

РАЗВИТИЕ ВОЗМУЩЕНИЙ В УДАРНОМ СЛОЕ НА СПЛОШНОЙ ПЛАСТИНЕ И ПЛАСТИНЕ СО ЗВУКОПОГЛОЩАЮЩИМ ПОКРЫТИЕМ В ПОТОКЕ СМЕСИ КОЛЕБАТЕЛЬНО ВОЗБУЖДЕННЫХ ГАЗОВ

- к.ф.-м.н. Кириловский Станислав Викторович, н.с. Лаборатория Неравновесных Течений НГУ
- д.ф.-м.н. Поплавская Татьяна Владимировна, ведущий научный сотрудник ИТПМ
- к.ф.-м.н. Цырюльников Иван Сергеевич, старший научный сотрудник ИТПМ
- Решетова Анна Игоревна, младший лаборант исследователь ИТПМ, магистрант ФФ НГУ

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант №16-08-00674). Название проекта: «Исследование взаимодействия длинноволновых возмущений с ударной волной на клине и модовая декомпозиция возмущений сверхзвукового потока». Руководитель: Цырюльников Иван Сергеевич. Проект рассчитан на 2016-2018год

Возможность управлять интенсивностью возмущений в пограничных слоях и переходом к турбулентности является одним из важных аспектов разработки перспективных гиперзвуковых летательных аппаратов.

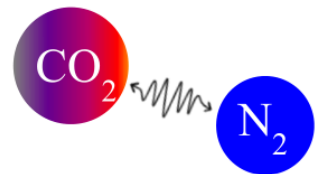
Условия	Содержание CO ₂ [моль]	M _∞	U _∞ [м/с]	Re _l [m ⁻¹]	P _∞ [Па]	T _v [K]	T ₀ [K]	T _w [K]
1	0.44	8,44	2255,414	1,36×10 ⁶	374,5	215	2430	300
2	0.22	8,44	2378,035	1,36×10 ⁶	374,5	215	2430	
3	0.88	8,44	2058,057	1,36×10 ⁶	374,5	215	2430	

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 могут существенно повлиять на генерацию и развитие возмущений в пограничном слое, и как следствие на переход к турбулентности [1]. 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. Одним из известных методов управления ламинарно-турбулентным переходом в умеренно гиперзвуковых течениях является метод нанесения на поверхность звукопоглощающего покрытия [2].

Целью данной работы является исследование развития возмущений в вязком ударном слое на пластине, обтекаемой гиперзвуковым потоком смесей углекислого газа и азота, и исследование влияния высокопористых ячеистых звукопоглощающих покрытий на подавление возмущений на модели в гиперзвуковых потоках смесей колебательно возбужденных газов.

Численное моделирование проводилось с помощью пакета ANSYS Fluent на базе решения двумерных нестационарных уравнений Навье – Стокса в рамках модели термически совершенного газа, теплоёмкость которого зависит от температуры вследствие возбуждения колебательных степеней свободы молекул газа. Для расчета влияния колебательной релаксации молекул к уравнениям Навье – Стокса производилось добавление 4-х уравнений сохранения колебательной энергии (для каждой колебательной степени свободы молекул CO₂) и встраиваемых в пакет модулей для реализации двухтемпературной модели колебательной релаксации углекислого газа. В рамках этой модели изменение колебательной энергии от времени моделируется уравнением Ландау – Теллера, в котором учитывается конечность времени колебательной релаксации молекул CO₂. Поскольку энергия колебательного возбуждения возникает за счет кинетической энергии теплового движения сталкивающихся молекул, в работе учитываются два канала колебательной релаксации молекул CO₂ (при взаимодействии молекул CO₂ друг с другом и при взаимодействии молекул CO₂ с молекулами N₂):

$$q_{iv}^{n(CO_2-CO_2)} = \frac{\rho}{\tau_{vt}^{(CO_2-CO_2)}} \left(e_v^{eq\ n} - e_v^n \right), \quad q_{iv}^{n(CO_2-N_2)} = \frac{\rho}{\tau_{vt}^{(CO_2-N_2)}} \left(e_v^{eq\ n} - e_v^n \right).$$



