

SINF/Flag-S-2017

*Смирнов Е.М., Зайцев Д.К.,
Колесник Е.В., Смирновский А.А.*



Санкт-Петербургский политехнический
университет Петра Великого
Кафедра «Гидроаэродинамика,
горение и теплообмен»
Web: <http://aero.spbstu.ru>
E-mail: aero@phmf.spbstu.ru

Комплекс программ **SINF**

(**S**upersonic to **IN**compressible **F**lows)

разрабатывается с 1992 г.

Цели и задачи

- Освоение современных и разработка новых методов и технологий вычислительной гидродинамики
- Проведение фундаментальных исследований
- Решение задач промышленной гидрогазодинамики и теплообмена

Разработчики

- Сотрудники, аспиранты и студенты кафедры «Гидроаэродинамика, горение и теплообмен» СПбПУ

Результаты

- 10 кандидатских, 1 докторская и более 20 магистерских диссертаций
- Гранты РФФИ (13), поддержки научных школ, зарубежные (3)
- Контракты с российскими (>30) и зарубежными (>10) предприятиями

Комплекс программ SINF: Компоненты

Блочнo-структурированные сетки

- **Базовый расчетный код SINF** (3D Навье-Стокс, газ/жидкость; 1992-2010)
- Интерактивный 2D генератор сеток + 3D утилиты (1993-1998)
- Визуализатор **FLAG** (*Flow Analysis Graphics*; 1993-1997)
- **Специализированные коды/версии:**
 - Течения с дисперсными частицами (Лагранж-Эйлер; 1996-1997)
 - МГД течения (1998-1999)
 - Интегрированный учебный пакет **FLOS** (*Flow Studio*; 2000-2003)
 - **ПГС-ТК** (многокомпонентная парогазовая смесь, равновесная объемная и пленочная конденсация, ...; для СПб АЭП, 2009-2012)

Неструктурированные (полиэдральные) сетки

- **Базовый код SINF/Flag-S** (2005-н.в.)
- **Специализированные коды:**
 - **Flag-FS** (течения со свободной поверхностью; 2009-2014)
 - **ТЕМБР** (жидкие металлы; для ГК Росатом, 2012-2013)
 - **СКАТ³** (сопряженный тепломассоперенос ...; Роскосмос, 2014-2015)

Классы задач, решаемых с использованием блочно-структурированного кода SINF

- **Течения несжимаемой жидкости (без свободных поверхностей)**
- **Дозвуковые течения однородного газа и газовых смесей**
- **Сверхзвуковые течения однородного газа**
- **Течения с дисперсными частицами**
- **Течения в областях с подвижными границами**
- **Течения в вращающихся системах и в системах ротор-статор**
- **Свободно- и смешанно-конвективные течения в полях гравитационных и центробежных сил**
- **Задачи сопряженного теплообмена (без радиационного)**
- **Задачи конвективно-диффузионного переноса примеси**
- **Низкоскоростные течения парогазовых смесей с пленочной и равновесной объемной конденсацией**
- **МГД - течения**

Модели, реализованные в блочно-структурированном коде SINF

- Невязкая текучая среда (уравнения Эйлера)
- Вязкая текучая среда (уравнения Навье-Стокса)
- RANS-модели турбулентности (k , v_t -SA, k - ϵ , k - ω , MSST, $v2f$)
- Расширенные («автоматические») пристенные функции
- Вихреразрешающие модели турбулентности (LES, DES)
- Модель ламинарно-турбулентного перехода Ментера-Лэнгтри
- Лагранжево-эйлерово описание течений с частицами

Сетки и сеточные технологии в блочно-структурированном коде SINF

- Криволинейные многоблочные (стыкуемые) сетки
- Подвижные деформируемые сетки
- Скользящие сетки
- Регулярные («узел в узел») и нерегулярные стыковки на межблочных границах

Генерация сеток

- Собственный генератор 2D многоблочных сеток (со встроенным геометрическим модельером) и инструментарий с различными трансляционными операциями для создания 3D сеток
- Использование коммерческих генераторов сеток

Численные методы, реализованные в блочно-структурированном коде SINF

- Метод конечных объемов (второй порядок пространственной аппроксимации)
- Второй порядок аппроксимации по физическому времени (неявная трехслойная схема)
- Переменные «давление-скорость» для случая несжимаемой жидкости и дозвуковых течений газа (опции: SIMPLEC-алгоритм, метод искусственной сжимаемости, метод Роджерса-Квака)
- Переменные «плотность-скорость» для случая сверхзвуковых течений газа (предобуславливание, неявные схемы, схема Роу или H-CUSP схема для невязких потоков)
- Солверы для СЛАУ: AFM, ADDM, GMRES, CG, Bi-CGstab
- Локальный шаг по времени установления

Дополнительная информация о блочно-структурированном коде SINF

- **Целевые архитектуры ВК и ОС: Linux, Windows**
- **Параллельные вычисления: тип распараллеливания – одноуровневое MPU; рабочий диапазон числа ядер – до 1000, без гетерогенных вычислений**
- **Техника и политика тестирования: не устоялась, база основных рабочих тестов – около 50**
- **Ведение документации: ведется только рабочая документация по фиксации изменений в «этапные» версии кода и в пользовательские файлы с вводными данными**
- **Наличие версий: есть понятие «этапных» версий, всего их около 15-ти**
- **Язык исходного кода: FORTRAN-90**

Код SINF/Flag-S, оперирующий неструктурированными сетками *(разрабатывается с 2005 г. по н.вр.)*

Общие цели и задачи кода

- **Освоение современных и разработка новых методов и технологий**
- **Проведение фундаментальных исследований**
- **Решение задач промышленной гидрогазодинамики и теплообмена**
- **Базовые версии не предполагают отчуждаемости (ответвления - да)**
- **Интеграция с другими кодами пока не осуществлялась**

Классы задач, решаемых с использованием неструктурированного кода SINF/Flag-S на конец 2016 г.

- Ламинарные и турбулентные течения несжимаемой жидкости
- Течения со свободными поверхностями (пока без поверхностного натяжения и межфазного теплообмена)
- Дозвуковые течения однородного газа
- Свободно- и смешанно-конвективные течения в полях гравитационных сил
- Задачи сопряженного теплообмена (без радиационного), включая процессы испарения и конденсации на границах раздела сред
- Задачи теплообмена при течении через пористые тела

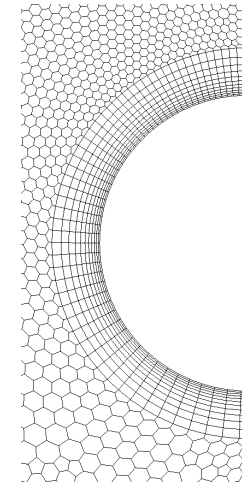
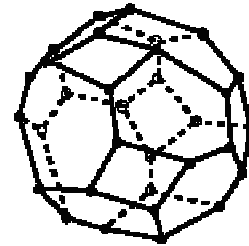
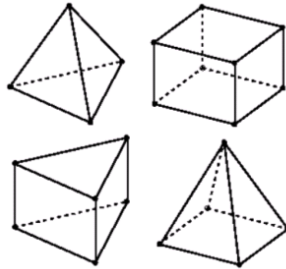
В активной разработке в 2017 г.

- Модули для расчета сверх- и трансзвуковых течений однородного газа

Модели, реализованные в неструктурированном коде SINF/Flag-S

- Вязкая текучая среда (уравнения Навье-Стокса)
- RANS-модели турбулентности (k , v_t -SA, k - ϵ , k - ω , MSST)
- Расширенные («автоматические») пристенные функции
- Вихреразрешающие модели турбулентности (LES, DES, IDDES)
- Генератор входной синтетической турбулентности
- Модели метода Volume-of-Fluid (VOF) для расчета течений со свободными поверхностями

Сетки и сеточные технологии в неструктурированном коде SINF/Flag-S



- **Неструктурированные многоблочные (стыкуемые) сетки**
- **Регулярная («узел в узел») стыковка на межблочных границах**
- **Собственная утилита для разбивки и сбора сетки с применением библиотеки METIS**

Генерация сеток

- **Использование открытого кода Salome**
- **Использование коммерческих генераторов сеток**

Численные методы, реализованные в коде SINF/Flag-S на конец 2016 года

- Метод конечных объемов (второй порядок пространственной аппроксимации)
- Переменные «давление-скорость»
- Разные «сжимающие» схемы для расчета межфазной границы (основная – M-CICSAM)
- Второй порядок аппроксимации по физическому времени
- Схемы продвижения по физическому времени : (1) неявная с итерациями по SIMPLEC-алгоритму или методу Роджерса-Квака, (2) оригинальная полу-неявная схема метода дробных шагов
- Солверы для СЛАУ: GMRES, CG, Bi-CGstab, оригинальный многосеточный алгоритм, включающий процедуру геометрической агломерации ячеек

Разработки в 2017 г.

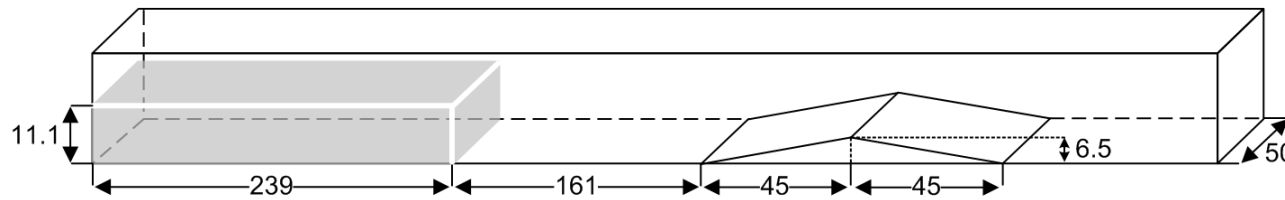
- Явные и неявные (в «приращениях») схемы для расчета сверх- и трансзвуковых течений однородного газа

Дополнительная информация о «неструктурированном» коде SINF/Flag-S

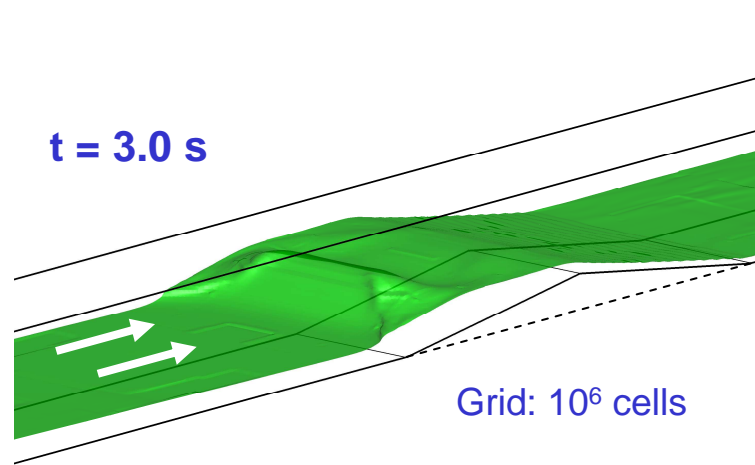
- **Целевые архитектуры ВК и ОС: Linux, Windows**
- **Параллельные вычисления: тип распараллеливания – одноуровневое MPU;**
- **Техника и политика тестирования: не устоялась, база основных рабочих тестов – около 30**
- **Ведение документации: ведется рабочая документация по фиксации изменений в «этапные» версии кода и в пользовательские файлы с вводными данными**
- **Наличие версий: используется среда SVN для хранения и обмена версиями, есть понятие «этапных» версий, всего их 9**
- **Язык исходного кода: FORTRAN-90**

Отдельные примеры расчетов по коду SINF/Flag-S (коротко)

Triangular obstacle test case



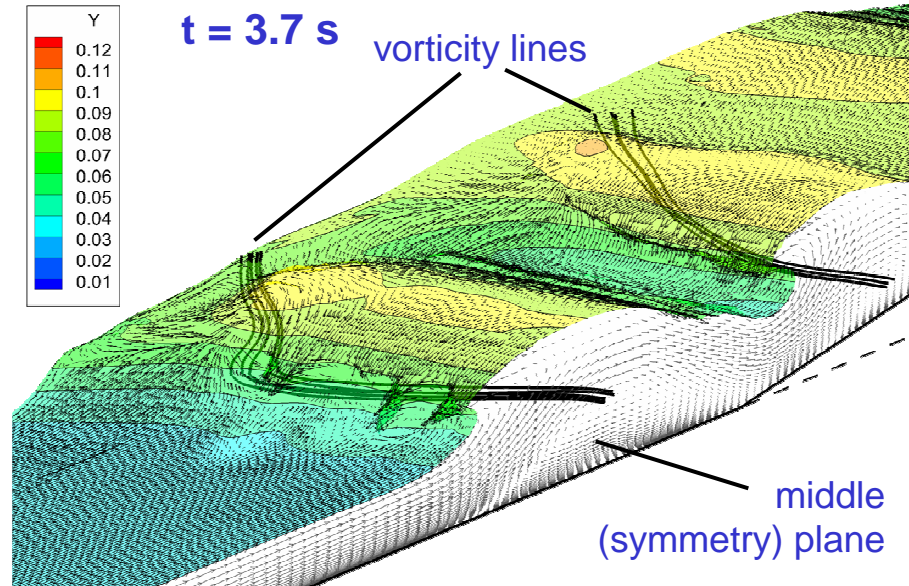
Experimental setup :
(Soares-Fraza, 2007)



t = 3.0 s

Grid: 10⁶ cells

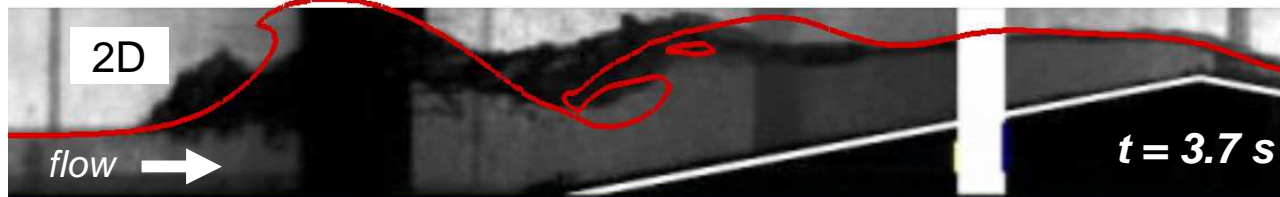
3D-effects are very pronounced



t = 3.7 s

vorticity lines

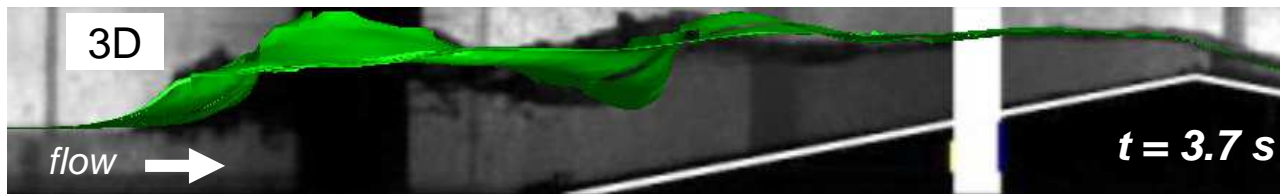
middle (symmetry) plane



2D

flow

t = 3.7 s



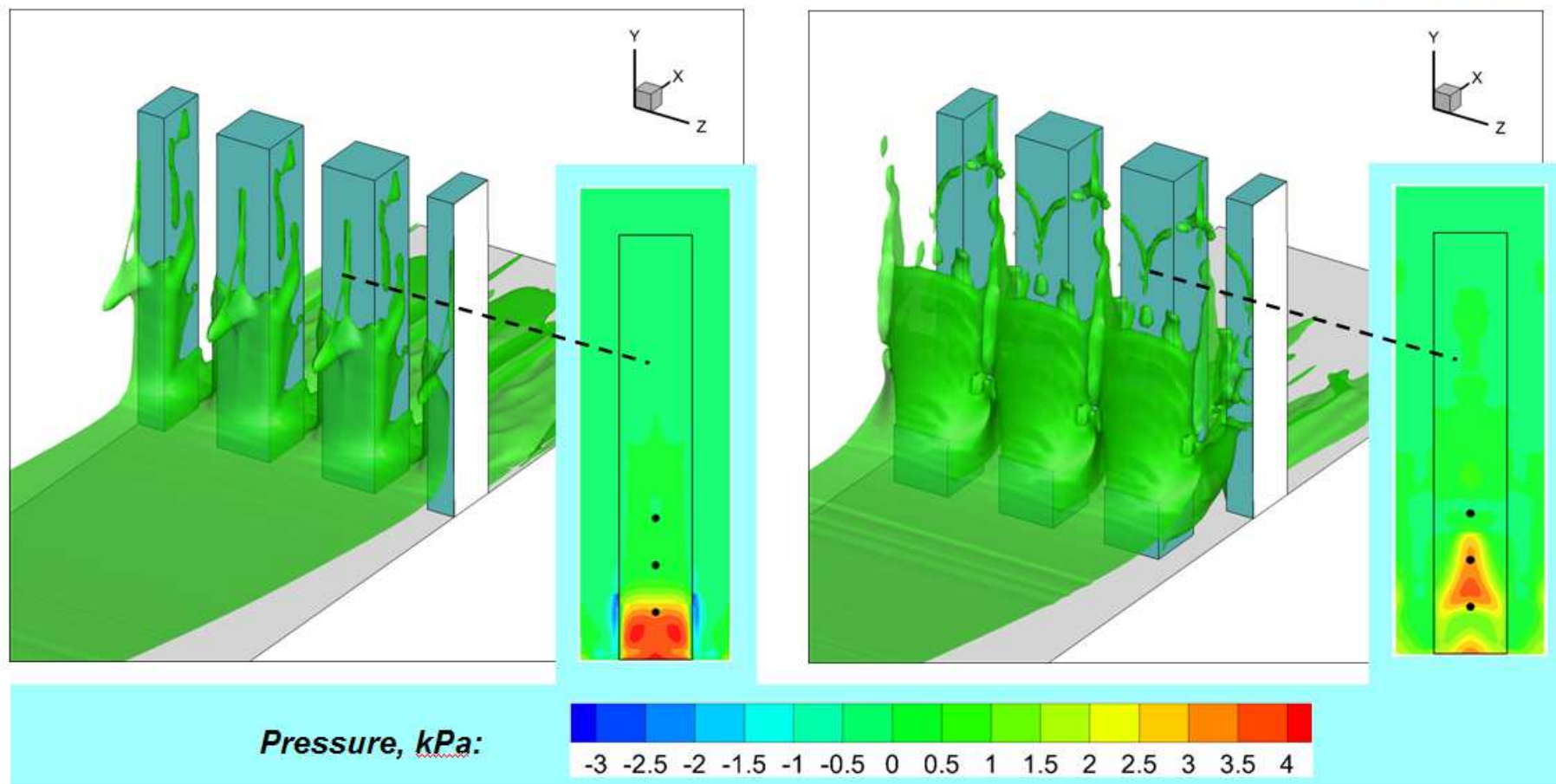
3D

flow

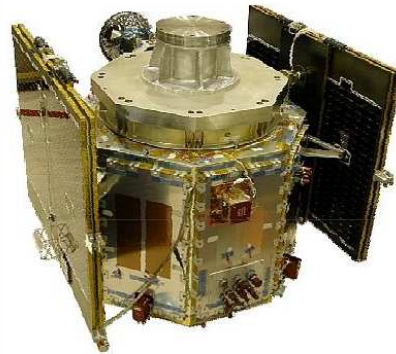
t = 3.7 s

Much better agreement with the experiments is achieved on the base of 3D formulation

