

УДК 532.526.7

© 1995 г. Г. В. ЕНЮТИН, Ю. А. ЛАШКОВ, Н. В. САМОЙЛОВА

СНИЖЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ ТРУБ С РИБЛЕТНЫМ ПОКРЫТИЕМ ВНУТРЕННЕЙ ПОВЕРХНОСТИ

Экспериментально исследованы возможности снижения сопротивления трубы круглого поперечного сечения за счет продольного микроорегрения внутренней поверхности при развитом турбулентном течении воздуха. Максимальное снижение сопротивления оребренной трубы по сравнению с гладкой составляло 6—7%, при этом максимальный выигрыш в трении достигался при безразмерном шаге оребрения, выраженном в параметрах закона стенки, $s^+ = 14$ —18.

В настоящее время достаточно полно исследован один из возможных способов снижения сопротивления трения при внешнем обтекании за счет воздействия на турбулентный пограничный слой с помощью продольного микроорегрения обтекаемой поверхности. Наиболее значительные результаты получены Уолшем, им же в обзоре [1] представлены исчерпывающие результаты исследования микроорегрения — «риблетов» в условиях внешнего обтекания. Уолш показал, что риблеты позволяют снижать сопротивление трения в том случае, когда безразмерный шаг оребрения $s^+ = su^*/\nu \leq 30$ (s — шаг оребрения, u^* — динамическая скорость, ν — кинематическая вязкость). Максимальное снижение трения на наиболее эффективных риблетах с ребрами треугольной формы достигало 8% при $s^+ \approx 15$. Подробные исследования риблетов, проведенные в ЦАГИ (см., например, [2]), дали аналогичные результаты и подтвердили возможность снижения трения на 8—10%.

Воздействие риблетов на внутреннее турбулентное течение в канале мало изучено. Авторам известны лишь работы [3—5], в которых опубликованы результаты экспериментальных исследований снижения сопротивления трубопровода круглого сечения с оребрением внутренней поверхности.

В [3] измерялось сопротивление трубопровода при течении газа (воздуха) в нем. Измерения проводились на участке с полностью развитым турбулентным течением длиной $L/D = 120$, где D — диаметр трубопровода. Оребрение, по-видимому, наносилось непосредственно на внутреннюю поверхность трубы и выполнялось со скругленными вершинами ребер и с плоским дном канавок между ребрами. Максимальное снижение трения было невелико и достигало $\approx 3\%$ при шаге оребрения $s^+ = 11$ —15. Весь диапазон снижения сопротивления составлял $s^+ = 8$ —23.

В [4, 5] исследовалось турбулентное течение несжимаемой жидкости (воды) в трубе с риблетами. В опытах [5] использовалась риблетная пленка фирмы 3М с треугольным оребрением с параметрами $h = s = 0,11$ мм (h — высота ребра). Максимальное снижение сопротивления трубопровода достигало 5—7% при $s^+ = 11$ —13. Значение s^+ , при котором наблюдалось снижение сопротивления, не превышало 23.

Данные, приведенные в [4], противоречивы и, по мнению самих авторов, требуют уточнения.

В настоящей работе приведены результаты испытаний на воздухе трубопровода, оклеенного изнутри различными риблетными пленками, при развитом турбулен-

тном течении. Скорость потока в трубе достигала 160—170 м/с, вследствие чего влияние сжимаемости на трение было весьма существенным.

Экспериментальная установка представляла собой круглую цилиндрическую трубу длиной ≈ 7 м, собранную из отдельных модулей диаметром $D = 48,5$ мм, изготовленных из алюминиевого сплава. Места взаимной стыковки модулей были тщательно подогнаны хонингованием.

На входе в трубу устанавливался мерный коллектор диаметром 48,27 мм. Выходное сечение трубы с помощью гибкого шланга соединялось с регулировочным краном, установленным на входе в вакуумную емкость. Воздух в трубу засасывался из атмосферы, затем по гибкому шлангу через регулировочный кран поступал в вакуумную емкость и далее через форвакуумные насосы выбрасывался опять в атмосферу. С помощью регулировочного крана изменялась скорость потока в трубе, максимальная величина средней скорости в каждом испытании достигала 160—170 м/с.

Мерный участок располагался на расстоянии 6120 мм от входного коллектора. Здесь попеременно устанавливались сменные модули: модули, оклеенные изнутри риблетной пленкой, контрольный гладкий модуль и модуль, оклеенный изнутри гладкой пленкой. Каждый сменный модуль имел длину 1000 мм. Измерение перепада давления осуществлялось на отрезке 1120 мм с помощью приемников статического давления, расположенных на одинаковом расстоянии до и после сменного модуля.