Акустические возмущения набегающего потока моделировались заданием суперпозиции стационарного течения и плоских монохроматических акустических волн на левой и верхней границах расчётной области. На рис. 1 приведено сравнение расчетных данных с результатами трубных экспериментов для смеси CO₂ и воздуха, проведённых в аэродинамической трубе ИТ-302М ИТПМ СО РАН [1]: на рис.1а – положение головного скачка уплотнения, на рис. 1б - величина p'_2/p'_1 изменения амплитуд пульсаций давления вниз по потоку в ударном слое на пластине (индексы 1 и 2 соответствуют положениям датчиков 1 и 2, расположенных на расстоянии 80мм и 180мм от носика пластины, соотве-

а

б

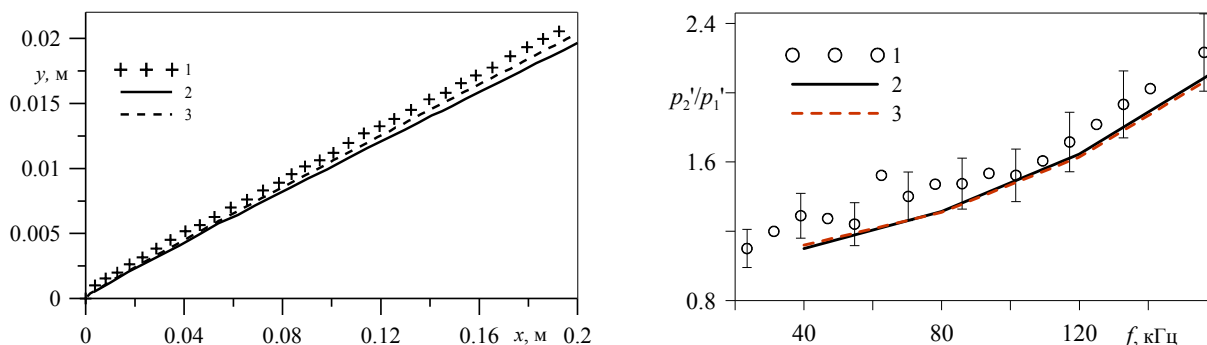


Рис.1. Положение УВ (а) и степени роста пульсаций давления на поверхности пластины (b) при воздействии быстрой акустической волны (условия 1 таблицы, $\alpha=10.2^\circ$, $L=200\text{мм}$)

тственно). Видно, что для условий эксперимента [1] колебательная релаксация молекул CO_2 при взаимодействии с молекулами азота (2-ой канал колебательной релаксации) слабо влияет и на характеристики среднего течения, и на интенсивность возмущений.

В данной работе исследовано влияние угла атаки ($\alpha=0\div 20^\circ$) на стационарное течение и интенсивность пульсаций давления при разной длине пластины ($L=200\text{ мм}$ и $L=400\text{ мм}$) и разных параметрах акустических возмущений набегающего потока (условие 1 таблицы). Видно, что воздействие внешних акустических возмущений приводит к генерации в ударном слое нарастающих по длине пластины возмущений давления. (рис.2).

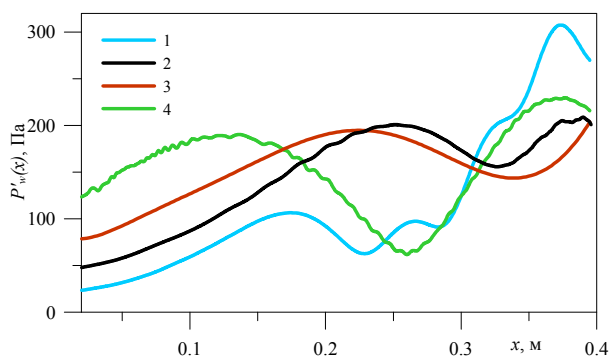


Рис.2. Среднеквадратичные пульсации давления на поверхности сплошной пластины: (1) – $\alpha=5^\circ$, (2) – $\alpha=10.2^\circ$, (3) – $\alpha=15^\circ$, (4) – $\alpha=20^\circ$ (условия 1 таблицы, $L=400\text{мм}$) при воздействии быстрой акустической волны с частотой $f=160\text{ кГц}$ и амплитудой $A=0.03$

В данной работе исследовано влияние концентрации CO_2 на характеристики среднего течения и развитие возмущений в ударном слое на пластине под углом атаки $\alpha=10.2^\circ$ в потоке смеси колебательно возбужденных газов. Параметры течения приведены в таблице. Показано, что повышение концентрации CO_2 в смеси увеличивает термическую неравновесность, и интенсивность пульсаций давления на поверхности сплошной пластины снижается (рис 3).

