

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

УДК 533.6

Влияние температуры передней пористой вставки на аэродинамическое сопротивление цилиндра в сверхзвуковом потоке*

С.Г. Миронов, Т.В. Поплавская, С.В. Кириловский

*Институт теоретической и прикладной механики
им. С.А. Христиановича СО РАН, Новосибирск*

Новосибирский государственный университет

E-mail: mironov@itam.nsc.ru

Приведены экспериментальные и расчетные данные о влиянии нагрева ячеисто-пористого материала на волновое сопротивление цилиндра с передней газопроницаемой пористой вставкой, обтекаемого сверхзвуковым потоком ($M_\infty = 4,85$, $Re_{1\infty} = 3,3 \cdot 10^6 \text{ м}^{-1}$). Данные весовых измерений, полученные в сверхзвуковой аэродинамической трубе, сопоставлены с результатами численного моделирования обтекания, использующего дискретную модель ячеисто-пористого материала. Показано увеличение волнового сопротивления с ростом температуры пористой вставки и его уменьшение при понижении температуры.

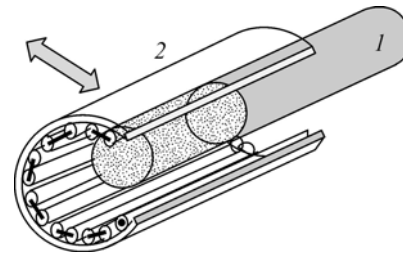
Ключевые слова: сверхзвуковое обтекание, газопроницаемые ячеисто-пористые материалы, влияние температуры, численное моделирование.

В последнее десятилетие разработан и испытан способ управления волновым сопротивлением в сверхзвуковых потоках с помощью газопроницаемых пористых материалов [1, 2]. Целью настоящего исследования являлось получение количественных данных о влиянии нагрева пористого материала на аэродинамическое сопротивление цилиндра с газопроницаемой передней пористой вставкой в сверхзвуковом потоке. Влияние нагрева вставки на сверхзвуковое обтекание лежит в основе метода управления аэродинамическими силами сверхзвукового летательного аппарата, предложенного авторами [3] и частично реализованного с помощью электрического тлеющего разряда в работе [4].

Эксперименты проводились в сверхзвуковой аэродинамической трубе Т-327Б ИТПМ СО РАН при числе Маха $M_\infty = 4,85$ и единичном числе Рейнольдса $Re_{1\infty} = 3,3 \cdot 10^6 \text{ м}^{-1}$. Модель (рис. 1) представляла собой продольный в направлении потока цилиндр диаметром $D = 14,8 \text{ мм}$ с расположенным на его переднем торце цилиндром того же диаметра из газопроницаемого ячеисто-пористого никеля. Средняя величина диаметра пор материала

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 15-08-003867).

Рис. 1. Экспериментальная модель цилиндра с передней газопроницаемой вставкой (1) в выдвигаемом нагревателе (2).



составляла $d = 1$ мм, величина пористости — 95 %, относительная длина пористой вставки $\Delta x/D = 2$. Модель была установлена на тензовесах, которые измеряли силу аэродинамического сопротивления модели потока в направлении оси модели. Температура пористой вставки измерялась на половине длины оси вставки медь-константановой термопарой.

Нагрев материала пористой вставки и цилиндра осуществлялся тепловым излучением трубчатого омического нагревателя (рис. 1), четверть образующей которого была вырезана для поперечного ввода и вывода из него модели, установленной на весах. Проведение измерений с нагревом осуществлялось следующим образом. Перед пуском аэродинамической трубы, при давлении в рабочей камере 1 Па, нагреватель через вырезку надвигался на модель и выполнялся лучистый нагрев всей модели. По достижении максимальной температуры нагрева вставки, составляющей $\cong 400$ К, нагреватель отводился в сторону за известную границу сверхзвукового потока, и производился пуск аэродинамической трубы. Вследствие охлаждения пористой вставки набегающим потоком, теплоотвода в державку модели и излучения во внешнее пространство температура газопроницаемой вставки падает и постепенно стремится к начальной величине, равной 300 К. Так как пуск и остановка аэродинамической трубы занимает $\cong 0,1$ с, то это давало возможность проводить серию измерений сил сопротивления при различных температурах пористой вставки в одном эксперименте.

