

УДК 532.525.2

© 1992 г.

Ю. А. ЛАШКОВ, И. Н. СОКОЛОВА, Е. А. ШУМИЛКИНА

**СТРУЙНОЕ ТЕЧЕНИЕ НА ОРЕБРЕННЫХ КРИВОЛИНЕЙНЫХ
ПОВЕРХНОСТЯХ**

Исследована возможность использования микрооробрения криволинейных поверхностей для уменьшения турбулентного трения в течениях Коанда. Показано, что с помощью оребрения можно снизить воздействие струи при натекании ее на преграду, а также предотвратить реализацию эффекта Коанда, когда прилипание струи нежелательно.

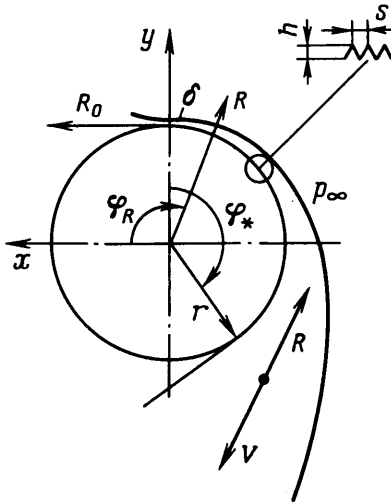
При изучении эффекта Коанда (прилипание струи к поверхности) обычно используют гладкие криволинейные поверхности. В настоящей работе изучалось течение Коанда на поверхностях с нанесенными на них ребрами, высота и шаг которых составляли доли миллиметра и которые ориентированы вдоль или поперек набегающего потока. В плоскопараллельном течении продольное микрооробрение способствует снижению сопротивления турбулентного трения [1–3], поэтому интересно исследовать влияние оребрения на течение Коанда, которое, как правило, всегда турбулентное и сопровождается значительными потерями на поверхностное трение.

Исследовалась плоская струя, истекающая из сужающегося сопла по касательной к оребренному цилиндру (фиг. 1). Значительное удлинение сопла $L/\delta=20-100$ (L – ширина сопла, δ – его высота) и наличие пластин на концах цилиндра обеспечивало двумерность течения. В процессе проведения испытаний начальная толщина струи $\delta'=\delta/r$ (r – радиус цилиндра) изменялась от 0,06 до 0,32. Давление в форкамере сопла p_0 повышалось от давления в затопленном пространстве p_∞ до соответствующей величины p_* , при которой наступал отрыв струи от поверхности цилиндра.

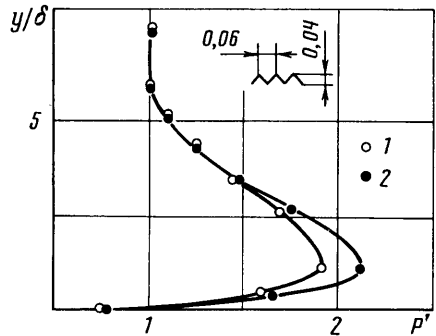
Получены профили полного давления в поперечных сечениях струй указанных начальных толщин, обтекающих оребренный цилиндр ($r=25$ мм). При этом использовались оребренные поверхности с треугольной формой поперечного сечения ребер различной высоты h ($h=0,04-0,22$ мм) и шага оребрения s ($s=0,06-0,53$ мм) и поверхность со скругленными вершинами ребер ($h=0,06$ мм, $s=0,20$ мм).

Проведенный эксперимент показал, что эффект Коанда реализуется как на продольно, так и на поперечно оребренных поверхностях, с острой и скругленной вершиной ребра, за исключением струи $\delta'=0,32$, обтекающей поперечно оребренный цилиндр с крупным оребрением ($h=0,22$ мм).

При продольном микрооробрении ($h=0,04$ мм) течение Коанда при $\delta'=0,12-0,24$ реализуется с меньшими потерями полного давления p_0' в струе, чем на гладких поверхностях (фиг. 2) (точки 1 – гладкая поверхность, точки 2 – оребренная поверхность $P'=p_0'/p_\infty$). При этом угол отрыва φ_* , соответствующий положению точки схода струи с цилиндра, и давление $p_{0*}/p_\infty=p_*$, при котором происходит разрушение течения Коанда, практически одинаковы для гладкой и продольно оребренной поверхности. Так, для струи с начальной толщиной $\delta'=0,12$ угол отрыва $\varphi_*\approx 160^\circ$, давление отрыва $P_*=4,2$ как для гладкой, так и для продольно оребренной поверхности.



Фиг. 1



Фиг. 2

Следствием реализации эффекта Коанда с меньшими потерями полного давления в струях $\delta' = 0,12-0,24$ на цилиндре с мелким оребрением ($h = 0,04$ мм) является увеличение вертикальной составляющей силы $Y = R_y/R_0$ на $\sim 4\%$ (Фиг. 3) и уменьшение горизонтальной $X = R_x/R_0$ на $1-2\%$ по сравнению с гладким цилиндром (R_0 – тяга сопла). На Фиг. 3 безразмерная сила Y показана сплошными линиями, X – штриховыми, точки 1 – гладкая поверхность, точки 2 – оребренная поверхность. Следовательно, как и в плоскопараллельном потоке, в струйном течении Коанда при соответствующем выборе параметров δ' и h/δ можно получить трение меньшее, чем на соответствующих гладких криволинейных поверхностях. При этом безразмерные параметры $h^+ = Re_h \sqrt{C_{f0}/2}$ и $s^+ = Re_s \sqrt{C_{f0}/2}$ (где C_{f0} – коэффициент местного трения, Re_h и Re_s – числа Рейнольдса, вычисленные по h и s) составляют $h^+ \approx 1-10$, $s^+ \approx 3-20$.

