



Семинар академика Фомина В.М.
«Задачи аэрофизики и газовой динамики»
25 марта 2015 г., НГУ

**ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
РАЗВИТИЯ ВОЗМУЩЕНИЙ В УДАРНОМ СЛОЕ
НА ПЛАСТИНЕ В ПОТОКЕ СМЕСИ
КОЛЕБАТЕЛЬНО ВОЗБУЖДЕННЫХ ГАЗОВ**

Решетова А.И.

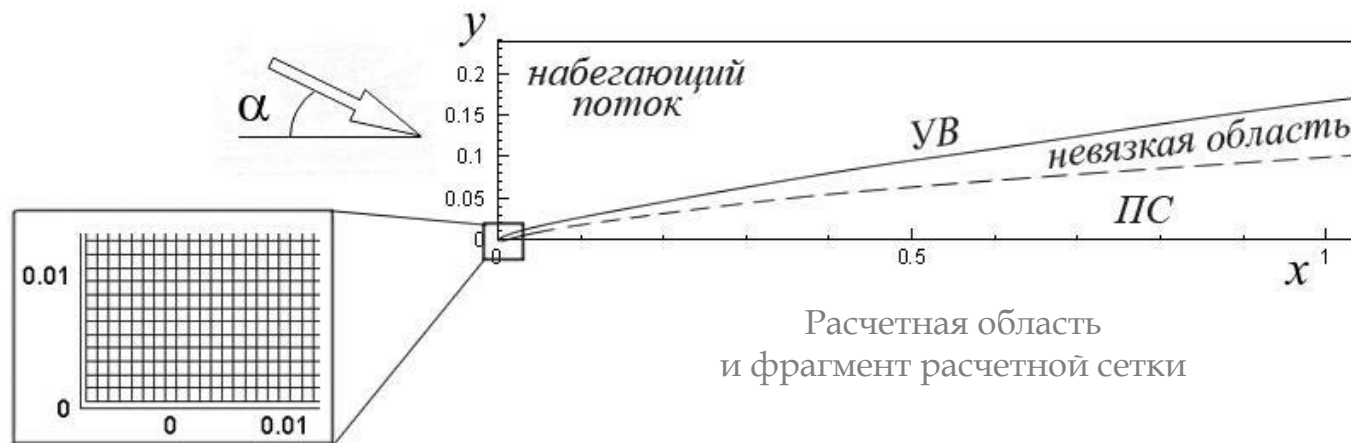
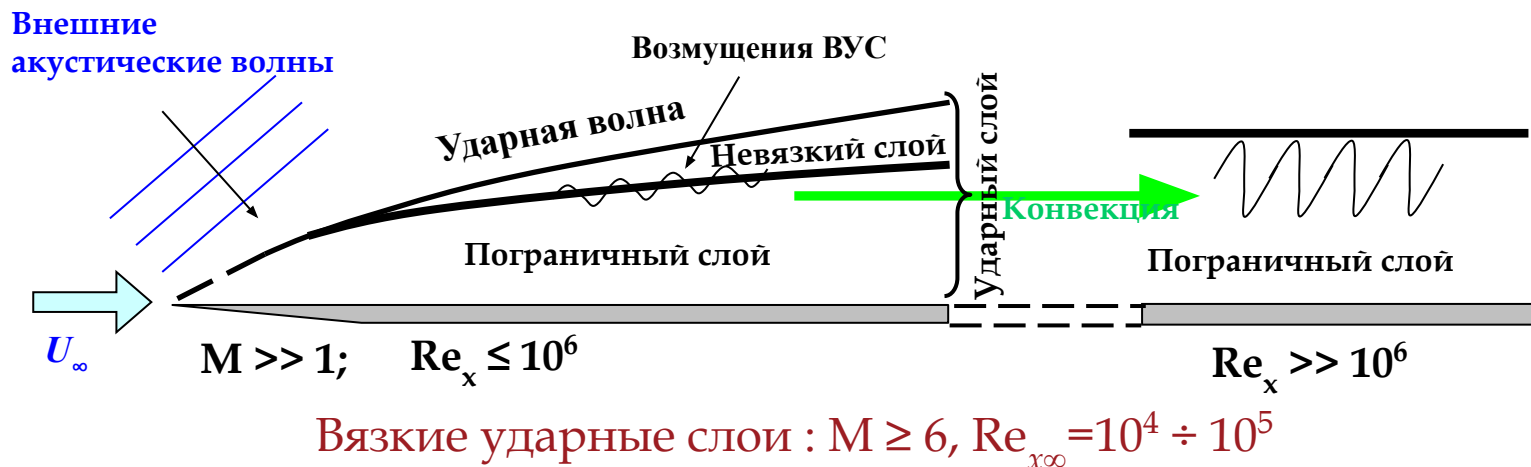


Научный руководитель:
д.ф.-м.н. Поплавская Т.В.

Мотивация

1. **Malik M.R., Anderson J.D.** Real gas effect on hypersonic boundary layer stability // *Physics of Fluid A*. 1991. Vol. 3, No. 5. pp. 803-821.
 2. **Осипов А.И, Уваров А.В** Кинетические и газодинамические процессы в неравновесной молекулярной физике // *Успехи физических наук*, т. 162, № 11, 1992г.
 3. **В.В. Лунёв** Течение реальных газов с большими скоростями. - 2007 с.500.
 4. **Anderson J.D.** Hypersonic and high temperature gas dynamics. 1989. 702pp.
 5. **Bertolotti F.P.** The influence of rotational and vibrational energy relaxation on boundary layer stability // *Journal of Fluid Mechanics*. 1998. Vol. 372. pp. 93-118.
 6. **Fujii K., Hornung H.G.** Experimental investigation of high-enthalpy effects on attachment-line boundary-layer transition // *AIAA Journal* . 2003. Vol. 41, No. 7.
 7. **Григорьев Ю.Н., Ершов И.В.** Устойчивость течений релаксирующих молекулярных газов // Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2012. – 230с.
 8. **Гапонов С.А., Петров Г.В.** Устойчивость пограничного слоя неравновесно диссоциирующего газа // Новосибирск: Наука, 2013. – 95с.
-
9. **Кириловский С.В. , Поплавская Т.В., Цырюльников И.С.** Применение пакета ANSYS FLUENT для решения задач воздействия акустических волн на гиперзвуковой ударный слой на пластине // *Математическое моделирование*. 2013. т.25. N 9.
 10. **С. В. Кириловский, А.А. Маслов, Т. В. Поплавская, И. С. Цырюльников** Влияние колебательной релаксации на развитие возмущений в ударном слое на пластине // ЖТФ (в печати)

