

03

## **Снижение волнового сопротивления тел в сверхзвуковом потоке с помощью пористых материалов**

© *В.М. Фомин, С.Г. Миронов, К.М. Сердюк*

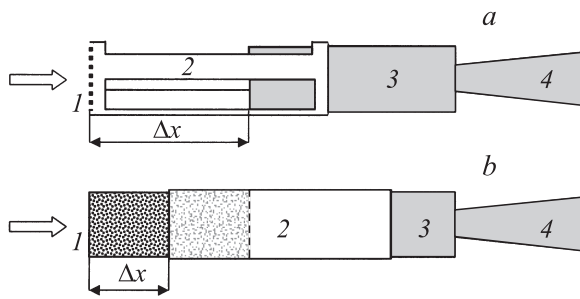
Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича  
СО РАН, Новосибирск  
E-mail: mironov@itam.nsc.ru  
Новосибирский государственный университет, Новосибирск

*Поступило в Редакцию 16 июня 2008 г.*

Приведены результаты экспериментального исследования влияния газопроницаемых материалов, расположенных перед тупым телом, на аэродинамическое сопротивление такой системы при ее обтекании сверхзвуковым потоком воздуха с числом Маха  $M = 4.85$ . Показано существенное снижение волнового сопротивления системы, дано объяснение наблюдаемому явлению.

PACS: 47.85.Ib

В настоящее время известен ряд методов аэродинамического управления, в том числе снижения волнового сопротивления тупых тел в сверхзвуковом потоке. К ним относятся: использование аэродинамической иглы [1], подвод энергии в поток перед телом [2], выдув вперед струи газа, жидкости или твердых частиц (например, [3]). Эти методы основаны на формировании перед телом поля течения, близкого к обтеканию заостренного тела обтекаемой формы. Хотя достигнутая величина снижения волнового сопротивления этими методами не превосходит той, которой можно было бы достичь, выполнив головную часть в виде тела минимального сопротивления, возможность управления сопротивлением делает эти методы привлекательными для практики. К недостаткам упомянутых методов можно отнести соответственно возникновение пульсаций давления в передней части тела, высокое энергопотребление, необходимость в расходных материалах. В рамках этой общей идеи возможно использование расположенных перед телом высокопроницаемых материалов для перераспределения набегающего потока и формирования течения, соответствующего заостренному телу.



**Рис. 1.** *a* — схема модели для экспериментов с сетками; *b* — схема модели для экспериментов с пористыми материалами. 1 — сетка/пористый материал; 2 — поддерживающая трубка; 3 — цилиндр; 4 — тензосенсы.

Ранее такие исследования были выполнены для сеток, расположенных перед торцом цилиндра в сверхзвуковом потоке [4], где расчетами было показано влияние прозрачности сетки и ее расстояния до торца на сопротивление интегрированной модели. Тем не менее прямых весовых измерений и измерений характеристик поля течения в [4] выполнено не было.

В настоящей работе впервые экспериментально исследовано влияние ряда газопроницаемых материалов, расположенных перед торцом цилиндра, на сопротивление этой системы в сверхзвуковом потоке воздуха, найдены условия существенного снижения волнового сопротивления, показана соответствующая ему перестройка течения в головной части при наличии газопроницаемого тела.

Эксперименты выполнены в сверхзвуковой аэродинамической трубе при числе Маха потока  $M_\infty = 4.85$  и единичном числе Рейнольдса  $Re_{1\infty} = 2.7 \cdot 10^6 \text{ m}^{-1}$ . Температура торможения потока составляла 290 К. Эксперименты проведены на двух моделях, включающих в себя цилиндр диаметром  $D = 14.5 \text{ mm}$  и длиной 50 mm — модель для измерения с сетками (рис. 1, *a*) и модель для измерений с пористыми материалами (рис. 1, *b*). В экспериментах использованы сетки различной структуры и пористо-ячеистые материалы. Их параметры приведены в табл. 1 (сетки) и табл. 2 (пористо-ячеистые материалы). По цилиндру могла перемещаться тонкостенная цилиндрическая трубка длиной 50 mm,

Таблица 1.

Номер сетки	Толщина проволоки, mm	Размер ячейки сетки, mm	Прозрачность, %
1	0.125	0.2 × 0.2	38
2	0.2	0.5 × 0.5	51
3	0.25	1 × 1	64
4	0.5	1.6 × 1.6	58
5	0.2	4 × 4	90

Таблица 2.

Номер материала	Число ячеек на 1 см	Пористость, %	Толщина непрозрачности, mm
1	12	95	20
2	4	95	40

поддерживающая газопроницаемый материал. Использованы два типа трубок: с тремя продольными пропилами для пропуска воздуха, доля поверхности которых составляла 50% от площади поверхности трубки, и сплошная цилиндрическая трубка. Первая из них поддерживала сетки, вторая — пористый материал. Перемещением тонкостенных трубок изменялись расстояние между плоскостью сетки и торцом цилиндра, а также степень выдвижения в поток пористого материала, как показано на рис. 1. Для измерения силы сопротивления система устанавливалась на тензовесы, расположенные в державке модели. Точность весовых измерений составляла 3%. Дополнительно производились визуализация обтекания моделей теньвым методом и измерение давления в центре торца цилиндра.