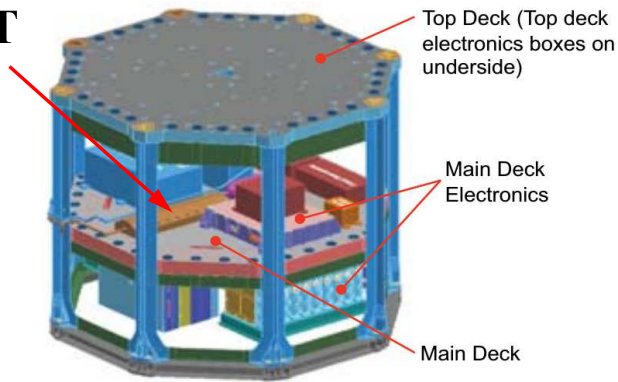
Cases with one or two rows of obstacles

 $t = 0,8 \text{ c}$ 

Моделирование работы испарителя контурной тепловой трубы (КТТ) спутника TacSat-4



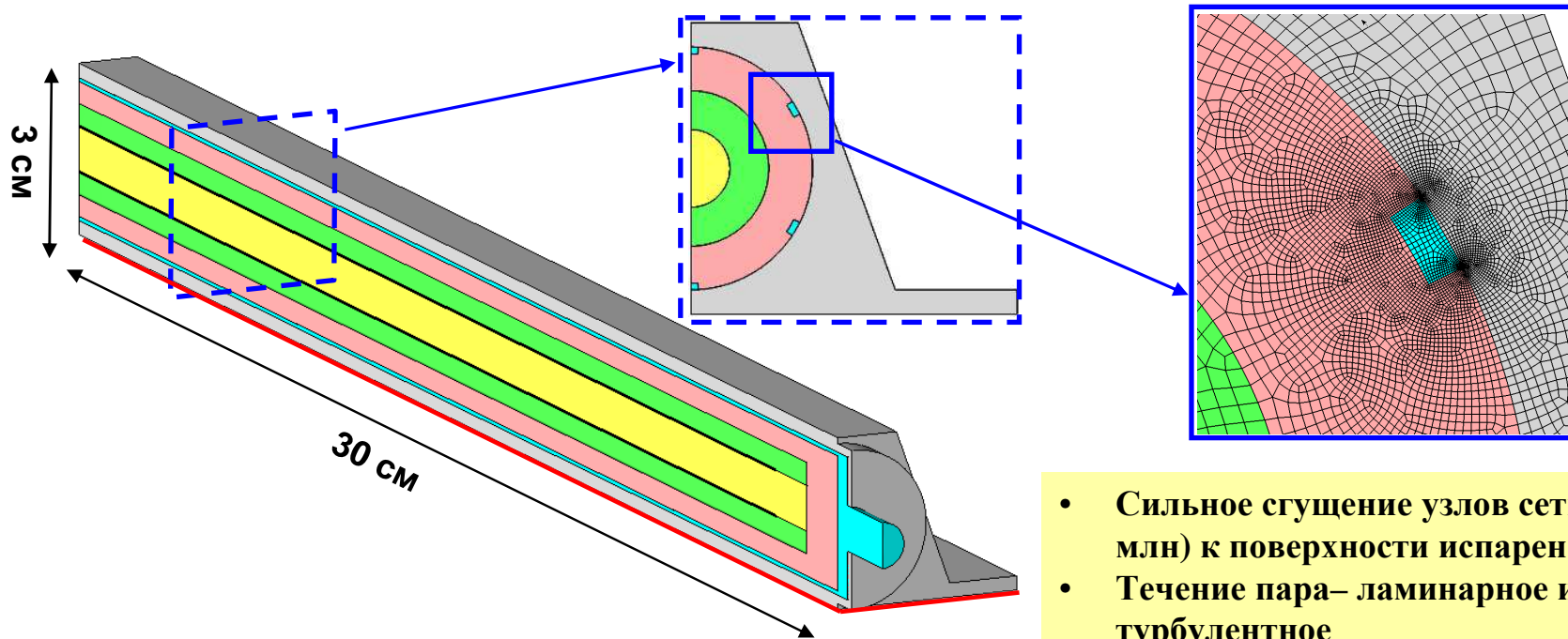
**Испаритель
КТТ**



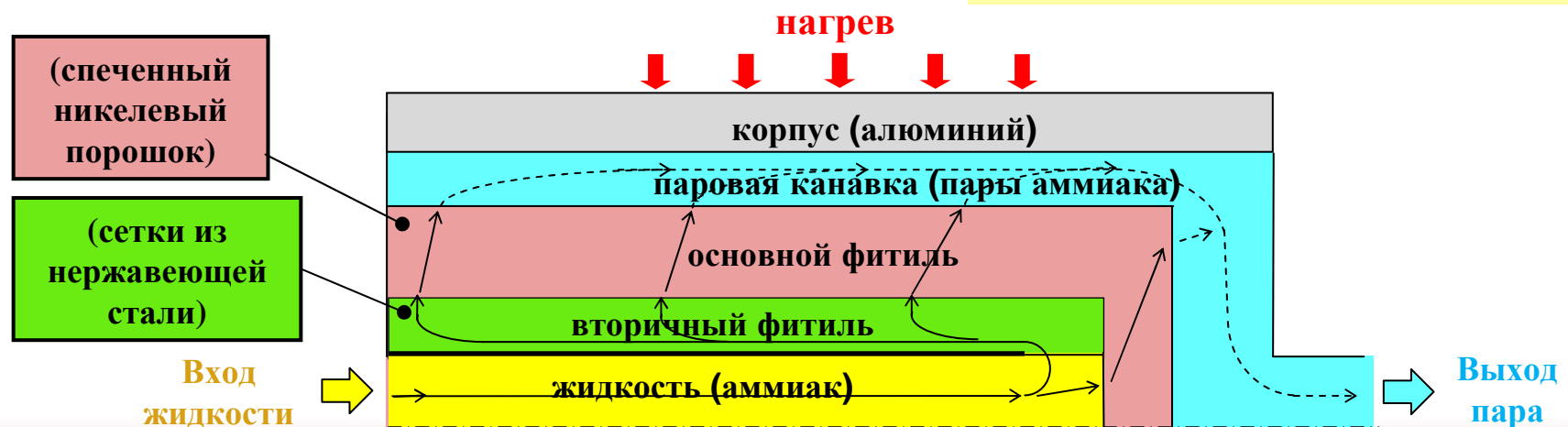
Секции конденсатора



Постановка задачи

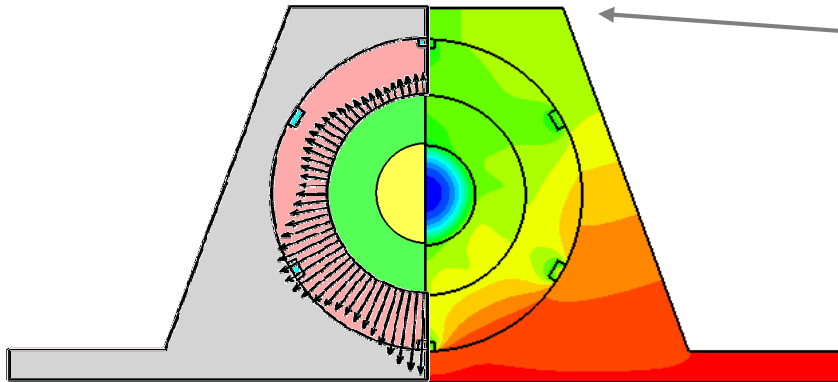


- Сильное сгущение узлов сетки (1.5 млн) к поверхности испарения
- Течение пара – ламинарное или турбулентное
- Стационарный режим работы

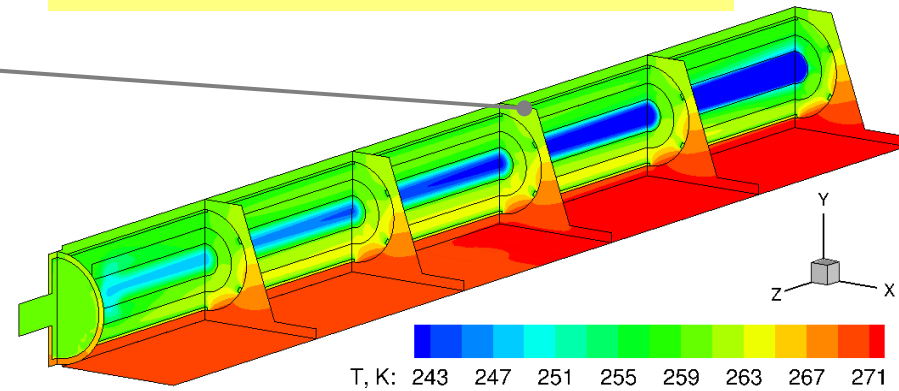


Результаты расчета

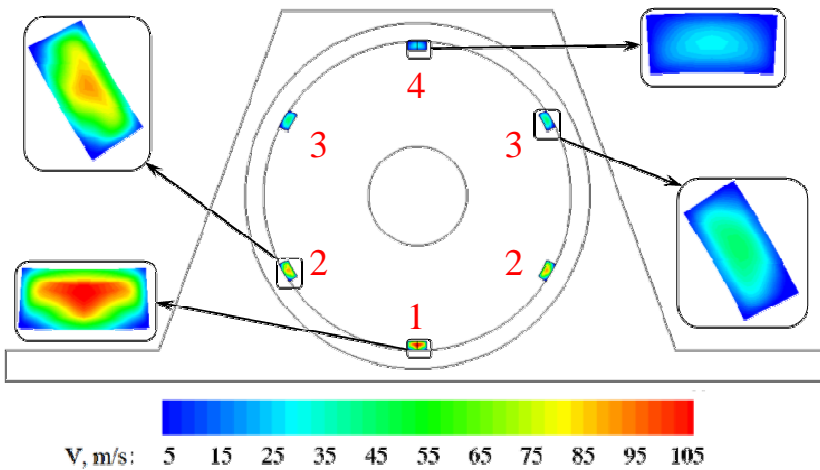
Скорость втекания жидкости в первичный фитиль и температура в сечении



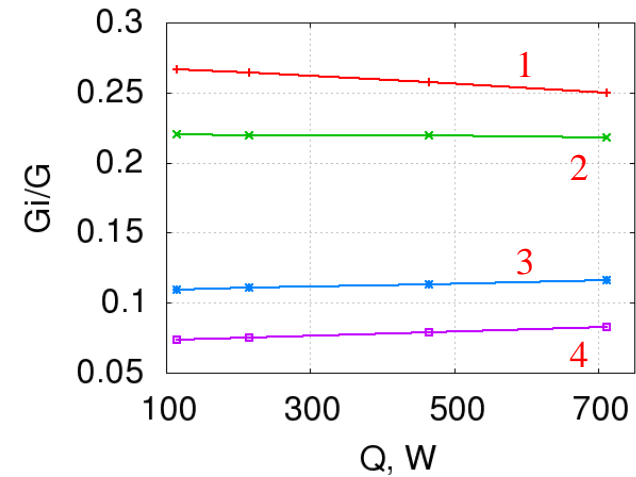
Температура в продольном и поперечных сечениях



Скорость пара в паровых каналах



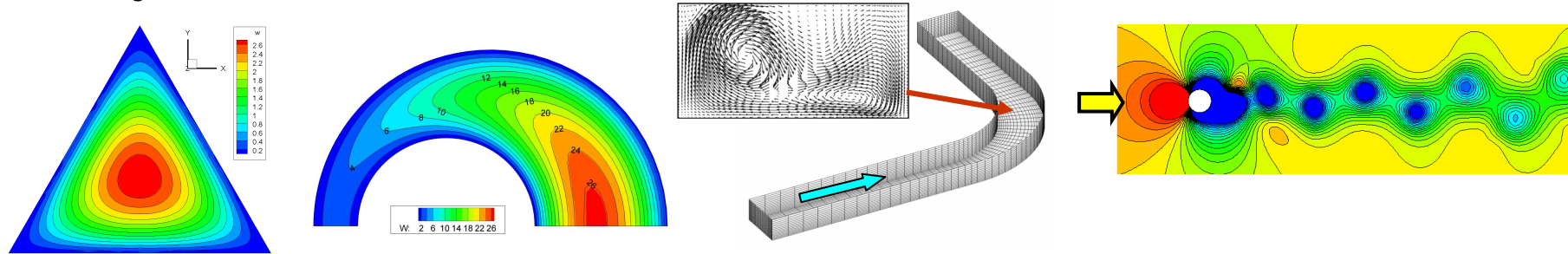
Распределение расхода по каналам



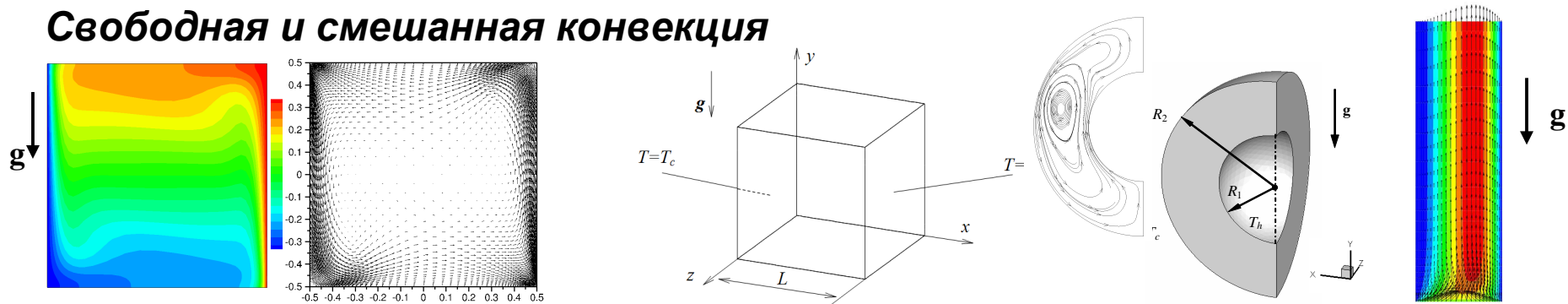
Тесты (12) с аналитическими или эталонными

численными данными для ламинарных течений

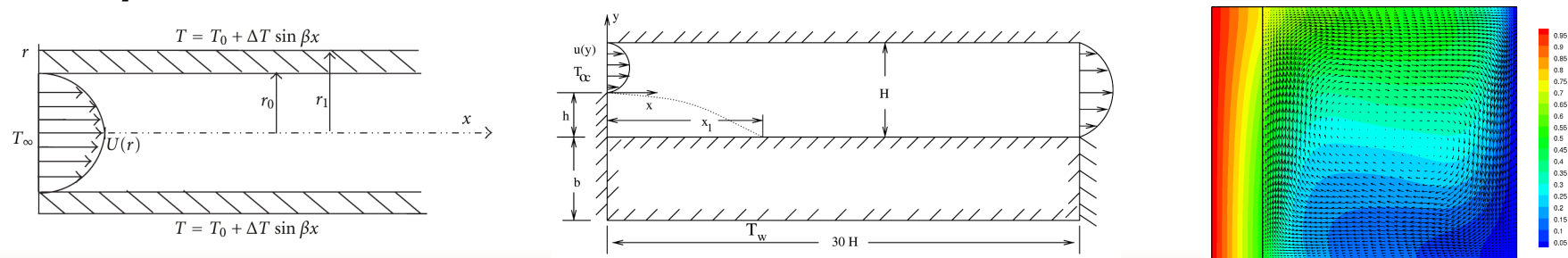
Вынужденная конвекция



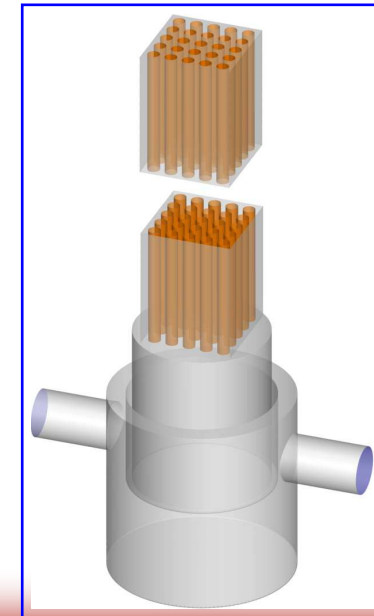
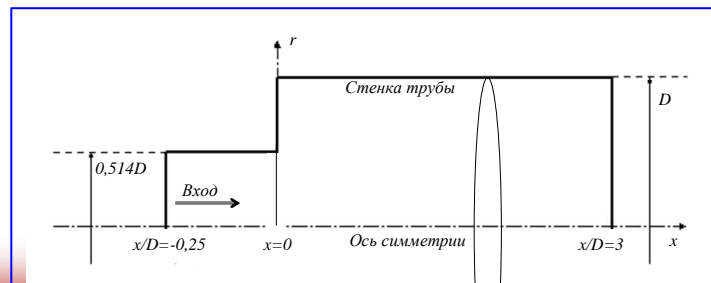
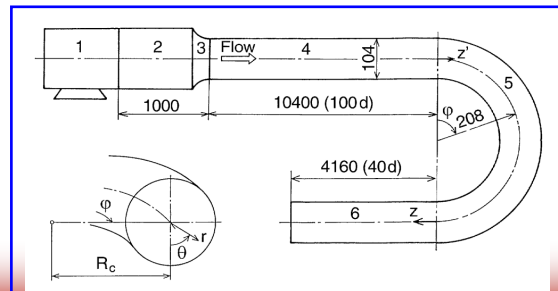
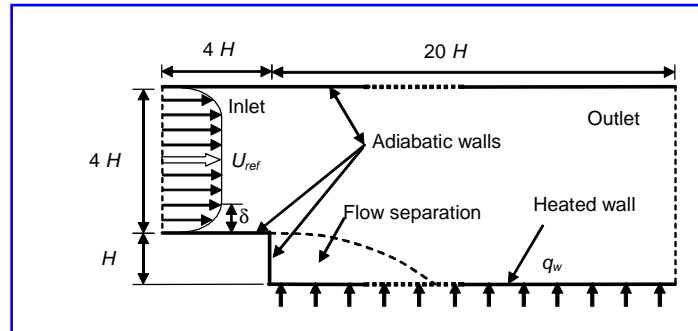
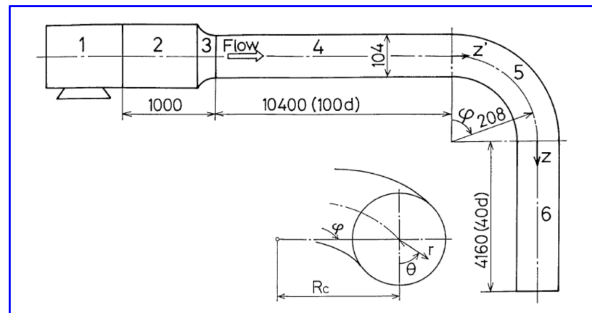
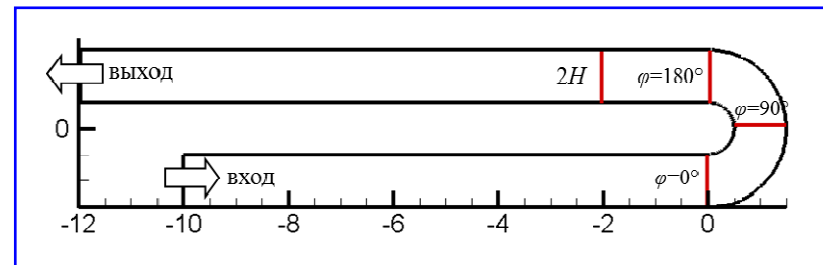
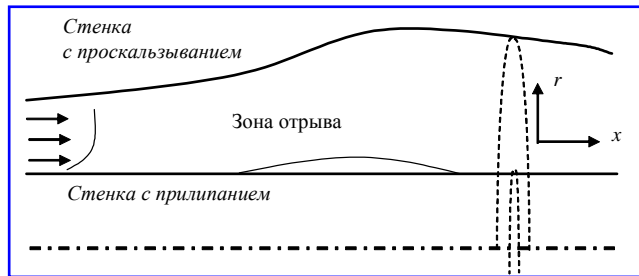
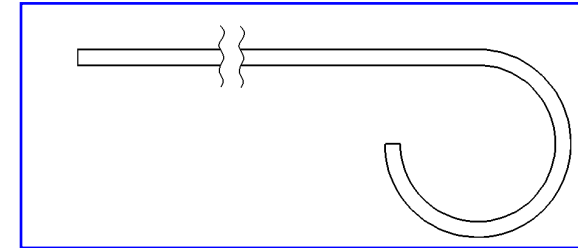
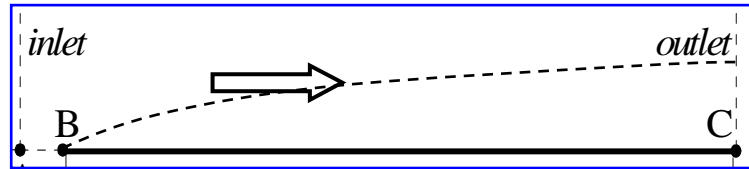
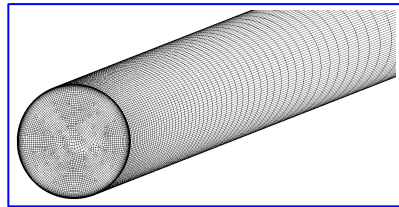
Свободная и смешанная конвекция



Сопряженный теплообмен

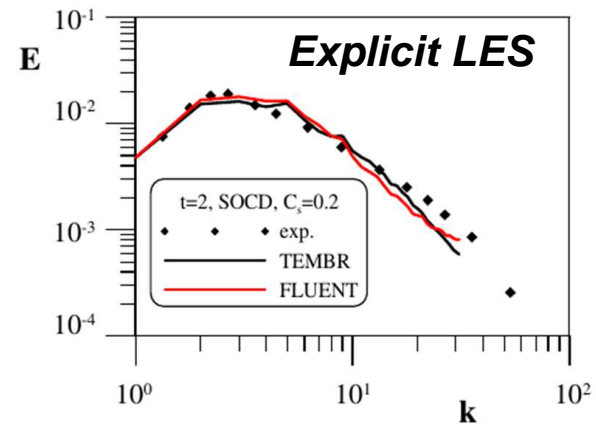
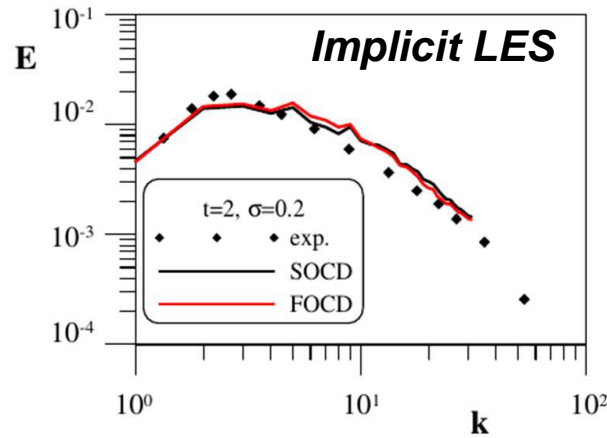


Валидационные расчеты турбулентных течений (10 задач) на основе RANS моделей турбулентности



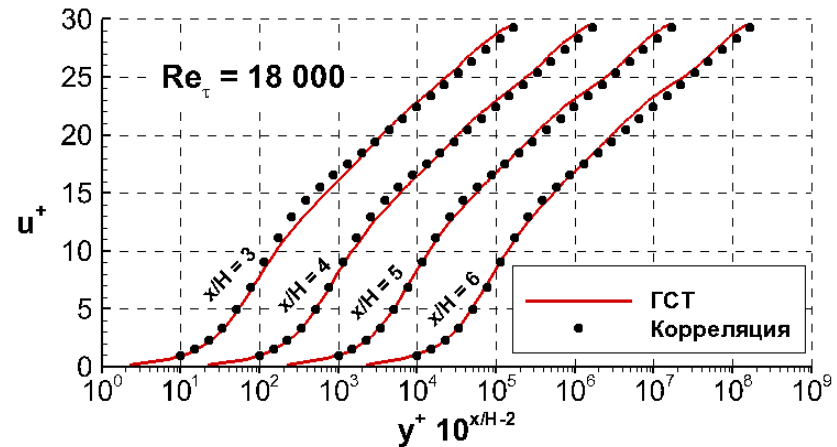
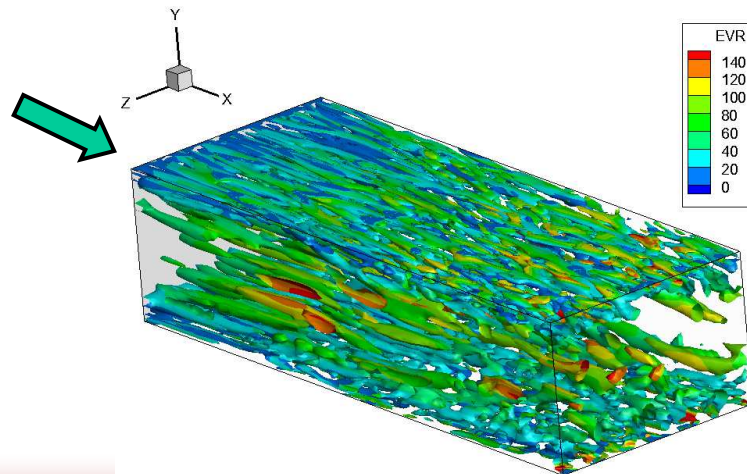
**Валидационные расчеты
турбулентных течений
на основе вихреразрешающих
методов**

Вырождение однородной турбулентности

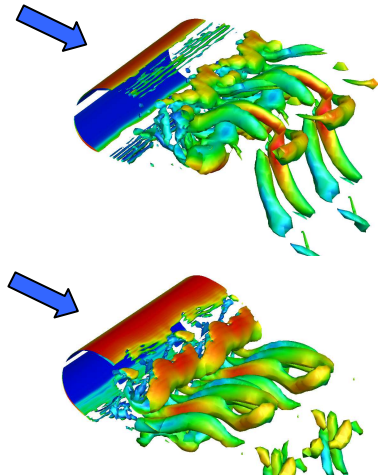
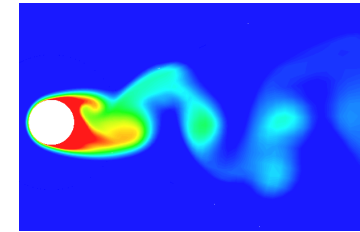


Развитое течение в плоскопараллельном канале.

