

УДК 533.69:532.517.4

© 1998 г. С.Ф. КОНОВАЛОВ, Ю.А. ЛАШКОВ, В.В. МИХАЙЛОВ

**ВЛИЯНИЕ МИКРООРЕБРЕНИЯ НА СОПРОТИВЛЕНИЕ ТЕЛА  
ВРАЩЕНИЯ, ОБТЕКАЕМОГО С КОРМОВЫМ ОТРЫВОМ ПОТОКА**

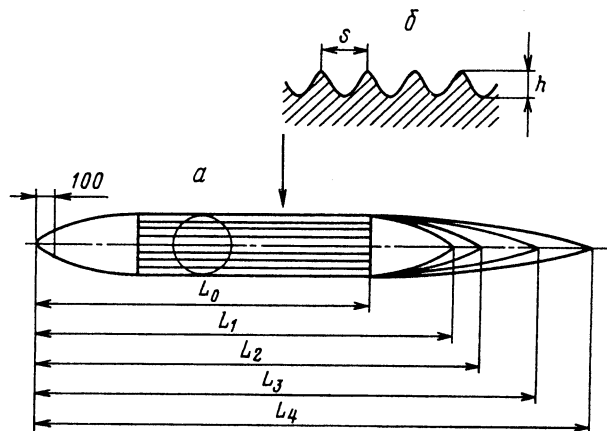
Изложены результаты измерений сопротивления осесимметричных тел с гладкой и оребренной центральной цилиндрической частью и афинно подобными хвостовыми частями различной длины. Экспериментальные данные получены при нулевом угле атаки, числах  $M = 0,25-0,85$  и  $Re = 10^7-2,4 \cdot 10^7$  (рассчитанных по длине тела без хвостовой части). Проведена визуализация кормового отрыва методом масляной пленки. Показано, что оребрение может приводить к уменьшению сопротивления не только за счет снижения турбулентного трения, но и вследствие сокращения зоны отрыва на гладкой кормовой части тела.

Измерения напряжения турбулентного трения на риблетных поверхностях [1–4] показали, что расположенные вдоль пристеночных линий тока ребра оптимальной формы и оптимального размера позволяют снизить трение на 6–9%. В [5] приведены результаты экспериментальных исследований сопротивления тела вращения с гладкой и оребренной центральной цилиндрической частью. Снижение сопротивления на микрооробренном теле оказалось значительно большим того уровня, который можно объяснить уменьшением турбулентного трения. Для объяснения указанного явления в [5] было высказано предположение о том, что микрооробрение может сократить зону отрыва потока на гладкой кормовой части тела. Другая возможная причина – изменение геометрии тела после удаления риблетного покрытия, в частности значительная остаточная шероховатость поверхности.

В данной работе последняя причина была практически исключена, так как риблетная пленка не удалялась, а тщательно заполировывалась. Это обстоятельство, а также сравнение значений сопротивления тел с различной величиной зоны отрыва и визуализация отрыва позволили сделать вывод об уменьшении сопротивления оребренного тела за счет сокращения зоны кормового отрыва.

**1. Постановка исследований.** При испытаниях измерялось полное сопротивление пяти моделей, различавшихся удлинением хвостовых частей (фиг. 1). Модели представляли собой тела вращения и устанавливались под нулевым углом атаки. Длины моделей  $L_i = 1,765, 2,222, 2,358, 2,656$  и  $2,983$  м ( $i = 0, 1, \dots, 4$ ). Условимся называть в дальнейшем модели с хвостовыми частями  $L_0, \dots, L_4$  соответственно моделями № 0, ..., 4. Диаметр цилиндрической части  $D = 0,2985$  м. Отношение длины хвостовой части к диаметру моделей соответственно равнялось  $\lambda_i = 0, 1, 5, 2, 3$  и 4.

Форма носовой и хвостовой частей моделей, как и в [5], соответствовала зависимости  $r = [\Delta x(2 - \Delta x)]^m$ . Здесь  $\Delta x$  – координата, отсчитываемая вдоль оси модели от носика (хвостика), отнесенная к длине носика (хвостика),  $r$  – текущий радиус поперечного сечения, отнесенный к диаметру цилиндрической части,  $m = 0,45$  и  $0,9$  для носовой и хвостовой частей. На расстоянии 100 мм (по оси) от носка модели вплотную к ее поверхности закреплялось кольцо-турбулизатор из проволоки диаметром 0,2 мм.



