

Базовые версии и ответвления кода SINF (Supersonic to INcompressible Flows)

Е.М. Смирнов



Санкт-Петербургский государственный
политехнический университет
Кафедра гидроаэродинамики
Web: <http://aero.spbstu.ru>
E-mail: aero@phmf.spbstu.ru

Содержание

- Базовые версии кода SINF (блочноструктурированные сетки)
- Учебная CFD среда Flos с вычислительным ядром SINF
- Специализированный код ПГС-ТК на основе кода SINF
- Базовая версия кода SINF/Flag-S (неструктурированные сетки)
- Код ТЕМБР для моделирования теплогидродинамики жидких металлов

CFD-пакеты общего назначения, используемые на кафедре гидроаэродинамики СПбГПУ

Пакет *	Права	Использование	
SINF + ответвления	Собственная разработка, внутреннего пользования	с 1993 г.	
ANSYS Fluent	Лицензия СПбГПУ, Лицензия ООО «НТС»	с 2001 г. по н.вр.	
ANSYS CFX	Лицензия СПбГПУ, Лицензия ОАО «СПБАЭП»	с 2005 г. по н.вр	
CFX- TASCflow	Лицензия СПбГПУ	2003-2006 гг.	
NUMECA- Fine/Turbo	Лицензия СПбГПУ	2003-2007 гг.	

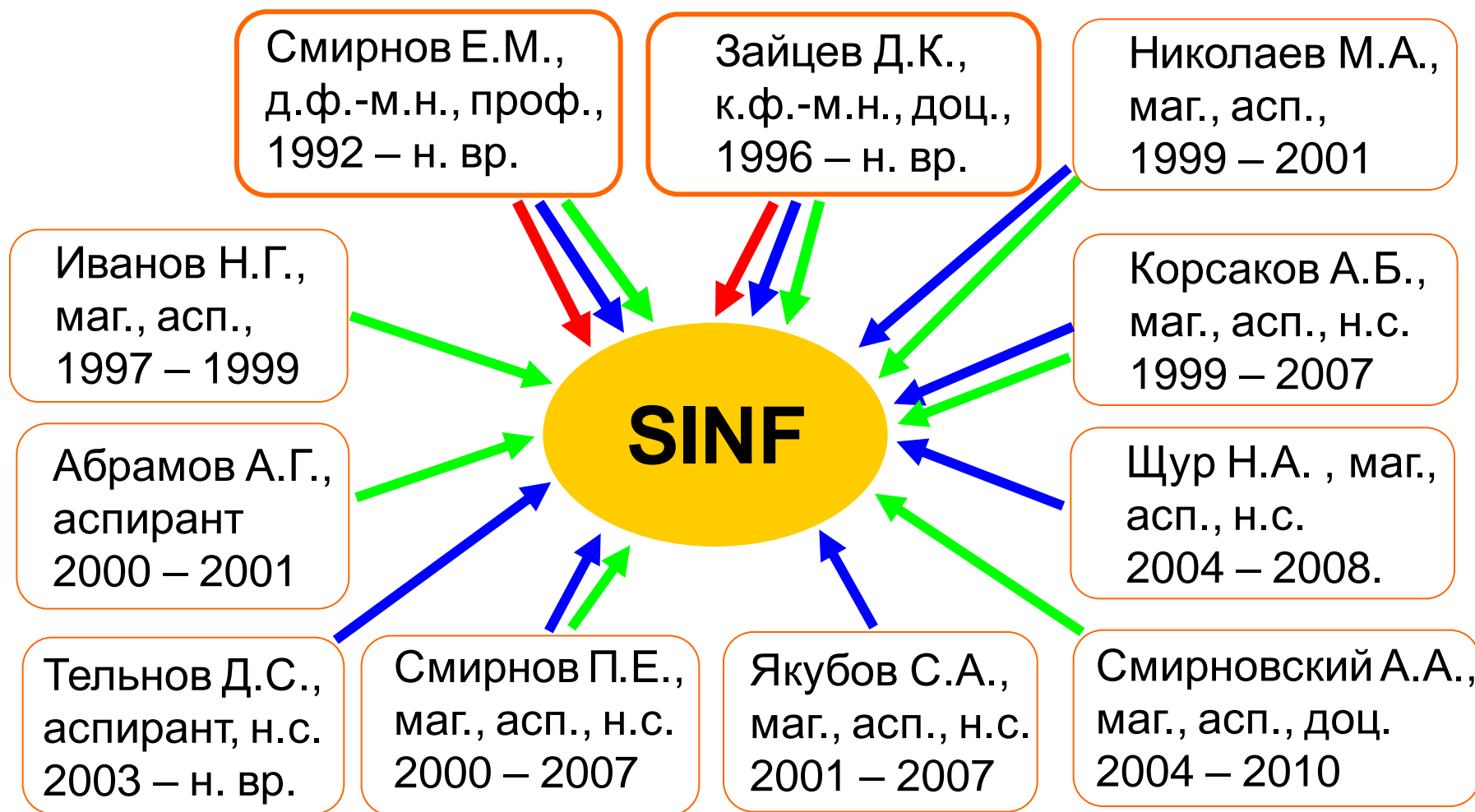
**) все пакеты основаны на методе конечных объемов*




Программный код SINF, оперирующий с блочно-структурированными сетками *(активно разрабатывался в 1992 -2010 гг.)*

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 не осуществлялась**

Разработка блочно-структурированного кода SINF



-  *структура, взаимосвязи, базовые версии*
-  *численные схемы, алгоритмы*
-  *физические модели, расширение класса задач*

Результаты использования блочно-структурированных версий кода SINF

Подготовлено :

- ☐ 9 кандидатских диссертаций и более 20-ти магистерских диссертаций

Выполнены исследования по:

- ☐ грантам РФФИ (12), а также грантам из зарубежных источников (3);
- ☐ программам по поддержке ведущих научных школ;
- ☐ контрактам с отечественными предприятиями (более 30-ти);
- ☐ контрактам с зарубежными предприятиями (более 10-ти)

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

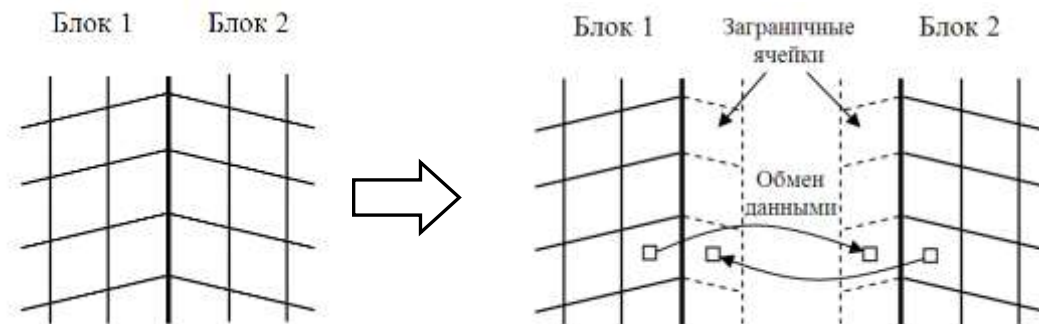
Сетки и сеточные технологии в блочно-структурированном коде SINF

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

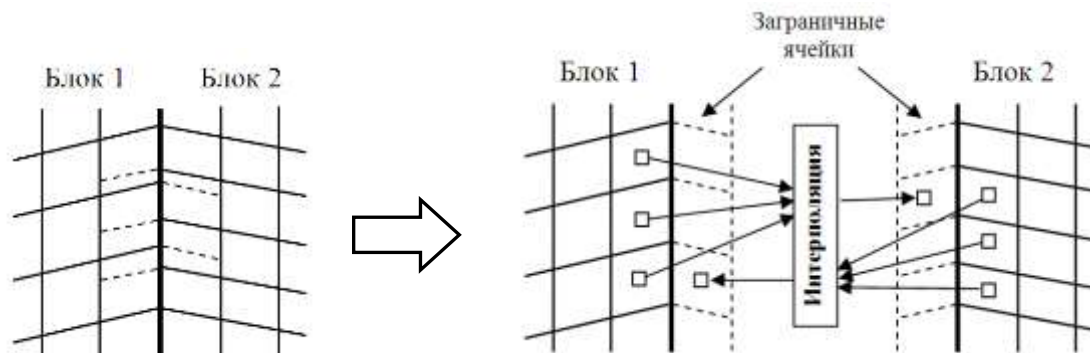
Генерация сеток

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

Стыковка блоков

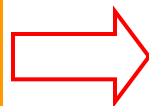


Регулярная
стыковка
полностью
«прозрачна»



Нерегулярная
стыковка с
интерполяцией

Для вычисления невязок
требуются значения ϕ и $\nabla\phi$
из одного ряда заграничных ячеек



Стыковка проводится в два этапа

- ✓ Обмен переменными
- ✓ Вычисление градиентов
- ✓ Обмен градиентами

Численные методы, реализованные в блочно-структурированном коде SINF

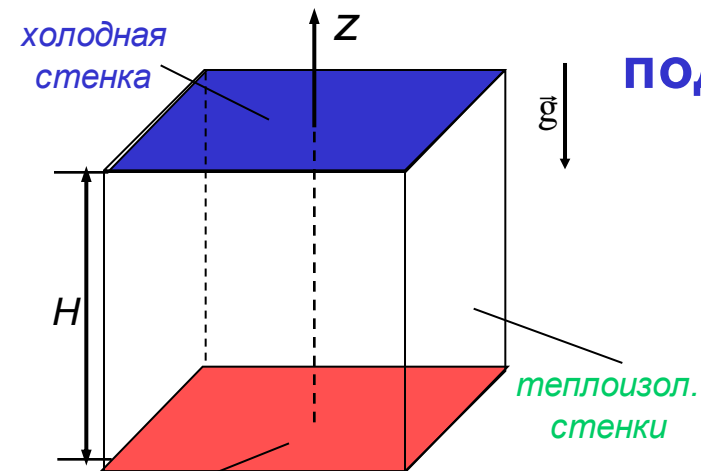
- Метод конечных объемов (второй порядок пространственной аппроксимации)
- Второй порядок аппроксимации по физическому времени (неявная трехслойная схема)
- Переменные «давление-скорость» для случая несжимаемой жидкости и дозвуковых течений газа (опции: SIMPLEC-алгоритм, метод искусственной сжимаемости, 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 SINP

- **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**

Некоторые примеры использования блочно-структурированного кода SINF

Турбулентная конвекция воды в подогреваемой снизу кубической полости

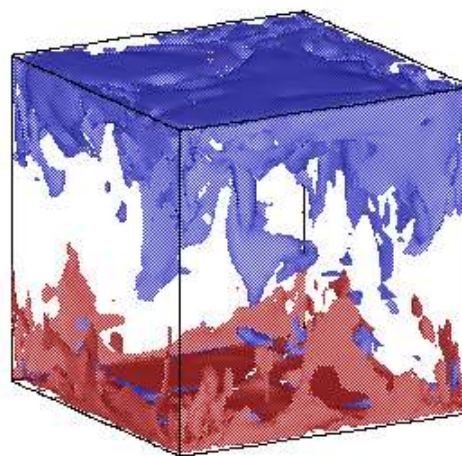
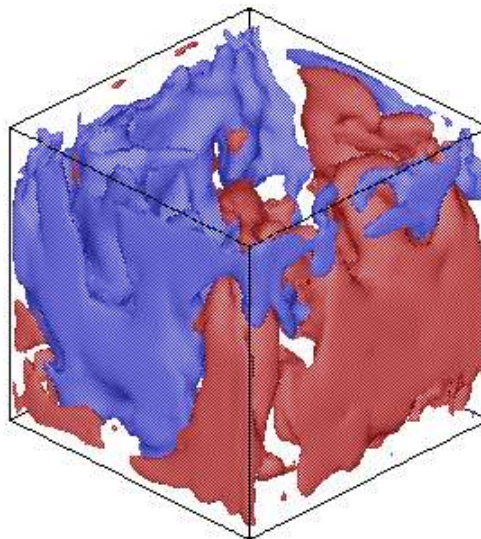
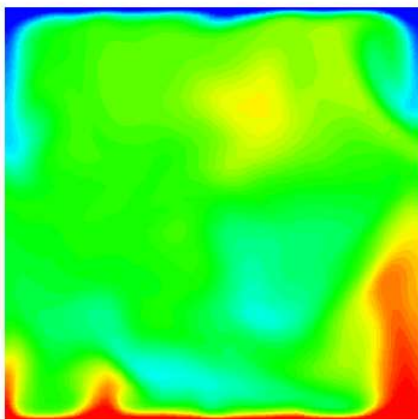


