

Пакет расчётных программ HSFlow: развитие кода, новые модели физхим процессов и ключевые задачи

Александров Сергей
(представляя группу разработчиков и пользователей
HSFlow)

МФТИ, ЦАГИ
splavgm@gmail.com

1 декабря 2018 г.

Содержание

- 1 О пакете
- 2 Разработка
 - Инструменты разработки
 - C++-11/14
- 3 Физико-химические процессы
 - AUSM+-up
 - Модели
 - Примеры расчётов
- 4 Частицы
 - Обзор
 - Метод
 - Выводы
- 5 Обзор задач
 - Hexafly
 - Вихри Гётлера в углу сжатия
 - Турбулиизация с помощью микроструй

Кратко о пакете

- HSFlow = High-Speed Flow solver (МФТИ, НИО-8 ЦАГИ)
- Решение нестационарных уравнений Навье-Стокса и Рейнольдса в двухмерной, осесимметричной и трёхмерной постановках
- Моделирование неравновесных физико-химических процессов
- Неявный численный метод конечного объёма второго порядка точности по пространству и времени
- Схема TVD типа Годунова. Реконструкция на грани ячейки minmod и WENO3. Распад разрыва по методу Roe.
- Структурированные многоблочные расчётные сетки
- Формат для хранения расчётных сеток и полей течений – международный стандарт CGNS (CFD General Notation System)

Кратко о пакете

- Язык программирования: C и C++. Утилиты и скрипты обработки: Python.
- Библиотека PETSc для параллельных матрично-векторных операций
- Стандарт распределённых вычислений MPI
- Кроссплатформенный код: поддержка Windows и Linux
- Основные компиляторы: Intel C++, GCC, MSVC. Вторичные: Clang.

Разработка

Инфраструктура

- git (давно)
- за год:
2165 files changed, 119643 insertions(+), 88825 deletions(-)
- Веб интерфейс (gogs/gitea)
- Модель разработки на основе запросов на принятие изменений (Pull requests)
 - ▶ Несколько человек знают, что происходит и как это работает
 - ▶ Мотивация к качеству кода и комментариев

The screenshot shows the Gitea web interface for the repository **TsAGI / HSFlow**. At the top, there are navigation links: Dashboard, Issues, Pull Requests, and Explore. The repository name is displayed with a lock icon, and statistics show 8 Unwatch, 0 Stars, and 0 Forks. Below the repository name, there are tabs for Files, Issues (7), Pull Requests (2), and Wiki, along with a Settings link. The main content area shows the repository name **HSFlow (High Speed Flow) solver** and statistics: 2485 Commits, 16 Branches, and 0 Releases. A green button with a refresh icon is visible. Below this, there is a section for recent commits. The first commit is by **Александров Сергей** (commit hash 3ffaaceda5) titled "Merge branch 'NovA' of TsAGI/HSFlow into master" from 1 week ago. Below this, there is a list of files with their commit hashes and descriptions:

File	Commit Hash	Description	Time
build	2965f2a1e1	[-] build: NS.2D: Visual Studio	2 months ago
include	c7bede9423	[*] core: debugging asserts & comments	3 months ago
plugins	aed3cac2cc	[*] phys/uni-BCExtrapolate: more robust default kind	1 month ago

Зачем?

- Умные указатели
- Делегирующие конструкторы
- Списки инициализации
- Лямбда-функции
- Вывод типов
- for range
- Семантика перемещения

Поддержка стандартов

Компилятор	C++-11	C++-14
GCC	4.8.1 (2013)	4.9 (2014)
Clang	3.3 (2013)	3.4 (2014)
Intel C++	15.0*	17.0*
MSVC	2015	2017

Пора?