Фиг. 1. *a* – тела вращения с различными хвостовыми частями (модели № 0–4), *б* – форма оребрения: угол при вершине ребра –  $62^\circ$ , шаг  $s = 0,063$  мм, высота  $h = 0,035$  мм, радиус затупления около 4 мкм

На цилиндрическую часть модели с помощью двухсторонней липкой пленки наклеивалось риблетное покрытие. Толщина покрытия по вершинам ребер составляла 0,17 мм. Форма оребрения показана на фиг. 1.

Модель крепилась к платформе аэродинамических весов при помощи двух *x*-образных боковых и одной носовой стреловидной профилированных лент.

Испытания проводились в замкнутой аэродинамической трубе диаметром 2,48 и длиной рабочей части 4,85 м. Влияние подвески учитывалось введением стандартных поправок к измеренной величине сопротивления. Проводились трехкратные независимые испытания с последующим среднеарифметическим осреднением. Среднеквадратичный разброс результатов измерений 1%.

В отличие от методики, использованной в [5], перед проведением испытаний моделей с гладкой цилиндрической частью покрытие не удалялось, а тщательно заполировывалось.

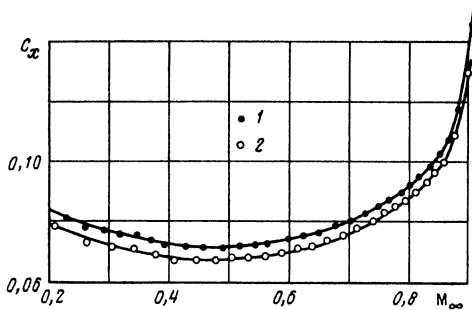
Для качественной оценки величины зоны отрыва осуществлялась его визуализация путем нанесения на хвостовые части тел пленки масла с сажей. Начальное давление в контуре трубы  $p = 10^5$  Н/м<sup>2</sup>. Значение коэффициента сопротивления  $c_x$  рассчитывалось по площади мишеля моделей, равной 0,7 м<sup>2</sup>.

**2. Разделение эффектов влияния микрооробрения.** Воздействие риблетных покрытий на течение связано с изменением характеристик турбулентного пограничного слоя, обусловленным микрогеометрией обтекаемой поверхности.

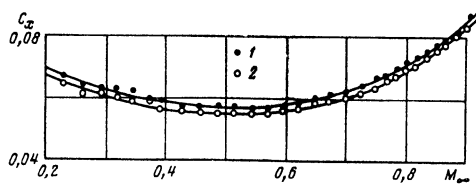
Поскольку при околосзвуковых скоростях обтекания влияние вязко-невязкого взаимодействия мало, основными эффектами, связанными с микрооробрением, должны быть изменения напряжения трения и (при определенных условиях) параметров отрыва потока.

Первый эффект зависит не только от геометрии риблетов и режима обтекания, но и от состояния исходной (без риблетов) поверхности. В связи с этим одной из целей настоящей работы был анализ причин "аномально" большого снижения сопротивления, полученного в [5], где состояние поверхности после удаления риблетного покрытия не контролировалось.

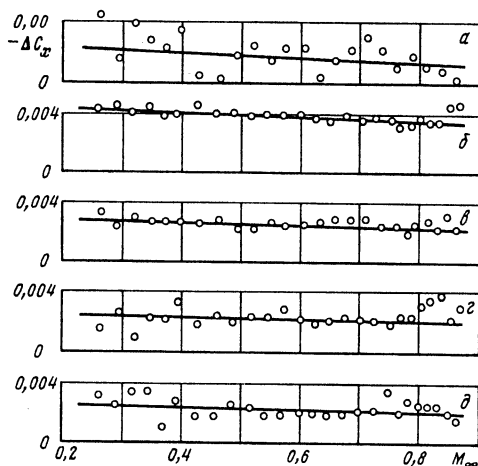
Геометрия одной из моделей (фиг. 1,  $L = L_3$ ) была та же, что и геометрия модели, испытанной в [5], а риблетное покрытие было одним и тем же. В обоих случаях испытания показали, что абсолютный выигрыш в коэффициенте сопротивления  $\Delta c_x$  слабо зависит от числа Маха и составляет  $\Delta c_x \approx -0,005$  [5] и  $\Delta c_x \approx -0,002$  (данная работа). Визуализация течения при  $M_\infty = 0,5$  показала отсутствие отрыва.