Метод IDDES (из класса RANS/LES) + генератор входной турбулентности (ГСТ)

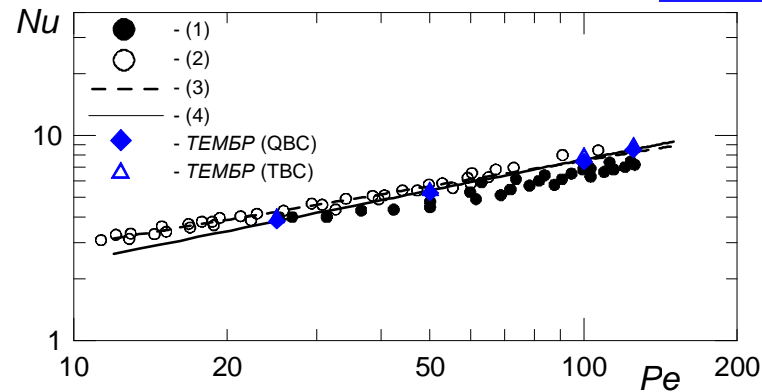


Обтекание жидким натрием ($Pr=0.007$) нагреваемого кругового цилиндра



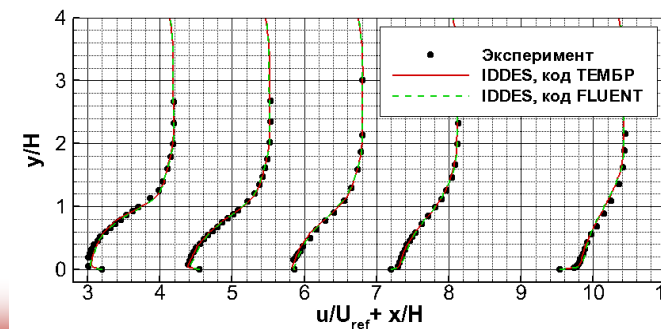
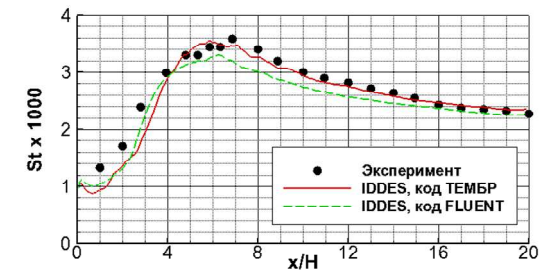
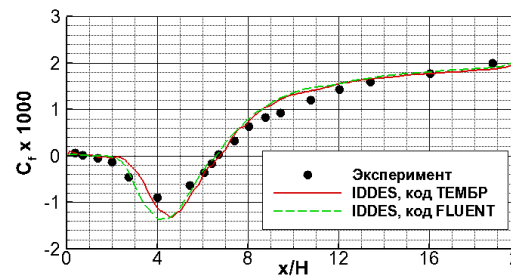
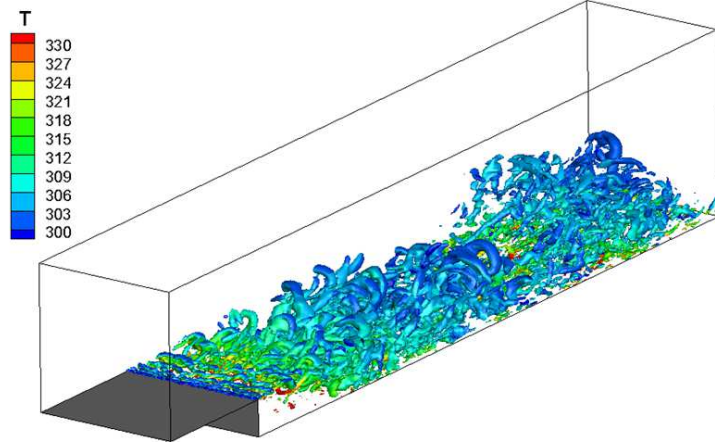
$Re=3600$,
Implicit LES

$Re=18000$,
DES (RANS/LES)



Течение и теплообмен за обратным уступом

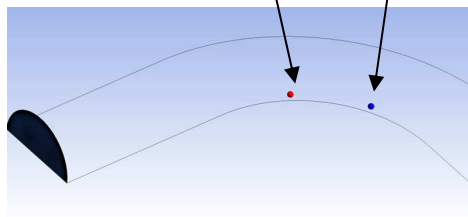
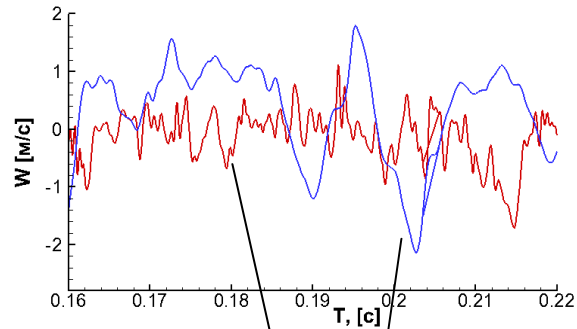
Метод IDDES (из класса RANS/LES)



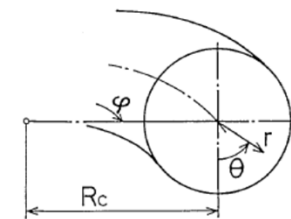
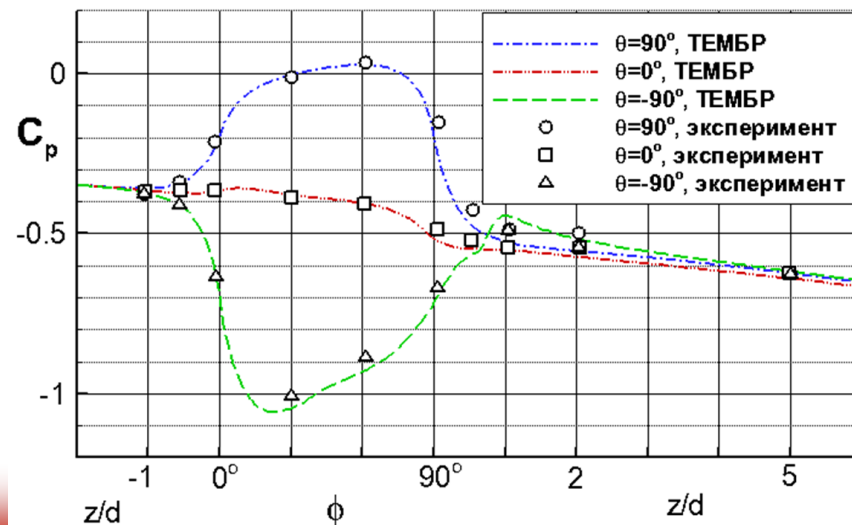
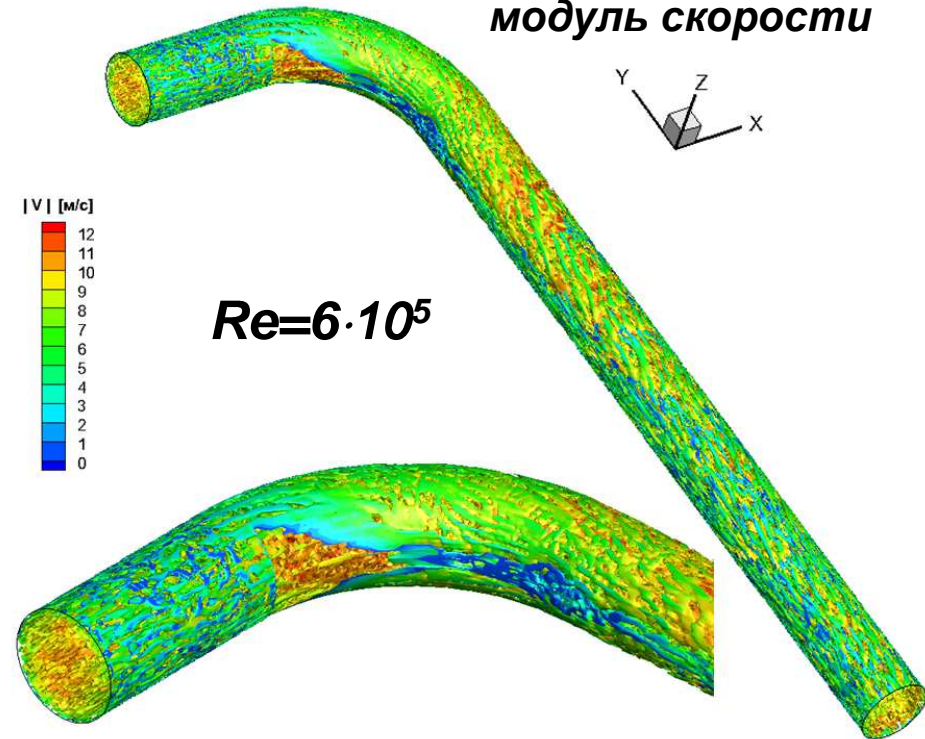
Течение в круглой трубе с поворотом на 90°

Метод IDDES + генератор входной турбулентности

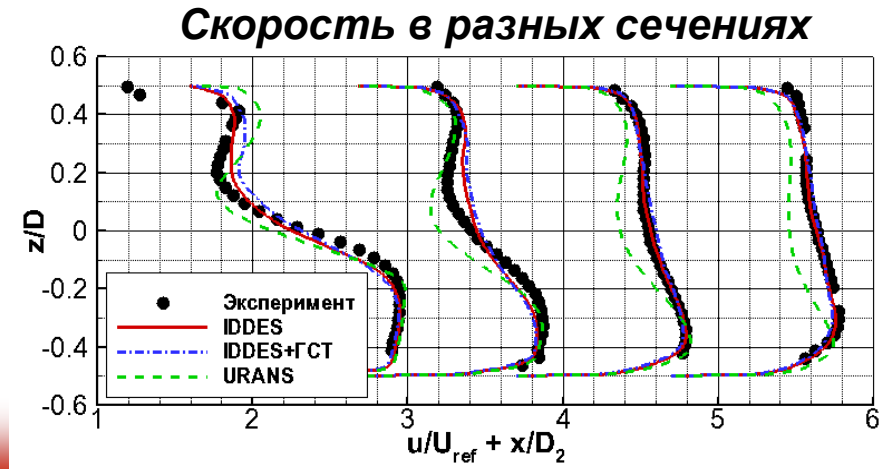
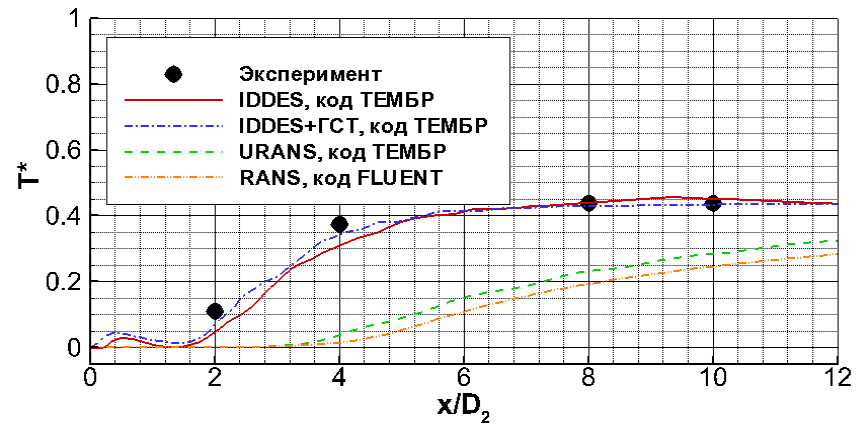
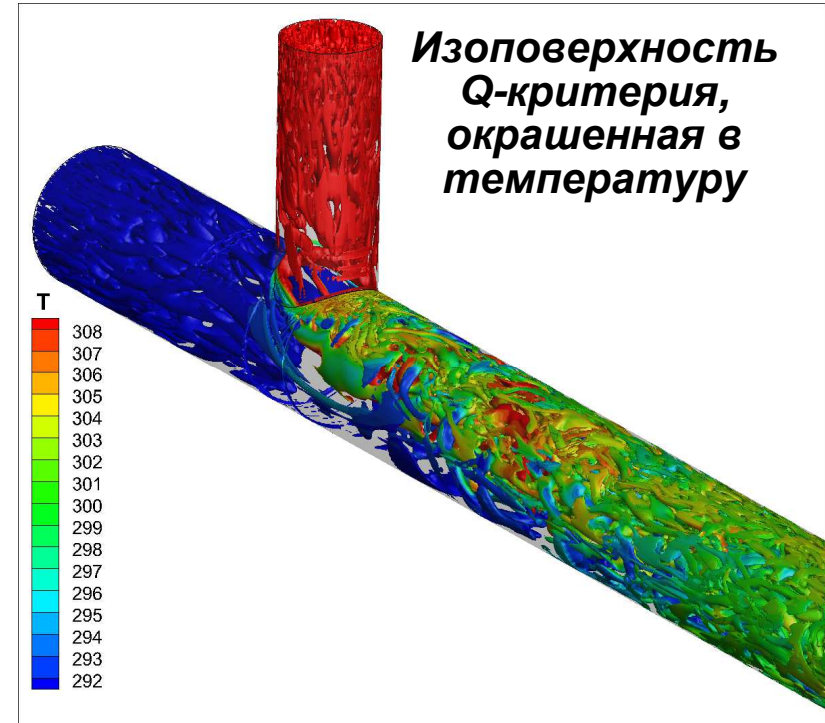
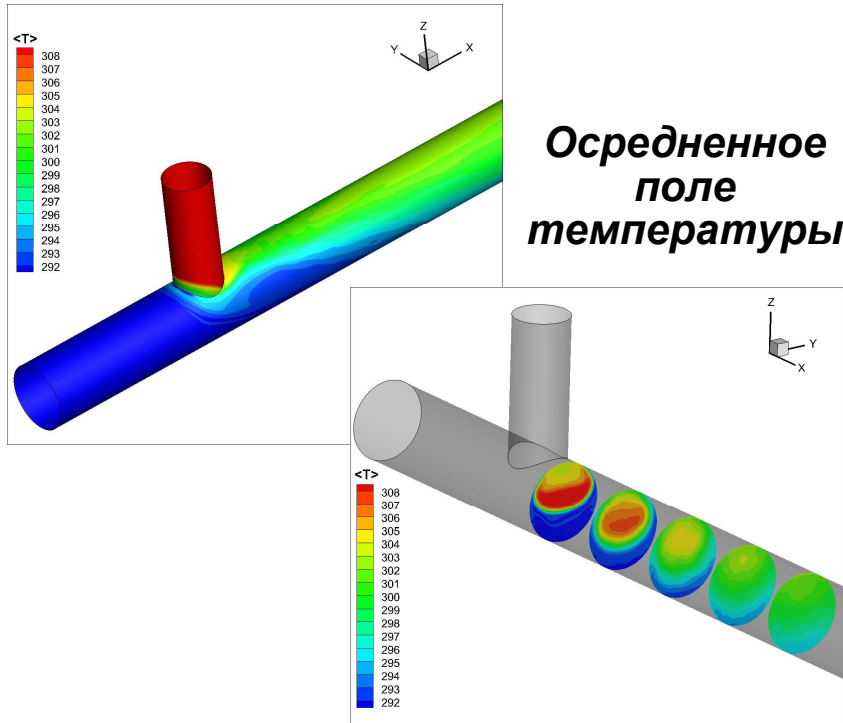
Низкочастотные пульсации - «переброс» несимметрии вихрей Дина



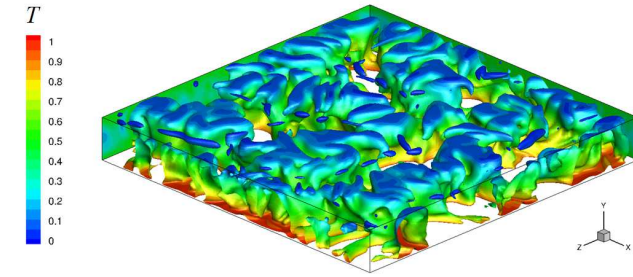
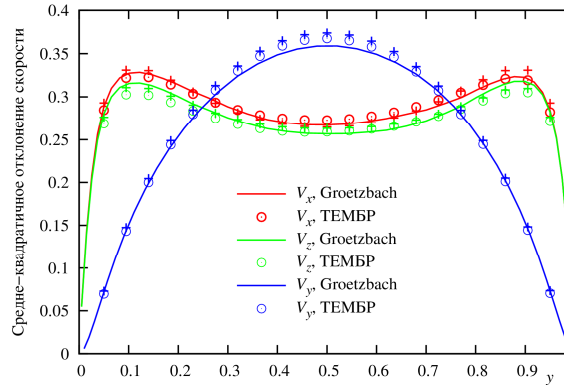
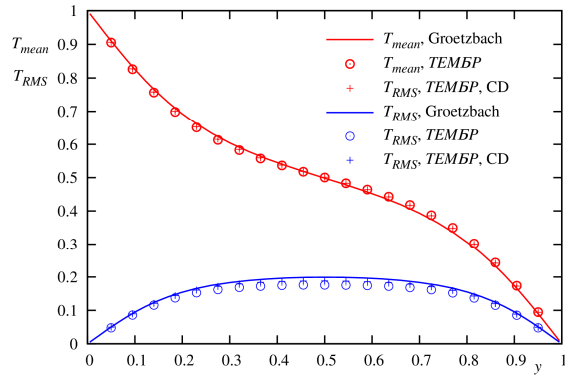
Изоповерхность Q-критерия, окрашенная в модуль скорости



Смешение разнонагретых потоков воды в T-образном соединении труб (тест OECD/NEA, 2010 г.)



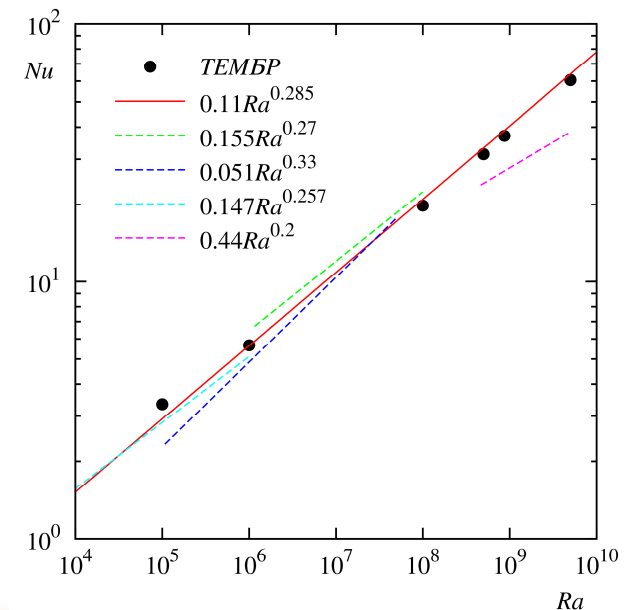
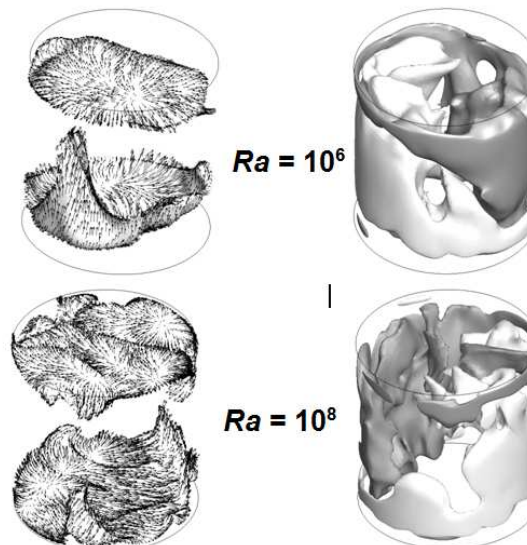
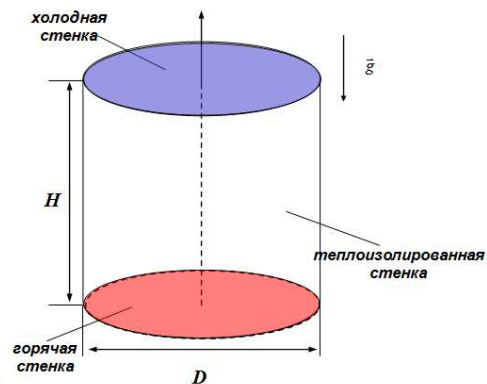
Конвекция Рэля-Бенара в горизонтальном слое при $Pr=0.025$



$Ra=25000, DNS$

Конвекция Рэля-Бенара в цилиндре при $Pr=0.025$

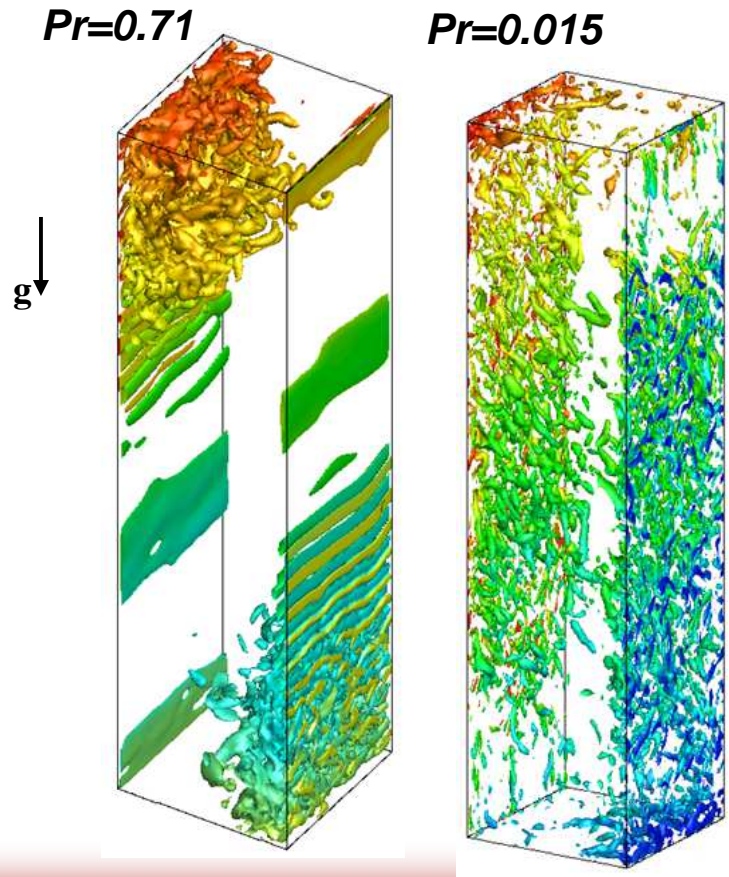
**Implicit LES до $Ra=10^7$,
RANS/LES при $Ra=10^8-10^9$**



Конвекция в прямоугольной полости 4:1 с разнонагретыми вертикальными стенками

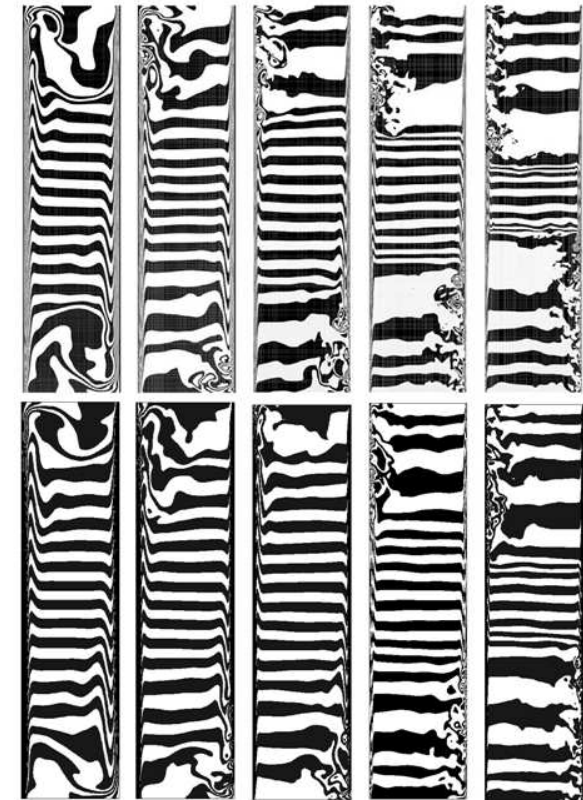
*Implicit LES до $Ra=10^{11}$,
RANS/LES при $Ra=10^{11}-10^{13}$*

