

**А. И. Решетова, Т. В. Поплавская**

*Институт теоретической и прикладной механики  
им. С. А. Христиановича СО РАН  
ул. Институтская, 4/1, Новосибирск, 630090, Россия*

*Новосибирский государственный университет  
ул. Пирогова, 2, Новосибирск, 630090, Россия*

*annareshetova29@gmail.com, popla@itam.nsc.ru*

### **ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РАЗВИТИЯ ВОЗМУЩЕНИЙ НА ПЛАСТИНЕ В ГИПЕРЗВУКОВОМ ПОТОКЕ СМЕСИ КОЛЕБАТЕЛЬНО-ВОЗБУЖДЕННЫХ ГАЗОВ\***

Рассмотрена задача развития возмущений в гиперзвуковом вязком ударном слое на плоской пластине в потоке смеси колебательно-возбужденного углекислого газа и азота на базе решения двумерных нестационарных уравнений Навье – Стокса. При моделировании термической неравновесности с помощью двухтемпературной модели релаксационных течений учитывалось два канала колебательной релаксации молекул  $\text{CO}_2$  при столкновениях их с молекулами  $\text{CO}_2$  и при столкновениях с молекулами  $\text{N}_2$ . В работе представлены данные по динамике развития возмущений на поверхности пластины в широком диапазоне определяющих параметров (угол атаки  $5\div 20^\circ$ , содержание  $\text{CO}_2$  в смеси, температура торможения  $T_0 = 2\ 000\div 4\ 000$  К).

*Ключевые слова:* гиперзвуковые течения, колебательная релаксация, численное моделирование.

#### **Введение**

Знание динамики развития возмущений в ударных и пограничных слоях необходимо для создания эффективных методов прогнозирования и управления ламинарно-турбулентным переходом при гиперзвуковом обтекании тел. Свойства реального газа (возбуждение и неравновесность колебательных степеней свободы молекул, диссоциация, ионизация), проявляющиеся при высоких скоростях и температурах, оказывают существенное воздействие как на среднее течение вокруг летательного аппарата [1–3], так и на характеристики устойчивости [4; 5].

В работе [6] впервые экспериментально было показано влияние колебательной ре-

лаксации углекислого газа на увеличение длины ламинарного участка в гиперзвуковом пограничном слое. Углекислый газ ( $\text{CO}_2$ ), с одной стороны, представляется идеальным объектом для моделирования физических и химических процессов в высокоэнталийных гиперзвуковых потоках, поскольку это газ со сравнительно низкой температурой возбуждения колебательных степеней свободы молекул ( $\sim 100$  К). С другой стороны,  $\text{CO}_2$  имеет реальное практическое значение при исследовании аэротермодинамики вхождения космических аппаратов в атмосферу Марса, где он составляет значительную часть (97 %).

Представляет интерес также исследование влияния угла атаки на развитие возму-

---

\* Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 16-08-00674).

Таблица 1  
 Параметры течения

Показатель	Смесь		
	1 0,44 CO <sub>2</sub> 0,56 N <sub>2</sub>	2 0,22 CO <sub>2</sub> 0,78 N <sub>2</sub>	3 0,88 CO <sub>2</sub> 0,12 N <sub>2</sub>
$P_\infty$ [Па]	374,5	374,5	374,5
$T_0$ [К]	2430	2430	2430
$M_\infty$	8,44	8,44	8,44
$Re_1$ [м <sup>-1</sup> ]	$1,36 \times 10^6$	$1,36 \times 10^6$	$1,36 \times 10^6$
$T_\infty$ [К]	215	215	215
$U_\infty$ [м/с]	2255,414	2378,035	2058,057

щений, поскольку элементы конструкции гиперзвуковых летательных аппаратов содержат участки под ненулевыми углами наклона поверхности к направлению набегающего потока. В [7] задача влияния угла атаки на развитие возмущений на плоской пластине в потоке азота при числе Маха  $M_\infty = 21$  была решена без учета колебательной релаксации молекул газа. Исследования [7] показали, что при малых углах атаки в ударном слое доминируют энтропийно-вихревые возмущения, а при углах атаки больше  $20^\circ$  – акустические, и дали знания для применения разных методов управления ламинарно-турбулентным переходом [8]. В [9] расчетно-экспериментальным методом показано существенное воздействие колебательной неравновесности углекислого газа на среднее течение и развитие возмущений в гиперзвуковом вязком ударном слое на пластине, обтекаемой потоками воздуха, углекислого газа и их смесей при высоких температурах торможения (2 000–3 000 К). В [8; 9] учитывалось время колебательной релаксации молекул CO<sub>2</sub> только при столкновениях их с молекулами CO<sub>2</sub>, и не учитывались другие каналы колебательной релаксации.

