

УДК 532.526

ВОЗДЕЙСТВИЕ ЗВУКОПОГЛОЩАЮЩИХ МАТЕРИАЛОВ НА ИНТЕНСИВНОСТЬ ВОЗМУЩЕНИЙ В УДАРНОМ СЛОЕ ПЛАСТИНЫ, РАСПОЛОЖЕННОЙ ПОД УГЛОМ АТАКИ

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

Институт теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича СО РАН,
630090 Новосибирск
Новосибирский государственный университет, 630090 Новосибирск
E-mails: maslov@itam.nsc.ru, mironov@itam.nsc.ru, popla@itam.nsc.ru, tsivan@ngs.ru

Представлены результаты численного и экспериментального исследования характеристик возмущений в гиперзвуковом ударном слое на пластине, расположенной под углом атаки, при наличии на поверхности звукопоглощающего покрытия. Эксперименты и расчеты выполнены для числа Маха набегающего потока $M_\infty = 21$ и числа Рейнольдса $Re_L = 6 \cdot 10^4$. Показана возможность подавления пульсаций давления в ударном слое с помощью трубчатых и пористых материалов, встроенных в поверхность пластины, при частотах $20 \div 40$ кГц. Установлено, что результаты численного моделирования и экспериментальные данные хорошо согласуются.

Ключевые слова: гиперзвуковой ударный слой, управление возмущениями, звукопоглощающие покрытия, эксперимент, численное моделирование.

Введение. Под воздействием солнечного излучения в верхней стратосфере и нижней мезосфере генерируются высокоскоростные широтные струйные течения [1]. Эти течения вызывают крупномасштабные вертикальные и горизонтальные турбулентные движения воздуха, которые в свою очередь являются источником акустических возмущений в верхней атмосфере. При движении в верхних слоях атмосферы летательного аппарата на его передних кромках реализуется режим вязкого ударного слоя. Воздействие возмущений внешнего потока на гиперзвуковой ударный слой приводит к возникновению в этом слое возмущений с различными модами, которые могут инициировать развитие неустойчивости гиперзвукового пограничного слоя, расположенного ниже по потоку. В работе [2] для пластины с острой передней кромкой, расположенной под нулевым углом атаки, показано, что при воздействии акустических волн внешнего потока в ударном слое развиваются энтропийно-вихревые возмущения, управление интенсивностью которых возможно с помощью введения в ударный слой локальных контролируемых возмущений типа вдува-отсоса соответствующей амплитуды и частоты (интерференционный метод управления). Однако

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 09-08-00557) и в рамках Федеральной целевой программы "Научные и научно-педагогические кадры инновационной России" № 16.740.11.0303 и Программы РАН № 22/9.

© Маслов А. А., Миронов С. Г., Поплавская Т. В., Цырюльников И. С., Кириловский С. В., 2012

при увеличении угла атаки пластины в ударном слое на ее наветренной стороне возникают незатухающие пульсации давления, соответствующие акустической моде возмущений [3]. При дальнейшем увеличении угла атаки пульсации давления быстро нарастают и их максимум смещается к поверхности пластины, а относительный уровень пульсаций энтропийно-вихревой моды уменьшается. В этом случае управление интенсивностью возмущений с помощью интерференционного метода малоэффективно и необходимо использовать другие методы.

Одним из известных методов управления ламинарно-турбулентным переходом в умеренно гиперзвуковых течениях является метод нанесения на поверхность звукопоглощающего покрытия [4–6]. Данный метод основан на ослаблении за счет поглощения звука в порах такого покрытия возмущений, соответствующих акустической моде, наиболее неустойчивой в высокоскоростных пограничных слоях. В случае ударного слоя также возможно влияние на интенсивность акустических возмущений звукопоглощающих материалов на поверхности пластины. Ранее подобные исследования не проводились, и в литературе отсутствует информация о влиянии разреженности газа, его скольжения по поверхности и структуры течения в ударном слое на эффективность поглощения звука.

В данной работе впервые описаны эксперименты по определению влияния звукопоглощающих материалов с канальной и ячеистой структурой на эффективность подавления пульсаций плотности и давления в гиперзвуковом ударном слое на пластине под углом атаки. Данные этих экспериментов сопоставлены с результатами прямого численного моделирования развития возмущений, выполненного на основе решения полных нестационарных уравнений Навье — Стокса с использованием схем высокого порядка точности, и с результатами расчетов с помощью коммерческого пакета ANSYS Fluent 12.1.

Экспериментальное оборудование и методы диагностики. Эксперименты выполнены в гиперзвуковой азотной аэродинамической трубе Т-327А Института теоретической и прикладной механики СО РАН (ИТПМ) для числа Маха потока $M_\infty = 21$ и единичного числа Рейнольдса $Re_{1\infty} = 6 \cdot 10^5 \text{ м}^{-1}$.

Модель пластины длиной $L = 100$ мм, шириной 50 мм и толщиной 25 мм с острой передней кромкой показана на рис. 1, *слева*. Угол клина передней кромки равен 30° , угол клина боковых кромок — 70° . На расстоянии от передней кромки, равном 40 мм, в пластине имелась прямоугольная выемка размером $33 \times 55 \times 20$ мм для размещения звукопоглощающих вставок. Модель крепилась на боковой державке и могла быть установлена под углом атаки к потоку в пределах $\alpha = -10 \div 30^\circ$. На расстоянии от заднего торца модели, равном 5 мм, заподлицо с поверхностью пластины был установлен пьезокерамический датчик