$Ra=3 \cdot 10^{10}$: влияние числа Прандтля

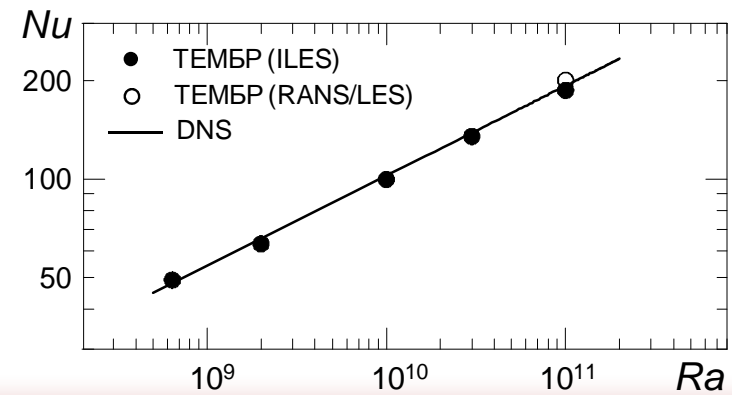


$Pr=0.71$

Эталонный DNS
(Trias et al, 2011) →

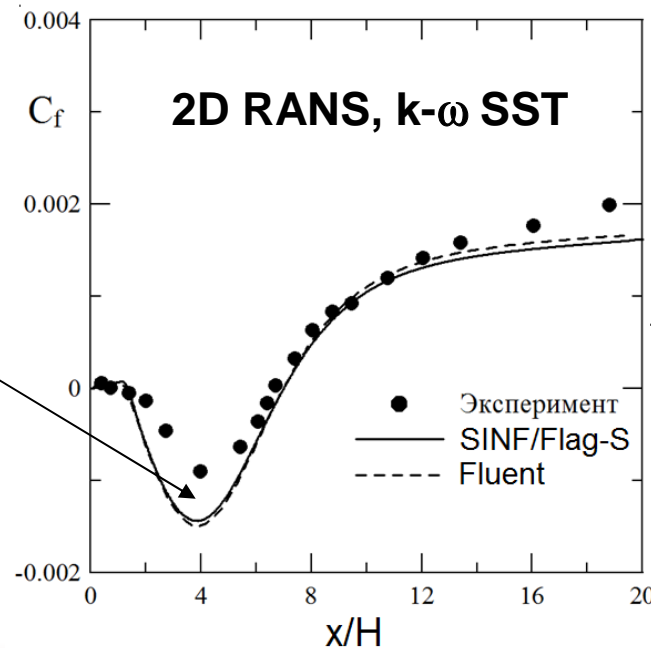
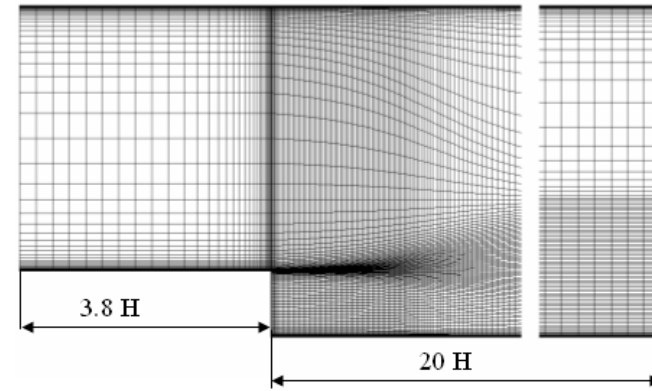
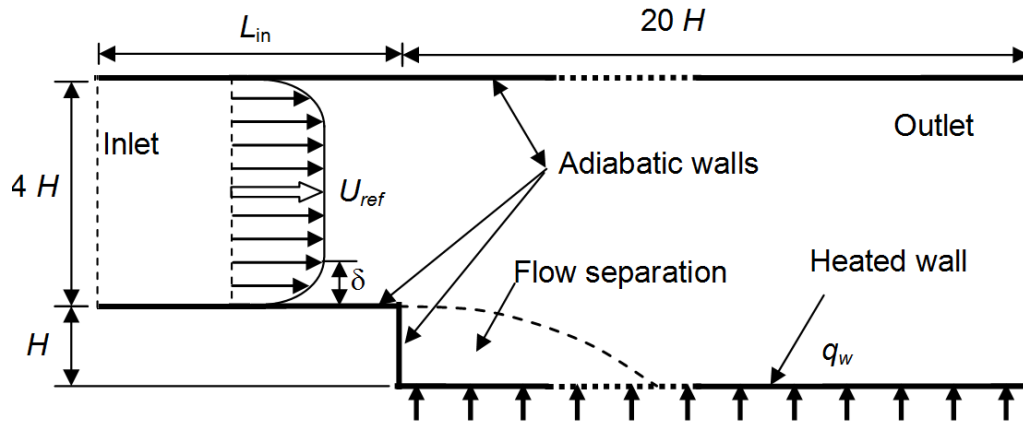


Implicit LES,
TEMБP →

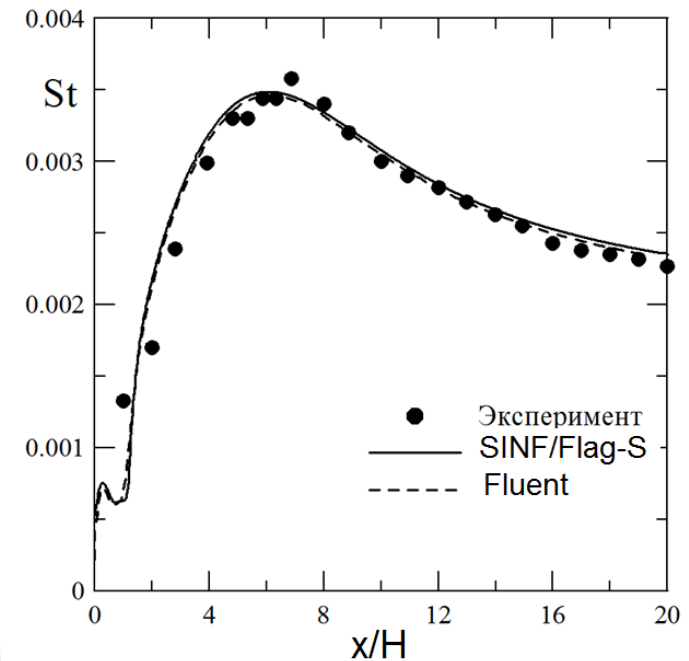


**Подробнее о ряде тестовых
расчетов с применением
вихреразрешающих подходов.
Код SINF/Flag-S в сопоставлении с
ANSYS Fluent**

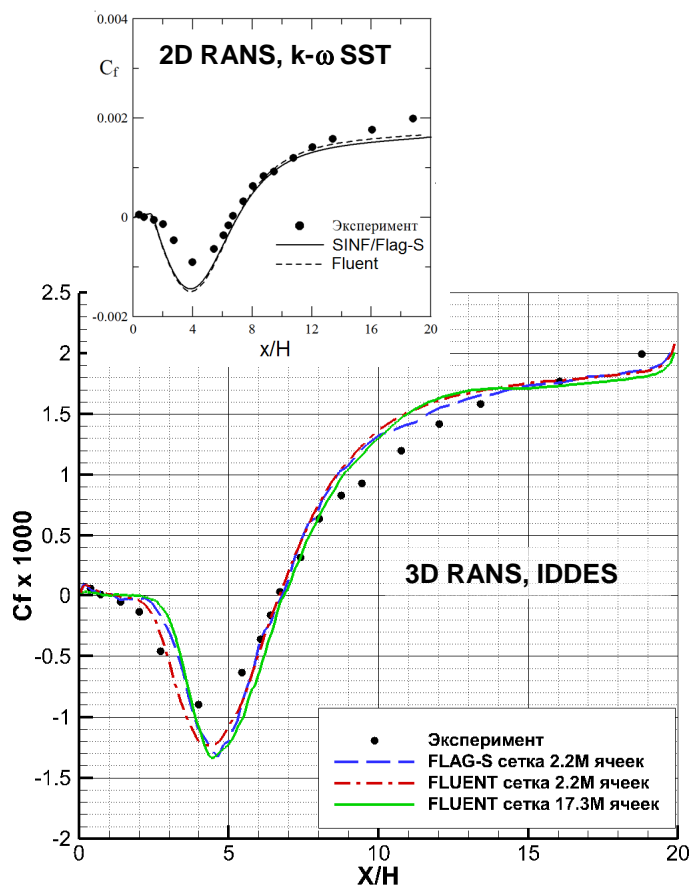
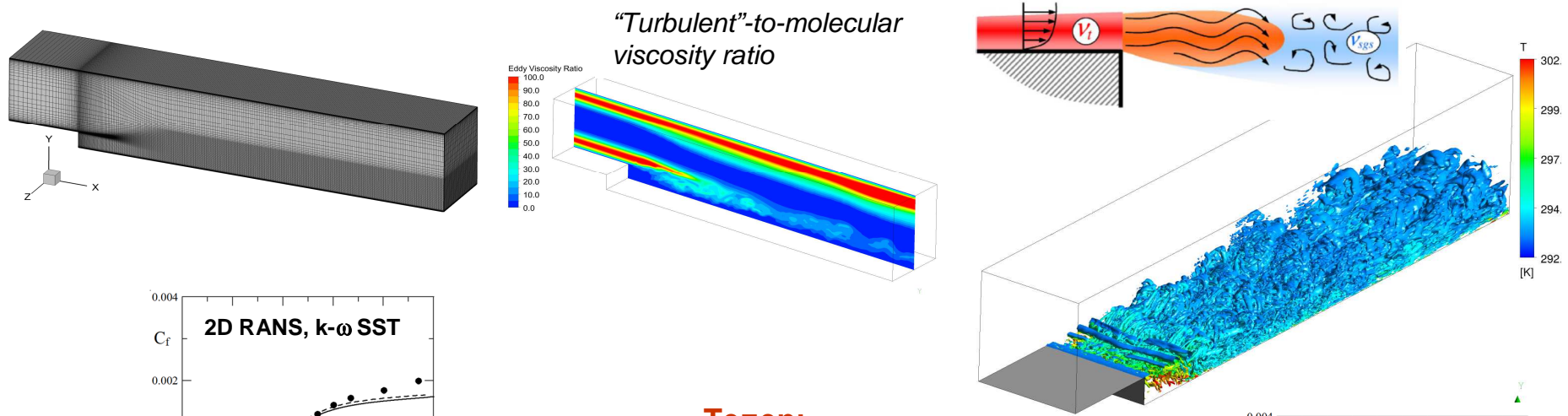
Течение и теплообмен в канале с внезапным расширением (мест: Vogel&Eaton, 1985)



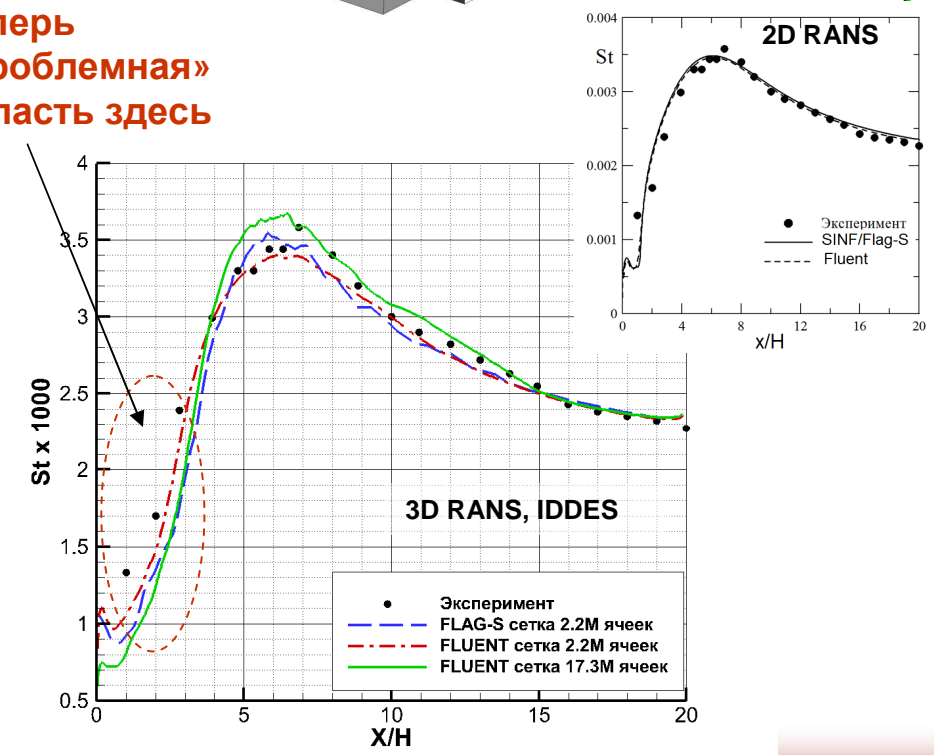
Существенное расхождение (у всех RANS моделей!)



“Незональный” RANS/LES: IDDES расчеты (SINF/Flag-S, Fluent)

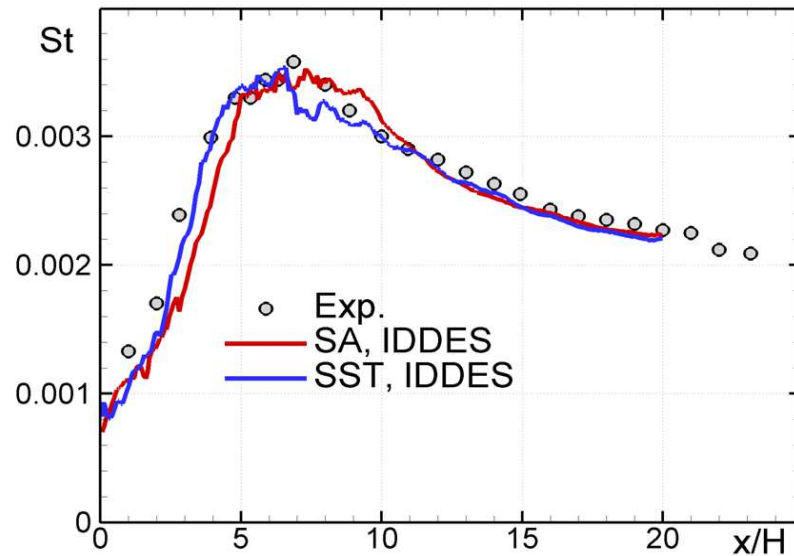


Теперь «проблемная» область здесь

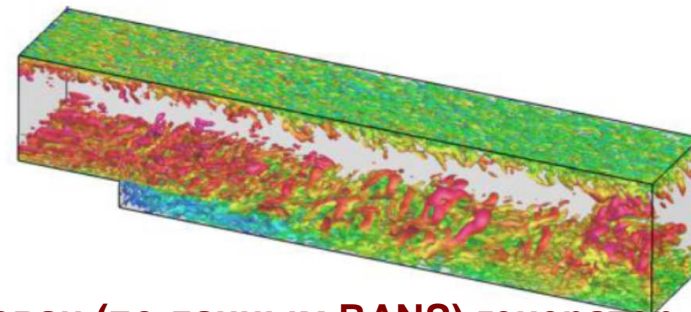
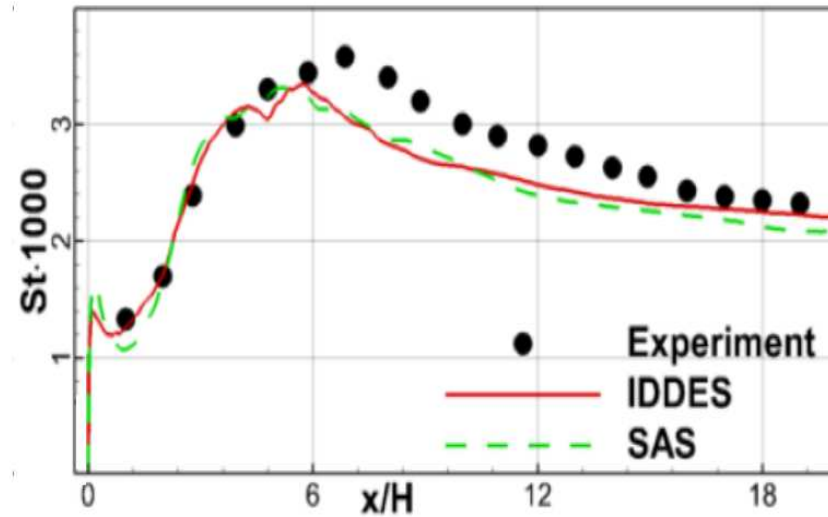


RANS/LES (литературные данные)

Незональный подход,
Стрелец и др., код NTS, 2012



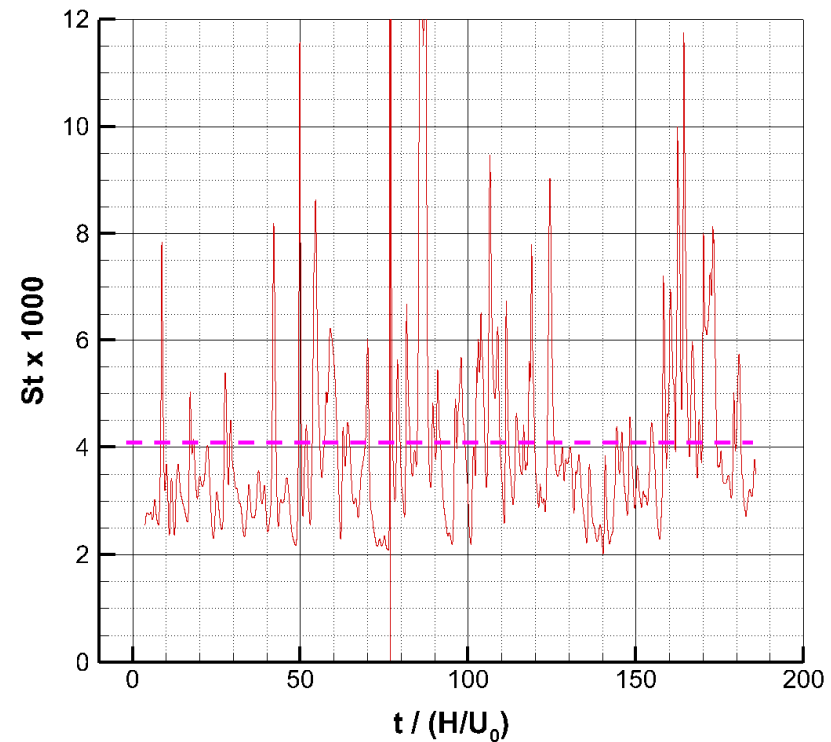
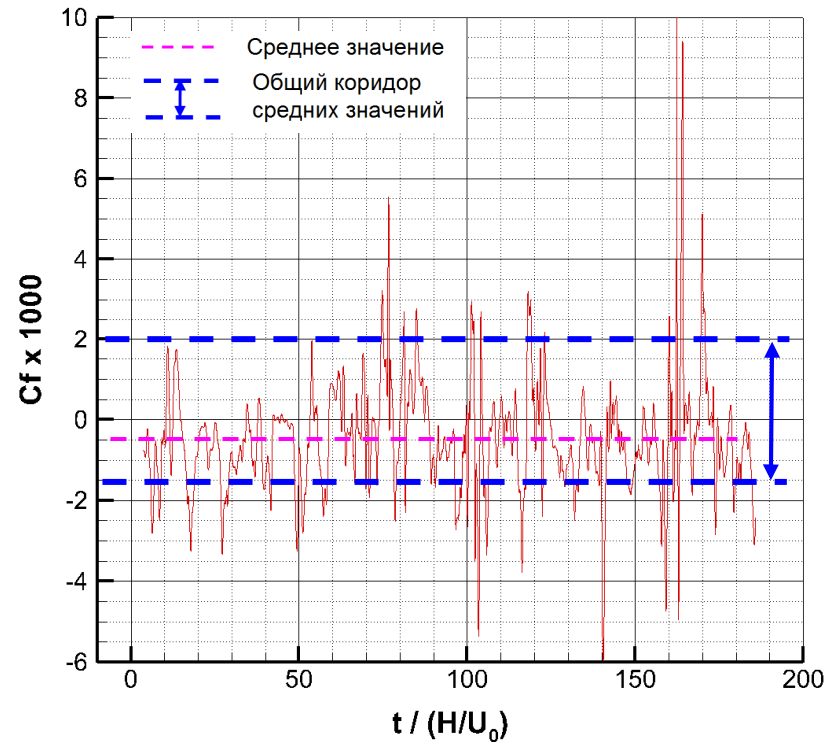
Зональный подход RANS/IDDES,
Грицкевич, Гарбарук, код Fluent, 2014



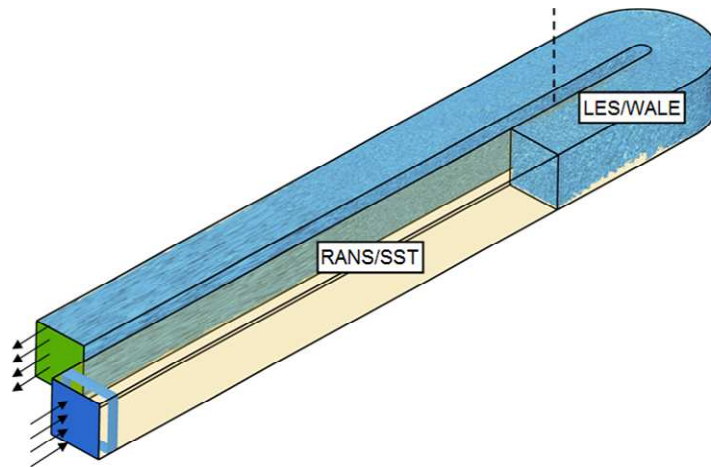
Активирован (по данным RANS) генератор входной турбулентности и погранслои сходит уже с вихрями!