Физико-химические процессы

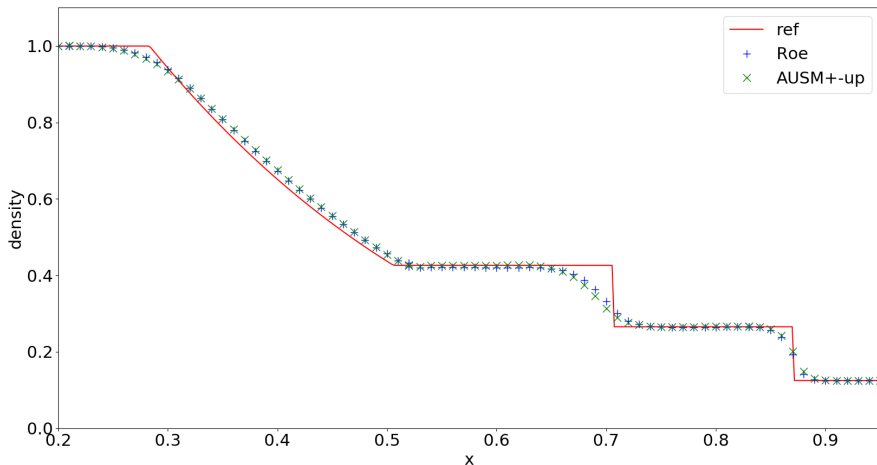
AUSM+-up for all systems

Зачем:

- Просто обобщается для RANS, многокомпонентного газа, неравновесных колебательных температур
- Отсутствует* эффект "карбункула"
- Подходит для широкого диапазона чисел Маха
- Прост в реализации
- Не склонен к забросам

Семейство AUSM насчитывает много вариантов, стоит обратить на него внимание.