горячая
стенка

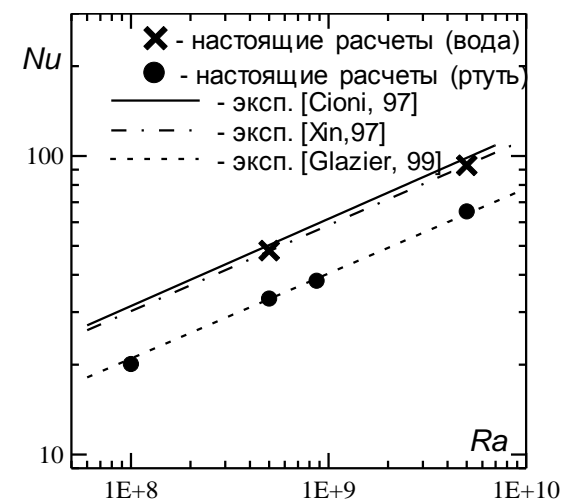
$$Ra = 5 \times 10^8; 5 \times 10^9$$

$$Pr = 7$$

Поле температуры

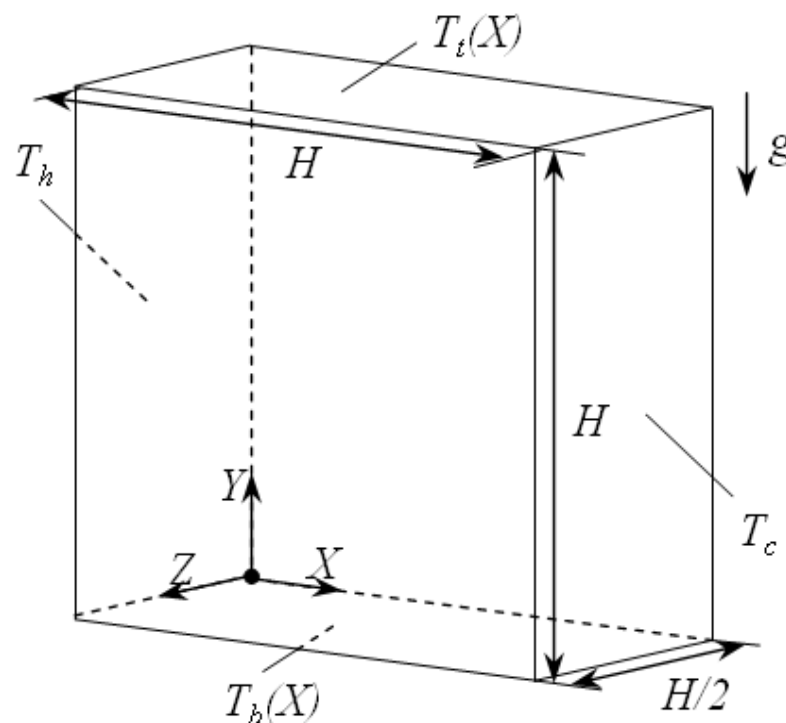
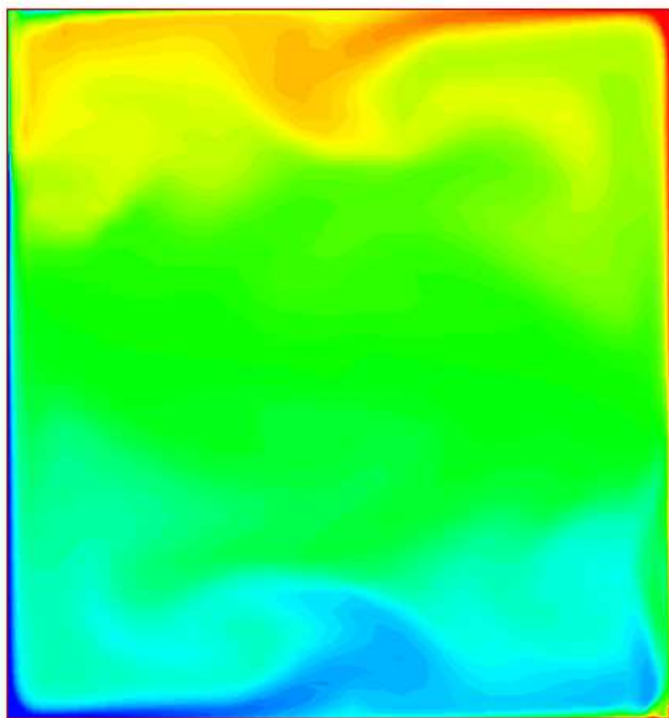


Числа Нуссельта
в сравнении с экспериментами

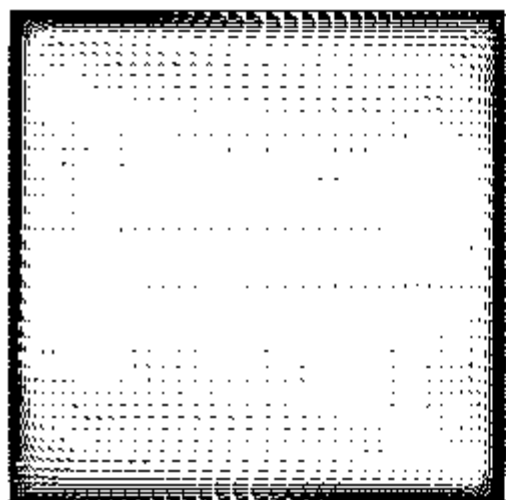
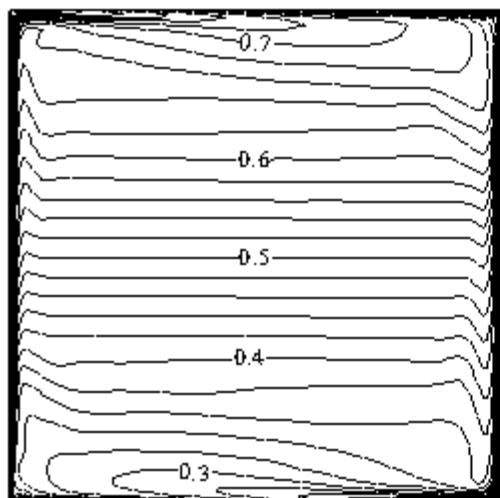


Статистически двумерная турбулентная конвекция воздуха в полости с разнотемпературными вертикальными стенками ($Ra = 1.6 \cdot 10^9$)

3D RANS/LES расчеты для условий экспериментов
Tian & Karayiannis, 2000

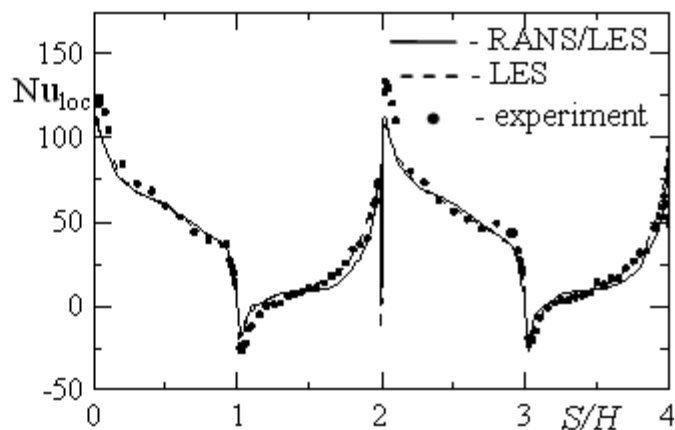
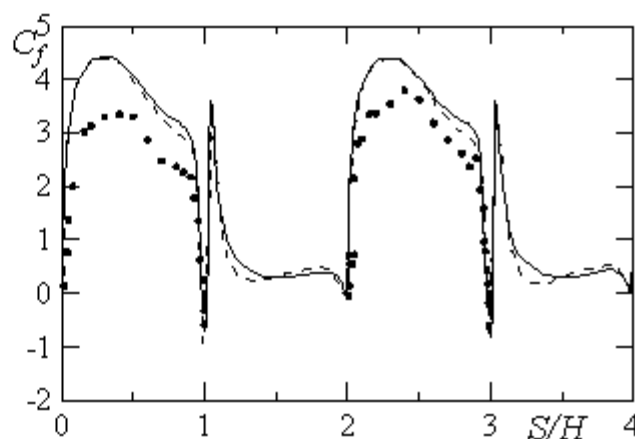


Temperature



Velocity

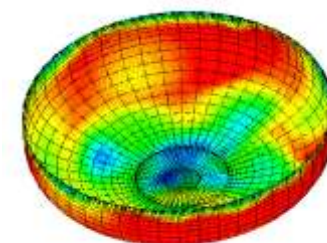
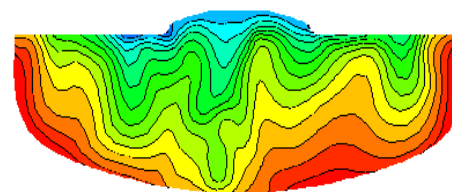
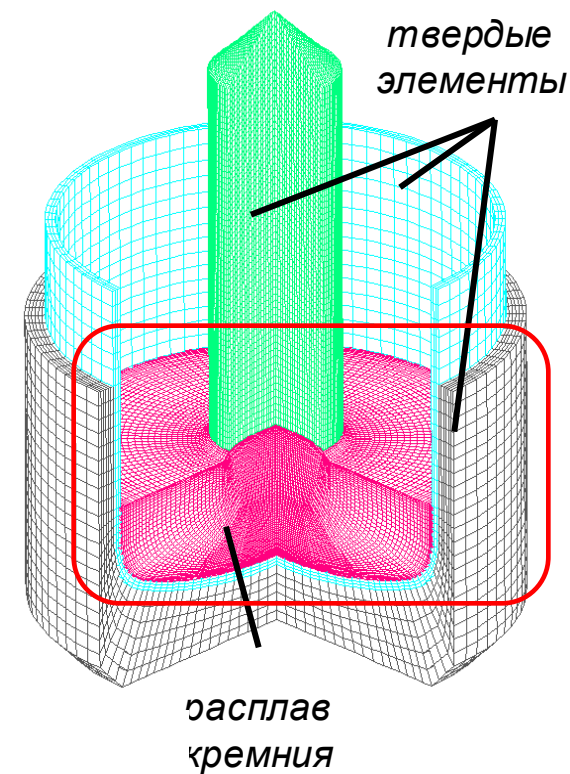
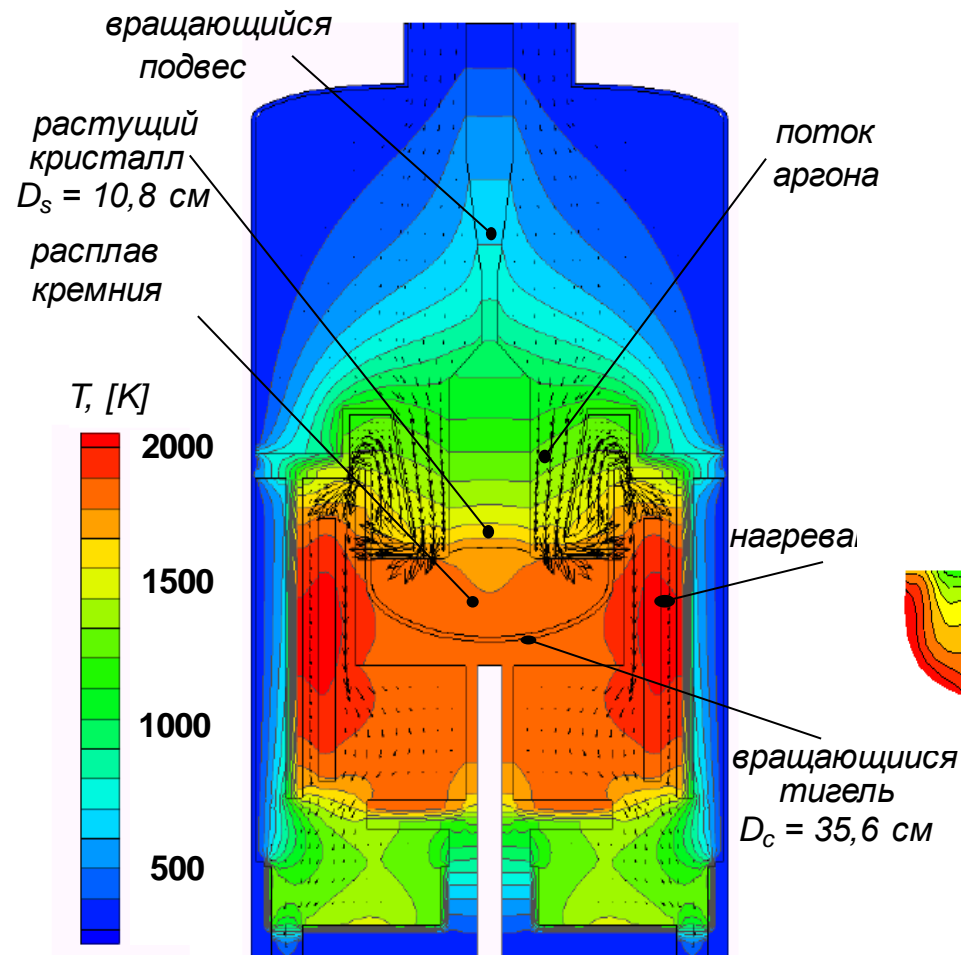
Осредненные поля



RANS/LES: 3D сетка ~150 000 ячеек

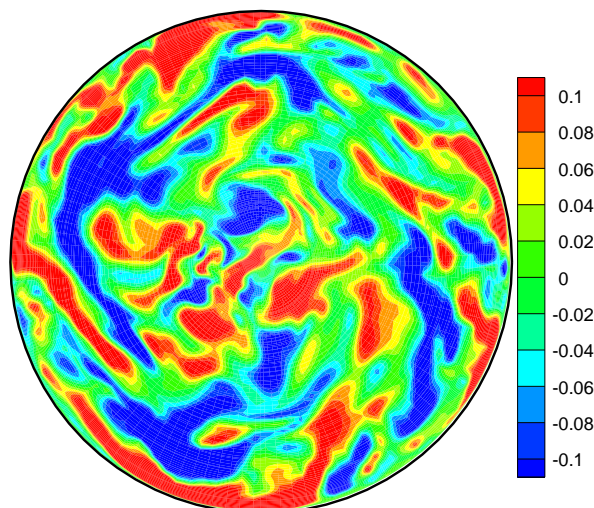
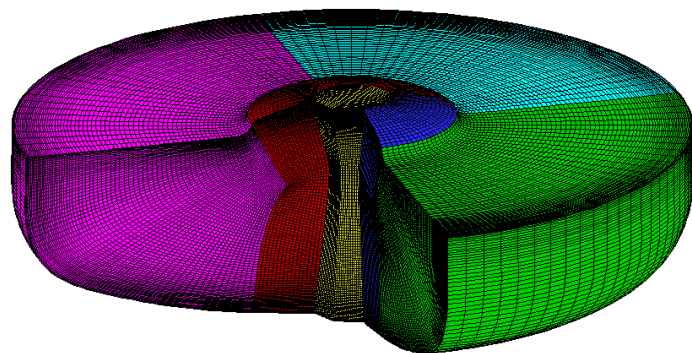
LES: (Peng&Davidson, 2001), сетка ~ 600 000 ячеек

