

УДК 532.5.013.12

МОДЕЛИРОВАНИЕ СВЕРХЗВУКОВОГО ОБТЕКАНИЯ ЦИЛИНДРА С ГАЗОПРОНИЦАЕМОЙ ПОРИСТОЙ ВСТАВКОЙ

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

Новосибирский государственный университет, 630090 Новосибирск, Россия

Институт теоретической и прикладной механики

им. С. А. Христиановича СО РАН, 630090 Новосибирск, Россия

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

kirilov@itam.nsc.ru

Приведены результаты экспериментального и численного исследования обтекания сверхзвуковым ($M_\infty = 4,85$) потоком продольно расположенного цилиндра с газопроницаемой пористой вставкой на его переднем торце в диапазоне чисел Рейнольдса $Re_D = (0,1 \div 2,0) \cdot 10^5$. Численное моделирование выполнено на основе пакета Ansys Fluent с использованием модели пористой среды, основанной на квадратичном законе фильтрации. По данным экспериментов о течении воздуха в пористом материале вычислены параметры квадратичной зависимости. Получены данные о полях течения и вычислены значения волнового сопротивления модели в зависимости от длины пористой вставки и числа Рейнольдса. Проведено сравнение результатов численного моделирования с результатами измерений в аэродинамической трубе.

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

DOI: 10.15372/PMTF20150402

Введение. Моделирование течения воздуха в высокопористом материале необходимо для разработки различных способов управления сопротивлением и аэродинамическими моментами тел в высокоскоростных потоках. Взаимодействие газопроницаемого материала со сверхзвуковым или гиперзвуковым потоком может привести к существенному изменению процесса обтекания и оказать влияние на тепловые потоки на поверхности летательного аппарата. Исследования в этом направлении проводятся начиная с 50-х гг. XX в. В последнее десятилетие разработан и испытан ряд новых, нетрадиционных способов управления волновым сопротивлением и сопротивлением трения тел в сверхзвуковом потоке. В работе [1] показана возможность уменьшения волнового сопротивления затупленного тела за счет выдува навстречу сверхзвуковому набегающему потоку высокотемпературной плазменной струи. В [2, 3] показано, что при использовании модели конуса с покрытием из газопроницаемого пористого материала существенно увеличивается ламинарный участок гиперзвукового пограничного слоя на конусе и значительно уменьшается сопротивление трения.

Работа выполнена в рамках гранта Правительства РФ (договор № 14.Z50.31.0019) для поддержки исследований под руководством ведущих ученых, а также при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (коды проектов 12-08-00357, 15-08-03867).

© Миронов С. Г., Маслов А. А., Поплавская Т. В., Кириловский С. В., 2015

Применение газопроницаемых сетчатых или пористых материалов позволяет управлять не только сопротивлением трения, но и волновым сопротивлением тел. В частности, в работах [4, 5] исследовано влияние сетчатых экранов, расположенных перед затупленными телами, на волновое сопротивление. В экспериментах [6], в которых использовался сетчатый экран, размещенный перед продольно расположенным в сверхзвуковом потоке цилиндром, достигнуто уменьшение волнового сопротивления в два раза. В [7] показана возможность уменьшения на 40 % волнового сопротивления цилиндра с газопроницаемой пористой вставкой на его переднем торце, расположенного продольно в сверхзвуковом потоке. При тех же условиях, что и в работе [7], в [8] проведено численное моделирование сверхзвукового обтекания цилиндра с пористой вставкой на его переднем торце. Установлено, что в этом случае перед цилиндром формируется “эффективное” заостренное тело с волновым сопротивлением, меньшим сопротивления цилиндра без вставки.

В механике сплошных сред при изучении течений жидкостей и газов, имеющих малую скорость, в пористой среде применяется закон Дарси, представляющий собой линейную зависимость скорости фильтрации газа от градиента давления. При течении газа с большей скоростью наблюдается существенное отклонение от линейного закона фильтрации. Поэтому в этих условиях вместо закона Дарси используется его обобщение в виде нелинейного закона фильтрации Дарси — Форхгеймера [9–11], который задает квадратичную зависимость градиента давления в пористом материале p от скорости фильтрации u и имеет следующий вид:

$$\frac{dp}{dx} = Au^2 + Bu. \quad (1)$$

Здесь A , B — коэффициенты гидравлического сопротивления (коэффициент A учитывает инерционные потери, B — вязкие потери при протекании газа через пористую среду).