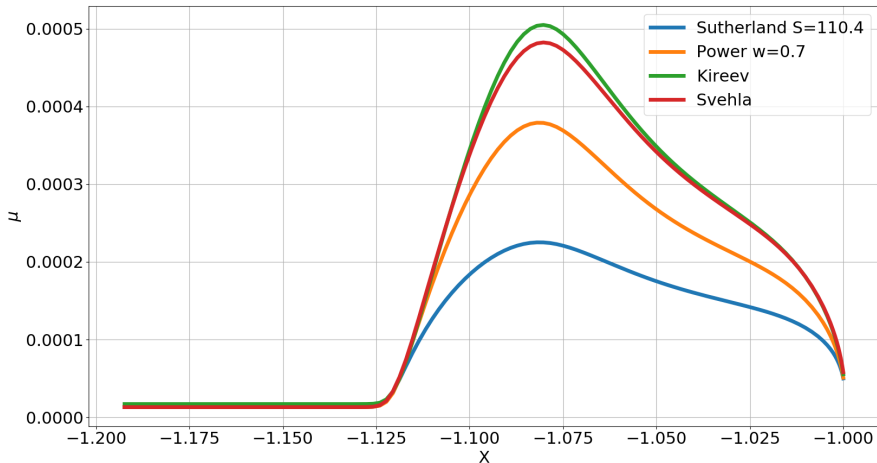
AUSM+-up тест Суда, TVD, minmod, nx=100



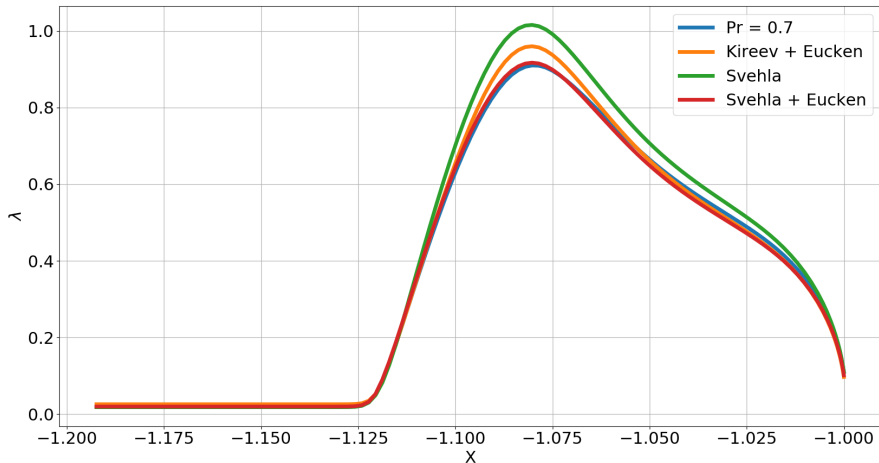
Вязкость и теплопроводность

- Вязкость для компонент смеси (Svehla 1995, Gupta 1990)
- Теплопроводность через соотношение Эйкена с поправкой Хиршфельдера
- Вязкость и теплопроводность смеси без ионизации (Wilke 1950, Mason-Saxena 1958)
- Вязкость и теплопроводность смеси с ионизацией (Armaly-Sutton 1980, 1981)

Вязкость



Теплопроводность



Неравновесные колебательные температуры

- Модель гармонического осциллятора для колебательных степеней свободы (*)

$$e_{ve,m} = R_s \frac{\theta_{v,s}}{\exp(\theta_{v,s}/T_{ve,s}) - 1}$$

- Модель колебательной релаксации Ландау-Теллера

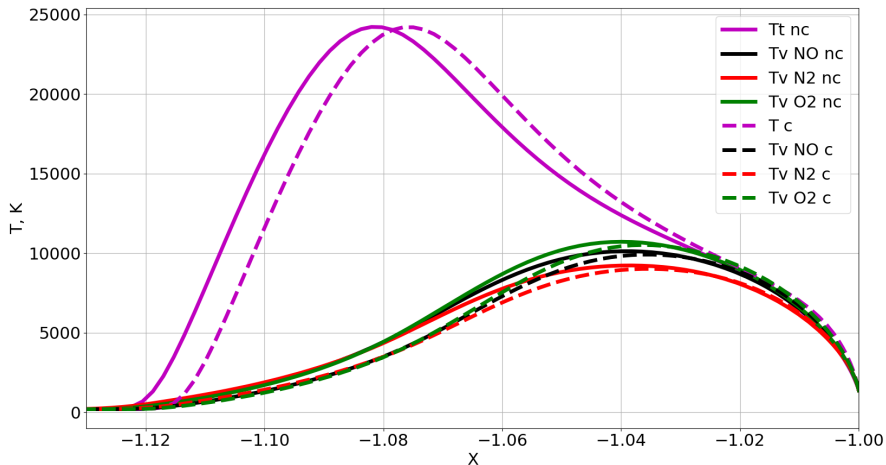
$$Q_{m,V-T} = \rho_m \frac{\partial e_{ve,m}(T_{ve,m})}{\partial t} = \rho_m \frac{e_{ve,m}(T_{tr}) - e_{ve,m}(T_{ve,m})}{\tau_{m,V-T}}$$

$$\tau_{m,V-T} = \frac{\sum X_s}{\sum X_s / \tau_{m-s,V-T}}$$

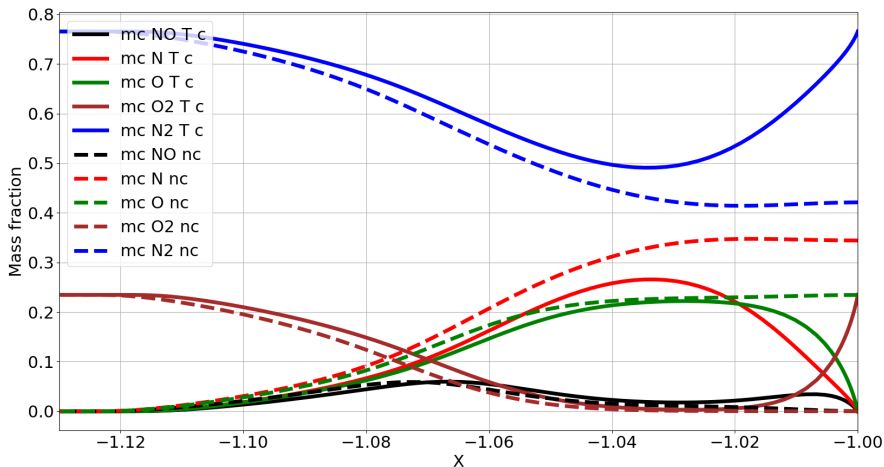
- Полуэмпирическая зависимость для времени релаксации Миликана-Уайта + поправка Парка