В данной работе исследуется динамика развития возмущений в вязком ударном слое на плоской пластине, обтекаемой гиперзвуковым колебательно-возбужденным потоком смеси углекислого газа и азота, в широком диапазоне определяющих параметров: температура торможения ( $T_0 = 2\,000 \div 4\,000$  К), угол атаки ( $\alpha = 5 \div 20^\circ$ ),

концентрация CO<sub>2</sub> в смеси газов (молярные доли).

### Постановка задачи и алгоритм решения

Рассматривается задача обтекания бесконечно тонкой пластины потоком смеси колебательно-возбужденного углекислого газа и азота при условиях экспериментов для смесей CO<sub>2</sub> с воздухом, проводимых в импульсной аэродинамической трубе ИТ-302М ИТПМ СО РАН [9]. Параметры потока приведены в табл. 1.

Расчетная область представляет собой прямоугольник, часть нижней стороны которого совпадает с поверхностью пластины, где задаются условие прилипания и постоянная температура поверхности пластины, равная 300 К. На левой и верхней границах задаются условия набегающего потока (давление –  $P_\infty$ , число Маха –  $M_\infty$ , температура –  $T_\infty$ , колебательная энергия молекул углекислого газа –  $e_{vib}$ ). На правой и на нижней границе, не занятой поверхностью пластины, установлено условие истечения. Высота расчетной области выбиралась из условия, чтобы головная ударная волна не взаимодействовала с верхней границей расчетной области. Расчетная сетка состояла из прямоугольных ячеек размером  $0,18 \times 0,1$  мм в количестве 322 000 для пластины длиной 0,2 м. Расчетная область и регулярная расчетная сетка построены в программе WORKBENCH.

Численное моделирование проводилось с помощью пакета ANSYS Fluent с использованием решателя, основанного на плотности, явной схемы второго порядка точности по пространству с Roe-FDS методом расщепления конвективных потоков и явного метода Рунге – Кутты по времени. В работе рассматривается система двумерных нестационарных уравнений Навье – Стокса, которая дополняется уравнением состояния Менделеева – Клайперона и уравнением сохранения колебательной энергии для каждой колебательной степени свободы молекул CO<sub>2</sub> (см ниже). Вязкость рассчитывается по формуле Сазерленда, теплопроводность – по формуле из кинетической теории газов, теплоемкость определяется как функция температуры в рамках модели термически совершенного газа.

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

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

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

$$p = \rho R T_{tr} \sum_{i=1,2} Y_i,$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} (\rho e_v^n) + \nabla \cdot (\vec{u} \rho e_v^n) = \\ = q_{nv}^{n(\text{CO}_2-\text{CO}_2)} + q_{nv}^{n(\text{CO}_2-\text{N}_2)}, \\ n = 1, 2, 3, 4. \end{aligned} \quad (4)$$

Здесь  $\rho$ ,  $p$ ,  $\lambda$  – плотность, давление, теплопроводность;  $\vec{u}$  – вектор скорости;  $T_{tr}$  – температура поступательно-вращательных степеней свободы;  $n$  – номер моды колебательной степени свободы;  $\tau_{\mu}$  – тензор вязких напряжений;  $e_t$  – энергия газа;  $R$  – универсальная газовая постоянная;  $Y_i$  – мольная доля  $i$ -й компоненты смеси.

Молекула  $\text{CO}_2$  является линейной симметричной молекулой и имеет 4 колебательные степени свободы (рис. 1). Колебание с частотой  $\nu_1$  происходит вдоль оси, соединяющей атомы, и является симметричным (симметричная валентная мода). В случае симметричного валентного колебания  $\nu_1$  положение атома С остается постоянным. Двукратно вырожденное колебание с частотой  $\nu_2$  соответствует движению атома С в плоскости, перпендикулярной оси симметрии (деформационная мода). Колебание с частотой  $\nu_3$  происходит вдоль оси симметрии и является асимметричным (асимметричная валентная мода). Четырем колебательным модам соответствуют различные характерные температуры возбуждения  $\theta_{\nu_1} = 1920 \text{ K}$ ,  $\theta_{\nu_2} = 960 \text{ K}$ ,  $\theta_{\nu_3} = 3380 \text{ K}$ . Двухатомная молекула  $\text{N}_2$  имеет одну колебательную степень свободы. Ее характерная температура практически совпадает с характерной температурой верхнего уровня молекул  $\text{CO}_2$  и равна  $3340 \text{ K}$ .

