностей выступ увеличивает значение коэффициента трения на 2–4%.

Представляет интерес тот факт, что небольшое естественное загрязнение ребристой поверхности не влияет на величину силы трения. Это обнаружилось при сравнительных испытаниях незагрязненной и загрязненной ребристой поверхности, когда пылинки в канавках были видны через лупу и не удалялись при обдуве струей воздуха под давлением. Этот результат позволяет надеяться на снижение требований к чистоте обработки поверхности внутри канавок, а также к загрязнению ребристой поверхности при эксплуатации ее на самолете.

3. На фиг. 2 для эталонной гладкой пластины приведены измеренные на весах значения коэффициента трения c_{f0}' в функции от числа Re_x . Там же нанесены расчетные зависимости местного коэффициента трения



Фиг. 2

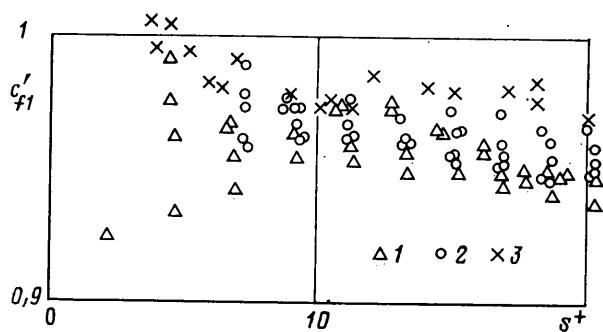
$c_{f0}'(Re_x)$, определенные по известным соотношениям Прандтля $c_{f0}' = 0,0592 Re_x^{-0,2}$, Шульц — Грунова $c_{f0}' = 0,37 (\lg Re_x)^{-2,584}$, Прандтля — Шлихтинга $c_{f0}' = (2 \lg Re_x - 0,65)^{-2,3}$ и Никурадзе $c_{f0}' = 0,02296 Re_x^{-0,139}$ (кривые 1—4 соответственно).¹

При вычислении местного коэффициента трения по величине силы трения, действующей на пластину размером 285×285 мм, получим некоторую осредненную по длине оценку величины местного коэффициента трения. В силу нелинейной зависимости $c_{f0}'(Re_x)$ эта оценка, по-видимому, будет несколько завышенной по сравнению с истинным значением местного коэффициента трения, что подтверждается данными на фиг. 2. Однако в целом измеренные в настоящих опытах значения c_{f0}' для гладкой пластины удовлетворительно согласуются с соответствующими классическими результатами. Так, отличие от зависимости Прандтля — Шлихтинга местного коэффициента трения не превышает 3% при $Re_x > 0,5 \times 10^7$. Отметим, что в [4—6] нет аналогичного сравнения измеренных на весах значений c_{f0}' с классическими данными.

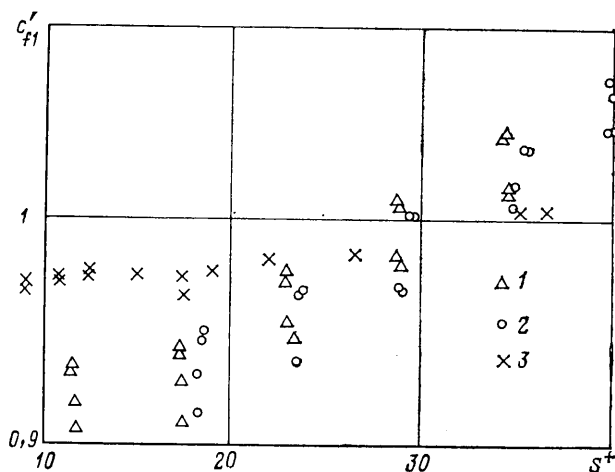
На фиг. 3—5 представлены результаты весовых измерений сопротивления трения трех ребристых поверхностей (модели А, В, С соответственно) при испытаниях с турбулизатором (точки 1) и без него (точки 2). Здесь приведены зависимости относительно коэффициента трения $c_{f1}' = c_f'/c_{f0}'$ от безразмерного шага оребрения s^+ , где c_f' и c_{f0}' — местный коэффициент трения ребристой и гладкой поверхностей соответственно. Значения c_{f0}' определялись по осредненным зависимостям, описанным выше; значения c_f' не осреднялись и для наглядности зависимости относительного коэффициента трения c_{f1}' приведены для различных положений ребристой поверхности — заподлицо и с выступом в пределах высоты ребра (истинная величина c_{f1}' заключена в пределах этих значений).

