

УДК 533.6.011:536.24

© 2003 г. И. Н. СОКОЛОВА

## ВЛИЯНИЕ СФЕРИЧЕСКИХ УГЛУБЛЕНИЙ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ТЕЧЕНИЯ КОАНДА

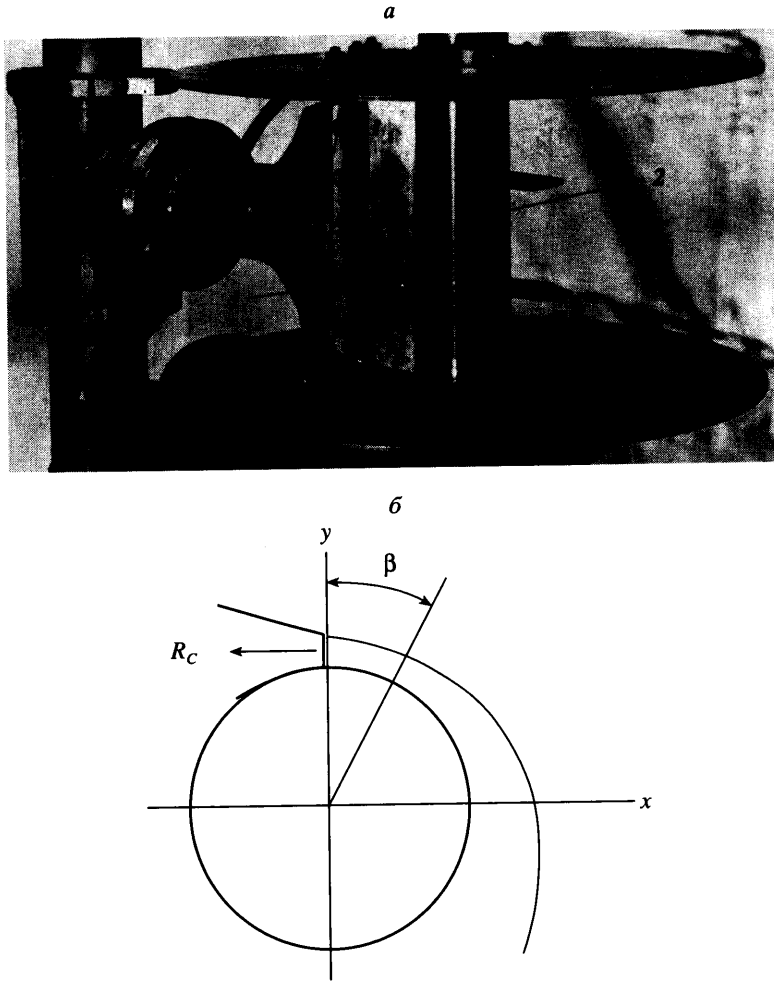
Исследовано обтекание криволинейных поверхностей со сферическими углублениями при дозвуковых и сверхзвуковых скоростях. Течение Коанда создавалось струей, истекающей по касательной к круглому цилиндру в затопленное пространство из плоского сужающего сопла. Измерены силы, действующие на цилиндр, и профили полного и статического давления в сечениях струи Коанда. Показано, что сферические углубления увеличивают сопротивление трения как при дозвуковых, так и при сверхзвуковых скоростях.

*Ключевые слова:* течение Коанда, сферические углубления, сопротивление трения, теплообмен.

Во многих технических проблемах важную роль играет интенсификация теплообмена. Интенсифицировать теплообмен можно за счет применения поверхностей с углублениями различной формы. На эффективность такого метода впервые, по-видимому, указано в [1–4]. В этих работах показано, что при обтекании плоских поверхностей со сферическими углублениями возникают вихревые структуры, которые интенсифицируют теплообмен, причем утверждается, что увеличение сопротивления при этом не происходит. Однако исследования обтекания плоских поверхностей со сферическими углублениями [5] прямым весовым методом измерения силы сопротивления показали, что на дозвуковых скоростях (до числа Маха  $\leq 0.3$ ) сопротивление таких поверхностей увеличивается на 20–30%.

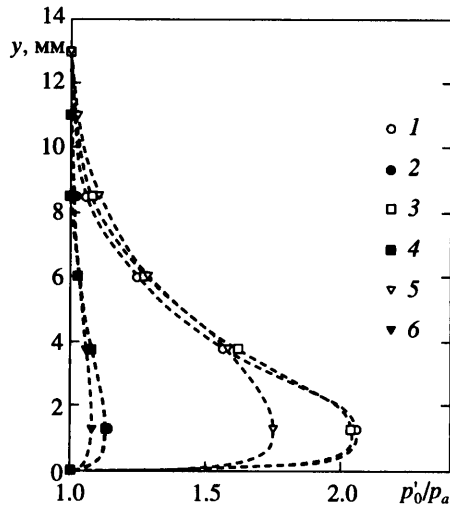
Влияние сферических углублений на трение и теплообмен при обтекании криволинейной поверхности проведено на примере течения Коанда. В связи с тем, что на криволинейных поверхностях теплообмен происходит менее интенсивно [6], интенсификация теплообмена на них представляет и самостоятельный интерес. В проведенных экспериментах плоская струя истекала из сужающегося щелевого сопла по касательной к цилиндрической поверхности (фиг. 1). Щелевое сопло и цилиндр были расположены между двумя плоскими пластинами, которые при значительном удлинении сопла обеспечивали двумерность течения в области измерений.