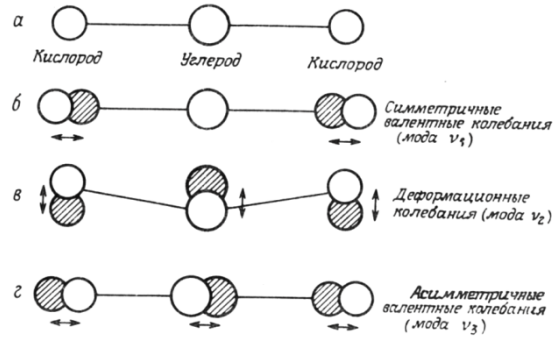


Рис. 1. Колебательное движение в молекуле  $\text{CO}_2$ :  
 а – невозбужденная молекула;  
 б–г – 3 колебательные моды (из работы [10])

Известно, что для течений в сверхзвуковых соплах, за фронтами сильных ударных волн, в термически неравновесных пограничных слоях, где температура достигает  $1000 \text{ K}$ , характерные значения времени отдельных релаксационных процессов в молекулярном газе образуют следующую иерархию [2]:

$$\tau_{ii} \leq \tau_{ri} \ll \tau_{vv} \ll \tau_{vi} \leq \tau_f.$$

Здесь  $\tau_f$  – характерное время течения,  $\tau_{ii}$ ,  $\tau_{ri}$ ,  $\tau_{vi}$  – характерное время установления равновесия по поступательным, вращательным и колебательным степеням свободы молекул,  $\tau_{vv}$  – характерное время обмена между молекулами колебательными квантами ( $vv$ -обмены). Для такого класса течений на временных масштабах  $\tau_{vi} \leq \tau_f$  различие между характерными значениями времени более быстрых процессов можно считать пренебрежимо малым. Это позволяет рассматривать колебательную релаксацию изолированно на фоне уже закончившихся быстрых процессов установления по поступательным и вращательным степеням свободы и без учета обмена квантами колебательной энергии  $\tau_{vv}$ , используя моделирование колебательной релаксации в терминах макроскопических переменных с помощью двухтемпературной модели релаксационных течений [2], например, средней колебательной энергии  $\text{CO}_2$ . В рамках этой модели изменение колебательной энергии от времени моделируется уравнением Ландау – Теллера, в котором учитывается конечное время колебательной релаксации молекул газа:

$$\frac{de_{vib}}{dt} = \frac{1}{\tau_{vr}} (e_v^{eq} - e_v),$$

где  $e_{vib}$  – колебательная энергия газа,  $\tau_{vr}$  – время колебательной релаксации,  $e_v^{eq}$  – равновесная колебательная энергия газа,  $e_v$  – неравновесная колебательная энергия газа.

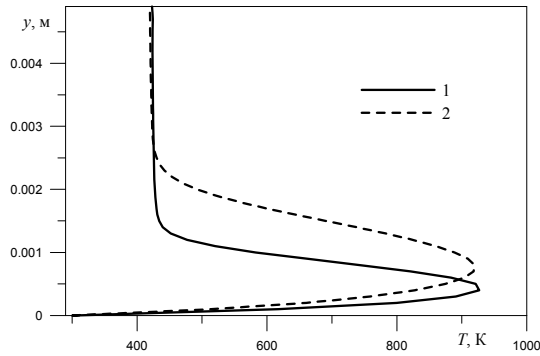


Рис. 2. Профиль температуры в ударном слое на пластине (смесь 1): 1 – в сечении  $x = 0,05$  м; 2 – в сечении  $x = 0,16$  м

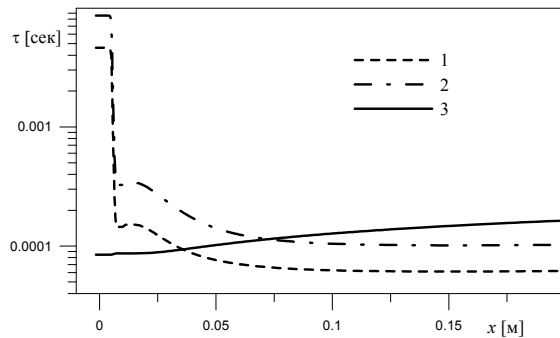


Рис. 3. Время колебательной релаксации молекул  $\text{CO}_2$  (смесь 1): 1 – при столкновениях с молекулами  $\text{CO}_2$ ; 2 – с молекулами  $\text{N}_2$ ; 3 – характерное время обтекания пластины

