

УДК 532.526

Воздействие звукопоглощающих покрытий на развитие возмущений в потоке смеси колебательно возбужденных газов*

Т.В. Поплавская, А.И. Решетова, И.С. Цырюльников

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

E-mail: popla@itam.nsc.ru, tsivan@itam.nsc.ru

В работе исследуется процесс развития возмущений на сплошной пластине и пластине со звукопоглощающим покрытием под углом атаки в гиперзвуковом потоке ($M_\infty = 8,44$) колебательно возбужденных смесей углекислого газа и азота. Измерение среднеквадратичных пульсаций на поверхности пластин проведено в импульсной аэродинамической трубе ИТ-302М ИТПМ СО РАН. Численное моделирование выполнено на базе решения двумерных нестационарных уравнений Навье–Стокса и двухтемпературной модели релаксационных течений. При моделировании реального пористого покрытия используется скелетная модель, представляющая собой набор квадратных элементов, расположенных в шахматном порядке, с расстоянием между ними, равным диаметру пор звукопоглощающего материала, используемого в эксперименте. Представлены данные по динамике развития возмущений на сплошной пластине и пластине со звукопоглощающим покрытием при разных условиях набегающего потока. Проведено исследование влияния различных параметров звукопоглощающего покрытия (глубины, длины и расположение на пластине). Показано, что звукопоглощающее покрытие существенно (до 50 %) ослабляет интенсивность пульсаций давления на поверхности пластины по сравнению со сплошной поверхностью. Продемонстрировано согласование расчетных и экспериментальных данных по пульсациям давления на поверхности пластин.

Ключевые слова: гиперзвуковые течения, неравновесность, высокопористые материалы.

Введение

Возможность управлять интенсивностью возмущений в пограничных слоях и переходом к турбулентности является одним из важных аспектов разработки перспективных гиперзвуковых летательных аппаратов. В условиях реального полета, где наблюдаются большие скорости и температуры, проявляются эффекты реального газа, связанные с возбуждением колебательных степеней свободы молекул и неравновесностью течения. Свойства реального газа существенно влияют как на среднее течение вокруг летательного аппарата, так и на развитие возмущений. Летные исследования устойчивости течений колебательно возбужденных газов конструктивно сложны и достаточно дорогостоящи, поэтому важным способом изучения является численное моделирование и проведение экспериментальных исследований в аэродинамических трубах.

* Работа выполнена в рамках Программы фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2013–2020 годы (проект АААА-А17-117030610126-4).

Возмущения, формирующиеся в ударном слое, сносятся вниз по потоку и оказывают влияние на развитие возмущений и ламинарно-турбулентный переход в гиперзвуковом пограничном слое модели в целом. На сегодняшний день имеется большой научный опыт в исследовании влияния физико-химических процессов в газах на среднее течение при обтекании тел гиперзвуковыми потоками [1, 2]. Однако работ по исследованию устойчивости таких течений и управлению интенсивностью возмущений существует не так много (см., например, [3–6]).

Одним из известных методов управления ламинарно-турбулентным переходом в сверх- и гиперзвуковых пограничных слоях является метод звукопоглощающих пористых покрытий поверхности обтекаемого тела [7, 8]. Моделирование пористых звукопоглощающих покрытий может осуществляться разными способами: с помощью граничного условия на поверхности пластины [9] и моделирования взаимодействия возмущений со звукопоглощающим покрытием [7, 10] или заданием конкретной геометрии и структуры звукопоглощающих материалов [11, 12] (скелетная модель пористой среды) для прямого моделирования течения жидкости и газа в скелете пористого покрытия без использования граничного условия на звукопоглощающей поверхности.

Метод звукопоглощающих пористых покрытий показал свою эффективность для низкотемпературных потоков при $M_\infty = 21$ [12]. В работах [6, 13] было показано, что он эффективно работает и в колебательно-возбужденных гиперзвуковых потоках углекислого газа и его смесей с воздухом.

В настоящей работе исследуются процессы развития возмущений в вязком ударном слое на сплошной пластине и пластине со звукопоглощающим высокопористым покрытием в гиперзвуковом потоке колебательно возбужденных смесей углекислого газа и азота с учетом колебательной неравновесности углекислого газа, а также влияние различных параметров звукопоглощающего покрытия (глубины, длины и расположения) на подавление пульсаций давления на поверхности модели в течениях релаксирующих газов.

1. Экспериментальные исследования

Эксперименты по измерению пульсаций давления на поверхности модели проводились в высокоэнтропийной аэродинамической трубе ИТ-302М ИТПМ СО РАН при параметрах торможения в форкамере P_0 и T_0 (полное давление и температура торможения) (см. табл. 1). Также в табл. 1 приведены параметры M_∞ , Re_1 , T_∞ , p_∞ , T_v на входе в рабочую камеру, полученные путем численного моделирования течения в сопловом тракте ИТ-302М и рассматриваемые далее как условия набегающего потока для задачи обтекания пластины. Здесь M_∞ — число Маха, Re_1 — единичное число Рейнольдса, T_∞ — температура набегающего потока, p_∞ — давление набегающего потока и T_v — колебательная температура газа. При этих параметрах течения проводились эксперименты по измерению пульсаций давления на поверхности модели.

