

Программа *zFlare* для численного моделирования турбулентных течений с горением

В.В. Власенко, С.С. Молев, А.И. Трошин
 ФАУ «ЦАГИ»



План доклада

- **Введение**
- Физические модели
- Численные методы
 - общий подход
 - аппроксимация по пространству
 - аппроксимация по времени
- Примеры расчетов
 - базовые URANS-расчеты, течение воздуха
 - вихреразрешающие тесты, течение воздуха
 - задачи с горением
- Выводы

Введение (1)

- Лаборатория физического и численного моделирования течений с горением
 - создана в 2017 году
 - разработана программа *zFlare* для расчета 3D нестационарных течений вязкого газа с горением в каналах в рамках подходов URANS и DES
 - получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019610822 от 18 января 2019 г.



<http://tsagi.ru/institute/lab220/>

Введение (2)

- zFlare входит в состав пакета программ “Электронная аэродинамическая труба” (EWT-ЦАГИ) →
 - базируется на библиотеке ZEUS (С.В. Михайлов, ЦАГИ)
 - написана на языке C++
 - является набором консольных приложений с возможностью запуска в средах MS Windows и Linux, в том числе на суперкомпьютерах
 - расширяет возможности базовых солверов пакета EWT-ЦАГИ в области моделирования
 - нестационарных течений
 - турбулентности
 - многокомпонентного газа
 - неравновесных химических реакций в широком диапазоне условий



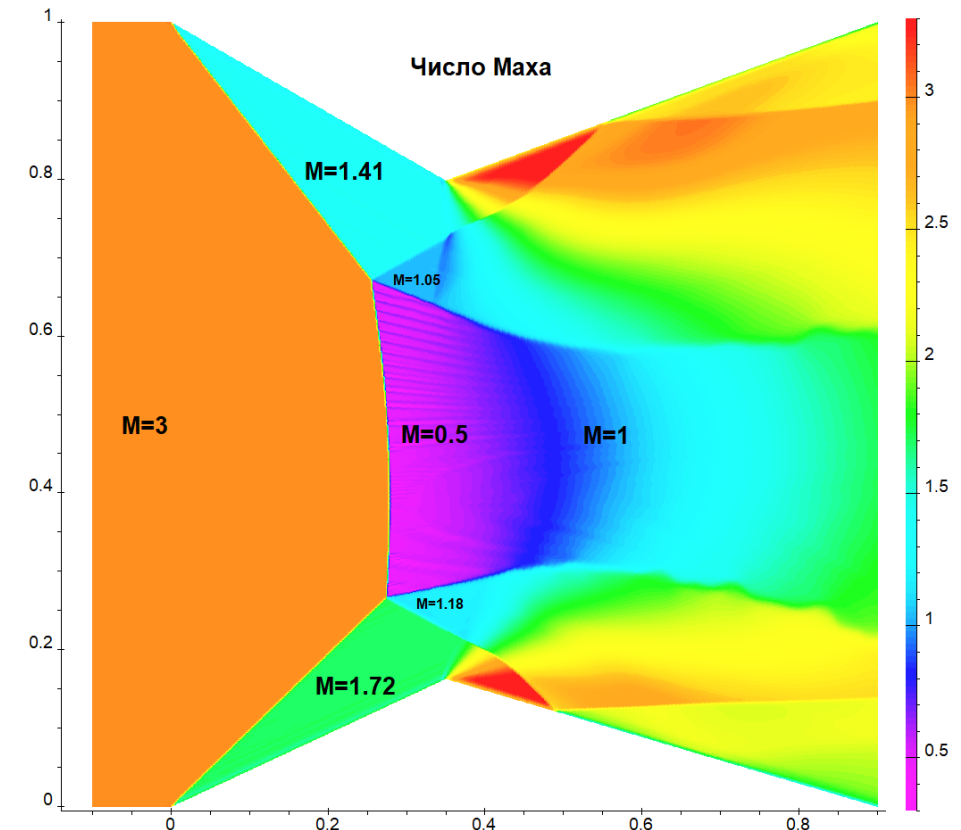
План доклада

- Введение
- **Физические модели**
- Численные методы
 - общий подход
 - аппроксимация по пространству
 - аппроксимация по времени
- Примеры расчетов
 - базовые URANS-расчеты, течение воздуха
 - вихреразрешающие тесты, течение воздуха
 - задачи с горением
- Выводы

Физические модели (1)

➤ Однокомпонентный газ

- уравнение состояния $p = \rho RT$, $R = const$, $C_p/C_v = const$
- линейная зависимость энтальпии от температуры: $h = C_p T$
- учет молекулярной вязкости и теплопроводности:
 - $\mu = 0$ (уравнения Эйлера)
 - $\mu = const > 0$ (уравнения Навье–Стокса с постоянной вязкостью)
 - $\mu = \mu(T)$ по формуле Сазерленда
 - во всех случаях $\lambda = \mu C_p / Pr$, $Pr = const$
- моделирование турбулентности
 - стационарные и нестационарные уравнения Рейнольдса (RANS/URANS)
 - метод моделирования крупных вихрей (LES)
 - гибридные RANS/LES-методы расчета пристеночных течений (DDES, IDDES и собственные наработки)



