

03

## **Критерий подобия сверхзвукового обтекания цилиндра с передней высокопористой ячеистой вставкой**

© С.Г. Миронов<sup>1,2</sup>, Т.В. Поплавская<sup>1,2</sup>, С.В. Кириловский<sup>1,2</sup>,  
А.А. Маслов<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича  
СО РАН, Новосибирск, Россия

<sup>2</sup> Новосибирский национальный исследовательский государственный  
университет, Новосибирск, Россия  
E-mail: mironov@itam.nsc.ru

Поступило в Редакцию 18 октября 2017 г.

Приведены результаты экспериментального и численного исследования влияния отношения диаметра цилиндра с передней газопроницаемой пористой вставкой из вспененного никеля к диаметру пор вставки на аэродинамическое сопротивление модели в сверхзвуковом потоке ( $M_\infty = 4.85, 7$  и  $21$ ). Получена аналитическая зависимость нормированного коэффициента аэродинамического сопротивления от параметра, в который входит отношение диаметра цилиндра к диаметру пор вставки и число Маха. Данный параметр предложен в качестве критерия подобия в задаче сверхзвукового обтекания цилиндра с передней высокопористой ячеистой вставкой.

DOI: 10.21883/PJTF.2018.06.45761.17087

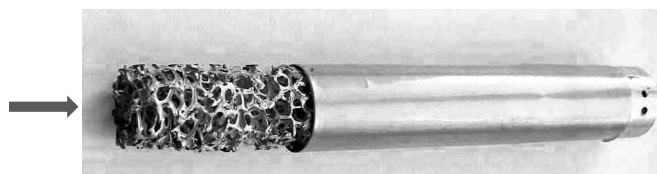
Критерии аэродинамического подобия позволяют судить об аэродинамических характеристиках (например, сопротивлении) реального объекта по результатам исследований их небольших моделей. Известными критериями подобия в аэродинамике являются число Маха и

число Рейнольдса. В число Рейнольдса входит один из характерных геометрических размеров обтекаемого тела. В случае обтекания тел с газопроницаемыми пористыми вставками в список характерных размеров добавляется еще и размер пор материала. При этом значения чисел Рейнольдса, вычисленные с использованием масштаба тела и масштаба пор, могут существенно различаться.

В настоящее время работы в области применения газопроницаемых пористых материалов в современной аэродинамике ведутся в двух основных направлениях: использование пористых материалов для подавления акустических возмущений в пограничном слое для продления ламинарного режима течения [1–3] и управление обтеканием тел с газопроницаемыми пористыми вставками с целью снижения аэродинамического сопротивления [4–6] и повышения маневренности летательных аппаратов [7,8].

В работах [4,9,10] экспериментально и с помощью численного моделирования были получены коэффициенты сопротивления цилиндра с передней газопроницаемой вставкой из ячеисто-пористого никеля (пористость 95%) в сверхзвуковом потоке (число Маха  $M_\infty = 4.85$ ) в диапазоне чисел Рейнольдса  $Re_D = (0.1–2) \cdot 10^5$ , вычисленных по скорости набегающего потока и диаметру цилиндра  $D$ . Эксперимент и расчет показали слабую зависимость коэффициента сопротивления модели от  $Re_D$ . С другой стороны, коэффициент сопротивления оказался существенно зависящим от диаметра пор  $d$  при постоянном диаметре цилиндра. Это инициировало экспериментальное и численное исследование влияния отношения диаметра цилиндра к диаметру пор передней высокопористой вставки на коэффициент аэродинамического сопротивления в сверхзвуковом потоке, результаты которого представлены в настоящей работе.

Эксперименты по измерению коэффициента аэродинамического сопротивления  $C_x$  цилиндра с передней цилиндрической пористой вставкой из высокопористого ячеистого никеля при варьировании диаметра цилиндра  $D = 14.8, 24$  и  $34$  mm и диаметра пор  $d = 1, 2, 3$  и  $4$  mm газопроницаемой передней вставки (рис. 1) проводились в сверхзвуковой аэродинамической трубе Т-327 ИТПМ СО РАН. Таким образом, были испытаны геометрически подобные модели с 12 значениями отношения  $D/d$ . Условия в потоке были следующими: числа Маха  $M_\infty = 4.85, 7$  и  $21$ , единичные числа Рейнольдса  $Re_{1\infty} = 2.7 \cdot 10^6, 1.5 \cdot 10^6$  и  $0.6 \cdot 10^6 \text{ m}^{-1}$  соответственно. Во всех экспериментах отношение длины

