

УДК 532.526

Трехмерные скелетные модели газопроницаемых высокопористых ячеистых материалов для сверхзвуковой аэродинамики*

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

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

E-mails: kirilov@itam.nsc.ru, popla@itam.nsc.ru, mironov@itam.nsc.ru

Представлены результаты численного моделирования сверхзвукового ($M_\infty = 7$) обтекания цилиндра с передней газопроницаемой пористой вставкой (пористость 95 %, диаметр пор 2 мм), расположенного под углами атаки $\alpha = 0 \div 10^\circ$. Численное моделирование выполнено на основе решения трехмерных уравнений Навье–Стокса, осредненных по Рейнольдсу, с использованием трех скелетных моделей: модель из пересекающихся полых сфер, модель из непересекающихся твердых сфер с хаотическим расположением пор и модель из набора тороидальных элементов. Проведено сопоставление расчетных данных по коэффициентам сопротивления и подъемной силе цилиндра с передней газопроницаемой высокопористой вставкой с результатами экспериментов, проведенных в аэродинамической трубе Т-327 ИТПМ СО РАН. Выполнен сравнительный анализ результатов применения трехмерных скелетных моделей высокопористых ячеистых материалов для моделирования сверхзвукового обтекания тел с газопроницаемыми пористыми вставками под различными углами атаки.

Ключевые слова: сверхзвуковые течения, управление обтеканием, газопроницаемые пористые вставки, аэродинамическое сопротивление.

Введение

В настоящее время сфера применения газопроницаемых пористых материалов, традиционно используемых в различных областях техники в качестве фильтров и конструктивных элементов охлаждающих устройств, значительно расширилась и включила в себя сверхзвуковую аэродинамику, в которой с их помощью осуществляется управление аэродинамическими характеристиками летательных аппаратов. Например, газопроницаемые пористые материалы используются для защиты конструкций от воздействия ударных волн [1], сокращения отрывной зоны на пластине с уступом в сверхзвуковом

* Работа выполнена в рамках Программы фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2021–2023 годы (проект № 121030500162-7). Эксперименты проводились на оборудовании Центра коллективного пользования «Механика» (ИТПМ СО РАН).

потоке [2], подавления нарастающих возмущений в сверхзвуковом пограничном слое [3–6], для снижения донного [7] и волнового [8] сопротивлений цилиндрических тел.

В работе [9] были представлены результаты экспериментальных и расчетных исследований сверхзвукового обтекания цилиндра с передней газопроницаемой пористой вставкой из высокопористого ячеистого материала (ВПЯМ) при нулевом угле атаки. Было показано, что передняя высокопористая вставка на цилиндрическом теле в сверхзвуковом потоке существенно снижает аэродинамическое сопротивление модели. Расчетные исследования в широком диапазоне определяющих параметров, таких как длина передней вставки, выступающей в набегающий поток, диаметр пор материала, диаметр цилиндра, число Маха и число Рейнольдса, проводились с использованием разработанной авторами осесимметричной скелетной модели ВПЯМ, состоящей из набора соосных колец, имеющих квадратное сечение, разный диаметр и расположенных в шахматном порядке (кольцевая модель).

Модель пористого материала является основным элементом численного моделирования задачи обтекания тел с газопроницаемыми пористыми вставками. В качестве модели пористой среды широко используются континуальные модели, в которых задаются аналитические зависимости градиента давления в пористой среде от скорости фильтрации [1, 10–13]. Однако эти модели требуют получения эмпирических фильтрационных зависимостей для условий сильно градиентного течения при сверхзвуковых скоростях. Поэтому для ВПЯМ авторами были разработаны скелетные модели пористого материала, в которых напрямую моделируется течение газа сквозь пористый материал. Скелетные модели имеют вид пространственной системы дискретных элементов, определяющими параметрами которой являются пористость k , характерная длина прозрачности пористого материала и диаметр пор d . Для численного моделирования используются различные скелетные модели пористых материалов, например, модель для стабилизации сверхзвукового пограничного слоя (модель из щелевых каналов [14]), для исследования процессов теплообмена в пористых средах (модель шаровой засыпки [15] и модель сферических пор, соединенных каналами [16]), для ослабления детонационной волны (модель круговых элементов, расположенных в шахматном порядке [17]). В представленной работе скелетные модели разрабатывались для решения задачи снижения волнового сопротивления цилиндра с передней пористой вставкой из ВПЯМ.

При разработке скелетных моделей необходимо учитывать такие критерии, как минимизация количества расчетных ячеек при построении расчетной сетки, приближение пространственной структуры скелетной модели к реальному каркасу ВПЯМ, учет хаотических отклонений в расположении элементов скелета, присутствующих в реальном ВПЯМ. В соответствии с этими критериями было разработано и реализовано несколько скелетных моделей ВПЯМ.

Исторически первой для численного моделирования сверхзвукового обтекания цилиндра с передней пористой вставкой под нулевым углом атаки была разработана и успешно реализована осесимметричная кольцевая скелетная модель [18]. Для расчетов обтекания цилиндра с передней пористой вставкой под ненулевым углом атаки на базе кольцевой модели была разработана трехмерная скелетная модель, состоящая из гладко-обтекаемых тороидальных элементов разного диаметра, расположенных в шахматном порядке [19]. Наиболее соответствующими реальному скелету ячеисто-пористого материала [20] являются скелетные модели из набора пересекающихся полых сфер [21, 22] с диаметром сфер, равным диаметру пор d ВПЯМ, которые были успешно реализованы для низкоскоростных течений [21]. Однако при пересечении сфер в этих моделях образуются элементы скелета с острыми вершинами и ребрами, не существующие в реальном образце ВПЯМ (в частности, в образцах ячеисто-пористого никеля). Поэтому была

предложена трехмерная модель скелета, в которой такие элементы скелета были заменены твердыми непересекающимися сферами (модель из непересекающихся твердых сфер). Модель из непересекающихся твердых сфер с точки зрения построения скелета является крайней идеализацией реальной структуры ВПЯМ. Более того, именно в этой модели легко реализуется возможность учета хаотических отклонений в периодическом расположении элементов реального скелета путем хаотичного смещения сфер относительно их первоначальных регулярных позиций и изменения объема твердых сфер случайным образом.