Представление результатов в безразмерных переменных $c_{f1}'(s^+)$ общепринято в работах по исследованию оребрения и связано с гипотезой о

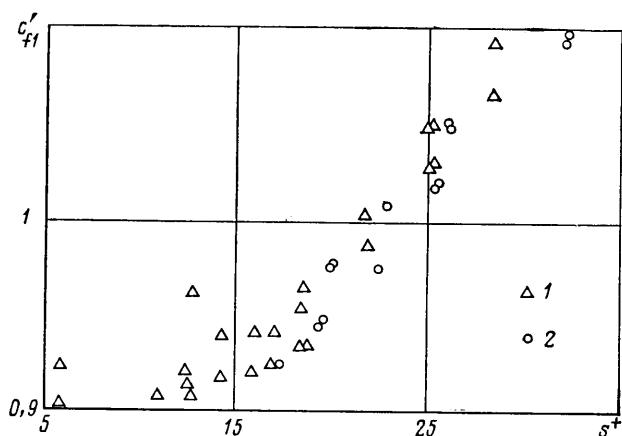
¹ На фиг. 2 вместо $Re_x \cdot 10^{-3}$ следует читать $Re_x \cdot 10^{-7}$.



Фиг. 3



Фиг. 4



Фиг. 5

воздействию продольных канавок на зарождение и развитие турбулентных пристеночных выбросов. Это воздействие, по-видимому, наиболее эффективно в том случае, когда размеры ребер сравнимы с областью возникновения выбросов. Как известно, область зарождения турбулентных выбросов ограничена по толщине пограничного слоя $y^+ = 30$, а поперечное расстояние между ними в безразмерном виде равно 100. В данных опытах величина h^+ варьировалась от 2 до 45, а величина s^+ — от 2 до 55.

Из фиг. 3—5 отчетливо видно, что продольное оребрение позволяет существенно снизить сопротивление трения по сравнению с гладкой по-

верхностью. Наиболее эффективной из исследованных поверхностей оказалась ребристая поверхность B с треугольной формой ребра с параметрами $h=0,17$ мм, $s=0,25$ мм: максимальный выигрыш в трении на фиг. 4 достигает 7–8%. Снижение трения наблюдается в диапазоне $s^+ \leq 30$, при больших значениях s^+ сопротивление трения увеличивается по сравнению с гладкой пластиной.

Максимальный выигрыш в трении для поверхности A также с формой ребра, близкой к треугольной, с параметрами $h=0,078$ мм, $s=0,097$ мм несколько меньше и составляет 4–5% (фиг. 3). Однако эта поверхность обладает тем преимуществом, что обеспечивает более стабильное снижение трения в диапазоне $s^+ \leq 20$. Кроме того, на фиг. 3 заметна тенденция к снижению сопротивления трения с ростом величины s^+ от 15 до 20, тогда как выигрыш в трении за счет оребрения B (фиг. 4) снижается с ростом s^+ . Возможно, ребристая поверхность A позволит расширить диапазон снижения трения по величине s^+ в дальнейших исследованиях.

Для ребристой поверхности с прямоугольной формой ребра с параметрами $h=0,215$ мм, $s=0,26$ мм максимальный выигрыш составляет 7–9%. Как видно из фиг. 5, снижение сопротивления трения наблюдается при $s^+ \leq 23$.

Результаты исследований аналогичных ребристых поверхностей (точки 3), полученные в [6], приведены для сравнения на фиг. 3, 4. Видно, что выигрыш в трении, полученный в данной работе, выше, чем в [6], особенно в случае поверхности B . Это может быть обусловлено, во-первых, некоторым различием параметров моделей: в [6] относительная высота ребра h/s имела значения 0,54 и 0,45, в рассматриваемом случае — соответственно 0,68 и 0,8 (модель B , A). Во-вторых, длина пластины в данных исследованиях составляла 28,5 см, а в [6] — 91,4 см, тогда как по результатам [4] оребрение более эффективно на начальных участках поверхности. Отметим, что в данных опытах не наблюдалось снижения эффективности оребрения с увеличением протяженности участка оребрения.

В целом проведенные исследования показали, что снижение турбулентного трения за счет применения продольного оребрения может достигать 8–10%.

Авторы выражают благодарность В. В. Михайлову за большую помощь в работе.

ЛИТЕРАТУРА

1. Walsh M. J. Turbulent boundary layer drag reduction using riblets // AIAA Pap. 1982. № 169. 8 p.
2. Eckert E. R. G., Irvine T. F. Jr. Flow in cornes of passages with noncircular cross sections // Trans. ASME. 1956. V. 78. № 4. P. 709–718.
3. Jonsson V. K., Sparrow E. M. Experiments on turbulent-flow phenomena in eccentric annular ducts // J. Fluid Mech. 1966. V. 25. Pt 1. P. 65–86.
4. Уолш М. Д. Сопротивление пластины с продольными пазами и ребрами. // Снижение вязкостного трения. М.: Машиностроение, 1984. С. 189–206.
5. Walsh M. J., Weinstein L. M. Drag and heat transfer on surfaces with small longitudinal fins // AIAA Pap. 1978. № 1161. 11 p.
6. Walsh M. J., Lindemann A. M. Optimization and application of riblets for turbulent drag reduction // 22nd AIAA Aerospace Sciences Meeting. January 9–12, 1984. Reno, Nevada.
7. Klebanoff P. S., Diehl Z. W. Some features of artificially thickened fully developed turbulent boundary layers with zero pressure gradient // NACA, Techn. Note. 1951. № 2475. 55 p.

Москва,
Харьков

Поступила в редакцию
21.VII.1986