Объект исследований и постановка задачи



1. Решение стационарной задачи
2. Решение задачи о взаимодействии внешних акустических волн с ударным слоем на пластине

Развитие возмущений на пластине

Экспериментальные исследования ИТ-302М ИТПМ

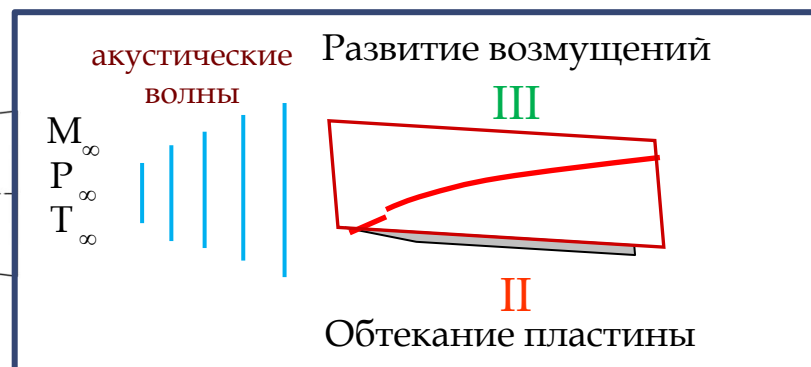
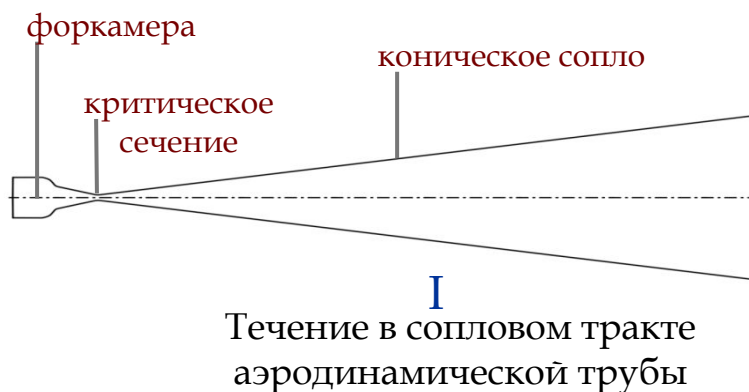
Маслов А.А., Миронов С.Г., Цырюльников И.С.



Состав потока
в рабочей части
ИТ-302:
Воздух; CO_2
Смесь воздуха и CO_2

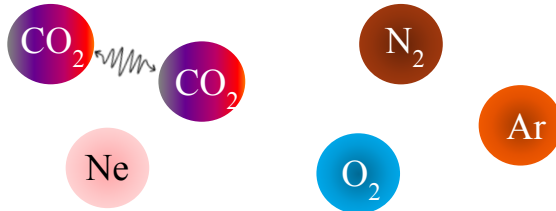
Численное моделирование (ANSYS Fluent)

Кириловский С.В., Поплавская Т.В.



Смеси газов

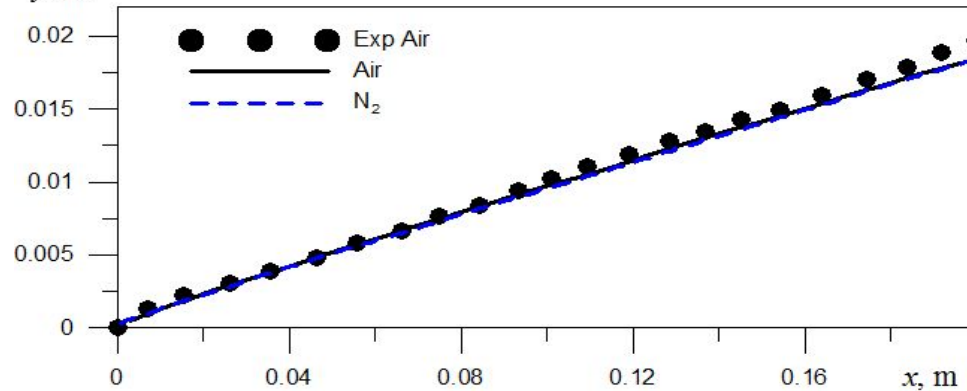
Смесь CO_2 и Воздуха



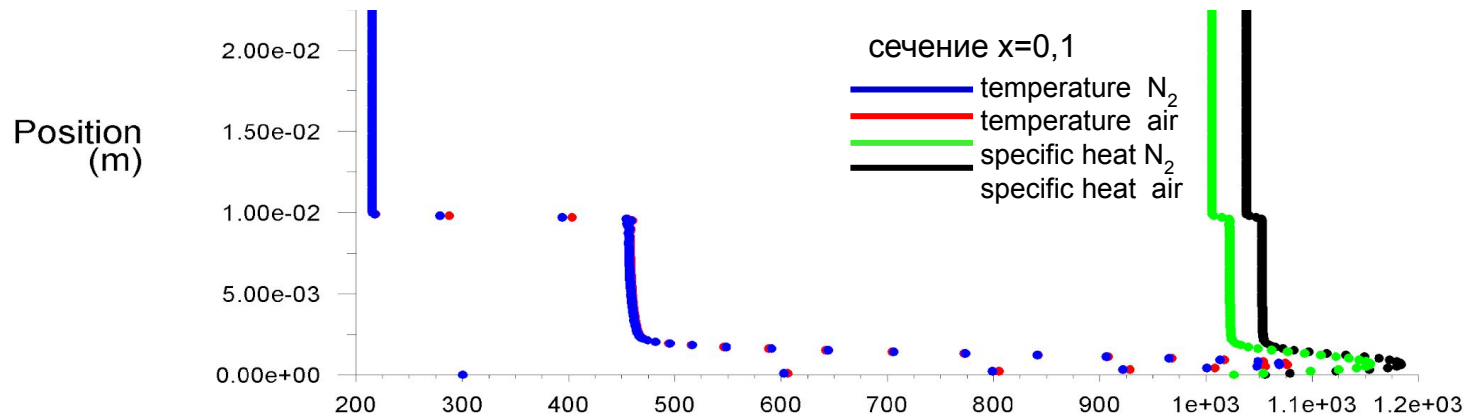
Состав Воздуха

N_2 - 75,5%	Ne - 0,0014%
Ar - 1,292%	CO_2 - 0,046%
O_2 - 23,15%	

$M_\infty = 9.44$ $Re_1 = 11.47 \times 10^5$ $T_0 = 3000\text{K}$ $P_\infty = 360\text{Pa}$ $T_\infty = 215\text{K}$ $\alpha = 10,2^\circ$



