

УДК 532.5.013.12

© 1996 г. И.В. ГУДИЛИН, Ю.А. ЛАШКОВ, В.Г. ШУМИЛКИН

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РИБЛЕТОВ И РАЗРУШИТЕЛЕЙ ВИХРЕВЫХ СТРУКТУР НА СОПРОТИВЛЕНИЕ ТЕЛА ВРАЩЕНИЯ

В аэродинамической трубе малых скоростей на модели тела вращения исследовано влияние риблетного покрытия и разрушителей вихревых структур на турбулентное трение и на полное сопротивление модели.

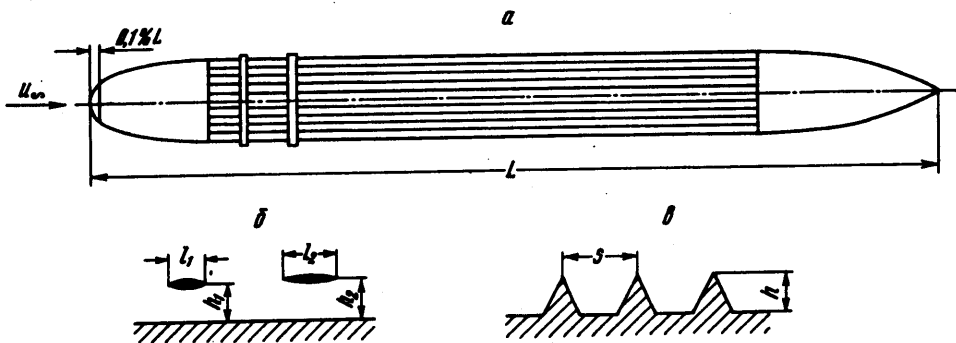
Задача снижения сопротивления турбулентного трения на плоских поверхностях с микроорегрированием при дозвуковых скоростях к настоящему времени изучена достаточно полно [1–7]. Непосредственные измерения напряжения трения с помощью плавающего элемента в малотурбулентных безградиентных потоках устойчиво показывают, что при оптимальных форме и шаге оребрения сопротивление турбулентного трения за счет использования риблетов может быть снижено на 7–9%. Максимальный выигрыш в трении при использовании риблетов в условиях повышенной внешней турбулентности ($\epsilon_x \approx 5\%$) в потоке с положительным градиентом давления достигал 16% [7].

В значительно меньшей степени исследовано влияние риблетов на полное сопротивление тел, хотя заранее не очевидно, что мелкорегрированное покрытие не влияет одновременно и на другие составляющие полного сопротивления: волновое, донное и так называемое "вредное" сопротивление, обусловленное, в частности, технологическими неровностями поверхности.

Также недостаточно детально исследовано влияние разрушителей вихревых структур на снижение турбулентного трения. При исследовании на пластине совместного влияния риблетов и разрушителей вихрей на турбулентное трение было показано, что в этом случае имеет место суммирование эффектов, обусловленных применением указанных элементов порознь [8].

Исследования проводились в аэродинамической трубе малых скоростей с открытой рабочей частью на модели тела вращения типа фюзеляжа (фиг. 1, а) с внутримодельными тензовесами, которые позволяли измерять независимо сопротивление средней (цилиндрической) части, а также полное сопротивление тела вращения. Модель с относительным удлинением $\lambda = 11,25$ представляла собой прямой цилиндр диаметром 200 мм и общей длиной $L = 2250$ мм. Отношения длин носовой, цилиндрической и хвостовой частей к диаметру миделевого сечения модели составляли соответственно $\lambda_1 = 1,25$, $\lambda_2 = 8$, $\lambda_3 = 2$. Форма носовой и хвостовой частей была выбрана в соответствии с зависимостью $r = [\Delta x(2 - \Delta x)]^m$, где Δx – координата, отсчитываемая вдоль оси симметрии от носика (хвостика), отнесенная к длине носовой (хвостовой) части, r – текущий поперечный радиус носовой (хвостовой) части, отнесенный к радиусу цилиндрического участка: $m = 0,45$ для носовой части, $m = 0,9$ для хвостовой части.

Модель устанавливалась на подвеске из шести струн диаметром 1,5 мм каждая горизонтально под нулевым углом атаки вдоль центральной оси симметрии рабочей части. При этом носовая часть на 200 мм располагалась внутри сопла, а хвостовая часть была на 300 мм заглублена в диффузоре. На расстоянии от носка модели,



Фиг. 1

равном 0,001 ее полной длины, вплотную к поверхности устанавливалось кольцевой турбулизатор. В качестве турбулизатора использовалась проволока диаметром 1 мм.