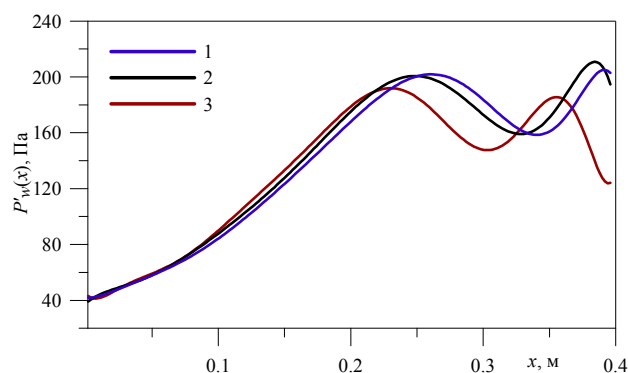


Рис.3. Среднеквадратичные пульсации давления на поверхности сплошной пластины при разных концентрациях CO_2 в смеси: (1) – $0,22\text{mol}$, (2) – $0,44\text{mol}$, (3) – $0,88\text{mol}$ ($L=400\text{мм}$) при воздействии быстрой акустической волны с частотой $f=160\text{кГц}$ и амплитудой $A=0.03$

Преыдущие исследования о развитии возмущений на сплошной пластине необходимы для решения задачи о влиянии звукопоглощающих покрытий. Полученные результаты помогли определить, при каких параметрах среднего течения и частотах внешнего акустического возмущения пульсации давления достигают максимума. Представление о картине развития возмущений в ударном слое позволяет приступить к исследованиям влияния пористых звукопоглощающих покрытий.

Звукопоглощающие вставки I и II, были расположены в области нарастания возмущений для пластины под углом атаки 10.2° , а вставка III – в области максимума возмущений. Во всех трёх случаях звукопоглощающие покрытия эффективно снижают интенсивность пульсаций давления при частотах выше 80кГц (рис. 4). Однако, звукопоглощающие покрытия, расположенные ближе к максимуму возмущений, более эффективны по снижению интенсивности пульсаций.

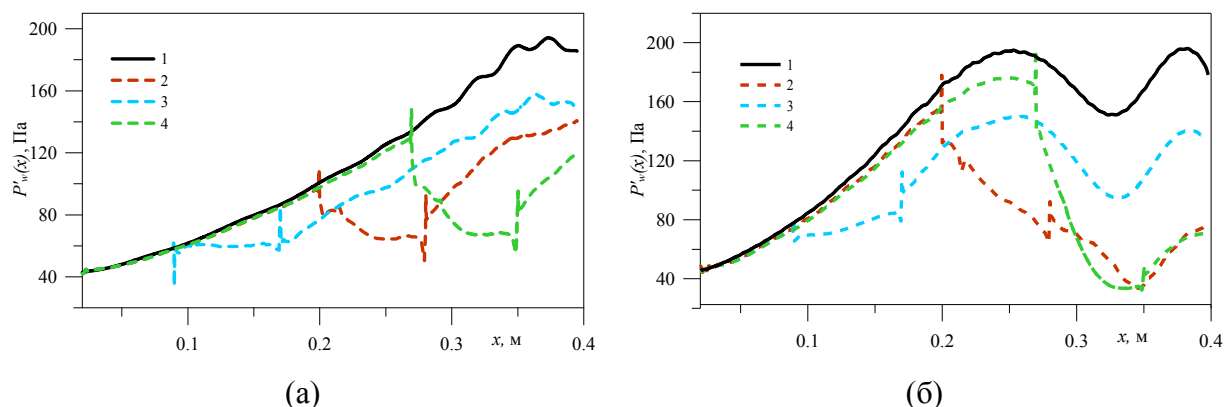


Рис.4. Среднеквадратичные пульсации давления на поверхности пластины при воздействии быстрой акустической волны с частотой (а) – $f=120\text{кГц}$, (б) – $f=160\text{кГц}$ и амплитудой $A=0.03$: (1) – сплошная пластина, (2) – пластина с покрытием I, (3) – пластина с покрытием II, (4) – пластина с покрытием III (условия 1 таблицы, $L=400\text{мм}$)