Турбулентная конвекция расплава кремния в тигле метода Чохральского



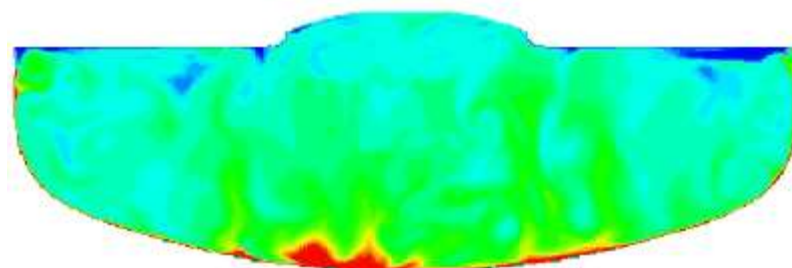
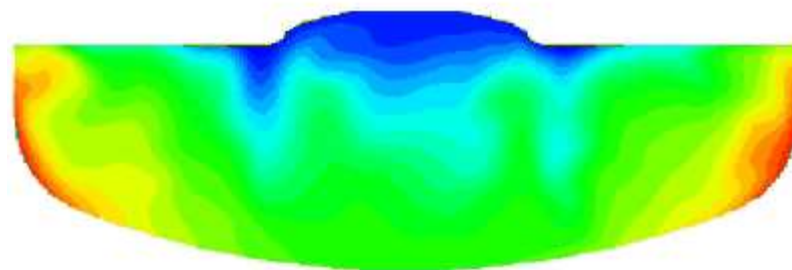
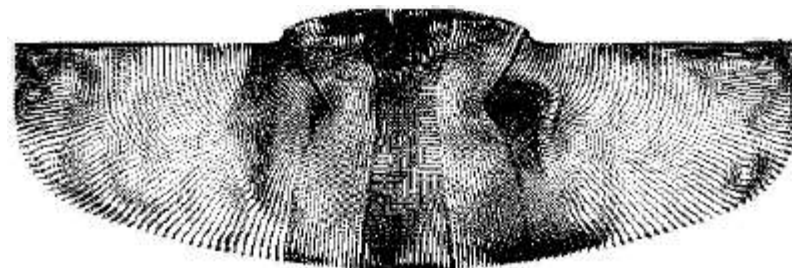
DNS турбулентной конвекции расплава кремния в тигле метода Чохральского

Блочно-структурированная расчетная
сетка ~1 млн. ячеек



Поле вертикальной скорости в горизонтальном сечении

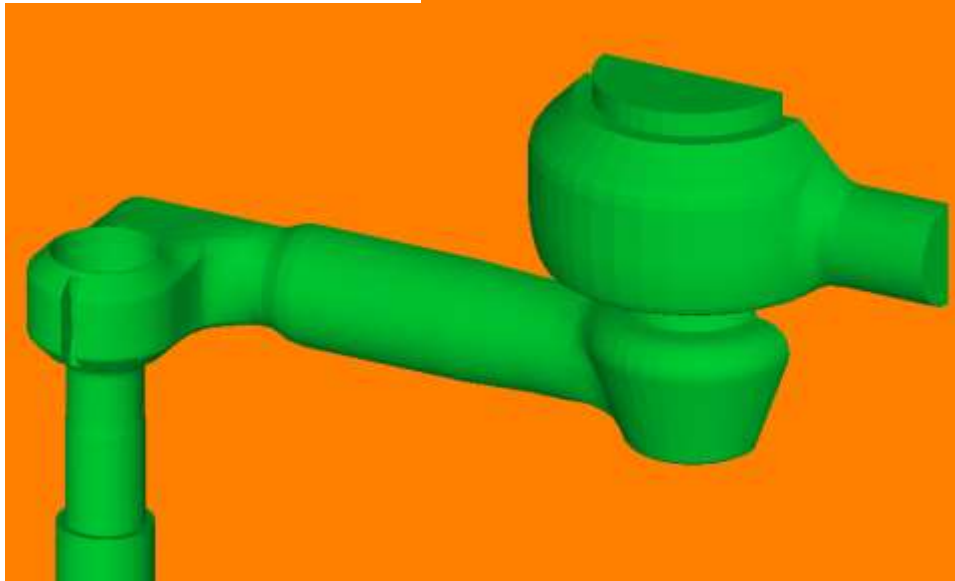
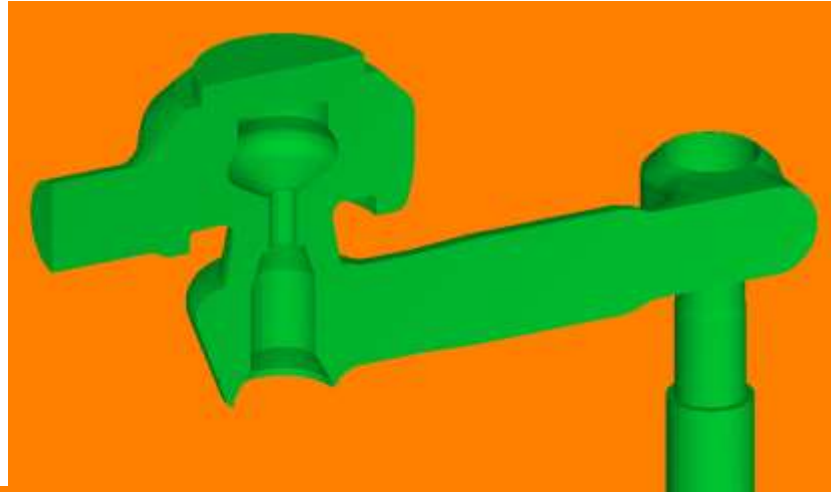
Эволюция полей скорости, температуры и
концентрации кислорода



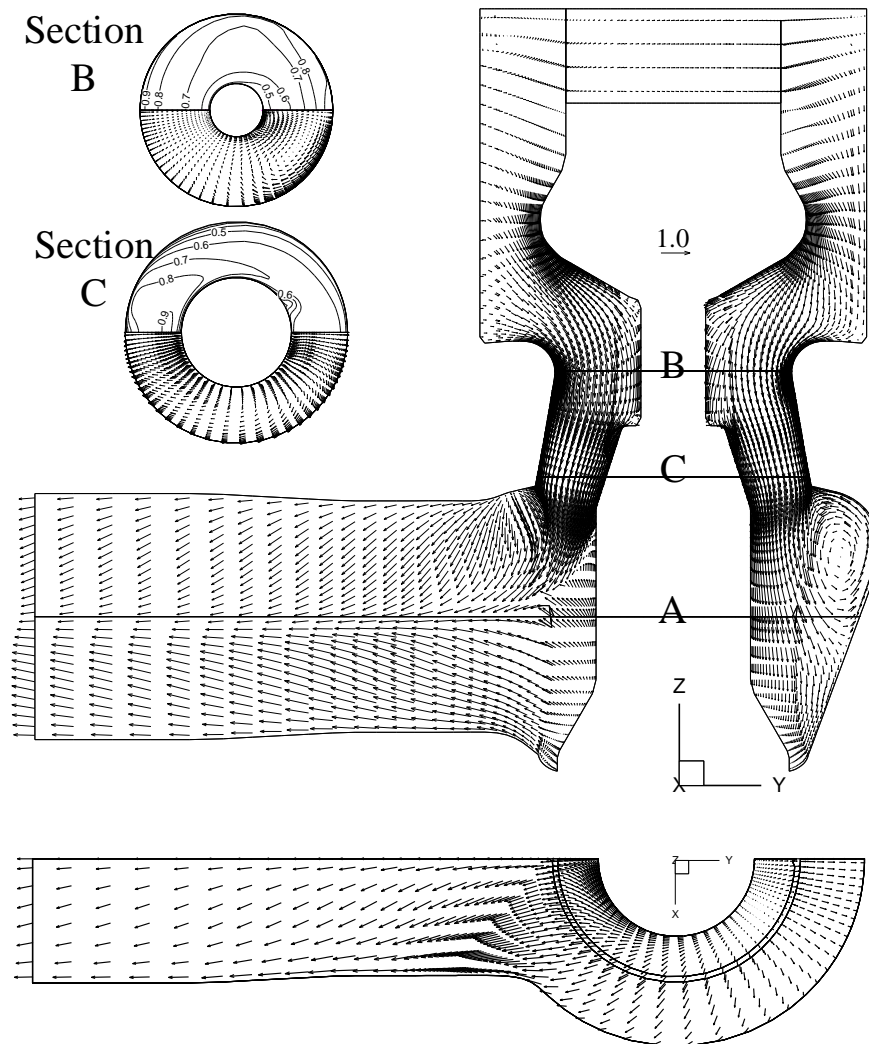
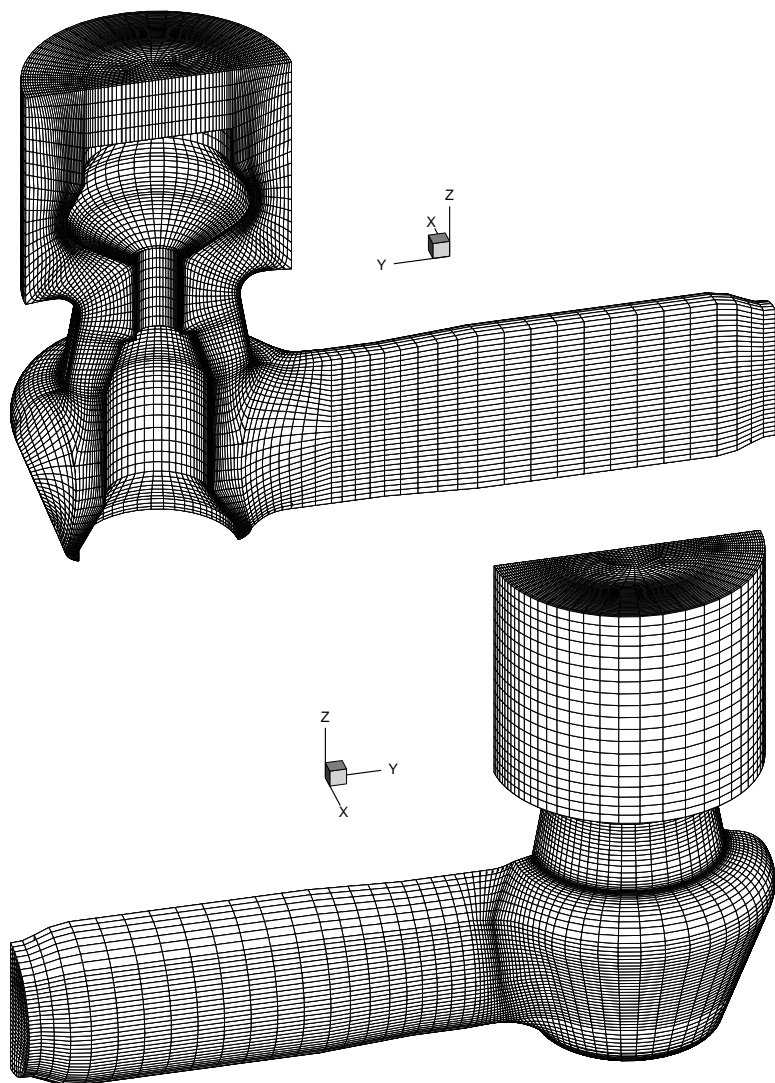
$$Ra = 5 \times 10^5, Pr = 0.015, Ro = 1$$

Conceptual Design of a Large Steam Turbine Control Valve (CV)

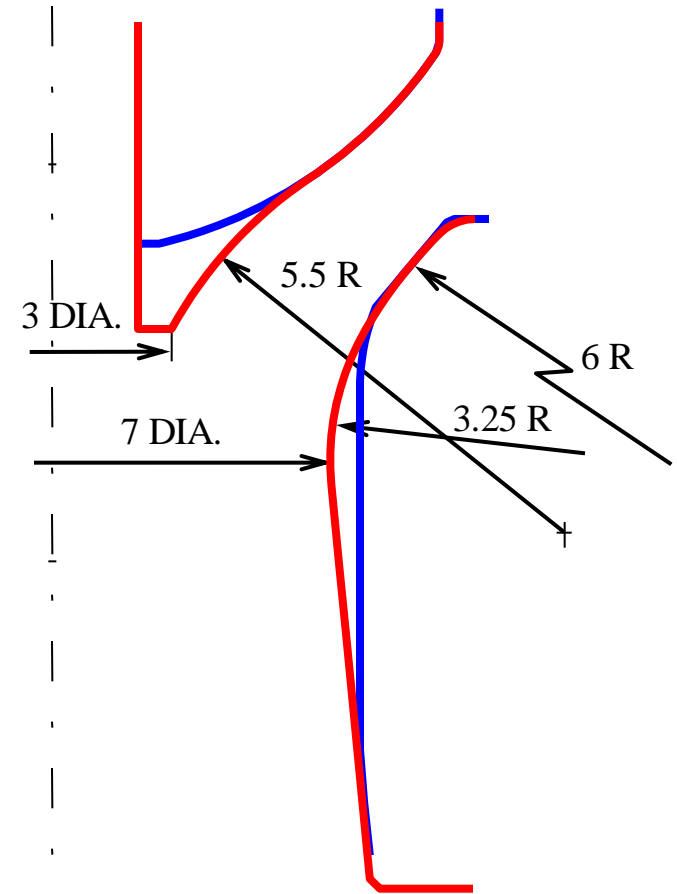
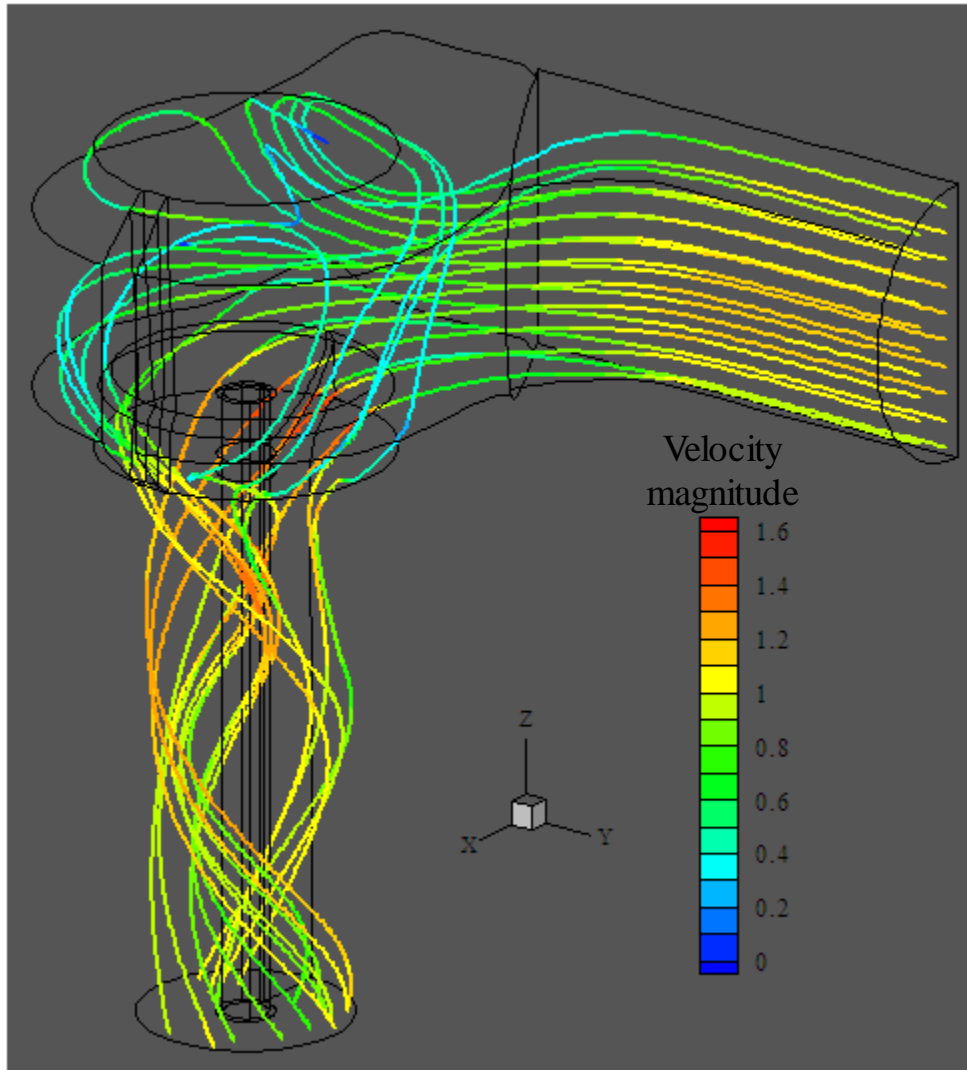
“Solid-gas” model
for CFD-analysis of
steam flow in an
assembly of a main
stop valve and two
control valves