В справочной литературе данные о коэффициентах сопротивления приводятся для относительно небольших скоростей фильтрации, как правило, менее 5 м/с. При сверхзвуковых скоростях для получения гидродинамических характеристик пористого материала необходимо провести специальные стендовые измерения скорости фильтрации либо использовать некоторые данные экспериментов, выполненных в аэродинамической трубе. Поэтому коэффициенты при вязких и инерционных членах в [8] подбирались с использованием результатов измерений давления за пористой вставкой на торце цилиндра. Основной трудностью, возникающей при моделировании течения в пористом материале, является описание течения в области вблизи передней кромки пористой вставки, где модель фильтрации неприменима. В [8] эта область заменялась эффективной сеткой с размерами ячеек, соответствующими размерам пор в материале с коэффициентом сопротивления, который определялся по результатам весовых измерений, проведенных в аэродинамической трубе при использовании реальной сетки аналогичной геометрии. Таким образом, недостатком подхода [8] является использование значительного объема эмпирических данных, что ограничивает область применения данной расчетной методики при проведении численных исследований.

В данной работе представлена методика и описан более общий подход к решению задачи численного моделирования сверхзвукового обтекания продольно расположенного в потоке цилиндра с газопроницаемой пористой вставкой на его переднем торце. Целями работы являются выявление физических механизмов уменьшения волнового сопротивления и определение основных параметров пористого материала, оказывающих влияние на величину сопротивления.

Модель газопроницаемой пористой среды: эксперимент и расчет. Проведены эксперименты для получения значений коэффициентов при вязких и инерционных членах в квадратичной зависимости (1) в случае больших перепадов давления (больших скоростей

фильтрации). Испытывались образцы из вспененного никеля диаметром $D = 14,5$ мм, длиной от 5 до 50 мм с порами диаметром 3 мм. В экспериментах измерялись зависимости давления в замкнутой камере с низким давлением и объемом $V = 0,2$ м³ от времени t при втекании атмосферного воздуха через цилиндрическую пористую вставку в стенке камеры. Средняя скорость фильтрации воздуха u_0 без учета сжимаемости может быть вычислена по соотношению

$$u_0 = \frac{V}{P_a S} \frac{dP}{dt}.$$

Здесь S — площадь сечения пористого образца; P, P_a — давление в камере и атмосферное давление. Поскольку даже для образцов малой длины значение u_0 было меньше 100 м/с, сжимаемость воздуха учитывалась в виде поправки к средней скорости фильтрации u_0 :

$$u = u_0 \left(1 + \frac{\gamma - 1}{2} \frac{u_0^2}{c_a^2 - (\gamma - 1)u_0^2/2} \right)^{1/(\gamma-1)}$$

(γ — показатель адиабаты воздуха; c_a — скорость звука в атмосфере).

При вычислении средней скорости фильтрации предполагалось, что температура воздуха, втекающего в камеру, мгновенно становится равной температуре ее стенок. Данное предположение проверялось экспериментально. Для этого поступление воздуха в камеру резко прекращалось и регистрировалось изменение давления в камере в зависимости от времени. В случае неизотермического процесса давление в камере со временем изменяется. В эксперименте изменения давления, превышающего погрешность измерений, не обнаружено, что подтверждает правильность сделанного предположения.

При различии давлений по длине образца более чем в два раза обнаружено, что скорость фильтрации асимптотически стремится к некоторому пределу, зависящему от длины образца. Это объясняется возникновением в выходном сечении образца области, в которой локальная скорость воздуха равна локальной скорости звука и течение в материале “запирается”, при этом расход воздуха и, следовательно, средняя скорость фильтрации становятся постоянными. Данное объяснение проверялось экспериментально путем измерения скорости воздуха за образцом пневмодатчиками полного и статического давления при различии давлений более чем в два раза. Измерения показали, что число Маха потока постоянно: $M \approx 1,1$. Это значение соответствует распространению потока воздуха из пор материала с пористостью 95 % в область низкого давления.

На рис. 1,а точками показана экспериментальная зависимость величины градиента давления dp/dx в образце от средней скорости фильтрации воздуха u . Измерения проводились на образцах из вспененного никеля длиной 9, 15, 23, 28, 37 и 48 мм с пористостью 95 %, диаметр пор составлял 3 мм. Результаты измерений, в случае когда значения давления на образце различались более чем в два раза и скорость фильтрации уже не менялась, не учитывались. При этом предполагалось, что давление p меняется по длине образца по линейному закону от значения, равного атмосферному давлению P_a , до значения, равного давлению в камере P . На рис. 1,а видно, что результаты измерений на образцах различной длины хорошо согласуются.

Аппроксимация данных, приведенных на рис. 1,а, выполнена с использованием квадратичного полинома

$$\frac{dp}{dx} = 551u^2 - 3580u \quad (2)$$

(сплошная кривая), который достаточно точно аппроксимирует экспериментальные данные при скоростях фильтрации воздуха более 10 м/с. На рис. 1,б приведен участок кривой, представленной на рис. 1,а. Видно, что в области малых скоростей при аппроксимации (2)