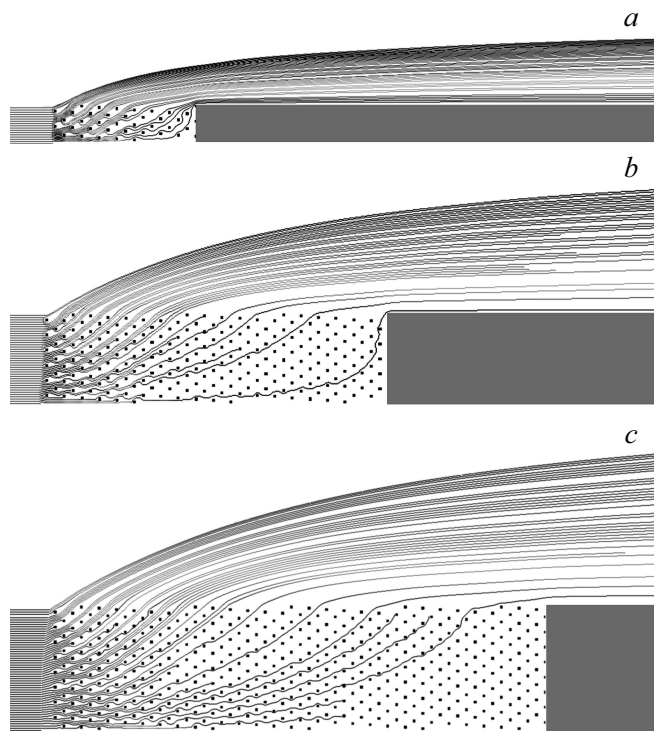


**Рис. 1.** Экспериментальная модель цилиндра с передней высокопористой вставкой из вспененного никеля.

пористой вставки к диаметру цилиндра было не менее 2, когда величина нормированного коэффициента аэродинамического сопротивления  $C_x/C_{x0}$  перестает изменяться [10]. Здесь  $C_{x0}$  — коэффициент аэродинамического сопротивления цилиндра без передней пористой вставки. В экспериментах величина  $C_x/C_{x0}$  определялась как отношение силы сопротивления цилиндра с передней пористой вставкой к силе сопротивления сплошного цилиндра. Сила сопротивления измерялась трехкомпонентными тензovesами.

С целью получения подробной картины течения было выполнено численное моделирование осесимметричного обтекания цилиндра с передними вставками из ячеисто-пористого материала при различных отношениях  $D/d$ . Решалась система двумерных уравнений Навье—Стокса, осредненных по Рейнольдсу, с использованием  $k-\omega$ -SST-модели турбулентности. К уравнениям, записанным в виде системы законов сохранения в цилиндрической системе координат  $xr$  ( $x$  — осевая координата,  $r$  — радиальная координата), добавляется уравнение состояния совершенного газа. Задача обтекания цилиндра решалась с использованием неявных схем второго порядка точности по пространству. Для аппроксимации конвективных потоков использовался Roe-FDS-метод расщепления с TVD-ограничителем для сохранения монотонности решения вблизи разрывов и локальных экстремумов течения. Рассматривалось обтекание полной модели, включающей скелет пористой вставки и сплошной цилиндр, общей длиной 100 мм.

В расчетах использовалась скелетная модель пористой среды в виде системы соосных колец разного диаметра, расположенных в шахматном порядке [11]. В плоскости осевого сечения данная система колец (каркас пористого материала) представляет собой набор непроницаемых квадратных элементов, расположенных в шахматном



**Рис. 2.** Поля линий тока в нормальном направлении к оси  $x$  при обтекании цилиндра с пористой вставкой,  $d = 1$  mm,  $M_\infty = 7$ ,  $p_\infty = 186$  Pa,  $T_\infty = 51$  K,  $Re_{1\infty} = 2.7 \cdot 10^6$  m $^{-1}$ .  $D = 6$  (a), 14.5 (b), 20 mm (c).

порядке. Расстояние между элементами каркаса в радиальном и осевом направлениях равнялось диаметру пор, а объем, занимаемый каркасом, подбирался из расчета соответствия величины пористости реальному ячеисто-пористому материалу.