Ставятся аналогичные расчеты по Flag-S

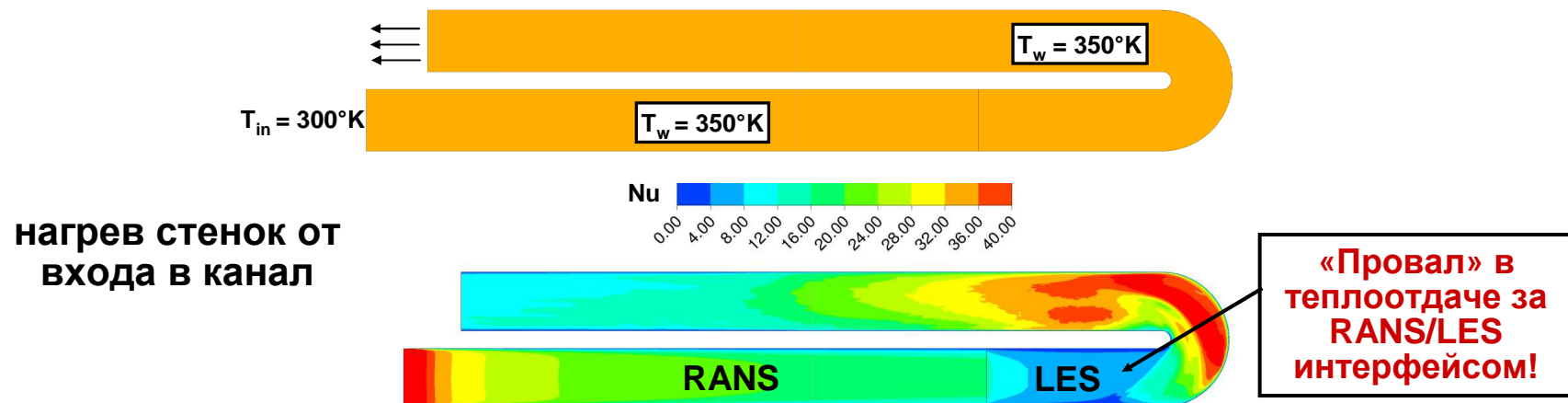
Пульсации коэффициента трения и коэффициента теплоотдачи в окрестности линии присоединения ($x/H=6$), IDDES-расчеты



$\langle St \rangle = 3.99 \times 10^{-3}$
 $St \text{ (based on } (\langle T_w \rangle - T_{in})) = 3.62 \times 10^{-3}$
 различие 10%

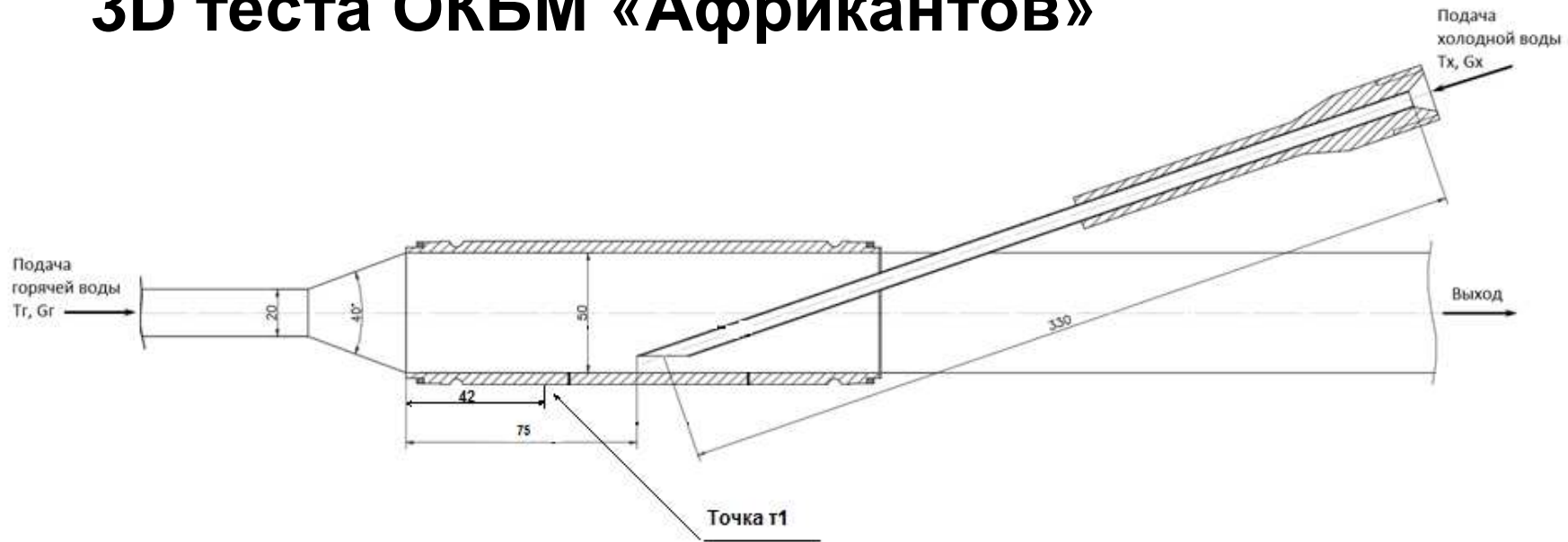


Попытка использовать зональный RANS/LES для течения в U-образном канале с теплообменом

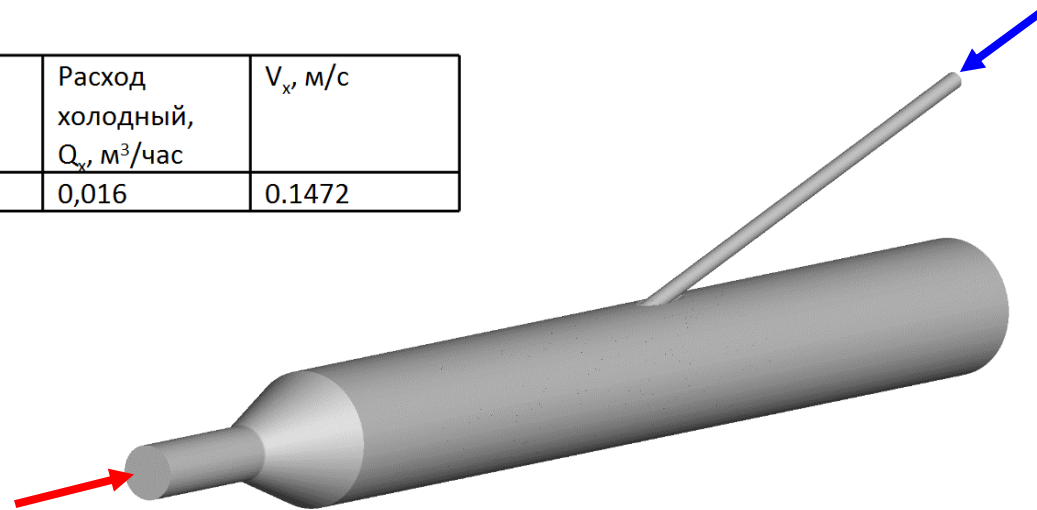


Открытая проблема: необходимость разработки генератора входных пульсаций температуры !

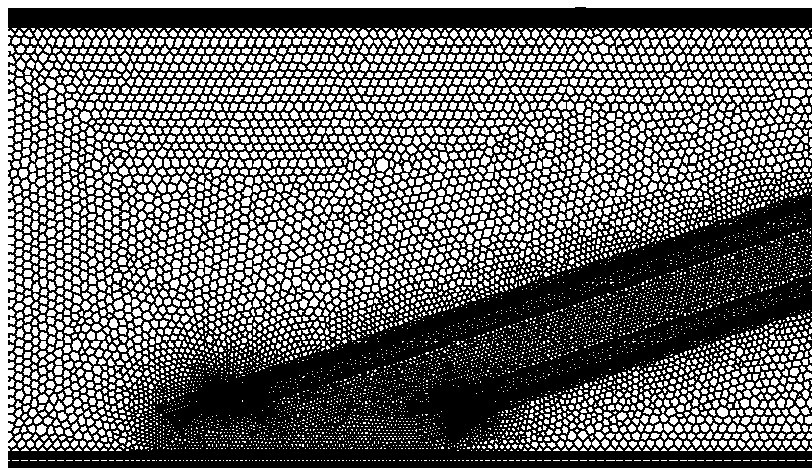
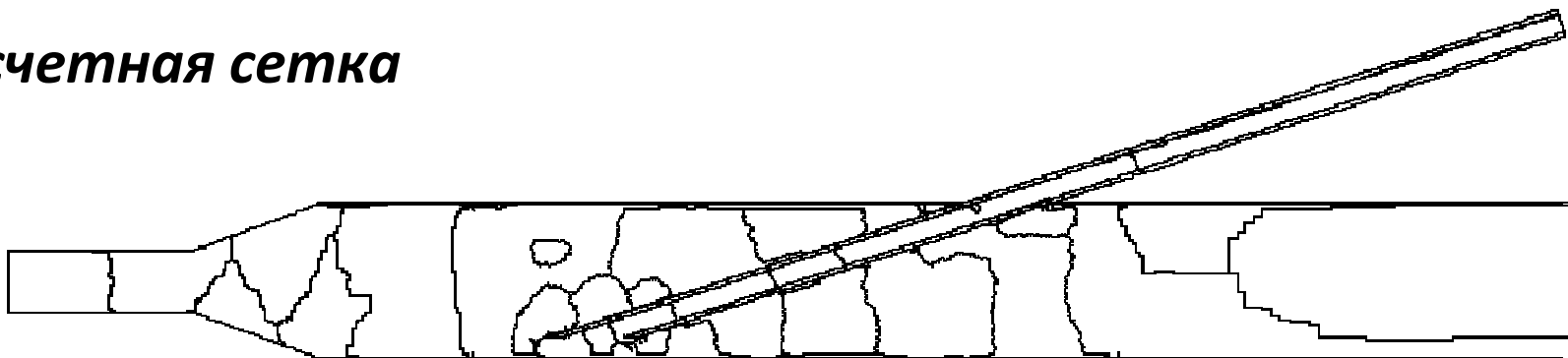
Зональные RANS/LES расчеты для 3D теста ОКБМ «Африкантов»



Температура горячего потока, °C	Температура холодного потока, °C	Расход горячий, Q _г , м ³ /час	V _г , м/с	Расход холодный, Q _х , м ³ /час	V _х , м/с
50	28,2	0,786	0.69498	0,016	0.1472

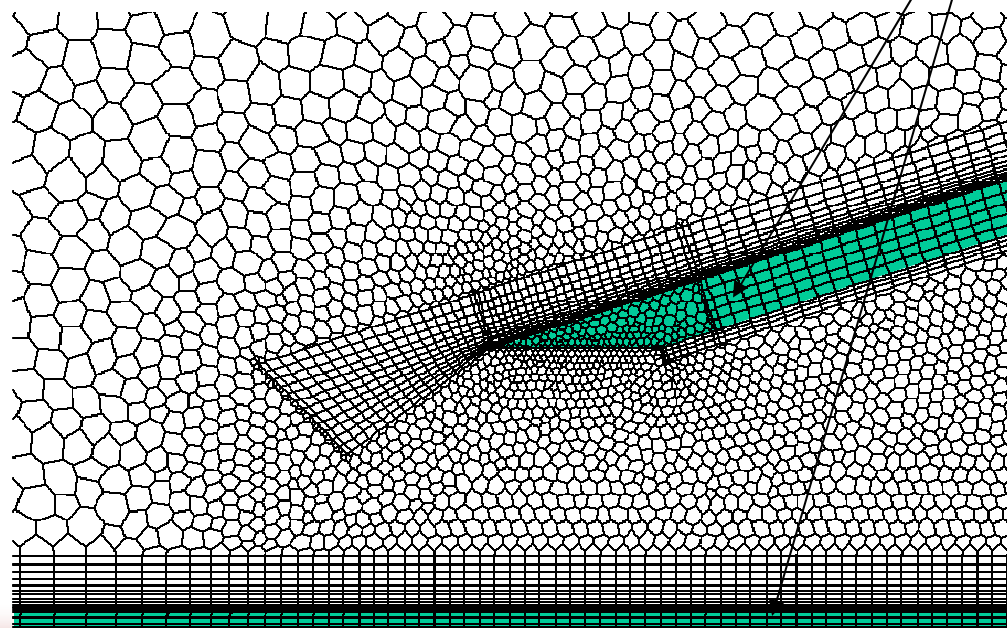


Расчетная сетка



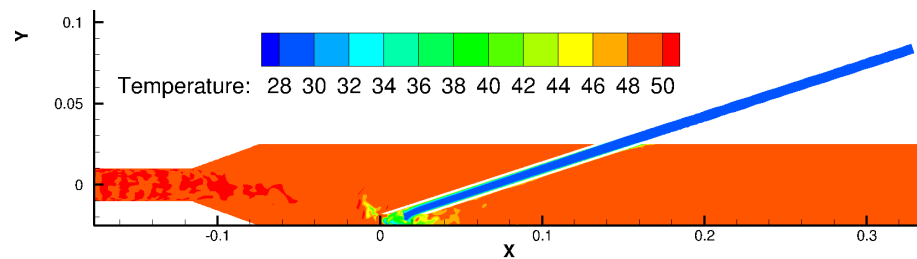
- 4,2 млн. полиэдральных ячеек
- максимальный размер ячеек 1 мм
- размер ячеек в зоне впрыска < 0.3мм
- пристенный шаг < 0.05 мм ($y^+ < 2$)

Твердые
блоки

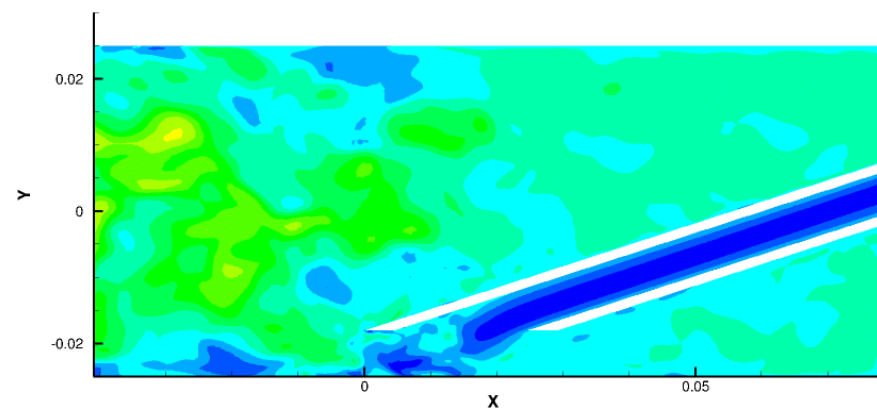
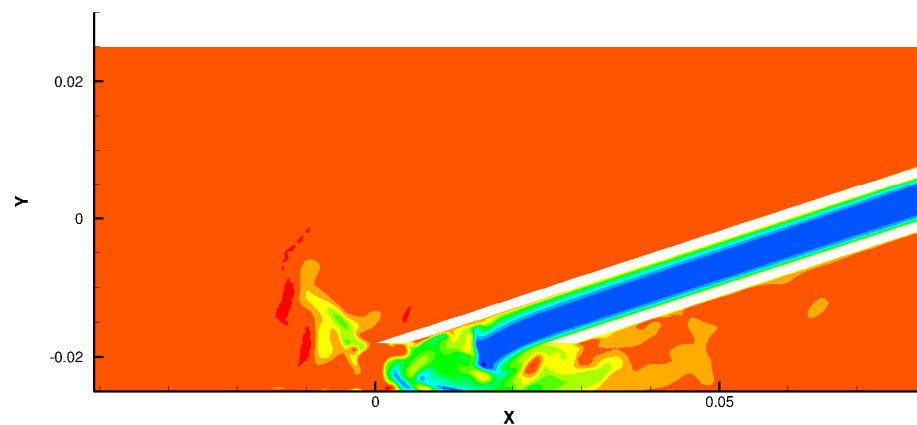
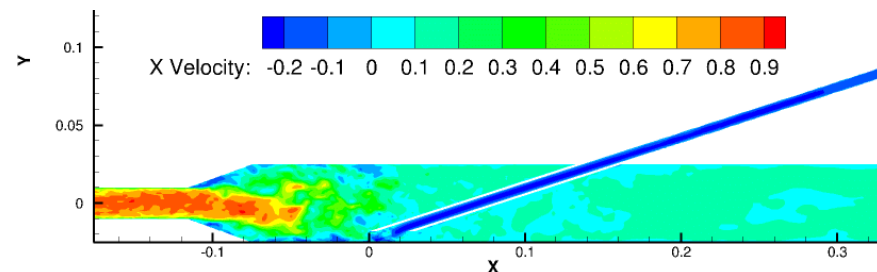


Шаг по времени 0.00015 с ($CFL < 1$)
Скорость счета на 280 ядрах ~ 8 с/сутки

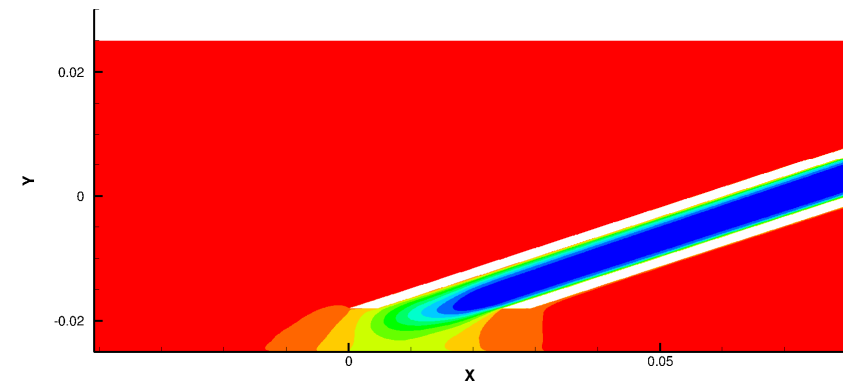
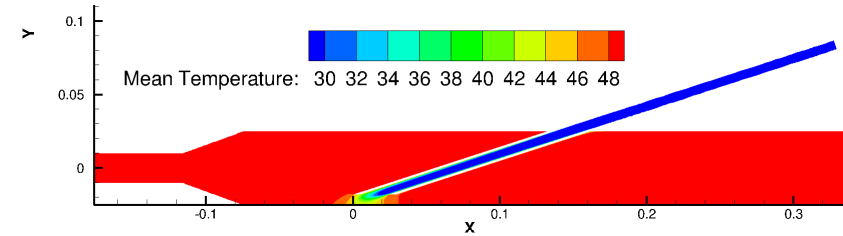
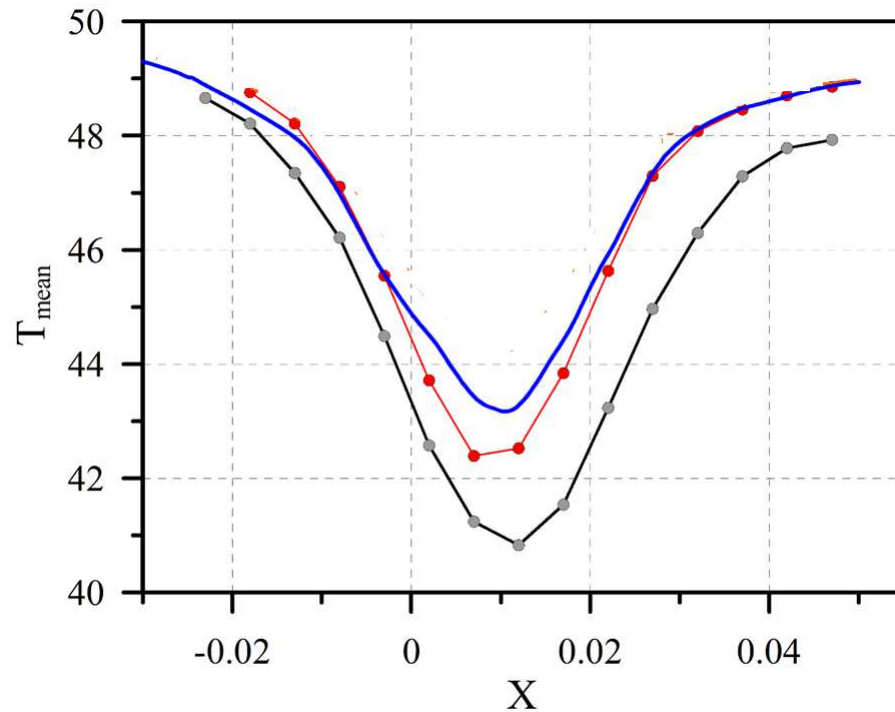
Мгновенное поле температуры