В настоящей работе выполнен сравнительный анализ трехмерных скелетных моделей ВПЯМ с целью исследования влияния геометрической структуры скелета на аэродинамические характеристики трехмерной модели цилиндра с передней газопроницаемой высокопористой вставкой, обтекаемой сверхзвуковым потоком под ненулевым углом атаки, соответствия аэродинамических коэффициентов экспериментальным данным и выбора наиболее подходящей скелетной модели для численного моделирования рассматриваемой задачи.

1. Эксперимент

Для проверки адекватности предложенных скелетных моделей ВПЯМ использовались эксперименты по измерению силы сопротивления и подъемной силы, создаваемых цилиндром с передней пористой вставкой из ячеисто-пористого никеля. Ячеисто-пористый никель (рис. 1) с пористостью $k = 95\%$ (отношение объема газа в порах к общему объему пористого образца) является типичным примером ВПЯМ. Подобные материалы формируются при застывании вспененных жидких металлов, и ячейки застывшей пены образуют пространственный каркас из перемычек практически круглого сечения между пересекающимися ячейками (рис. 1*b*). Величина пористости такого материала лежит в пределах от 76 до 98%. При меньшей пористости материал перестает быть газопроницаемым, а при большей — не образуется скелет из перемычек.

Эксперименты по измерению силы сопротивления и подъемной силы цилиндра с передней пористой вставкой из ВПЯМ проводились в сверхзвуковой аэродинамической трубе Т-327 ИТПМ СО РАН в потоке воздуха при значениях числа Маха $M_\infty = 7$, единичного числа Рейнольдса $Re_1 = 1,5 \cdot 10^6 \text{ м}^{-1}$, давления торможения в потоке 10^5 Па , температуры торможения 300 К, что соответствует температуре набегающего потока 27,5 К. Величина единичного числа Рейнольдса обусловлена относительно низким значением

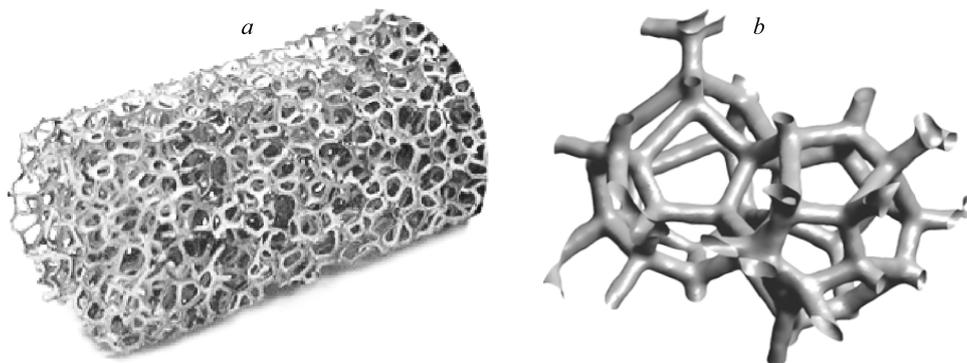


Рис. 1. Фотография образца ячеисто-пористого никеля (а) и вид пространственной структуры ВПЯМ, полученный с помощью рентгеновской томографии (б).

давления торможения, что связано с необходимостью избежать конденсации воздуха в потоке аэродинамической трубы [23].

Экспериментальная модель [24] представляла собой цилиндр диаметром $D = 14,5$ мм, состоящий из двух частей. Передняя цилиндрическая часть длиной $l = 29$ мм была изготовлена из ячеисто-пористого никеля с диаметром пор $d = 2$ мм и соединена со сплошной частью цилиндра, выполненной из алюминия. Общая длина модели составляла $L = 100$ мм. При длине пористой вставки $l = 29$ мм при всех значениях угла атаки наблюдалось максимальное уменьшение сопротивления модели с передней газопроницаемой вставкой по сравнению с моделью со сплошным цилиндром [22]. Измерения силы сопротивления и подъемной силы цилиндра с передней пористой вставкой из ВПЯМ проводились с помощью трехкомпонентных тензососов. Более подробное описание экспериментов приведено в работах [9, 24].

2. Численное моделирование

Задача об обтекании цилиндра под ненулевым углом атаки решалась в рамках трехмерных уравнений Навье–Стокса, осредненных по Рейнольдсу, с использованием $k-\omega$ SST модели турбулентности. Численное моделирование обтекания цилиндра с модельными вставками проводилось с помощью пакета ANSYS Fluent. При решении задачи использовались неявные схемы второго порядка точности по пространству. Для аппроксимации конвективных потоков применялся Roe-FDS — метод расщепления с TVD-ограничителем для сохранения монотонности решения вблизи разрывов и локальных экстремумов течения. Расчеты выполнялись при условиях, соответствующих экспериментам в сверхзвуковой аэродинамической трубе Т-327 ИТПМ СО РАН, описанных выше. При моделировании в качестве рабочего газа использовался воздух, вязкость полагалась зависящей от температуры по закону Сазерленда, коэффициент теплопроводности — по формуле из кинетической теории газов, удельная теплоемкость считалась постоянной (все зависимости взяты из базы данных ANSYS Fluent).