Проекция расчетной области на плоскость  $xr$  представляет собой прямоугольник, нижняя сторона которого совпадает с осью симметрии цилиндра. Внутри пористой вставки расчетная область покрывалась равномерной прямоугольной расчетной сеткой, вне пористой зоны расчетная сетка имела сгущение вблизи переднего торца модели и

к поверхностям цилиндра и пористого участка. Общее число ячеек составляло не менее 800 000 и зависело от длины пористой зоны. В результате решения задачи были получены все газодинамические величины потока как вне газопроницаемой вставки, так и внутри пористого материала, в том числе величины коэффициента аэродинамического сопротивления.

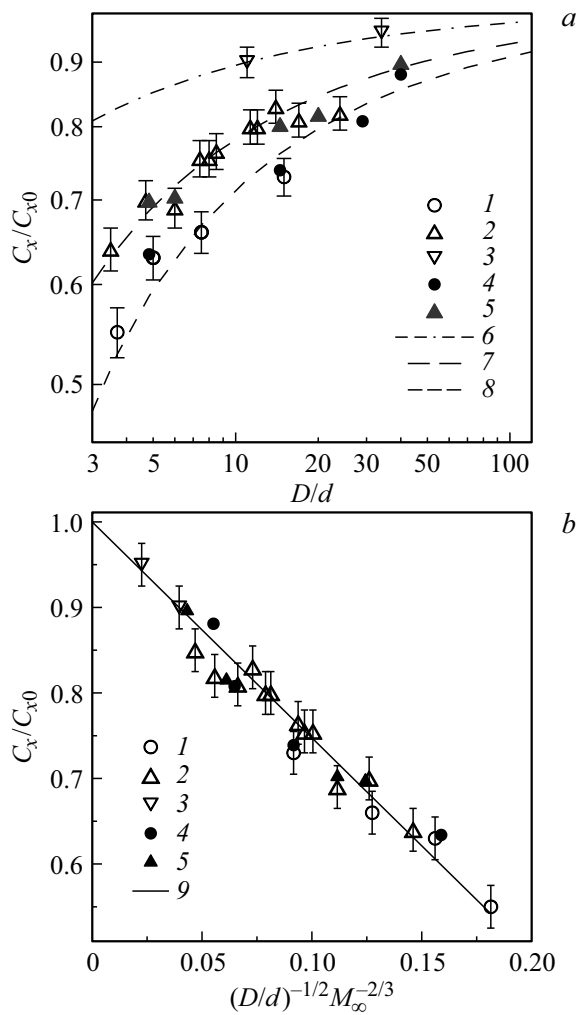
Коэффициент сопротивления модели рассчитывался по формуле

$$C_x = \frac{F}{0.5\rho_\infty u_\infty^2 S_m},$$

где  $\rho_\infty$ ,  $u_\infty$  — плотность и скорость набегающего потока,  $S_m$  — площадь мишени модели,  $F$  — аэродинамическая сила, включающая в себя силу давления, силу трения и силу волнового сопротивления. Сила  $F$  вычислялась по разнице величин полного импульса потока перед головной ударной волной и в плоскости заднего торца цилиндра (интегральные величины по площади рассматриваемого сечения).

На рис. 2 приведены поля линий тока при обтекании цилиндров разного диаметра  $D = 6, 14.5$  и  $20$  mm с пористой передней вставкой длиной в два диаметра цилиндра, диаметром ячеек пористого материала  $d = 1$  mm при  $M_\infty = 7$ . Видно, что с ростом диаметра модели увеличивается угол отклонения линий тока от поверхности модели, что связано с более интенсивным истечением газа из пористой зоны большего диаметра. Поэтому эффективность воздействия пористой вставки на поток падает с ростом диаметра модели, что должно приводить к увеличению аэродинамического сопротивления. Проведенные параметрические расчеты и экспериментальные измерения показали, что компенсировать снижение эффективности пористой вставки можно, увеличивая диаметр ячеек пористого материала, что в целом снижает аэродинамическое сопротивление. Отсюда следует существование критерия подобия вида отношения диаметра модели к диаметру пор материала.

На рис. 3, а приведены экспериментальные и расчетные зависимости нормированного коэффициента аэродинамического сопротивления  $C_x/C_{x0}$  от отношения  $D/d$  для относительной длины пористой вставки не менее 2. Видно увеличение коэффициента аэродинамического сопротивления с ростом величины  $D/d$ . Совпадение расчетных и экспериментальных данных находится в пределах точности измерений. Наблюдаемый разброс расчетных данных связан с дискретной природой



**Рис. 3.** Расчетные и экспериментальные данные для нормированного коэффициента сопротивления цилиндра с пористой вставкой в зависимости от величины отношения диаметра модели к диаметру пор (a) и в зависимости от параметра подобия (2) (b). 1–3 — эксперимент при  $M_\infty = 4.85, 7$  и 21; 4, 5 — расчетные данные при  $M_\infty = 4.85$  и 7; 6–9 — обобщающая зависимость (1).