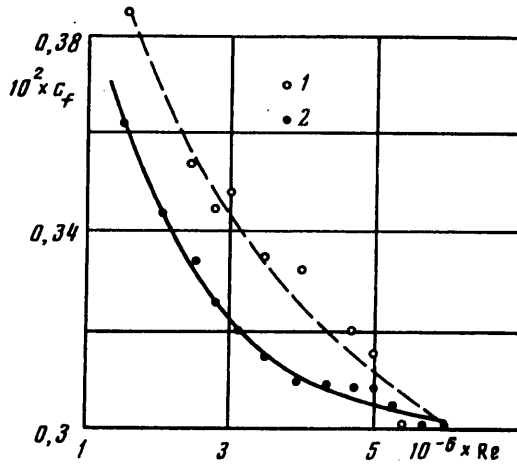
Разрушитель вихревых структур был выполнен в виде двух колец, изготовленных из плоской стальной ленты, толщиной $t_1 = t_2 = 0,15$ мм. Передние и задние кромки колец имели клинообразную форму с углом $\sim 20^\circ$. Расстояние от носка модели до передней кромки первого элемента разрушителя вихрей составляло 400 мм. Использовался разрушитель вихрей, состоящий из двух элементов со следующими параметрами (фиг. 1, б): $h_1 = 5$ мм, $h_2 = 6,5$ мм, $l_1 = 15$ мм, $l_2 = 20$ мм. Элементы разрушителя устанавливались по схеме "тандем" (один за другим) на расстоянии 140 мм между ними. В зависимости от скорости внешнего потока параметры разрушителя вихрей в безразмерном виде были равны: $t_1/\delta = 0,012-0,015$, $t_2/\delta = 0,011-0,013$, $l_1/\delta = 1,25-1,5$, $l_2/\delta = 1,43-1,67$, $h_1/\delta = 0,42-0,5$, $h_2/\delta = 0,47-0,54$. Безразмерное расстояние от задней кромки второго элемента до конца цилиндрического участка модели составляло $\Delta x/\delta = 86-104$. Здесь δ – толщина пограничного слоя в сечении, где устанавливался первый элемент разрушителя вихрей.

На этой же модели были проведены исследования по снижению турбулентного трения при оребренной цилиндрической части. На боковую поверхность цилиндрической части было нанесено восемь мелкоребристых пластин (размеры в плане 314×365 мм, толщина 0,55 мм). Эти пластины имели различную геометрию оребрения (фиг. 1, в): высота ребра $h = 0,16-0,25$ мм, расстояние между вершинами ребер $s = 0,32-0,5$ мм. Начало оребренного участка располагалось на расстоянии 320 мм от носка модели (фиг. 1), длина оребренной части составляла 1460 мм.

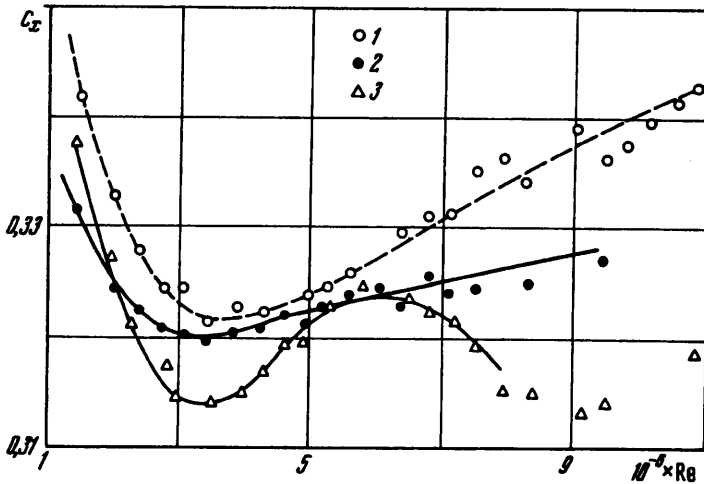
Результаты измерения сопротивления цилиндрической части модели (которое определяется лишь трением) с оребрением и без оребрения находятся в хорошем соответствии с результатами, полученными ранее на плоской пластине [5]. На фиг. 2 приведены зависимости местного коэффициента турбулентного трения c_f для гладкого (кривая 1) и оребренного (кривая 2) цилиндров в зависимости от числа Re, вычисленного по длине модели. Максимальное снижение величины c_f за счет оребрения составило 7%.

На фиг. 3 приведены экспериментальные зависимости коэффициента полного сопротивления модели c_x от числа Re. Здесь кривая 1 относится к гладкой модели, а кривые 2 и 3 – к модели с риблетами и к модели с разрушителями вихрей. Относительное снижение коэффициента полного сопротивления $c'_x = c_x / c_{x0}$ за счет применения риблетов (кривая 1) или разрушителей вихрей (кривая 2) показано на фиг. 4, где c_{x0} – коэффициент полного сопротивления гладкой модели.

