



Моделирование термо - акустических эффектов в камерах сгорания

ЧЕПРАСОВ С.А., ЦИАМ, МОСКВА



Шум горения

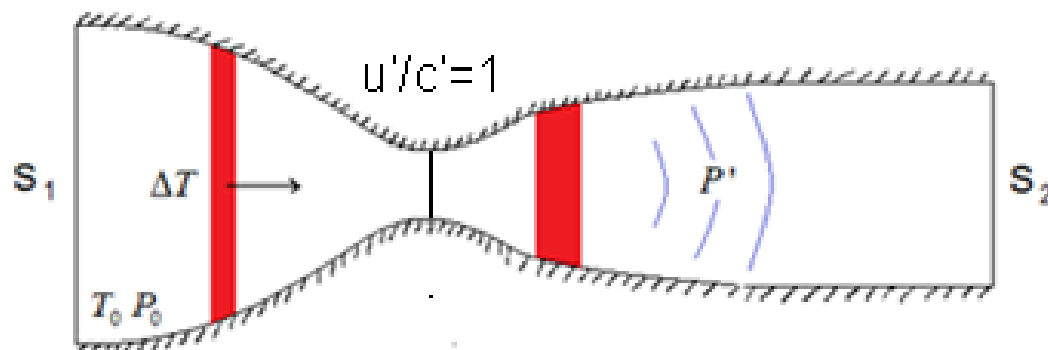
Излучение звука вследствие пульсаций тепловыделения



$$p' \approx \frac{\gamma - 1}{4\pi r} \int \frac{1}{c^2} \frac{\partial q'}{\partial t} dV$$

Монополь

Излучение звука при
взаимодействии неоднородностей
температуры с потоком.
«Побочный шум горения»

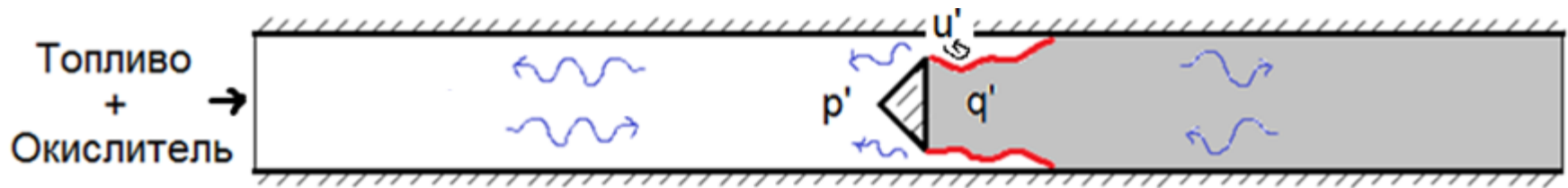


Дипольный
механизм

Шум форсажных камер сгорания,
Взаимодействие потока камеры сгорания и турбины

Автоколебания в камерах сгорания

Согласования пульсаций тепловыделения и давления



Критерий Релея

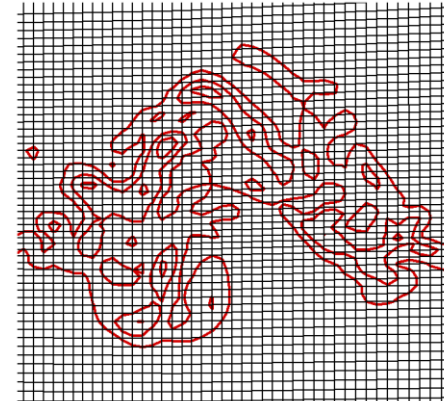
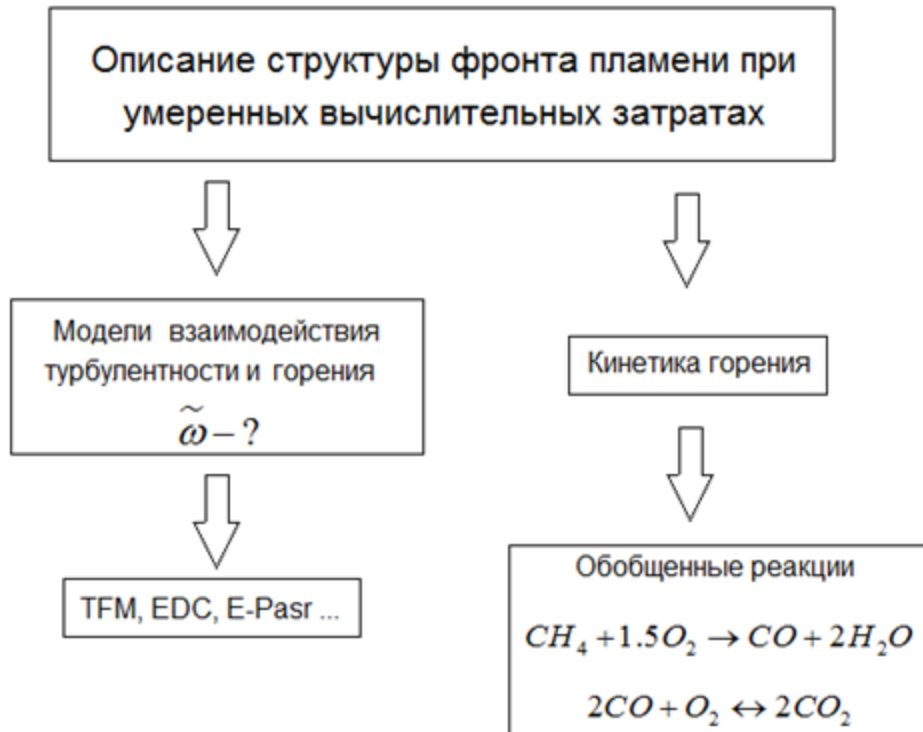
$$\int \langle p' q' \rangle dV > 0$$