$$\tau_{m-s,V-T} = \tau_{m-s,V-T}^{MW} + \tau_{m-s,V-T}^P$$

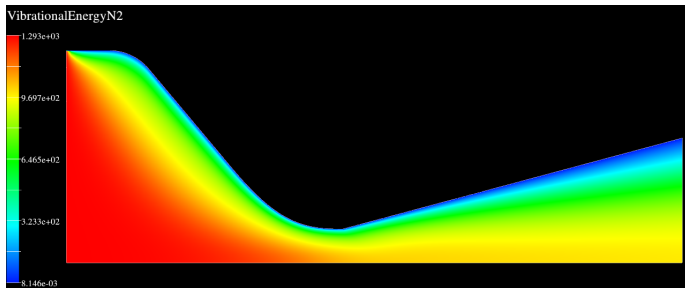
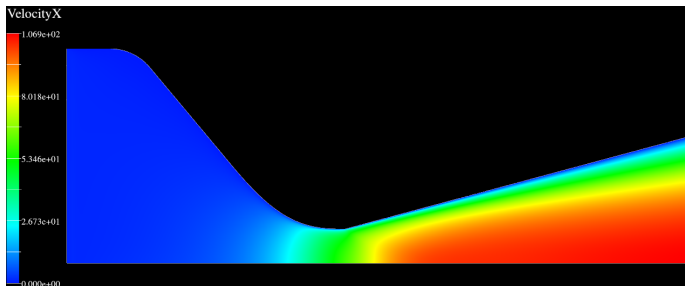
Сфера, $R = 0.5$ м, $V = 8$ км/с. Колебательные температуры



Массовые доли



Пример расчёта сопла BAT-104. $T_0 \approx 9000K$, $M = 5$



Частицы

Вводная

- Частицы могут провоцировать ранний ЛТП, как в полёте, так и в трубных условиях
- Для гладких поверхностей могут служить главным фактором ЛТП в полёте при $M > 1$
- Исследовался случай возбуждения неустойчивых мод в пограничном слое по мере прохождения через него
- $R_p = 10 \dots 20$ нм, $\rho_p \geq \rho_{H_2O}$

Метод моделирования возмущений в потоке

- $R_p \ll \delta_{BL}$ - источник точечный
- Частица влияет на поток - объёмные источники

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j) &= 0 \\
 \frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j + p \delta_{ij}) &= \frac{1}{\text{Re}} \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \boxed{R_p^2 \bar{F}_{pi} \delta(\vec{x} - \vec{x}_p)} \\
 \rho \left[\frac{\partial T}{\partial t} + u_j \frac{\partial T}{\partial x_j} \right] &= \frac{1}{\text{Pr Re}} \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) + (\gamma - 1) M_\infty^2 \left(\frac{\partial p}{\partial t} + u_j \frac{\partial p}{\partial x_j} \right) + \frac{(\gamma - 1) M_\infty^2}{R} \Phi + \\
 &+ \boxed{\frac{\bar{r}}{\text{Pr Re}} \bar{Q}_p \delta(\vec{x} - \vec{x}_p)} + \boxed{R_p^2 (\gamma - 1) M_\infty^2 (u_{pj} - u_j) \bar{F}_{pj} \delta(\vec{x} - \vec{x}_p)} \\
 \gamma M_\infty^2 p &= \rho T
 \end{aligned}$$