Исследовать более широкий температурный диапазон нагрева пористой вставки позволило численное моделирование обтекания модели. В применении к сверхзвуковой аэродинамике численное моделирование обтекания тел с газопроницаемыми высокопористыми вставками проводилось в рамках континуальной модели, базирующейся на законе фильтрации Дарси–Форхгеймера [1, 2]. Однако для континуальной модели необходимо определение эмпирических данных о фильтрационных свойствах материала [5]. Другим способом моделирования обтекания тел с газопроницаемыми высокопористыми вставками является использование дискретной модели скелета высокопористого ячеистого материала [6]. Преимуществом этого подхода является потребность в наличии данных только о геометрии скелета, без привлечения дополнительных эмпирических данных по фильтрационным свойствам пористого материала. В настоящей работе дискретная модель ячеисто-пористого материала реализована в виде каркаса из квадратных элементов, закрученных вокруг продольной оси модели (рис. 2). Эти элементы располагались в шахматном порядке друг за другом. Такое расположение обеспечивает взаимодействие

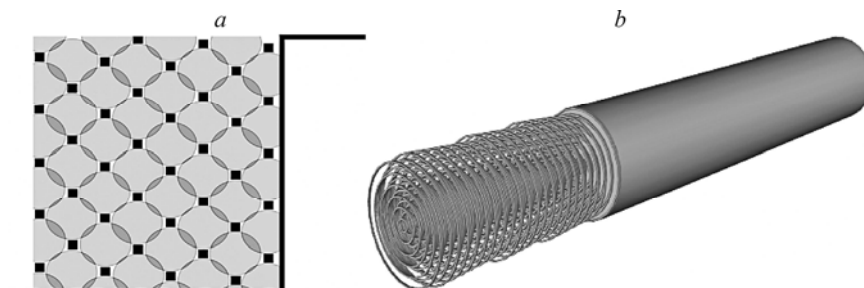


Рис. 2. Дискретная модель газопроницаемого высокопористого материала в сечении вдоль оси цилиндра с передней вставкой (а) и трехмерное изображение расчетной модели цилиндра с передней вставкой (б).

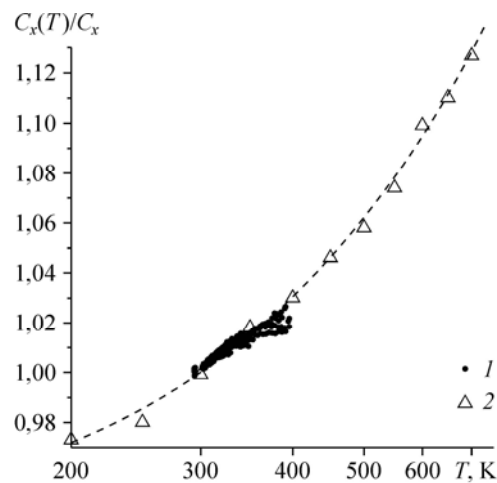
набегающего потока со всеми элементами модели скелета, как это имеет место в эксперименте. Расстояние между элементами каркаса в радиальном и осевом направлениях равнялось диаметру пор (рис. 2а). Реальные поры материала (сферы) представлены на рисунке в виде пересекающихся кругов диаметром d . При этом объем, занимаемый каркасом, подбирался из расчета соответствия течению в пористой вставке с величиной пористости 95 %, т.е. каркас составлял только 5 % объема газопроницаемой пористой вставки (рис. 2б). Следует также заметить, что в модельной вставке осуществлялось постепенное смещение вертикального ряда прямоугольных элементов с периодичностью, соответствующей непрозрачности реального пористого материала. В этом случае ни одна из струек тока не может достигнуть торца цилиндра без взаимодействия с элементами скелета. На изображении модельной пористой вставки на рис. 2б это проявляется как периодически повторяющаяся ступенька на внешней границе вставки.

Численное моделирование обтекания цилиндра с модельной вставкой проводилось с помощью пакета ANSYS Fluent для экспериментальных условий обтекания. Решалась система двумерных дифференциальных уравнений Навье–Стокса (осесимметричный случай) с добавлением $k-\omega$ SST модели турбулентности и с помощью Density-based решателя. В расчетах используется неявная схема второго порядка точности по времени и неявная схема второго порядка точности по пространству с методом расщепления конвективных потоков Roe-FDS. Проекция на плоскость расчетной области представляет собой прямоугольник, часть нижней стороны которого совпадает с осью симметрии цилиндра. Левая (входная) граница расположена на некотором расстоянии вверх по потоку от переднего торца модели, высота расчетной области выбирается из условия, что головная ударная волна не должна взаимодействовать с верхней границей расчетной области. Правая (выходная) граница отодвинута от заднего торца модели так, чтобы течение в выходном сечении было полностью сверхзвуковым. Расчетная область состояла из двух подобластей: зоны с пористой вставкой и зоны вне пористой вставки. Внутри пористой зоны расчетная область покрывалась равномерной прямоугольной расчетной сеткой, которая вне этой зоны имела сгущение к поверхности модели. Общее число ячеек составляло порядка 200000. На левой границе расчетной области задавался равномерный гиперзвуковой поток. На верхней и нижней границах задавались условия симметрии. На правой границе решение экстраполировалось изнутри расчетной области. На стенках, к которым относятся элементы каркаса и поверхность цилиндра, задается температура, равная максимальной температуре нагрева в эксперименте.