Фиг. 2. Коэффициент сопротивления  $c_x$  модели № 1 с гладкой (1) и оребренной (2) цилиндрической частью



Фиг. 3. Коэффициент сопротивления  $c_x$  модели № 4 с гладкой (1) и оребренной (2) цилиндрической частью



Фиг. 4. Выигрыш в сопротивлении  $-\Delta c_x$  за счет оребрения поверхности (фрагменты  $a-d$  соответствуют моделям № 0-4)

Отсюда следует, что для данной геометрии модели выигрыш в сопротивлении связан, по крайней мере при  $M_\infty < 0,5$ , с уменьшением напряжения турбулентного трения, а разница в  $\Delta c_x$  объясняется различным состоянием цилиндрической поверхности без оребрения в [5] и в данной работе. Таким образом, для оценки влияния собственно микрооребрения (исключая эффект уменьшения шероховатости) на турбулентное трение необходимо использовать значение  $\Delta c_x = -0,002$  ( $M_\infty < 0,5$ ). Это соответствует снижению трения на оребренной цилиндрической части модели на 6–7% при  $M_\infty = 0,25-0,5$ , если принять, что сопротивление обусловлено в основном трением.

Данные об эффективности использованного типа оребрения содержатся в [6], где приведены и соотношения для оценки безразмерного шага оребрения  $s^+$ , от которого зависит эта эффективность.

В обсуждаемых испытаниях при  $M_\infty = 0,2-0,5$  значения  $s^+ = 13-23$ , что, согласно [6], соответствует  $\Delta c_f = -(5-7)\%$  ( $c_f$  – коэффициент трения). В диапазоне  $M_\infty = 0,5-0,85$ , где  $s^+ = 23-30$ , эффективность оребрения падает с  $\Delta c_f = -5\%$  до  $\Delta c_f = -1\%$ . При этом  $c_x$  растет, что, очевидно, связано с кормовым отрывом потока, а  $\Delta c_x \approx \text{const}$ .

Все это позволяет предположить, что для данной модели при  $M_\infty = 0,5-0,85$  оребрение снижает сопротивление, связанное с отрывом потока (в которое, возможно, входило и волновое сопротивление). Естественно ожидать, что для тел с более развитой зоной отрыва подобное воздействие оребрения должно наблюдаться и при меньших числах  $M_\infty$ . Одним из индикаторов такого явления может служить превышение значения  $-\Delta c_x$  величины 0,002, которая соответствует снижению  $c_f$  на 7% на оребренной части моделей.

**3. Результаты исследований влияния микрооробрения на кормовой отрыв.** В испытаниях были определены значения коэффициентов сопротивления  $c_x$  моделей с риблетным и гладким (полированным) покрытием цилиндрической части в диапазоне  $M_\infty = 0,25-0,85$  ( $Re_\infty = 10^7-2,4 \cdot 10^7$ ). На фиг. 2, 3 показаны значения  $c_x$  для модели № 1 и модели № 4 с гладкой (кривая 1) и оребренной (кривая 2) поверхностью. Снижение коэффициента сопротивления, вызванное микрооробрением, для модели № 1 максимально. Выигрыш в сопротивлении  $-\Delta c_x$  для каждого из тел, показанных на фиг. 1, приведен на фиг. 4.

Значение  $\Delta c_x$  является разницей значений  $c_x$  для оребренной и гладкой моделей при одинаковых значениях  $M_\infty$  и  $Re_\infty$ . Поэтому для модели № 0, сопротивление которой примерно в 3 раза выше сопротивления моделей № 1–4, разброс экспериментальных точек относительно велик. Однако и для этой модели можно предположить, что, как и для моделей № 3 и 4, выигрыш в сопротивлении  $-\Delta c_x$  не превосходит упомянутого выше значения 0,002.