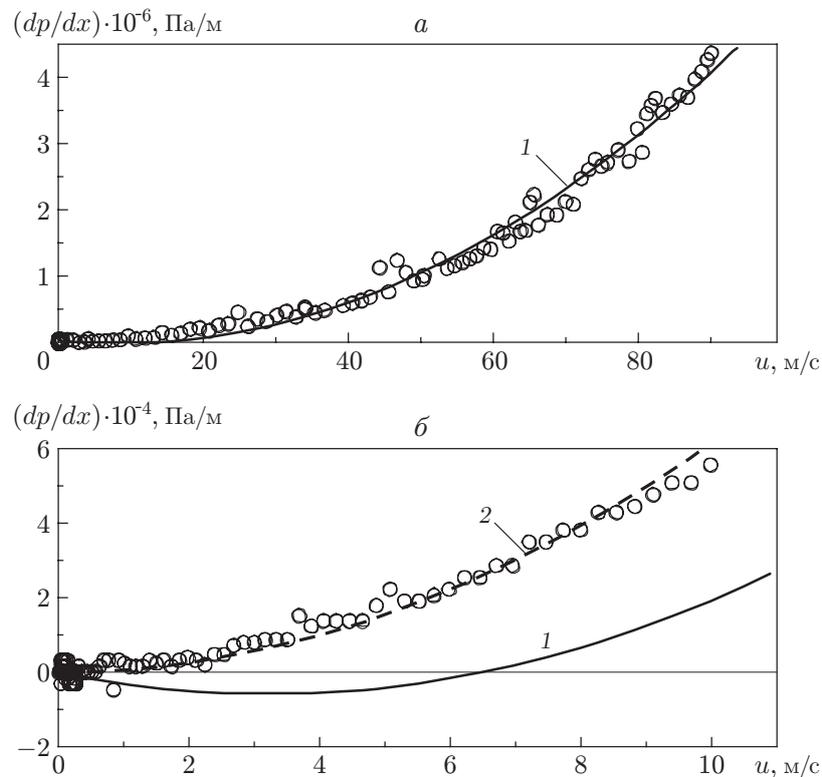


Рис. 1. Зависимость градиента давления в пористом образце от средней скорости фильтрации воздуха:

a — $0 < u < 100$ м/с, b — $0 < u < 10$ м/с; точки — экспериментальные данные, линии — результаты аппроксимации экспериментальных данных (1 — аппроксимация по формуле (2), 2 — аппроксимация по формуле (3))

получаются не имеющие физического смысла отрицательные значения градиента давления, поэтому для зависимости $(dp/dx)(u)$ необходимо подбирать другие значения коэффициентов.

В работах [12, 13] газопроницаемая вставка на переднем торце цилиндра была разбита по длине на две области: область с большими скоростями течения воздуха (область I) и область с малыми скоростями (область II). Для этих областей использовались разные квадратичные зависимости. Область I соответствует течению непосредственно за головной ударной волной (УВ), в котором перепады давления и скорости велики. Для этой области (см. рис. 1, a) была использована аппроксимация (2). Область II находится ниже по потоку за областью I и соответствует слабоградиентному фильтрационному течению с малыми скоростями. Для области II получена зависимость

$$\frac{dp}{dx} = 61u^2 + 1,8u \quad (3)$$

(штриховая кривая на рис. 1, b), не дающая отрицательных значений градиента давления и удовлетворительно аппроксимирующая экспериментальные данные при скоростях фильтрации воздуха менее 10 м/с. Следует отметить, что аппроксимация (3) в области II выбрана среди нескольких аппроксимаций с точки зрения наилучшего соответствия значений коэффициента сопротивления в расчете и эксперименте [7].

Численное моделирование. Численное исследование влияния газопроницаемой ячеисто-пористой вставки, расположенной на торце цилиндра, на сопротивление систе-

мы в целом в сверхзвуковом потоке воздуха проводилось с использованием пакета Ansys Fluent. Характеристики газопроницаемой вставки соответствовали характеристикам пористой среды в пакете Ansys Fluent. При этом пористая вставка разбивалась на две области (области I и II), в каждой из которых задавались параметры пористой среды, полученные описанным выше способом на основе экспериментальных данных.

Рассматривается процесс осесимметричного обтекания модели, состоящей из цилиндра диаметром $D = 14,5$ мм и газопроницаемой пористой вставки такого же диаметра и переменной длины. Общая длина модели составляет 100 мм. Модель обтекается потоком воздуха с числом Маха $M_\infty = 4,85$, температурой торможения 290 К и единичным числом Рейнольдса $Re_\infty = 2,7 \cdot 10^6 \text{ м}^{-1}$. Эти параметры соответствуют условиям эксперимента [7].

Система двумерных дифференциальных уравнений Навье — Стокса решается с использованием SST ($k-\omega$)-модели турбулентности, неявной схемы второго порядка точности по времени и неявной схемы второго порядка точности по пространству, построенной на основе метода расщепления разности 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, поперечный размер расчетной области выбирается при условии, что головная УВ не взаимодействует 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 трех подобластей (области перед телом, области с пористой вставкой и области за пористой вставкой) с целью сгущения расчетной сетки вблизи головной УВ и поверхности цилиндра. Расчетная сетка содержала не менее 400 000 ячеек (размеры ячеек сетки в области пористой вставки и вблизи головной УВ равны $\Delta x = 10^{-5}$ м, $\Delta y = 5 \cdot 10^{-5}$ м).