Для исследования влияния длины пористого покрытия рассматрива-

лось 2 случая: обтекание пластины со вставкой I длиной 80мм, расположенной в области максимума возмущений, и со вставкой IV, длина которой увеличена в 2 раза (160мм). Пористое покрытие, установленное в области локального максимума возмущений, эффективно снижает пульсации давления, в частности, на поверхности пластины с пористым покрытием длиной 160мм до 95%.

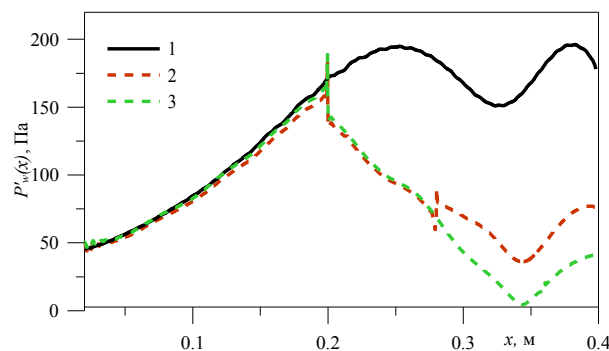


Рис.5. Среднеквадратичные пульсации давления: (1) – на поверхности сплошной пластины, (2) – на пластине с покрытием, (3) – на пластине с покрытием IV; при воздействии быстрой акустической волны с частотой $f=160$ кГц и амплитудой $A=0.03$ (условия 1 таблицы, $L=400$ мм)

1.S. V. Kirilovskiy, A. A. Maslov, T. V. Poplavskaya, I. S. Tsyryul'nikov Influence of Vibrational Relaxation on Perturbations in a Shock Layer on a Plate // *Technical Physics*. 2015. Vol. 60. No. 5. P. 645–655

2.Fedorov A., Shiblyuk 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

Эффект от использования кластера в достижении целей работы

Для выполнения подобных исследований необходимо большое количество параметрических расчётов. Использование кластера НГУ существенно ускоряет их проведение, а, следовательно, и получение научных результатов.

Публикации:

- Kirilovskiy S.V.,Poplavskaya T.V., Tsyryulnikov I.S. Numerical simulation of interaction of long-wave disturbances with a shock wave on a wedge for the problem of mode decomposition of supersonic flow oscillations //18th International Conference on the Methods of Aerophysical Research (ICMAR2016) (Russia, Perm, 27 Jun.-3 Jul., 2016): AIP Conference Proceedings.-Vol.1770. -S.l., 2016. -P. 030040.DOI:10.1063/1.4963982

- Tsyryulnikov I.S., Kirilovskiy S.V., Poplavskaya T.V. Determination of the mode composition of long-wave disturbances in a supersonic flow in a hotshot wind tunnel //18th International Conference on the Methods of Aerophysical Research (ICMAR2016) Russia, Perm, 27 Jun.-3 Jul., 2016) : AIP Conference Proceedings.-Vol.1770. -S.l., 2016. -P. 030018.

- Kirilovskiy S.V., Poplavskaya T.V., Tsyryulnikov I.S. Effect of the mode composition disturbances in a high-enthalpy wind tunnel on wave processes in the hypersonic viscous shock layer // Journal of Physics Conference Series, 2016, Vol. 722 , conference 1
- Reshetova A.I., Poplavskaya T.V. Evolution of disturbances in the shock layer on a flat plate in a flow of a mixture of vibrationally excited gases //AIP Conf. Proc. Vol.1770, 30059 (2016); <http://dx.doi.org/10.1063/1.4964001>
- 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, No 2. С. 11–19.