Crosco 1969

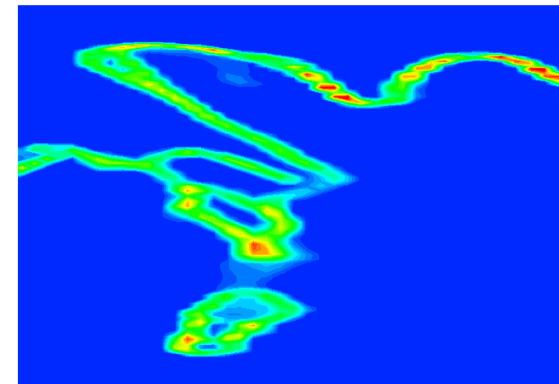
$$\Delta p' - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p'}{\partial t^2} = \frac{1-\gamma}{c^2} \frac{\partial q'}{\partial t}$$

Современные подходы моделирования турбулентного горения и акустики

LES + химические реакции



Область тепловыделения
фронт пламени $\delta \sim 0.1-1$ мм



Особенности предлагаемой методики

Мат. модель и вычислительная процедура

LES + 1 обобщенная реакция + квази - ламинарный подход для описания турбулентность/горения

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho + \frac{\partial}{\partial x_\alpha} \rho u_\alpha = 0$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho u_i + \frac{\partial}{\partial x_\alpha} \rho u_\alpha u_i = -\frac{\partial}{\partial x_i} p + \frac{\partial}{\partial x_\alpha} \tau_{i\alpha}$$

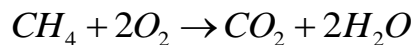
$$\frac{\partial}{\partial t} \rho Y_k + \frac{\partial}{\partial x_\alpha} \rho u_\alpha Y_k = \frac{\partial}{\partial x_\alpha} (D + D_T) \frac{\partial}{\partial x_\alpha} Y_k + \omega_k$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho h + \frac{\partial}{\partial x_\alpha} \rho u_\alpha h = \frac{\partial}{\partial x_\alpha} (\lambda + \lambda_T) \frac{\partial}{\partial x_\alpha} T - \sum_{k=1}^N h_k^0 \omega_k$$

Термодинамические соотношения

$$h = \sum_{k=1}^N h_k Y_k \quad h_k = \int_{T_0}^T c_{p,k} dT \quad p = \rho R T \sum_{k=1}^N \frac{Y_k}{W_k}$$

Обобщённая реакция окисления метана



$$\omega = A [CH_4]^a [O_2]^b e^{-\frac{E}{RT}}$$

Уравнения газовой динамики $M \ll 1$
 μ_v, D_v, λ_t (Germano 1991), $\mu = \text{Const}$

Вычислительная процедура

Метод контрольных объёмов
 Неявная схема с интегрированием
 по фиктивному времени и коррекцией давления
 2 -ой порядок по времени и пространству
 Статистика $N = 50000$,
 4 – временные реализации,
 $CFL = 10 - 50$
 Fluent 17.2, 24 – 32 ядра Intel