Block-structured
grid consists of
15 blocks (about
400,000 cells)



Streamline Patterns within the Original Valve



Seat and Disk Redesign
 (blue) original design
 (red) CFD-based redesign

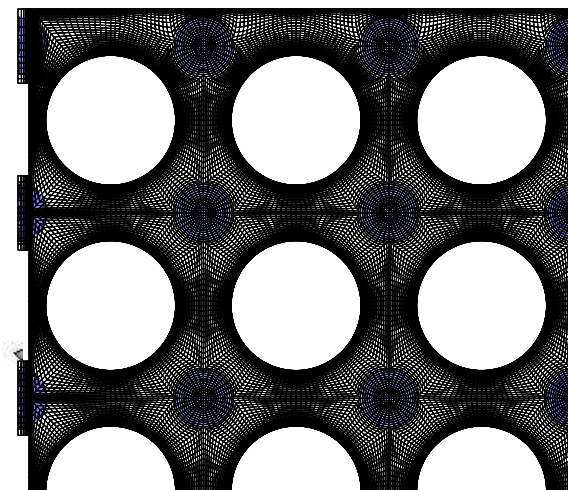
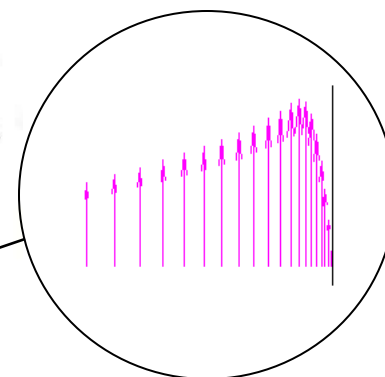
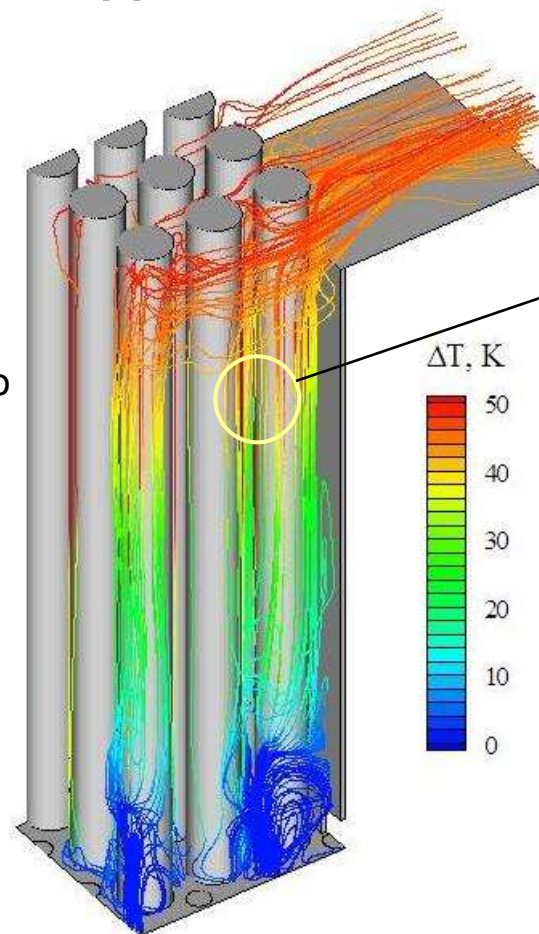
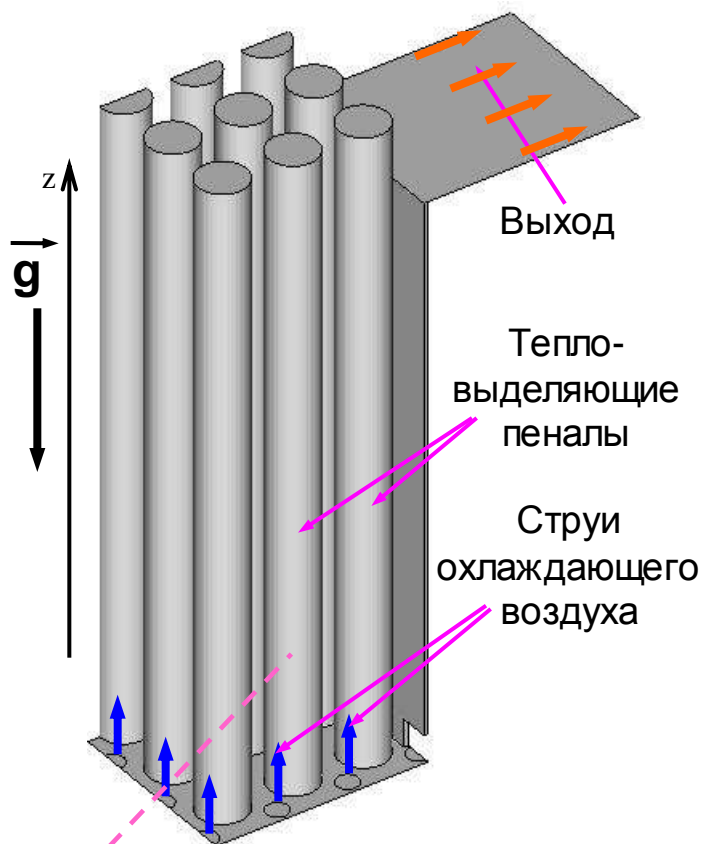
Comparison of pressure losses in the MSV-CV system with experimental data for original design

Section of flow path	$\Delta p^*/p_0$, %	
	CFD, SPSPU	Exp.
Upstream of the strainer	0.54	0.54
Downstream of the strainer	0.81	0.79
Inlet to the CV chest	1.61	1.84
450 cm downstream of the CV	2.97	2.88

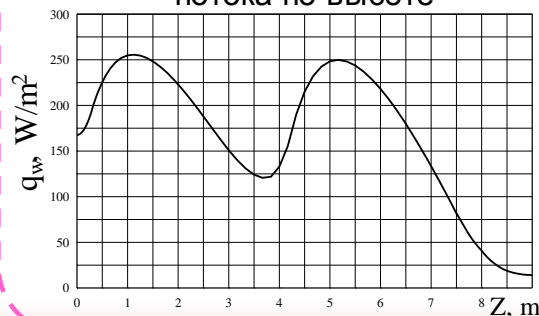
Effect of Control Valve Redesign on Pressure Losses

	$\Delta p^*/p_0$, %
Original valve	2.97
Redesigned Seat and Disk	2.56

СМЕШАННАЯ КОНВЕКЦИЯ В КАМЕРЕ СУХОГО ХРАНЕНИЯ ОТРАБОТАННОГО ЯДЕРНОГО ТОПЛИВА (RANS расчет)

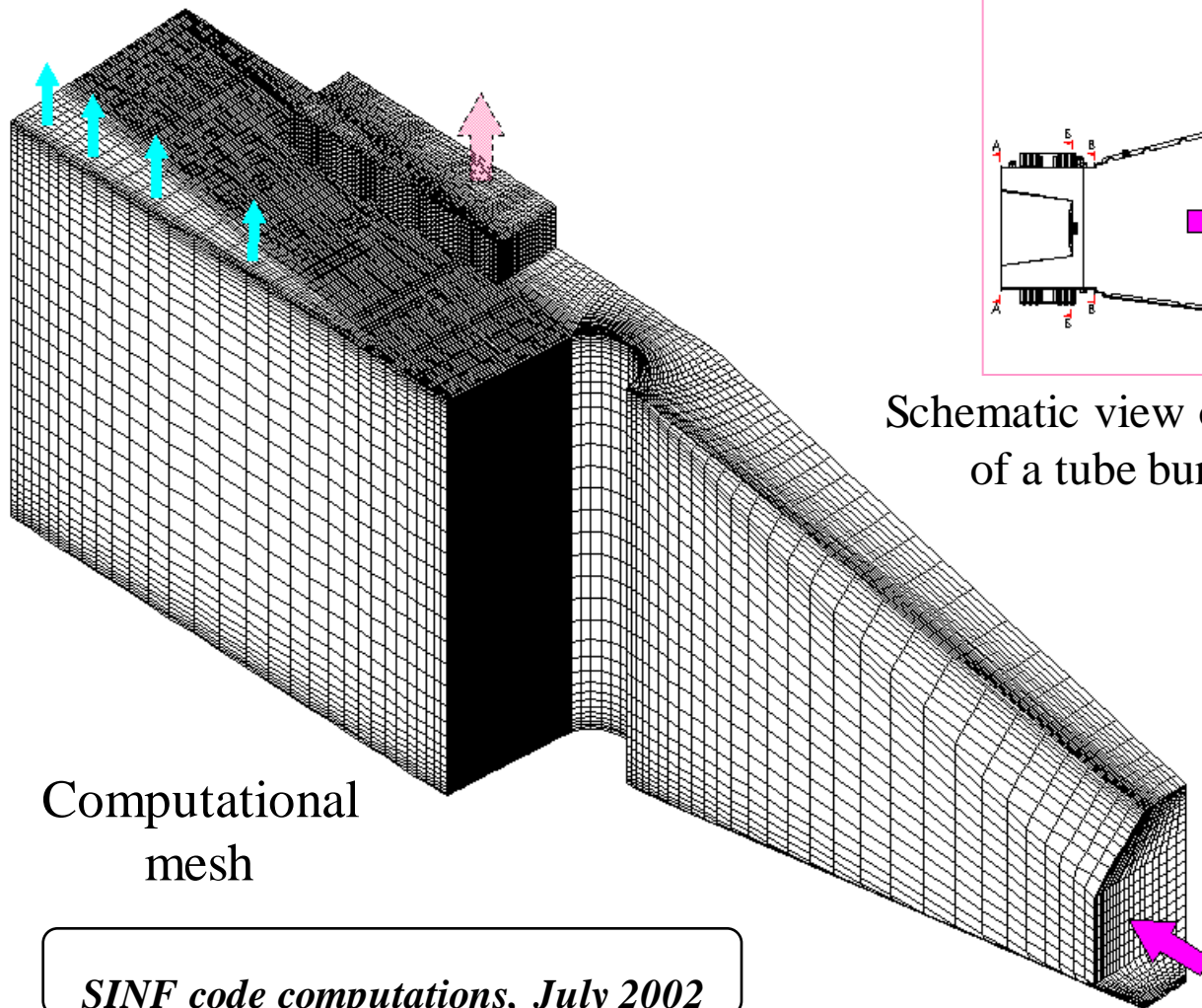


Распределение теплового потока по высоте



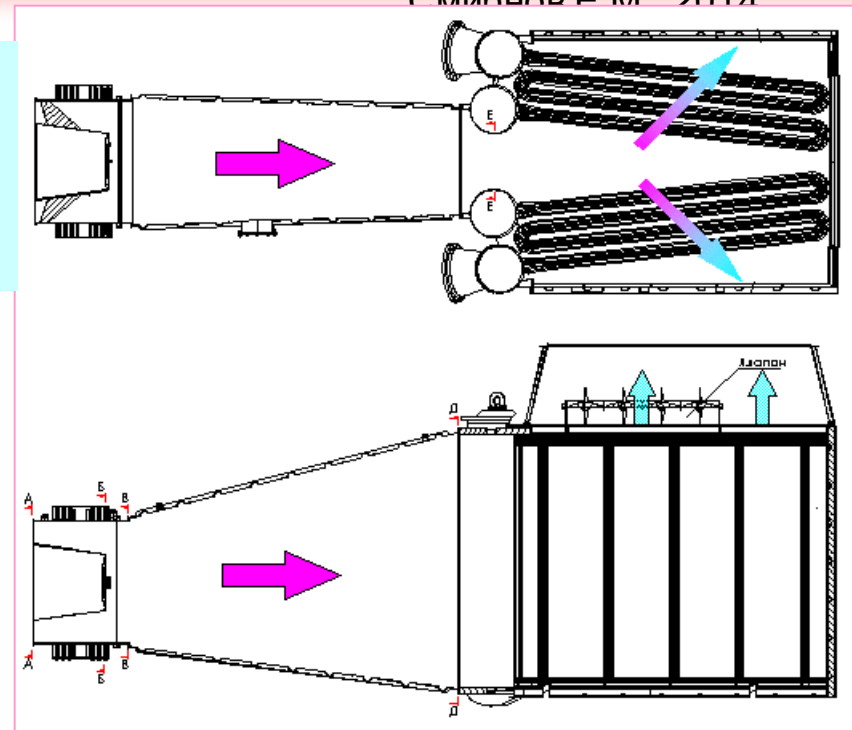
Линии тока, окрашенные по значениям температуры