$\delta(\vec{x} - \vec{x}_p)$
 Dirac delta function

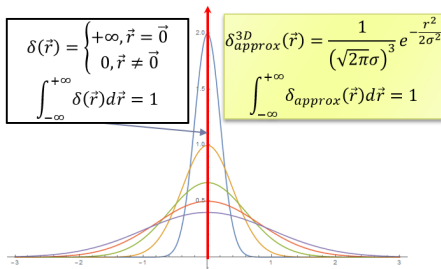
$$\bar{F}_{pi} = C_D \frac{\rho}{2} |\vec{u} - \vec{u}_p| (u_{ip} - u_i) \pi = O(1)$$

$$\bar{Q}_p = 2\pi \text{Nu}(T_p - T) = O(1)$$

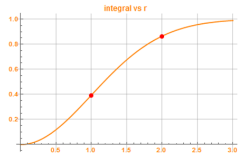
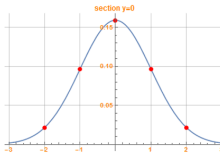
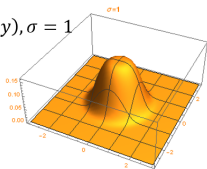
$r \gg 1/(\gamma - 1) M_\infty^2 \text{Pr} R$

Аппроксимация дельта-функции

Для $h_x = \sigma$, δ -функция разрешается 7 точками



$\delta(x, y), \sigma = 1$



Верификация по сеткам

$$\sigma = 10^{-4}$$

6×6	12×12	24×24
sym: 0.0% (<i>base</i>) noSym: +1.5%	sym: -0.7%	sym: + 0.5%

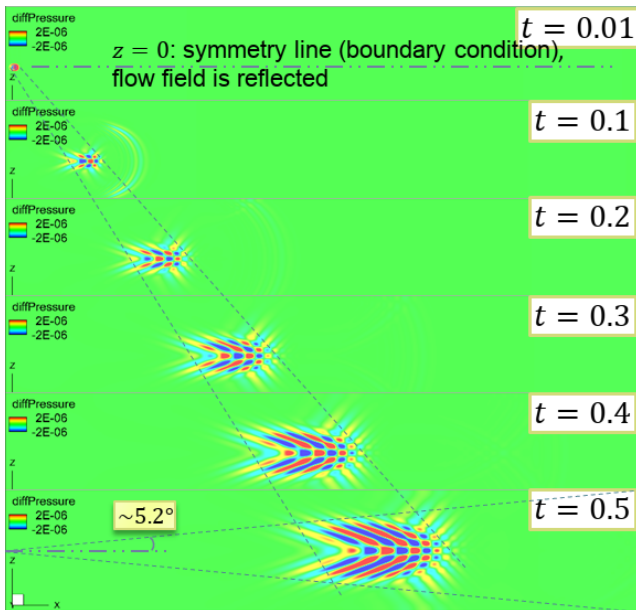
$$\sigma = 5 \times 10^{-5}$$

	$pps_x = 3$	6	12
$pps_z = 3$	noSym: +3.2%		
6	sym: +0.5%	sym: 0.0% (<i>base</i>) noSym: +0.6%	sym: +0.1%
12		sym: -1.5% noSym: +0.5%	sym: + 2.1% noSym: 0.0%

$$\Delta p_{w,\max}^{sym} \equiv \frac{p_{w,\max}^{sym} - p_{w,\max,b}^{sym}}{p_{w,\max,b}^{sym}}$$