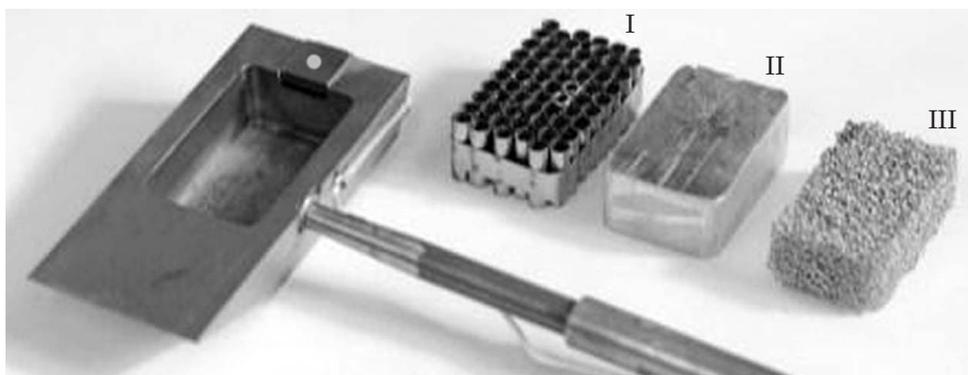


Рис. 1. Модели пластины (*слева*) и вставок (*справа*):

I — вставка из трубок; II — вставка из алюминия; III — вставка из вспененного ячеистопористого никеля

пульсаций давления И4010 диаметром 4 мм с диапазоном частот до 70 кГц, с помощью которого измерялись пульсации давления на поверхности модели.

На рис. 1 показаны также вставки в выемку пластины трех типов (вставки I–III). Вставка I выполнена в виде пакета замкнутых снизу тонкостенных трубок диаметром 4 мм с эффективной пористостью, равной 98 %. Вставка II представляет собой сплошной блок алюминия, считающегося материалом, не поглощающим звук. Вставка III изготовлена из вспененного ячеисто-пористого никеля со средним диаметром ячеек, приблизительно равным 1 мм, и пористостью, равной 95 %. Результаты измерений с алюминиевой вставкой II использовались для нормировки результатов измерений со звукопоглощающими вставками I и III.

По результатам серии методических экспериментов в гиперзвуковой аэродинамической трубе при указанных выше параметрах потока для вставок I и III были выбраны наиболее эффективные звукопоглощающие материалы. Эксперименты проводились с использованием цилиндрических моделей, на переднем торце которых располагались исследуемые звукопоглощающие материалы, при натекании гиперзвукового потока перпендикулярно их поверхности. Конструкция моделей обеспечивала отсутствие протекания газа через материалы. Такая постановка экспериментов позволяла минимизировать влияние на структуру течения движения газа над поверхностью материала и максимально увеличить долю акустических пульсаций в ударном слое. Методом электронно-пучковой флюоресценции азота [7] измерялась интенсивность пульсаций плотности в ударном слое перед торцом цилиндра со звукопоглощающим материалом в диапазоне частот до 50 кГц. Результаты измерений нормировались на параметры, полученные при обтекании цилиндра без звукопоглощающего материала. Исследована эффективность подавления возмущений сетками с различной степенью прозрачности, расположенными над поверхностями цилиндра, цилиндрических полужамкнутых каналов различного диаметра с различной относительной площадью отверстий, ячеисто-пористых материалов с различными размерами ячеек и степенью пористости.

На рис. 2 представлены спектры среднеквадратичных амплитуд пульсаций плотности в ударном слое ρ'_M , полученные в методических экспериментах при нормальном натекании

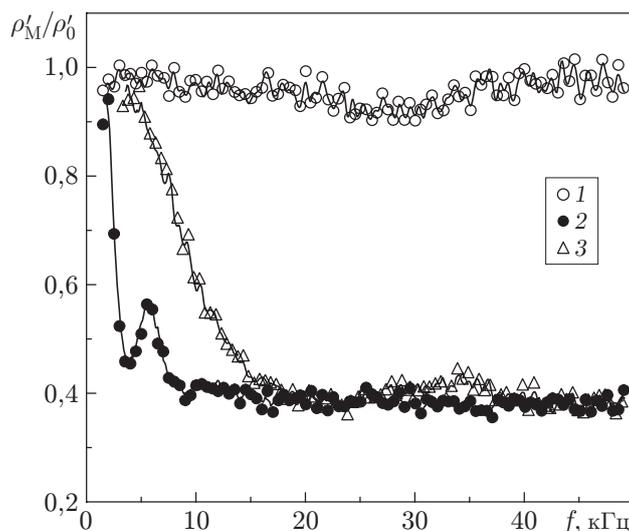


Рис. 2. Спектры нормированных среднеквадратичных амплитуд пульсаций плотности в ударном слое ρ'_M при нормальном натекании гиперзвукового потока на вставки из различных материалов:

1 — полужамкнутые каналы с пористостью, равной 40 %; 2 — материал I; 3 — материал III

нии гиперзвукового потока на вставки из звукопоглощающих материалов. Эти амплитуды нормированы на значения пульсаций плотности на сплошной поверхности ρ'_0 . Видно, что начиная с частоты $f = 15$ кГц материалы I (кривая 2) и III (кривая 3) практически полностью поглощают пульсации, так как значение относительной амплитуды пульсаций плотности падает ниже значения, равного 0,5. Для материала I в области низких частот наблюдаются вариации амплитуды, возможно, обусловленные наличием резонансов в каналах. Следует отметить, что аналогичный пакет из трубчатых полузамкнутых каналов диаметром 3,5 мм и глубиной 10 мм с пористостью, равной 40 % (кривая 1), незначительно уменьшает пульсации плотности, что подтверждает сильную зависимость эффективности поглощения звука от величины пористости.