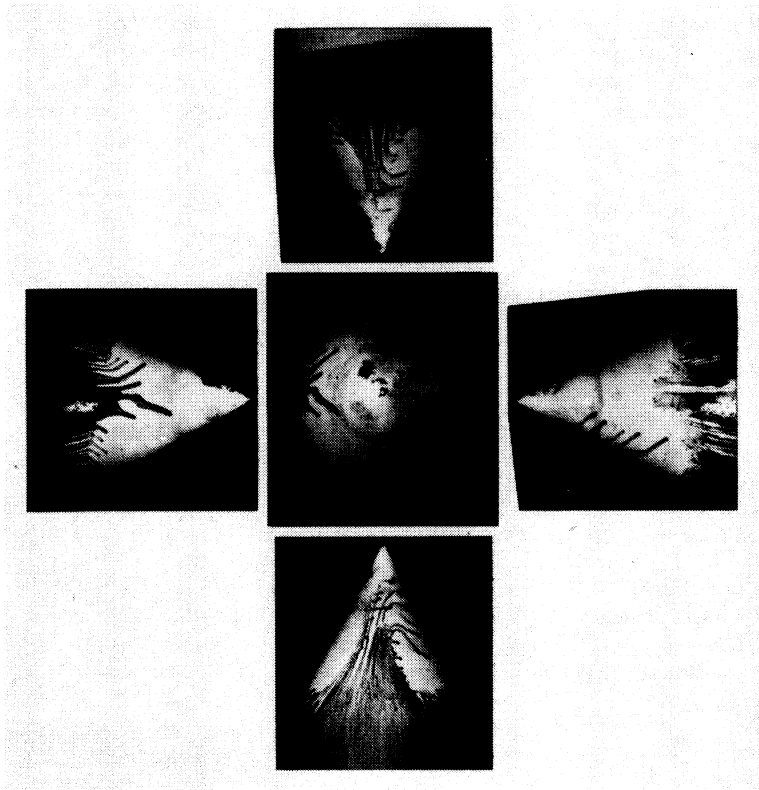
Для модели № 1, имеющей самую короткую хвостовую часть, получено почти в 2 раза большее значение  $-\Delta c_x$ , что, как указывалось ранее, не может быть объяснено снижением уровня турбулентного трения на оребренной цилиндрической части модели. Для модели № 2 с более длинной хвостовой частью, согласно данным фиг. 4, этот эффект менее выражен.

Исходя из сказанного, естественно предположить, что дополнительное снижение сопротивления по крайней мере на моделях № 1, 2 обусловлено сокращением зоны кормового отрыва потока. Для проверки такого предположения была проведена визуализация кормового отрыва при  $M_\infty = 0,5$  методом сажемасляной пленки на моделях № 1–4 с микрооробрением и без оребрения цилиндрической части. Линией отрыва считалась граница масляной пленки (траектории капель масла, указывающие на возвратное течение, не учитывались). В качестве меры интенсивности отрыва принималась площадь, ограниченная проекцией линии отрыва на плоскость поперечного сечения модели. Наиболее развитая зона отрыва наблюдалась на модели № 1 (фиг. 5). На моделях № 3, 4 отрыва потока не было (фиг. 6). Течение в зоне отрыва не является осесимметричным (фиг. 5), что объясняется, вероятно, влиянием подвески модели. Измерения на модели № 1 показали явное уменьшение области отрыва, вызванное влиянием оребрения. Наличие оребрения цилиндрической части сократило указанную площадь примерно на 7%.

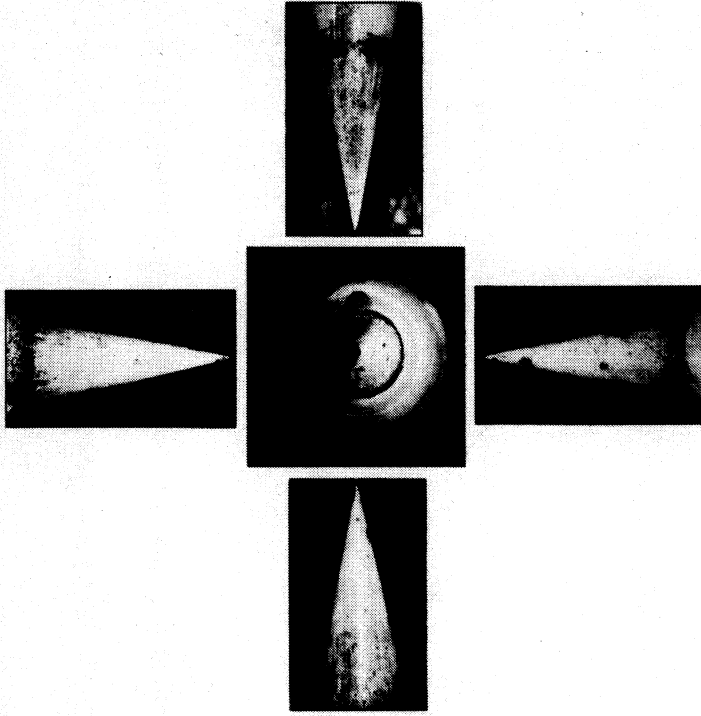
Исходя из сказанного, можно сделать заключение, что при  $M_\infty = 0,2-0,5$  снижение сопротивления оребренных моделей № 3, 4 обусловлено уменьшением турбулентного трения, а моделей № 1, 2 – также и сокращением области кормового отрыва.