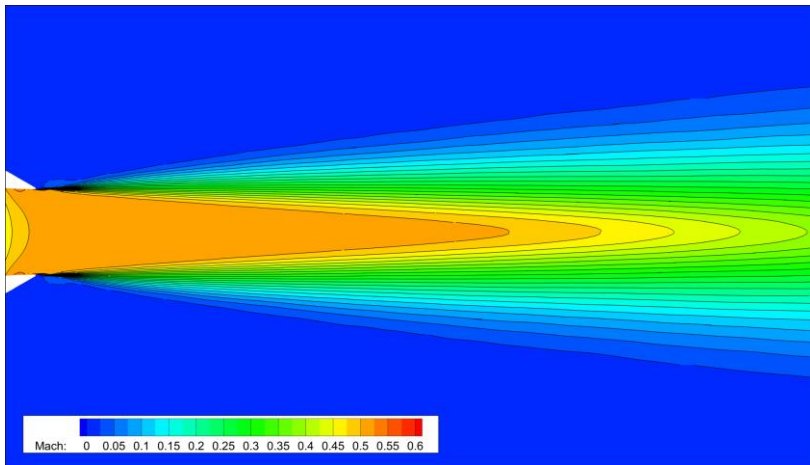
Физические модели (2)

➤ Модели турбулентности (URANS):

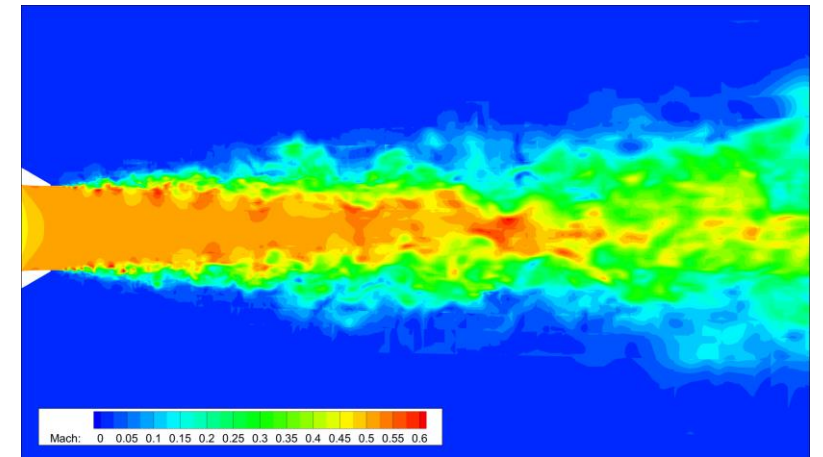
- SST
- варианты DRSM:
 - SSG/LRR- ω
 - Jakirlić & Maduta
 - собственные наработки на базе этих моделей
- SA
- $q-\omega$ (поддерживается в старых версиях кода)

➤ Подсеточные модели:

- Смагоринский
- на базе модели SA
- на базе модели SST
- дифференциальные модели подсеточных напряжений (DSM)



варианты RANS/LES-гибридизации



Физические модели (3)

➤ Многокомпонентный газ

➤ уравнение состояния $p = \rho RT$, $R = R(\mathbf{Y})$, $\kappa = \kappa(T, \mathbf{Y})$, где \mathbf{Y} — столбец массовых долей компонент

➤ зависимости энтальпии от температуры:

– квадратичная: $h(T) = AT^2 + BT + C$

– многочлены А. Бурката пятой степени:

$$h(T) = A_5T^5 + A_4T^4 + \dots + A_0$$

➤ кинетические схемы

– горение водорода:

– усеченные схемы: Моретти, Давиденко, Яхимовский

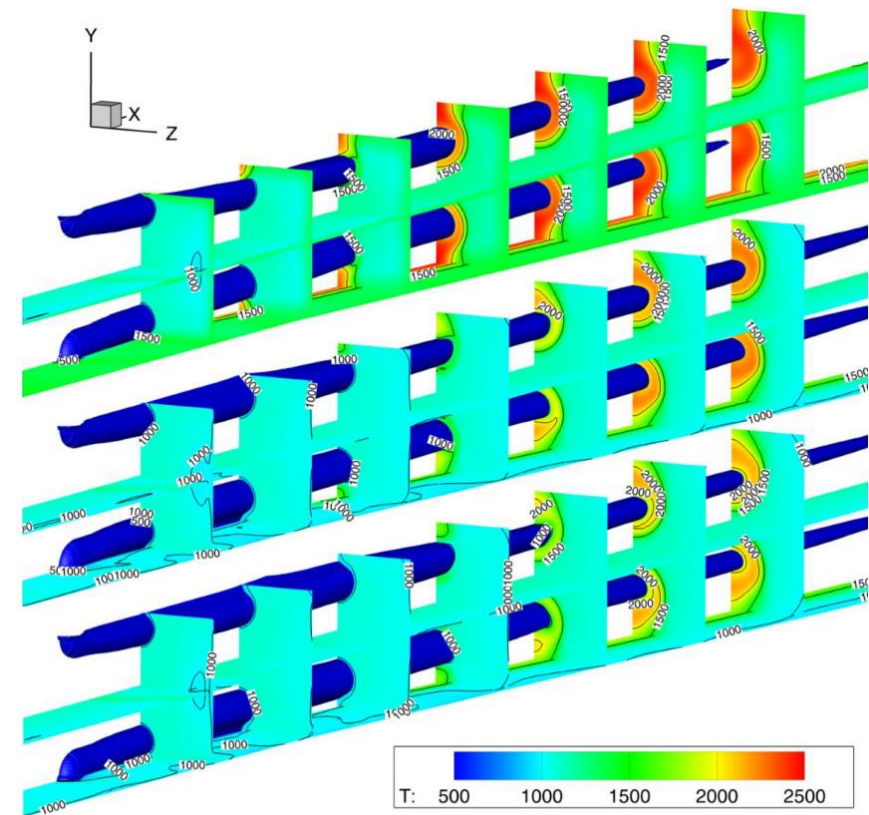
– детальные схемы: Яхимовский, Фюрби

– горение углеводородных топлив:

– квазиглобальные схемы: метан, этилен, пропан

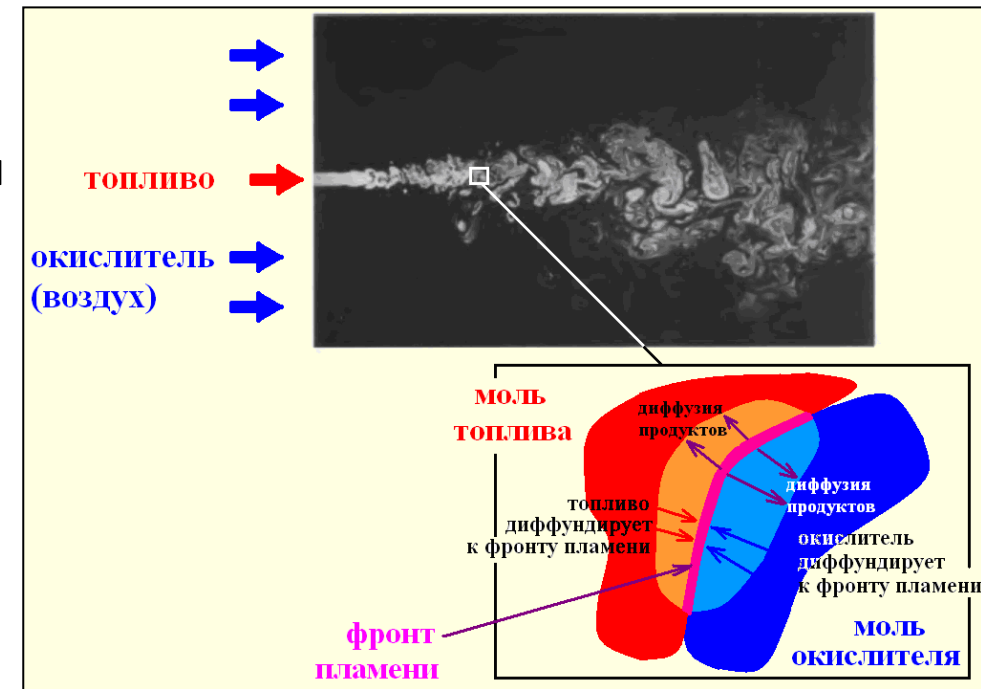
– скелетные механизмы: метан, этилен*, декан*

*Скелетные механизмы разработаны ООО КинТех (С)



Физические модели (4)

- Модели турбулентности для многокомпонентного реагирующего газа:
 - SST в режиме URANS и гибридные методы на ее основе: DDES, IDDES
 - $q-\omega$ в режиме URANS (поддерживается в старых версиях кода)
- Методы вычисления средних скоростей химических реакций
 - квазиламинарное приближение
 - флеймлеты
 - методы частично перемешанного реактора (PaSR / EPaSR)
- Учет влияния тепловыделения на турбулентный перенос
 - модель переменных чисел Прандтля и Шмидта



Физические модели (5)

➤ Граничные условия

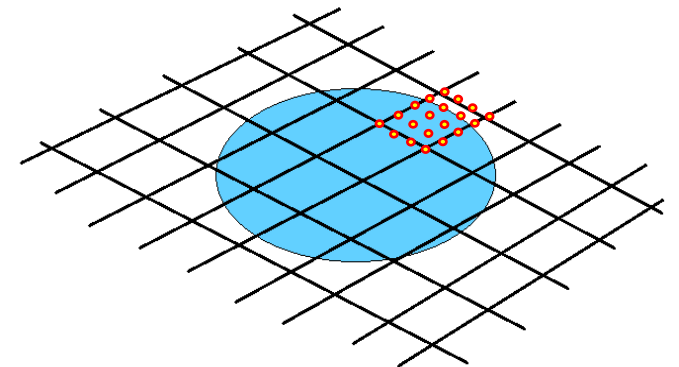
- вход
 - параметры невозмущенного потока
 - мягкое ГУ с заданием p_0 и T_0
- выход
 - экстраполяция решения
 - задание p
- плоскость симметрии
- стенка с прилипанием потока
 - при постоянной температуре
 - с постоянным тепловым потоком
 - адиабатическая

➤ Детализация течения вблизи стенки

- интегрирование до стенки
- пристеночные функции

➤ Дополнительные физические эффекты

- условие инъекции без согласования сеточных линий
- учет шероховатости поверхности