Численное моделирование. В данной работе проведено прямое численное моделирование развития двумерных возмущений, которые при больших значениях числа Маха являются наиболее неустойчивыми. Расчетное исследование выполнено на основе программы решения уравнений Навье — Стокса с использованием разработанных в ИТПМ СО РАН современных схем сквозного счета высокого порядка точности (далее пакет ИТПМ). Численный алгоритм и граничные условия на сплошной поверхности подробно описаны в работе [8]. Расчетная область в плоскости (x, y) представляет собой прямоугольник и включает переднюю кромку пластины и головную ударную волну (координаты x, y обезразмерены на длину пластины L). В данной работе при численном моделировании внешних акустических возмущений переменные на левой и верхней границах расчетной области задавались в виде суперпозиции стационарного основного течения и плоской медленной звуковой волны, характеризующейся амплитудой $A = 0,0286$ и частотой f .

Для исследования влияния звукопоглощающего покрытия в решение нестационарной задачи дополнительно вводились граничные условия, моделирующие взаимодействие возмущений со звукопоглощающим покрытием. На некотором интервале по координате x ставилось нестационарное граничное условие, соответствующее теоретической модели, разработанной в [4, 9]. Данное граничное условие для безразмерных величин имеет вид

$$V_w^n(x, t) = p'_w(x, t) \operatorname{Re}(A) - \frac{1}{\omega} \frac{\partial p'_w(x, t)}{\partial t} \operatorname{Im}(A).$$

Здесь $V_w^n(x, t)$ — нормальная к стенке компонента скорости; $p'_w(x, t) = p_w(x, t) - p_w(x, 0)$ — возмущение давления на стенке (разность между мгновенным значением давления и давлением, соответствующим решению стационарной задачи до введения возмущений); $A = \varphi \operatorname{th}(\Lambda h)/Z_0$ — коэффициент проницаемости пористого слоя; φ — величина пористости (отношение объема пор к общему объему пористого слоя); Z_0, Λ — характеристический импеданс и константа распространения для отдельной поры; h — толщина пористого слоя; ω — безразмерная круговая частота возмущений. Импеданс пористой поверхности $Z = 1/A$ для материала, расположенного на жесткой стенке, равен $Z = \varphi^{-1} Z_0 \operatorname{cth}(\Lambda h)$. При записи граничного условия в безразмерном виде пульсации скорости отнесены к скорости звука c_∞^* , пульсации давления — к величине $\rho_\infty^* c_\infty^*$ (ρ_∞^* — значение плотности в набегающем потоке).

В случае произвольного звукопоглощающего покрытия импеданс является комплексной величиной, значение которой для конкретного типа покрытий можно определить с помощью теоретических или полуэмпирических зависимостей, исследованных, например, в работах [10, 11] для материалов с порами в виде прямолинейных равномерно распределенных каналов и материалов с хаотической волокнистой структурой. Однако в качестве упрощенной тестовой модели в данном численном моделировании были использованы граничные условия для звукопоглощающего покрытия только с действительным значением импеданса Z .

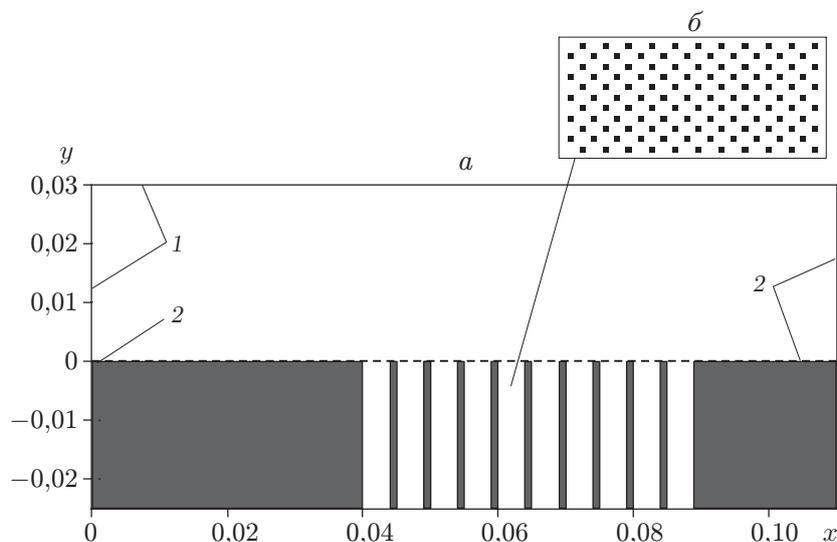


Рис. 3. Расчетная область для прямого численного моделирования развития возмущений в ударном слое на пластине со вставкой I (а) и вставкой III (б) с использованием пакета ANSYS Fluent 12.1:

1 — границы, на которых используется условие pressure-far-field; 2 — границы, на которых используется условие pressure outlet

Значения импеданса Z с малой комплексной частью могут быть получены для материалов с высокой пористостью при значительном увеличении толщины слоя h или с высоким показателем затухания звука в порах при $|\text{cth}(\Lambda h)| \rightarrow 1$ в исследуемом диапазоне частот акустических возмущений. С учетом направления оси y в данном случае получаем $Z = -\varphi^{-1}Z_0$. В случае согласования характеристического импеданса с импедансом внешней среды, т. е. при $Z_0 \approx \rho_w^* c_w^*$ (ρ_w^* , c_w^* — размерные величины плотности и местной скорости звука), граничное условие для звукопоглощающего покрытия с учетом обезразмеривания величин принимает вид

$$V_w^n(x, t) = -p'_w(x, t) \frac{\varphi}{\rho_w \sqrt{T_w}}. \quad (1)$$

Здесь T_w — температура поверхности, нормированная на температуру набегающего потока. Упрощенное граничное условие (1) на части поверхности пластины со звукопоглощающим материалом, соответствующее практически полному поглощению звука порами, использовано в данной работе при прямом численном моделировании развития возмущений в ударном слое с помощью пакета ИТПМ. Выбрана равномерная расчетная сетка с числом узлов $N_x \times N_y = 1600 \times 625$. Вследствие измельчения расчетной сетки в два раза по обоим направлениям решения изменяются менее чем на 2 %.