Данные по положению ударной волны для течения воздуха и азота



Расчетные профили температуры и теплоемкости для течения воздуха и азота

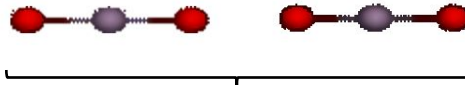
Колебательное движение в молекулах

CO₂

1



2



3



N₂



Моды:

симметричные
валентные колебания

деформационные
колебания

асимметричные
валентные колебания

симметричные
колебания

θ_v : 1920K

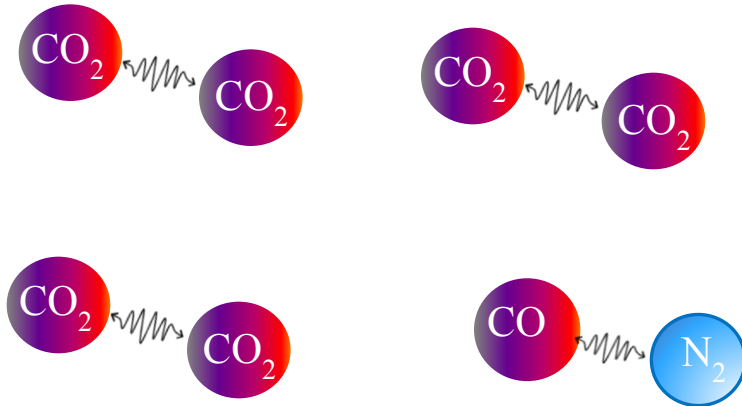
960K

3380K

3340K

Смесь CO₂ и N₂

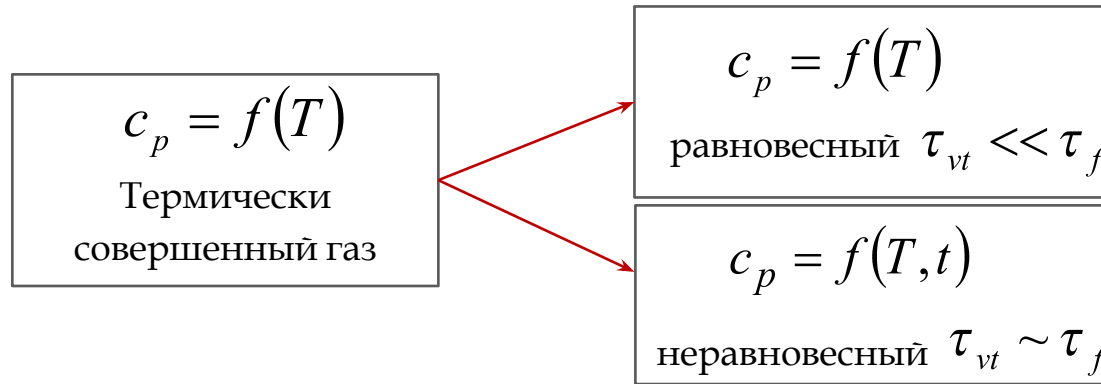
Константы скорости релаксации k_2 группы 2
Уровней молекулы CO₂ при столкновениях
с молекулами M (T=300K)



M	k_2 (мм рт.ст.) ⁻¹ · с ⁻¹
	194
	650

В. Витteman CO₂-лазер // М. «Мир». 1990

Термодинамическая модель



Иерархия времён релаксационных процессов

$$\tau_{tt} \leq \tau_{rt} \ll \tau_{vv} \ll \tau_{vt} \sim \tau_f \longrightarrow$$

Макроскопический уровень описания колебательной релаксации с помощью двухтемпературной модели релаксационных течений

Уравнение Ландау-Теллера

для каждой колебательной степени свободы:

$$\frac{de_{vib}}{dt} = \frac{1}{\tau_{vt}} (e_{vib}^{eq} - e_{vib})$$

e_{vib} – колебательная энергия (неравновесная)

$$e_{vib}^{eq} = \frac{\theta_v}{e^{\theta_v/T_{tr}} - 1} R$$

колебательная энергия (равновесная)

τ_{vt} – время колебательной релаксации

Основные уравнения

Уравнения сохранения:

массы	$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0$	
импульса	$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \mathbf{u}) + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u} \mathbf{u}) = -\nabla p + \nabla \tau_\mu$	
энергии	$\frac{\partial}{\partial t} (\rho e_t) + \nabla \cdot [\mathbf{u} (\rho e_t + p)] = \nabla \cdot (\lambda \nabla T_{tr} + \tau_\mu \mathbf{u}) - \sum_{n=1}^4 q_{tv}^{n(CO_2-CO_2)} - \sum_{n=1}^4 q_{tv}^{n(CO_2-N_2)}$	} UDS + UDF
колебат. энергии $n=1, \dots, 4$	$\frac{\partial}{\partial t} (\rho e_v^n) + \nabla \cdot (\mathbf{u} \rho e_v^n) = q_{tv}^{n(CO_2-CO_2)} + q_{tv}^{n(CO_2-N_2)}$	

k – теплопроводность, $c_{p,0}$ – теплоёмкость поступательно-вращательных степеней свободы,

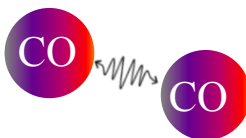
$\tau_\mu = \mu \left[\left(\nabla \mathbf{g} + \nabla \mathbf{g}^T \right) - \frac{2}{3} \nabla \mathbf{g} I \right]$ – тензор вязких напряжений, $e_t = \int c_p dT_{tr} - \frac{p}{\rho} + \frac{\mathbf{u}^2}{2}$ – энергия газа

$e_v^{eq^n} = \frac{\theta_n}{e^{\theta_n/T_{tr}} - 1} R$ $e_v^n = \frac{\theta_n}{e^{\theta_n/T_v} - 1} R$ $n=1, \dots, 4$ – колебательная энергия газа,

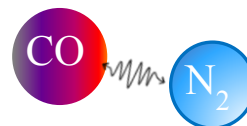
τ_{vt} – время колебательной релаксации,