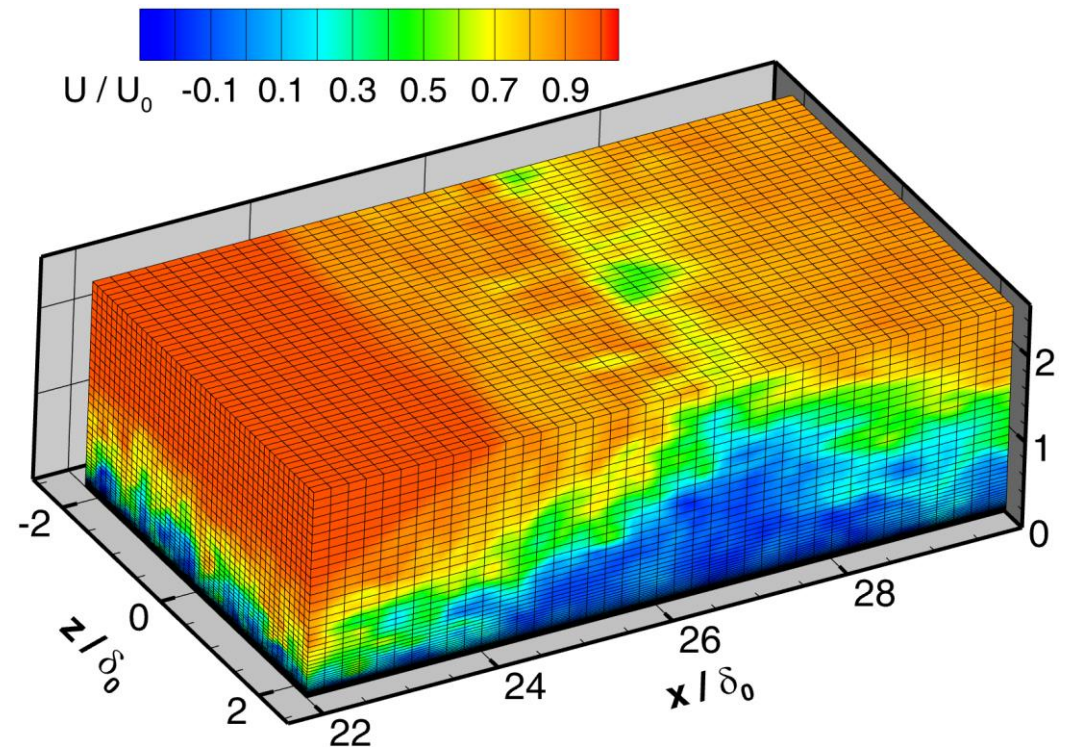


План доклада

- Введение
- Физические модели
- **Численные методы**
 - общий подход
 - аппроксимация по пространству
 - аппроксимация по времени
- Примеры расчетов
 - базовые URANS-расчеты, течение воздуха
 - вихреразрешающие тесты, течение воздуха
 - задачи с горением
- Выводы

Численные методы: общий подход

- Метод конечных объемов
- Структурированные многоблочные сетки
 - допускаются разрывы сеточных линий на границах блоков
 - возможность поблочного MPI-распараллеливания (протестировано на 3000 процессорных ядрах)
- Предположение о линейности распределений параметров в ячейках (2 порядок точности по пространству)
- Внимание уделяется корректности аппроксимации по времени



Численные методы: аппроксимация по пространству

Конвективные потоки

- Для RANS/URANS-расчетов:
 - TVD-схемы с реконструкциями ван Лира, Колгана (2 порядок) либо Годунова (1 порядок)
 - варианты низкодиссипативной WENO5-схемы (базовый вариант, «оптимальные» веса, MP-монотонизация)
 - на гранях — точное решение задачи о распаде разрыва либо метод Роу

- Для RANS/LES- и LES-расчетов:
 - CD2: «центрально-разностная» схема 2 порядка с возможностью смешивания с противопоточной схемой
 - гибридная схема Е.К. Гусевой (СПбПУ): MPWENO5 в RANS-областях, CD2 в LES-областях

Диффузионные потоки и источниковые члены

- «центрально-разностная» схема 2 порядка точности

Численные методы: аппроксимация по времени

- Базовые подходы:
 - явные методы Рунге–Кутты с глобальным шагом по времени (1–4 порядки точности)
 - явные методы Рунге–Кутты с локальным шагом по времени для стационарных задач
 - для источников в уравнениях на концентрации компонент — неявный метод 2 порядка точности с центральной точкой

- Способы ускорения описания нестационарных процессов:
 - дробный шаг по времени на основе явных методов Рунге–Кутты
 - адаптивно-неявная схема
 - диагонально-неявные методы Рунге–Кутты (DIRK) — экспериментальный функционал