Обсуждение результатов. Численное моделирование и эксперимент показали, что в зависимости от длины вставки Δx в пористом материале реализуются различные картины течения. На рис. 2 приведены результаты шпирен-визуализации течения и расчетные изолинии статического давления при обтекании сплошного цилиндра и цилиндра с пористой вставкой длиной $\Delta x/D = 0; 0,20; 1,73$. Четко выражена область перехода от дугообразного головного скачка уплотнения на сплошном цилиндре (см. рис. 2, *а, б*) к косому скачку (см. рис. 2, *д, е*), возникающая при большой длине газопроницаемой пористой вставки. При малой длине пористой вставки ($\Delta x/D < 1$) в ней возникает область высокого давления (вследствие торможения потока воздуха на переднем торце цилиндра модели), воздух с высокой скоростью вытекает в радиальном направлении и существенного изменения формы УВ не происходит. При этом головная УВ отходит от переднего торца пористой вставки, но на меньшую величину, чем в случае цилиндра без вставки (ср. рис. 2, *а* и рис. 2, *в*). При большой длине газопроницаемой вставки ($\Delta x/D \geq 1$) наблюдаются ослабление головной УВ, входящей в пористый материал, и уменьшение угла ее наклона к направлению потока (см. рис. 2, *д*).

На рис. 2, *е* приведены расчетные изолинии давления в пористом материале и внешнем потоке. Видно, что в пористом материале имеется область высокого давления. Наличие этой области приводит к возникновению во внешнем потоке второго косого скачка уплотнения. Известно, что преобразование мощного прямого или слабонаклонного скачка уплотнения в систему косых скачков приводит к уменьшению потерь импульса потока при обтекании, а также волнового сопротивления цилиндра с пористой вставкой большой длины. Это явление используется при проектировании сверхзвуковых воздухозаборников самолетов.

На рис. 3 показаны определенные в эксперименте и расчете формы головной УВ при различных значениях длины пористой вставки. Видно, что с увеличением длины пористой