поток энергии между поступательными и колебательными степенями свободы –

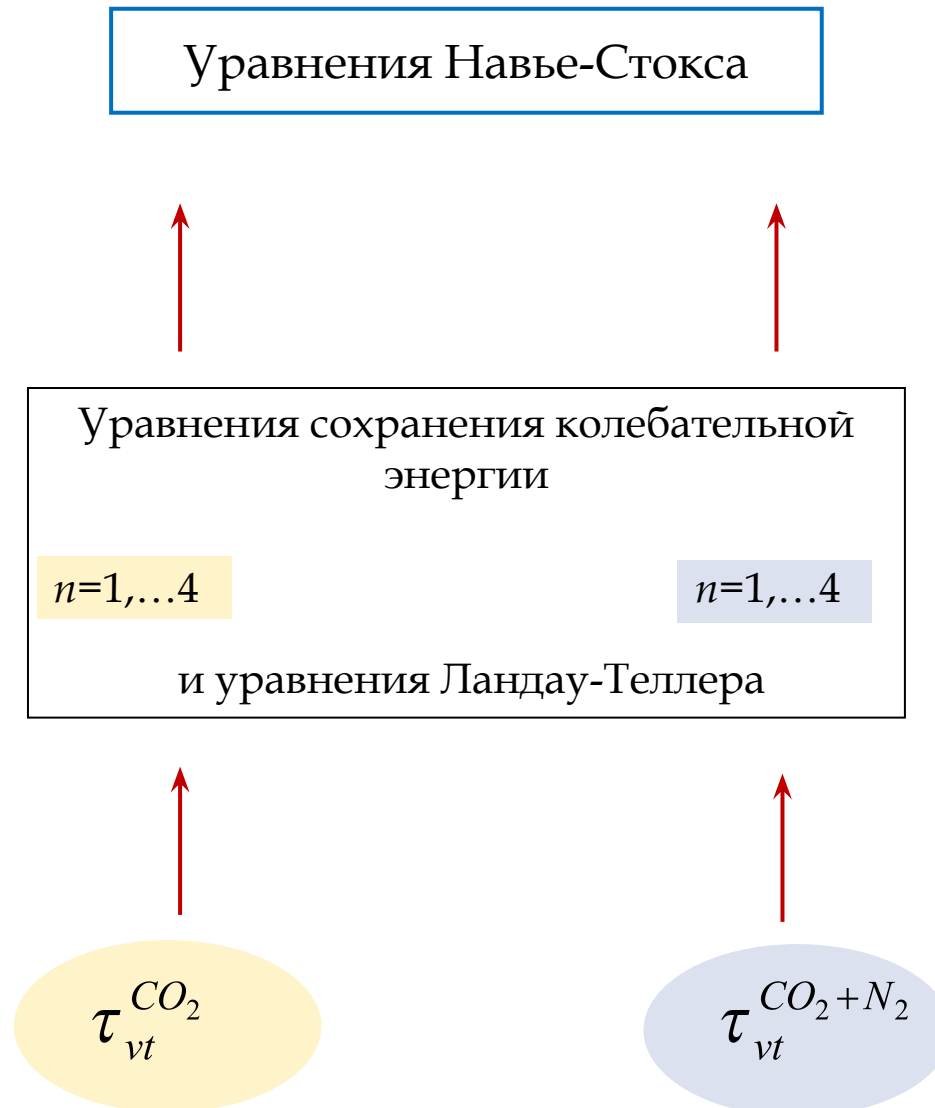
$$q_{tv}^{n(CO_2-CO_2)} = \frac{\rho}{\tau_{vt}^{(CO_2-CO_2)}} \left(e_v^{eq^n} - e_v^n \right)$$



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



Численное моделирование



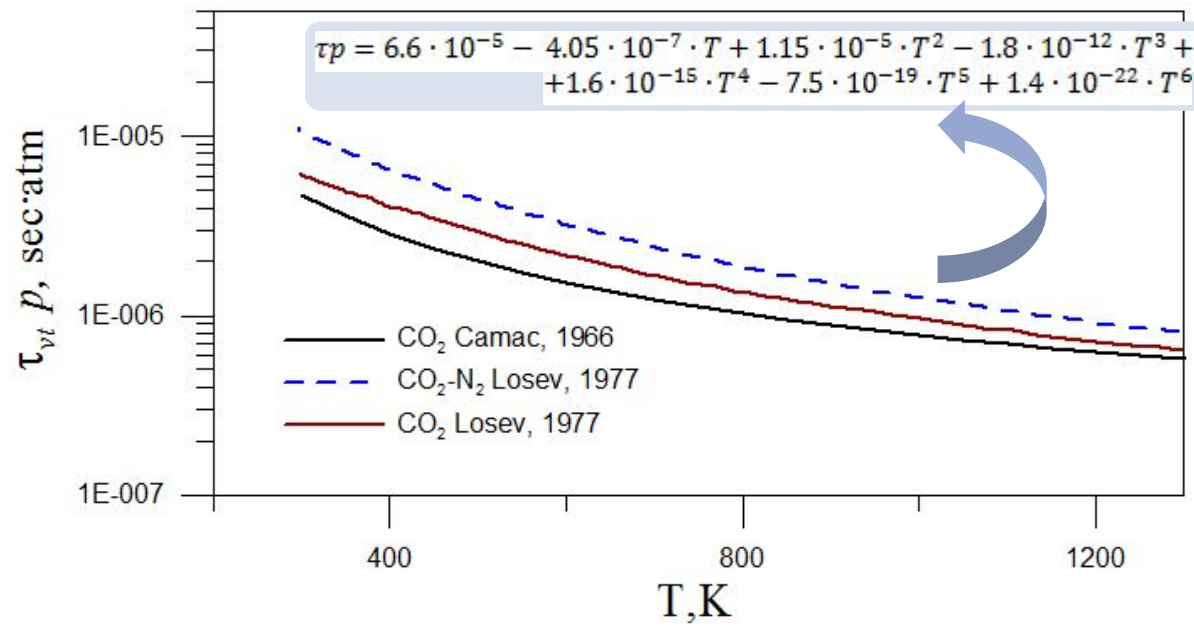
Времена колебательной релаксации газов

M. Camac CO₂ relaxation processes in shock waves.
Cornell University Press // *Fundamental Phenomena
in Hypersonic Flow*. 1966. P. 195-218