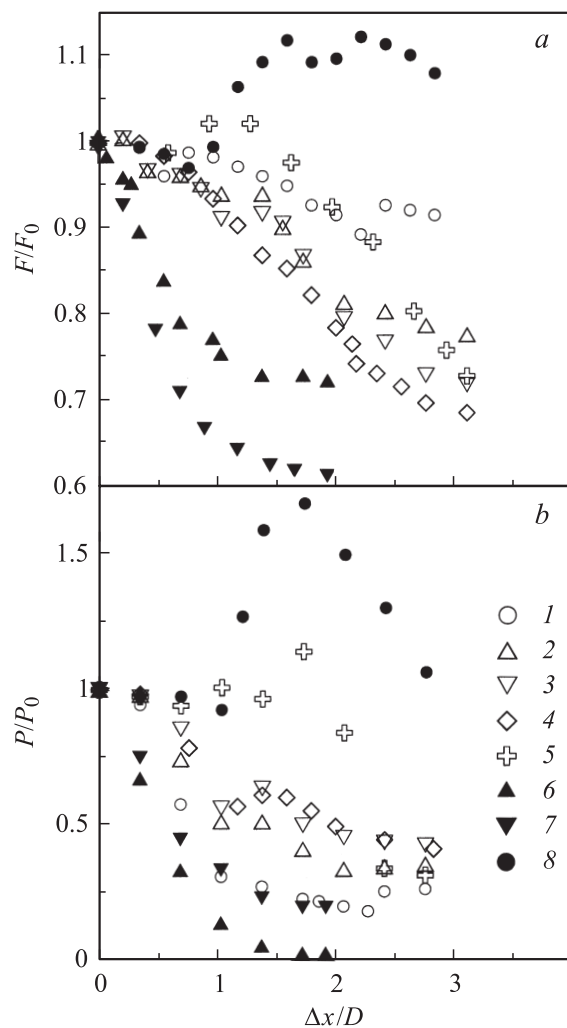
Предварительно изучалось влияние типа поддерживающей трубки и величины ее выдвижения на сопротивление модели. При этом вместо сетки или пористого тела устанавливался сплошной диск. Измерения показали линейную зависимость увеличения сопротивления при выдвижении трубки вперед для двух типов трубок, максимальная величина которого не превышает 2.5% от сопротивления цилиндра. Увеличение сопротивления в этом случае связано только с ростом сопротивления

трения. Проводились также измерения сопротивления моделей с поддерживающими трубками, но без установки на них сеток или пористых тел. Измерения показали немонотонный рост сопротивления модели в зависимости от величины выдвижения поддерживающей трубки с тремя продольными пропилами (точки 8 на рис. 2, *a*). Для сплошной поддерживающей трубки получен дополнительный к сопротивлению трения линейный рост сопротивления в 3%. Кроме того, было выполнено исследование влияния числа Рейнольдса на сопротивление сеток и пористых тел. Для этого производились измерения коэффициента сопротивления при их установке на весы отдельно от интегрированной модели. Измерения показали заметное увеличение коэффициента, когда величина числа Рейнольдса, вычисленного по характерному размеру ячейки сетки или пористого тела, становится меньше  $10^3$ . Эксперименты, описанные в статье, проводились при значительно больших числах Рейнольдса (кроме сетки 1), и наблюдаемые эффекты снижения сопротивления не были связаны напрямую с силами вязкости в газопроницаемых материалах.