При поперечном мелком оребрении для $\delta' = 0,12-0,24$ течение Коанда реализуется, но при больших потерях полного давления, чем на гладкой поверхности, при этом обтекается меньший участок цилиндра ($\varphi_* \approx 150^\circ$) и разрушается течение Коанда при меньшем давлении в форкамере сопла ($P_* = 3,9$). Однако по сравнению с неупорядоченной шероховатостью цилиндрической поверхности поперечное оребрение приводит к меньшим потерям полного давления, а следовательно, и к меньшему трению, чем неупорядоченная шероховатость с величиной зерна, равной размеру ребра поперечного оребрения.

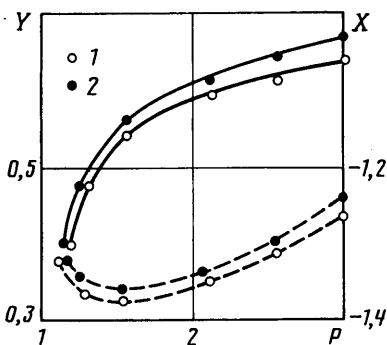
В более «толстых» струях ($\delta' \approx 0,32$) мелкое продольное оребрение ($h = 0,04$ мм, $s = 0,06$ мм) дает выигрыш в трении только при очень малом давлении ($P = p_0/p_\infty \approx 1,1$) и приводит к разрушению течения Коанда при меньшем давлении в форкамере сопла, чем на гладкой поверхности ($P \approx 1,7$).

При крупном оребрении ($h = 0,22$ мм, $s = 0,53$ мм и соответственно $h^+ \approx 10-20$, $s^+ \approx 20-40$) течение Коанда происходит с потерями полного давления, причем тем большими, чем больше толщина струи δ' . При $\delta' = 0,32$ в этом случае отрыв на продольно оребренном цилиндре происходит при $P \approx 1,4$, в то время как гладкий цилиндр обтекается до $P = 1,8$, а при крупном поперечном оребрении течение Коанда не реализуется вовсе. Это обстоятельство можно использовать для предотвращения нежелательного прилипания струи к криволинейной поверхности.

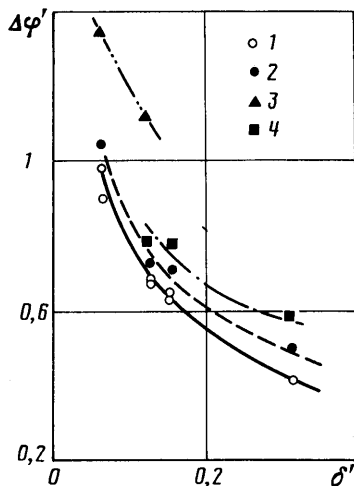
Используя эффект Коанда, можно существенно снизить воздействие струи при натекании на преграду за счет значительного ее размывания по сравнению со свободной струей [4]. С помощью микрооребрения поверхности этот эффект может быть усилен при соответствующем подборе параметров оребрения.

Степень размываемости струи характеризуется углом $\Delta\varphi = \varphi_* - \varphi_R$, где φ_R – угол поворота вектора тяги R (Фиг. 1). На Фиг. 4 приведено значение отношения $\Delta\varphi/\varphi_R = \Delta\varphi'$ в зависимости от толщины струи δ' для гладкого (точки 1) и оребренного цилиндров. Мелкое продольное оребрение (точки 2) увеличивает размываемость струи примерно на 6% , поперечное (точки 3) – приблизительно на 35% и более, крупное продольное оребрение (точки 4) – примерно на 15% .

Таким образом, оптимальные параметры оребрения в течениях Коанда на оребренных поверхностях в различных технических задачах неодинаковы. Сниже-



Фиг. 3



Фиг. 4

ние трения на криволинейной поверхности достижимо для сравнительно тонких струй при мелком продольном оребрении. При этом оптимальные параметры оребрения примерно такие же, как и для плоской пластины [2–3]. Уменьшение воздействия струи на преграду эффективнее всего при мелком поперечном оребрении, а предотвращение реализации течения Коанда – в толстых струях с крупным поперечным оребрением.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Walsh M. J., Sellers W. L., McGinley C. B. Riblet drag of flight conditions // J. Aircraft. 1989. V. 26. № 6. P. 570–575.
2. 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.
3. 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.
4. Соколова И. Н. Использование эффекта Коанда для уменьшения воздействия струи на преграду // Уч. зап. ЦАГИ. 1985. Т. 16. № 3. С. 118–121.

Москва

Поступила в редакцию
21.11.1991