Таким образом, во всех испытаниях использовались приемники статического давления, расположенные на гладком участке трубы. Это исключало погрешность измерения, связанную с качеством изготовления отверстия на оребрении. Как известно, требования к обработке края отверстия, предназначенного для измерения статического давления, очень высоки, и их трудно выполнить на риблетной пленке. К недостатку такой методики измерений следует отнести то, что диаметр оребренного модуля несколько меньше диаметра примыкающих гладких модулей (за счет толщины пленки). Это приводит к наличию уступа и выступа на мерном участке трубы. Для того чтобы обеспечить одинаковые условия измерения сопротивления оребренной и гладкой труб, проводились также испытания модуля, оклеенного изнутри гладкой пленкой приблизительно той же толщины, что и риблетная. При этом внутренний диаметр модулей с риблетами и гладкой пленкой составлял соответственно 47,90, 47,93 и 47,85 мм.

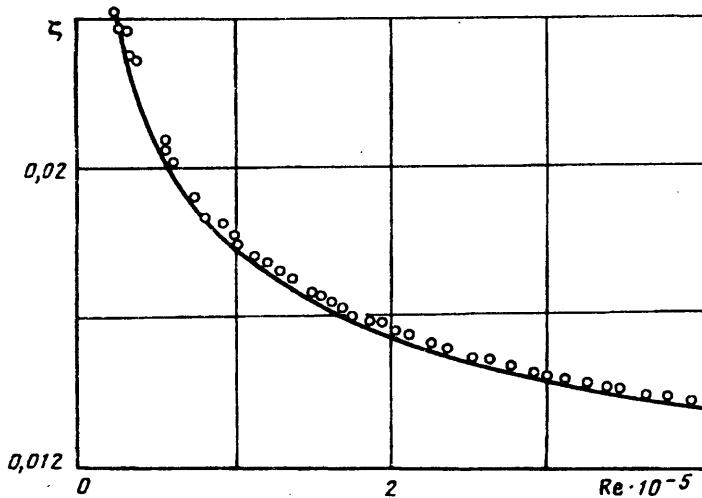
Риблеты представляли собой изготовленную на основе эпоксидной смолы пленку толщиной $\approx 0,2$ мм (измерено посередине высоты ребра) с оребрением треугольной формы. Испытывались два вида оребрения с $h = 0,035$ мм и $s = 0,063$ мм, а также с $h = 0,045$ мм и $s = 0,1$ мм, причем в последнем случае ребра располагались на некотором расстоянии друг от друга («через зуб»).

Число Рейнольдса $Re = uD/\nu$ в каждом испытании изменялось от $0,3 \cdot 10^5$ до $4 \cdot 10^5$. Измерение сопротивления осуществлялось в зоне развитого турбулентного течения, что обеспечивалось большим расстоянием от входа до измеряемого участка $L/D = 120$. Как известно [6], длина начального участка течения в трубе не превышает $L/D = 40$. Подтверждением того, что течение полностью сформировалось, является также линейный характер продольного градиента давления, измеренного в предварительных испытаниях. Специальные испытания, в которых варьировалась длина трубы за измеряемым участком, показали, что возмущения, возникающие ниже по потоку, не оказывают влияния на измерение перепада давления. И, наконец, основным доказательством полностью развитого турбулентного течения является хорошее согласование измеренного сопротивления гладкой трубы с законом сопротивления Прандтля, о чем говорится ниже.

На основании измеренных величин коэффициент сопротивления трубы ζ определялся из одномерного уравнения импульсов для сжимаемой жидкости [7]

$$u \frac{du}{dx} = -\frac{1}{\rho} \frac{dp}{dx} - \zeta \frac{u^2}{2D} \quad (1)$$

где u — средняя скорость в канале, x — продольная координата, p — давление,



Фиг. 1

ρ — плотность. Уравнение (1) в [7] проинтегрировано с использованием уравнений расхода и энергии и приведено к удобному для вычислений виду

$$\chi(\lambda_1) - \chi(\lambda_2) = \int_{x_1'}^{x_2'} \zeta(Re) dx' \quad (2)$$

$$\chi(\lambda) = \frac{\kappa + 1}{\kappa} \left(\frac{1}{\lambda^2} + 2 \ln \lambda \right) \quad (3)$$

Здесь $x' = x/D$, индексы 1 и 2 относятся к началу и концу измерительного участка, λ — приведенная скорость, κ — показатель адиабаты.