CFD-analysis of 3D flow and pressure losses in a gas-turbine-unit air-heater

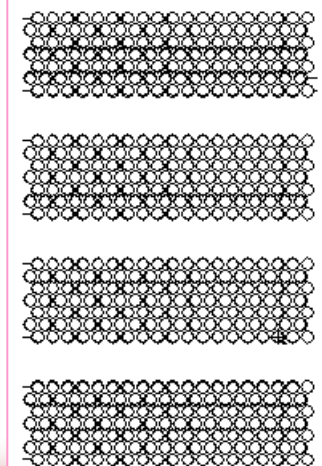


Computational
mesh

SINF code computations, July 2002

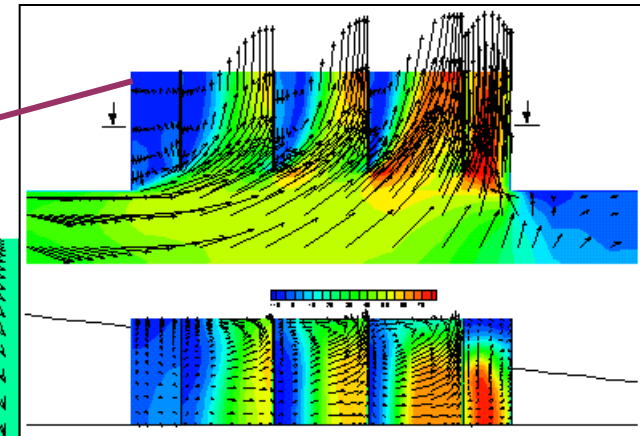
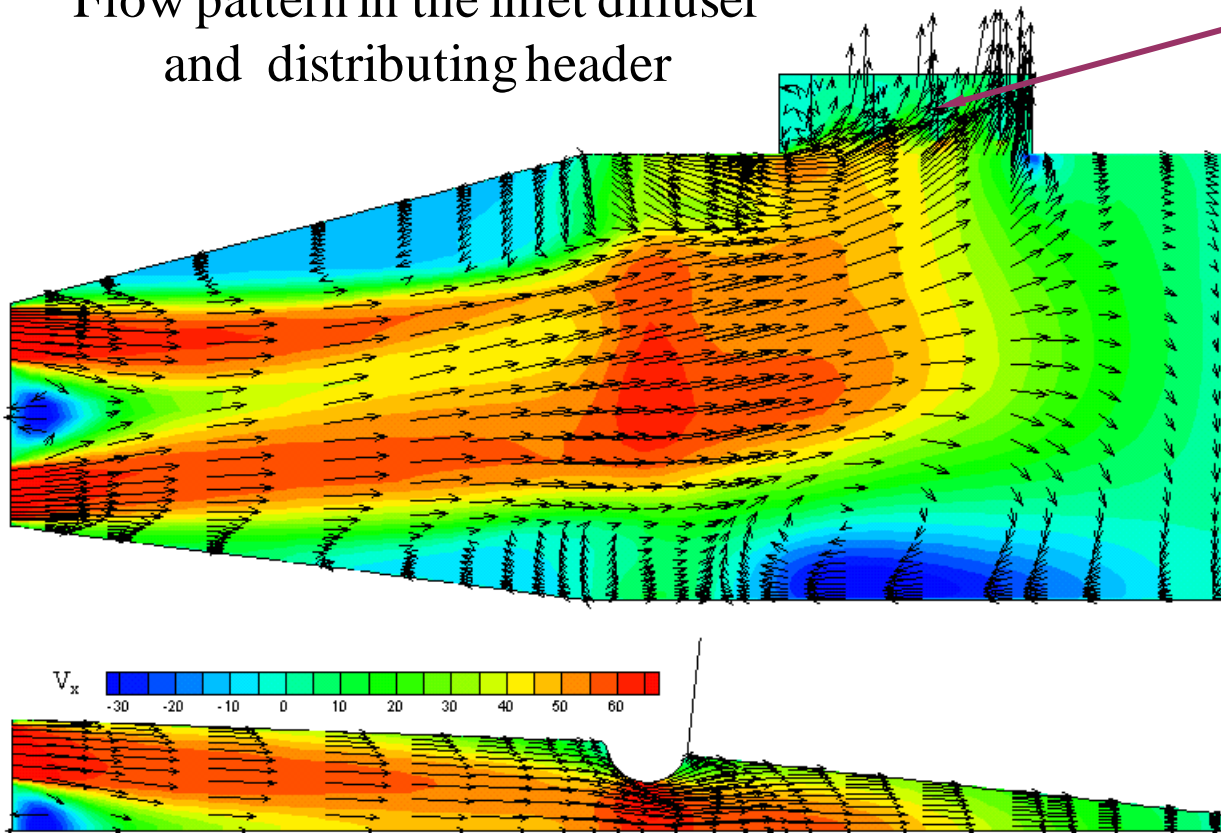


Schematic view of the recuperator and fragment
of a tube bundle modelled as a porous body



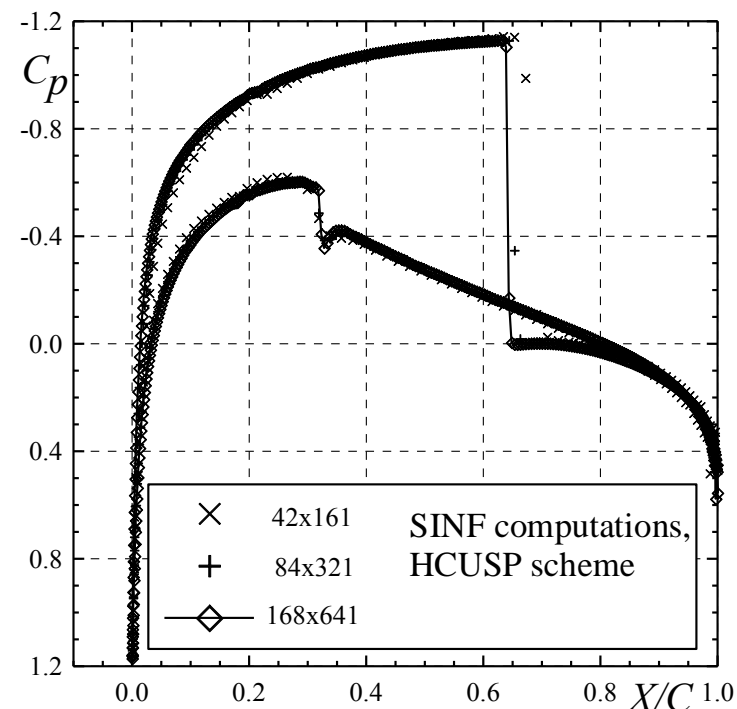
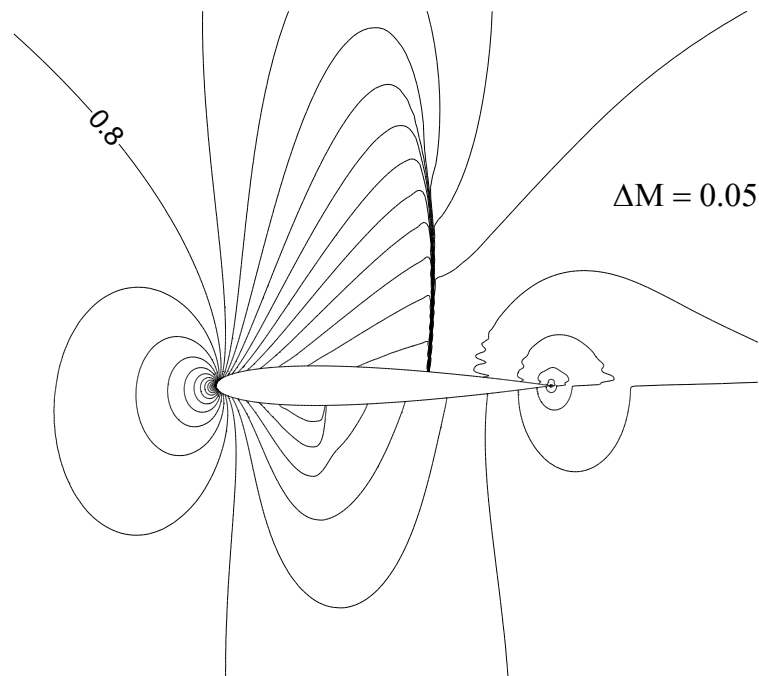
Heat-extraction mode of the air-heater

Flow pattern in the inlet diffuser and distributing header



Flow details in the outlet valve

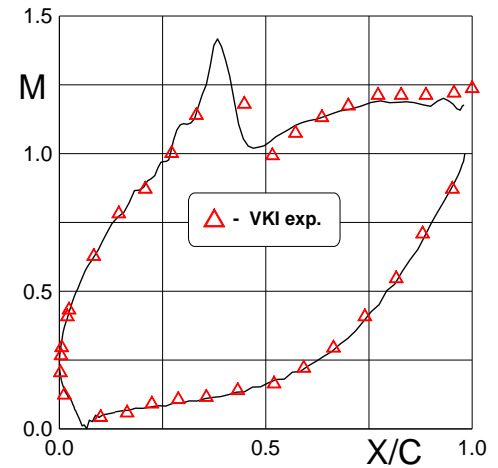
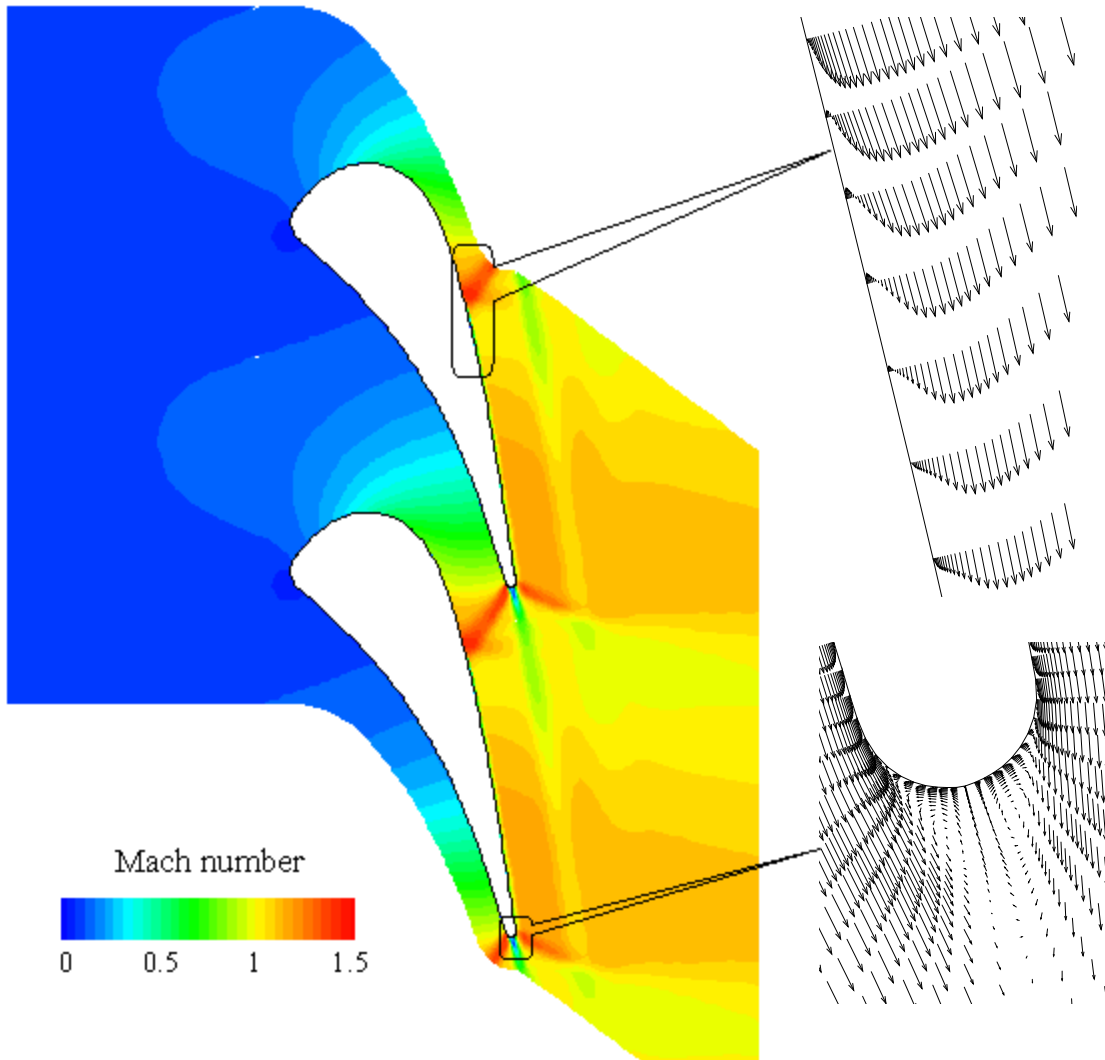
Euler equation solution for transonic flow around the NACA-0012 airfoil at $M_\infty=0.8$ and $\alpha=1.25^\circ$



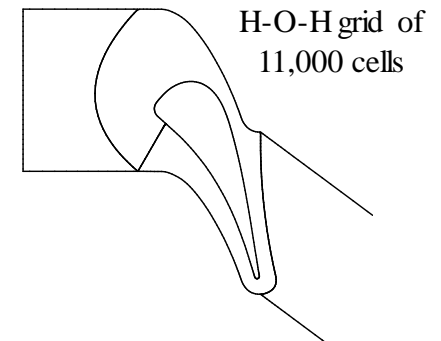
Data source	O-type grid	C_L	C_D
SINF code	42x161	0.3717	0.02716
Same	84x321	0.3577	0.02286
Same	164x641	0.3569	0.02224
Swanson, Radespiel and Turkel, <i>AIAA-Pap.</i> No 97-1945, 1997	128x768	0.3582	0.02278