Устройство для измерения пульсаций давления в потоке устанавливалось в рабочей камере аэродинамической трубы. Оно включало в себя четыре прямоугольные пластины длиной $L = 114$ мм и толщиной 17 мм (рис. 1а). Две из них — сплошные, а на двух других на расстоянии 16 мм от передней кромки располагалась прямоугольная каверна

Таблица 1

Параметры течения

Смеси	P_0 , бар	T_0 , К	M_∞	Re_1 , m^{-1}	T_∞ , К	p_∞ , Па	T_v , К
Смесь 1: $CO_2(0,44)/N_2(0,56)$	180	2430	8,44	$13,6 \cdot 10^5$	215	374,5	215
Смесь 2: $CO_2(0,214)/N_2(0,786)$	55	2556	8,65	$4,5 \cdot 10^5$	205	134	205

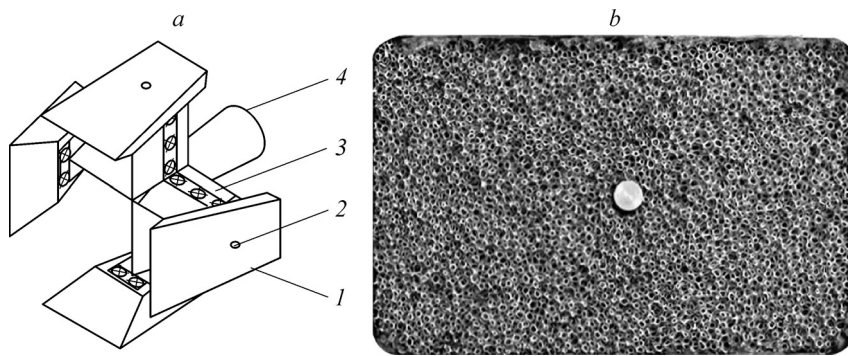


Рис. 1. Устройство из четырех моделей пластин (а) и образец высокопористого ячеистого материала (b).

а: 1 — пластина, 2 — датчик давления, 3 — крестовина, 4 — державка.

размером 93×60 мм и глубиной 9 мм, в которую была установлена вставка из вспененного никеля (рис. 1b). На противоположных плечах крестовины устанавливались сплошная пластина и пластина с пористой вставкой таким образом, чтобы каждая пара пластин имела один угол атаки. Углы атаки варьировались от 5° до 20°. На всех четырех пластинах на расстоянии 64,6 мм от передней кромки были размещены датчики РСВ 113В28 для измерения пульсаций давления.

В качестве газопроницаемой вставки использовался ячеисто-пористый никель (рис. 1b), относящийся к высокопористым ячеистым материалам (ВПЯМ), формирующимся при застывании вспененных жидких металлов, подробные характеристики которого описаны в работе [14]. Застывшая пена образует пространственный каркас из перегородок между соприкасающимися шарообразными ячейками. Важной структурной характеристикой ВПЯМ является средний диаметр этих ячеек. Размер ячеек реального высокопористого ячеистого материала определяет размер пор — диаметр d . Преимущество ВПЯМ перед другими высокопористыми материалами состоит в высокой однородности их структуры и малом отклонении диаметров ячеек от среднего значения [14]. Отношение объема пустот в материале к его полному объему определяет пористость материала k . В рассматриваемом случае использовалась вставка из вспененного никеля с пористостью $k = 0,95$.

При исследовании обтекания сплошной пластины и пластины со звукопоглощающей вставкой из вспененного никеля смесями CO_2 и азота с указанными в табл. 1 мольными долями газов (смесь 1 и смесь 2) измерения пульсаций давления проводились для акустических возмущений внешнего потока в диапазоне частот $f = 10 \div 250$ кГц. В результате спектральных нормировок пульсаций давления по сигналам датчиков определялось отношение спектральных амплитуд датчиков, полученных на пластине со звукопоглощающим покрытием, к спектральным амплитудам датчиков на сплошной пластине. Так оценивалась эффективность метода звукопоглощающих покрытий.

2. Численное моделирование

В численном моделировании решалась задача взаимодействия двумерных акустических волн с вязким ударным слоем на сплошной пластине и на пластине со звукопоглощающей вставкой, обтекаемых высокотемпературным гиперзвуковым потоком газа. При обтекании сплошной пластины расчетная область представляла собой прямоугольник, часть нижней стороны которого совпадала с поверхностью пластины, где задавалось

условие прилипания и постоянства температуры поверхности $T_w = 300$ К. На левой и верхней границах задавались условия набегающего потока: p_∞ , M_∞ , T_∞ и $e_{v\infty}$ — колебательная энергия молекул углекислого газа. На правой и нижней границах, не занятых поверхностью пластины, устанавливалось условие истечения. Высота расчетной области выбиралась из условия, чтобы головная ударная волна не взаимодействовала с верхней границей. Расчетная сетка состояла из прямоугольных ячеек размером $0,2 \times 0,1$ мм в количестве 322000 для пластины длиной 400 мм и 118400 — для пластины длиной 114 мм.

Для задачи обтекания пластины с пористой звукопоглощающей вставкой расчетная область дополняется подобластью, в которой напрямую моделируется скелет пористого материала (рис. 2а). Первая подобласть совпадает с расчетной областью для сплошной пластины и располагается над поверхностью пластины. Вторая подобласть, верхняя граница которой совпадает с поверхностью пластины, включает звукопоглощающую вставку. Для численного моделирования структуры высокопористого ячеистого материала использовалась скелетная модель пористой среды, предложенная и реализованная ранее в работе [12]. Выбор геометрических размеров элементов скелета обусловлен их сходством со вспененным никелем. В двумерном случае скелетная модель представляет собой набор квадратных элементов, расположенных в шахматном порядке, расстояние между которыми определяется размером ячеек реального высокопористого ячеистого материала (диаметр пор $d = 2$ мм). Размер квадратных элементов ($0,4 \times 0,4$ мм) подбирался из расчета соответствия пористости 0,95, а именно, чтобы их суммарная площадь (каркас пористой вставки) составляла только 0,05 (5 %) от площади пористой вставки.

