

УДК 533.6

Тороидальная скелетная модель высокопористого ячеистого материала для моделирования сверхзвукового обтекания цилиндра с передней газопроницаемой вставкой под углом атаки*

С.Г. Миронов, С.В. Кириловский, Т.С. Милицина, Т.В. Поплавская, И.С. Цырюльников

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

E-mail: mironov@itam.nsc.ru; mili_tanya@mail.ru; popla@itam.nsc.ru

Представлены результаты численного моделирования сверхзвукового ($M_\infty = 7$) обтекания цилиндра с передней газопроницаемой вставкой из высокопористого ячеистого материала. Для описания фильтрации воздуха в газопроницаемой вставке предложена и реализована тороидальная скелетная модель высокопористой среды. Получены аэродинамические коэффициенты модели цилиндра при различных углах атаки ($\alpha = 0 \div 15^\circ$), согласующиеся с имеющимися экспериментальными данными, что свидетельствует о соответствии предложенной скелетной модели реальным свойствам высокопористых материалов.

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

Для решения задач сверхзвукового обтекания тел с пористыми элементами управления необходимо создание компьютерных программ, позволяющих моделировать пористые материалы и рассчитывать обтекание тел с газопроницаемыми пористыми вставками с целью улучшения их аэродинамических характеристик. Для численного моделирования пористых сред используется два подхода. К первому относятся так называемые континуальные модели, в которых задаются аналитические зависимости градиента давления в пористой среде от скорости фильтрации, получаемые в специальных экспериментах [1–5]. Второй подход заключается в численном моделировании течения жидкости и газа в скелете пористого материала, представляемого в виде пространственной системы дискретных элементов (скелетные модели пористой среды) [6–8]. В этом случае пористый материал характеризуется геометрией скелета и величиной пористости k без использования эмпирических законов фильтрации.

* Работа выполнена в рамках Проекта базового государственного задания на 2021–2023 годы (номер регистрации 121030500162–7).

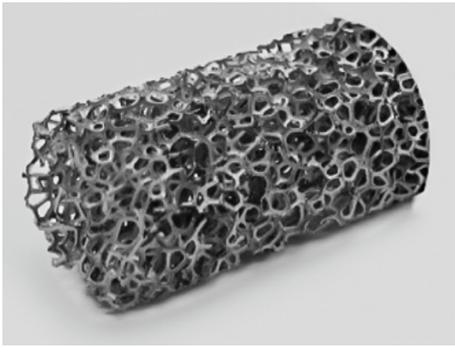


Рис. 1. Фотография реального образца вспененного никеля.

В настоящей работе рассматривается задача сверхзвукового обтекания цилиндра с передней вставкой из высокопористого ячеистого материала (ВПЯМ), который формируется при застывании вспененных жидких металлов. Ячейки застывшей пены образуют пространственный каркас из перемычек между пересекающимися ячейками. Типичным примером ВПЯМ является вспененный никель с пористостью $k = 95\%$ (отношение общего объема пористого образца к объему каркаса) и диаметром пор $d = 1$ мм, изображение которого приведено на рис. 1.

Ранее авторами для исследования путем численного моделирования сверхзвукового обтекания цилиндра с передней вставкой из высокопористого ячеистого материала была разработана и реализована двумерная осесимметричная [7, 8] и трехмерная скелетная [9] модели из набора соосных колец разного диаметра, расположенных в шахматном порядке (кольцевая модель ВПЯМ на рис. 2а). С использованием этой модели ВПЯМ были проведены параметрические исследования при вариации размера ячеек пористого материала, проанализировано влияние чисел Маха и Рейнольдса [8] и было изучено влияние нагрева передней вставки, лежащее в основе метода управления аэродинамическими силами [10]. Несмотря на отличие геометрической структуры кольцевой модели от реального образца ВПЯМ (отсутствие связности кольцевых элементов скелета), эта простая модель показала согласованность данных с экспериментальными значениями аэродинамических коэффициентов (отличие составило не более 3,5 %).