Исследована струя с относительной начальной толщиной  $\delta/r = 0.14$  ( $r$  – радиус цилиндра,  $\delta$  – толщина щели сопла). Давление в форкамере сопла изменялось от давления в затопленном пространстве  $p_a$  до давления, при котором наступал отрыв струи от поверхности цилиндра у среза сопла (глобальный отрыв). Испытаны поверхности с гексагонально расположенными сферическими углублениями следующих размеров ( $h$  – глубина лунки,  $d$  – диаметр лунки), мм:  $h = 0.2, d = 1.3$ ;  $h = 0.08, d = 0.8$ ;  $h = 0.04, d = 0.8$ ; расстояние между осями лунок 1.3. Измерялись потери полного давления  $p_0$  в струе Коанда (фиг. 2) и сила  $X$ , действующая на цилиндр в направлении, противоположном тяге сопла  $R_c$  (фиг. 3). Эта сила создается главным образом разрежением, удерживающим струю около поверхности цилиндра. ( $p < p_a$ , где  $p$  – давление на обтекаемой поверхности цилиндра). Трение струи о поверхность ведет к увеличению потерь полного давления, уменьшению скорости и площади поверхности цилиндра, омываемой струей (уменьшению угла отрыва струи  $\beta$  от поверхности).

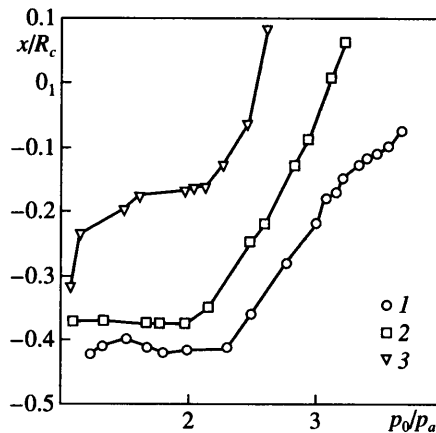


Фиг. 1. Установка Коанда (а: 1 – щелевое сопло; 2 – цилиндр) и ее схема (б),  $R_c$  – тяга сопла

При относительном давлении в форкамере сопла  $p_0/p_a \geq 1.89$ , т.е. при истечении сверхзвуковых струй, потери полного давления в струе  $p'_0/p_a$  в случае поверхности с крупными сферическими углублениями ( $h = 0.2$  мм,  $d = 1.3$  мм) значительно больше потерь давления для гладкой поверхности (фиг. 2). Более мелкие сферические углубления ( $h = 0.08$  мм,  $d = 0.8$  мм) приводят к меньшим потерям давления, характеризующим меньшее трение потока на поверхности цилиндра. Еще более мелкие сферические углубления ( $h = 0.04$  мм) почти не создают потерь полного давления по сравнению с гладкой поверхностью. Соответственно уменьшается разрежение на поверхности цилиндра, удерживающее струю у этой поверхности (фиг. 4). Возрастание трения в случае крупных сферических углублений ( $h = 0.2$  мм) приводит к более раннему отрыву струи от цилиндра и, следовательно, к уменьшению участка поверхности цилиндра, на котором струя создает разрежение. Поэтому сила, действующая на цилиндр в на-



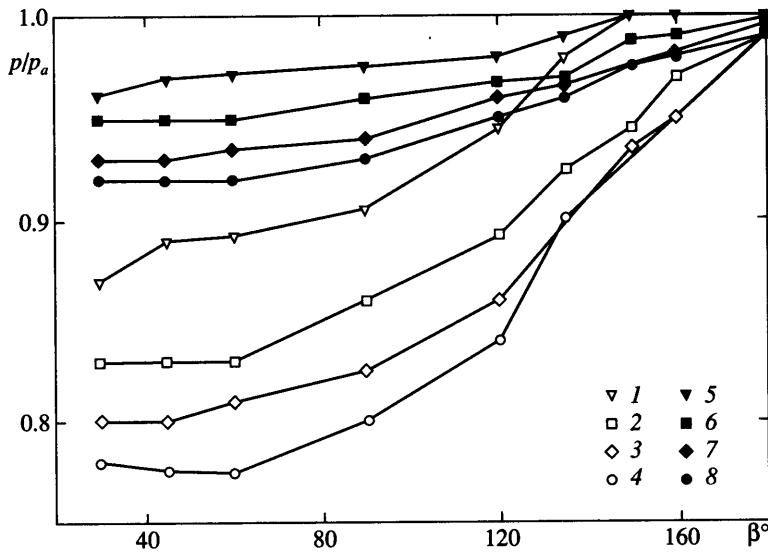
Фиг. 2. Профили относительного полного давления в поперечных сечениях струи Коанда при  $\beta = 60^\circ$ ; кривые 1, 3, 5 –  $p_0 = 2.3$ ; 2, 4, 6 –  $p_0 = 1.2$ ; точки 1, 2 – гладкая поверхность; 3, 4 – лунки:  $-h = 0.8$  мм; 5, 6 –  $-h = 0.2$  мм