pps - точек на источник

Пример следа

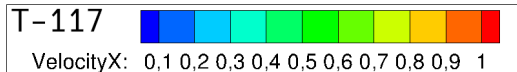


Выбор параметров

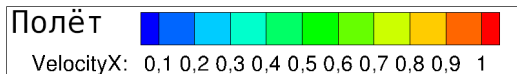
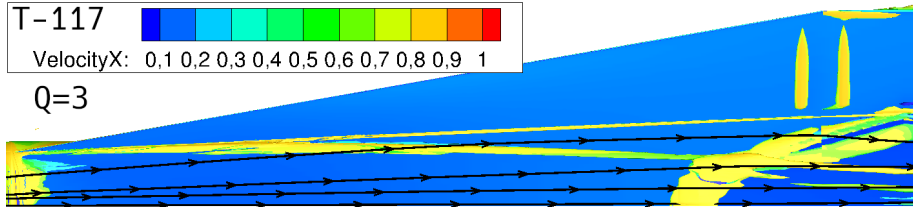
- 2D: $h_x < 2\sigma$ - разрешение функции Гаусса
- 3D: $h_x < \sigma$ - разница 3%
- 2D: $N_{t,BL} \geq 15$ - влияние внутри пограничного слоя
- 3D: $N_{t,BL} \approx 25 \dots 30$
- 2D: $\sigma \lesssim 0.3\delta_c$ - точечность источника
- 3D: $2\sigma\sqrt{2} \lesssim 0.22\delta_c$
- При выполнении данных условий, решение не зависит от сетки