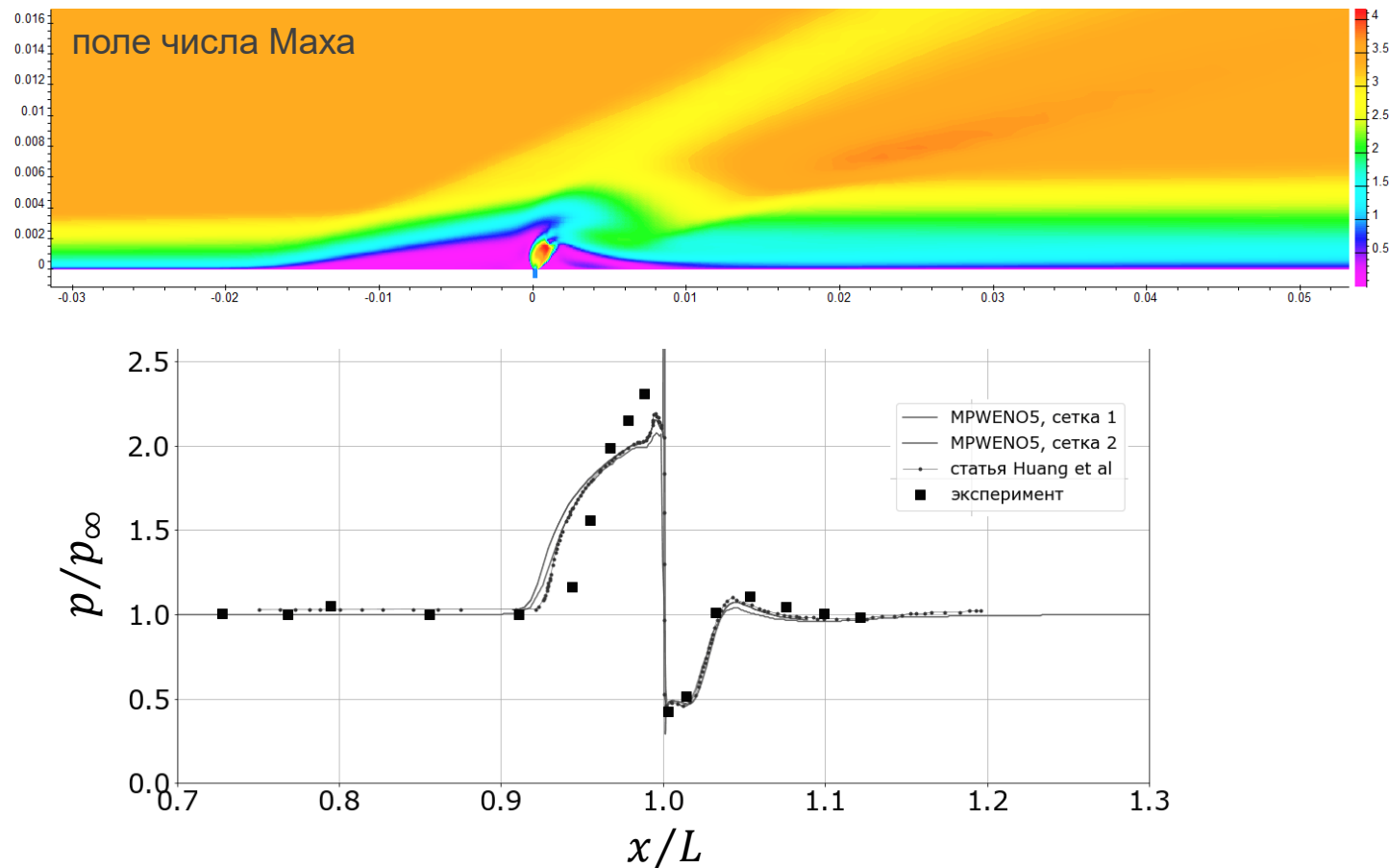
План доклада

- Введение
- Физические модели
- Численные методы
 - общий подход
 - аппроксимация по пространству
 - аппроксимация по времени
- **Примеры расчетов**
 - базовые URANS-расчеты, течение воздуха
 - вихреразрешающие тесты, течение воздуха
 - задачи с горением
- Выводы

Примеры расчетов: URANS, течение воздуха

- эксперимент Spaid & Zukoski (1968) по выдуву плоской струи в сверхзвуковой поток
- RANS, стационарное течение
- модель турбулентности SST
- схема MPWENO5

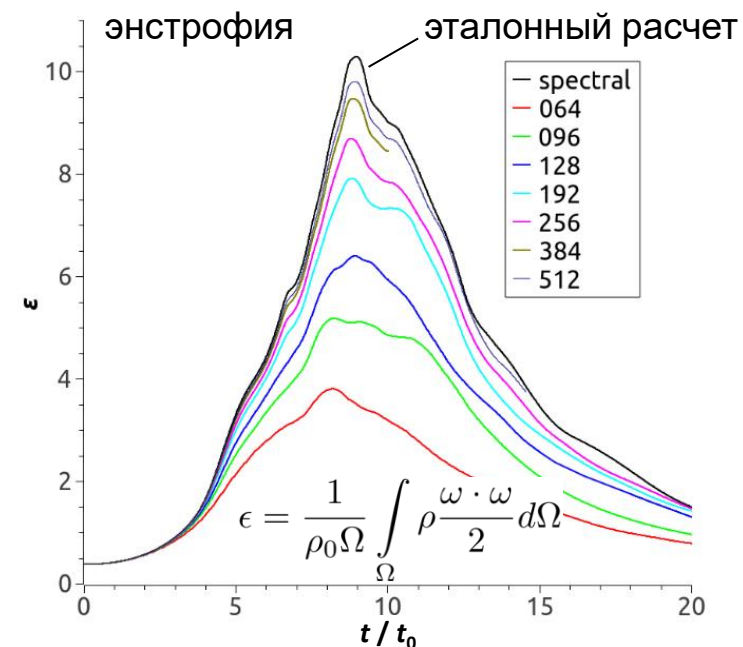
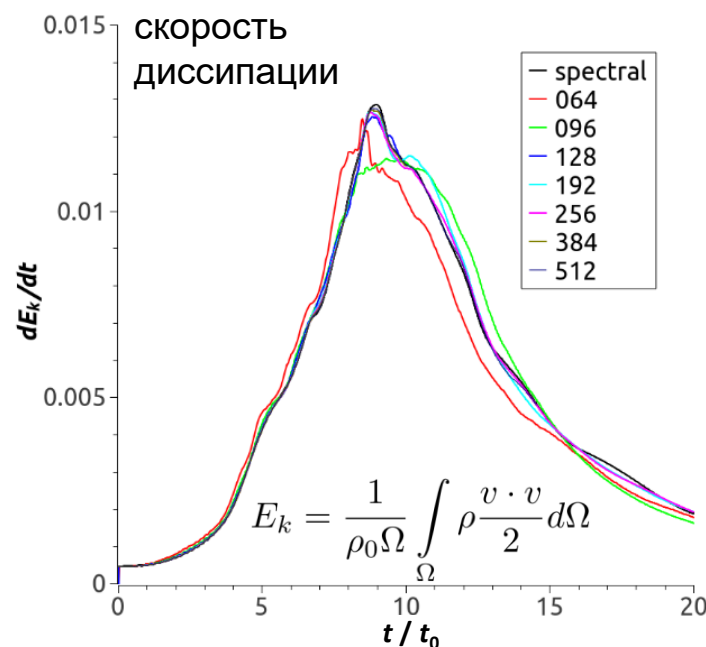
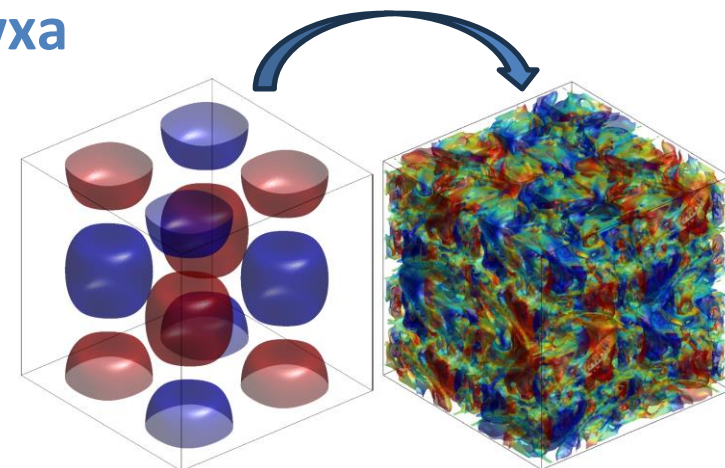
- воспроизведено распределение давления по стенке
- продемонстрирована сеточная сходимость