Одновременно было выполнено численное моделирование развития возмущений в ударном слое с использованием коммерческого пакета ANSYS Fluent 12.1. Прямая задача взаимодействия двумерных акустических волн с ударным слоем на пластине с пористой вставкой решалась без использования граничного условия на звукопоглощающей поверхности, так как в этом случае задавалась конкретная геометрия каналов пористых вставок, так же как в [12]. Расчетная область (рис. 3) состояла из двух прямоугольных подобластей. Первая подобласть размером 111×40 мм располагалась над поверхностью пластины. Левая (входная) граница находилась на расстоянии, равном длине 10 расчетных ячеек вверх по потоку от передней кромки пластины, высота подобласти выбиралась в соответствии с условием, согласно которому идущая с передней кромки головная ударная волна не долж-

на взаимодействовать с верхней границей расчетной области. Правая (выходная) граница отодвинута от задней кромки пластины, так чтобы течение в выходном сечении было полностью сверхзвуковым. Вторая подобласть размером 50×25 мм, верхняя граница которой совпадала с поверхностью пластины, включала пористую вставку. Использовалась равномерная расчетная сетка с квадратными ячейками, длина стороны которых равна 0,1 мм, что обеспечивало приемлемое время счета. Тестовые расчеты показали, что при измельчении сетки в два раза по обоим направлениям изменение пульсаций давления на поверхности пластины не превышает 2 %. Для расчетов использовались солвер 2D density based, неявная схема второго порядка точности по времени и неявная схема Roe-FDS второго порядка точности по пространству.

Структура пор была задана двумя способами: в виде набора полужамкнутых двумерных каналов шириной 4 мм с шагом 5 мм с пористостью 80 % (см. рис. 3,а) и в виде регулярной структуры (с пористостью 92 %), состоящей из поверхностей квадратного сечения, длина стороны которого равна 0,2 мм, расположенных в шахматном порядке (см. рис. 3,б). Расстояние между структурами в ряду равно 0,8 мм. Выбор геометрических размеров пор обусловлен их сходством со звукопоглощающими вставками I и III на рис. 1. Прямое моделирование структуры звукопоглощающих вставок позволило не использовать граничные условия (1) для пульсаций.

Сначала проводился расчет стационарного течения, при этом на левой и верхней границах расчетной области (см. рис. 3) с помощью граничного условия pressure-far-field (границы 1 на рис. 3,а) задавался равномерный гиперзвуковой поток, направленный вдоль оси x . (Здесь и далее использованы термины пакета ANSYS Fluent 12.1.) На нижней границе, не занятой поверхностью пластины, а также на правой границе ставилось граничное условие pressure outlet (границы 2 на рис. 3,а). На поверхностях пластины, каналов и пор задавались граничные условия wall при температуре поверхности $T_w = 300$ К. Значения параметров в граничных условиях соответствовали описанному выше эксперименту.

После того как было найдено стационарное решение задачи обтекания пластины, решалась нестационарная задача о взаимодействии вязкого ударного слоя с возмущениями в виде плоских монохроматических акустических волн. Для этого на левой и верхней границах расчетной области с помощью подпрограммы User-Defined-Function задавалась суперпозиция стационарных граничных условий и периодических возмущений с волновым вектором, соответствующим распространению в свободном потоке медленных акустических волн.

Результаты экспериментов и расчетов. На рис. 4 приведены зависимости от частоты основных акустических характеристик пористых материалов, полученные с использованием модели распространения акустических волн в цилиндрических каналах (кривые 1–3) [13] и данных расчета пульсаций скорости и давления с помощью пакета ANSYS Fluent 12.1 при $y = 0$ в вязком ударном слое на пластине со звукопоглощающими вставками. Так, в диапазоне частот возмущений $f = 10 \div 40$ кГц значения характеристического импеданса Z_0 для вставки с канальной пористостью (материал I) приблизительно равны единице для его действительной части и нулю для мнимой части (кривые 1, 2 на рис. 4). С учетом данного обстоятельства возможно применение упрощенного граничного условия (1) в случае пористого материала I при частотах $f > 15$ кГц.

Кривые 4, 5 на рис. 4 соответствуют значениям коэффициента поглощения звука α для вставок с канальной (материал I) и ячеистой (материал III) пористостью, вычисленным по формуле

$$\alpha = 1 - \left| \frac{Z - \rho_w c_w}{Z + \rho_w c_w} \right|^2.$$

Значение импеданса определялось с помощью отношения амплитуд пульсаций давления и скорости с учетом фазового сдвига $Z = (p'/v'_y) e^{i\Delta\varphi}$. Для этого определялся фазовый сдвиг

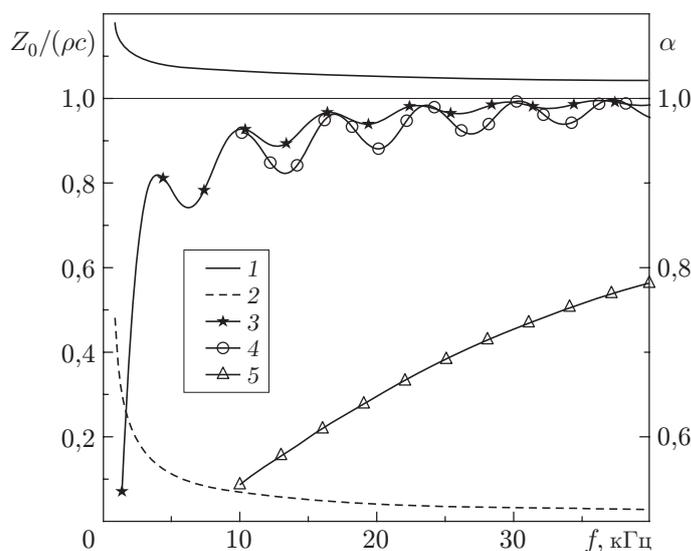


Рис. 4. Зависимости от частоты модуля действительной (1) и мнимой (2) частей характеристического импеданса Z_0 для вставки из цилиндрических каналов; коэффициента поглощения звука α , вычисленного по модели распространения звука в цилиндрическом канале (3) [13]; коэффициента поглощения звука для материала с канальной (4) и ячеистой (5) пористостью (расчеты с помощью пакета ANSYS Fluent 12.1)