Обзор задач

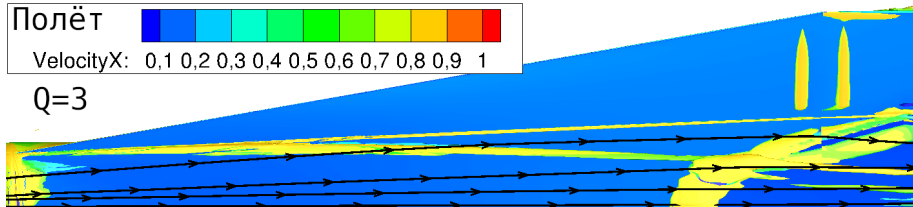
Hexafly. M=7,7.5 Визуализация вихрей



Q=3

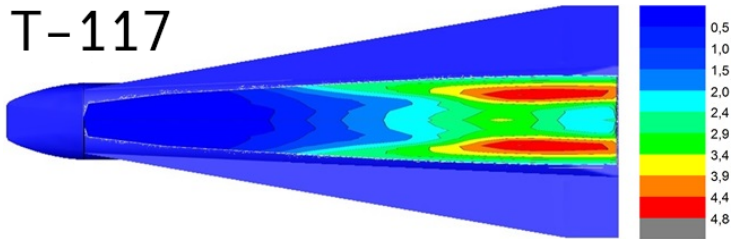


Q=3

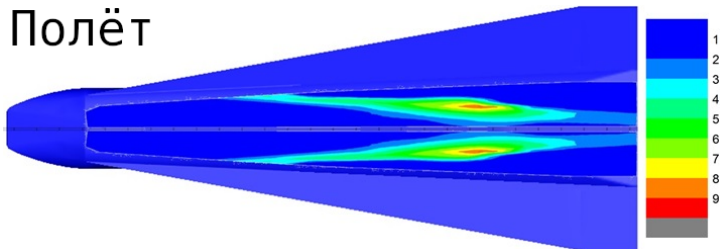


Анализ устойчивости: Распределение N-факторов

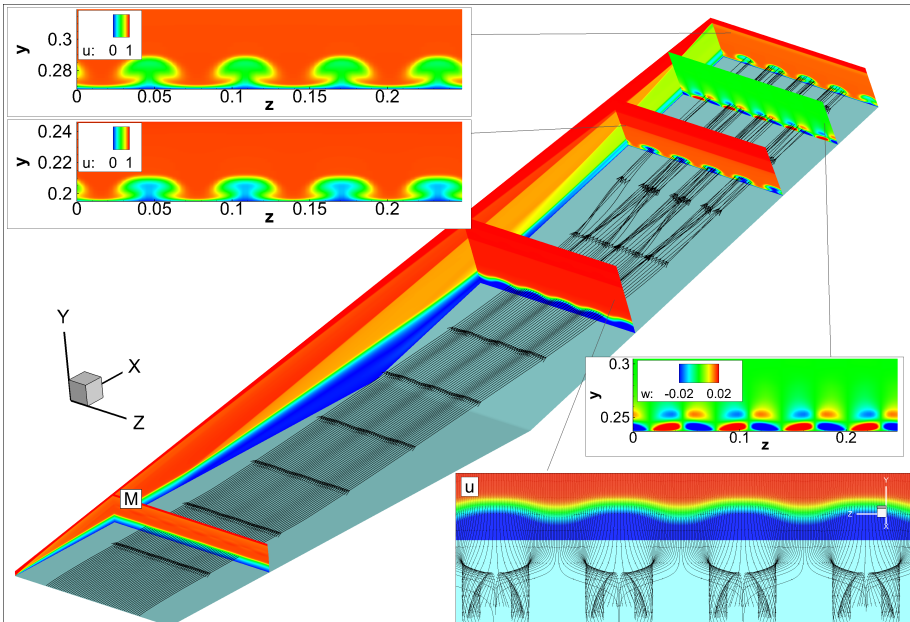
Т-117



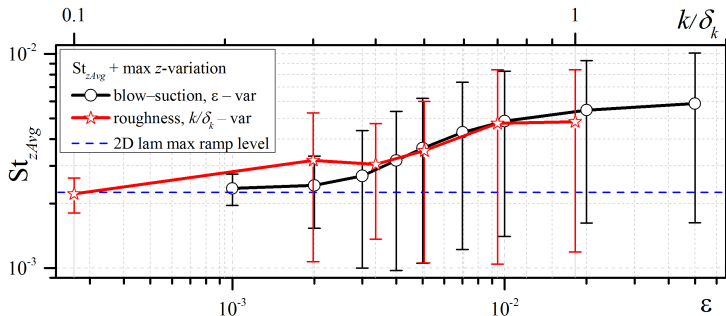
Полёт



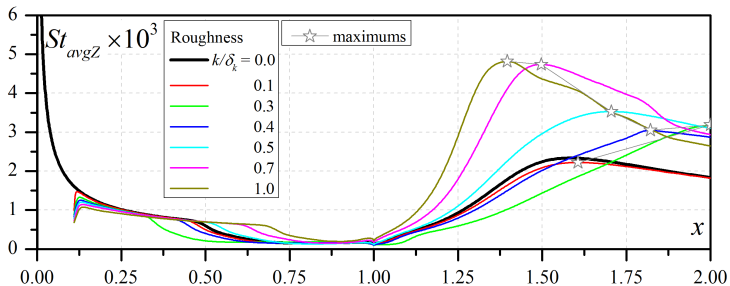
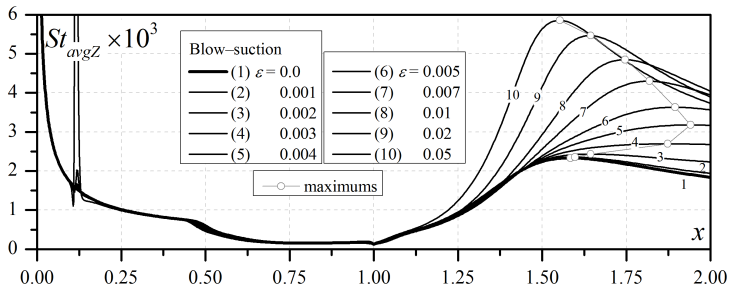
Вихри Гётлера в углу сжатия, $M=8$



Сравнение вдува-отсоса и ряда неровностей



Поведение отрыва



Турбулизация с помощью микроструй. Угол сжатия, $M=5.37$ Визуализация следа.