Трехмерная кольцевая модель в плоскости продольного сечения, проходящего через ось симметрии вставки, состоит из набора квадратных элементов с острыми вершинами (рис. 2б). Представляется очевидным, что лучше обтекаются элементы без острых вершин. Поэтому в данной работе рассматривается трехмерная скелетная модель, состоящая из соосных тороидальных элементов разного диаметра, расположенных так же, как и в кольцевой модели в шахматном порядке (рис. 3). В плоскости осевого сечения эта система колец представляет собой набор непроницаемых круглых элементов, расположенных в шахматном порядке (рис. 3с) с расстоянием между элементами в радиальном и осевом направлениях, равным диаметру пор d реального образца ВПЯМ. Диаметр круглых элементов и их количество выбирались из условия соответствия течению в пористой вставке с пористостью $k = 95\%$, т.е. скелет составлял 5 % объема пористой вставки.

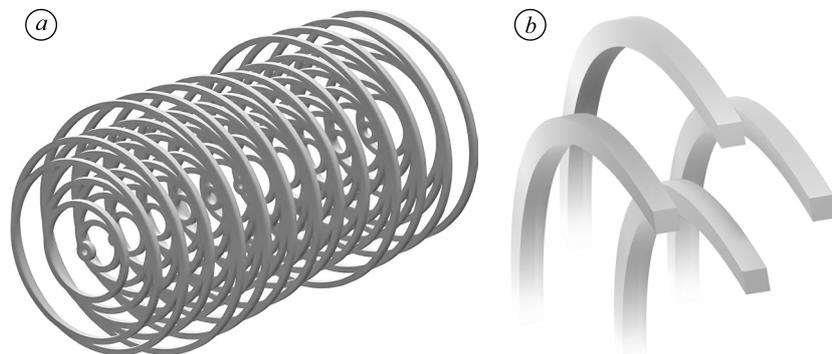


Рис. 2. Изображение расчетной модели передней пористой вставки цилиндра кольцевой модели ВПЯМ (а) и изображение данной модели ВПЯМ при рассечении её продольной осевой плоскостью (б).

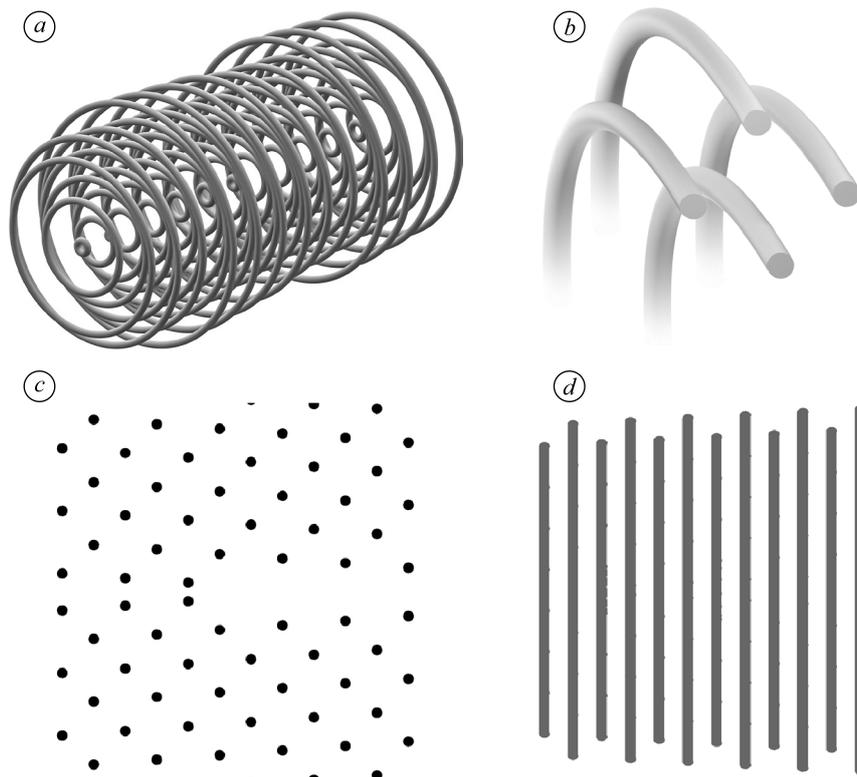


Рис. 3. Изображение расчетной модели передней пористой вставки цилиндра тороидальной модели ВПЯМ (а), изображение данной модели ВПЯМ при рассечении её продольной осевой плоскостью (b), проекция системы колец тороидальной модели ВПЯМ на плоскость в сечении $z = 0$ (с) и её вид сбоку (d).