Для оценки акустических характеристик звукопоглощающих материалов применяются различные полуэмпирические модели распространения звука. В частности, для высокопористых волокнистых материалов была предложена такая модель [15] для оценки распространения звука в условиях гиперзвуковых течений [16]. Для этой полуэмпирической модели использовались следующие характеристики звукопоглощающего материала: пористость, характерный пространственный размер пор (ячеек) материала и коэффициент сопротивления трения материала, определяемый из неакустических измерений (при стационарном пропускании воздушного потока). При разработке скелетной модели ВПЯМ выбор геометрических размеров элементов скелета дает возможность подбора соответствия модели по первым двум характеристикам и, кроме того, можно использовать соответствие коэффициенту сопротивления трения реального материала (вспененный никель), приведенное в работе [17]. Таким образом, по совокупности параметров, определяющих акустические свойства материала, предполагаемая скелетная модель адекватно представляет пористый материал типа вспененного никеля при пористости 0,95.

Внутри пористой зоны расчетная область покрывалась равномерной прямоугольной расчетной сеткой (рис. 2б). Верхняя граница пористой зоны считалась проницаемой, на других границах, включая стенки каркаса, ставилось условие прилипания и постоянства температуры поверхности. Оценка нагрева верхнего ряда элементов пористой зоны показала, что за время работы аэродинамической импульсной установки (~ 100 мс)

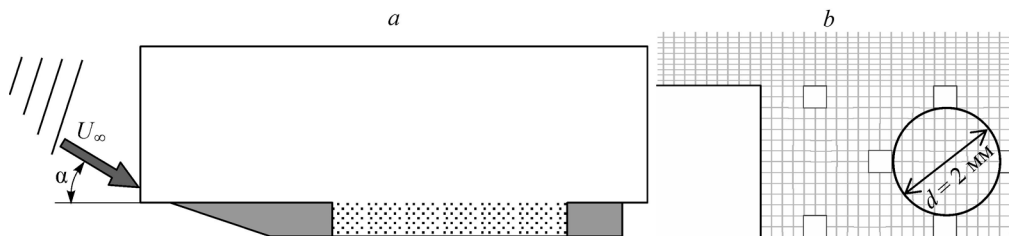


Рис. 2. Вид расчетной области для пластины со звукопоглощающим покрытием (а) и фрагмент расчетной сетки (б).

существенного нагрева элементов пористого покрытия не происходит, что позволило использовать условие изотермичности стенки. Общее число ячеек в пористой зоне составляло 26419 для вставки длиной 80 мм и глубиной 14 мм. Тестовые расчеты показали, что при измельчении сетки в два раза по обоим направлениям изменение пульсаций давления на поверхности пластины не превышает 2 %.

Все большее применение для решения широкого круга задач газодинамики и теплообмена находят CFD-пакеты общего назначения, в частности пакет ANSYS Fluent [18], используемый в настоящей работе. Численное моделирование проводилось на основе решения двумерных нестационарных уравнений Навье–Стокса (1)–(3) (см. далее), которые дополнялись уравнением состояния Менделеева–Клапейрона (4). Поскольку характеристические колебательные температуры азота и нижнего колебательного уровня молекул углекислого газа равны 3340 и 960 К соответственно, для указанных выше условий эксперимента ($T_0 > 2000$ К) доля колебательно возбужденных молекул азота мала, в то время как молекулы CO_2 колебательно возбуждены. Для расчета неравновесного течения к уравнениям Навье–Стокса добавлялись уравнения сохранения колебательной энергии (5) для каждой из четырех колебательных степеней свободы молекул углекислого газа:

$$\partial \rho / \partial t + \nabla(\rho \vec{u}) = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \vec{u}) + \nabla(\rho \vec{u} \vec{u}) = -\nabla p + \nabla \tau_\mu, \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho e_t) + \nabla[\vec{u}(\rho e_t + p)] = \nabla(\lambda \nabla T_{tr} + \tau_\mu \vec{u}) - \sum_{n=1}^4 q_{vt}^{n(\text{CO}_2-\text{CO}_2)} - \sum_{n=1}^4 q_{vt}^{n(\text{CO}_2-\text{N}_2)}, \quad (3)$$

$$p = \rho R T_{tr} \sum_{i=1,2} \frac{Y_i}{M_i}, \quad (4)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho e_v^n) + \nabla(\vec{u} \rho e_v^n) = q_{vt}^{n(\text{CO}_2-\text{CO}_2)} + q_{vt}^{n(\text{CO}_2-\text{N}_2)}, \quad n = 1, \dots, 4, \quad (5)$$

здесь ρ , p , λ — плотность, давление и теплопроводность, \vec{u} — вектор скорости, T_{tr} — температура поступательно-вращательных степеней свободы, n — номер моды колебательной степени свободы, τ_μ — тензор вязких напряжений, e_t — удельная поступательно-вращательная энергия, R — универсальная газовая постоянная, Y_i — массовая доля i -ой компоненты смеси, M_i — молярная масса i -ой компоненты смеси; индекс «v» относится к колебательным степеням свободы молекул, индекс «vt» — к параметрам, характеризующим обмен между колебательными и поступательными степенями свободы молекул. Вязкость рассчитывалась по формуле Сазерленда, теплопроводность — по формуле из кинетической теории газов.

В работе рассматривается модель термически совершенного газа, теплоемкость c_p которого зависит от температуры вследствие возбуждения колебательных степеней свободы молекул углекислого газа. В случае, когда время колебательной релаксации τ_{vt} много меньше времени конвективного изменения параметров течения τ_f , газ считается равновесным. Если же эти времена сопоставимы ($\tau_{vt} \sim \tau_f$), то газ является неравновесным. Для моделирования колебательной неравновесности CO_2 в работе использовалась двухтемпературная модель релаксационных течений, где температура колебательных степеней свободы может не совпадать с температурой поступательно-вращательных степеней свободы. В большинстве исследований, в частности, в работе [19] для моделирования неравновесных течений с малым отклонением от термического равновесия используется формула Ландау–Теллера [20]. В этой работе энергообмен между колебательными

и поступательно-вращательными степенями свободы молекул CO_2 с конечным временем релаксации учитывался путем добавления в (5) источников членов q_{vt} (см. далее (6), (7)), рассчитываемых по упомянутому выше уравнению Ландау–Теллера с помощью встраиваемого в пакет модуля UDF1. Такой подход для расчета течений с термической неравновесностью, основанный на добавлении пользовательских модулей с открытым кодом в пакет программ ANSYS Fluent, получил распространение в последнее время [21, 22].