В центре расчетной области, имеющей форму цилиндра (рис. 2а), располагается описанная выше модель цилиндра с передней пористой вставкой. Диаметр расчетной области

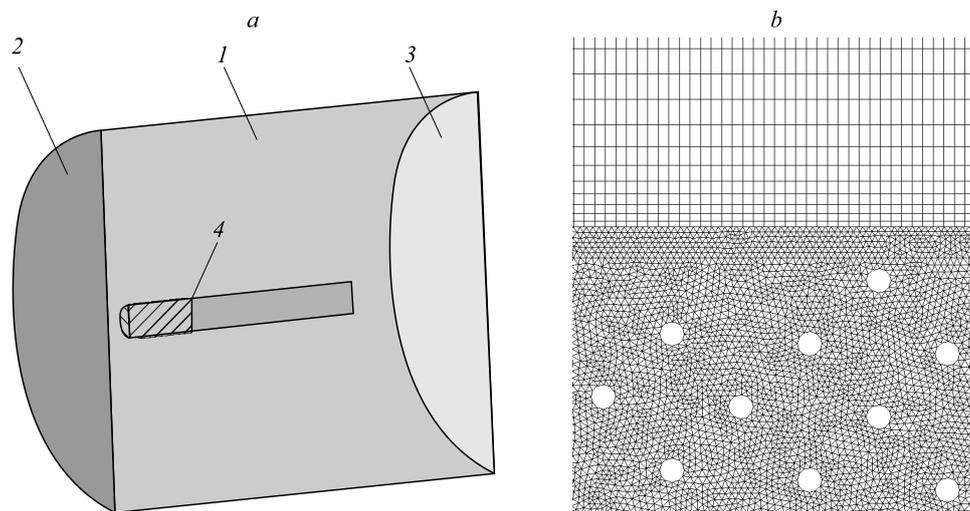


Рис. 2. Схематичное изображение расчетной области (а) и фрагмент расчетной сетки в осевом сечении (тороидальная модель) (b).
 а: 1 — внешняя боковая граница, 2 — левая входная граница, 3 — выходная граница,
 4 — модель цилиндра с передней пористой вставкой.

выбирался из условия, чтобы головная ударная волна не взаимодействовала с внешней границей 1 расчетной области. Левая (входная) граница 2 располагалась на некотором расстоянии вверх по потоку от переднего торца модели. Правая (выходная) граница 3 была отодвинута от заднего торца модели на расстояние порядка длины модели. Расчетная область делилась на подобласти с целью построения оптимальной сетки для разрешения течения вблизи головной ударной волны, внутри пористой вставки и в пограничном слое модели. Внутри пористой зоны цилиндра расчетная область покрывалась нерегулярной тетраэдральной расчетной сеткой (см. рис. 2*b*). Вне пористой зоны строилась регулярная гексаэдральная расчетная сетка, которая имела сгущение вблизи переднего торца модели, к поверхностям цилиндра и пористого участка (см. рис. 2*b*).

Расчеты проводились методом установления, при этом на левой (входной) и на внешней границах 1, 2 расчетной области задавались условия набегающего потока. На правой границе 3 задавалось условие сноса потока, на поверхности модели и на каждом элементе скелета пористой вставки — условия прилипания и постоянства температуры $T_w = 300$ К. Расчетные сетки для трехмерной задачи строились в соответствии с размерами ячеек осесимметричной задачи [9], для которой была проведена оценка сеточной сходимости методом Grid Convergence Index (GCI) [25]. При этом в представленной работе для каждой конфигурации ячеек, определяемой различными скелетными моделями, проводился анализ сеточной сходимости: измельчение расчетных сеток в 1,5 раза показало изменение аэродинамического коэффициента сопротивления модели не более чем на 2 %.

Для моделирования течения воздуха в высокопористой ячеистой вставке цилиндра использовались разработанные трехмерные скелетные модели, которые делятся на три типа. Первый из них — трехмерная скелетная модель из набора пересекающихся полых сфер [21] с диаметром сфер, равным диаметру пор d ВПЯМ (рис. 3*a*). Модельная ячейка этой скелетной модели практически повторяет реальную геометрию ВПЯМ [20] (см. рис. 1*b*). Однако элементы самого модельного скелета отличаются от структуры реального образца, в котором скелет состоит из системы связанных с друг другом перемычек практически круглого сечения. Скелет модели из полых сфер в плоскости осевого сечения представляет собой набор ромбовидных элементов с острыми вершинами, расположенными регулярным образом. Аналогичная картина наблюдается и в проекциях модели на плоскость, ориентированную поперек потока. То есть у рассматриваемой трехмерной скелетной модели из полых сфер [26] имеются перемычки ромбовидного сечения как в осевом, так и в радиальном направлениях. Эта модель имеет неразрывный скелет, и газ проходит сквозь отверстия в полых сферах. Следует отметить, что при построении расчетной сетки на элементах с острыми вершинами и ребрами в пористой зоне необходимо использовать ячейки малого размера, поэтому скелетная модель из набора пересекающихся полых сфер требует не менее 15 млн вычислительных ячеек.