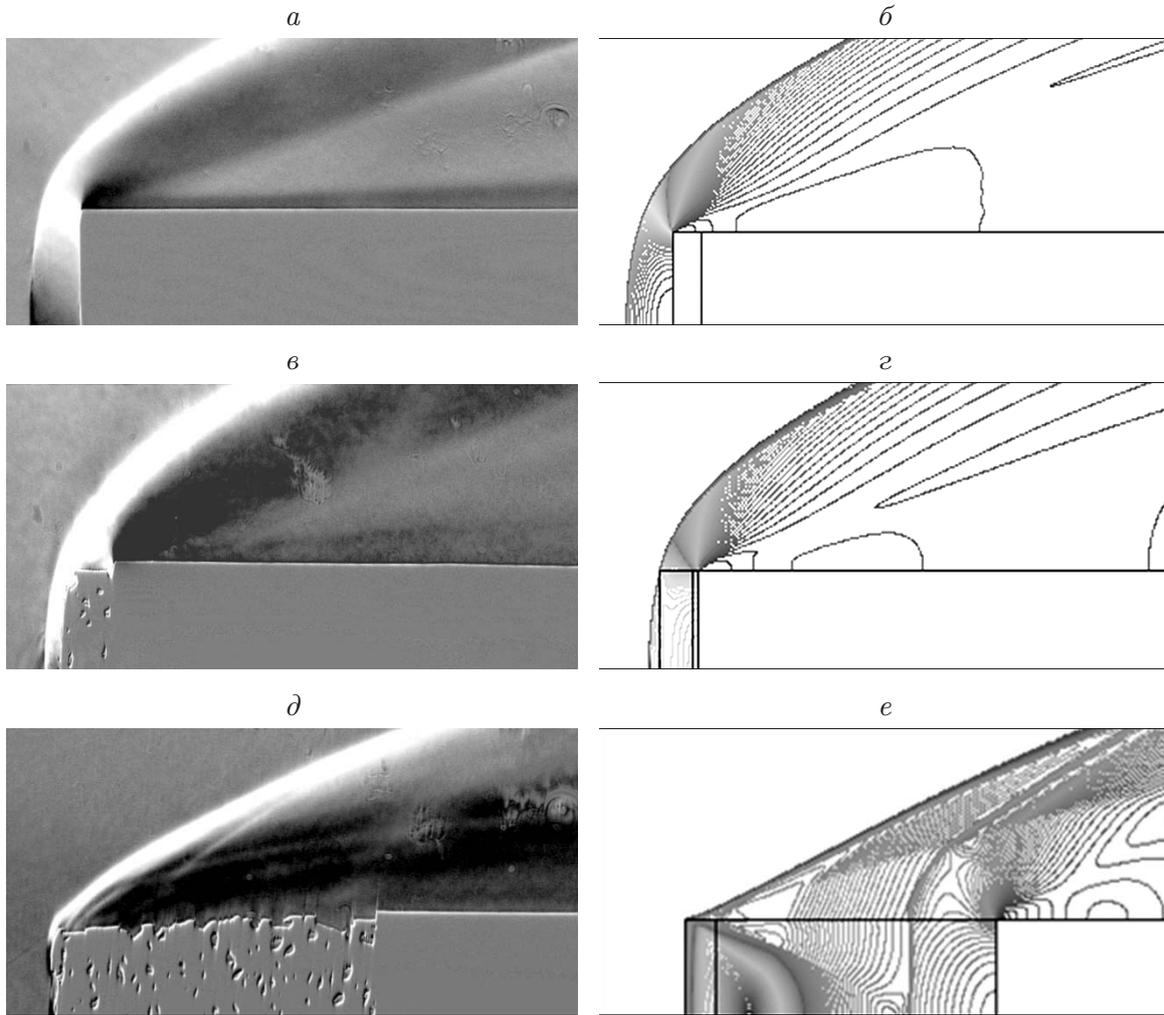


Рис. 2. Результаты шпирен-визуализации течения (*a, в, д*) и расчетные изолинии статического давления (*б, г, е*):

a, б — сплошной цилиндр, *в-е* — цилиндр с пористой вставкой (*в, г* — $\Delta x/D = 0,2$, *д, е* — $\Delta x/D = 1,73$)

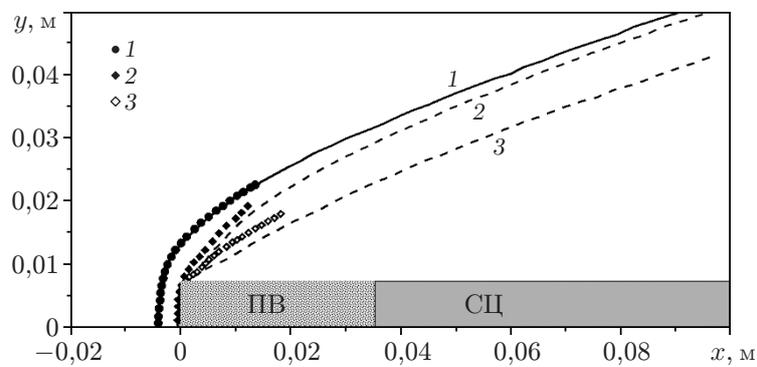


Рис. 3. Положение головной УВ, определенное в расчетах (линии) и экспериментах (точки):

1 — сплошной цилиндр, 2, 3 — цилиндр с пористой вставкой (2 — $\Delta x/D = 0,48$, 3 — $\Delta x/D = 2,4$); СЦ — сплошной цилиндр, ПВ — пористая вставка

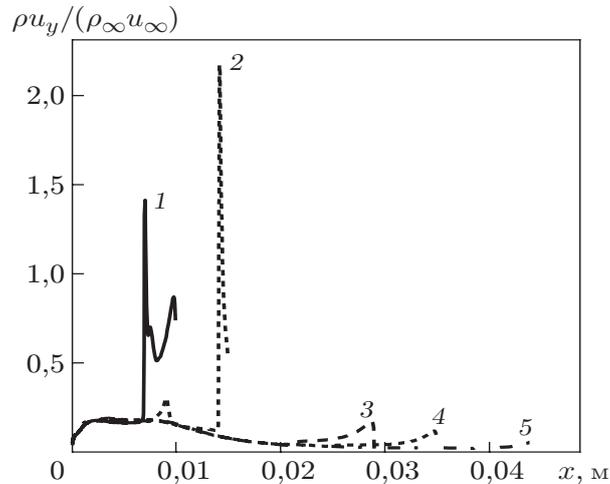


Рис. 4. Относительный локальный расход газа, вытекающего в радиальном направлении через верхнюю поверхность, при различных длинах пористой вставки: 1 — $\Delta x/D = 0,69$; 2 — $\Delta x/D = 1,0$; 3 — $\Delta x/D = 2,0$; 4 — $\Delta x/D = 2,4$; 5 — $\Delta x/D = 3,1$

вставки угол наклона УВ к направлению потока постепенно уменьшается. Сравнение форм головной УВ показывает, что в расчете и эксперименте асимптотические углы наклона УВ равны, но имеется некоторое различие пространственного положения УВ, обусловленное существенной неоднородностью поверхности передней кромки пористого тела в эксперименте (см. [8]). Кроме того, при изготовлении пористого образца его передняя кромка становится закругленной, в то время как в расчете форма вставки является абсолютно прямоугольной (см. рис. 2, *g, e*), а ее материал — однородным по своим гидродинамическим характеристикам.