Вследствие того, что энергия колебательного возбуждения возникает за счет кинетической энергии теплового движения сталкивающихся молекул, необходимо учитывать конечное время колебательной релаксации молекул углекислого газа при их столкновениях как с молекулами CO_2 , так и с молекулами N_2 . В настоящей работе эти два канала колебательной релаксации молекул CO_2 учитывались следующим образом:

$$q_{vt}^{n(\text{CO}_2-\text{CO}_2)} = \rho \left(e_v^{\text{eq}^n} - e_v^n \right) \left(\tau_{vt}^{(\text{CO}_2-\text{CO}_2)} \right)^{-1}, \quad (6)$$

$$q_{vt}^{n(\text{CO}_2-\text{N}_2)} = \rho \left(e_v^{\text{eq}^n} - e_v^n \right) \left(\tau_{vt}^{(\text{CO}_2-\text{N}_2)} \right)^{-1}, \quad (7)$$

здесь q_{vt} — поток энергии между поступательными и колебательными степенями свободы молекул, τ_{vt} — время колебательной релаксации, e_v^{eq} — равновесная колебательная энергия газа, e_v — неравновесная колебательная энергия газа. Для того чтобы не нарушить энергетический баланс системы уравнений Навье–Стокса, в уравнение поступательно-вращательной энергии (3) добавлялись источниковые члены (6) и (7) с противоположным знаком.

Зависимость времени колебательной релаксации молекул CO_2 при взаимодействии с молекулами CO_2 от температуры и давления приведена в работе [23], где время релаксации τ_{vt} всех колебательных мод CO_2 одинаково (при условии $\tau_{vt} \gg \tau_{vv}$, где τ_{vv} — время релаксации резонансного обмена колебательными квантами). Данные по времени колебательной релаксации CO_2 при взаимодействии с молекулами N_2 взяты из работы [24]. При моделировании колебательной релаксации в смеси CO_2 с азотом предполагалось, что азот не участвует в процессах релаксации углекислого газа.

Задача моделирования развития возмущений в вязком ударном слое на пластине, расположенной под углом атаки, при воздействии внешних акустических волн решалась в два этапа. На первом этапе рассматривалось гиперзвуковое обтекание пластины без возмущений (стационарная задача) для получения характеристик среднего течения. На втором этапе для полученного среднего течения исследовалось развитие возмущений в вязком ударном слое на пластине при воздействии внешних акустических волн набегающего потока. В работе [11] был экспериментально определен модовый состав возмущений в ядре потока аэродинамической трубы, а именно: выявлено наличие в сопловом тракте акустических возмущений быстрой моды. Вследствие этого в работе рассматривается задача воздействия быстрых акустических волн.

На втором этапе в расчетную область с помощью встраиваемого в пакет модуля UDF2 (аналогично работе [5]) вводятся акустические возмущения набегающего потока и решается нестационарная задача до тех пор, пока решение не выйдет на установившийся периодический режим. При решении этой задачи на левой и верхней границах расчетной области задавалось условие суперпозиции стационарного течения $\langle U \rangle$ и плоских монохроматических акустических возмущений U' :

$$U = \langle U \rangle + U' = U_\infty + A \exp \left[i \left(k_x x + k_y y - \omega t \right) \right], \quad (8)$$

здесь $A = 0,03 p_\infty$ — амплитуда возмущений, $k_x = k \cos \theta$ и $k_y = -k \sin \theta$ — компоненты волнового вектора k , $\omega = 2\pi f$ — круговая частота вводимого возмущения, θ — угол распространения внешних акустических возмущений (в рассматриваемом случае $\theta = \alpha$, что

соответствует распространению внешних возмущений по потоку), t — время; индекс « ∞ » соответствует параметрам набегающего потока, штрих при параметрах обозначает возмущения.

В численном моделировании использовался решатель, основанный на плотности, явная схема 2-ого порядка точности по пространству с Roe-FDS методом расщепления конвективных потоков и явный метода Рунге–Кутты по времени. Численное моделирование проводилось на кластере информационно-вычислительного центра (ИВЦ) Новосибирского государственного университета.

3. Результаты

В численном исследовании эффективности звукопоглощающего покрытия в условиях высокотемпературного течения рассматривались задачи влияния расположения и размера покрытия. Расчеты проводились для случая обтекания пластины длиной 400 мм смесью 1 под углом атаки $\alpha = 10,2^\circ$. Звукопоглощающие вставки длиной 80 мм и глубиной 14 мм были включены в расчетную область на расстоянии 90 мм (покрытие 1), 200 мм (покрытие 2) и 270 мм (покрытие 3) от передней кромки пластины и имели вид регулярной ячеистой структуры, состоящей из поверхностей квадратного сечения, расположенных в шахматном порядке. Расстояние между элементами каркаса в нормальном и осевом направлениях равнялось диаметру пор $d = 2$ мм, а площадь, занимаемая элементами, подбиралась из расчета соответствия течению в пористой вставке с пористостью 0,95.

После расчетов среднего течения данные сравнивались, в частности, сопоставлялись профили температуры в различных сечениях: до начала пористой вставки, после нее и внутри. Профили температуры на звукопоглощающей пластине во всех случаях совпадали с профилями на сплошной пластине. Это свидетельствует о том, что пористое покрытие практически не нарушает структуру среднего течения.

Длины волн λ внешних быстрых акустических возмущений набегающего потока, вычисляемые по формуле $\lambda = U'/f = (U_\infty + c)/f$, где c — скорость звука, для течения смеси 1 при $U_\infty = 2255,4$ м/с и $c = 267,5$ м/с приведены в табл. 2. Следует отметить, что на длину любого пористого покрытия приходится несколько длин волн акустического возмущения.