Фиг. 3. Сила  $X$ , действующая на цилиндр, отнесенная к тяге сопла; 1 – гладкая поверхность, 2 – лунки  $h = 0.8$  мм, 3 –  $h = 0.2$  мм

правления, противоположном тяге сопла, при крупных сферических углублениях наименьшая среди рассмотренных (фиг. 3).

При дозвуковых скоростях ( $p_0/p_a \leq 1.89$ ) количество движения струи мало (струя слабая), так что различие потерь полного давления по сравнению с гладким цилиндром находится в пределах точности измерения. Но, поскольку трение приводит также к более раннему отрыву, изменение силы, действующей на цилиндр, свидетельствует об изменении силы трения. Поэтому можно заключить (фиг. 3), что, как и при сверхзвуковом истечении струи, крупные сферические углубления создают большее трение, чем гладкая поверхность и более мелкие углубления.



Фиг. 4. Распределение статического давления  $p$  по поверхности цилиндра; кривые 1–4 –  $p_0 = 2$ , 5–8 –  $p_0 = 1.3$ ; 4, 8 – гладкая поверхность, 3, 7 – лунки  $h = 0.04$  мм; 2, 6 –  $h = 0.08$  мм, 1, 5 –  $h = 0.2$  мм

Сферические углубления, как указывалось, создают вихри, распространяющиеся вдоль потока. Результаты расчетов [7] показывают, что наличие определенным образом расположенных вихрей с противоположным вращением и специально подобранной интенсивностью существенно меняет картину течения в турбулентном пограничном слое и даже может приводить к уменьшению трения. Однако при данных геометрии поверхности и параметрах потока наличие сферических углублений к уменьшению трения не приводит.

**Заключение.** На криволинейной поверхности сопротивления трения возрастает с увеличением размеров сферических углублений, как при дозвуковых, так и при сверхзвуковых скоростях. Полученные результаты указывают в то же время на возможность использования установки Коанда в качестве дешевого и эффективного инструмента для экспериментального исследования методов воздействия на турбулентный пограничный слой на криволинейных поверхностях как при сверхзвуковых, так и при дозвуковых скоростях потока.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Калинин О.А., Кикнадзе Г.И., Коляскин О.Е., Комаров В.М., Краснов Ю.К., Самойлов А.Г., Чушкин Ю.В., Яковлев В.Г. Метод интенсификации теплообмена. Препринт № 3998/4. М.: ИАЭ им. Курчатова, 1984. 8 с.
2. Гичечиладзе И.А., Кикнадзе Г.И., Краснов Ю.К. и др. Теплообмен при самоорганизации смерчеобразных структур // Теплообмен – ММФ. Пробл. докл. Минск: ИТМО им. Лыкова, 1988. Секц. 1.2, С. 83–125.
3. Кикнадзе Г.И., Краснов Ю.К., Подымаки Н.Ф., Хабенский В.Б. Самоорганизация вихревых структур при обтекании водой полусферической лунки // Докл. АН СССР. 1986. Т. 291. № 6. С. 1315–1318.
4. Алексеев В.В., Гичечиладзе И.А., Кикнадзе Г.И., Олейников В.Г. Смерчевой энергообмен на трехмерных вогнутых рельефах-структурах самоорганизующихся течений, их визуализация

- зация и механизмы обтекания поверхностей // 2-я Всерос. нац. конф. по тепломассообмену. М.: МЭИ, 1998. Т. 6. С. 33.
5. *Лашков Ю.А., Самойлова Н.В.* К вопросу о сопротивлении трения пластины со сферическими углублениями // Изв. РАН. МЖГ. 2002. № 2. С. 69–75.
  6. *Dakos T., Verriopoulos C.A., Gibson M.M.* Turbulent flow with heat transfer in plane and curved wall jets // J. Fluid Mech. 1984. V. 145. P. 339–360.
  7. *Wadc Schoppa, Fazle Hussain.* Dynamics and control of near-wall coherent structures // JUTAM Symposium on Mechanics of Passive and Active Flow Control. 1998. P. 5–14.

Москва

Поступила в редакцию  
1.XI.2002