Второй тип скелетных моделей, в котором элементы с острыми вершинами и ребрами из модели полых сфер заменены непересекающимися твердыми сферами, с точки зрения построения скелета является крайней идеализацией реальной структуры ВПЯМ. Эта скелетная модель представляет собой пространственную структуру несвязанных твердых сфер, расположенных в вершинах куба (рис. 3*b*), и поэтому имеет разрывный скелет. Ячейкой в такой модели ВПЯМ является виртуальная полая сфера диаметром d , вписанная в систему из восьми твердых сфер (см. рис. 3*b*). Именно в этой модели [27] была реализована возможность учета хаотических отклонений в периодическом расположении элементов реального скелета путем хаотичного смещения сфер относительно их перво-

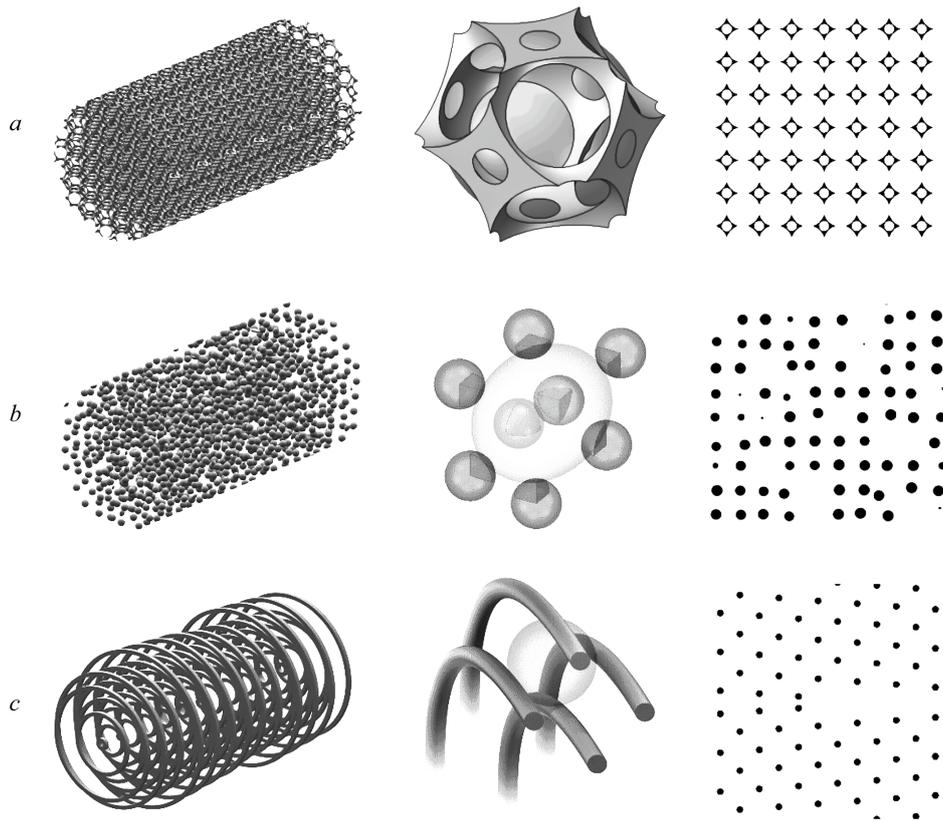


Рис. 3. Трехмерное изображение расчетной модели передней пористой вставки цилиндра, вид модельной ячейки, проекция модели на плоскость, ориентированную вдоль потока, в сечении $z = 0$ (столбцы слева направо): модель из полых пересекающихся сфер (а), модель из твердых непересекающихся сфер с хаотическим расположением элементов (b) и тороидальная модель (c).

начальных регулярных позиций и изменения объема твердых сфер случайным образом (см. проекцию модели на плоскость, ориентированную вдоль потока, на рис. 3b). Количество вычислительных ячеек для реализации скелетной модели из твердых непересекающихся сфер составляет 13,6 млн.

Третий тип скелетных моделей — модели в виде набора соосных кольцевых элементов квадратного поперечного сечения (кольцевая модель) [9, 18] и круглого поперечного сечения (тороидальная модель) [19]. Трехмерная тороидальная скелетная модель (рис. 3c) состоит из гладкообтекаемых тороидальных элементов разного диаметра, расположенных в шахматном порядке [19]. В плоскости осевого сечения данная система колец представляет собой набор непроницаемых круглых элементов, расположенных в шахматном порядке с расстоянием d , равным диаметру пор между элементами в радиальном и осевом направлениях. Таким образом, между кольцами также можно вписать набор соприкасающихся виртуальных полых пор-ячеек в виде сферы (см. рис. 3c). Эта скелетная модель не предполагает наличия радиальных перемычек между кольцевыми элементами, поэтому поток воздуха в поперечном направлении проходит беспрепятственно. В работе [19] было показано, что тороидальная скелетная модель ВПЯМ точнее кольцевой предсказывает величины аэродинамических коэффициентов цилиндра

с передней пористой вставкой под ненулевым углом атаки. Количество вычислительных ячеек для реализации тороидальной модели составляет 12,3 млн.

Предлагаемые скелетные модели пористой среды использовались для прогнозирования аэродинамических характеристик цилиндра с передней газопроницаемой пористой вставкой из ВПЯМ, обтекаемого сверхзвуковым потоком под нулевым углом атаки, в исследованиях [9, 18, 19, 22, 27]. Однако в реальном полете сверхзвукового летательного аппарата наблюдается изменение угла атаки, которое следует учитывать. Поэтому в настоящей работе выполнен сравнительный анализ трехмерных скелетных моделей ВПЯМ для численного моделирования сверхзвукового обтекания цилиндра с передними газопроницаемыми высокопористыми вставками под ненулевым углом атаки. В результате решения задачи получены газодинамические характеристики течения как вне модели, так и внутри пористого материала. Аэродинамический коэффициент сопротивления модели рассчитывался по формуле $C_x = F_x / (0,5\rho_\infty u_\infty^2 S_m)$, коэффициент подъемной силы — по формуле $C_y = F_y / (0,5\rho_\infty u_\infty^2 S_m)$, 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.