На рис. 3 приведена расчетная область задачи с наложенным полем мгновенных пульсаций давления на пластине со звукопоглощающим покрытием 2 при воздействии быстрой акустической волны с частотой 160 кГц. Видно, что возмущения, проходя через

Таблица 2

Параметры внешних быстрых акустических волн

Параметры	Значения			
f , кГц	40	80	120	160
λ , мм	63	31,5	21	15,8

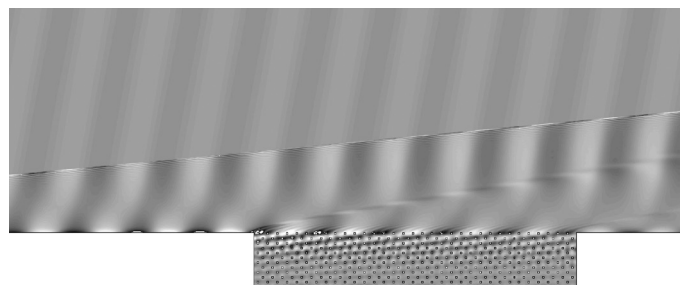


Рис. 3. Поле мгновенных пульсаций давления на пластине длиной 400 мм со звукопоглощающим покрытием 2 при воздействии быстрой акустической волны с $f = 160$ кГц для смеси 1 при $\alpha = 10,2^\circ$.

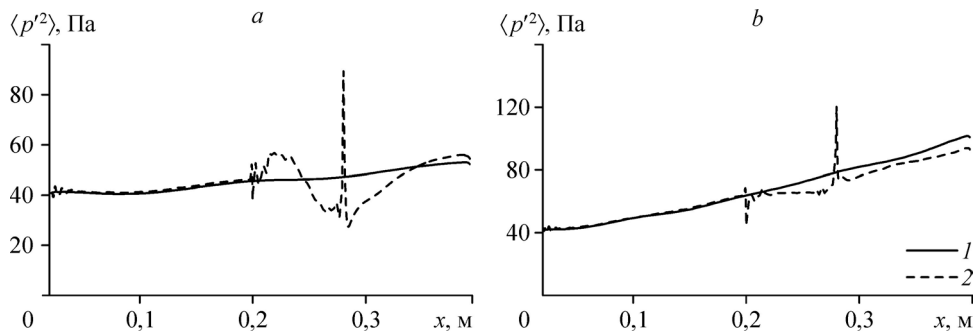


Рис. 4. Распределения средневладратичных пульсаций давления вдоль сплошной пластины (1) и пластины со звукопоглощающим покрытием 2 (2) для смеси 1 при $\alpha = 10,2^\circ$ при воздействии быстрой акустической волны с $f = 80$ (а) и 120 (б) кГц.

ударную волну, усиливаются, достигая максимума у поверхности пластины, затем затухают в пористой зоне, где при этом образуются стоячие волны, вызванные распространением и отражением возмущений от нижней границы зоны.

На рис. 4 представлены распределения средневладратичных пульсаций давления на поверхности сплошной пластины (1) и пластины со звукопоглощающим покрытием 2 (2) для случая обтекания смесью 1. Видно, что при частоте $f = 80$ кГц возмущения не затухают ни в пористой области, ни после нее. Следует заметить, что при этом в пористой зоне длиной 80 мм укладываются только две длины волны. С ростом частоты внешней акустической волны пульсации давления на пластине со звукопоглощающим покрытием существенно снижаются как над областью звукопоглощающего покрытия, так и за ним в конце пластины. Таким образом, эффективность метода звукопоглощающих покрытий увеличивается.

Звукопоглощающие покрытия 1 и 2 располагались в области нарастания возмущений для пластины под углом атаки $10,2^\circ$, а покрытие 3 — в области максимума возмущений. Было получено, что во всех трех случаях звукопоглощающие покрытия эффективно снижают интенсивность пульсаций давления при частотах 120 и 160 кГц (рис. 5). Однако те из них, которые располагались ближе к максимуму возмущений, оказались более эффективными по снижению интенсивности пульсаций давления.

Для исследования влияния длины звукопоглощающего пористого покрытия рассматривалось два случая: обтекание пластины с покрытием 2 длиной 80 мм, расположенным в области максимума возмущений, и с покрытием 4, в 2 раза большей длины (160 мм), находящемся под воздействием внешних быстрых акустических волн. Результаты расчетов

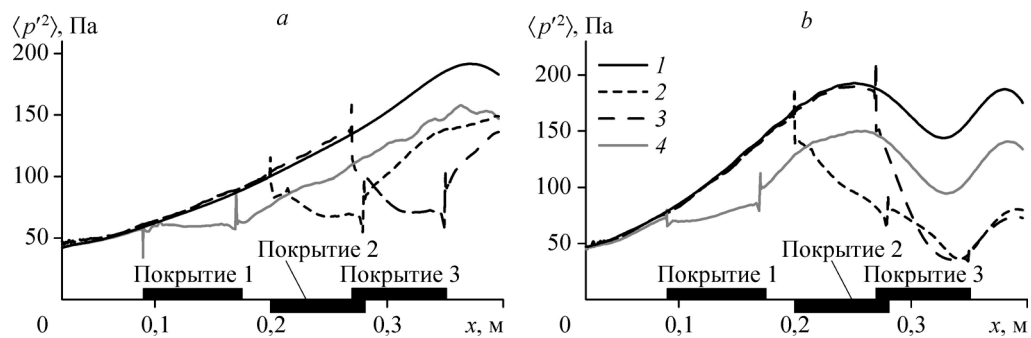


Рис. 5. Распределения средневладратичных пульсаций давления вдоль сплошной пластины (1), пластины со звукопоглощающими покрытиями 1 (2), 2 (3) и 3 (4) для смеси 1 при $\alpha = 10,2^\circ$ при воздействии быстрой акустической волны с $f = 120$ (а) и 160 (б) кГц.