между пульсациями давления p' и пульсациями нормальной компоненты скорости v'_y . Для интерполяции значений импеданса на весь исследуемый частотный диапазон осуществлялась аппроксимация постоянной распространения и характеристического импеданса пор. На рис. 4 видно, что материал с канальной пористостью обладает относительно высоким коэффициентом поглощения звука, который практически во всем исследуемом диапазоне частот превышает значение 0,9 и приблизительно равен коэффициенту поглощения звука, вычисленному на основе модели распространения акустических волн в цилиндрических каналах (кривая 3) [13]. В случае материала с ячеистой структурой пор коэффициент поглощения звука значительно меньше, чем для материала с канальной пористостью. Однако значение этого коэффициента составляет $0,55 \div 0,80$ в диапазоне частот $f = 10 \div 40$ кГц. Это значение является достаточно высоким показателем поглощения звука.

На рис. 5 представлены изолинии среднеквадратичных пульсаций давления p'_w на частоте внешних возмущений $f = 20, 40$ кГц при угле атаки $\alpha = 30^\circ$ для случаев сплошной и звукопоглощающей поверхностей. Поля изолиний получены с помощью пакета ИТПМ методом прямого численного моделирования развития возмущений с упрощенным граничным условием (1) при $0,4 \leq x \leq 0,9$. Видно, что пористая поверхность оказывает существенное влияние на пульсации давления в ударном слое.

Анализ расчетных данных показал, что в ударном слое над пористой поверхностью происходят вариации амплитуды в продольном направлении. В качестве примера на рис. 6 приведены зависимости от продольной координаты x среднеквадратичных пульсаций давления на поверхности пластины со звукопоглощающим покрытием при $0,4 \leq x \leq 0,9$, обтекаемой под углом атаки $\alpha = 30^\circ$, для частот внешних возмущений $f = 15, 20, 30, 40$ кГц. Видно, что в случае, когда на конце звукопоглощающего покрытия расположен минимум пульсаций, амплитуда пульсаций давления в точке измерения ($x = 0,95$) также минимальна (см. рис. 5,б и рис. 6, кривая 2). В том случае, когда на конце звукопоглощающего покрытия расположен максимум пульсаций, амплитуда пульсаций давления в точке изме-

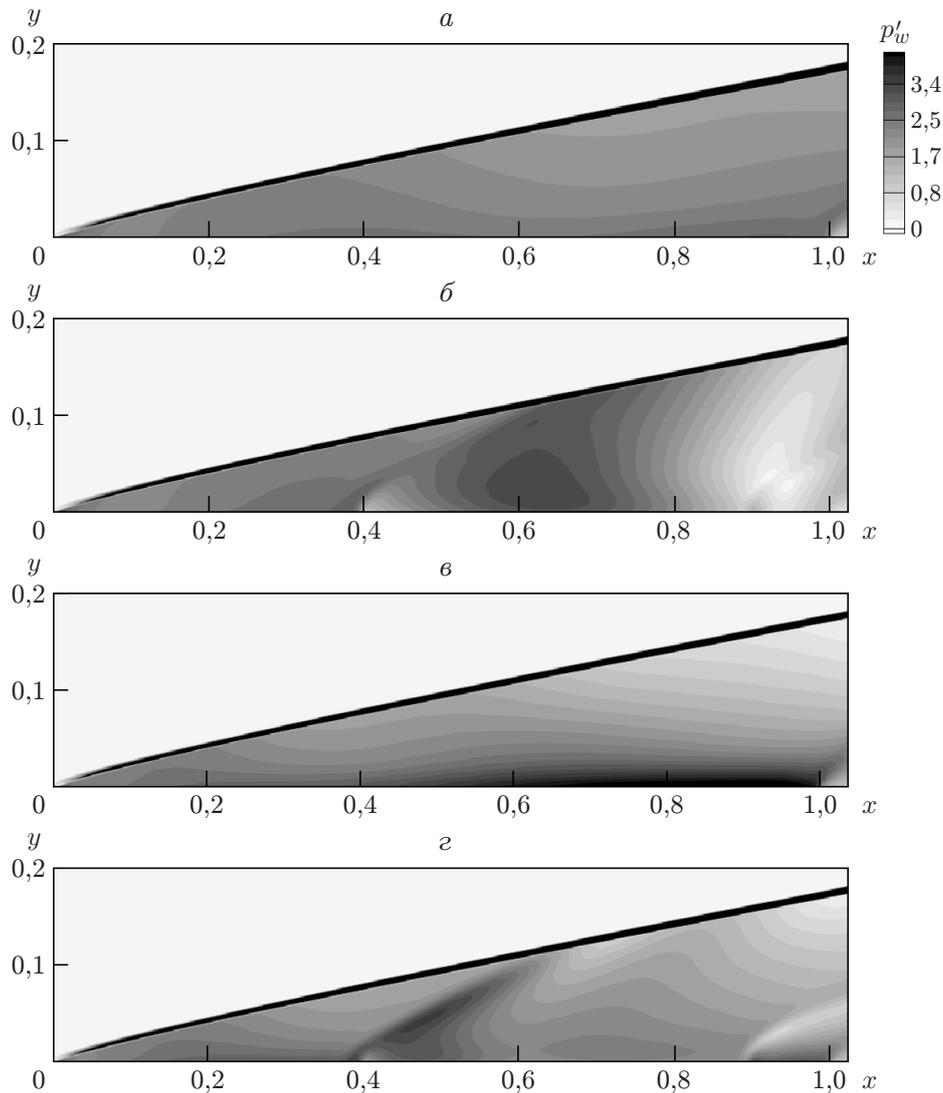


Рис. 5. Изолинии среднеквадратичных пульсаций давления на пластине, обтекаемой под углом атаки $\alpha = 30^\circ$:

a, в — сплошная поверхность (*a* — $f = 20$ кГц, *в* — $f = 40$ кГц); *б, г* — звукопоглощающая вставка, моделируемая граничным условием (1) (*б* — $f = 20$ кГц, *г* — $f = 40$ кГц)

рения максимальна. С увеличением частоты внешних возмущений продольные вариации амплитуды уменьшаются.

На рис. 7 показаны изолинии среднеквадратичных пульсаций давления p' в ударном слое в случае канальной и ячеистой пористости соответственно при $\alpha = 30^\circ$ и воздействии на ударный слой медленных акустических волн внешнего потока на частоте $f = 40$ кГц. Эти данные получены с помощью пакета ANSYS Fluent 12.1 для условий эксперимента. Видно, что в ударном слое над пористыми вставками пульсации давления (рис. 7, б, в) значительно меньше пульсаций над сплошной поверхностью пластины (рис. 7, а). Внутри пористой вставки распространяются затухающие акустические волны. В случае канальной пористости (рис. 7, б) с относительно широкими каналами акустические волны не успевают полностью затухнуть на длине канала и отражаются от заглушенного торца ка-

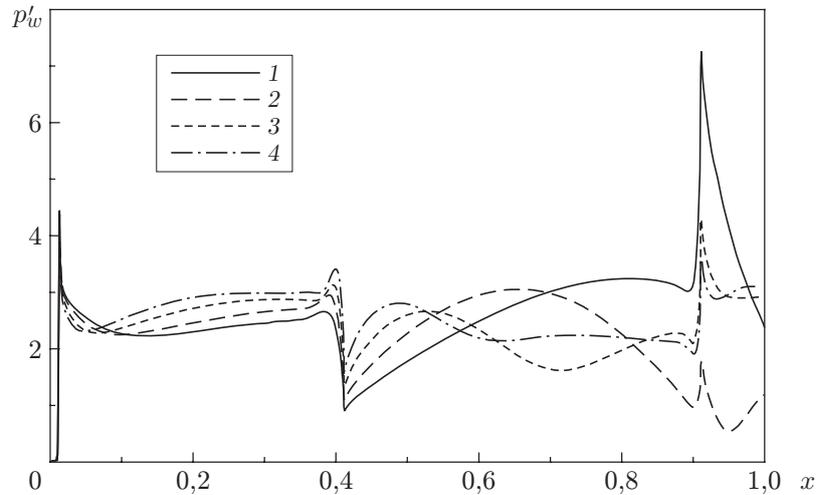


Рис. 6. Среднеквадратичные пульсации давления на поверхности обтекаемой под углом атаки $\alpha = 30^\circ$ пластины со звукопоглощающим покрытием при $0,4 \leq x \leq 0,9$:

1 — $f = 15$ кГц, 2 — $f = 20$ кГц, 3 — $f = 30$ кГц, 4 — $f = 40$ кГц

нала, образуя стоячую волну. В случае если вставка представляет собой ячеисто-пористый материал (рис. 7, в) с относительно небольшим размером пор, акустические волны быстро затухают внутри пористой вставки, длина участка затухания существенно меньше толщины вставки и приблизительно равна 5 мм.

На рис. 8 представлены расчетные и экспериментальные значения амплитуд пульсаций давления p'_w в сечении $x = 0,95$ на поверхности обтекаемой под углом атаки $\alpha = 30^\circ$ пластины со вставками из пористых материалов I и III (кривые 1 и 2), нормированных на значения амплитуды пульсаций давления p'_{w0} на сплошной поверхности II. Анализ экспериментальных спектров нормированных амплитуд пульсаций давления для вставок из пористых материалов позволяет сделать вывод, что на частотах $f = 20 \div 40$ кГц пульсации давления на поверхности модели значительно ослабевают (приблизительно на 40 %). Это свидетельствует о высокой степени поглощения пульсаций давления данными материалами на больших частотах. Сопоставление данных на рис. 2, 8 показывает, что степени звукопоглощения материалов I и III, полученные в методических экспериментах и в экспериментах с пластиной, обтекаемой под углом атаки, качественно согласуются.

Точки 3 на рис. 8 соответствуют значениям амплитуды пульсаций давления, полученным с помощью пакета ИТПМ с граничным условием (1) для величины пористости, равной 98 %. Данные моделирования качественно согласуются с результатами эксперимента на частотах $f > 20$ кГц. На частотах $f = 15 \div 20$ кГц наблюдается резкий переход от увеличения пульсаций давления к их существенному уменьшению, обусловленный описанными выше вариациями амплитуды пульсаций давления над пористой поверхностью.