В результате решения задачи были получены все газодинамические величины потока как в течении вне модели, так и внутри пористого материала. По этим данным определялись аэродинамические коэффициенты сопротивления цилиндра с передней пористой вставкой C_x . Сила сопротивления вычислялась по разнице величин полного импульса потока, входящего в круг перед головной ударной волной и выходящего из такого же круга в плоскости заднего торца цилиндра [2]. На рис. 3 приведены экспериментальная и расчетная зависимости от температуры нормированного коэффициента аэродинамического сопротивления модели C_x , нормированного на коэффициент аэродинамического сопротивления модели при температуре 300 К. Видно, что данные

Рис. 3. Экспериментальная (1) и расчетная (2) зависимости нормированного коэффициента аэродинамического сопротивления модели от температуры.

Температура вставки 300 К.



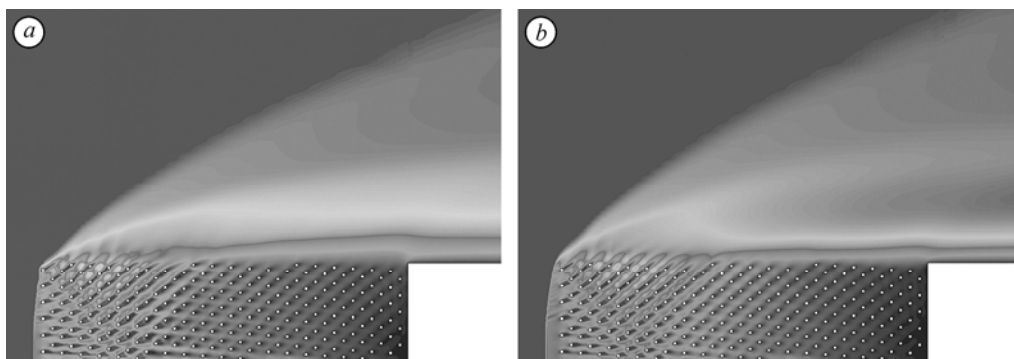


Рис. 4. Расчетные поля скорости при обтекании модели с температурами пористой вставки 300 (а) и 700 (б) К.

расчетов хорошо совпадают с результатами экспериментов в диапазоне температур 300–400 К, а нагрев пористой вставки до 700 К позволяет получить увеличение аэродинамического сопротивления около 13 %. Расчеты также показывают, что охлаждение пористой вставки снижает аэродинамическое сопротивление.

Физическую интерпретацию результатов, показанных на рис. 3, могут дать расчетные поля течения, представленные на рис. 4. Нагрев каркаса пористого материала приводит к заметной перестройке течения, что на рисунках выглядит как увеличение угла наклона головной ударной волны, отхода ударной волны от переднего торца модели и отсечения от поверхности вставки линии смешения (светлая линия на рис. 4) основного потока и струй радиального истечения из пор вставки. Такая перестройка обусловлена интенсификацией радиального истечения, связанного с увеличением сил вязкого трения при обтекании нагретых элементов каркаса.

Экспериментально показано увеличение аэродинамического сопротивления цилиндра с передней газопроницаемой пористой вставкой при нагревании пористого материала на 100°. В диапазоне температур вставки 200–700 К выполнено численное моделирование обтекания цилиндра с пористой вставкой с использованием дискретной модели пористого материала. Показан рост аэродинамического сопротивления цилиндра с пористой вставкой при увеличении температуры и его снижение при уменьшении температуры пористой вставки. Результаты работы демонстрируют новый метод управления аэродинамическими силами тел с газопроницаемыми пористыми вставками с помощью нагрева пористого материала.

Список литературы

1. Бедарев И.А., Миронов С.Г., Сердюк К.М., Фёдоров А.В., Фомин В.М. Физическое и математическое моделирование сверхзвукового обтекания цилиндра с пористой вставкой // Прикладная механика и техническая физика. 2011. Т. 52, № 1. С. 13–23.
2. Миронов С.Г., Маслов А.А., Поплавская Т.В., Кирилловский С.В. Моделирование сверхзвукового обтекания цилиндра с газопроницаемой пористой вставкой // Прикладная механика и техническая физика. 2015. Т. 56, № 4. С. 12–22.
3. Пат. 2559193С1 РФ, МПК^{с1} В64С21/04, В64С19/00. Способ управления обтеканием сверхзвукового летательного аппарата / Миронов С.Г., Маслов А.А., Цырюльников И.С.; заявитель и патентообладатель Новосибирский государственный университет. № 2014116998/11; заявлено 25.04.2014, опубликовано 10.08.2015, бюлл. № 22.
4. Миронов С.Г., Маслов А.А., Цырюльников И.С. Управление аэродинамическими силами с помощью газопроницаемых пористых материалов // Письма в ЖТФ. 2014. Т. 40, вып. 19. С. 83–88.
5. Миронов С.Г., Колотилов В.А., Маслов А.А. Экспериментальное исследование фильтрационных характеристик высокопористых материалов // Теплофизика и аэромеханика. 2015. Т. 22, № 5. С. 599–607.
6. Poplavskaya T.V., Kirilovskiy S.V., Mironov S.G. Supersonic flow around a cylinder with front gas-permeable insert which modeled by skeleton of porous material // AIP Conf. Proc. 2016. Vol. 1770. P. 030067-1–030067-6.

Статья поступила в редакцию 17 октября 2016 г.