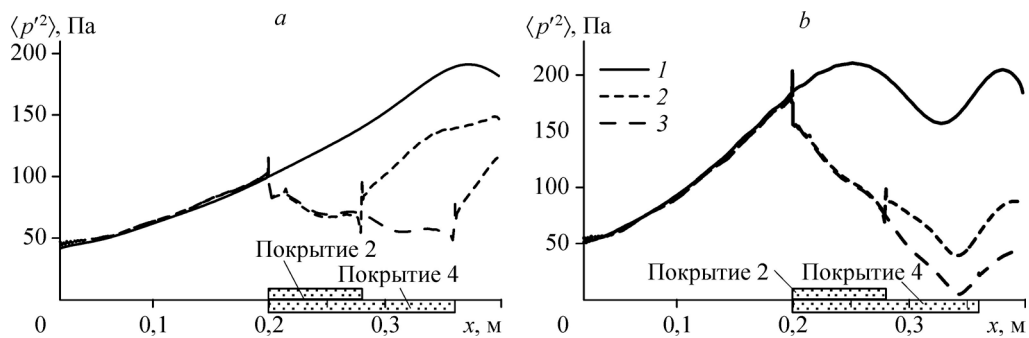


Рис. 6. Распределения среднеквадратичных пульсаций давления вдоль сплошной пластины (1), пластины со звукопоглощающими покрытиями 2 (2) и 4 (3) для смеси 1 при $\alpha = 10,2^\circ$ при воздействии быстрой акустической волны с $f = 120$ (a) и 160 (b) кГц.

представлены на рис. 6. Видно, что в обоих случаях пористое покрытие, установленное вблизи области локального максимума возмущений, существенно снижает пульсации давления. Увеличение длины звукопоглощающего покрытия приводит к большему подавлению пульсаций давления над ним, т.е. увеличивает (до 40 %) эффективность снижения.

В работе [25] было показано, что с ростом угла атаки интенсивность возмущений на сплошной пластине в гиперзвуковом потоке смеси колебательно возбужденных газов увеличивается. Авторам представилось интересным исследовать влияние угла атаки на эффективность метода звукопоглощающих покрытий. Было проведено численное моделирование обтекания пластины с пористым звукопоглощающим покрытием 2 колебательно возбужденной смесью 1 при различных углах атаки $\alpha = 5 \div 20^\circ$ при воздействии внешних быстрых акустических волн. Результаты расчетов по подавлению возмущений пористым покрытием на поверхности пластины приведены на рис. 7. Видно, что при всех углах атаки звукопоглощающее покрытие подавляет пульсации давления как в зоне расположения покрытия, так и вниз по потоку от этой зоны. В случае, когда звукопоглощающее покрытие располагается в области нарастания пульсаций давления на сплошной пластине (рис. 7a–7d) или в области максимума этих пульсаций (рис. 5b), эффект снижения интенсивности возмущений давления проявляется сильнее, чем в случае размещения покрытия в области уменьшения амплитуд на сплошной пластине (рис. 7e, 7f).

Полученные экспериментальные данные использовались для сравнения с результатами численного моделирования развития возмущений на сплошной пластине длиной 114 мм и пластине с пористым покрытием 5 типа вспененного никеля ($k = 0,95$, $d = 2$ мм) в потоке смеси 2 при частотах внешних быстрых акустических волн $f = 40 \div 200$ кГц. Звукопоглощающее покрытие длиной 93 мм и глубиной 9 мм располагалось на расстоянии 16 мм от передней кромки пластины.

На рис. 8 представлено сравнение расчетных и экспериментальных данных по отношению амплитуд пульсаций давления на поверхности пластины со звукопоглощающим покрытием к пульсациям на сплошной пластине в точке $x = 0,064$ м (в месте расположения датчика давления на пластине в эксперименте). Отношение амплитуд пульсаций давления демонстрирует эффективность подавления возмущений звукопоглощающим пористым покрытием. Видно, что при обтекании пластины потоком колебательно возбужденных смесей CO_2 с азотом как в трубных экспериментах, так и численном моделировании для частот $f > 50$ кГц отношение амплитуд пульсаций давления меньше единицы, т.е. возмущения на поверхности пластины подавляются звукопоглощающим пористым покрытием на 20–50 % в зависимости от угла атаки и частоты внешних акустических волн.