Мгновенное поле продольной скорости

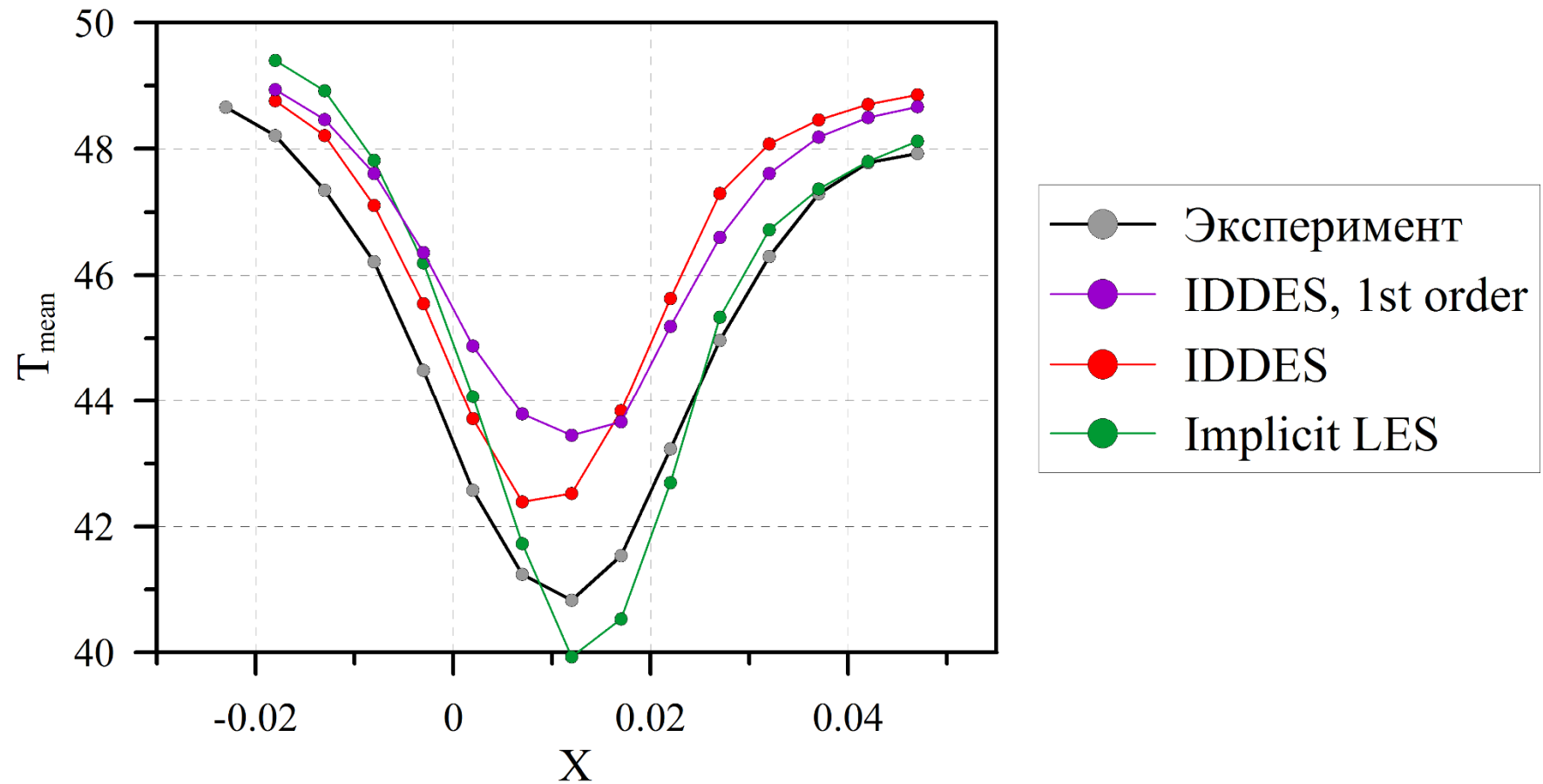


Распределение средней температуры на нижней линии

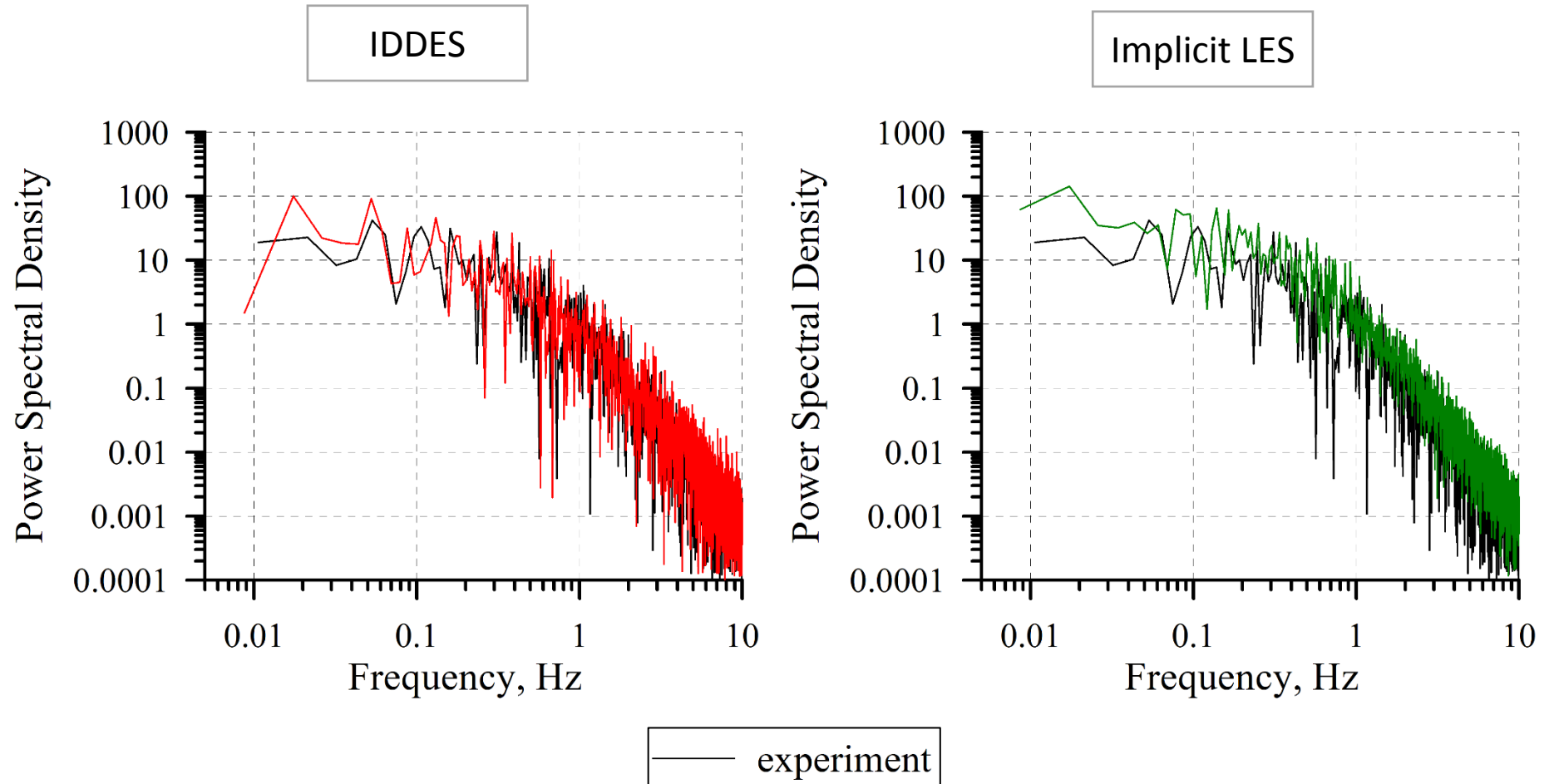


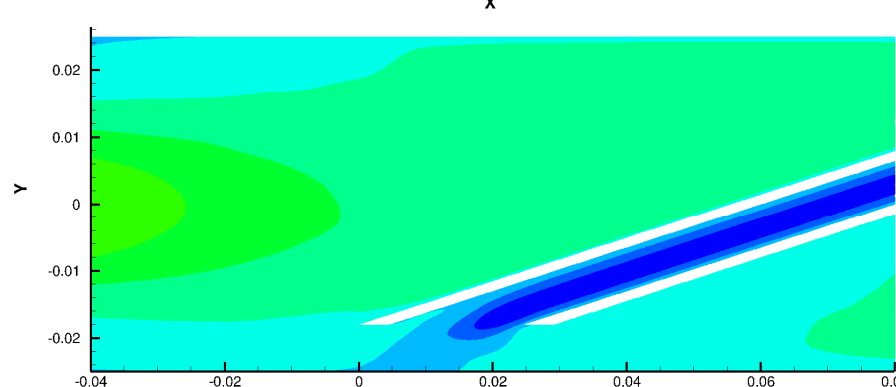
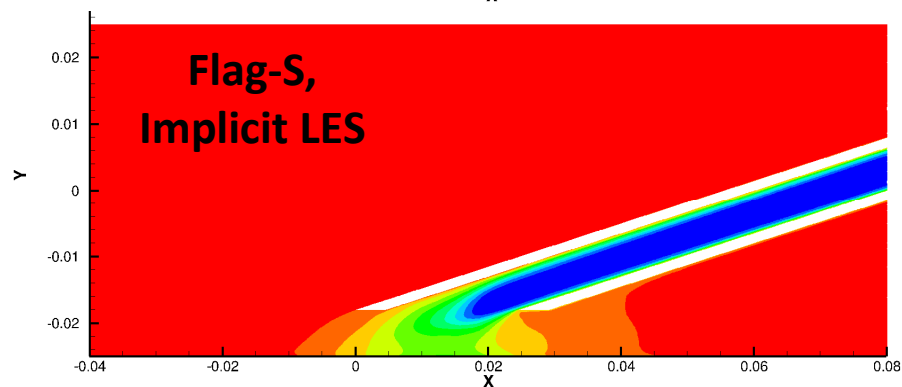
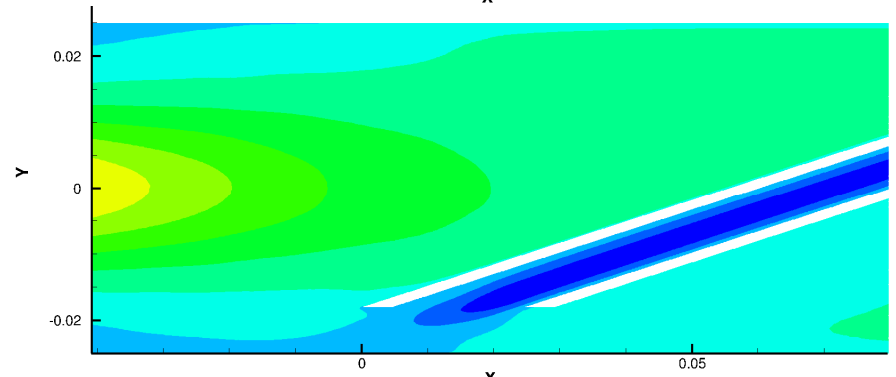
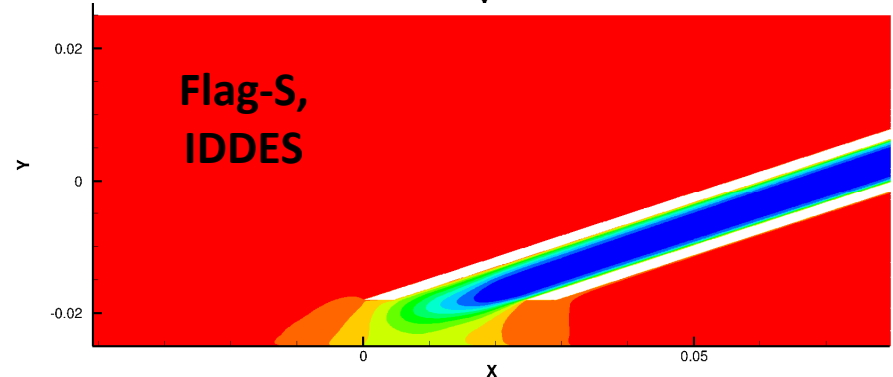
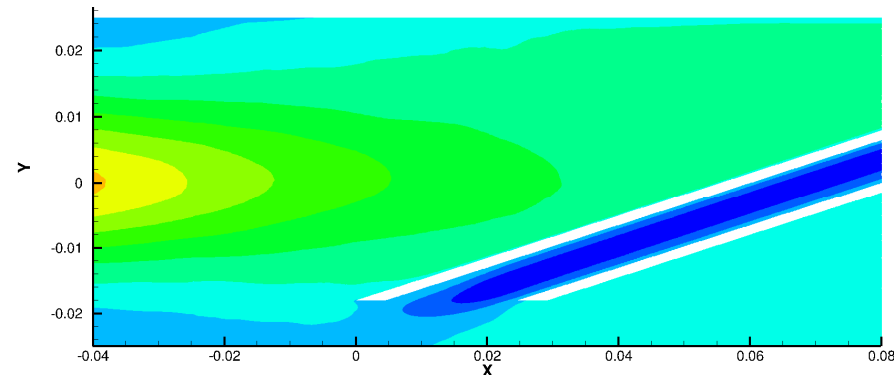
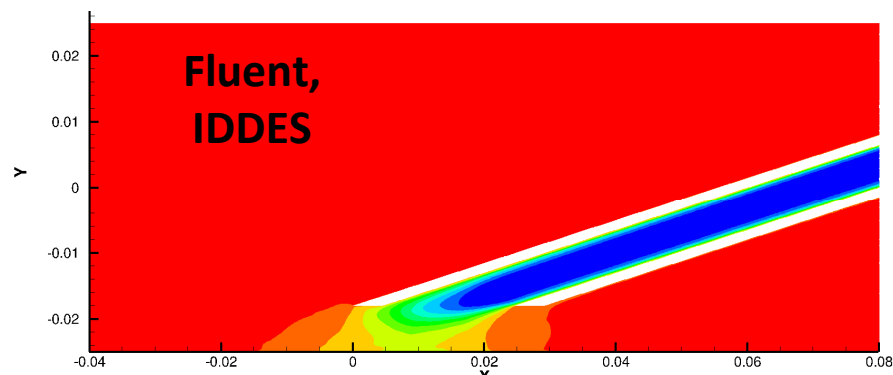
- Эксп., ОКБМ
- IDDES, Fluent
- IDDES, FLag-S

Влияние численной схемы и модели, Flag-S



Сравнение спектров температурных пульсаций на стенке





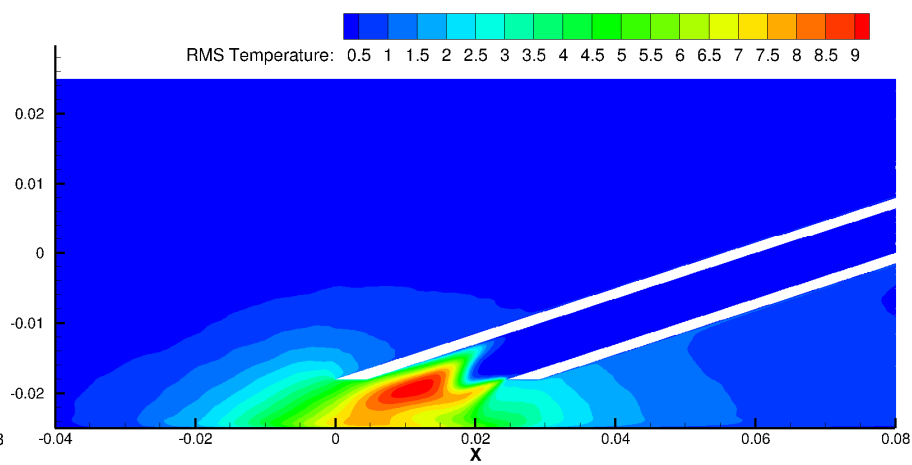
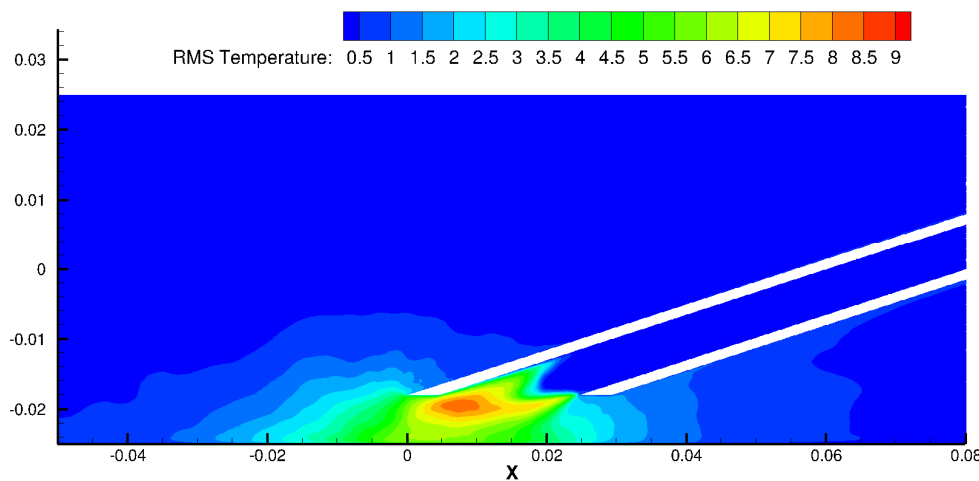
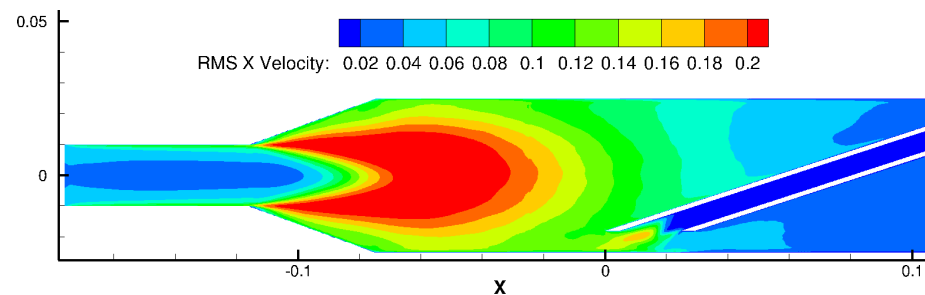
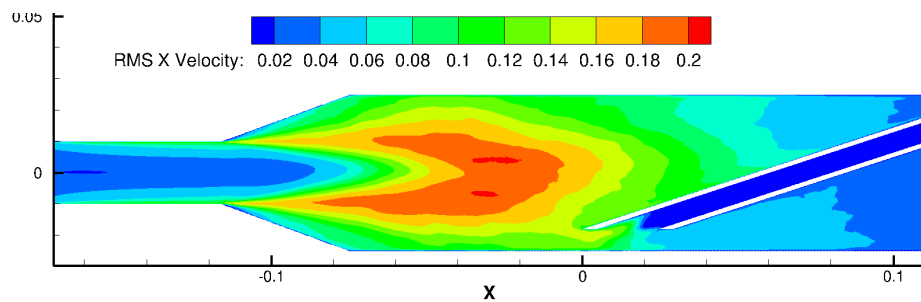
Mean Temperature: 30 32 34 36 38 40 42 44 46 48

Mean X Velocity: -0.2 -0.1 0 0.1 0.2 0.3 0.4 0.5 0.6 0.7 0.8

Поля пульсаций, RMS

IDDES

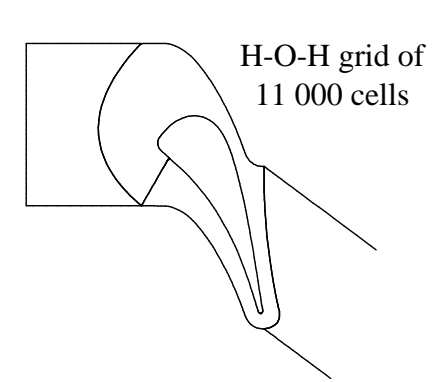
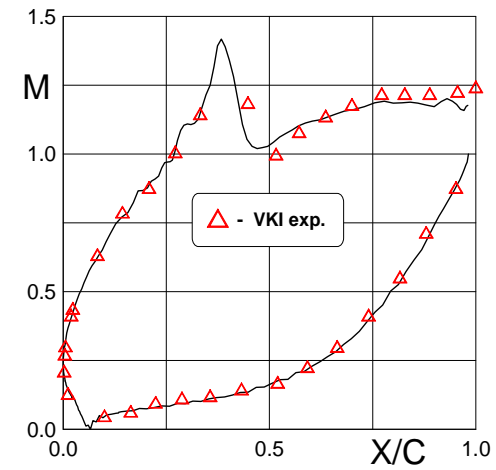
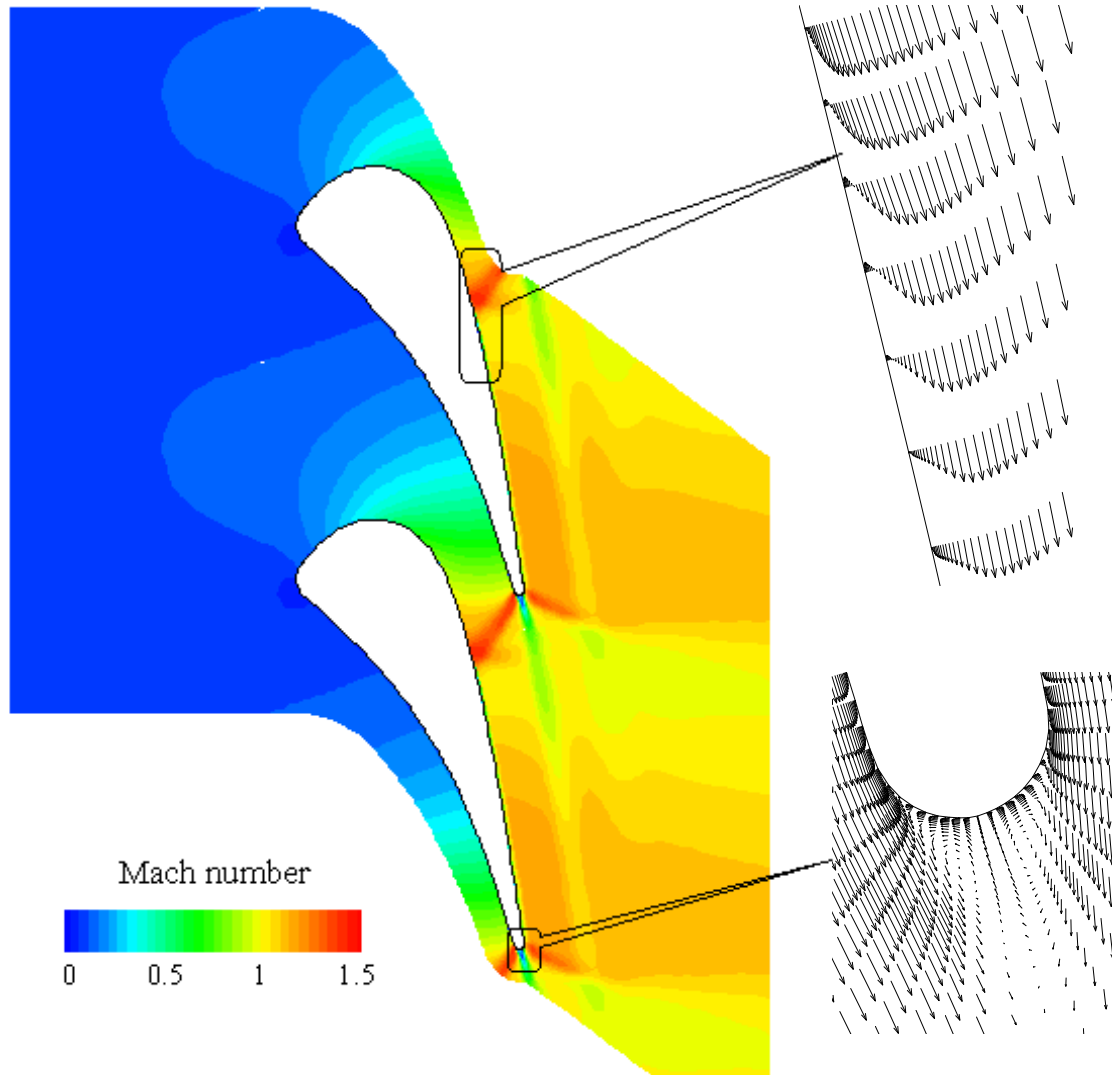
Implicit LES



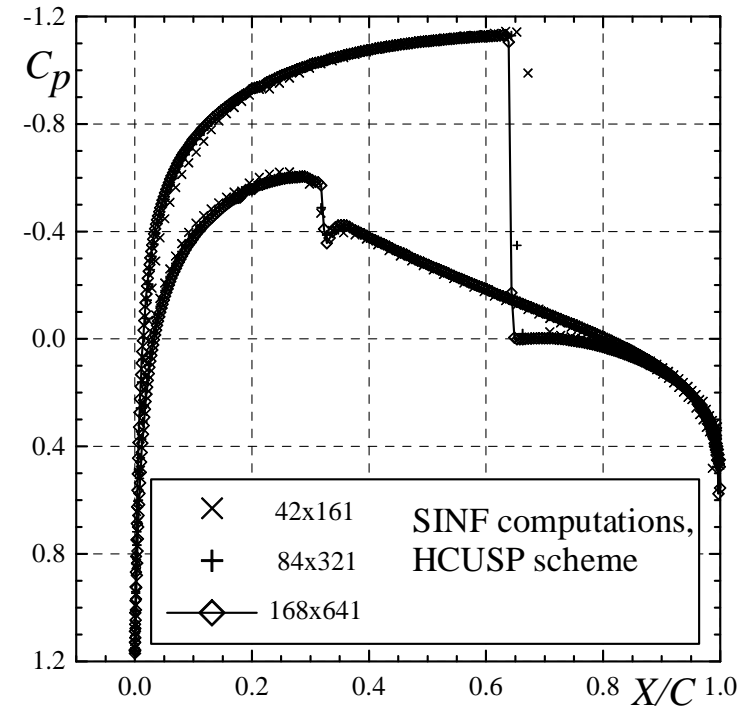
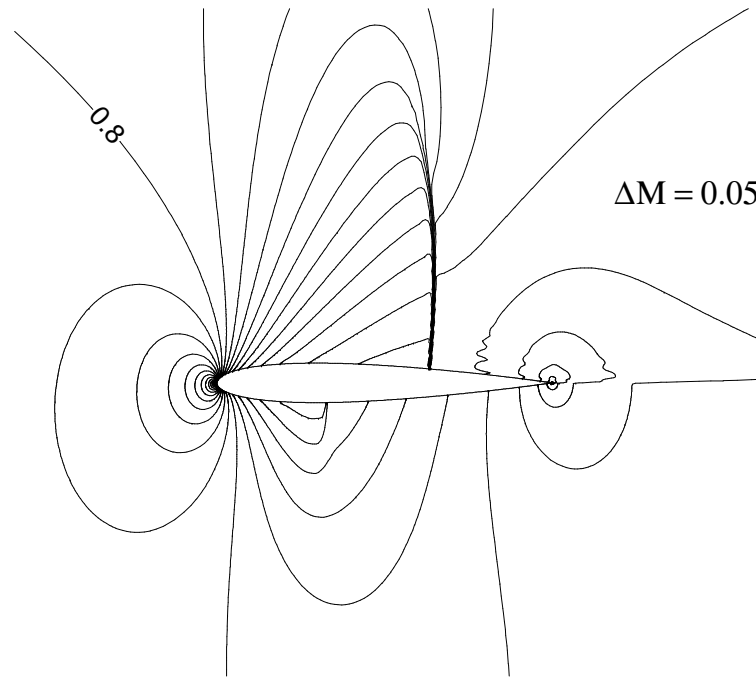
**Расчет сверх- и транзвуковых течений
(«старые» примеры расчетов по
блочно-структурированному» коду SINF)**