При моделировании скелета также учитывалась длина прозрачности ВПЯМ. Для соответствия этому параметру осуществлялось постепенное смещение вертикального ряда круглых элементов (см. рис. 3). Исследуемая скелетная модель не предполагает наличия радиальных перемычек между кольцевыми элементами (рис. 3d), поэтому эта модель ВПЯМ имеет разрывной скелет.

Экспериментальные исследования проводились в сверхзвуковой аэродинамической трубе Т-327 ИТПМ СО РАН при числе Маха $M_\infty = 7$ и единичном числе Рейнольдса $Re_1 = 1,5 \cdot 10^6$ 1/м. В качестве экспериментальной модели рассматривался цилиндр диаметром $D = 14,5$ мм с передней цилиндрической пористой вставкой (см. рис. 1) из вспененного никеля с пористостью 95 % такого же диаметра. Общая длина модели L составляла 100 мм, длина пористой вставки $l = 29$ мм и диаметр пор $d = 2$ мм. Измерения аэродинамических сил, действующих на модель, выполнялись с помощью трехкомпонентных тензометрических весов. Модель устанавливалась на тензovesы с помощью специальной державки, позволяющей изменять угол атаки модели. Эксперимент проводился для углов атаки $\alpha = 0, 2, 5, 10$ и 15 градусов [9].

Численное моделирование задачи сверхзвукового обтекания выполнялось с помощью газодинамического пакета общего назначения ANSYS Fluent. В работе решалась система трехмерных уравнений Навье–Стокса, осредненных по Рейнольдсу, с использованием $k-\omega$ SST модели турбулентности. Расчеты проводились при условиях эксперимента для модели цилиндра с передней пористой вставкой с использованием тороидальной модели пористого материала. Геометрические размеры модели указаны выше. Следует отметить, что при длине передней пористой вставки $l = 29$ мм ($l/D = 2$) при всех значениях

угла атаки в экспериментах наблюдается максимальное уменьшение сопротивления всей модели [9].

В результате решения задачи получены все газодинамические величины потока, включая аэродинамические коэффициенты: $C_x = (F_x / 0,5 \rho_\infty u_\infty^2) / S_m$ и $C_y = (F_y / 0,5 \rho_\infty u_\infty^2) / S_m$, где ρ_∞ , u_∞ — плотность и скорость набегающего потока, S_m — площадь миделя модели, F_x , F_y — аэродинамические силы в продольном и поперечном относительно потока направлениях, включающие силу давления и силу трения, определяемые в ANSYS Fluent.

На рис. 4 приведены расчетные поля плотности на плоскости, ориентированной вдоль потока, для цилиндра с передней пористой вставкой из набора соосных тороидальных элементов при углах атаки $\alpha = 0^\circ$, 5° и 10° . Видно, что поток воздуха проходит сквозь пористую вставку, и при всех углах атаки головной скачок уплотнения присоединен к переднему торцу модели. Изменение угла атаки приводит к заметной перестройке течения, которое видно на рисунках как увеличение угла наклона головной ударной волны с подветренной стороны модели и уменьшение угла наклона головной ударной волны с наветренной стороны. Такая перестройка обусловлена несимметричностью обтекания модели внешним потоком, которая должна привести к изменению коэффициента сопротивления модели.

На рис. 5 приведены результаты измерений и расчета аэродинамических коэффициентов сопротивления и подъемной силы цилиндра с передней пористой вставкой при различных значениях угла атаки. Экспериментальные данные усреднены по десяти и более измерениям в различных пусках аэродинамической трубы. Доверительные интервалы показывают величину стандартного отклонения от среднего значения. Также здесь представлены расчетные данные как для тороидальной модели, полученные в настоящей работе, так и для кольцевой, полученные в исследовании [9]. Результаты показывают, что увеличение угла атаки приводит к росту как коэффициента сопротивления (см. рис. 5а), так и коэффициента подъемной силы (см. рис. 5б). Этот эффект объясняется следующим образом. При увеличении угла атаки растет проекция на поток передней пористой вставки и на поток сплошного цилиндра модели, что и приводит к увеличению сопротивления модели с пористой вставкой по сравнению с нулевым углом атаки. В то же время увеличение проекций на поток передней пористой вставки и сплошного цилиндра модели с увеличением угла атаки приводит к возникновению и увеличению подъемной силы.