Numerical simulation of transonic turbine cascade flow

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

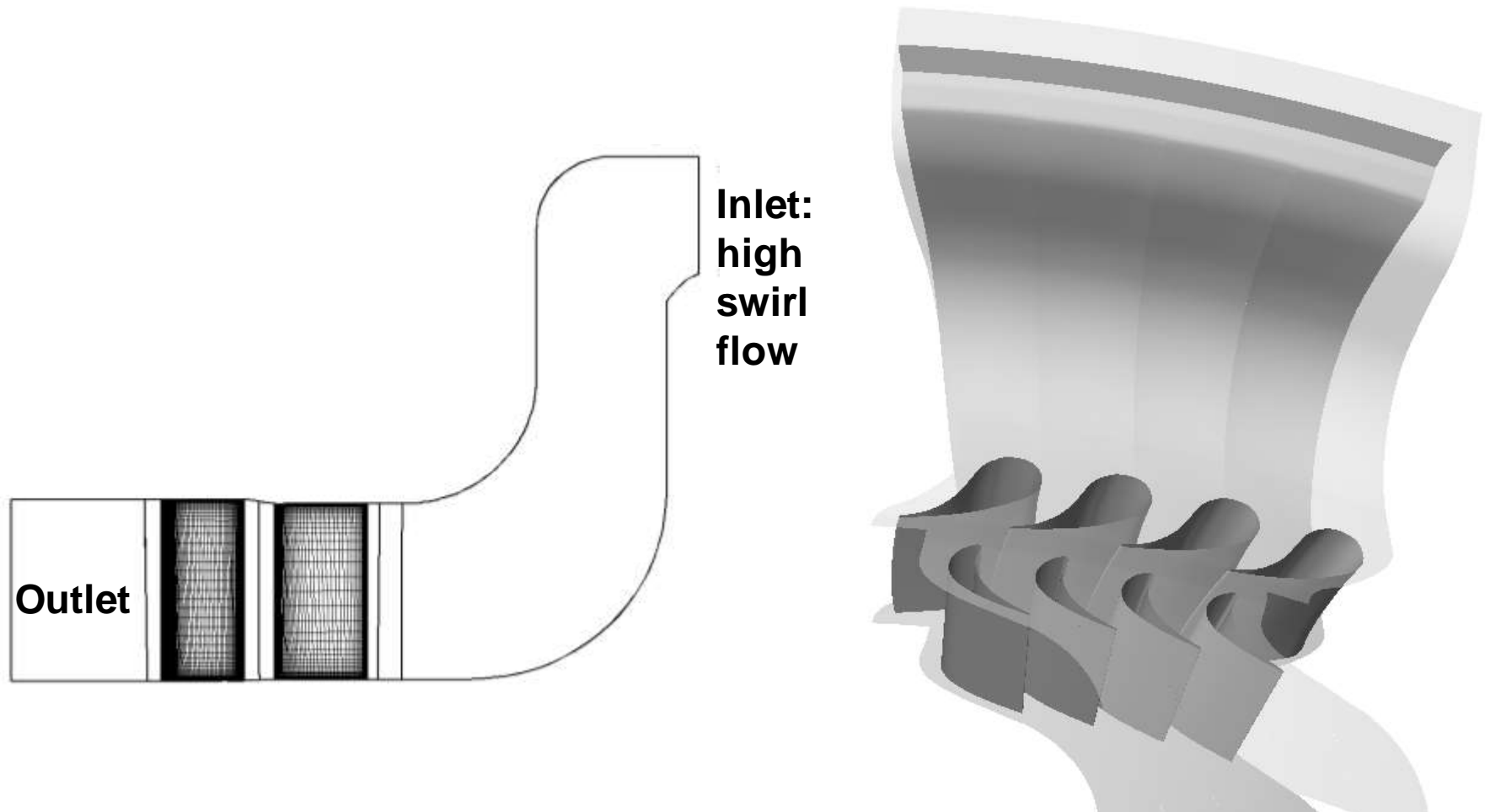


Pressure distribution over the blade (isentropic M)

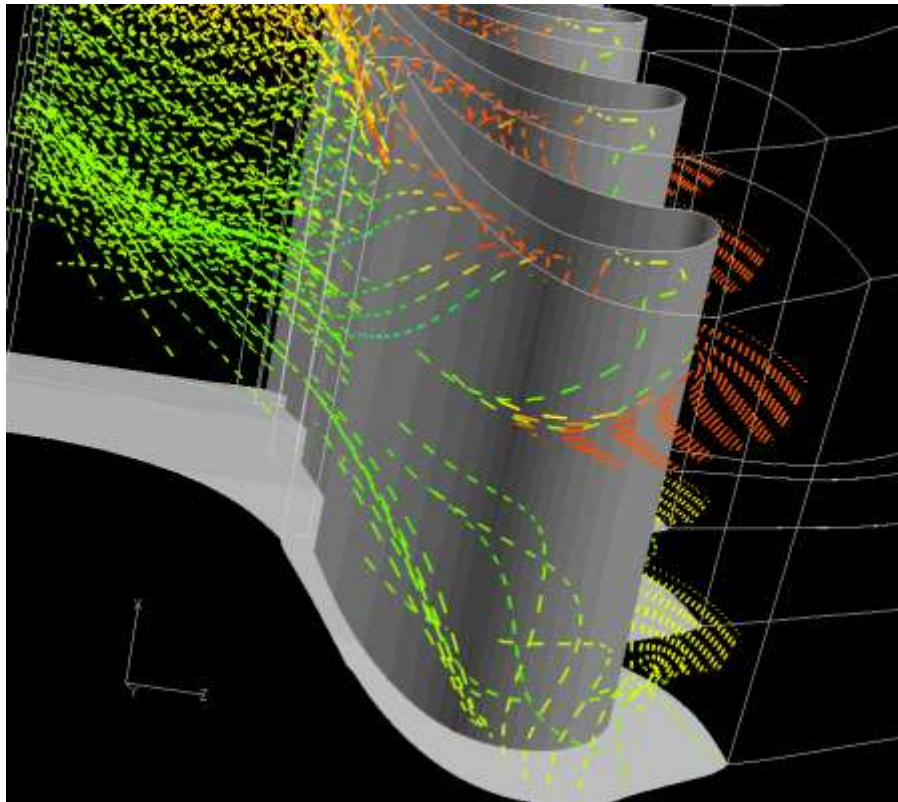


Conceptual CFD-based redesign of the passages related to the high pressure 2nd stage of a steam gas turbine

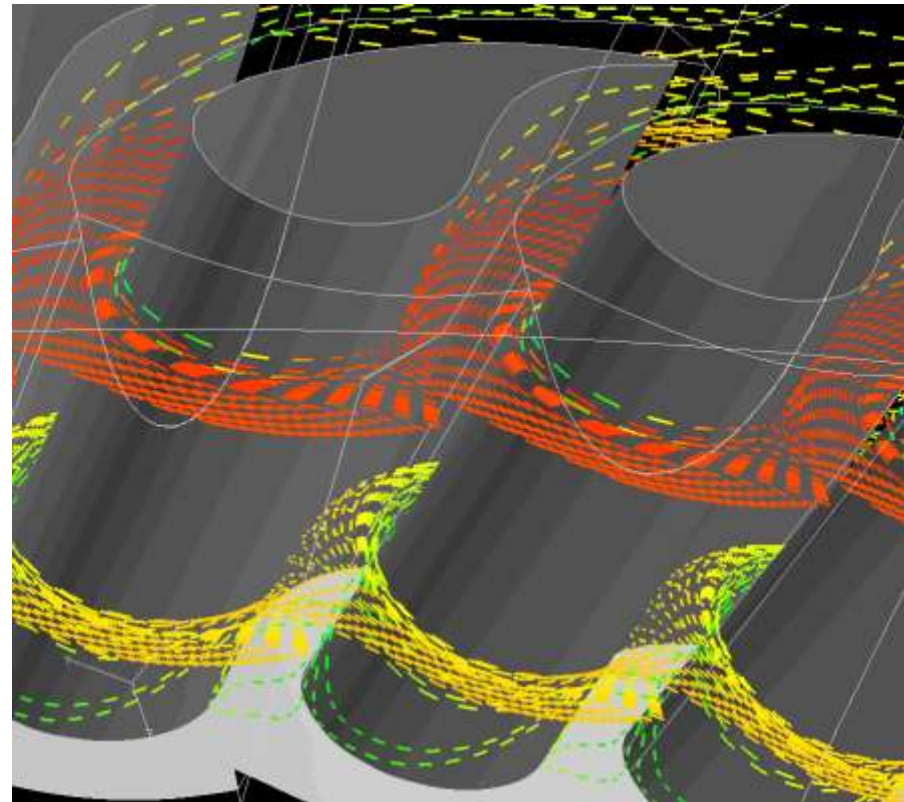
(project fulfilled for a Russian company in 2005)



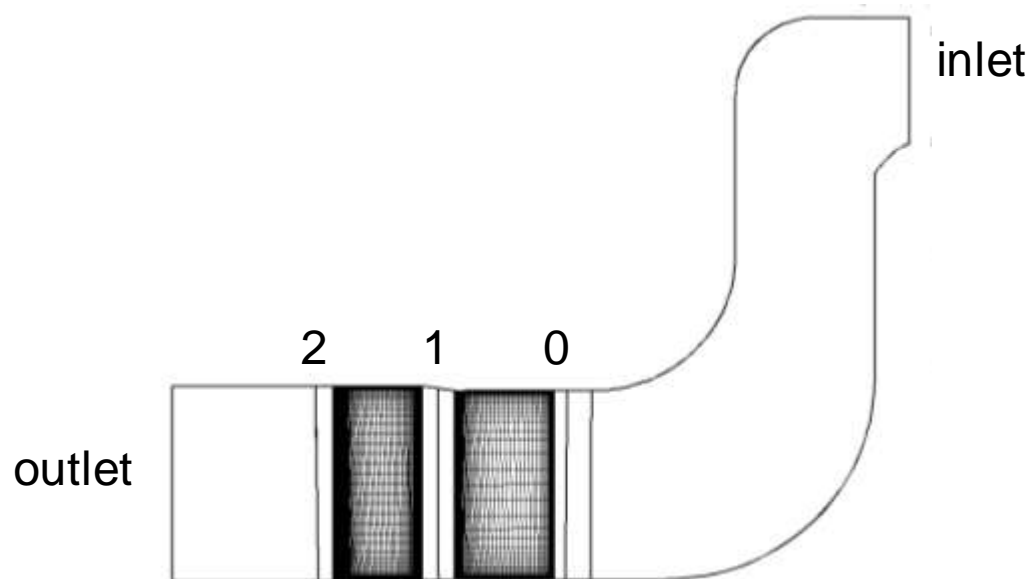
Flow in the vane stage



Original design



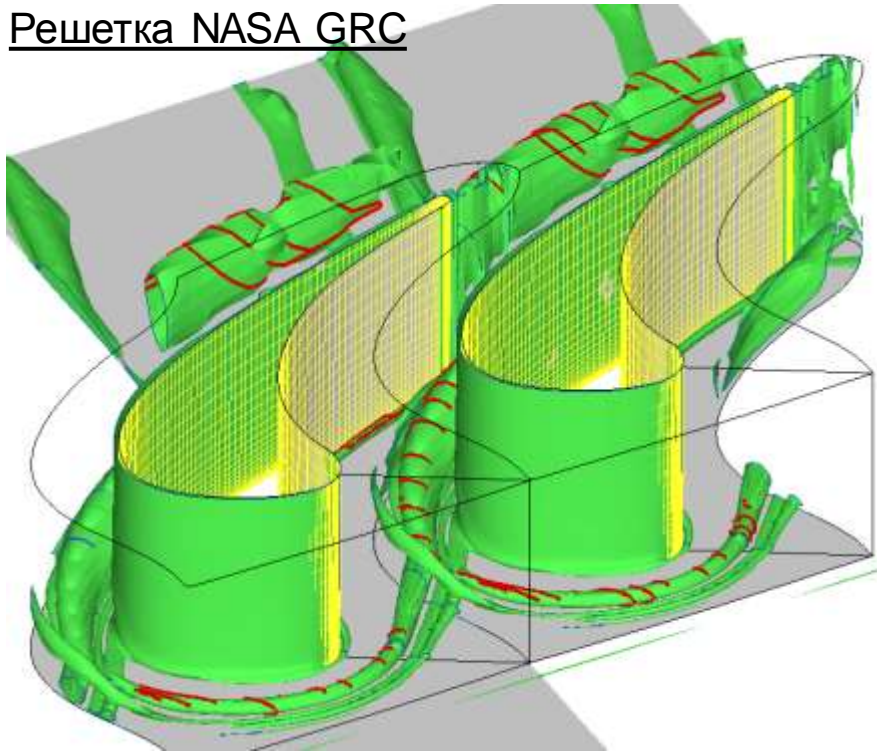
New design



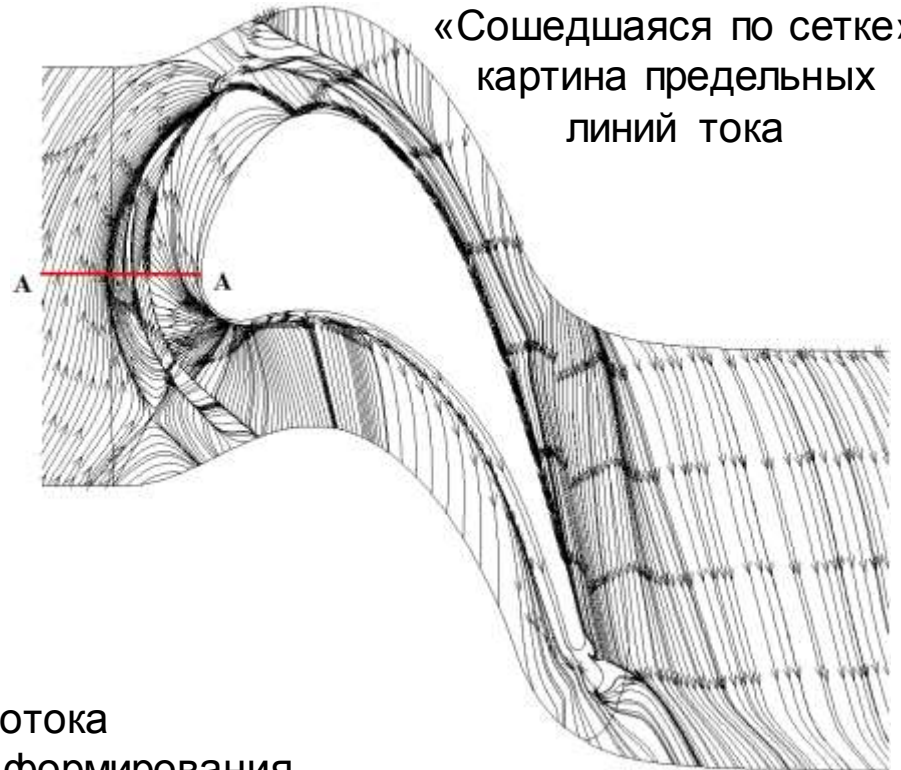
	ζ_0	ζ_{0-1}	ζ_Σ	
Original design	0.260	0.308	0.616	
New design	0.209	0.214	0.452	