3. Результаты

В экспериментах [24] было показано, что при значениях угла атаки в промежутке от 0 до 25° увеличение длины пористой вставки приводит к уменьшению коэффициента сопротивления модели и максимальное снижение достигается при $l/D = 1,5 \div 2$. Исходя из этого, в настоящей работе все расчеты проводились при длине пористой вставки $l/D = 2$.

На рис. 4 приведены расчетные поля плотности на плоскости, ориентированной вдоль потока, при обтекании сплошного цилиндра и цилиндра с передними модельными пористыми вставками разной структуры под углом атаки $\alpha = 10^\circ$. При обтекании сплошного цилиндра (рис. 4а) хорошо виден дугообразный головной скачок уплотнения, отошедший от торца модели. Наличие газопроницаемой пористой вставки приводит к тому, что головная ударная волна входит в пористый материал и угол её наклона к направлению потока уменьшается. Таким образом, перераспределение газового потока в пористой вставке, как и при нулевом угле атаки (см. результаты работы [9]), приводит к формированию течения, подобного обтеканию заостренного тела, в результате чего сопротивление модели в сверхзвуковом потоке уменьшается по сравнению с телом без передней газопроницаемой вставки.

Следует отметить, что при обтекании модели под ненулевым углом атаки угол наклона головной ударной волны с подветренной стороны модели увеличивается, а угол наклона головной ударной волны с наветренной стороны уменьшается в отличие от симметричной картины обтекания при нулевом угле атаки (см. [9]). Такая перестройка обусловлена несимметричностью обтекания модели внешним потоком под углом атаки, которая должна привести к изменению коэффициента сопротивления модели.

Рисунки 4b–4d показывают, что углы наклона головной ударной волны в картинах течения, полученных с использованием различных скелетных моделей, несколько отличаются, что связано с интенсивностью протекания воздуха через пористую вставку. На рис. 5 приведены расчетные поля скорости на плоскостях, ориентированных вдоль и поперек потока, при обтекании цилиндра с передними модельными пористыми вставками разной

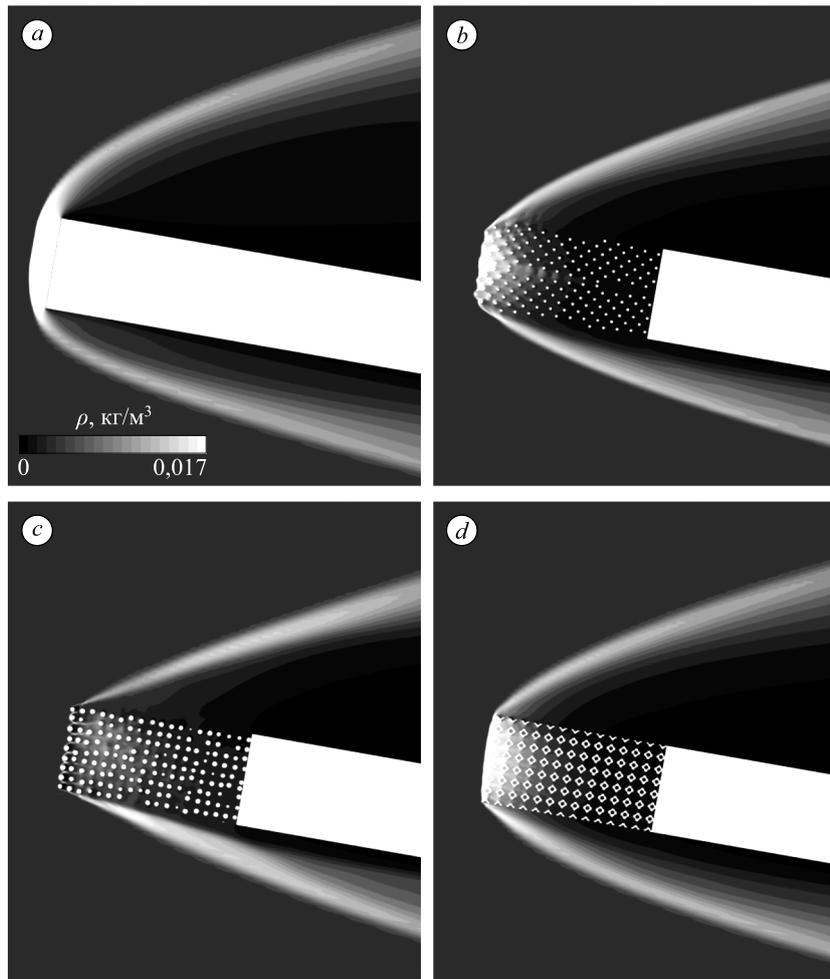


Рис. 4. Расчетные поля плотности на плоскости, ориентированной вдоль потока, при обтекании цилиндра с $L = 100$ мм, $D = 14,5$ мм, $M_\infty = 7$, $Re_1 = 1,5 \cdot 10^6$ м⁻¹, $\alpha = 10^\circ$.

a — цилиндр без передней пористой вставки, b, c, d — цилиндры с передней пористой вставкой: b — тороидальная модель, c — модель из твердых непересекающихся сфер, d — модель из пересекающихся полых сфер; характеристики передней пористой вставки: $l = 29$ мм, $d = 2$ мм, $k = 0,95$.

структуры под углом атаки 10° . Видно, что скорость протекания газа внутри пористой вставки, описываемой моделью из пересекающихся полых сфер, заметно меньше, чем в пористых вставках, описываемых моделью из твердых непересекающихся сфер и тороидальной моделью. Это объясняется тем, что гидравлическое сопротивление течению воздуха в порах больше, а значит, и поток тормозится больше, что должно приводить к большей величине полного аэродинамического сопротивления (как далее будет показано в табл. 2). Это связано с наличием плохообтекаемых перемычек ромбовидного сечения как в осевом, так и в радиальном направлениях у модели из пересекающихся полых сфер. Выходом из положения может стать сглаживание острых граней перемычек скелета [28], но это требует дополнительных затрат ручного труда по сравнению с построением других скелетных моделей.