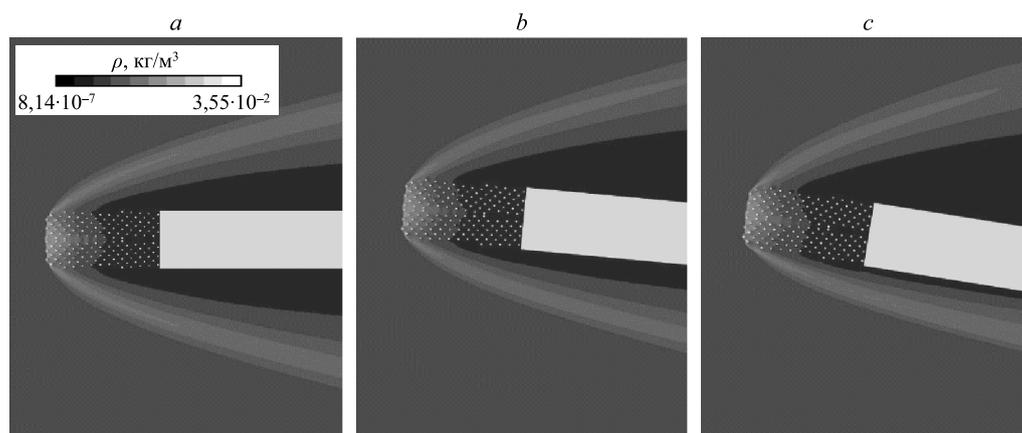


Рис. 4. Расчетные поля плотности на плоскости, ориентированной вдоль потока, при обтекании цилиндра ($L = 100$ мм, $D = 14,5$ мм) с передней пористой вставкой ($l = 29$ мм, $d = 2$ мм, $k = 0,95$) при $M_\infty = 7$, $Re_1 = 1,5 \cdot 10^6 \text{ м}^{-1}$ и углах атаки $\alpha = 0$ (а), 5° (б), 10° (с).

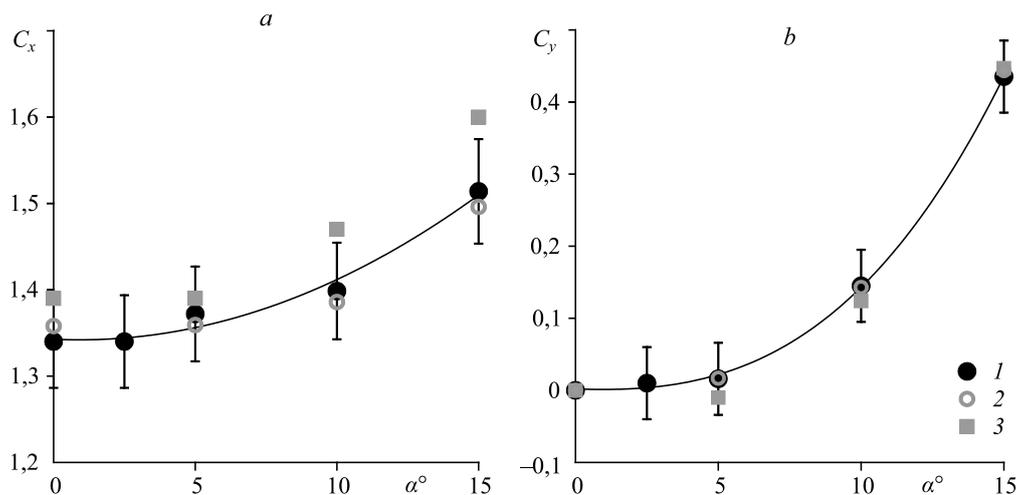


Рис. 5. Аэродинамические коэффициенты сопротивления (а) и подъемной силы (б) цилиндра с передней пористой вставкой.