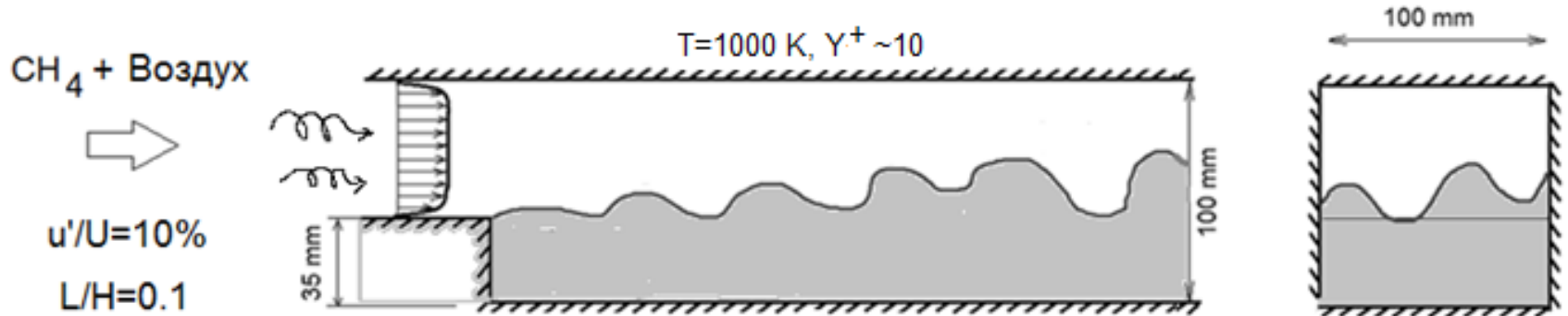
C_p – полином второй степени от T
 адаптированный в области $1000 \text{ K} < T < 5000 \text{ K}$

Возможно применение и для других углеводородных топлив

Квази - ламинарный подход
 Константы $a = 0.2-0.5$, $b = 1-1.3$

Задачи - лабораторные камеры сгорания

Турбулентное горение за уступом,
ONERA/LAERTA - подробные экспериментальные данные



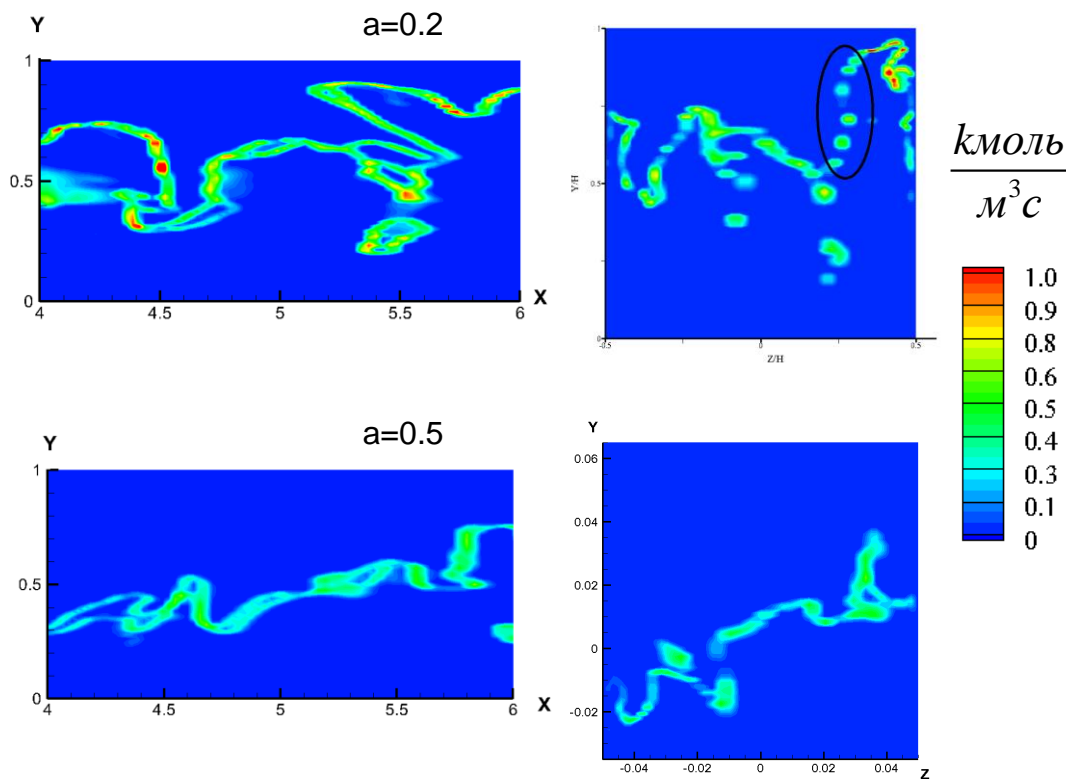
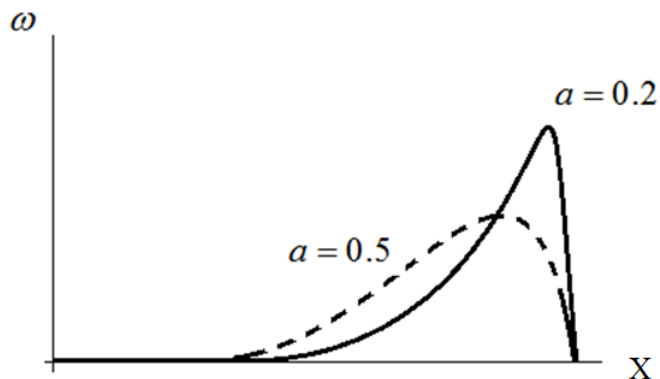
Кол – во узлов расчётной сетки
500*120*50