Примеры расчетов: LES, течение воздуха

- задача о вихре Тейлора–Грина
- DNS/ILES
- схема MPWENO5 по пространству
- явная схема RK SSP5 по времени

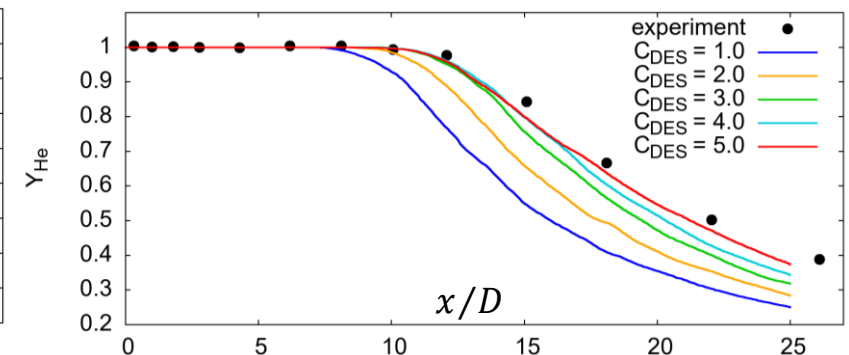
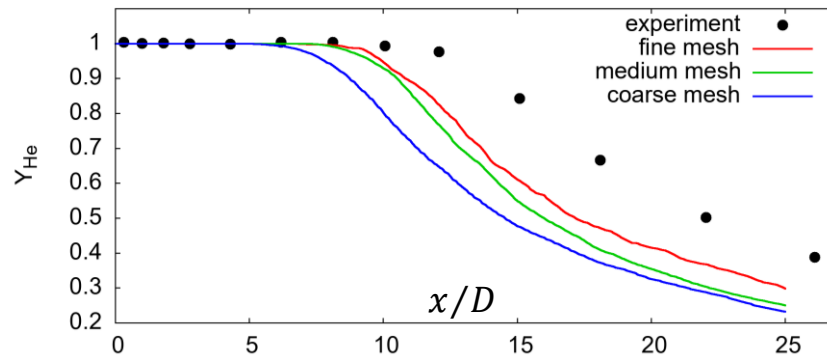
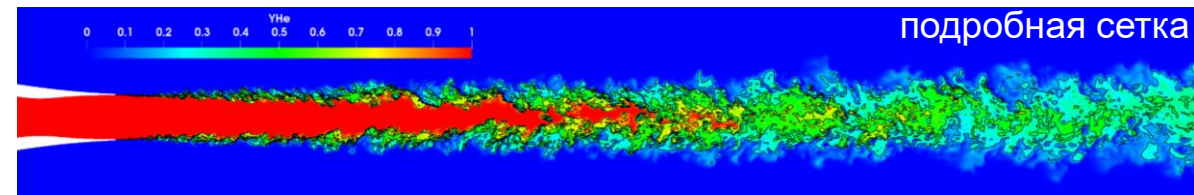
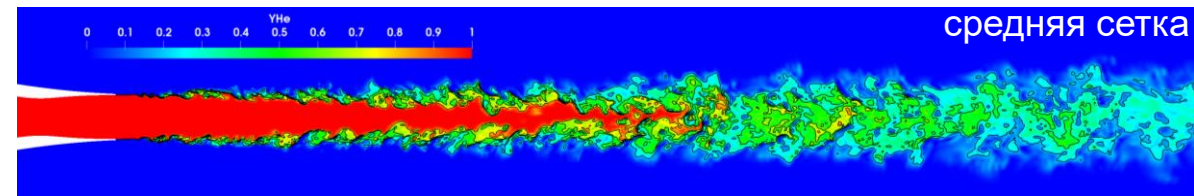
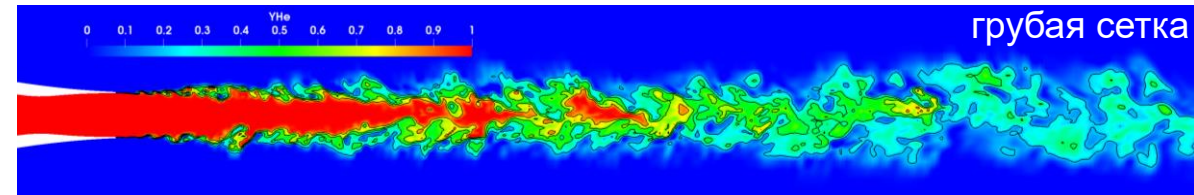
- воспроизведена скорость диссипации кинетической энергии турбулентности
- продемонстрировано приближение энтрофии к эталонному распределению с измельчением сетки



Примеры расчетов: LES, смешение гелия с воздухом

- эксперимент Катлера (2006)
- спутная струя гелия в потоке воздуха
- SST-DDES
- гибридная схема по пространству
- явная схема RK SSP5 по времени
- сетки 1.3, 10 и 83 млн ячеек