При увеличении  $M_\infty$  от 0,5 до 0,85 эффект уменьшения сопротивления трения исчезает из-за возрастания параметра  $s^+$ , но усиливается положительное влияние оребрения на отрыв. При этом возрастание  $c_x$  (фиг. 3) моделей № 3, 4 с увеличением  $M_\infty$  указывают, что и на них образуется зона кормового отрыва. Совместное влияние указанных двух эффектов и является причиной почти постоянного значения  $\Delta c_x$  моделей № 1–4 во всем исследованном диапазоне чисел  $M_\infty$  (фиг. 4).

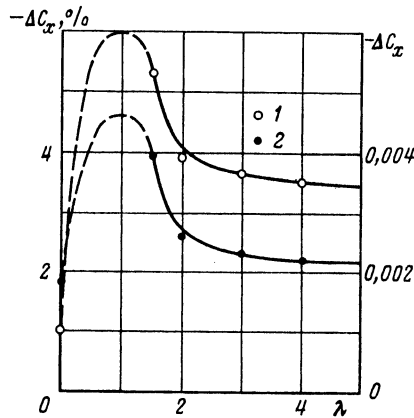
Суммарный выигрыш в сопротивлении, связанный с оребрением цилиндрической части модели, при различных удлинениях хвостовой части  $\lambda$  и  $M_\infty = 0,5$  приведен на



Фиг. 5. Визуализация кормового отрыва для модели № 1 с оребренной цилиндрической частью



Фиг. 6. Визуализация кормового отрыва для модели № 4 с оребренной цилиндрической частью



Фиг. 7. Зависимость выигрыша в сопротивлении  $-\Delta c_x$  от удлинения хвостовой части  $\lambda$ : 1 – значения  $-\Delta c_x$  отнесены к значениям  $c_x$  соответствующих моделей без оребрения, 2 – абсолютные значения  $-\Delta c_x$

фиг. 7 ( $c_x$  подсчитывается по площади миделя моделей, которая не зависит от значения  $\lambda$  их хвостовых частей).

С помощью данных на фиг. 7 можно судить о возможной эффективности применения микрооребрения для тел с различными удлинениями хвостовых частей (кривая 1), а также оценить величину дополнительного снижения сопротивления, связанную с сокращением зоны отрыва на оребренном теле вращения (кривая 2).

**Заключение.** При до- и околозвуковых скоростях набегающего потока необходимо разделять и оценивать три эффекта, связанных с микрооребрением поверхности тела: 1) уменьшение шероховатости обтекаемой поверхности; 2) снижение напряжения турбулентного трения; 3) влияние микрооребрения на кормовой отрыв потока.

Последний эффект может дать весьма существенное снижение сопротивления для тел, имеющих развитые кормовые отрывные зоны и не фиксированную линию отрыва.

Работа выполнена при поддержке Международного научно-технического центра (проект 199-95).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Walsh M.J., Weinstein L.M. Drag and heat transfer on surfaces with small longitudinal fins // AIAA Paper. 1978. № 1161. 11 p.
2. Coustols E. Behaviour of internal manipulators: "riblet" models in subsonic and transonic flows // AIAA 2nd Shear Flow Conf. AIAA Paper № 89-0963. 1989. 14 p.
3. Walsh M.J. Riblets. Viscous drag reduction in boundary layers // Progr. Astronaut. and Aeronaut. 1990. V. 123. P. 203–261.
4. Енютин Г.В., Лашков Ю.А., Самойлов Н.В. и др. Экспериментальное исследование влияния продольного оребрения на сопротивление трения плоской пластины // Изв. АН СССР. МЖГ. 1987. № 2. С. 140–145.
5. Коновалов С.Ф., Лашков Ю.А., Михайлов В.В. и др. Влияние продольного микрооребрения на сопротивление тела вращения // Изв. РАН. МЖГ. 1992. № 2. С. 174–178.
6. Коновалов С.Ф., Лашков Ю.А., Михайлов В.В. Влияние продольного микрооребрения поверхности на аэродинамические характеристики прямого крыла // Изв. РАН. МЖГ. 1995. № 2. С. 33–38.

Москва

Поступила в редакцию  
13.VI.1996