CO₂

$$\tau p = \exp(36.5T^{-1/3} - 3.9)$$

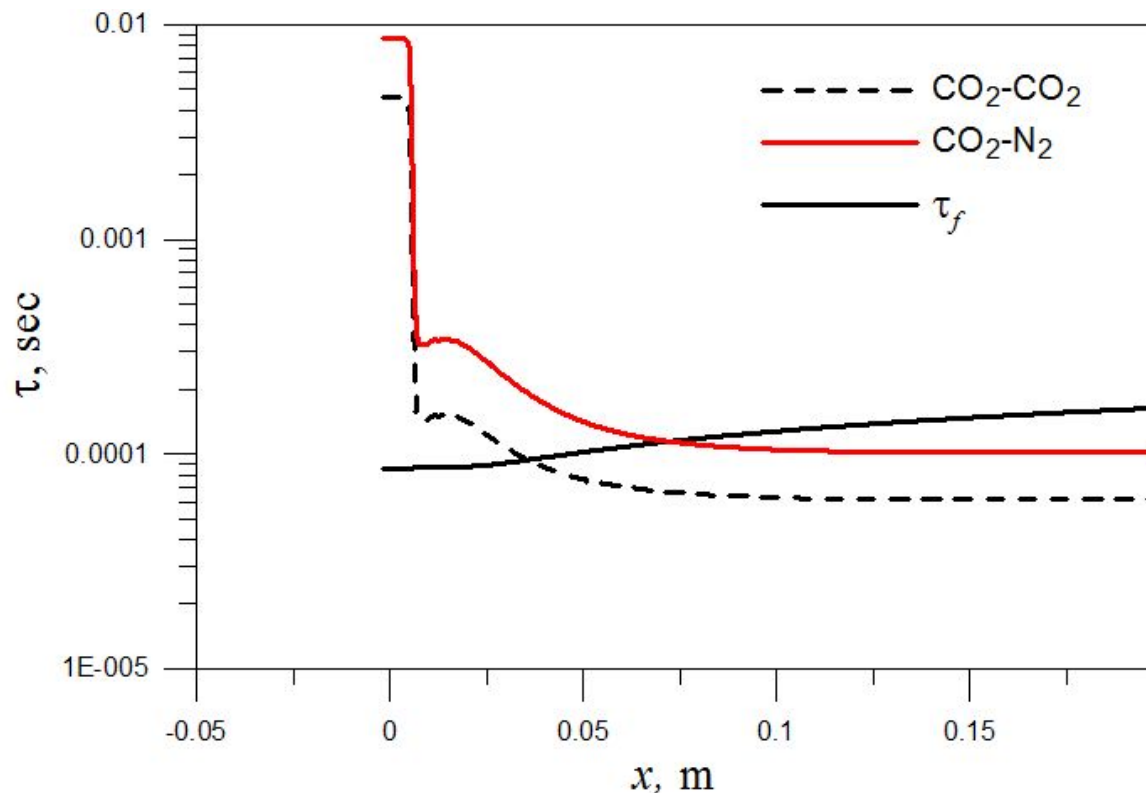
Зависимость времени колебательной релаксации молекул CO₂ от температуры



С. А. Лосев Газодинамические лазеры. – Москва: Изд. «Наука». 1977

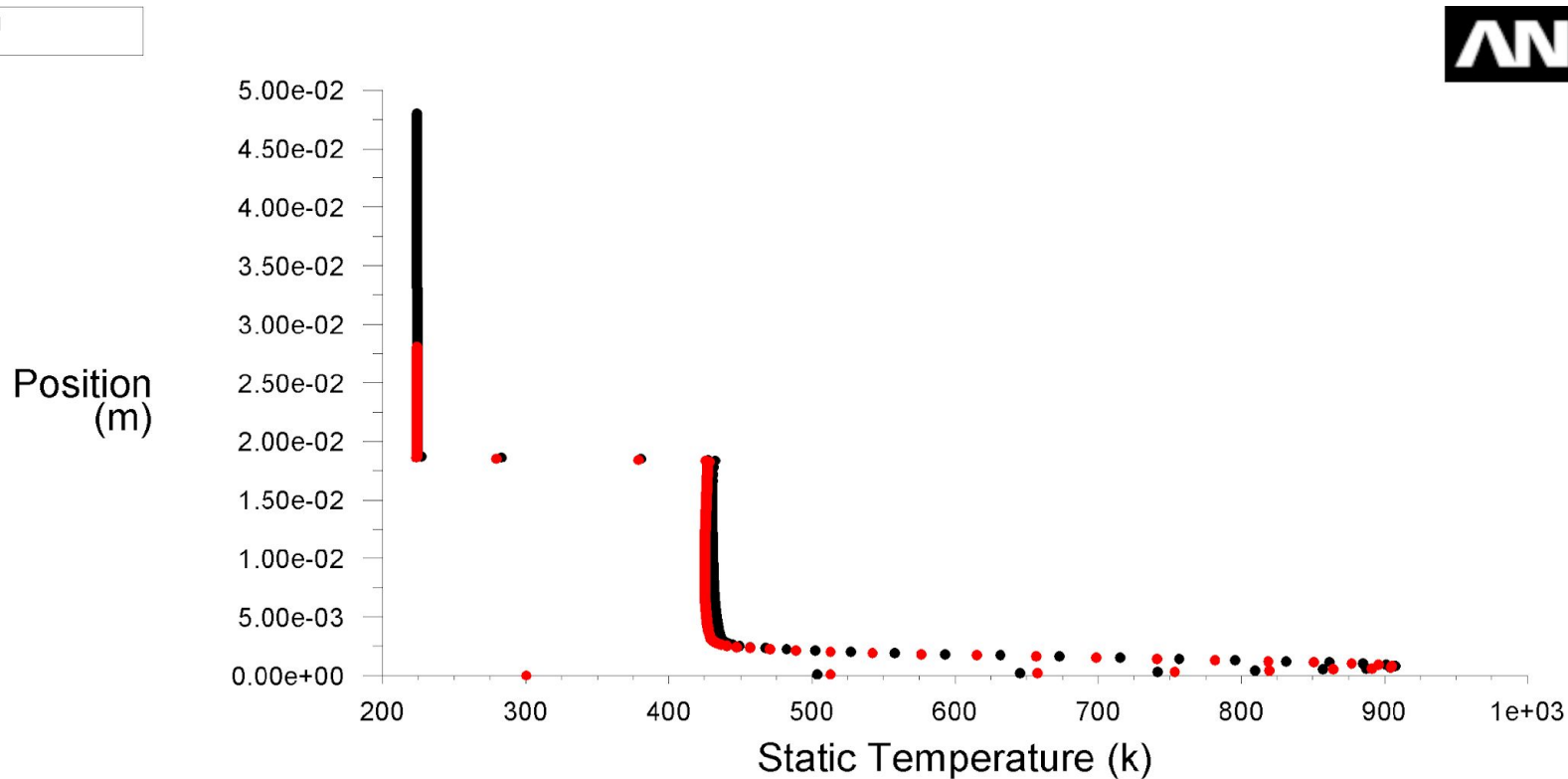
Времена колебательной релаксации газов

$$M_\infty=8.2 \quad Re_1=11.42 \times 10^5, \quad T_0=2430\text{K} \quad P_\infty=399\text{Pa} \quad T_\infty=238\text{K} \quad \alpha=10,2^\circ$$



Сравнение времен колебательной релаксации молекул CO_2 при столкновениях с молекулами CO_2 или N_2 с характерным временем обтекания пластины