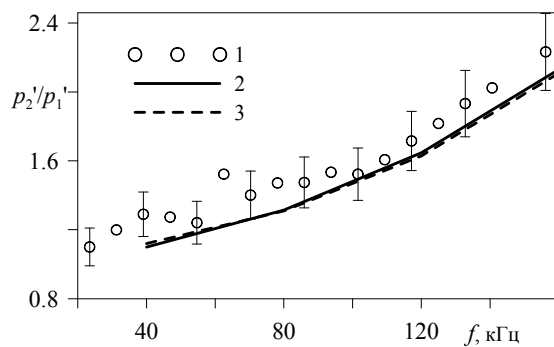


Рис. 4. Степень роста пульсаций давления на поверхности пластины (смесь 1) при воздействии быстрых акустических волн: 1 – экспериментальные данные; 2 – расчетные данные для смеси  $\text{CO}_2$  и воздуха; 3 – расчетные данные для смеси  $\text{CO}_2$  и  $\text{N}_2$  с учетом 2-х каналов релаксации

Поскольку 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  $\text{CO}_2$ , так и с молекулами  $\text{N}_2$ . Зависимость времени колебательной релаксации молекул  $\text{CO}_2$  при взаимодействии с молекулами  $\text{CO}_2$  от температуры и давления взята из работы [11], где время релаксации  $\tau_{vr}$  всех колебательных мод  $\text{CO}_2$  одинаково (при условии, что  $\tau_{vr} \gg \tau_{vv}$ ). Данные по времени колебательной релаксации  $\text{CO}_2$  при взаимодействии с молекулами  $\text{N}_2$  взяты из работы [12].

В настоящей работе для учета влияния колебательной релаксации молекул  $\text{CO}_2$  к уравнениям Навье – Стокса (1)–(3) проводилось добавление 4-х уравнений сохранения колебательной энергии (4) для каждой колебательной степени свободы молекул  $\text{CO}_2$ . Учет энергообмена между колебательными и поступательно-вращательными степенями свободы молекул  $\text{CO}_2$  с конечным временем релаксации производился добавлением в (4) источников членов  $q_{iv}$ , рассчитываемых по уравнению Ландау – Теллера в созданном программном модуле UDF1, встраиваемом в пакет. Причем учитывалось два канала колебательной релаксации молекул  $\text{CO}_2$  при столкновениях их с молекулами  $\text{CO}_2$  и при столкновениях с молекулами  $\text{N}_2$ :

$$q_{iv}^{n(\text{CO}_2-\text{CO}_2)} = \frac{\rho}{(\text{CO}_2-\text{CO}_2)} (e_v^{eq^n} - e_v^n), \quad (5)$$

$$q_{iv}^{n(\text{CO}_2-\text{N}_2)} = \frac{\rho}{(\text{CO}_2-\text{N}_2)} (e_v^{eq^n} - e_v^n). \quad (6)$$

Здесь  $q_{iv}^n$  – поток энергии между поступательными и колебательными степенями свободы молекул. Чтобы не нарушить энергетический баланс системы уравнений Навье – Стокса, в уравнение поступательно-вращательной энергии (3) добавлялись источниковые члены (5), (6) с противоположным знаком.

Задача о развитии возмущений решалась в два этапа. Первый этап – это численное моделирование гиперзвукового обтекания пластины без возмущений (стационарная

задача). На этом этапе для задания граничных условий набегающего потока использовались данные, полученные при расчетах течения в сопловом тракте аэродинамической трубы ИТ-302М [9]. На втором этапе в расчетную область с помощью модуля UDF2, встраиваемого в расчетный код, вводились акустические возмущения набегающего потока, и решалась нестационарная задача до момента выхода решения на установившийся периодический режим.

При решении этой задачи на левой и верхней границах расчетной области задавалось условие (суперпозиция стационарного течения  $\langle U \rangle$  и плоских монохроматических акустических возмущений  $U'$ ):

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

где  $A$  – амплитуда возмущений ( $A = 0,03 \cdot P_\infty$ );  $k_x = k \cos \theta$ ,  $k_y = k \sin \theta$  – компоненты волнового вектора  $k$ ;  $\omega = 2\pi f$  – круговая частота вводимого возмущения;  $\theta$  – угол распространения возмущений (в данной задаче вдоль потока).

Расчеты случая равновесного течения смеси 1 (см. табл. 1) на пластине под углом атаки  $10,2^\circ$  показали, что температура в ударном слое не превышает 1 000 К (рис. 2). Таким образом, основная доля колебательной энергии приходится на две деформационные моды молекул углекислого газа с характерной температурой  $\theta = 960$  К. В этом случае возможно использование упрощенной двухтемпературной модели релаксационных течений с единой колебательной температурой и временем колебательной релаксации для всех четырех колебательных степеней свободы.