Numerical simulation of transonic turbine cascade flow

(H-CUSP 2nd-order scheme; Spalart-Allmaras turbulence model; $Re=10^6$)

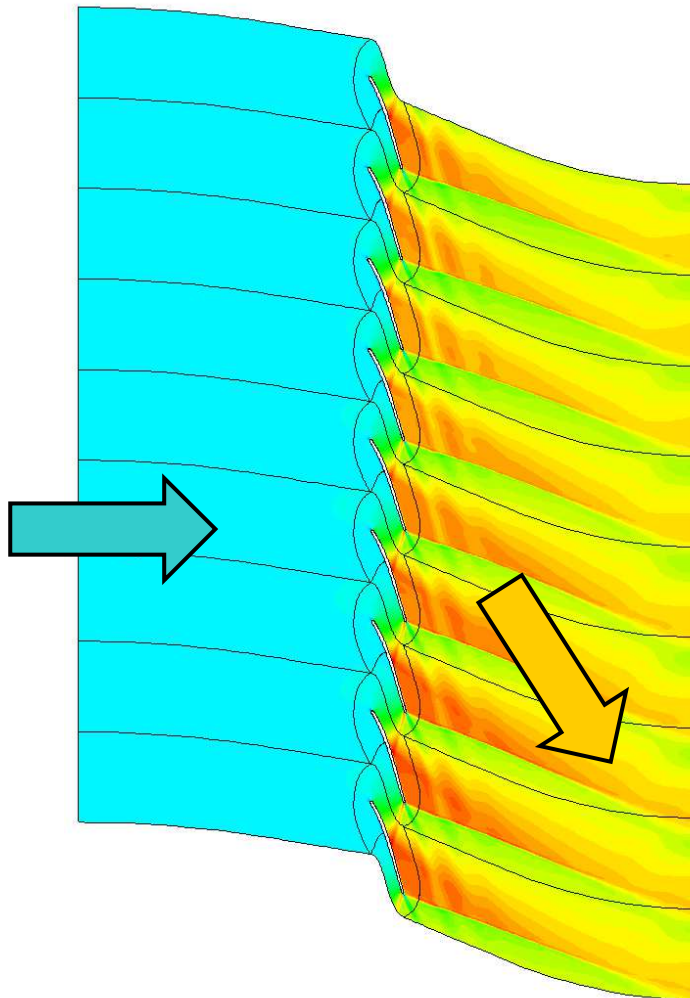


Euler equation solution for transonic flow around the NACA-0012 airfoil at $M_\infty=0.8$ and $\alpha=1.25^\circ$

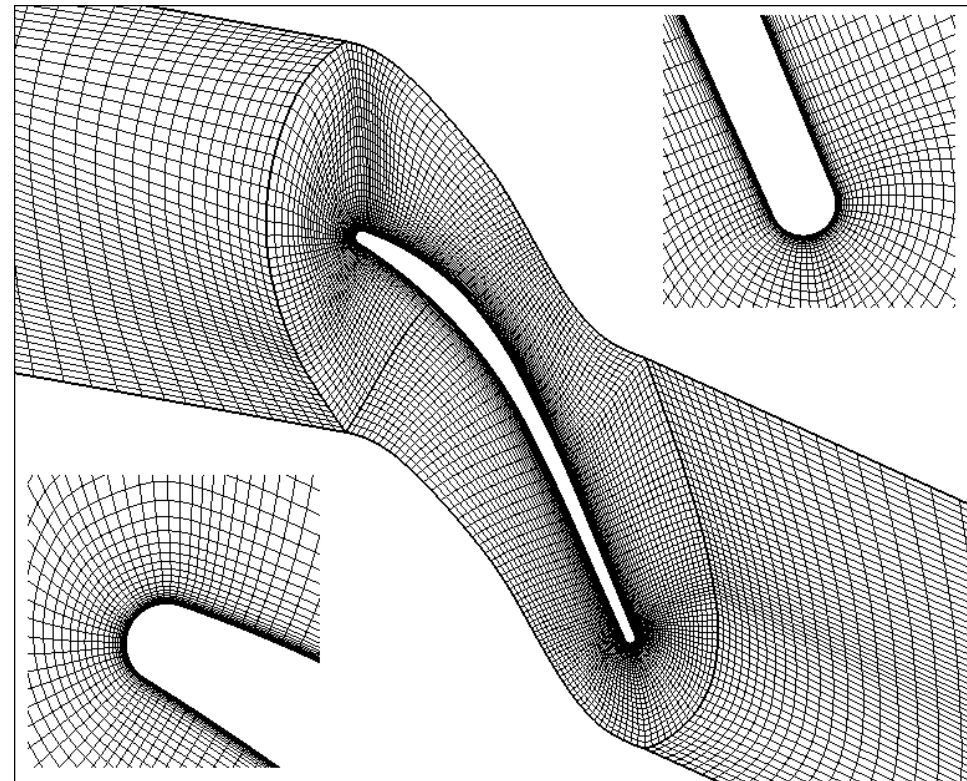


Data source	O-type grid	C_L	C_D
SINF code	42x161	0.3717	0.02716
Same	84x321	0.3577	0.02286
Same	164x641	0.3569	0.02224
Swanson, Radespiel and Turkel, <i>AIAA-Pap. No 97-1945, 1997</i>	128x768	0.3582	0.02278

Vibration of a turbine blade cascade



Mach number in a transonic turbine blade cascade



Example of grid deformation

**Развитие «неструктурированного»
кода SINF/Flag-S для расчета сверх- и
транзвуковых течений**

Реализуются схемы, основанные на решении задачи Римана о распаде разрыва

$$\vec{F}_f = \langle \vec{F} \rangle - \vec{D}$$

Схема Рунге

$$\langle \vec{F} \rangle = 0.5 \left(\vec{F}(\vec{w}_f^L) + \vec{F}(\vec{w}_f^R) \right)$$

$$\vec{D} = \frac{1}{2} \left| \tilde{A}(\vec{w}_f^R, \vec{w}_f^L) \right| (\vec{w}_f^R - \vec{w}_f^L)$$

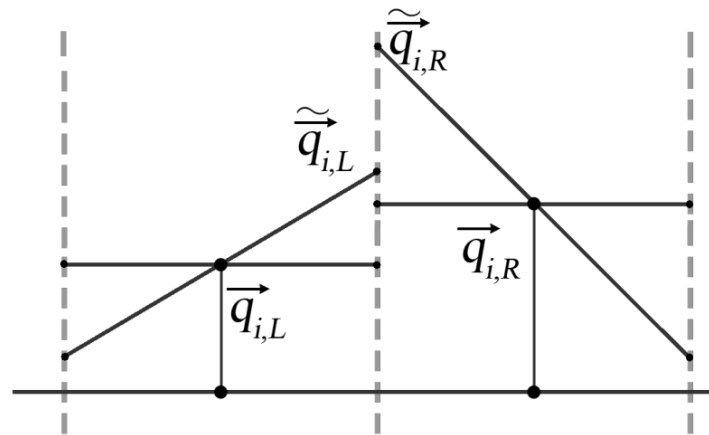
$$\tilde{A} = \left(\partial \vec{F} / \partial \vec{w} \right) \quad \left| \tilde{A} \right| = R \left| \tilde{\Lambda} \right| L$$

$$\vec{w} = \begin{bmatrix} \rho \\ \rho u \\ \rho v \\ \rho w \\ \rho H \end{bmatrix}$$

$$\vec{F} = \begin{bmatrix} \rho V_n \\ \rho u V_n + p n_x \\ \rho v V_n + p n_y \\ \rho w V_n + p n_z \\ \rho H V_n \end{bmatrix}$$

Повышение порядка точности (номинально до второго)

Повышение порядка точности (Monotone Upstream-centred Schemes for Conservation Laws - MUSCL подход): кусочно-полиномиальное распределение переменных в ячейке.



$$\mathbf{q} = \begin{bmatrix} p \\ T \\ u \\ v \\ w \end{bmatrix}$$

$\tilde{q}_{L,R}$ - реконструированные значения

$$\tilde{\mathbf{w}} = \tilde{\mathbf{w}}(\tilde{\mathbf{q}})$$

Расчет вектора потоков

первый порядок точности

второй порядок точности

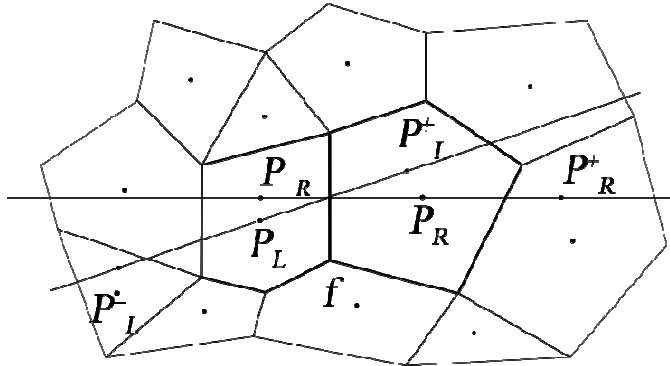
$$\vec{F}_f = \vec{F}_f(\vec{w}_L, \vec{w}_R) \quad \vec{F}_f = \vec{F}_f(\tilde{\vec{w}}_L, \tilde{\vec{w}}_R)$$

подавление осцилляций

Ограничители (Limiter)

ENO, WENO схемы

Квазиодномерные



Линейная односторонняя экстраполяция:

$$\tilde{u}_L = u_L + \frac{1}{2} \psi(R_L) \frac{(u_L - u_L^-)}{2}$$

$$\tilde{u}_R = u_R - \frac{1}{2} \psi(R_R) \frac{(u_R^+ - u_R)}{2}$$

$$R_L = \frac{u_L^+ - u_L}{u_L - u_L^-}$$

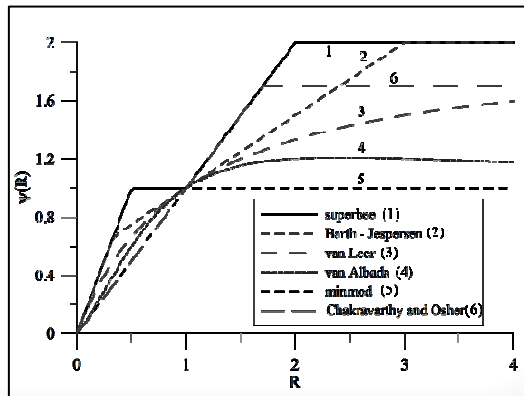
$$R_R = \frac{u_R^- - u_R}{u_R - u_R^+}$$

van Albada

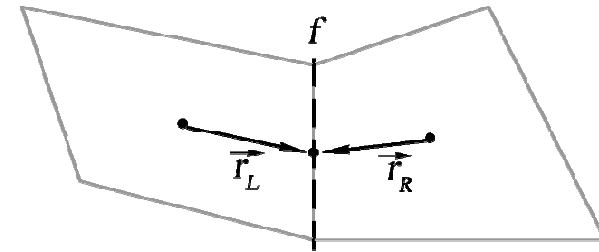
$$\psi_{VL}(R) = \frac{R^2 + R}{R^2 + 1}$$

Ψ – TVD ограничитель

$$0 < \left(\frac{\psi(R)}{R}, \psi(R) \right) < 2$$



Скалярные



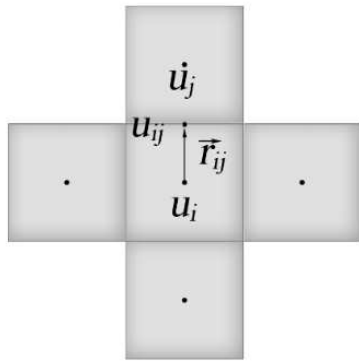
Реконструкция по градиенту:

$$\tilde{u}_L = u_L + \phi_L (\nabla u)_L \cdot \vec{r}_L$$

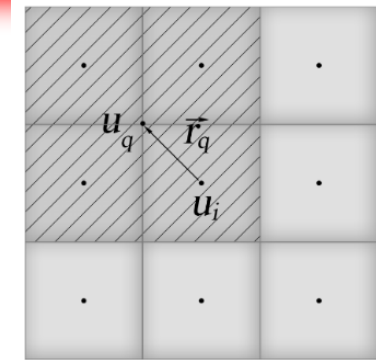
$$\tilde{u}_R = u_R + \phi_R (\nabla u)_R \cdot \vec{r}_R$$

ϕ – скалярный ограничитель

Скалярные ограничители



Ограничитель ВЖ
(Barth-Jespersen, 1989)



MLP-ограничители
(Park, Yoon et. al 2010)

Шаг 1 $\delta u_i^{\min} = \min_j (u_j - u_i)$ $\delta u_i^{\max} = \max_j (u_j - u_i)$

\hat{u}_q^{\min} \hat{u}_q^{\max} минимальное и максимальное значение в ячейках, прилегающих к узлу

Шаг 2 $u_{ij} = u_i + (\nabla u)_i \cdot \vec{r}_{ij}$
 $\Delta_- = (\nabla u)_i \cdot \vec{r}_{ij}$

$\Delta_- = (\nabla u)_i \cdot \vec{r}_q$

Шаг 3 $\varphi_{ij} = \Phi(y)$ $\begin{cases} \Delta_+ = \delta u_i^{\max}, \Delta_- > 0 \\ \Delta_+ = \delta u_i^{\min}, \Delta_- < 0 \end{cases}$
 $\varphi_{ij} = 1, \Delta_- = 0$

$\varphi_q = \Phi(y)$ $\begin{cases} \Delta_+ = \hat{u}_q^{\max} - u_i, \Delta_- > 0 \\ \Delta_+ = \hat{u}_q^{\min} - u_i, \Delta_- < 0 \end{cases}$
 $\varphi_q = 1, \Delta_- = 0$

ВЖ – ограничитель

$y = \Delta_+ / \Delta_-$
 $\Phi(y) = \min(1, y)$

MLP- u_1 - ограничитель

Шаг 4 $\varphi_i = \min_j (\varphi_{ij})$

$\varphi_{i,MLP} = \min_{\forall q} (\varphi_q)$

Ограничитель ВК
(Venkatakrishnan, 1995)

Дифференцируемый ограничитель:

$\Phi(y) = \frac{y^2 + 2y}{y^2 + y + 2}$ порог $\varepsilon = K(u_{\max} - u_{\min})$

$\varphi = \frac{1}{\Delta_-} \left[\frac{(\Delta_+^2 + \varepsilon^2)\Delta_- + 2\Delta_-^2\Delta_+}{\Delta_+^2 + 2\Delta_-^2 + \Delta_+\Delta_- + \varepsilon^2} \right]$

MLP- u_2 - ограничитель

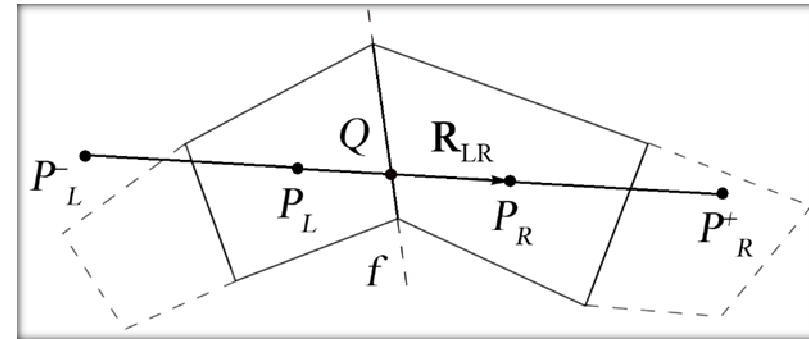
Проблема восстановления нужных точек при использовании квазиодномерного подхода

Способы восстановления точек:

метод DM (Darwish, Moukalled, 2003)

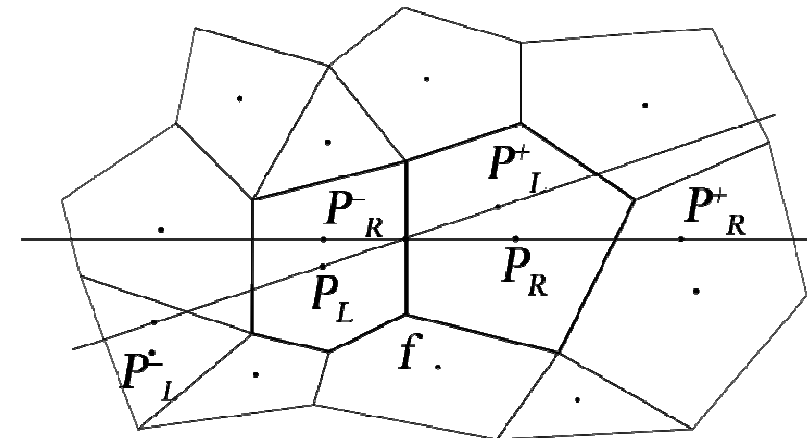
$$u_L^- = u_L - \left(2(\nabla u)_L \cdot \vec{R}_{LR} - (u_R - u_L) \right), \quad u_L^+ = u_R$$

$$u_R^+ = u_R + \left(2(\nabla u)_R \cdot \vec{R}_{LR} - (u_R - u_L) \right), \quad u_R^- = u_L$$



метод ВК (Бахвалов, Козубская, 2016),

- Для каждой грани проводится две прямые реконструкции
- Для дополнительных точек слева и справа определяется соответствующие тройки (пары) ячеек
- Значения в точках определяется путем интерполяции из центров ячеек



Алгоритм нахождения интерполирующих троек:

- определяется множество соседей первого уровня для текущей ячейки
- все ячейки сортируются по возрастанию косинуса угла между лучом реконструкции и выпущенным из центра текущей ячейки вектором направления на центр ячейки
- перебираются тройки ячеек в порядке возрастания суммы индексов ячеек в отсортированном массиве
- используется первая найденная интерполирующая тройка ячеек

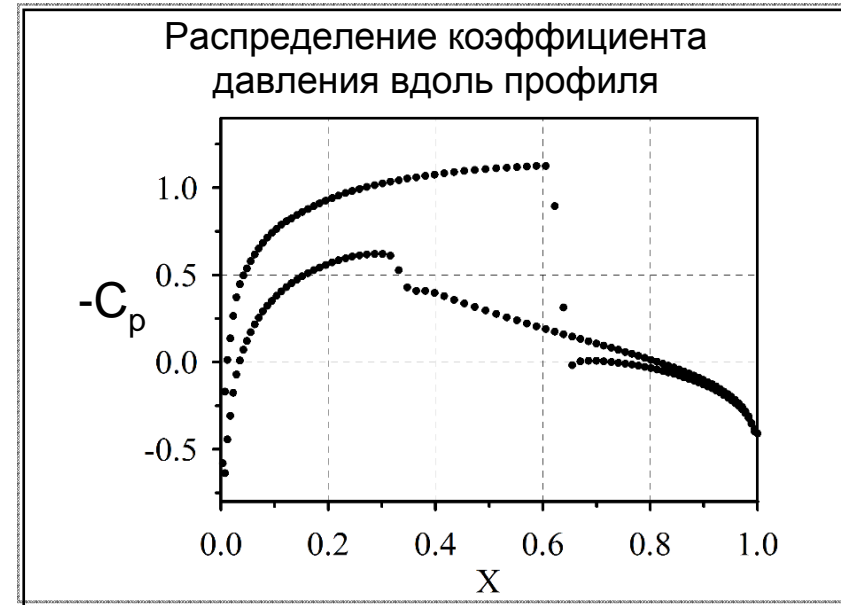
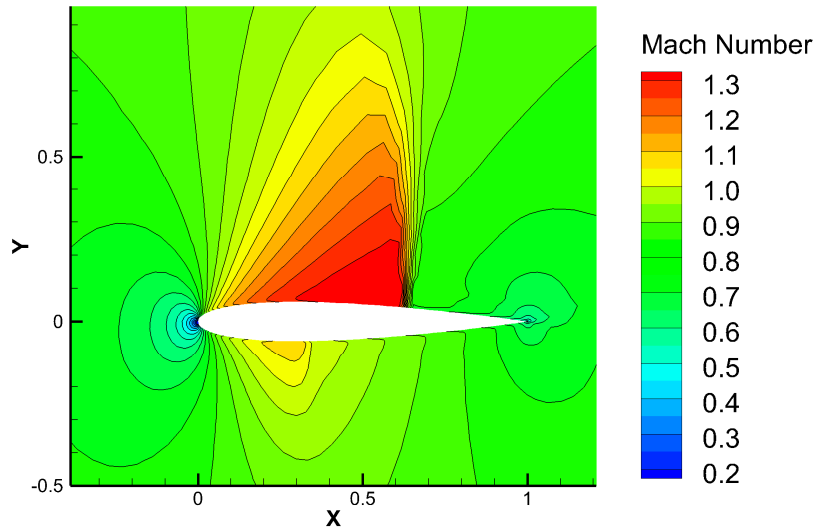
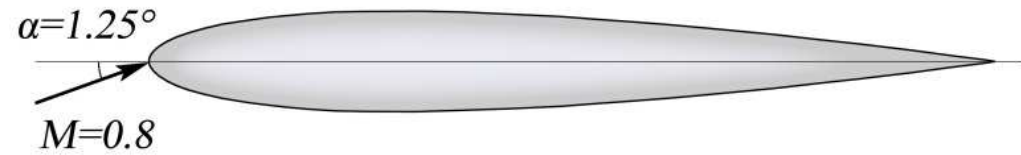
На данный момент в коде SINF/Flag-S реализованы:

- квазиодномерные ограничители с различными способами восстановления точек – по методам **DM** и **BK** (пока в 2D).
- скалярные ограничители **VJ**, **VK**, **MLP- u_1** , **MLP- u_2** .