Влияние колебательной релаксации на характеристики среднего течения



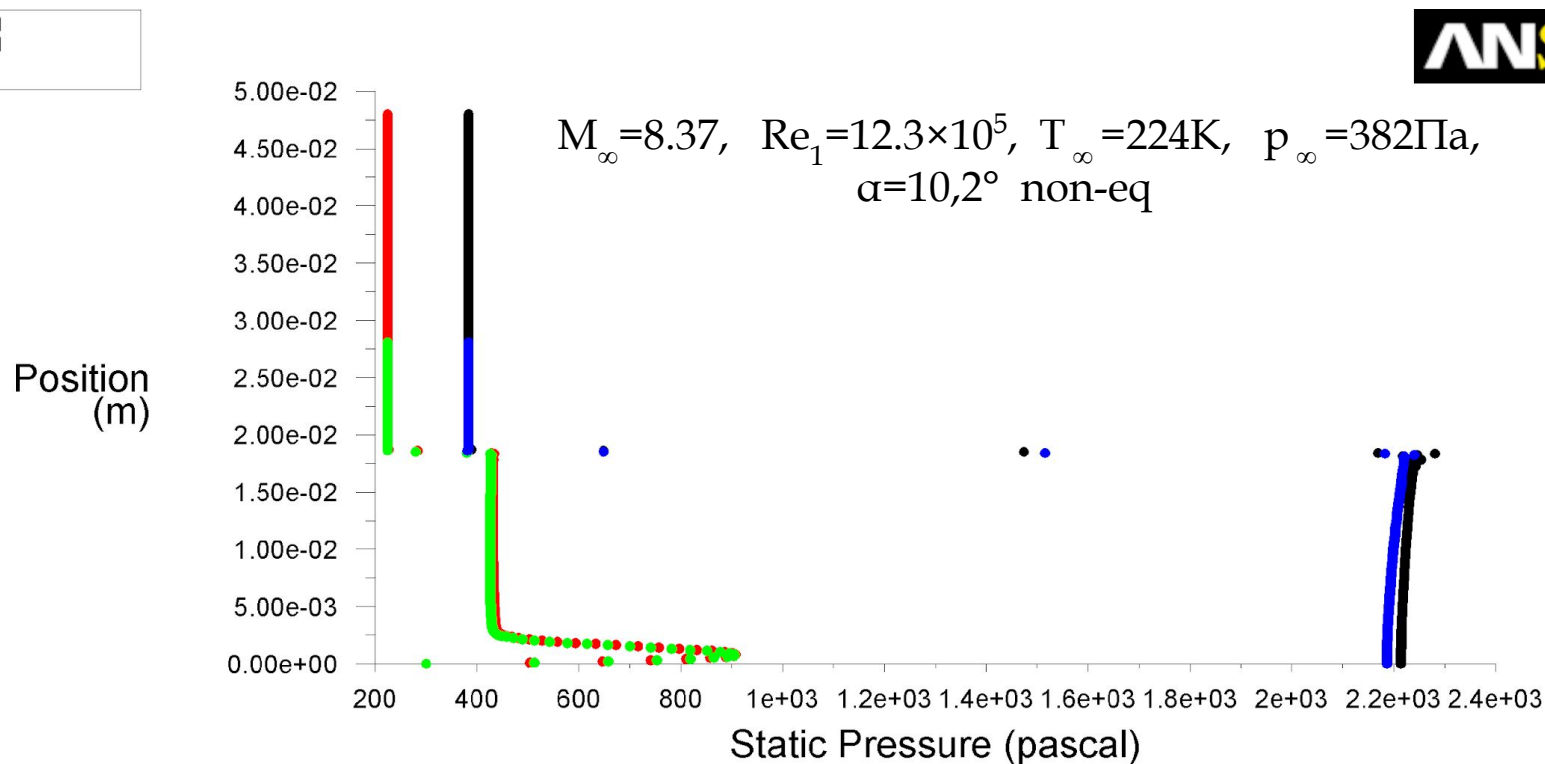
Static Temperature

Mar 24, 2015
ANSYS FLUENT 12.1 (2d, dp, dbns exp, spe, lam)

Сравнение экспериментальных и численных данных среднего течения
по положению ударной волны