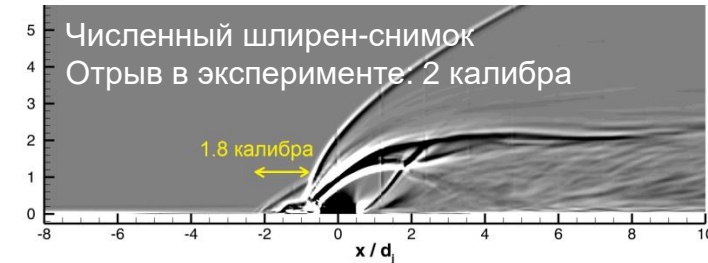
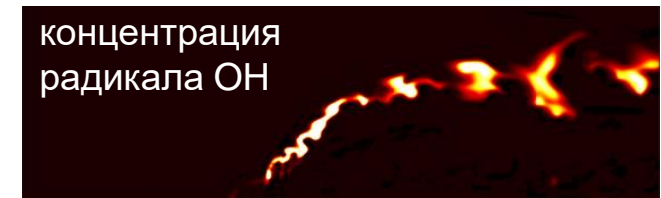
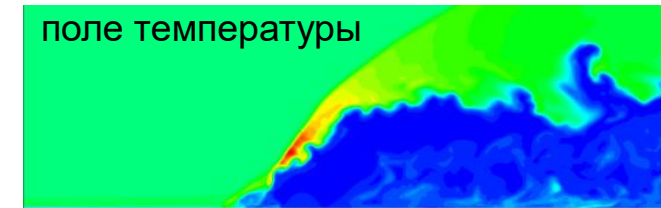
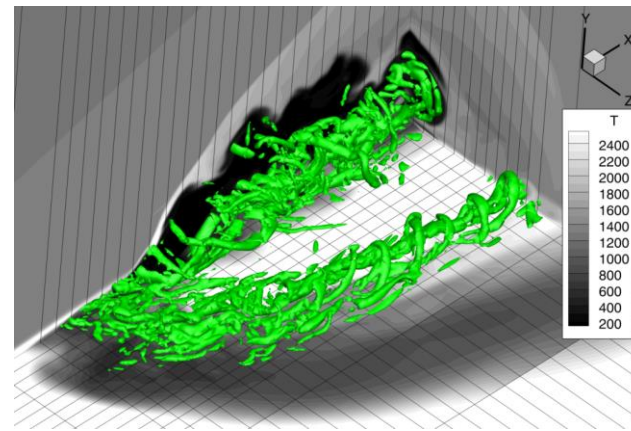
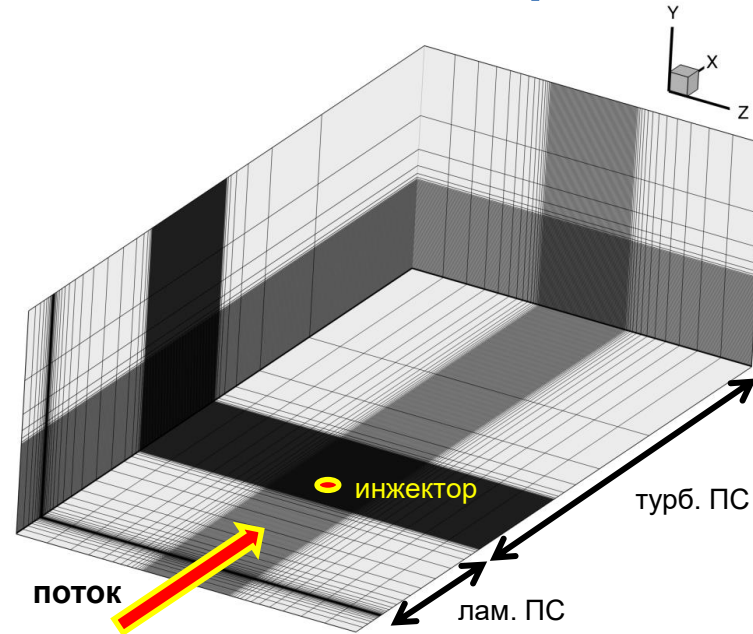
- показано, что на описание диффузии гелия существенно влияет подсеточная модель
- влияние сеточного разрешения более слабое