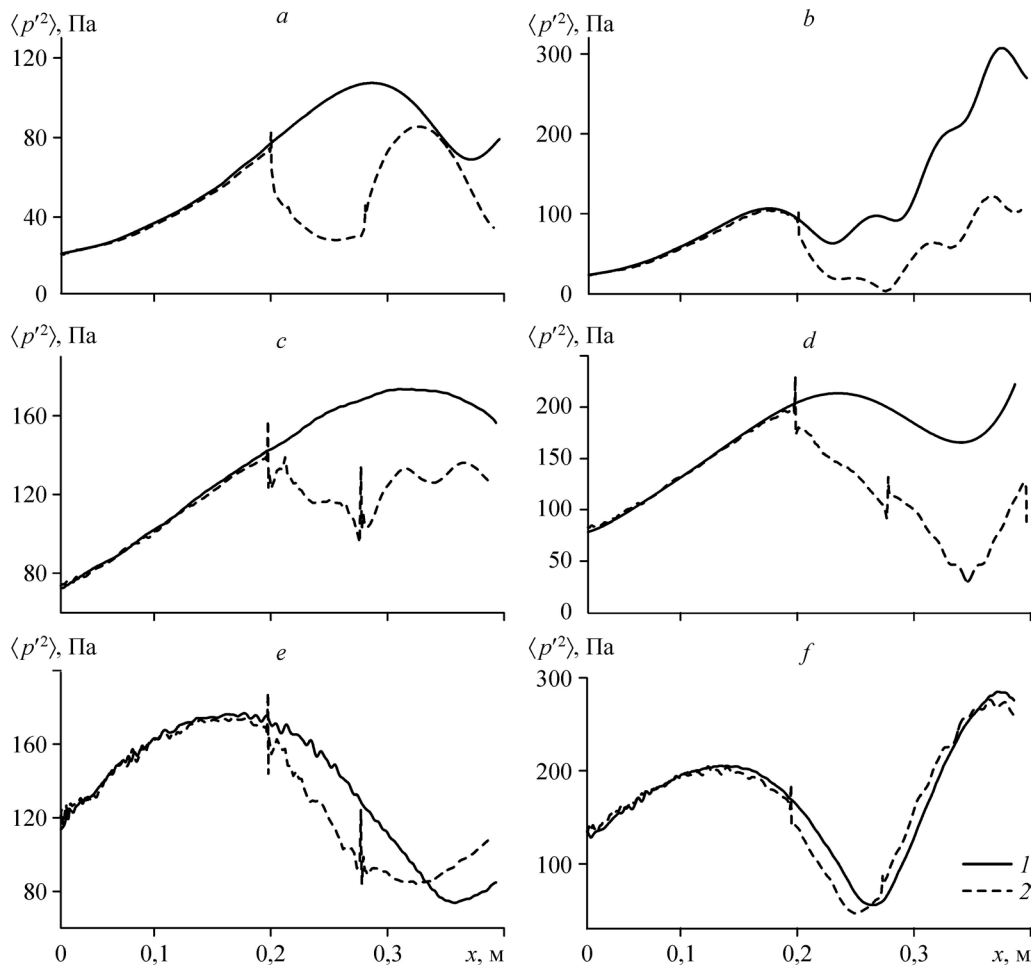


Рис. 7. Распределения среднеквадратичных пульсаций давления вдоль сплошной пластины (1) и пластины со звукопоглощающим покрытием 2 (2), обтекаемыми смесью 1 (а) при воздействии быстрой акустической волны с $f = 120$ (а, с е) и 160 (b, d, f) кГц при разных углах атаки α . $\alpha = 5^\circ$ (а, b), 15° (с, d) и 20° (е, f).

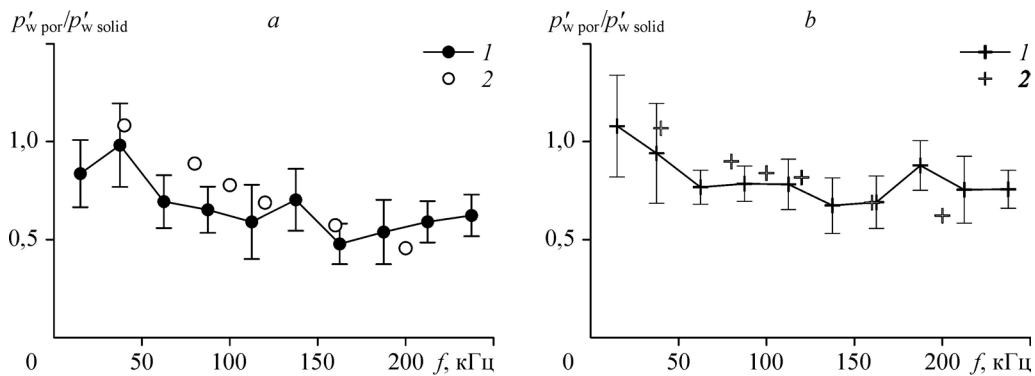


Рис. 8. Эффективность снижения амплитуд пульсаций давления на поверхности пластины со звукопоглощающим покрытием 5 в зависимости от частоты в сечении $x = 0,064$ м (смесь 2). $\alpha = 10^\circ$ (а), 15° (b); 1 — эксперимент, 2 — расчет.

Заключение

Выполнено численное моделирование обтекания сплошной пластины и пластины со звукопоглощающим покрытием под углом атаки в колебательно возбужденном потоке смеси углекислого газа и азота для условий экспериментов в импульсной аэродинамической трубе ИТ-302М ИТПМ СО РАН ($M_\infty \sim 8$, $T_0 > 2000$ К) с учетом двух каналов колебательной релаксации молекул CO_2 (при столкновениях с молекулами CO_2 и молекулами N_2) в рамках двухтемпературной модели релаксационных течений.

Для численного моделирования обтекания пластины со звукопоглощающим покрытием из высокопористого ($k = 0,95$) ячеистого материала реализована скелетная модель пористой среды, представляющая собой набор элементов квадратного сечения, расположенных в шахматном порядке, с расстоянием между элементами, равным диаметру реального звукопоглощающего материала ($d = 2$ мм).

Получены данные по динамике развития возмущений в вязком ударном слое на сплошной пластине и пластине со звукопоглощающим покрытием, обтекаемых гиперзвуковым высокотемпературным колебательно возбужденным потоком смесей углекислого газа и азота при разных углах атаки при воздействии внешних акустических возмущений быстрой моды с частотами в диапазоне от 20 до 160 кГц.

Проведена оценка влияния звукопоглощающего покрытия на интенсивность возмущений в колебательно возбужденных гиперзвуковых потоках смесей углекислого газа и азота. Показано снижение пульсаций давления на поверхности пластины со звукопоглощающим покрытием в сравнении со сплошной пластиной на 20–40 % в зависимости от угла атаки и частоты возмущений набегающего потока. Наиболее эффективными являются покрытия, расположенные в области локального максимума или нарастания возмущений. С увеличением длины пористой зоны подавление возмущений значительно усиливается. Получено соответствие расчетных и экспериментальных данных по снижению интенсивности пульсаций давления на поверхности пластины с помощью звукопоглощающего высокопористого ячеистого материала (вспененного никеля) в колебательно возбужденном течении смеси CO_2 и азота.