По локальным значениям температуры и давления, полученным при расчете равновесного течения смеси  $\text{CO}_2$  и  $\text{N}_2$  на пластине, было вычислено время колебательной релаксации  $\text{CO}_2$  при столкновениях с молекулами  $\text{CO}_2$  в соответствии с [11], а также время колебательной релаксации  $\text{CO}_2$  при столкновениях с молекулами  $\text{N}_2$  [12]. На рис. 3 видно, что время колебательной релаксации  $\text{CO}_2$  сравнимо с характерным временем течения на пластине, определенным как отношение длины пластины к локальной скорости газа  $U$ . Это означает, что в задаче обтекания пластины при условиях экспери-

ментов действительно следует учитывать колебательную неравновесность молекул  $\text{CO}_2$  при взаимодействии молекул  $\text{CO}_2$  друг с другом (первый канал колебательной релаксации) и при взаимодействии молекул  $\text{CO}_2$  с молекулами  $\text{N}_2$  (второй канал).

### Сравнение с экспериментальными данными

В экспериментах в ИТ-302М СО РАН с помощью двух датчиков РСВ А132, расположенных на модели на расстоянии 80 мм (датчик 1) и 180 мм (датчик 2) от носика, были измерены пульсации давления на поверхности пластины длиной 0,2 м, обтекаемой смесью углекислого газа и воздуха [9]. По этим данным были вычислены степени роста пульсаций давления (отношение спектральных амплитуд датчика 2 к спектральным амплитудам датчика 1). В численном моделировании также получено распределение амплитуд среднеквадратичных возмущений давления при воздействии на ударный слой акустических волн быстрой моды разной частоты.

На рис. 4 представлены экспериментальные и расчетные данные по интенсивности развивающихся возмущений в ударном слое. Видно, что расчетные распределения амплитуд среднеквадратичных пульсаций давления практически совпадают для случаев учета одного и двух каналов колебательной релаксации. Это свидетельствует о том, что для условий эксперимента учет второго канала колебательной релаксации молекул  $\text{CO}_2$  слабо влияет на интенсивность и динамику развития возмущений.

### Влияние температуры торможения на развитие возмущений

Возбуждение колебательных степеней свободы молекул зависит от температуры газа. Поэтому в работе проведено исследование влияния температуры торможения ( $T_0 = 2\,000 \div 4\,000$  К) на среднее течение и характеристики пульсаций потока в гиперзвуковом ударном слое на пластине длиной 0,2 м (табл. 2), обтекаемой смесью  $\text{CO}_2$  (0,44) и  $\text{N}_2$  (0,56). При таких условиях обтекания температурный фактор  $T_w/T_0$  постоянен и равен 0,1 ( $T_w$  – температура поверхности пластины).

Таблица 2  
Условия вычислительных экспериментов

Показатель	Эксперимент		
	1	2	3
$T_0$ [К]	2 000	2 954	4 000
$T_w$ [К]	200	300	400
$T_\infty$ [К]	141,1	295,8	295
$P_\infty$ [Па]	202,9	374,5	580
$U_\infty$ [м/с]	1 873	2 255	2 712

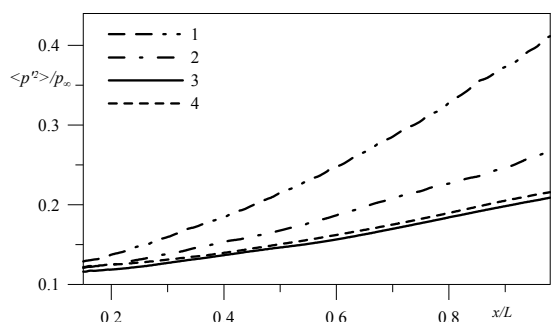


Рис. 5. Среднеквадратичные пульсации давления на поверхности пластины (смесь 1) при воздействии быстрой акустической волны с частотой  $f = 120$  кГц для разных значений температуры торможения: 1–3 – соответственно  $T_0 = 2\,000$ ,  $2\,954$  и  $4\,000$  К с учетом 2-х каналов релаксации; 4 –  $T_0 = 4\,000$  К с учетом 1-го канала релаксации

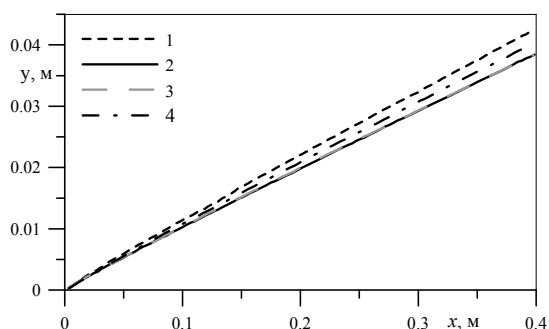


Рис. 6. Положение ударной волны при разных углах атаки (смесь 1): 1 –  $\alpha = 5^\circ$ ; 2 –  $\alpha = 10,2^\circ$ ; 3 –  $\alpha = 15^\circ$ ; 4 –  $\alpha = 20^\circ$