Результаты, полученные с помощью пакета ANSYS Fluent 12.1, показаны на рис. 8 точками 4 (полузамкнутые каналы) и 5 (ячеисто-пористый материал). Видно, что расчетные и экспериментальные данные качественно согласуются. На частотах, превышающих 15 кГц, пористые материалы ослабляют пульсации давления. На частоте $f = 40$ кГц пульсации давления равны 0,7, что соответствует экспериментальным значениям, приведенным на рис. 2. На частотах ниже 15 кГц наблюдается увеличение спектральных амплитуд до значений, превышающих единицу. На этих частотах в экспериментах и расчетах кроме общего усиления наблюдаются вариации амплитуды в низкочастотной области. Эффект

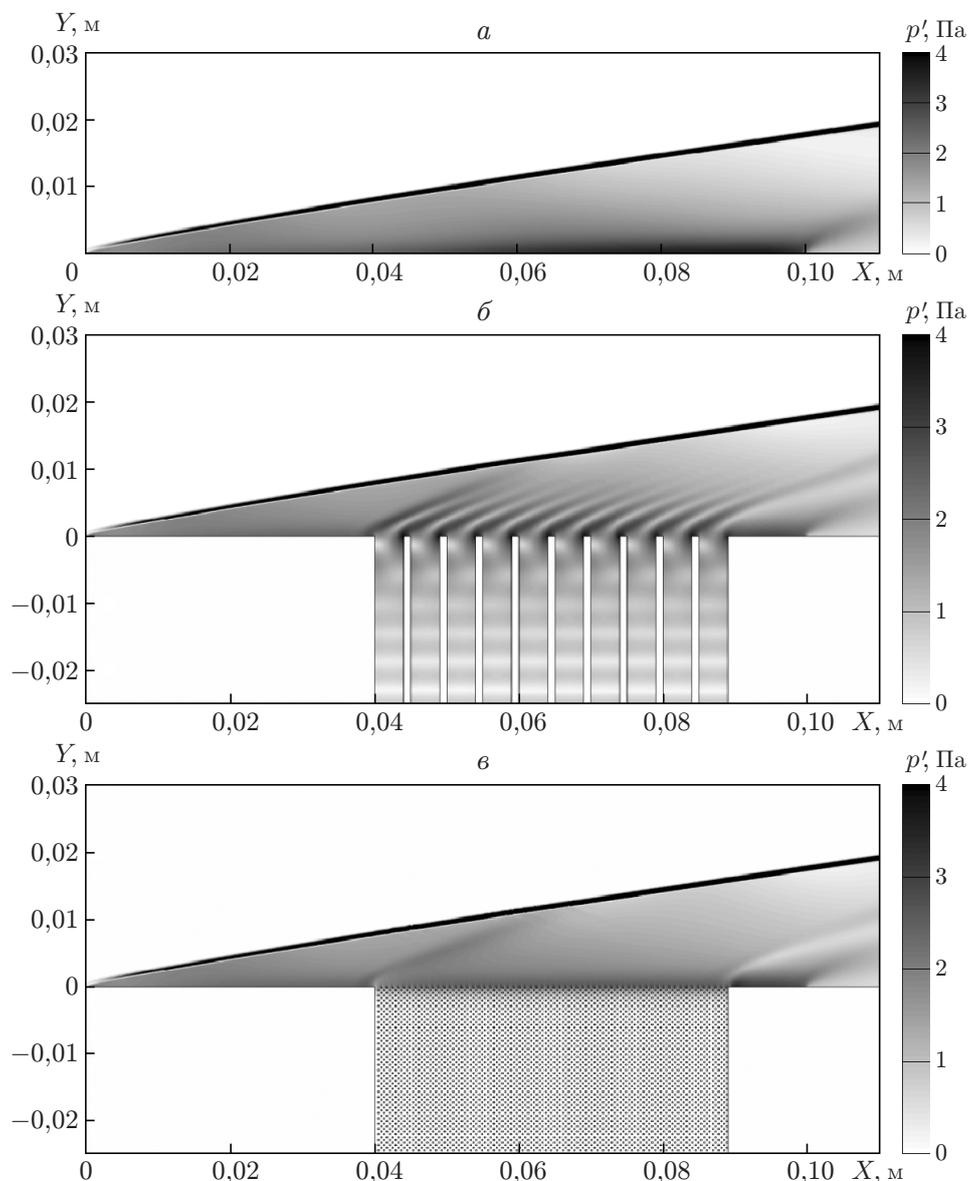


Рис. 7. Изолинии среднеквадратичных пульсаций давления в ударном слое на пластине, обтекаемой под углом атаки $\alpha = 30^\circ$, при $f = 40$ кГц:
a — сплошная вставка; *б* — вставка из полужамкнутых каналов; *в* — ячеисто-пористая вставка (расчеты с помощью пакета ANSYS Fluent 12.1)

усиления низкочастотных возмущений наиболее отчетливо проявляется в случае вставки из материала с канальной пористостью, имеющего большой коэффициент поглощения звука на низких частотах. В случае материала с ячеистой пористостью, для которого значение коэффициента поглощения звука меньше, низкочастотные возмущения усиливаются в меньшей степени, что соответствует экспериментальным результатам.

Заключение. Выполнено экспериментальное и численное исследование воздействия пористых звукопоглощающих материалов на интенсивность пульсаций давления на поверхности пластины, обтекаемой гиперзвуковым ($M_\infty = 21$) потоком азота под углом атаки $\alpha = 30^\circ$.