Влияние колебательной релаксации на характеристики среднего течения

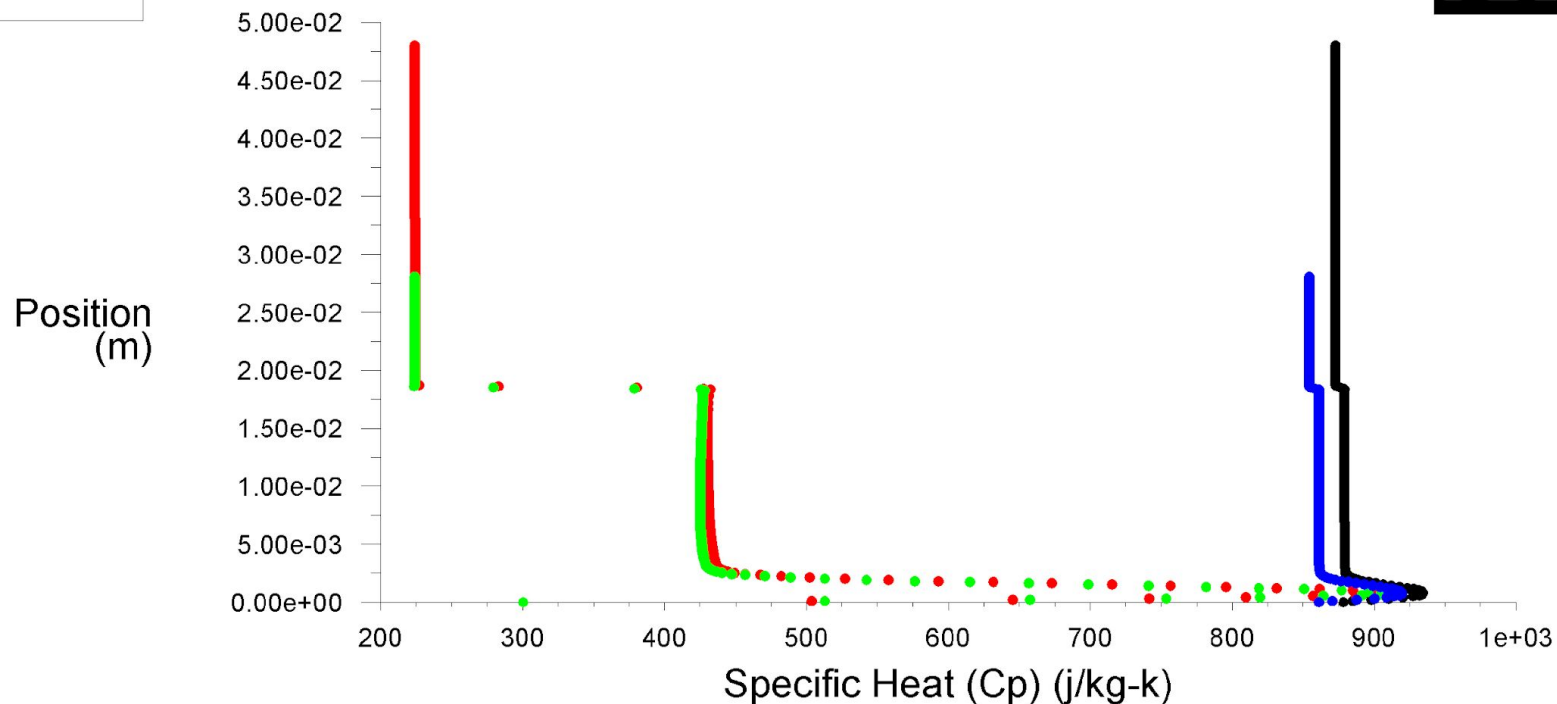
ANSYS



Static Pressure

Mar 24, 2015
ANSYS FLUENT 12.1 (2d, dp, dbns exp, spe, lam)

Влияние колебательной релаксации на характеристики среднего течения

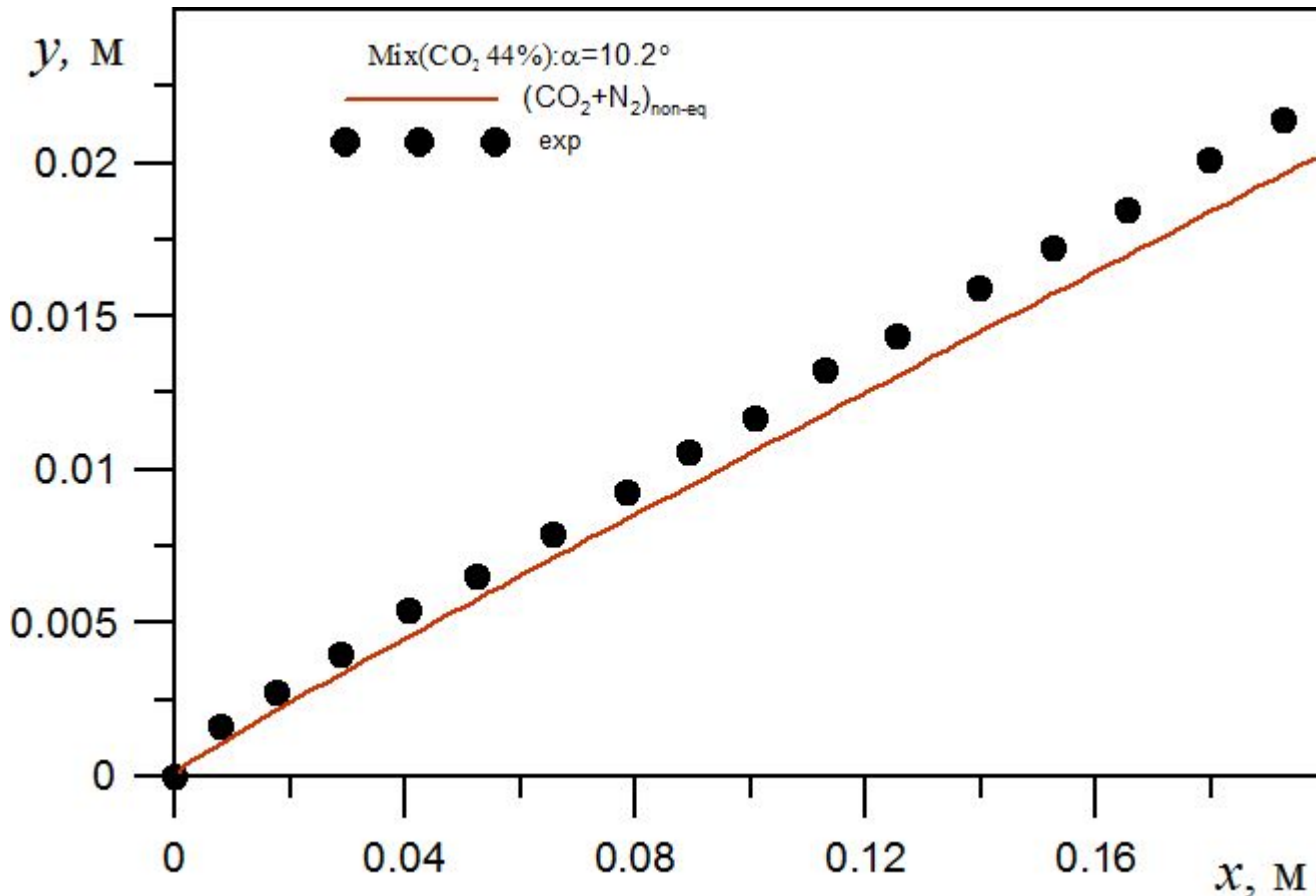


Specific Heat (C_p)

Mar 24, 2015
ANSYS FLUENT 12.1 (2d, dp, dbns exp, spe, lam)

Влияние колебательной релаксации на положение ударной волны в смеси газов

$M_\infty=8.37$, $Re_1=12.3 \times 10^5$, $T_\infty=224\text{K}$, $p_\infty=382\text{Па}$, $\alpha=10,2^\circ$ non-eq



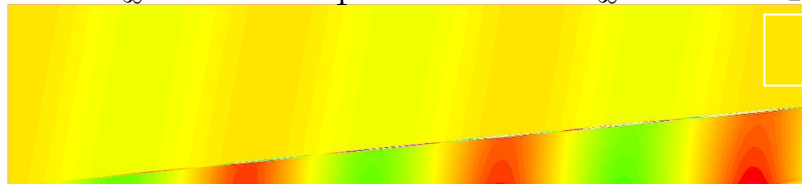
Сравнение экспериментальных и численных данных среднего течения по положению ударной волны

Развитие возмущений в ударном слое

Суперпозиция среднего течения и плоских монохроматических волн

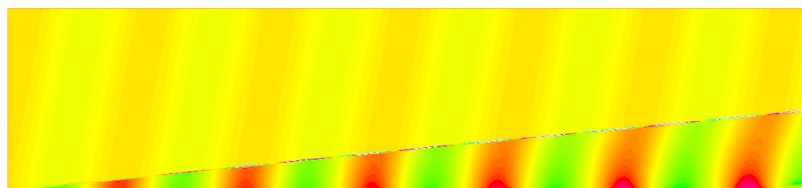
$$U = \langle U \rangle + U' = \langle U \rangle + A \exp[i(k_x x + k_y y - \omega t)]$$