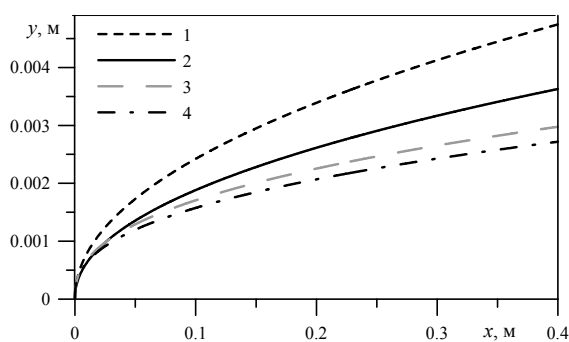


Рис. 7. Толщина пограничного слоя вдоль пластины при разных углах атаки (смесь 1): 1 –  $\alpha = 5^\circ$ ; 2 –  $\alpha = 10,2^\circ$ ; 3 –  $\alpha = 15^\circ$ ; 4 –  $\alpha = 20^\circ$

На рис. 5 приведены распределения вдоль поверхности пластины расчетных пульсаций давления, нормированных на давление в набегающем потоке. Видно, что с ростом температуры торможения амплитуда пульсаций давления на поверхности пластины существенно снижается. При этом учет второго канала колебательной релаксации тоже приводит к незначительному снижению интенсивности.

Следует заметить, что при постоянстве температурного фактора увеличение температуры торможения  $T_0$  не приводит к охлаждению поверхности, поскольку температура поверхности  $T_w$  тоже увеличивается. В этом случае изменение интенсивности пульсаций связано только с влиянием возбуждения и неравновесности колебательных степеней свободы молекул  $\text{CO}_2$ .

На рис. 5 приведены значения пульсаций давления только в области нарастания возмущений. Для того чтобы получить полную картину развития возмущений (т. е. и в зоне максимальных значений), длина пластины была увеличена в 2 раза, и дальнейшие расчеты проводились на удлинённой пластине. Расчетная область была увеличена в два раза по длине и высоте. Расчетная сетка состояла из прямоугольных ячеек размером  $0,18 \times 0,1$  мм в количестве 1 272 000.

### Влияние угла атаки на развитие возмущений

Ненулевые углы атаки некоторых участков гиперзвуковых летательных аппаратов приводят к изменению угла наклона головной ударной волны и угла падения возмущений на ударную волну, следовательно, изменяется распределение параметров основного течения и возмущений в ударном слое модели.

В работе проведены расчеты обтекания пластины длиной  $L_1 = 0,4$  м потоком смеси  $\text{CO}_2$  и  $\text{N}_2$  (смесь 1 из табл. 1) при различных углах атаки  $\alpha = 5^\circ$ – $20^\circ$  и разных частотах внешних акустических возмущений  $f = 40$ – $160$  кГц.

Сравнение расчетных данных по влиянию угла атаки на характеристики среднего течения приведены на рис. 6 и 7. Видно, что с ростом угла атаки от  $5^\circ$  до  $15^\circ$  ударная волна прижимается к пластине, а затем вновь начинает отодвигаться от нее. Толщина пограничного слоя с ростом угла атаки от  $5^\circ$

$15^\circ$  уменьшается, а затем, при дальнейшем увеличении угла атаки, практически не изменяется.

Вероятно, такая картина связана с тем, что за положение ударной волны относительно пластины отвечают как механизм невязкого взаимодействия потока с поверхностью, описываемый ударной полярой, так и механизм вязкого взаимодействия потока с пластиной, приводящий к формированию пограничного слоя. Конкуренция этих двух механизмов приводит к наблюдаемому поведению ударной волны.

На рис. 8 представлены среднеквадратичные пульсации давления на поверхности пластины для углов атаки  $\alpha = 5^\circ \div 20^\circ$  при  $f = 120$  кГц. Видно, что в зависимости от угла атаки максимум интенсивности пульсаций давления сначала нарастает до  $\alpha = 15^\circ$ , а затем незначительно снижается при  $\alpha = 20^\circ$ .

Следует заметить, что при этом максимум интенсивности пульсаций давления сдвигается к передней кромке пластины (рис. 9), что говорит об увеличении скорости нарастания возмущений, а это, в свою очередь, может привести к более раннему ламинарно-турбулентному переходу вниз по потоку.