На рис. 6 приведено поле температуры на плоскости, ориентированной вдоль потока, при обтекании цилиндра с передней модельной пористой вставкой из тороидальных

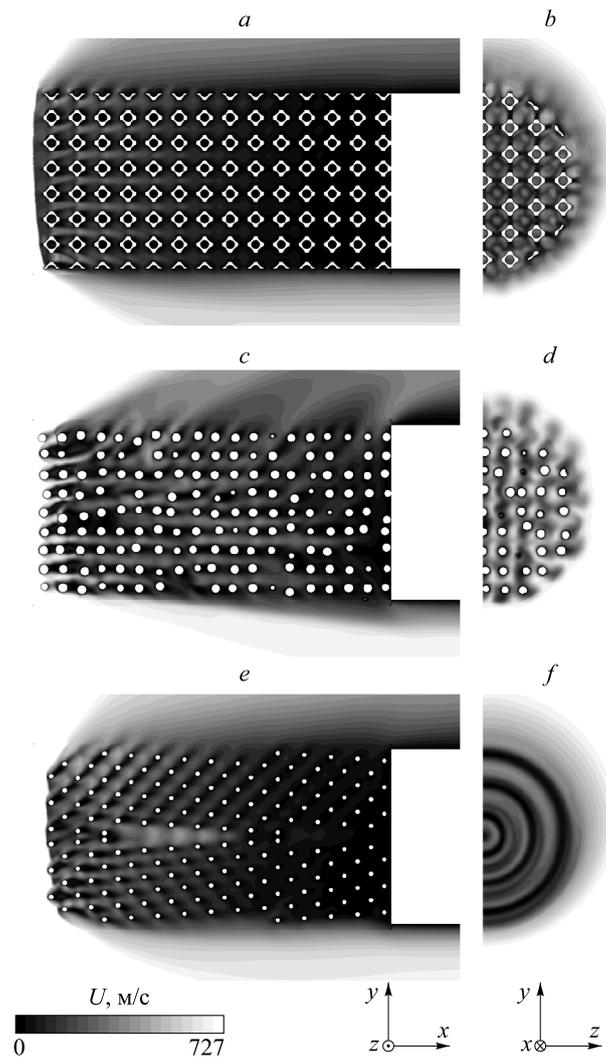


Рис. 5. Расчетные поля скорости на плоскости, ориентированной вдоль потока (*a, c, e*), и на плоскости, ориентированной поперек потока (*b, d, f*), в сечении $x = 5$ мм.
a, b — модель из пересекающихся полых сфер, *c, d* — модель из твердых непересекающихся сфер, *e, f* — тороидальная модель;
 $M_\infty = 7$, $Re_{1\infty} = 1,5 \cdot 10^6 \text{ м}^{-1}$, $D = 14,5 \text{ мм}$, $L = 100 \text{ мм}$,
 $d = 2 \text{ мм}$, $k = 0,95$, $l = 29 \text{ мм}$, $\alpha = 10^\circ$.

элементов под углом атаки 10° . Видно, что в пористой зоне температура воздуха возрастает до $\approx 300 \text{ К}$ по всей ее длине, а истечение струек воздуха из пористой зоны приводит к незначительному снижению температуры и возникновению температурной неоднородности.

Экспериментальные и расчетные данные по аэродинамическим коэффициентам сверхзвукового обтекания цилиндра с передней пористой вставкой различных типов скелета приведены в табл. 1 и 2 для углов атаки $\alpha = 0$ и 10° . Видно, что увеличение угла атаки приводит к росту коэффициента сопротивления C_x . Коэффициенты C_x , полученные с использованием скелетной модели из полых сфер, существенно выше экспериментального результата и расчетных данных, полученных с использованием других

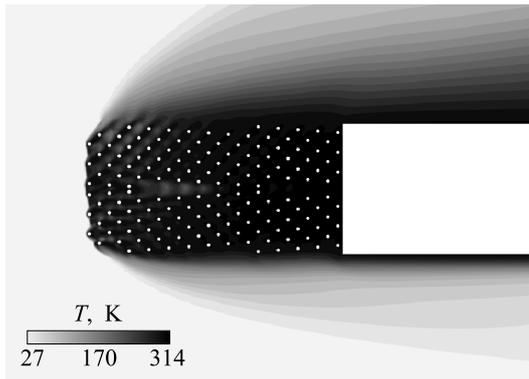


Рис. 6. Расчетные поля температуры на плоскости, ориентированной вдоль потока, при обтекании цилиндра с передней модельной пористой вставкой из тороидальных элементов.

$$M_\infty = 7, Re_{1\infty} = 1,5 \cdot 10^6 \text{ м}^{-1}, D = 14,5 \text{ мм}, \\ L = 100 \text{ мм}, d = 2 \text{ мм}, k = 0,95, \\ l = 29 \text{ мм}, \alpha = 10^\circ.$$

моделей ВПЯМ. Как уже отмечалось выше, это связано с наличием плохо-обтекаемых перемычек ромбовидного сечения в осевом и в радиальном направлениях, что способствует созданию

большого гидравлического сопротивления при протекании воздуха в порах. Таким образом, модель из полых сфер не создает наблюдаемого в эксперименте сопротивления для цилиндра с передней пористой вставкой. Другие модели ВПЯМ (из твердых непересекающихся сфер и из тороидальных элементов), имеющие разрывный скелет, показывают согласованность данных по аэродинамическому коэффициенту сопротивления C_x , полученных путем численного моделирования и в результате эксперимента.