Влияние констант модели на структуру фронта пламени

Нестационарное распределение скорости реакции

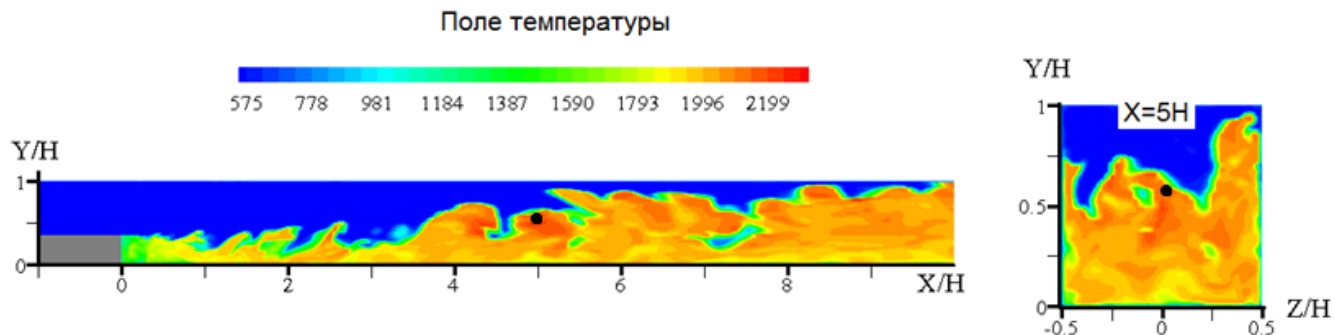
Некоторые сведения
из 1D теории ламинарного пламени