ВИХРЕВЫЕ СТРУКТУРЫ И ТЕПЛООБМЕН В ТУРБИННЫХ РЕШЕТКАХ (RANS моделирование)

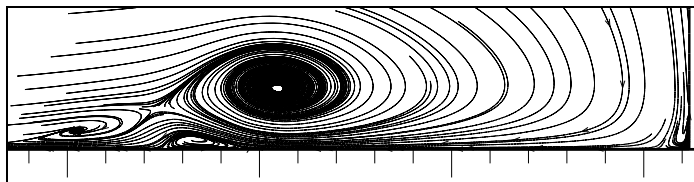
Решетка NASA GRC



Решетка Langston

**MSST model**

«Сошедшая по сетке»
картина предельных
линий тока

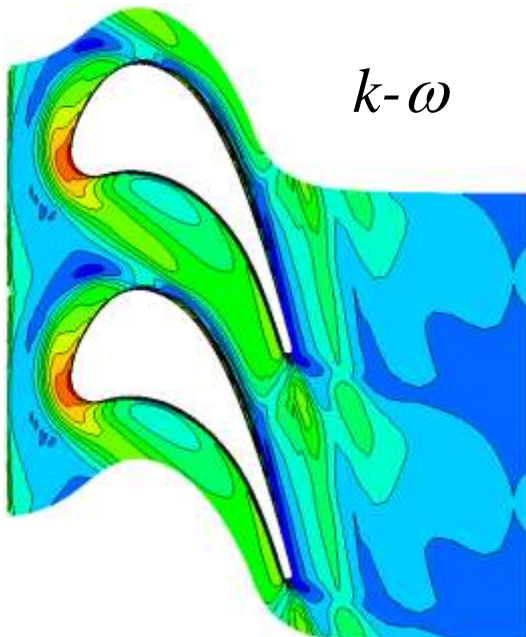


Сечение потока
в области формирования
подковообразного вихря

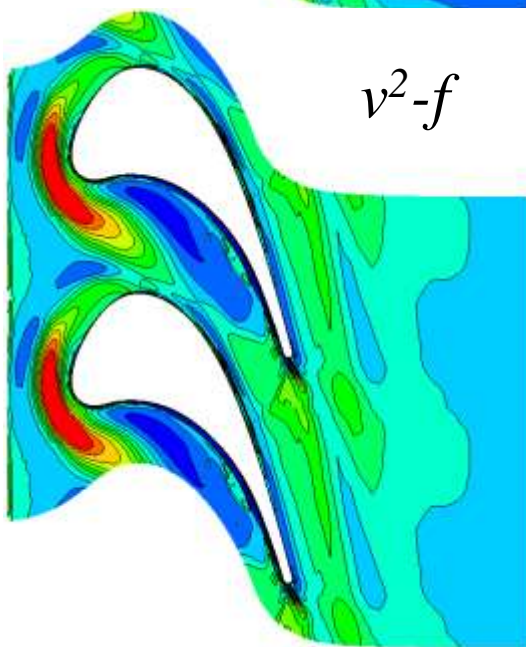
Вихревые трубки выделены как поверхности постоянного значения Q-критерия:

$$Q = -\frac{1}{2}u_{i|j}u_{j|i} = \frac{1}{2}(\|\Omega\|^2 - \|s\|^2) > 0$$

$k-\omega$



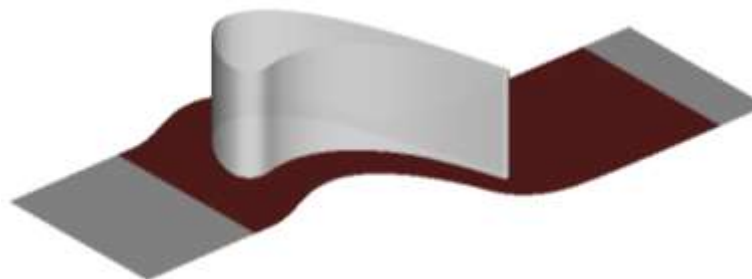
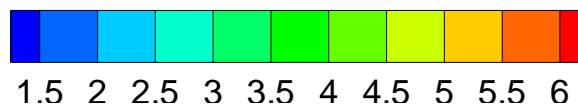
ν^2-f



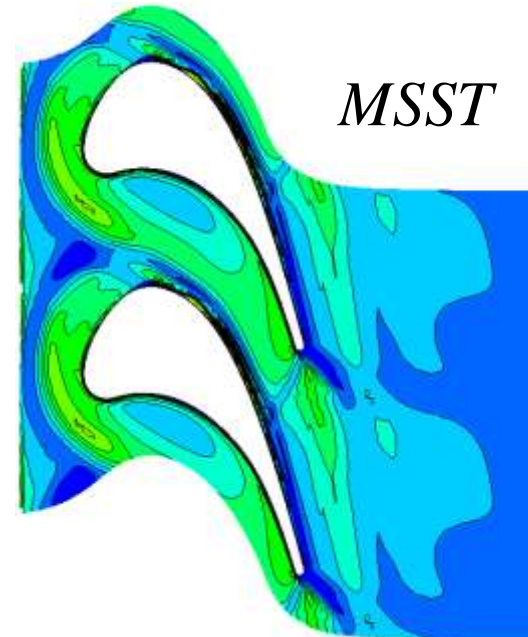
Влияние модели турбулентности на торцевой теплообмен

$$St = \frac{q_w}{\rho_{\text{ref}} U_{\text{in}} c_p (T_w - T_{\text{aw}})}$$

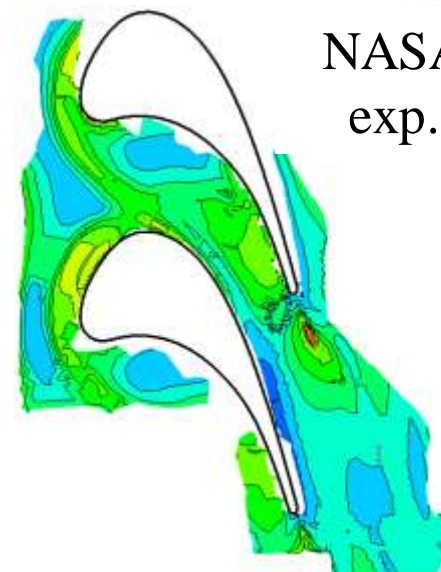
Stanton number $St \times 10^3$,



$MSST$

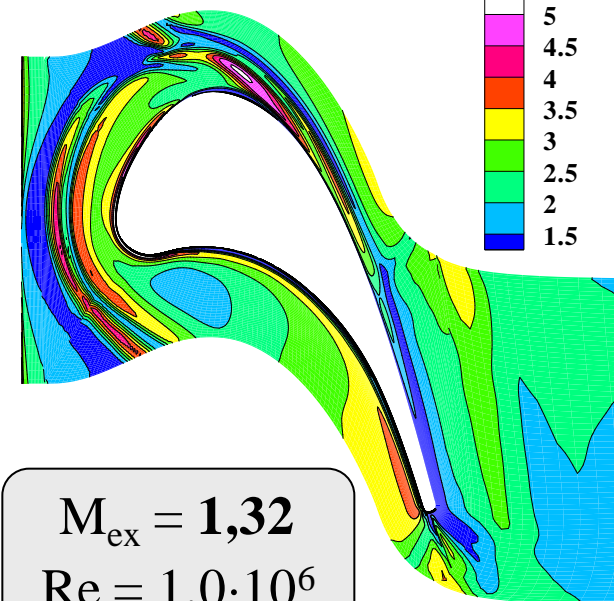
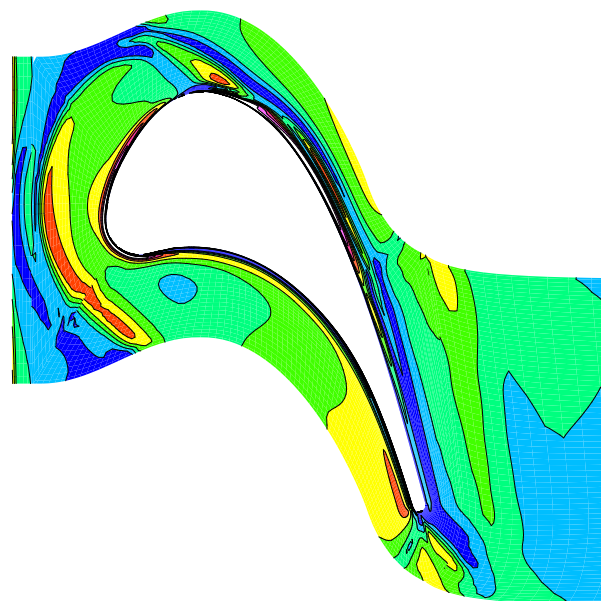
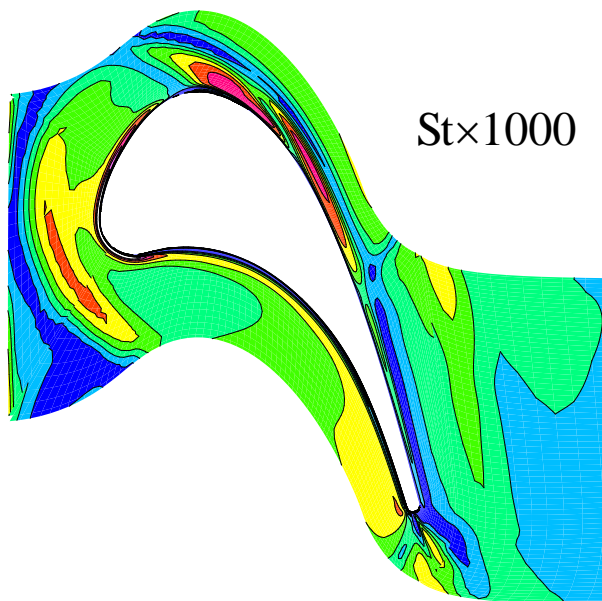
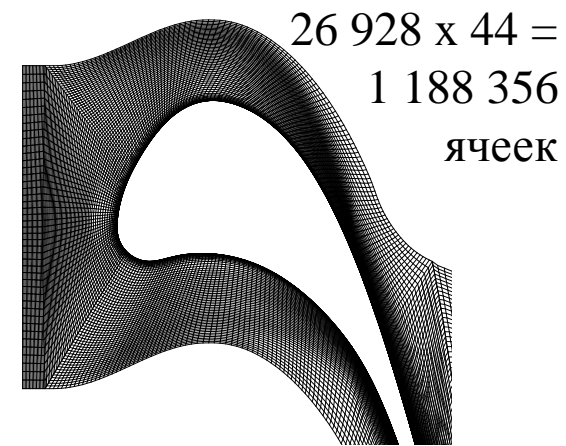
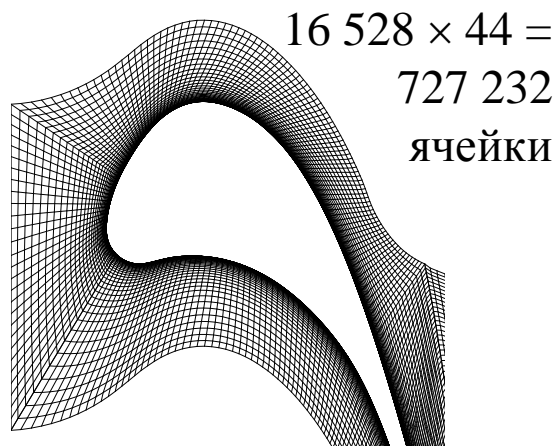


NASA
exp.