Примеры расчетов: самовоспламенение поперечной струи водорода

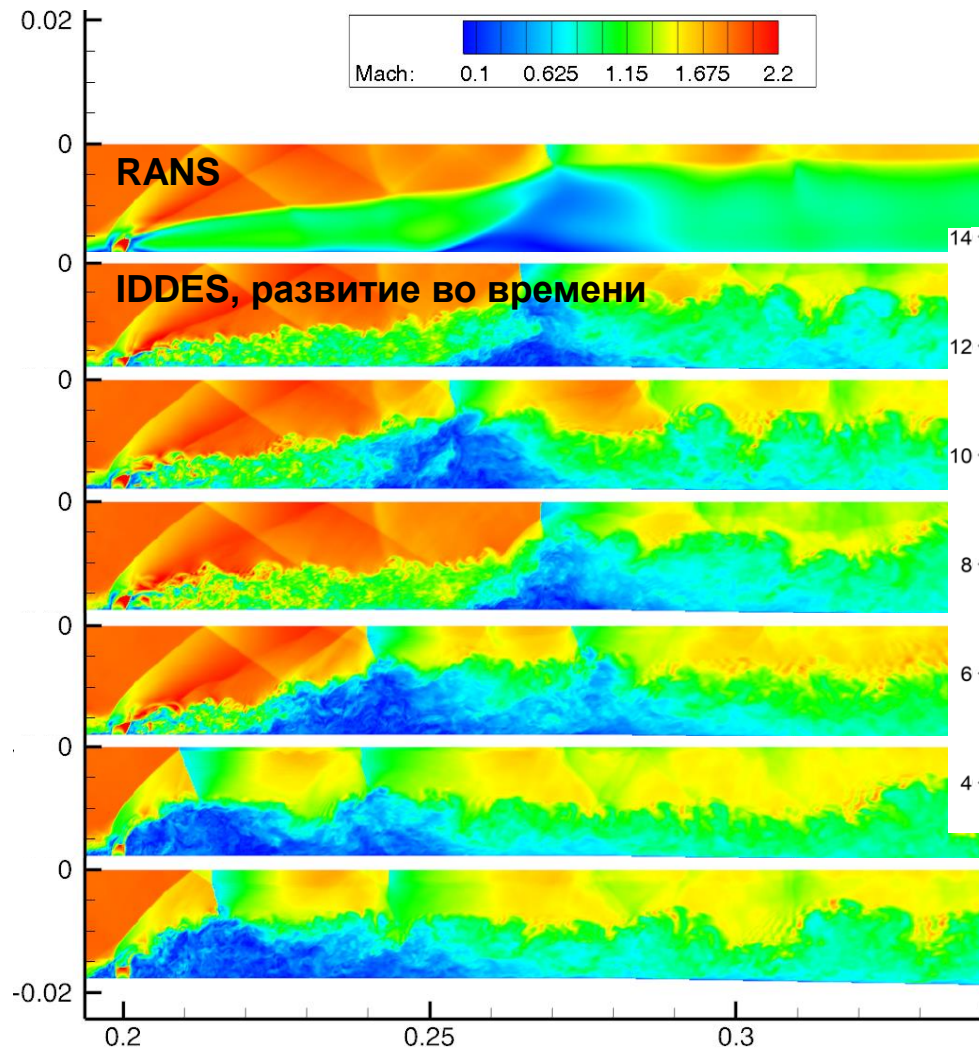
- эксперимент Бен-Якар (2000)
- поперечная струя водорода в горячем высокоскоростном потоке воздуха
- SST-DDES
- гибридная схема по пространству
- явная схема RK SSP5 по времени
- сетка 22 млн ячеек

- в расчете получена структура течения, согласующая с физическими измерениями
- размер отрыва описан с точностью 10%
- глубина проникновения струи описана с точностью 6%

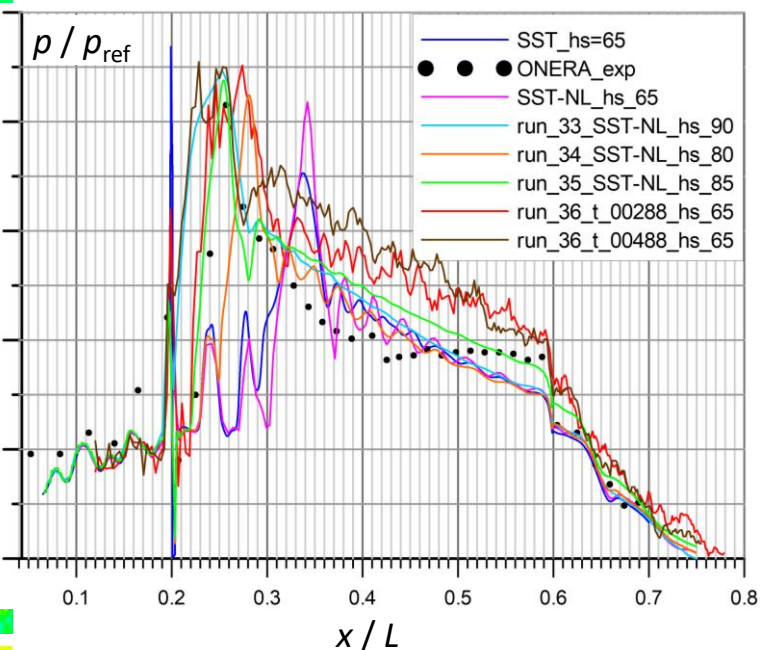


Примеры расчетов: течение в экспериментальной модели ONERA

- эксперимент Венсан-Рандонье и др. (2014)
- поперечная струя водорода в горячем высокоскоростном потоке воздуха
- SST-IDDES
- гибридная схема по пространству
- адаптивно-неявная схема
- сетка 104 млн ячеек
- проанализировано взаимодействие ударно-волновой структуры с процессом горения
- установлены наиболее значимые физические факторы, влияющие на структуру течения



распределение давления по стенке



План доклада

- Введение
- Физические модели
- Численные методы
 - общий подход
 - аппроксимация по пространству
 - аппроксимация по времени
- Примеры расчетов
 - базовые URANS-расчеты, течение воздуха
 - вихреразрешающие тесты, течение воздуха
 - задачи с горением
- **Выводы**

Выводы

- Программа *zFlare* прошла тестирование и пригодна для расчетов 3D нестационарных течений вязкого газа с горением в каналах в рамках подходов URANS и DES
- *zFlare* является собственным научным солвером с возможностью тонкой настройки под конкретные задачи
- *zFlare* продолжает активно развиваться в сторону расширения функционала

- Публикации:
 - А.И. Трошин, С.С. Молев, В.В. Власенко, С.В. Михайлов, С. Бахнэ, С.В. Матяш. Моделирование турбулентных течений на основе подхода IDDES с помощью программы *zFlare* // Вычислительная механика сплошных сред. 2023, Т. 16, № 2, с. 203–218.
 - В. В. Власенко и др. Опыт тестирования и применения программы *zFlare* для численного моделирования течений с горением в каналах // Труды ЦАГИ. 2022, выпуск 2810, с. 34–98.