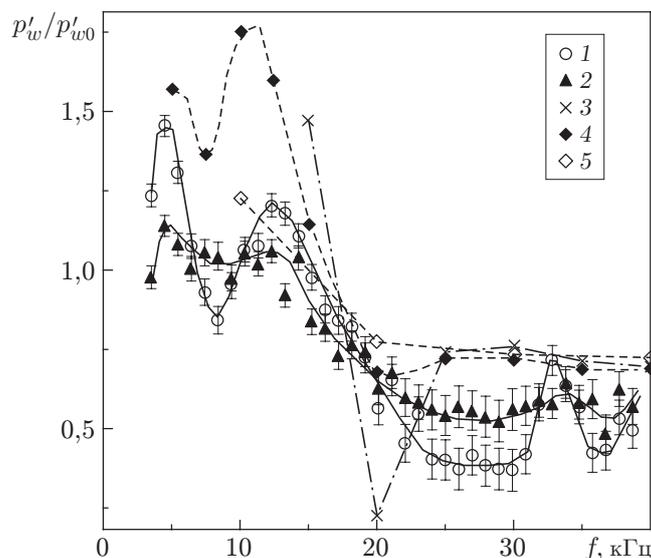


Рис. 8. Спектры нормированных среднеквадратичных амплитуд пульсаций давления на поверхности пластины, обтекаемой под углом атаки $\alpha = 30^\circ$, в сечении $x = 0,95$:

1, 2 — экспериментальные данные для материалов I и III; 3 — данные численного моделирования с помощью пакета ИТПМ с граничным условием (1); 4, 5 — численное моделирование с помощью пакета ANSYS Fluent 12.1 (4 — полузамкнутые каналы; 5 — ячеисто-пористый материал)

В методических экспериментах исследованы звукопоглощающие материалы, расположенные на переднем торце цилиндрических моделей. Показано, что пульсации плотности в ударном слое эффективно подавляются с помощью пакета полузамкнутых каналов и ячеисто-пористого никеля с высокой степенью пористости. В экспериментах по исследованию обтекания пластины под углом атаки со звукопоглощающими вставками из этих материалов показана возможность существенного ослабления пульсаций давления на поверхности пластины в диапазоне частот $f = 20 \div 40$ кГц. Однако в области частот, не превышающих 20 кГц, пульсации давления усиливаются более значительно, чем в случае пластины без звукопоглощающих материалов.

Результаты численного моделирования развития возмущений в ударном слое на пластине под углом атаки с упрощенным граничным условием на звукопоглощающей вставке с помощью пакета ИТПМ качественно согласуются с данными измерений на частотах, превышающих 20 кГц. Также обнаружено увеличение пульсаций давления на частотах менее 20 кГц, обусловленное вариациями пульсаций давления в продольном направлении, максимум которых реализуется в конце пористого участка.

Численное моделирование возмущений с включением в расчетную область пространства, занимаемого звукопоглощающим материалом, выполненное с помощью пакета ANSYS Fluent 12.1, также подтверждает, что на частотах менее 20 кГц пульсации давления увеличиваются, а на более высоких частотах эффективно подавляются. С использованием данных расчета пульсаций с помощью пакета ANSYS Fluent 12.1 определены основные акустические характеристики используемых пористых материалов.

Авторы выражают благодарность А. Н. Кудрявцеву, разработчику программы прямого численного моделирования возмущений в ударном слое (пакета ИТПМ), за предоставленную возможность использования ее в данной работе.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Тарасенко Д. А.** Структура и циркуляция стратосферы и мезосферы Северного полушария. Л.: Гидрометеоздат, 1988.
2. **Maslov A. A., Mironov S. G., Kudryavtsev A. N., et al.** Wave processes in a viscous shock layer and control of fluctuations // *J. Fluid Mech.* 2010. V. 650. P. 81–118.
3. **Маслов А. А., Миронов С. Г., Поплавская Т. В., Цырюльников И. С.** Волновые процессы в ударном слое на пластине, расположенной под углом атаки // *ПМТФ.* 2010. Т. 51, № 4. С. 39–47.
4. **Fedorov A. V., Malmuth N. D., Rasheed A., Hornung H. G.** Stabilization of hypersonic boundary layers by porous coatings // *AIAA J.* 2001. V. 39, N 4. P. 605–610.
5. **Fedorov A., Shpiyuk A., Maslov A., et al.** Stabilization of a hypersonic boundary layer using an ultrasonic absorptive coatings // *J. Fluid Mech.* 2003. V. 479. P. 99–130.
6. **Egorov I. V., Fedorov A. V., Soudakov V. G.** Receptivity of a hypersonic boundary layer over a flat plate with a porous coating // *J. Fluid Mech.* 2008. V. 601. P. 165–187.
7. **Mironov S. G., Maslov A. A.** An experimental study of density waves in hypersonic shock layer on a flat plate // *Phys. Fluids A.* 2000. V. 12, N 6. P. 1544–1553.
8. **Кудрявцев А. Н., Миронов С. Г., Поплавская Т. В., Цырюльников И. С.** Экспериментальное исследование и прямое численное моделирование развития возмущений в вязком ударном слое на плоской пластине // *ПМТФ.* 2006. Т. 47, № 5. С. 3–15.
9. **Гапонов С. А.** Влияние сжимаемости газа на устойчивость пограничного слоя над проникаемой поверхностью при дозвуковых скоростях // *ПМТФ.* 1975. № 1. С. 121–125.
10. **Цырюльников И. С., Миронов С. Г.** Определение характеристик поглощения ультразвука тонкими пористыми покрытиями // *Теплофизика и аэромеханика.* 2004. Т. 11, № 4. С. 523–532.
11. **Stinson M. R., Champoux Y.** Propagation of sound and the assignment of shape factors in model porous materials having simple pore geometries // *J. Acoust. Soc. Amer.* 1992. V. 91, N 2. P. 685–695.
12. **Sandham N. D., Ludeke H.** Numerical study of Mach 6 boundary-layer stabilization by means of a porous surface // *AIAA J.* 2009. V. 47, N 9. P. 2243–2252.
13. **Benade A. H.** On the propagation of sound waves in a cylindrical conduit // *J. Acoust. Soc. Amer.* 1968. V. 44, N 2. P. 616–623.

Поступила в редакцию 25/VII 2011 г.