Из анализа приведенных экспериментальных данных следует, что величина сопротивления трения цилиндрической части составляет 25–30% полного сопротивления модели. Микрооребрение цилиндрической части приводит к уменьшению турбулентного трения на ней на 6–7% при $Re = (1-4) \cdot 10^6$, что дает снижение полного сопротивления на ~2% (при тех же значениях Re). Таким образом, в указанном диапазоне чисел Рей-



Фиг. 2



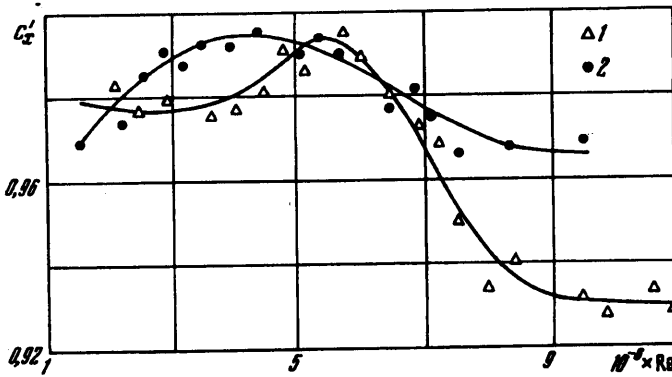
Фиг. 3

нольдса результаты измерений трения и полного сопротивления согласуются между собой и с результатами, полученными на плоской пластине [5].

Уменьшение полного сопротивления оребренной модели при $Re > 6 \cdot 10^6$ (фиг. 3) обусловлено, по-видимому, благоприятным влиянием оребрения на обтекание хвостовой части модели и, в частности, на затягивание отрыва потока. О наличии отрыва на хвостовой части модели свидетельствует ряд фактов: повышение c_x с ростом скорости потока, большая абсолютная величина коэффициента полного сопротивления, а также сравнительно малая доля трения в общем сопротивлении. Следует, однако, отметить, что вопрос о положительном влиянии микрооребра на обтекание хвостовой части требует отдельного исследования.

Экспериментальные результаты, относящиеся к испытаниям модели с разрушителями вихрей и также приведенные на фиг. 3–4, можно прокомментировать следующим образом: при $Re = (1-6) \cdot 10^6$ снижение сопротивления трения на цилиндрической части за счет применения разрушителя вихрей (включая потери на разрушителе) составило $\sim 3-4\%$, что позволило снизить полное сопротивление на $1-1,5\%$; при $Re = (7-9) \cdot 10^6$ снижение c_x на $2,5-3\%$ происходит, вероятно, в результате благоприятного влияния разрушителей на обтекание хвостовой части тела вращения.

В заключение отметим, что сравнительно небольшое уменьшение полного сопро-



Фиг. 4

тивления модели за счет использования разрушителей вихрей обусловлено неоптимальностью параметров использованных элементов рассматриваемого устройства. Это позволяет надеяться, что при повышении эффективности разрушителей вихревых структур хотя бы до уровня $\Delta c_f / c_{f0} \approx 8\%$, полученного ранее на пластине [8] с учетом независимости механизмов воздействия разрушителей вихрей и оребрения на турбулентный пограничный слой, при совместном использовании указанных устройств суммарное сопротивление тела вращения типа фюзеляжа может быть уменьшено на 6–8% и, возможно, более. Полученное уменьшение полного сопротивления нельзя объяснить только снижением трения за разрушителями вихрей или на риблетной поверхности. Как уже было отмечено выше, по-видимому, микрооробрение и разрушители вихрей благоприятно влияют на сопротивление хвостовой части модели. Этот вывод соответствует результатам изложенным в [9], где приведены данные, полученные при испытаниях при околосвуковых скоростях модели тела вращения с риблетным покрытием.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Walsh M.J. Riblets // Progr. in Astronaut. and Aeronaut. 1990. V. 123. P. 203–261.
2. Walsh M.J., Weinstein L.M. Drag and heat transfer on surfaces with small longitudinal fins // AIAA Paper. 1978. № 1161. 11 p.
3. Walsh M.J., Lindemann A.M. Optimization and application of riblets for turbulent drag reduction // AIAA Paper. 1984. № 347. 10 p.
4. 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.
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 скоса потока на аэродинамическую эффективность мелкорребристых поверхностей // Изв. АН СССР. МЖГ. 1991. № 1. С. 37–41.
7. Енютин Г.В., Лашков Ю.А., Самойлова Н.В. и др. Влияние внешней турбулентности и градиента давления на эффективность снижения турбулентного трения на мелкорребристой поверхности // Уч. зап. ЦАГИ. 1991. Т. 22. № 4. С. 33–38.
8. Гудилин И.В., Енютин Г.В., Ким А.Ю. и др. Экспериментальное исследование совместного влияния продольного оребрения и разрушительных вихревых структур на турбулентное трение // Уч. зап. ЦАГИ. 1989. Т. 20. № 6. С. 8–14.
9. Коновалов С.Ф., Лашков Ю.А., Михайлов В.В. и др. Влияние продольного микрооробрения на сопротивление тела вращения // Изв. РАН. МЖГ. 1992. № 2. С. 174–178.

Москва

Поступила в редакцию
10.III.1995