На рис. 4 приведены нормированные значения локального расхода воздуха ρu_y , вытекающего в радиальном направлении из пористой вставки ($y = D/2$) различной длины. Видно, что при $\Delta x/D < 1$ вследствие резкого торможения воздуха на переднем торце цилиндра его расход в радиальном направлении является значительным, а при $\Delta x/D > 1$ воздух в пористой вставке тормозится плавно и его локальный расход в радиальном направлении существенно меньше.

Результаты, приведенные на рис. 2, *e*, 3, 4, подтверждают правомерность использования в области II аппроксимационной зависимости (3) с меньшим по сравнению с зависимостью (2) значением коэффициента при квадратичном члене. В этом случае воздух течет в пористой вставке в продольном направлении без значительного сопротивления, частично фильтруясь через ее боковую поверхность, что приводит к разгрузке области высокого давления в области I. Часть потока воздуха, достигшая торца цилиндра, замедляется, при этом перед цилиндром возникает область повышенного давления, истечение воздуха в радиальном направлении вновь интенсифицируется и формируется второй скачок уплотнения.

Сопротивление модели вычислялось по разности значений полного импульса потока перед головной УВ и за задним торцом цилиндра. Волновое сопротивление модели рассчитывалось по формуле

$$C_x = \frac{\rho_\infty u_\infty^2 S_r - \rho_e u_e^2 S_r}{0,5 \rho_\infty u_\infty^2 S_m},$$

где C_x — безразмерный коэффициент аэродинамического сопротивления; ρ_∞ , u_∞ — плотность и скорость набегающего потока; ρ_e , u_e — плотность и скорость в плоскости заднего

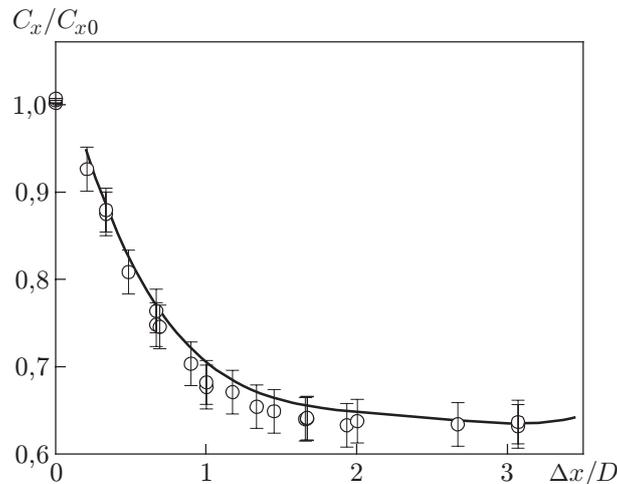


Рис. 5. Экспериментальная (точки) и расчетная (линия) зависимости коэффициента сопротивления модели от длины пористой вставки

Таблица 1

Расчетные значения относительного давления в центре торца цилиндра p_T/p_0 и коэффициента инерционных потерь A_{II} при различных длинах пористой вставки

Δx , мм	$\Delta x/D$	$\Delta x_I/\Delta x$	p_T/p_0	A_{II}
10	0,69	60	0,74	6,1
15	1,03	60	0,39	6,1
29	2,00	9	0,16	55,0
35	2,40	7	0,11	61,0
45	3,10	5	0,07	61,0

торца модели; S_r — площадь круга радиусом r , по которой вычислялся импульс потока; S_m — площадь мидела модели.

Были вычислены коэффициенты C_x цилиндра с передней пористой вставкой, нормированные на коэффициент сопротивления сплошного цилиндра C_{x0} . На рис. 5 приведены результаты расчета и данные измерений, полученные в работе [7] для образца из вспененного никеля с диаметром пор, равным 3 мм. Видно, что расчетные и экспериментальные данные хорошо согласуются. Следует отметить, что при большой длине пористой газопроницаемой вставки ($\Delta x/D \geq 1,5$) наблюдается существенное (на 40 %) уменьшение сопротивления, а при $\Delta x/D \leq 0,2$ уменьшение сопротивления является минимальным.

В табл. 1 приведены расчетные значения отношения давления в центре торца цилиндра p_T к давлению в центре торца цилиндра в отсутствие пористой вставки p_0 и коэффициента при квадратичном члене A_{II} при различных длинах пористой вставки, при которых наблюдается уменьшение волнового сопротивления. Значения p_T/p_0 в табл. 1 соответствуют результатам измерений в [7]. В расчетах коэффициенты A_I и B_I в области больших скоростей потока (область I) соответствовали коэффициентам в аппроксимации (2) и во всех вариантах были одни и те же. В области II коэффициент вязких потерь B_{II} также был постоянным для всех длин пористой вставки и соответствовал коэффициенту в аппроксимации (3), а коэффициент инерционных потерь A_{II} увеличивался с уменьшением относительного давления в центре торца цилиндра p_T/p_0 . Следует отметить, что коэффициент A_{II} постоянен ($A_{II} = 6,1$) при малой длине пористой вставки ($\Delta x/D < 1$) и практически постоянен ($A_{II} \approx 60$) при большой длине вставки ($\Delta x/D \geq 1$). Таким обра-