1 — эксперимент, 2 — тороидальная модель, 3 — кольцевая модель;
 $M_\infty = 7$, $Re_1 = 1,5 \cdot 10^6 \text{ м}^{-1}$, $D = 14,5 \text{ мм}$, $L = 100 \text{ мм}$, $d = 2 \text{ мм}$, $k = 0,95$, $l = 29 \text{ мм}$.

Из рис. 5 видно, что максимальное отклонение данных тороидальной модели от экспериментальных результатов составляет не более 0,01, а максимальное отклонение данных кольцевой модели достигает 0,09. Из этого следует, что расчеты аэродинамических коэффициентов с использованием тороидальной модели лучше согласуются с результатами экспериментов в сравнении с расчетами по кольцевой модели ВПЯМ.

Таким образом, получены следующие результаты. Разработана трехмерная скелетная модель высокопористого материала, состоящая из набора соосных тороидальных элементов разного диаметра, расположенных в шахматном порядке.

Выполнено численное моделирование сверхзвукового ($M_\infty = 7$) обтекания цилиндра с передней вставкой из высокопористого ячеистого материала под разными углами атаки ($\alpha = 0 \div 15^\circ$). Результаты расчетов сопоставлены с экспериментальными данными, полученными в сверхзвуковой аэродинамической трубе Т-327 ИТПМ СО РАН, и с расчетными данными, полученными с использованием кольцевой скелетной модели ВПЯМ.

Показано, что предложенная тороидальная модель ВПЯМ достаточно точно предсказывает величины аэродинамических коэффициентов цилиндра с передней пористой вставкой под углом атаки.

Список литературы

1. Гортышов Ю.Ф., Муравьев Г.Б., Надыров И.Н. Экспериментальное исследование течения и теплообмена в высокопористых структурах // Инж.-физ. журн. 1987. Т. 53, № 3. С. 357–361.
2. Беклемишев А.М. Особенности закона сопротивления высокопористых ячеистых материалов. Пермь: ВИНТИ, 1996. 38 с.
3. Полежаев Ю.В., Селиверстов Е.М. Универсальная модель теплообмена в системах с проникающим охлаждением // Теплофизика высоких температур. 2002. Т. 40, № 6. С. 922–930.
4. Бедарев И.А., Миронов С.Г., Сердюк К.М., Федоров А.В., Фомин В.М. Физическое и математическое моделирование сверхзвукового обтекания цилиндра с пористой вставкой // Прикл. механика и технич. физика. 2011. Т. 52, № 1. С. 13–23.
5. Миронов С.Г., Маслов А.А., Поплавская Т.В., Кириловский С.В. Моделирование сверхзвукового обтекания цилиндра с газопроницаемой пористой вставкой // Прикл. механика и технич. физика. 2015. Т. 56, № 4. С. 12–22.
6. Митричев И.И., Кольцова Э.М., Женса А.В. Компьютерное моделирование газодинамической обстановки внутри каналов высокопористого ячеистого материала // Фундаментальные исследования. Технические науки. 2012. № 11. С. 440–446.

7. Поплавская Т.В., Миронов С.Г., Кириловский С.В., Маслов А.А. Применение скелетной модели высокопористого ячеистого материала для моделирования сверхзвукового обтекания цилиндра с передней газопроницаемой вставкой // Изв. РАН. Механика жидкости и газа. 2018. № 3. С. 78–86.
8. Maslov A.A., Mironov S.G., Poplavskaya T.V., Kirilovskiy S.V. Supersonic flow around a cylinder with a permeable high-porosity insert experiment and numerical simulation // J. Fluid Mech. 2019. Vol. 867. P. 611–632.
9. Миронов С.Г., Кириловский С.В., Поплавская Т.В., Цырюльников И.С., Маслов А.А. Физическое и математическое моделирование сверхзвукового обтекания под углом атаки тел с газопроницаемыми пористыми вставками // Прикл. механика и технич. физика. 2020. Т. 65, № 5. С. 14–20.
10. Миронов С.Г., Поплавская Т.В., Кириловский С.В. Влияние температуры передней пористой вставки на аэродинамическое сопротивление цилиндра в сверхзвуковом потоке // Теплофизика и аэромеханика. 2017. Т. 24, № 4. С. 797–800.

*Статья поступила в редакцию 17 августа 2021 г.,
после доработки — 6 сентября 2021 г.,
принята к публикации 20 октября 2021 г.*