

## РАЗВИТИЕ ВОЗМУЩЕНИЙ В УДАРНОМ СЛОЕ НА ПЛАСТИНЕ 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
- 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

Свойства реального газа, в частности колебательная релаксация, играют значительную роль в устойчивости и ламинарно-турбулентном переходе в гиперзвуковых сдвиговых течениях. Знание характеристик течений колебательно возбужденных газов необходимо для задачи управления ламинарно-турбулентным переходом в гиперзвуковых пограничных слоях. В [1] рассмотрено влияние возбуждения и релаксации колебательных степеней свободы молекул  $\text{CO}_2$  при обтекании пластины потоком углекислого газа. Однако в смеси с другими газами интенсивность релаксационных процессов  $\text{CO}_2$  и их влияние на характеристики течения может отличаться от процессов в чистом  $\text{CO}_2$ .

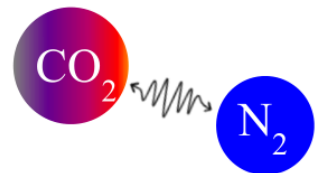
Цель данной работы исследовать влияние колебательной неравновесности на развитие возмущений в гиперзвуковом вязком ударном слое на пластине под углом атаки ( $\alpha=0\div 20^\circ$ ) при ее обтекании гиперзвуковыми потоками смесей углекислого газа ( $\text{CO}_2$ ) с азотом ( $\text{N}_2$ ) (таблица).

Условия	Содержание $\text{CO}_2$ [моль]	$M_\infty$	$Re_1$	$P_\infty$ [Па]	$T_v$ [K]	$T_0$ [K]	$T_w$ [K]
1	0.44	8,42	$1,36 \times 10^6$	371,5	215	2430	300
2	0.77	8,42	$1,36 \times 10^6$	371,5	215	2430	
3	1.0	8,42	$1,36 \times 10^6$	371,5	215	2430	
4	0.77	6,1	$6,24 \times 10^5$	717	511,85	2138	

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  $\text{CO}_2$ ) 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  $\text{CO}_2$ . Поскольку энергия колебательного возбуждения возникает за счет кинетической энергии теплового движения сталкивающихся молекул, в работе учитываются два канала колебательной релаксации молекул  $\text{CO}_2$  (при взаимодействии молекул  $\text{CO}_2$  друг с другом и при взаимодействии молекул  $\text{CO}_2$  с молекулами  $\text{N}_2$ ):

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



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  $\text{CO}_2$  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, соответ-

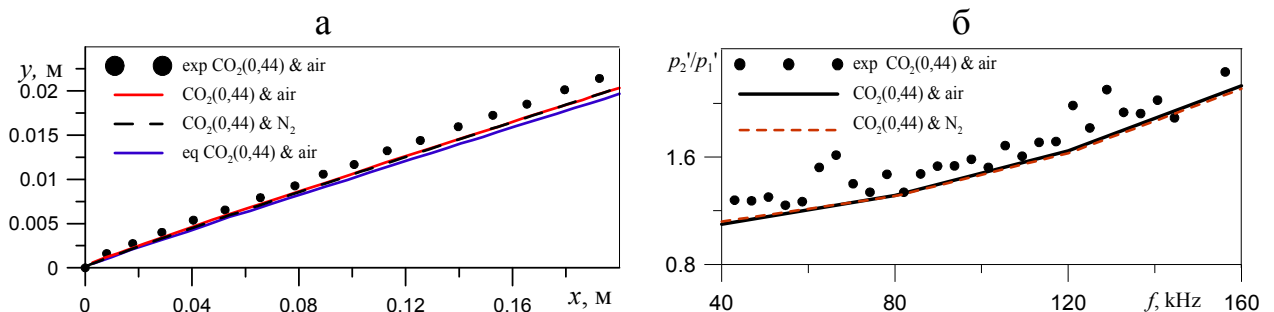


Рис.1. Положение УВ (а) и степени роста пульсаций давления на поверхности пластины (б) при воздействии быстрой акустической волны (условия 1 таблицы,  $\alpha=10.2^\circ$ ,  $L=200\text{мм}$ )

тственно). Видно, что для условий эксперимента [1] колебательная релаксация молекул  $\text{CO}_2$  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 ( $L=200$  мм и  $L=400$  мм) и разных параметрах акустических возмущений набегающего потока. Показано, что с ростом угла атаки колебательная релаксация молекул  $\text{CO}_2$  приводит к увеличению интенсивности пульсаций давления на поверхности пластины (рис.2).

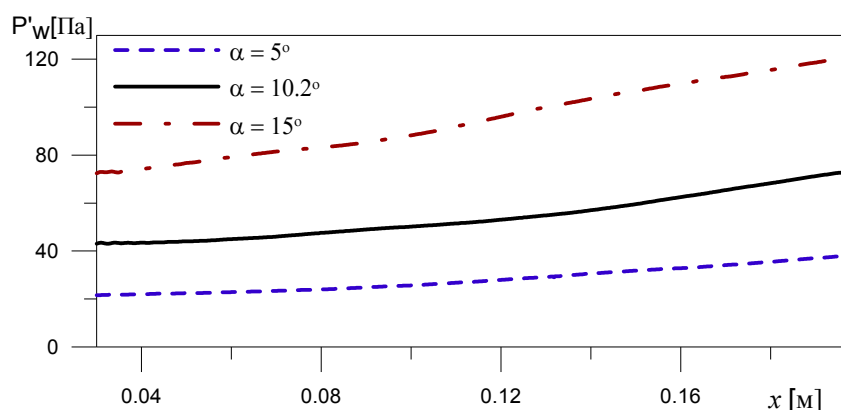


Рис.2. Пульсации давления на поверхности пластины (условия 1 таблицы,  $L=200$ мм) при воздействии быстрой акустической волны с частотой  $f=80$  кГц и амплитудой  $A=0.03$

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.

### 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.1., 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.1., 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