При обтекании тела под ненулевым углом атаки проявляется также коэффициент подъемной силы C_y , величина которого в рассматриваемой задаче на порядок меньше величины коэффициентов сопротивления C_x . Из табл. 2 видно, что все три типа скелетных моделей предсказывают значения C_y , согласующиеся с экспериментальным значением в пределах погрешности эксперимента.

Таблица 1

Коэффициент C_x для разных структур пористого материала при $k = 0,95$, $d = 2 \text{ мм}$, $D = 14,5 \text{ мм}$, $L = 100 \text{ мм}$, $l = 29 \text{ мм}$, $M_\infty = 7$, $Re_{1\infty} = 1,5 \cdot 10^6 \text{ м}^{-1}$, $\alpha = 0$

Цилиндр с передней пористой вставкой	C_x
Эксперимент	$1,38 \pm 0,025$
Скелетная модель из пересекающихся полых сфер	1,72
Скелетная модель из твердых непересекающихся сфер с хаотическим расположением элементов	1,34
Тороидальная скелетная модель	1,36

Таблица 2

Аэродинамические коэффициенты для разных структур пористого материала при $k = 0,95$, $d = 2 \text{ мм}$, $D = 14,5 \text{ мм}$, $L = 100 \text{ мм}$, $l = 29 \text{ мм}$, $M_\infty = 7$, $Re_{1\infty} = 1,5 \cdot 10^6 \text{ м}^{-1}$, $\alpha = 10^\circ$

Цилиндр с передней пористой вставкой	C_x	C_y
Эксперимент	$1,398 \pm 0,025$	$1,145 \pm 0,025$
Скелетная модель из пересекающихся полых сфер	1,69	0,148
Скелетная модель из твердых непересекающихся сфер с хаотическим расположением элементов	1,38	0,164
Тороидальная скелетная модель	1,38	0,146

Таким образом, наиболее подходящими для численного моделирования сверхзвукового обтекания тел с передней пористой вставкой в диапазоне углов атаки $\alpha = 0 \div 10^\circ$ являются тороидальная скелетная модель и модель из твердых непересекающихся сфер. Несмотря на отличие геометрической структуры от реального образца ВПЯМ, эти модели имеют преимущества: простота в построении геометрии пространственного скелета, хорошая обтекаемость элементов скелета, меньший по сравнению с моделью полых сфер

объем вычислительных ресурсов и хорошее согласование с экспериментальными данными по обоим аэродинамическим коэффициентам.

Заключение

Представлены результаты численного моделирования сверхзвукового обтекания цилиндра ($M_\infty = 7$) с передней газопроницаемой пористой вставкой (с пористостью 95 % и диаметром пор 2 мм), расположенного под углами атаки $\alpha = 0 \div 10^\circ$, с использованием разработанных скелетных моделей: модели из пересекающихся полых сфер, модели из непересекающихся твердых сфер с хаотическим расположением пор и модели из набора тороидальных элементов. Выполнен сравнительный анализ влияния геометрической структуры трехмерных скелетных моделей ВПЯМ на аэродинамические характеристики модели цилиндра с передней газопроницаемой высокопористой вставкой, обтекаемой сверхзвуковым потоком под ненулевым углом атаки, и проведено сравнение полученных значений аэродинамических коэффициентов с экспериментальными данными. Показано, что, несмотря на то что модель из пересекающихся полых сфер геометрически подобна реальному образцу ВПЯМ и неплохо зарекомендовала себя для низкоскоростных течений, она не создает наблюдаемого в эксперименте сопротивления в случае цилиндра с передней пористой вставкой, обтекаемого сверхзвуковым потоком, из-за наличия большого сопротивления протеканию воздуха сквозь поры неразрывного модельного скелета, включающего элементы скелета с острыми вершинами и ребрами. Другие модели ВПЯМ (модели из твердых непересекающихся сфер и из тороидальных элементов), имеющие разрывный скелет с гладкообтекаемыми элементами, несмотря на отличающуюся от реального образца ВПЯМ геометрическую структуру показывают согласованность полученных в результате численного моделирования значений аэродинамических коэффициентов с экспериментальными значениями в пределах экспериментальной погрешности. Следовательно, тороидальная скелетная модель и модель из твердых непересекающихся сфер являются наиболее подходящими для численного моделирования сверхзвукового обтекания тел с передней пористой вставкой под углами атаки $\alpha = 0 \div 10^\circ$.

Список литературы

1. Ram O., Sadot O. A simple constitutive model for predicting the pressure histories developed behind rigid porous media impinged by shock waves // *J. Fluid Mech.* 2013. Vol. 718. P. 507–523.
2. Фомин В.М., Постников Б.В., Ломанович К.А. Изменение режимов обтекания прямого уступа сверхзвуковым потоком введением газопроницаемых вставок // *Письма в ЖТФ.* 2015. Т. 41, вып. 18. С. 68–73.
3. Fedorov A.V., Shiplyuk A.N., Maslov A.A., Burov E., Malmuth N. et al. Stabilization of a hypersonic boundary layer using and ultrasonically absorptive coating // *J. Fluid Mech.* 2003. Vol. 479. P. 99–124.
4. Лукашевич С.В., Морозов С.О., Шнилюк А.Н. Экспериментальное исследование влияния параметров пассивного пористого покрытия на развитие возмущений в гиперзвуковом пограничном слое // *Письма в ЖТФ.* 2012. Т. 38, № 23. С. 83–88.
5. Кириловский С.В., Поплавская Т.В., Цырюльников И.С., Маслов А.А. Развитие возмущений в ударном слое на пластине в потоке смеси колебательно возбужденных газов // *Теплофизика и аэромеханика.* 2017. Т. 24, № 3. С. 433–442.
6. Поплавская Т.В., Решетова А.И., Цырюльников И.С. Воздействие звукопоглощающих покрытий на развитие возмущений в потоке смеси колебательно возбужденных газов // *Теплофизика и аэромеханика.* 2019. Т. 26, № 2. С. 451–462.
7. Фомин В.М., Запругаев В.И., Локотко А.В., Волков В.Ф. Влияние газопроницаемых участков поверхности на аэродинамические характеристики тела вращения при сверхзвуковых скоростях // *Докл. АН.* 2009. Т. 427, № 5. С. 628–627.
8. Фомин В.М., Миронов С.Г., Сердюк К.М. Снижение волнового сопротивления тел в сверхзвуковом потоке пористыми материалами // *Письма в ЖТФ.* 2009. Т. 35, вып. 3. С. 39–45.