$$\omega = A[CH_4]^a [O_2]^b e^{-\frac{E}{RT}}$$

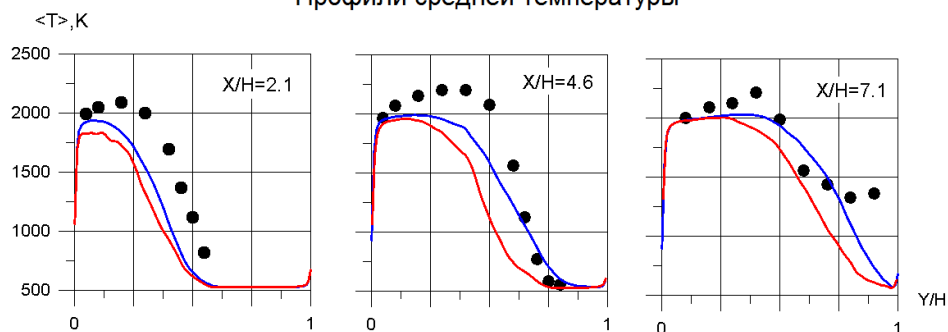


Продольное YX и поперечное YZ
сечение расчетной области

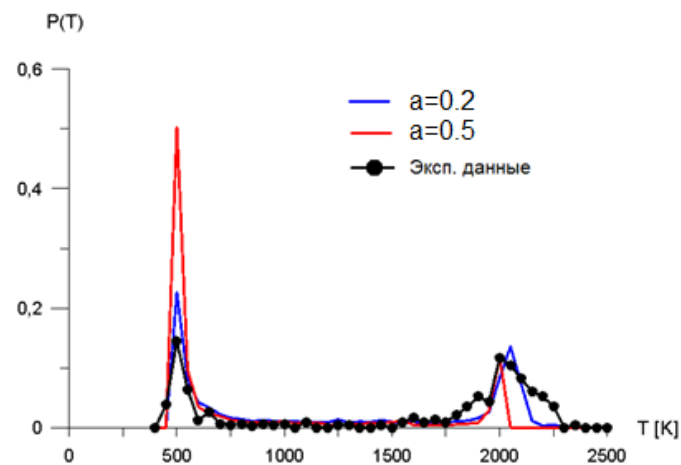
Сопоставление расчётных и экспериментальных данных для турбулентного горения за уступом



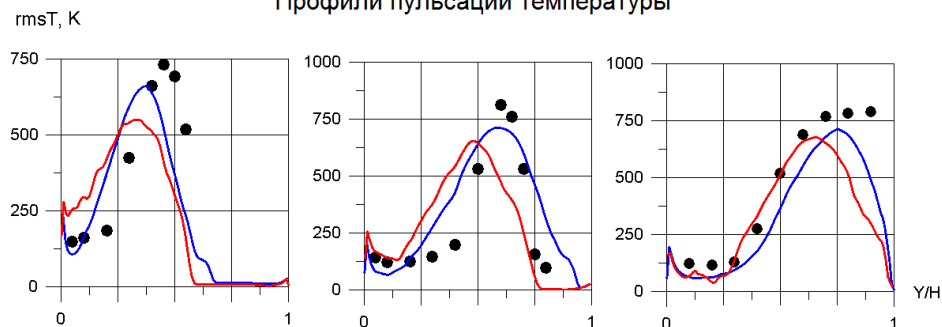
Профили средней температуры



Функция распределения температуры

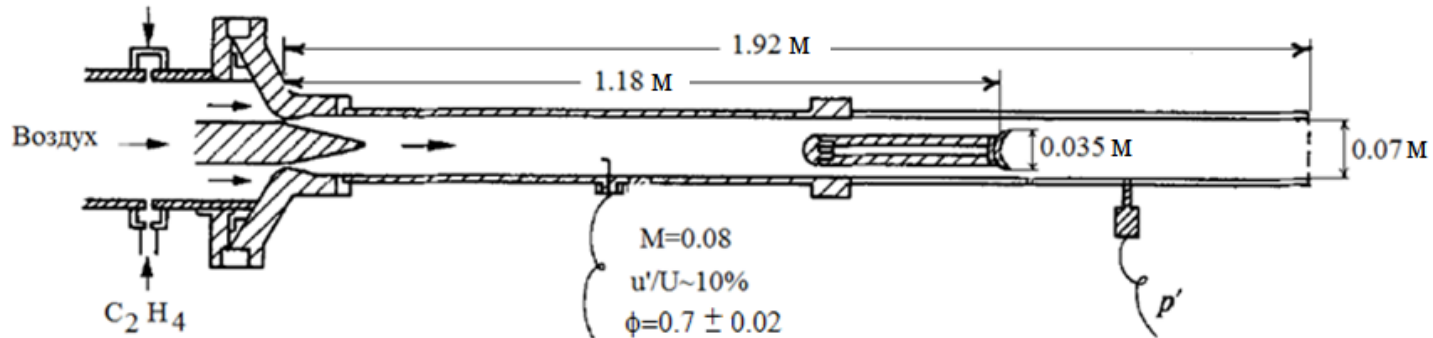


Профили пульсаций температуры



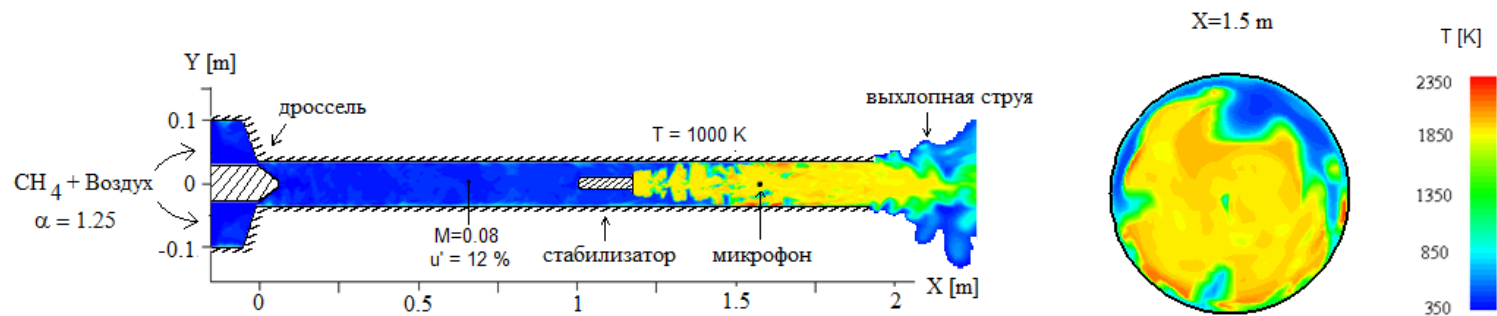
Расчёт спектра автоколебаний в лабораторной установке