### Влияние концентрации $\text{CO}_2$ в смеси газов на развитие возмущений

В работе также исследовано влияние концентрации  $\text{CO}_2$  на развитие возмущений в ударном слое на пластине в потоке смеси колебательно-возбужденных газов.

На рис. 10 приведены распределения среднеквадратичных пульсаций давления на поверхности пластины для различных концентраций  $\text{CO}_2$  в смеси с азотом при частоте внешнего акустического возмущения 120 кГц. Видно, что с увеличением концентрации  $\text{CO}_2$  интенсивность пульсаций давления на поверхности пластины снижается. При обтекании пластины потоком с более высоким содержанием углекислого газа в смеси возбуждение и неравновесность колебательных степеней свободы молекул  $\text{CO}_2$  усиливается, а это приводит к снижению интенсивности пульсаций давления на поверхности пластины. При этом максимум интенсивности пульсаций давления сдвигается к передней кромке пластины.

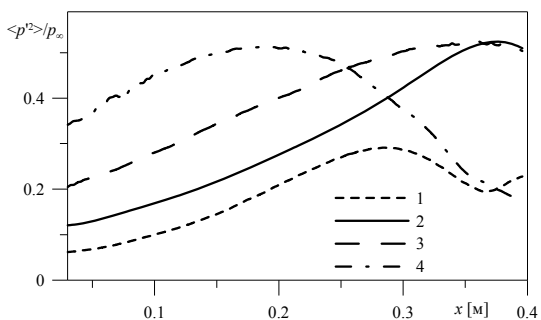


Рис. 8. Распределение среднеквадратичных пульсаций давления на поверхности пластины (смесь 1) при воздействии внешней акустической волны с частотой  $f = 120$  кГц: 1 –  $\alpha = 5^\circ$ ; 2 –  $\alpha = 10,2^\circ$ ; 3 –  $\alpha = 15^\circ$ ; 4 –  $\alpha = 20^\circ$

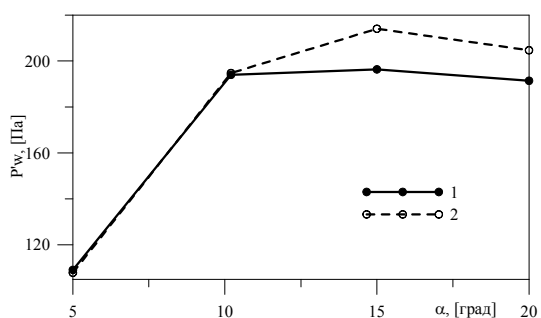


Рис. 9. Зависимость максимумов среднеквадратичных пульсаций давления на поверхности пластины  $L_1 = 0,4$  м (смесь 1) от угла атаки при воздействии внешних акустических волн: 1 –  $f = 120$  кГц; 2 –  $f = 160$  кГц

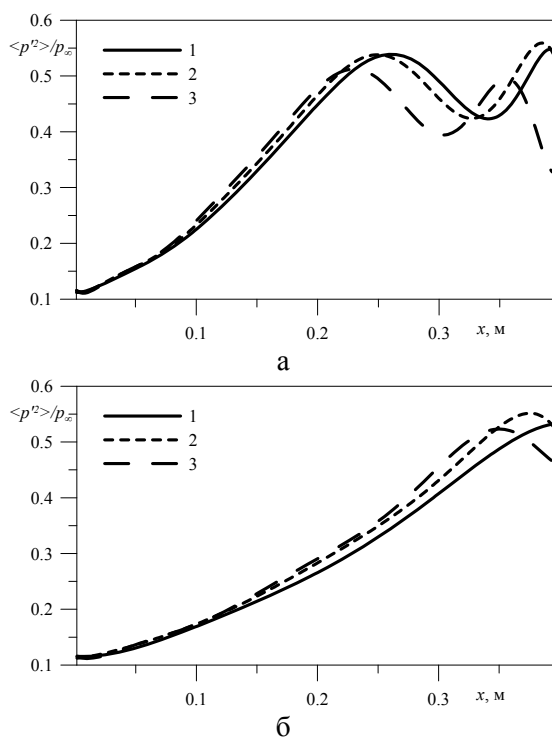


Рис. 10. Распределение среднеквадратичных пульсаций давления на поверхности пластины для различных концентраций  $\text{CO}_2$  в смеси: а –  $f = 120$  кГц; б –  $f = 160$  кГц (1 – 0,22  $\text{CO}_2$ ; 2 – 0,44  $\text{CO}_2$ ; 3 – 0,88  $\text{CO}_2$ )

## Заключение

В работе выполнено численное моделирование обтекания пластины под углом атаки в потоке смеси  $N_2$  и  $CO_2$  для условий экспериментов в аэродинамической трубе ИТ-302М ИТПМ СО РАН с учетом колебательной релаксации молекул  $CO_2$  при столкновениях с молекулами  $CO_2$  и молекулами  $N_2$  в рамках двухтемпературной модели релаксационных течений. Показано, что расчетные и экспериментальные данные по росту пульсаций давления на поверхности пластины при воздействии быстрых акустических волн внешнего потока согласуются.