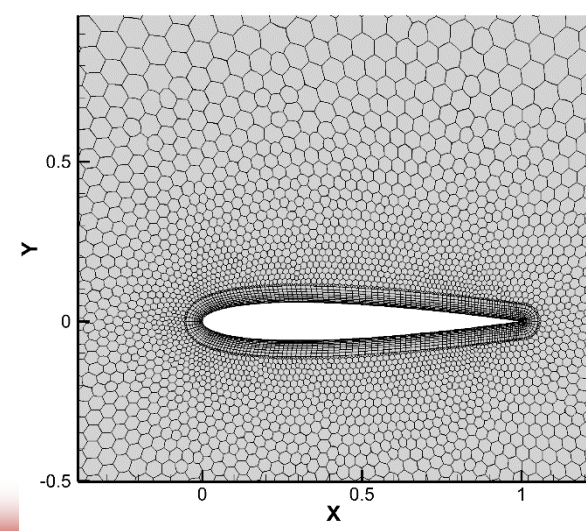
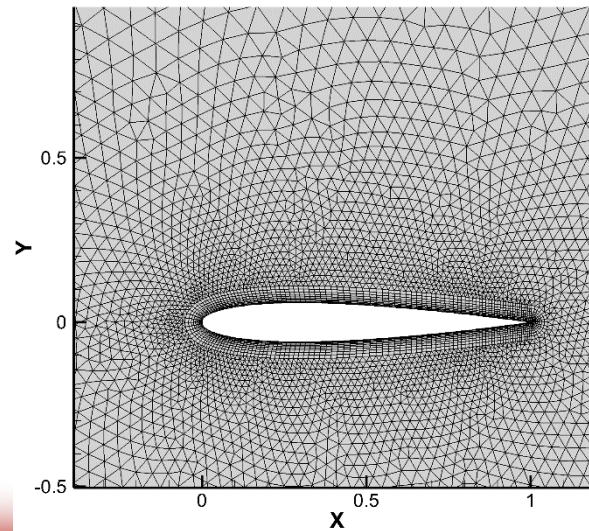
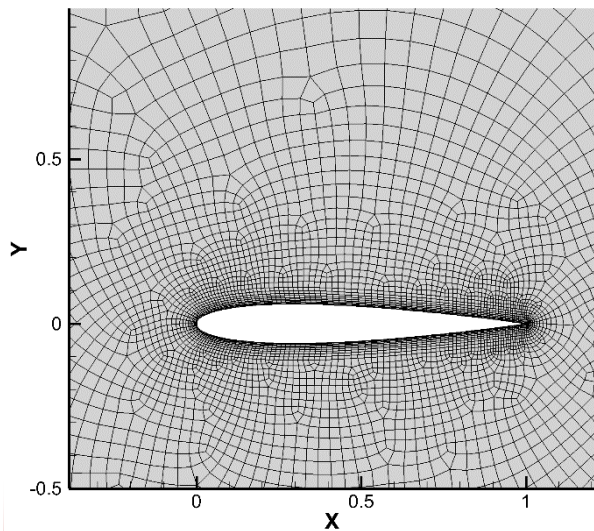
Расчеты проводились:

- по неявной схеме (в приращениях),
- дискретизацией стабилизирующего оператора по схеме со скалярной диссипации первого порядка,
- расчет градиента скалярной величины в центре контрольного объема проводился по методу Грина-Гаусса

Невязкое двумерное обтекание крылового профиля НАСА-0012



Расчетные сетки:

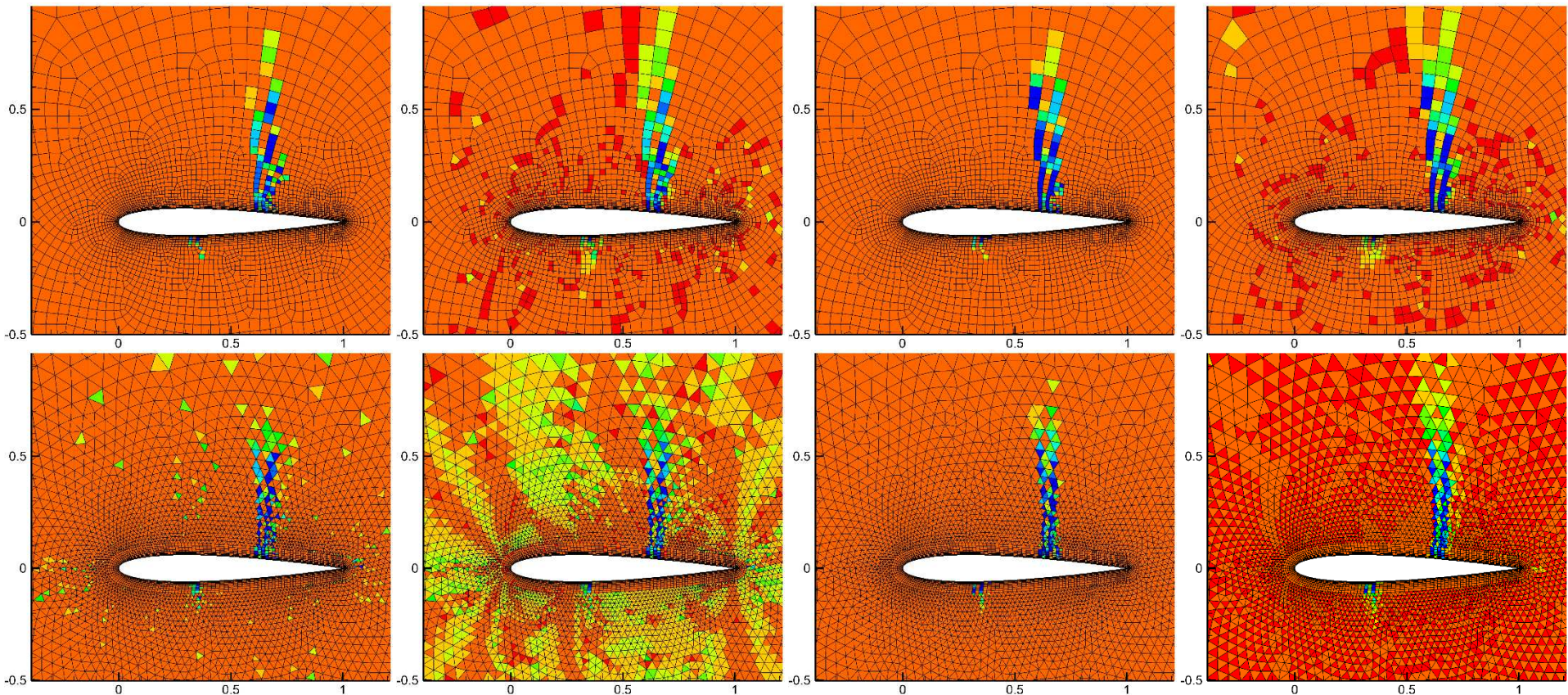


BJ

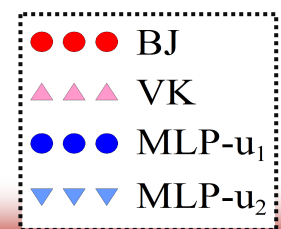
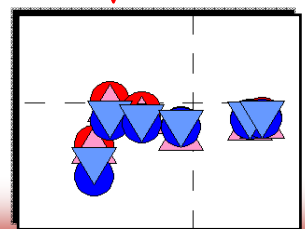
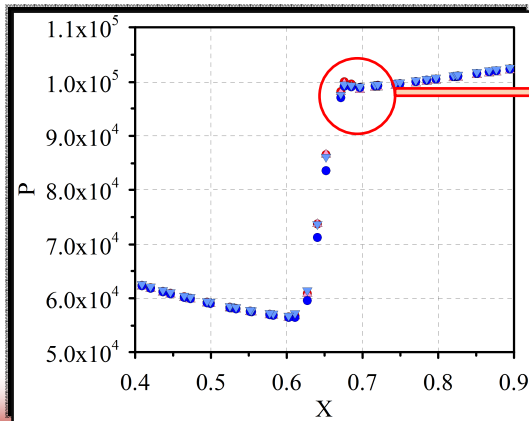
VK

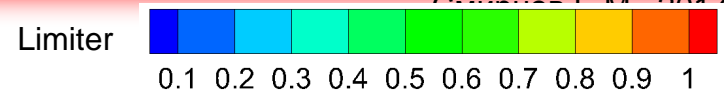
MLP- u_1

MLP- u_2



Распределение давления вдоль $y=0.3$





Сетка из многоугольных элементов

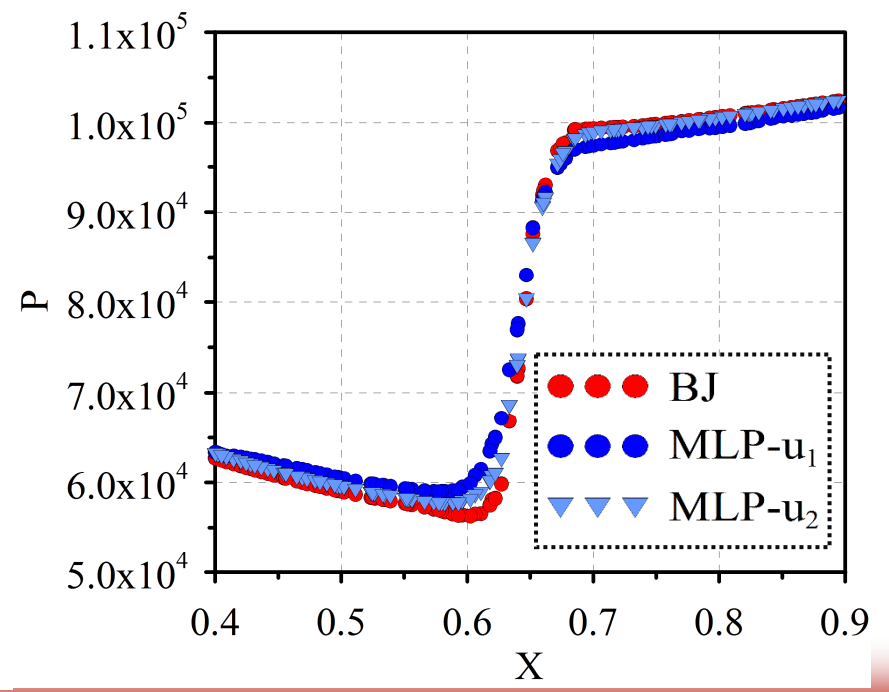
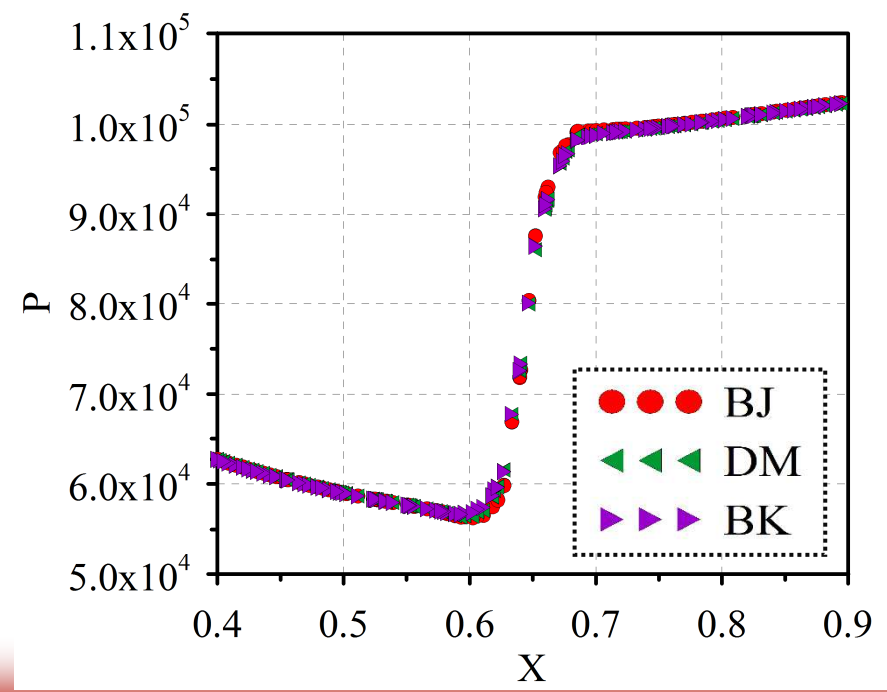
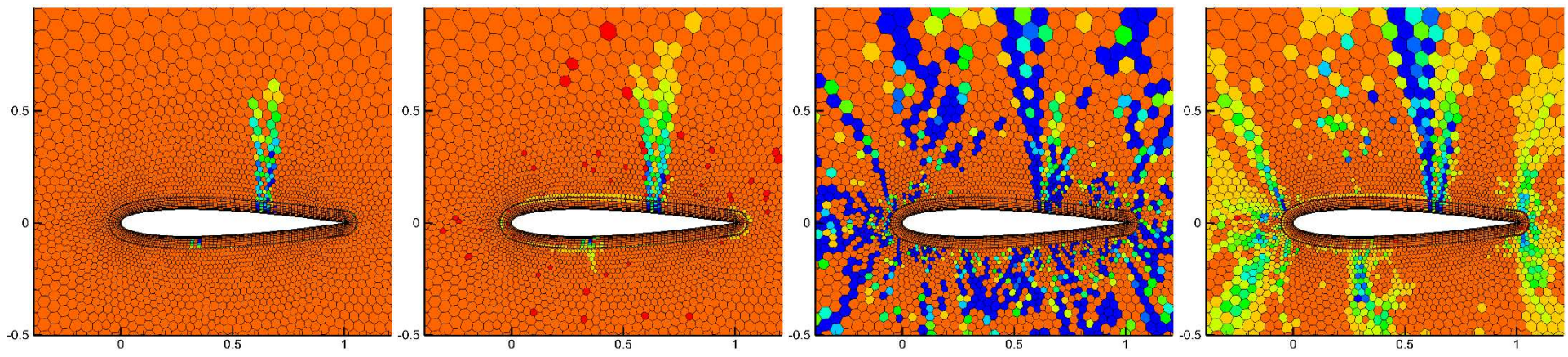
Поля ограничителей

BJ

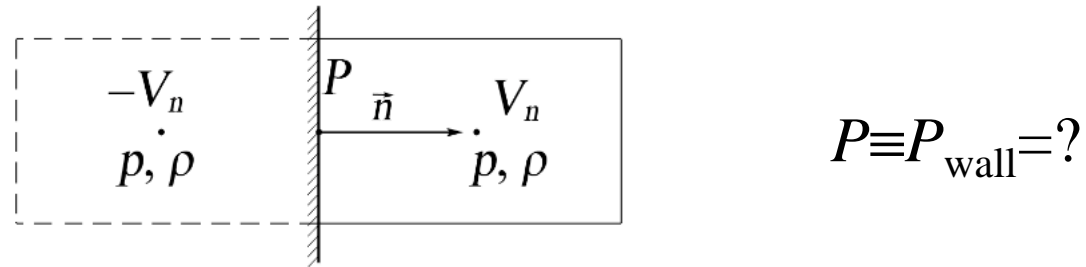
VK

MLP- u_1

MLP- u_2



Вопросы восстановления значения давления на стенке



Простейший способ (обозначение P1):

$$P = p$$

Использование решения задачи (Годунов, обозначение R#):

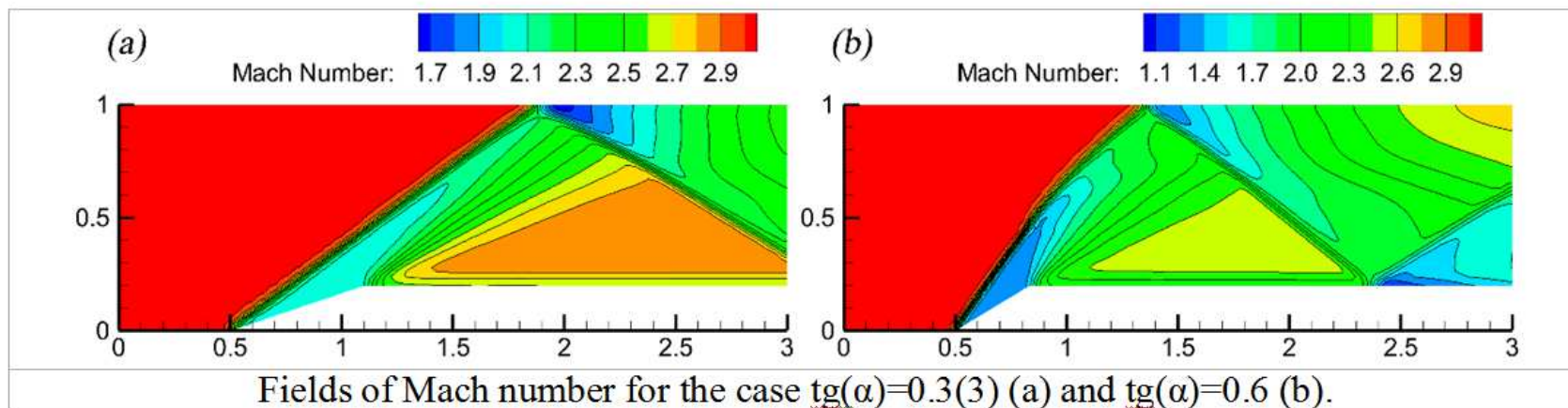
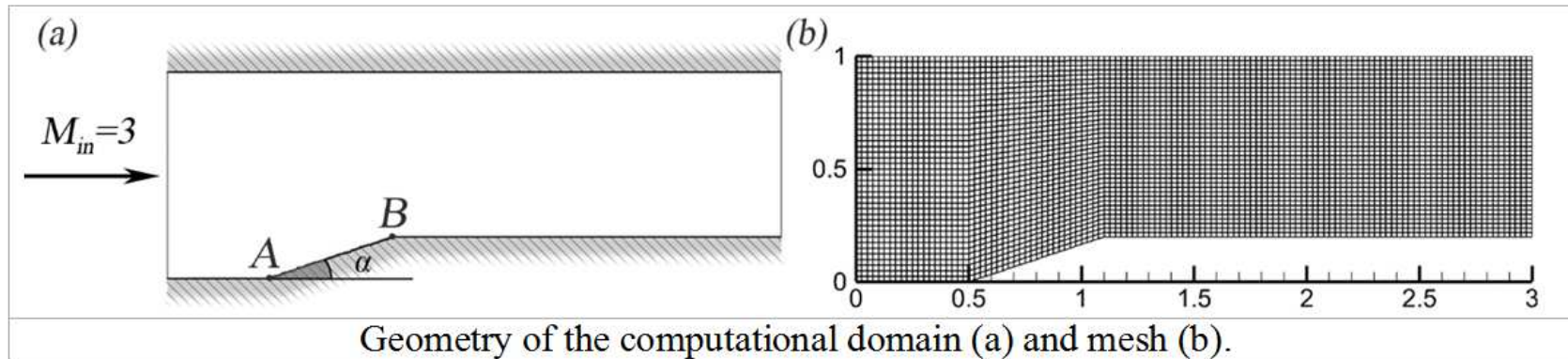
$$P = p \left(1 - \frac{k-1}{2} \frac{V_n}{c} \right)^{\frac{2k}{k-1}} \quad \text{при } V_n > 0 \quad \left| \quad \frac{P}{\sqrt{\rho \left(\frac{k+1}{2} P + \frac{k-1}{2} p \right)}} = -V_n \quad \text{при } V_n < 0$$

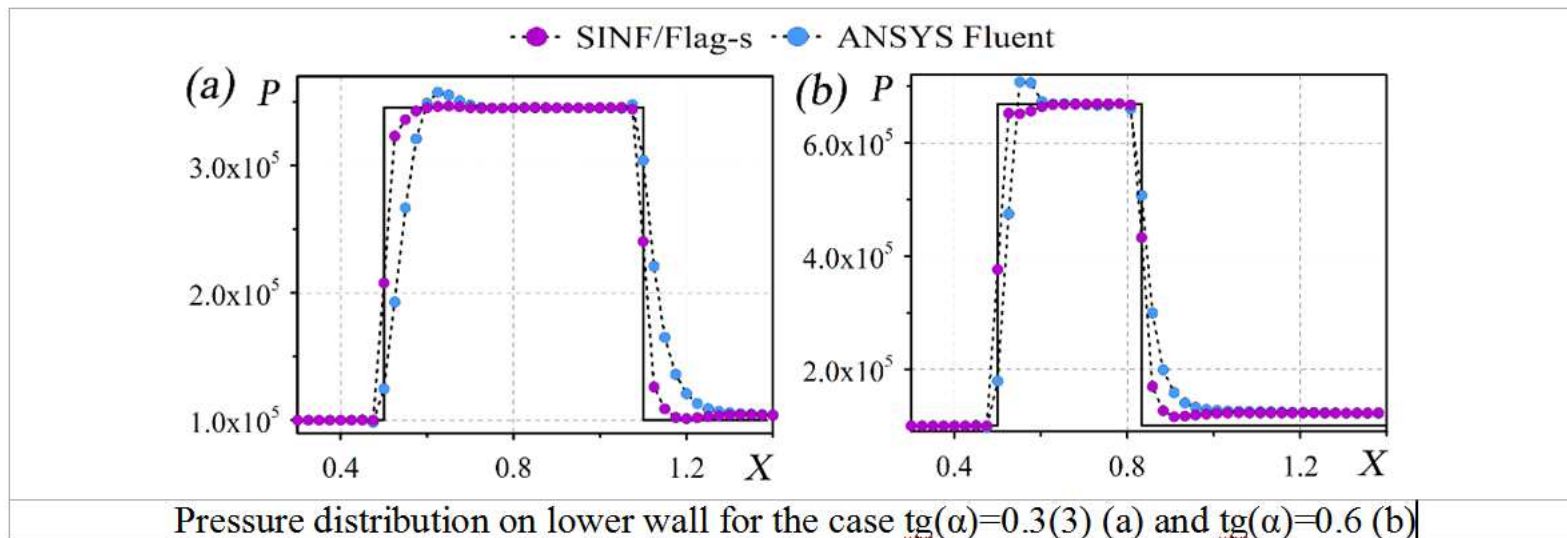
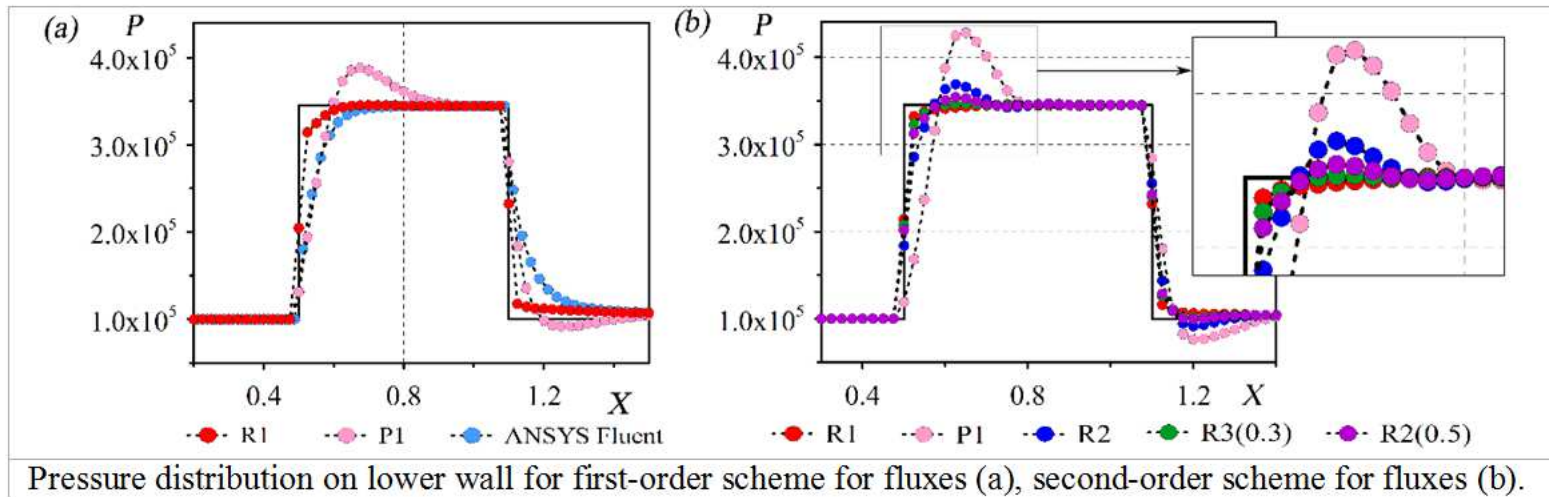
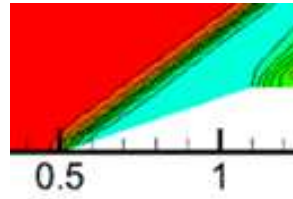
Для повышения порядка можно реконструировать V_n на стенке : $V_n \rightarrow \tilde{V}_n$

Вариант со взвешенным значением:

$$\tilde{V}_n^{weighted} = d \cdot V_n + (1-d) \cdot \tilde{V}_n, \quad d \in [0, 1]$$

Тест: сверхзвуковое течение в канале с центральным клином





Спасибо за внимание!