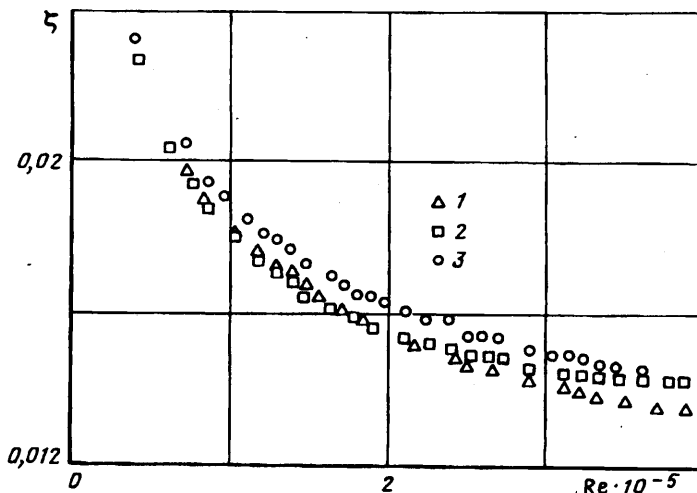
В данной работе предполагалось, что $\zeta(Re) = \text{const}$ вдоль измеряемого участка. Это вполне оправдано [7], так как число Рейнольдса Re изменяется вдоль x лишь за счет коэффициента вязкости μ . Величина μ зависит только от температуры, которая в пределах мерного участка практически оставалась постоянной.

Уравнение (2) решалось методом последовательных приближений с учетом указанного допущения, а также с использованием уравнения расхода, уравнения состояния и известных газодинамических функций. В первом приближении предполагалось, что статическая температура в потоке постоянна на мерном участке и равна температуре торможения $T_1 = T_2 = T_0$.

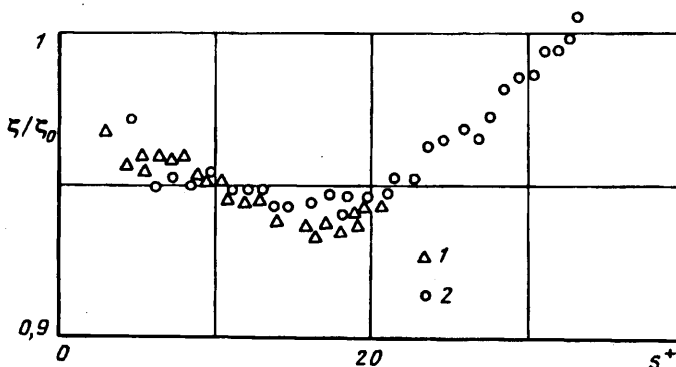
На фиг. 1 приведены зависимости коэффициента сопротивления от числа Рейнольдса Re , полученные при испытаниях гладкого контрольного модуля. Здесь экспериментальные данные многократно повторенных испытаний сопоставляются с классической зависимостью Прандтля (кривая 1) для сопротивления гладких труб в турбулентном потоке при $Re \geq 0,3 \cdot 10^4$. Видно, что полученные экспериментальные данные в целом хорошо согласуются с законом Прандтля. Несколько завышенные экспериментальные данные по сравнению с этим законом объясняются, по-видимому, наличием стыков в трубе. Кроме того, фигура 1 иллюстрирует хорошую повторяемость результатов в данных экспериментах: разброс экспериментальных точек, полученных в разных испытаниях, не превышает 1%. Следует отметить, что такая же повторяемость результатов наблюдалась и при испытаниях всех других модулей.

Сравнение результатов испытаний модуля, оклеенного гладкой пленкой, и контрольного гладкого модуля показало, что наличие выступа и уступа, образованных пленкой, незначительно повышает сопротивление модуля.

Определение эффективности риблетов осуществлялось путем сравнения ко-



Фиг. 2



Фиг. 3

эффицентом сопротивления ζ оребрения модуля и модуля с гладкой пленкой при одинаковых числах Рейнольдса Re . Далее под гладкой трубой подразумевается модуль, оклеенный гладкой пленкой. При сравнении эффективностей риблетов и гладкой поверхности экспериментальные данные для гладкой пленки предварительно аппроксимировались. Для этого использовалась зависимость того же вида [5], что применяется для аппроксимации закона Прандтля (фиг. 1), который, как известно, задается в параметрическом виде [6]. Следует отметить, что указанная зависимость позволяет получить хорошую аппроксимацию полученных данных. Так, среднее отклонение экспериментальных точек от аппроксимирующей зависимости составляло 0,3% при максимальном отклонении менее 1%.