Таким образом, метод пористых звукопоглощающих покрытий эффективно работает для подавления пульсаций давления при обтекании тел колебательно возбужденными смесями углекислого газа и азота под разными углами атаки.

Список литературы

1. Осипов А.И., Уваров А.В. Кинетические и газодинамические процессы в неравновесной молекулярной физике // Успехи физических наук. 1992. Т. 162, № 11. С. 1–42.
2. Лунев В.В. Течение реальных газов с большими скоростями. М.: Физматлит, 2007. 760 с.
3. Григорьев Ю.Н., Ершов И.В. Устойчивость течений релаксирующих молекулярных газов. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2012. 230 с.
4. Fujii K., Hornung H.G. Experimental investigation of high-enthalpy effects on attachmentline boundary-layer transition // AIAA J. 2003. Vol. 41, No. 7. P. 1282–1291.
5. Кириловский С.В., Маслов А.А., Поплавская Т.В., Цырюльников И.С. Влияние колебательной релаксации на развитие возмущений в ударном слое на пластине // Журнал технической физики. 2015. Т. 85, вып. 5. С. 12–22.
6. 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.
7. Fedorov A.V., Malmuth N.D., Rasheed A., Hornung H.G. Stabilization of hypersonic boundary layers by porous coatings // AIAA J. 2001. Vol. 39, No. 4. P. 605–610.
8. Fedorov A.V., Shplyuk A.N., Maslov A.A., Burov E.V., Malmuth N.D. Stabilization of hypersonic boundary layer using an ultrasonically absorptive coating // J. Fluid Mech. 2003. Vol. 479. P. 99–124.
9. Гапонов С.А. Влияние сжимаемости газа на устойчивость пограничного слоя над проницаемой поверхностью при дозвуковых скоростях // Прикладная механика и техническая физика. 1975. № 1. С. 121–127.

10. Гапонов С.А., Ермолаев Ю.Г., Косинов А.Д., Лысенко В.И., Семенов Н.В., Смородский Б.В. Влияние пористости поверхности на устойчивость и переход сверхзвукового пограничного слоя на плоской пластине // Теплофизика и аэромеханика. 2010. Т. 17, № 2. С. 281–290.
11. Sandham N.D., Ludeke H. Numerical study of mach 6 boundary-layer stabilization by means of a porous surface // AIAA J. 2009. Vol. 47, No. 9. P. 2243–2252.
12. Маслов А.А., Миронов С.Г., Поплавская Т.В., Цырюльников И.С., Кириловский С.В. Воздействие звукопоглощающих материалов на интенсивность возмущений в ударном слое пластины, расположенной под углом атаки // Прикладная механика и техническая физика. 2012. Т. 53, № 2. С. 21–32.
13. Цырюльников И.С., Маслов А.А., Миронов С.Г., Поплавская Т.В., Кириловский С.В. Об эффективности метода звукопоглощающих покрытий в колебательно-возбужденном гиперзвуковом потоке // Письма в ЖТФ. 2015. Т. 41, вып. 4. С. 61–67.
14. Пористые проницаемые материалы. Справочное издание / Под ред. С.В. Белова. М.: Металлургия, 1987. 335 с.
15. Allard J.F., Champoux Y. New empirical equations for sound propagation in rigid frame fibrous materials // J. Acoustical Society America. 1992. Vol. 91, No. 6. P. 3346–3353.
16. Цырюльников И.С., Миронов С.Г. Определение характеристик поглощения ультразвука тонкими пористыми покрытиями // Теплофизика и аэромеханика. 2004. Т. 11, № 4. С. 523–532.
17. Миронов С.Г., Поплавская Т.В., Кириловский С.В. Исследование течения воздуха в высокопористых ячеистых материалах при наличии нагрева // Сибирский физический журнал. 2017. Т. 12, № 2. С. 66–74.
18. Бойко А.В., Кириловский С.В., Маслов А.А., Поплавская Т.В. Инженерное моделирование ламинарно-турбулентного перехода: достижения и проблемы (обзор) // Прикладная механика и техническая физика. 2015. Т. 56, № 5. С. 30–49.
19. Петров Н.В., Кириловский С.В., Поплавская Т.В., Шоев Г.В. Численное исследование неравновесных течений с помощью различных моделей колебательной релаксации // Письма в ЖТФ. 2016. Т. 42, вып. 13. С. 72–79.
20. Ландау Л.Д., Теллер Е. К теории дисперсии звука // Ландау Л.Д. Собрание трудов. М.: Наука, 1969. Т. 1. С. 181–188.
21. Шоев Г.В., Бондарь Е.А., Облапенко Г.П., Кустова Е.В. Разработка и апробация методики численного моделирования термически неравновесных диссоциирующих течений в ANSYS Fluent // Теплофизика и аэромеханика. 2015. Т. 22, № 2. С. 159–171.
22. Кунова О.В., Шоев Г.В., Кудрявцев А.Н. Численное моделирование неравновесных течений на основе поуровневого описания в коммерческих пакетах программ // Теплофизика и аэромеханика. 2017. Т. 24, № 1. С. 7–18.
23. Samas M. CO₂ relaxation processes in shock waves // Fundamental Phenomena in Hypersonic Flow / Ed. J.G. Hall. Ithaca, N.Y.: Cornell University Press, 1966. P. 195–215.
24. Лосев С.А. Газодинамические лазеры. М.: Наука, 1977. 336 с.
25. Решетова А.И., Поплавская Т.В. Численное исследование развития возмущений на пластине в гиперзвуковом потоке смеси колебательно возбужденных газов // Сибирский физический журнал. 2017. Т. 12, № 2. С. 11–19.

*Статья поступила в редакцию 10 мая 2018 г.,
после доработки — 21 сентября 2018 г.,
принята к публикации 11 декабря 2018 г.*