Эскиз установки [J . Fluid Mech. Langhorne 1988]



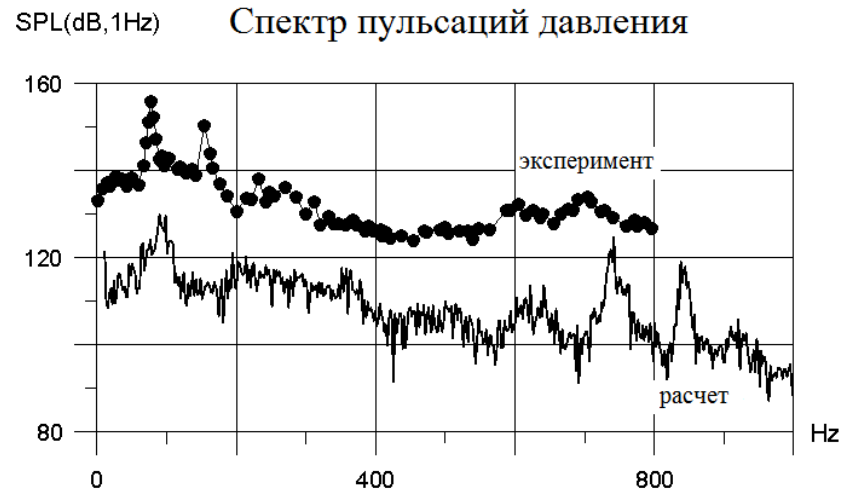
Особенности постановки расчёта

Распределение температуры

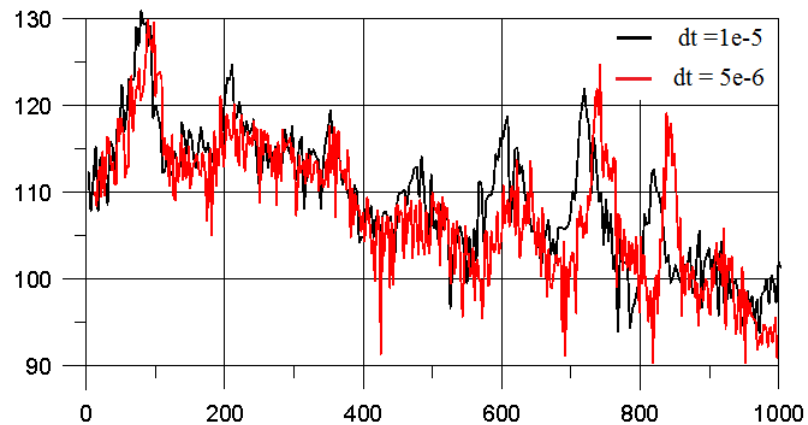


Кол – во узлов расчётной сетки
 500*120*80

Сопоставление спектров автоколебаний



Влияние шага по времени



Резюме

В данной работе предложена методика моделирования турбулентного горения и термо - акустических колебаний в камерах сгорания, работающих на углеводородных топливах.

Методика основана на моделирование крупных вихрей совместно с одной суммарной реакцией окисления метана и квази - ламинарном подходе к разрешению локального взаимодействия турбулентности и горения. Даны рекомендации по выбору констант модели, - уменьшение степени при концентрации метана в выражении для скорости реакции позволяет описывать высоко Рейнольдсовы особенности структуры фронта пламени, при этом возможно появление вычислительных осцилляций.

Продемонстрировано, что предложенная методика позволяет моделировать основные характеристики турбулентного горения и термо - акустических автоколебаний в лабораторных камерах сгорания при умеренных вычислительных затратах.

Спасибо за внимание!