$M_\infty = 8.37$, $Re_1 = 12.3 \times 10^5$, $T_\infty = 224\text{K}$, $p_\infty = 382\text{Па}$, $\alpha = 10.2^\circ$ non-eq

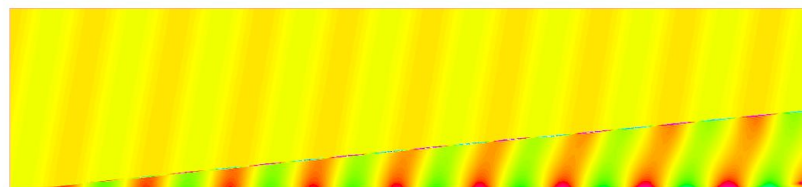


fast $A = P'/P_\infty = 0.03$

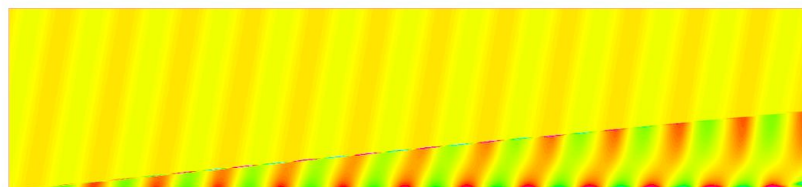
$f = 40 \text{ кГц}$



$f = 80 \text{ кГц}$



$f = 120 \text{ кГц}$



$f = 160 \text{ кГц}$

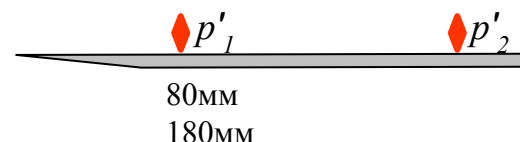
Мгновенные поля пульсаций давления при взаимодействии акустических волн с вязким ударным слоем на пластине под углом атаки $\alpha = 10.2^\circ$

Для смеси ($\text{CO}_2 + \text{N}_2$)

Развитие возмущений в ударном слое

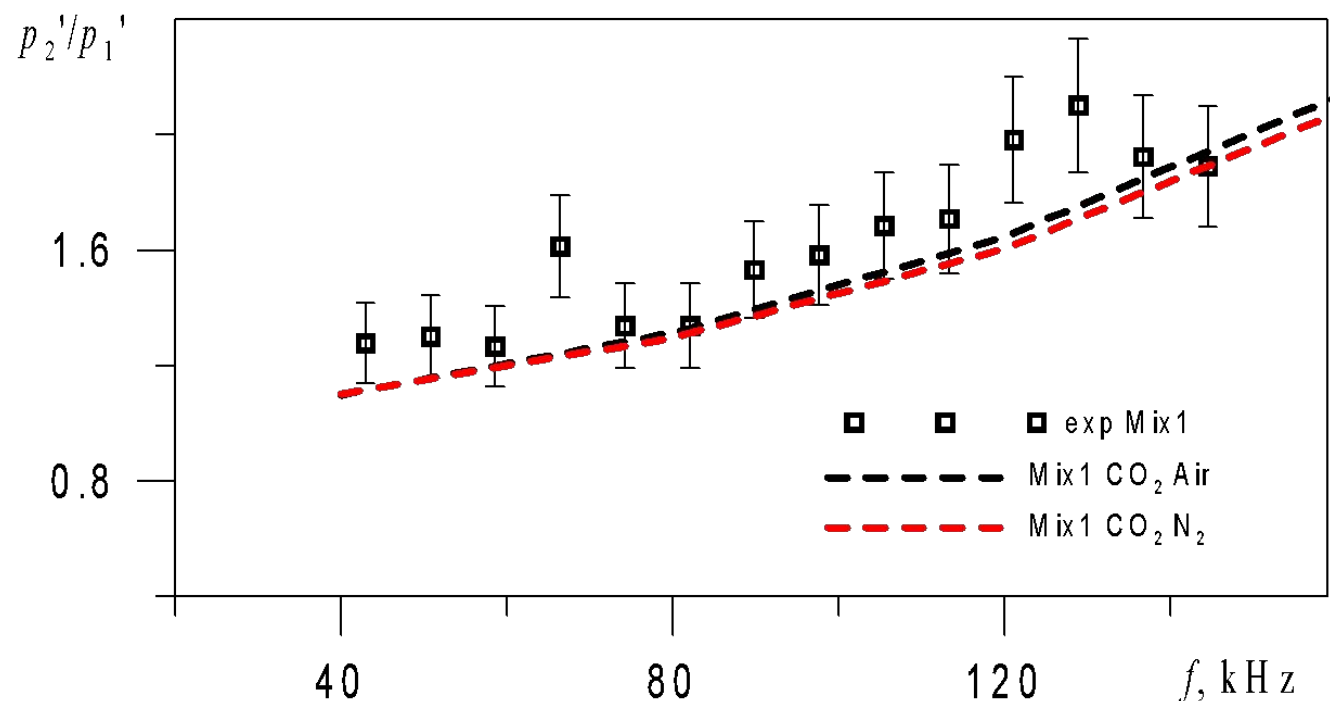
Эксперименты ИТ-302М ИТПМ СО РАН

Цырюльников И.С.



Mix1 CO₂ Air: $M_\infty=8.37$, $Re_1=12.3 \times 10^5$, $T_\infty=224K$, $p_\infty=382Pa$, $\alpha=10,2^\circ$ non-eq

Mix1 CO₂ N₂: $M_\infty=8.44$, $Re_1=13.1 \times 10^5$, $T_\infty=215K$, $p_\infty=375Pa$, $\alpha=10,2^\circ$ non-eq



Степени роста пульсаций давления на поверхности пластины при воздействии быстрой акустической волны

Планы на будущее

- Провести параметрические расчёты для:
 - a.** различных температур торможения;
 - b.** различных концентраций CO_2 в смеси с N_2 ;
- Выступление на МНСК в апреле 2015г.;

Заключение

- Выполнено численное моделирование обтекания пластины под углом атаки в потоке смеси воздуха и CO_2 и смеси азота и CO_2 для условий экспериментов в аэродинамической трубе ИТ-302М ИТПМ СО РАН с учетом колебательной релаксации молекул CO_2 в рамках двухтемпературной модели релаксационных течений;
- Для гиперзвуковых ударных слоев получены данные по динамике развития возмущений на модели, обтекаемой гиперзвуковыми потоками смесей азота и углекислого газа с учетом возбуждения и релаксации колебательных степеней свободы молекул CO_2 при столкновениях с молекулами других газов.
- Получено согласие расчетных и экспериментальных данных по характеристикам среднего течения и развития возмущений.

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