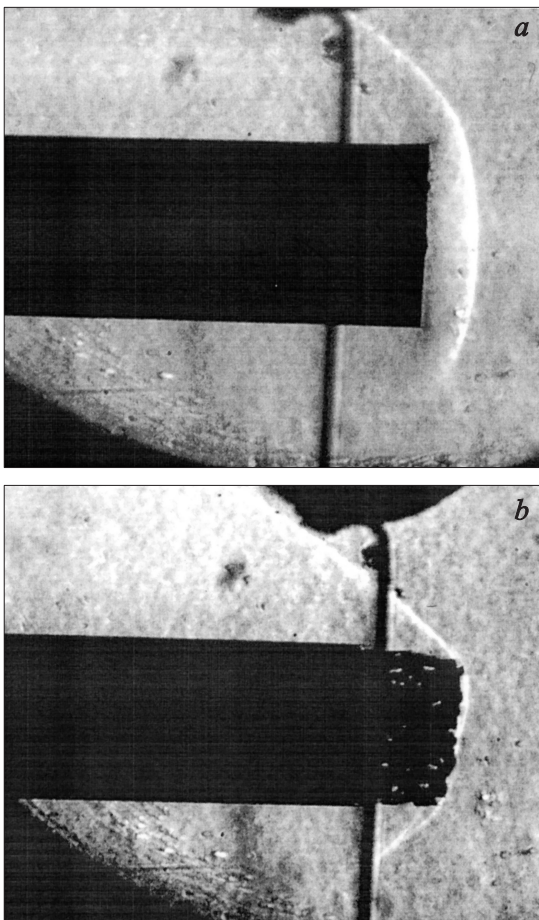
На рис. 2, *a* приведены зависимости относительного сопротивления моделей от безразмерного расстояния  $\Delta x/D$ . Видно, что для всех типов сеток и пористых тел имеет место снижение сопротивления, хотя здесь не учтено сопротивление, связанное с выдвижением поддерживающих трубок. Наиболее значительное снижение сопротивления, и при меньшей величине  $\Delta x/D$ , наблюдается для пористых тел, которое достигает примерно 40% начальной величины. Следует отметить, что абсолютные значения сопротивления моделей при больших  $\Delta x/D$  стремятся к величинам собственного аэродинамического сопротивления сеток и пористых тел.

Измерения давления в центре торца цилиндра от расстояния  $\Delta x/D$  (рис. 2, *b*) показали значительно большее относительное снижение давления, чем снижение сопротивления. Кроме того, значения величины сопротивления при больших величинах  $\Delta x/D$  находятся в обратном порядке с предельными величинами давления. Это свидетельствует о том, что газопроницаемые материалы перераспределяют воздушные потоки таким образом, что их воздействие на цилиндр моделей сильно уменьшается и основную роль начинает играть аэродинамическое сопротивление собственно газопроницаемого материала.

Шлирен-визуализация поля течения вокруг моделей показала, что по мере выдвижения сетки или пористого тела вперед происходит



**Рис. 2.** *a* — зависимости аэродинамического сопротивления от безразмерного расстояния  $\Delta x/D$ ; *b* — зависимости давления в центре торца цилиндра от  $\Delta x/D$ . Точки 1 — сетка 1; 2 — сетка 2; 3 — сетка 3; 4 — сетка 4; 5 — сетка 5; 6 — пористый материал 1; 7 — пористый материал 2; 8 — только поддерживающая трубка сеток.



**Рис. 3.** Шлирен-визуализация течения вокруг модели с пористым материалом 2.  
 $a$  —  $\Delta x/D = 0$ ;  $b$  —  $\Delta x/D = 0.65$ .

уменьшение угла наклона головной ударной волны к направлению потока. На рис. 3 приведены фотоснимки визуализации для модели с пористым материалом. Виден переход от дугообразного скачка уплотнения, характерного для обтекания торца цилиндра, к косому скачку.

При этом скачок уплотнения „садится“ на передний слой материала, за головной волной возникают более слабые косые скачки, вызванные истечением струек воздуха из боковых пор материала. Это связано с перераспределением газового потока в области носовой части модели, формированием течения, близкого к обтеканию заостренного тела, что приводит, как следствие, к снижению волнового сопротивления в сверхзвуковом потоке. Аналогичная картина, но без возникновения видимых скачков за головной волной, наблюдается и на модели с сетками. И в этом случае снижение сопротивления модели сопровождается приближением скачка уплотнения к плоскости сетки и уменьшением угла его наклона к направлению потока.

В работе [4] для сетчатой поверхности снижение сопротивления объясняется образованием за сеткой конической отрывной зоны, которая экранирует торец цилиндра от высокоскоростного потока, формируя эффективное заостренное тело. В случае пористо-ячеистого материала механизм снижения сопротивления другой. Скорее всего, здесь играет роль значительное различие в гидродинамическом сопротивлении набегающему потоку приосевых и периферийных слоев цилиндрического пористого тела. Меньшее гидродинамическое сопротивление периферийных слоев связано с меньшим путем движения газа от точки втекания на лобовой до точки вытекания на боковой поверхности пористого тела. Это формирует падающий профиль величины сопротивления потоку с ростом радиального расстояния от продольной оси модели, что соответствует эффективному заостренному телу.

## Список литературы

- [1] Запрягаев В.И., Миронов С.Г. // ПМТФ. 1991. Т. 32. № 6. С. 34–39.
- [2] Кортаева Т.А., Фомин В.М., Шашкин А.П. // ПМТФ. 1999. Т. 40. № 5. С. 26–30.
- [3] Кортаева Т.А., Малмус Н.Д., Маслов А.А., Фомин В.М., Шашкин А.П. // ПМТФ. 2001. Т. 42. № 5. С. 27–36.
- [4] Гувэрник С.В. // Газовая и волновая динамика. М.: Айрис-Пресс, 2005. С. 236–242.