Для гиперзвуковых ударных слоев получены данные по динамике развития возмущений на пластине, обтекаемой гиперзвуковым потоком колебательно-возбужденной смеси азота и углекислого газа при разных температурах торможения ( $T_0 = 2000 \div 4000$  К), углах атаки ( $\alpha = 5 \div 20^\circ$ ) и разных концентрациях углекислого газа в смеси.

Показано, что с ростом угла атаки интенсивность пульсаций давления в вязком гиперзвуковом ударном слое на пластине увеличивается, а с увеличением концентрации  $CO_2$  максимум интенсивности пульсаций давления на поверхности пластины снижается.

## Список литературы

1. *Malik M. R., Anderson J. D.* Real gas effect on hypersonic boundary layer stability // *Physics of Fluid A*. 1991. Vol. 3. No. 5. P. 803–821.
2. *Осипов А. И., Уваров А. В.* Кинетические и газодинамические процессы в неравновесной молекулярной физике // *УФН*. 1992. Т. 162, № 11. С. 1–42.
3. *Гордиец Б. Ф., Осипов А. И., Шелепин Л. А.* Кинетические процессы в газах и молекулярные лазеры. М.: Наука, 1980. 512 с.
4. *Григорьев Ю. Н., Еришов И. В.* Устойчивость течений релаксирующих молекулярных газов. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2012. 230 с.
5. *Гапонов С. А., Петров Г. В.* Устойчивость пограничного слоя неравновесно дис-

социирующего газа. Новосибирск: Наука, 2013. 95 с.

6. *Fujii K., Hornung H. G.* Experimental investigation of high-enthalpy effects on attachment-line boundary-layer transition // *AIAA J*. 2003. Vol. 41. No. 7. P. 1282–1291.

7. *Маслов А. А., Миронов С. Г., Поплавская Т. В., Цырюльников И. С.* Волновые процессы в ударном слое на пластине под углом атаки // *ПМТФ*. 2010. Т. 51, № 4. С. 39–47.

8. *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.

9. *Кириловский С. В., Маслов А. А., Поплавская Т. В., Цырюльников И. С.* Влияние колебательной релаксации на развитие возмущений в ударном слое на пластине // *ЖТФ*. 2015. Т. 85, № 5. С. 12–22.

10. *Витteman В.*  $CO_2$ -лазер. М.: Мир, 1990. 95 с.

11. *Samas M.*  $CO_2$  relaxation processes in shock waves. Cornell University Press // *Fundamental Phenomena in Hypersonic Flow*. 1966. P. 195–218.

12. *Лосев С. А.* Газодинамические лазеры. М.: Наука, 197.



**A. I. Reshetova, T. V. Poplavskaya**

*Institute of Theoretical and Applied Mechanics SB RAS  
4/1 Institutskaya Str., Novosibirsk, 630090, Russian Federation*

*Novosibirsk State University  
2 Pirogov Str., Novosibirsk, 630090, Russian Federation*

*annareshetova29@gmail.com, popla@itam.nsc.ru*

**NUMERICAL INVESTIGATION OF THE EVOLUTION OF DISTURBANCES  
ON A FLAT PLATE IN A HYPERSONIC FLOW OF A MIXTURE  
OF VIBRATIONALLY EXCITED GASES**

The problem of the evolution of disturbances in a hypersonic viscous shock layer on a plate in the flow of a mixture of vibrationally excited carbon dioxide and nitrogen is considered by solving of the Navier – Stokes equations. Two channels of vibrational relaxation of CO<sub>2</sub> molecules in collisions with CO<sub>2</sub> and in collisions with N<sub>2</sub> were taken into account by using a two-temperature model of relaxation flows in modeling the thermal nonequilibrium. The data on the dynamics of the evolution of disturbances on a flat plate in a wide range of determining parameters (attack angle  $\alpha = 5\div 20^\circ$ , concentration of CO<sub>2</sub> in mixture, braking temperature  $T_0 = 2000\div 4000$  K) are presented in this paper.

*Keywords:* hypersonic flows, vibrational relaxation, numerical simulation.