скелетной модели, которая диктует необходимость построения структуры пористого материала из конечного и целого числа элементов. Это порождает незначительные (менее 0.5%) вариации коэффициента пористости при изменении диаметра модели  $D$  и, как следствие, вариации сопротивления.

Экспериментальные и расчетные данные аппроксимируются единой зависимостью

$$\frac{C_x}{C_{x0}} = 1 - \frac{2.525}{\sqrt{D/d}} M_\infty^{-2/3}. \quad (1)$$

Рис. 3,  $b$  показывает линейную зависимость нормированного коэффициента аэродинамического сопротивления от параметра

$$(D/d)^{-1/2} M_\infty^{-2/3}, \quad (2)$$

и все экспериментальные и расчетные данные лежат на этой прямой. Это дает основание считать параметр  $(D/d)^{-1/2} M_\infty^{-2/3}$  критерием подобия для коэффициента аэродинамического сопротивления тел с передними пористыми вставками.

Отношение  $D/d$  можно рассматривать как отношение чисел Рейнольдса, вычисленных по диаметру цилиндра и по диаметру пор. Тогда, вероятно, физическим объяснением влияния найденного параметра подобия  $(D/d)^{-1/2} M_\infty^{-2/3}$  на нормированный коэффициент сопротивления является отношение сил трения на всем цилиндре к силам трения в порах передней вставки цилиндра, а зависимость от числа Маха учитывает волновое сопротивление модели.

Таким образом, показано, что важным параметром моделирования обтекания цилиндра с передней пористой вставкой в сверхзвуковом потоке при  $M_\infty \geq 5$  является отношение диаметра цилиндра к диаметру пор вставки. Получена аналитическая зависимость нормированного коэффициента аэродинамического сопротивления от параметра  $(D/d)^{-1/2} M_\infty^{-2/3}$ , в который входит отношение диаметра цилиндра к диаметру пор вставки и число Маха. Данный параметр можно считать критерием подобия в задаче сверхзвукового обтекания цилиндра с передней высокопористой ячеистой вставкой.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 015-08-03867).

**Список литературы**

- [1] *Wartemann V., Lüdeke H., Sandham N.D.* // AIAA J. 2012. V. 50. N 6. P. 1281–1290.
- [2] *Цырюльников И.С., Маслов А.А., Миронов С.Г., Поплавская Т.В., Кириловский С.А.* // Письма в ЖТФ. 2015. Т. 41. В. 4. С. 61–67.
- [3] *Лукашевич С.В., Морозов С.О., Шиплюк А.Н.* // ПМТФ. 2016. Т. 57. № 5. С. 127–133.
- [4] *Фомин В.М., Миронов С.Г., Сердюк К.М.* // Письма в ЖТФ. 2009. Т. 35. В. 3. С. 39–45.
- [5] *Фомин В.М., Запрягаев В.И., Локотко А.В., Волков В.Ф., Луцкий А.Е., Меньшов И.С., Максимов Ю.М., Кирдяшкин А.И.* // ПМТФ. 2010. Т. 51. № 1. С. 79–88.
- [6] *Фомин В.М., Постников Б.В., Ломанович К.А.* // Письма в ЖТФ. 2015. Т. 41. Вып. 18. С. 68–73.
- [7] *Hunter C.A., Viken S.A., Wood R.M., Bauer S.X.S.* // AIAA Paper. 2001. N 2001–0249.
- [8] *Миронов С.Г., Маслов А.А., Цырюльников И.С.* // Письма в ЖТФ. 2014. Т. 40. В. 19. С. 83–88.
- [9] *Бедарев И.А., Миронов С.Г., Сердюк К.М., Федоров А.В., Фомин В.М.* // ПМТФ. 2011. Т. 52. № 1. С. 13–23.
- [10] *Миронов С.Г., Маслов А.А., Поплавская Т.В., Кириловский С.В.* // ПМТФ. 2015. Т. 56. № 4. С. 12–22.
- [11] *Миронов С.Г., Поплавская Т.В., Кирилловский С.В.* // Теплофизика и аэромеханика. 2017. Т. 24. № 4. С. 647–650.