Результаты испытаний трубопровода с риблетами представлены на фиг. 2, 3. Здесь дано сравнение коэффициентов сопротивления (фиг. 2) гладкой трубы (точки 3) и трубы с риблетами (точки 1, 2), а также приведены зависимости отношения этих коэффициентов от шага оребрения s^+ (фиг. 3).

Снижение сопротивления на риблетах с шагом $s = 0,1$ мм (2) наблюдалось при значениях $s^+ \approx 33$, при больших значениях s^+ сопротивление оребренной трубы увеличивалось по сравнению с гладкой. Для мелких риблетов с $s = 0,063$ мм (1) верхняя граница значений s^+ области снижения сопротивления находится за пределами исследованного диапазона. Нижнюю границу значений s^+ , при которых наблюдается снижение коэффициента сопротивления оребренной

поверхности, в данной работе (так же, как и в [5]) не удалось точно установить из-за погрешностей в определении ζ и s^+ при малых скоростях потока.

Максимальное снижение сопротивления трубы с риблетами по сравнению с гладкой составляло 6—7% (фиг. 3). Это максимальное значение достигалось при $s_{\text{opt}}^+ \approx 14$ —16 для риблетов с $s = 0,1$ мм и $s_{\text{opt}}^+ = 16$ —18 для более мелких риблетов ($s = 0,063$ мм). Приведенные результаты, полученные в сжимаемом турбулентном потоке, хорошо согласуются с данными [5] для несжимаемой жидкости. Небольшое увеличение значения s_{opt}^+ по сравнению с результатами [5], где $s_{\text{opt}}^+ \approx 11$ —13, связано с использованием оребрения несколько иной геометрии. В опытах [5] использовалось треугольное оребрение с отношением $h/s = 1$. В данных опытах $h/s = 0,48$ и $0,55$. При этом в первом случае оребрение не являлось чисто треугольным, так как между ребрами имелась площадка. Такой сдвиг в сторону увеличения s_{opt}^+ наблюдался и при испытаниях на плоской пластине при уменьшении h/s . Этим же объясняется и увеличение верхней границы значений s^+ по сравнению с [5].

Невысокое значение выигрыша в трении $\approx 3\%$, полученное в [3], по-видимому, прежде всего обусловлено геометрией использованного оребрения, в частности скругленными вершинами ребер. Испытания оребрения, проведенные в ЦАГИ на плоской пластине [8], показали, что для достижения максимального снижения сопротивления трения вершины ребер должны быть острыми.

Таким образом, проведенные испытания риблетов в трубе в сжимаемом турбулентном потоке (наряду с опытами других авторов [5] в несжимаемой жидкости) показали, что продольное микрооребрение на внутренней поверхности круглой трубы, так же как и при внешнем обтекании плоской пластины в турбулентном пограничном слое, снижает сопротивление трения. Так, при испытаниях этого же оребрения с шагом $s = 0,063$ мм на плоской пластине максимальный выигрыш в трении составлял 7% при $s_{\text{opt}}^+ \approx 17$ —18, что хорошо согласуется с результатами настоящей работы.

Авторы выражают благодарность И. В. Фадееву за изготовление риблетной пленки, А. А. Успенскому за помощь в проведении испытаний и В. В. Михайлову за постоянное внимание к работе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Walsh M. J. Riblets. Viscous drag reduction in boundary layers Progr. Astronaut. and Aeronaut. V. 123. Wash. 1990. P. 203—261.
2. Енютин Г. В., Лашков Ю. А., Самойлова Н. В. и др. Влияние продольного оребрения на сопротивление турбулентного трения//Уч. зап. ЦАГИ. 1988. Т. 19. № 4. С. 37—44.
3. Nitschke P. Experimental investigation of the turbulent flow on smooth and longitudinally grooved tubes//NASA, TM-77480. 1984.
4. Reidy L. W., Anderson G. W. Drag reduction for external and internal boundary layers using reblets and polymers//AIAA Pap. 1988. № 88—0138. 11 p.
5. Liu K. N., Christodoulou C., Riccius O., Joseph D. D. Drag reduction in pipes lined with riblets//AIAA Journal. 1990. V. 28. № 10. P. 1697—1698.
6. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. М.: Наука, 1974. 711 с.
7. Христианович С. А., Гальперин В. Г., Миллионщиков М. Д., Симонов Л. А. Прикладная газовая динамика. М.: Изд. ЦАГИ, 1948. 148 с.
8. 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.