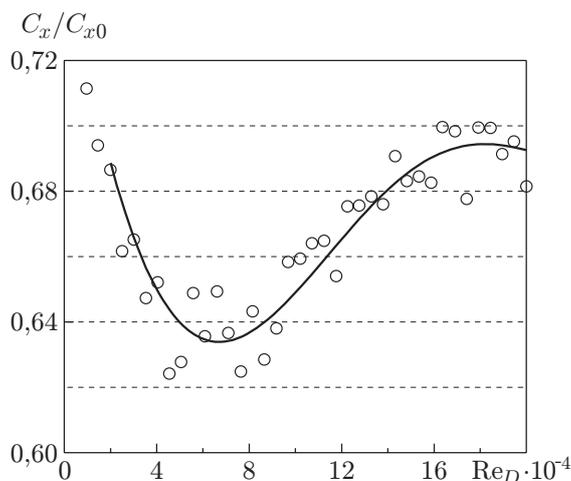


Рис. 6. Экспериментальная (точки) и расчетная (линия) зависимости коэффициента сопротивления модели от числа Рейнольдса при $\Delta x/D = 2$

зом, расчеты показали, что для условий обтекания, при которых число Рейнольдса Re_D , вычисленное по диаметру цилиндра, равно $4 \cdot 10^4$, основной причиной уменьшения волнового сопротивления является воздействие на процесс обтекания вставки перегородок пор (пространственного каркаса пористого материала). Преобладание влияния аэродинамического сопротивления каркаса на фильтрационные свойства высокопористых ячеистых материалов установлено в работе [11], в которой изучался процесс фильтрации в материалах с величиной пористости более 80 % и размером пор $1 \div 5$ мм при малых скоростях течения воздуха.

Для получения данных о влиянии числа Рейнольдса на волновое сопротивление модели были выполнены эксперименты в аэродинамической трубе, в которых давление торможения в форкамере сопла изменялось в диапазоне от $0,25 \cdot 10^5$ Па до $8,70 \cdot 10^5$ Па. Изменение давления при постоянной температуре торможения приводило к пропорциональному изменению единичного числа Рейнольдса потока. На рис. 6 точками показана экспериментально полученная зависимость коэффициента сопротивления модели с пористой вставкой, нормированного на коэффициент сопротивления сплошного цилиндра, от числа Рейнольдса Re_D . В экспериментах использован материал с диаметром пор, равным 3 мм, и пористостью 95 %, длина пористой вставки была равна двум диаметрам цилиндра ($\Delta x/D = 2$). На рис. 6 видно, что при $Re_D < 6 \cdot 10^4$ сопротивление цилиндра увеличивается, а при $Re_D > 6 \cdot 10^4$ оно сначала увеличивается, а затем выходит на постоянное значение и перестает зависеть от числа Рейнольдса.

В табл. 2 приведены расчетные значения относительного давления в центре торца цилиндра p_T/p_0 и коэффициента инерционных потерь A_{II} при различных числах Рейнольдса. Во всех вариантах коэффициенты A_I , B_I , B_{II} постоянны и соответствуют коэффициентам в аппроксимациях (2) и (3), а влияние числа Рейнольдса учитывается с помощью коэффициента A_{II} . Анализ данных, приведенных в табл. 2, показывает, что, несмотря на существенное изменение полного давления в набегающем потоке и соответствующего ему числа Рейнольдса, относительное давление на торце цилиндра меняется незначительно. Можно выделить три диапазона чисел Рейнольдса, в которых различается гидродинамика течения воздуха в порах. При этом различаются значения коэффициента при квадратичном члене в законе фильтрации Дарси — Форхгеймера: 1) при $Re_D < 4 \cdot 10^4$ $A_{II} > 55$; 2) при $4 \cdot 10^4 < Re_D < 10^5$ $0 < A_{II} < 10$; 3) при $Re_D > 10^5$ $A_{II} \geq 12$.

Таблица 2

Расчетные значения относительного давления в центре торца цилиндра p_T/p_0 и коэффициента инерционных потерь A_{II} при различных числах Рейнольдса

$Re_D \cdot 10^4$	p_∞ , Па	p_T/p_0	A_{II}
2	96	0,16	196,0
4	186	0,16	55,0
6	286	0,17	9,0
8	381	0,17	6,0
10	476	0,17	0,6
12	570	0,17	12,0
14	667	0,17	24,0
16	761	0,18	12,0
18	855	0,18	12,0
20	951	0,18	12,0

Заключение. С помощью пакета Ansys Fluent выполнено численное моделирование процесса обтекания сверхзвуковым потоком воздуха расположенного продольно цилиндра с газопроницаемой пористой вставкой на его переднем торце. Пористая вставка разбивалась на две области с большими и малыми скоростями фильтрации. В расчетах для этих областей использовались различные значения коэффициентов модели пористой среды. Эти коэффициенты подбирались по результатам измерений средней скорости фильтрации воздуха через ячеисто-пористый материал в диапазоне перепадов давления $0 \div 10^5$ Па.