9. 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
10. Беклемышев А.М. Особенности закона сопротивления высокопористых ячеистых материалов // Республиканский инж.-техн. центр порошковой металлургии с НИИ проблем порошковой технологии и покрытий и опытным производством. Пермь, 1996. 38 с. Деп. в ВИНТИ № 2265-B96.
11. Levi-Hevroni D., Levy A., Ben-Dor G., Sorec S. Numerical investigation of the propagation of planar shock waves in saturated flexible porous materials: development of the computer code and comparison with experimental results // *J. Fluid Mech.* 2006. Vol. 462. P. 285–306.
12. 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 техн. физика.* 2011. Т. 52, № 1. С. 13–23.
13. Миронов С.Г., Маслов А.А., Кириловский С.В., Поплавская Т.В. Моделирование обтекания газопроницаемого пористого материала в приложении к сверхзвуковой аэродинамике // *Прикл. механика и техн. физика.* 2015. Т. 56, № 4. С. 12–22.
14. Sadham N.D., Ludeke H. Numerical study of Mach 6 boundary-layer stabilization by of a porous surface // *AIAA J.* 2009. Vol. 47, No. 9. P. 2243–2252.
15. Полежаев Ю.В., Селиверстов Е.М. Универсальная модель теплообмена в системах с проникающим охлаждением // *Теплофизика высоких температур.* 2002. Т. 40, № 6. С. 922–930.
16. Кирсанов Ю.А., Назипов Р.А., Данилов В.А. Теплообмен пористого тела с однофазным потоком теплоносителя // *Теплофизика высоких температур.* 2011. Т. 49, № 2. С. 235–242.
17. Бедарев И.А., Темербеков В.М. Двумерное моделирование ослабления детонационной волны при ее прохождении через область с круговыми препятствиями // *Письма в ЖТФ.* 2021. Т. 47, вып. 14. С. 8–10.
18. Кириловский С.В., Маслов А.А., Миронов С.Г., Поплавская Т.В. 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.
19. Миронов С.Г., Кириловский С.В., Милицина Т.С., Поплавская Т.В., Цырюльников И.С. Торондальная скелетная модель высокопористого ячеистого материала для моделирования сверхзвукового обтекания цилиндра с передней газопроницаемой вставкой под углом атаки // *Теплофизика и аэромеханика.* 2021. Т. 28, № 6. С. 865–870.
20. Белов С.В., Витязь П.А., Шелег В.К., Капцевич В.М., Павлов В.А. и др. Пористые проницаемые материалы. Справочное издание / под ред. С.В. Белова. М.: Металлургия, 1987. 335 с.
21. 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.
22. Mironov S.G., Poplavskaya T.V., Kirilovskiy S.V. Application of highly porous gas-permeable materials in supersonic aerodynamics // *AIP Conf. Proceedings* 1893. 2017. P. 030151-1–030151-5.
23. Daum F.L., Gyarmathy G. Condensation of air and nitrogen in hypersonic wind tunnels // *AIAA J.* 1968. Vol. 6, No. 3. P. 458–465.
24. Миронов С.Г., Кириловский С.В., Поплавская Т.В., Цырюльников И.С., Маслов А.А. Физическое и математическое моделирование сверхзвукового обтекания тел с газопроницаемыми пористыми вставками под углом атаки // *Прикл. механика и техн. физика.* 2020. Т. 61, № 5. С. 14–20.
25. Roache P.J. Perspective: a method for uniform reporting of grid refinement studies // *J. of Fluids Engng.* 1994. Vol. 116. P. 405–413.
26. Mironov S.G., Kirilovskiy S.V., Militsina T.S., Poplavskaya T.V., Tsyryulnikov I.S., Valiullin I.R. Effect of the structure of skeleton models of cellular materials on the drag of a cylinder with a frontal gas-permeable insert in a supersonic flow // *J. of Physics. Conf. Series.* 2019. Vol. 1404, No. 1. P. 012032-1–012032-7.
27. Poplavskaya T.V., Valiullin I.R., Kirilovskiy S.V., Militsina T.S., Mironov S.G., Tsyryulnikov I.S. Modeling of the three-dimensional structure high-porosity cellular materials in supersonic flows // *AIP Conf. Proceedings* 2351. 2021. P. 040058-1–040058-5.
28. Соловьева О.В., Соловьев С.А., Попкова О.С. Моделирование трехмерной структуры высокопористых ячеистых материалов и анализ качества модели на примере расчета перепада давления // *Уч. записки Казанского ун-та. Серия: Физико-математические науки.* 2018. Т. 160, кн. 4. С. 681–694.

*Статья поступила в редакцию 28 марта 2022 г.,
после доработки — 9 июня 2022 г.,
принята к публикации 17 июня 2022 г.*