Получены изолинии давления в пористой вставке, вычислены формы головной УВ и коэффициенты сопротивления при различных длинах пористой вставки, а также определены зависимости коэффициента сопротивления модели от числа Рейнольдса. Проведено сравнение результатов численного моделирования с данными экспериментов.

Показано, что поле течения в пористом материале и соответственно сопротивление цилиндра с пористой вставкой определяются в основном инерционным (квадратичным) членом в законе Дарси — Форхгеймера. При больших скоростях непосредственно за УВ трение в порах пренебрежимо мало и волновое сопротивление определяется режимом обтекания каркаса пористого материала. При малых скоростях течения коэффициент инерционных потерь уменьшается на порядок, но значительно превышает коэффициент сопротивления трения.

Показано, что увеличение длины пористой вставки приводит к ослаблению головной УВ, прониканию ее в пористый материал и уменьшению угла ее наклона к направлению потока. При этом ниже по потоку в пористом материале возникает область повышенного давления, из которой в радиальном направлении истекает воздух, что приводит к появлению во внешнем потоке еще одной наклонной УВ. Наблюдаемое в экспериментах и расчете уменьшение сопротивления обусловлено заменой дугообразной головной УВ на цилиндре без вставки на систему двух наклонных УВ на модели с газопроницаемой вставкой, на которой потери импульса потока меньше.

ЛИТЕРАТУРА

1. Fomin V. M., Maslov A. A., Malmuth N. D., et al. Influence of a counterflow plasma jet on supersonic blunt-body pressure // AIAA J. 2002. V. 40, N 6. P. 1170–1177.
2. Fedorov A. V., Shplyuk A. N., Maslov A. A., et al. Stabilization of hypersonic boundary layer using an ultrasonically absorptive coating // J. Fluid Mech. 2003. V. 479. P. 99–124.

3. **Fedorov A. V., Kozlov V. V., Shiplyuk A. N., et al.** Stability of hypersonic boundary layer on porous wall with regular microstructure // AIAA J. 2006. V. 44, N 8. P. 1866–1871.
4. **Гувернюк С. В., Савинов К. Г., Ульянов Г. С.** Сверхзвуковое обтекание торца, экранированного пористым диском // Волновые задачи механики деформируемых сред. М.: Изд-во Моск. гос. ун-та, 1990. Ч. 2. С. 101–108.
5. **Гувернюк С. В.** О гиперзвуковом обтекании тел с сетчатыми экранами // Газовая и волновая динамика. М.: Айрис-Пресс, 2005. С. 236–242.
6. **Миронов С. Г., Сердюк К. М.** Воздействие на волновое сопротивление затупленных тел в сверхзвуковом потоке сетчатыми экранами // Теплофизика и аэромеханика. 2012. Т. 19, № 2. С. 201–208.
7. **Фомин В. М., Миронов С. Г., Сердюк К. М.** Снижение волнового сопротивления тел в сверхзвуковом потоке с помощью пористых материалов // Письма в ЖТФ. 2009. Т. 35, вып. 3. С. 39–45.
8. **Бедарев И. А., Миронов С. Г., Сердюк К. М. и др.** Физическое и математическое моделирование сверхзвукового обтекания цилиндра с пористой вставкой // ПМТФ. 2011. Т. 52, № 1. С. 13–23.
9. **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. 75–83.
10. **Беклемышев А. М.** Особенности закона сопротивления высокопористых ячеистых материалов / Респ. инж.-техн. центр порошковой металлургии. Пермь, 1996. Деп. в ВИНТИ 09.07.96, № 2265-B96.
11. **Беклемышев А. М.** Процесс фильтрации в высокопористых ячеистых материалах // Изв. вузов. Физика. 1998. Т. 41, № 4. С. 48–50.
12. **Миронов С. Г., Поплавская Т. В., Кириловский С. В.** Численное моделирование сверхзвукового обтекания цилиндра с передней газопроницаемой пористой вставкой // Сб. науч. тр. Всерос. конф. с междунар. участием “Информационные и математические технологии в науке, технике, медицине”, Томск, 2–5 нояб. 2012 г. Томск: Том. политехн. ун-т, 2012. С. 76–78.
13. **Поплавская Т. В., Кириловский С. В., Миронов С. Г.** Численное моделирование обтекания газопроницаемого пористого материала в приложении к сверхзвуковой аэродинамике // Материалы 18-й Междунар. конф. по вычислительной механике и современным прикладным программным системам, Алушта (Украина), 22–31 мая 2013 г. М.: Моск. авиац. ин-т, 2013. С. 652–654.

Поступила в редакцию 2/VI 2014 г.