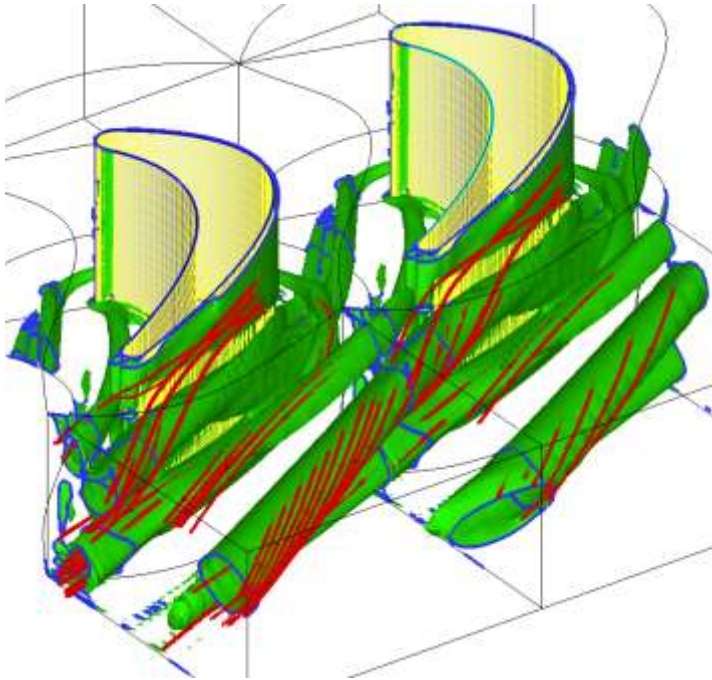


Распределения числа Стантона
на торцевой стенке

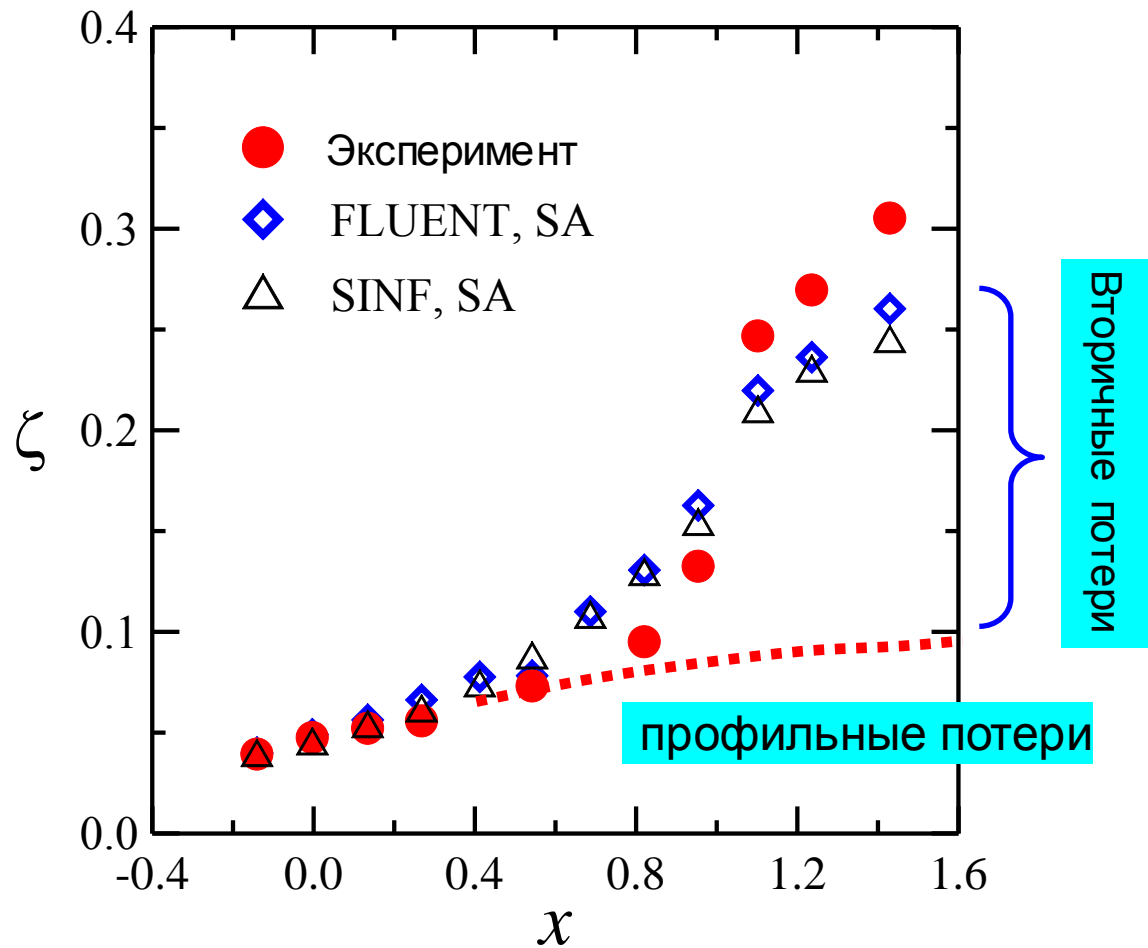
Влияние сетки

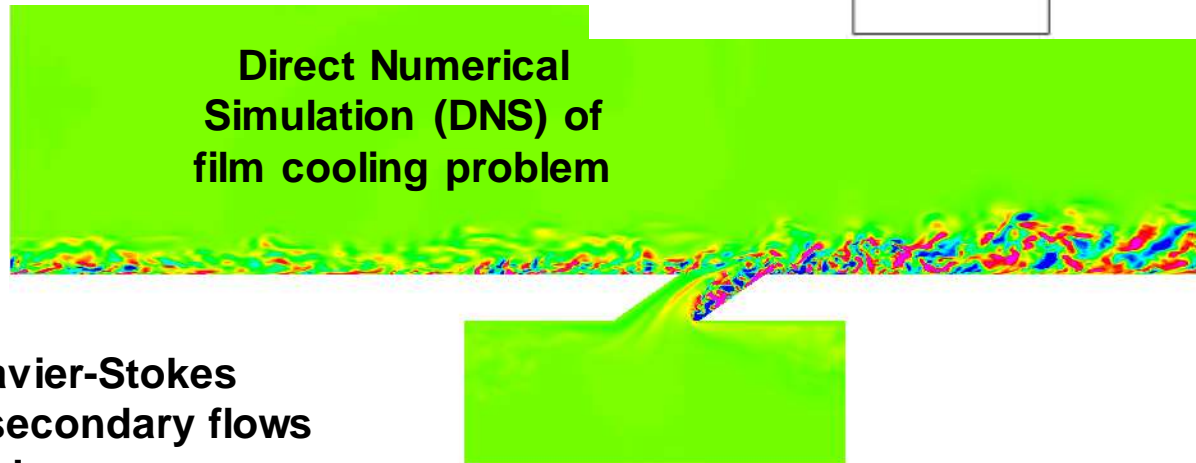
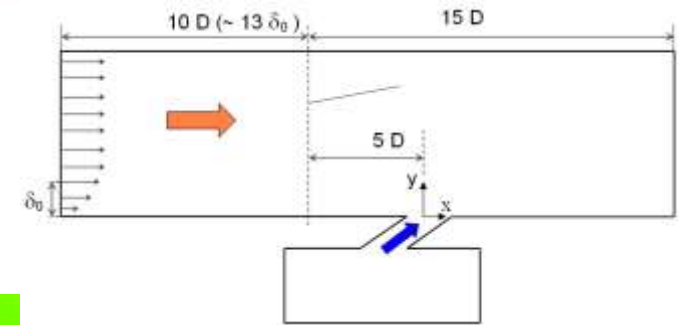


$M_{ex} = 1,32$
 $Re = 1,0 \cdot 10^6$

Решетка Langston

Рост потерь вдоль межлопаточного канала

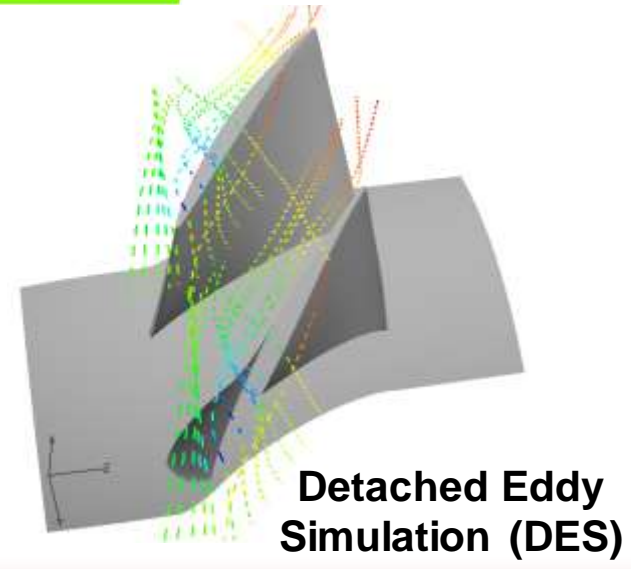
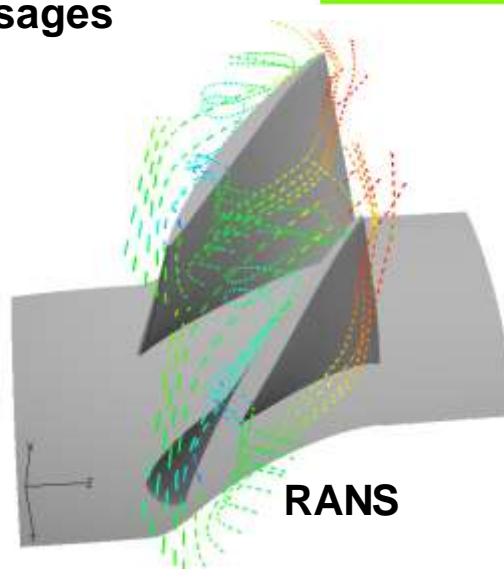




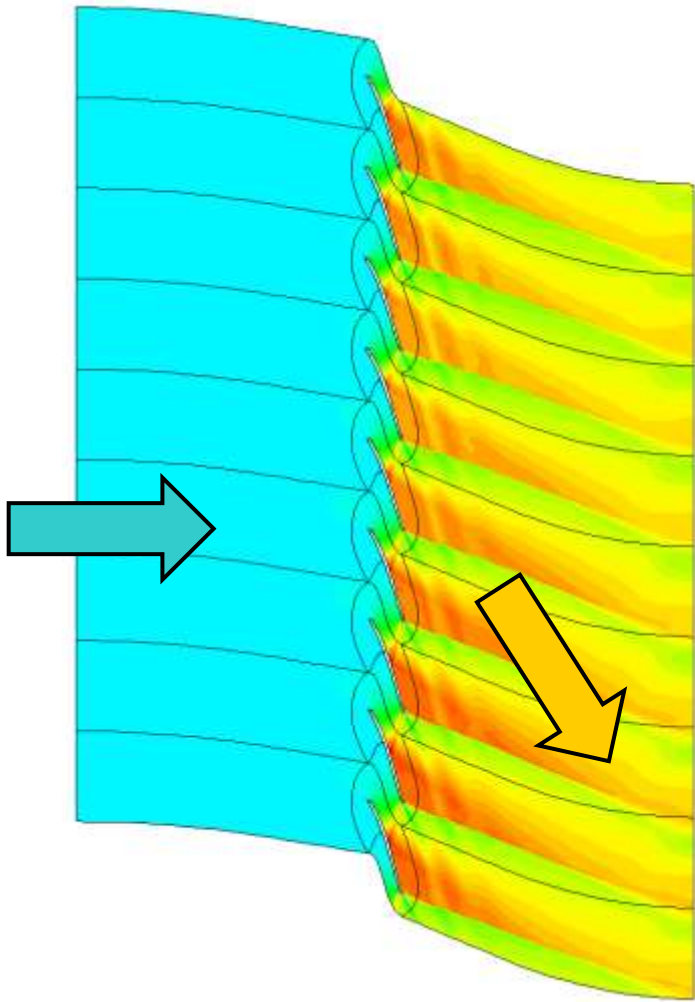
Reynolds Averaged Navier-Stokes (RANS) computations of secondary flows and heat transfer in blade passages



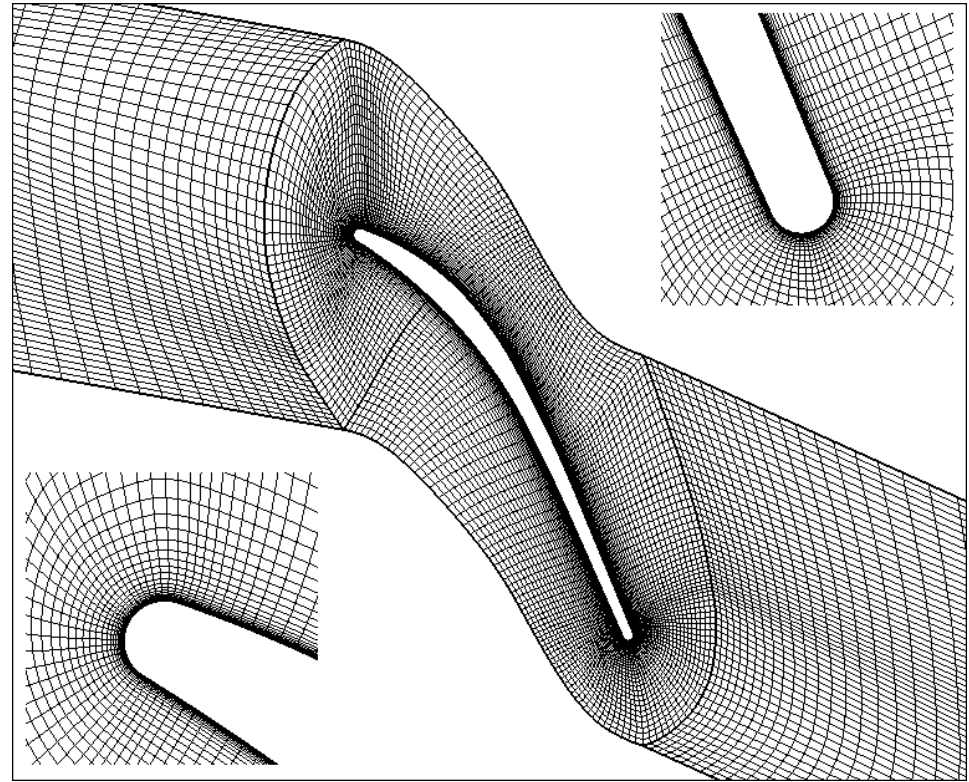
Modelling of tip flows for near stall regimes in axial compressors



Vibration of a turbine blade cascade

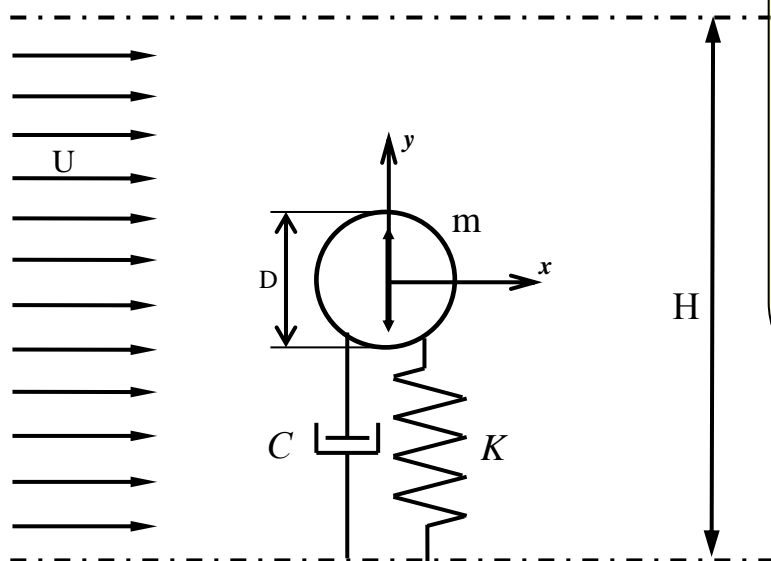


Mach number in a transonic turbine blade cascade



Example of grid deformation

Автоколебания цилиндра в потоке



$$\frac{d}{dt} \int_{\Omega} \rho d\Omega + \int_S \rho (\vec{v} - \vec{v}_b) \cdot \vec{n} dS = 0$$

$$\frac{d}{dt} \int_{\Omega} \rho \vec{v} d\Omega + \int_S \rho \vec{v} ((\vec{v} - \vec{v}_b) \cdot \vec{n}) dS = \int_S (\underline{\underline{\tau}} \cdot \vec{n} + p \vec{n}) dS$$

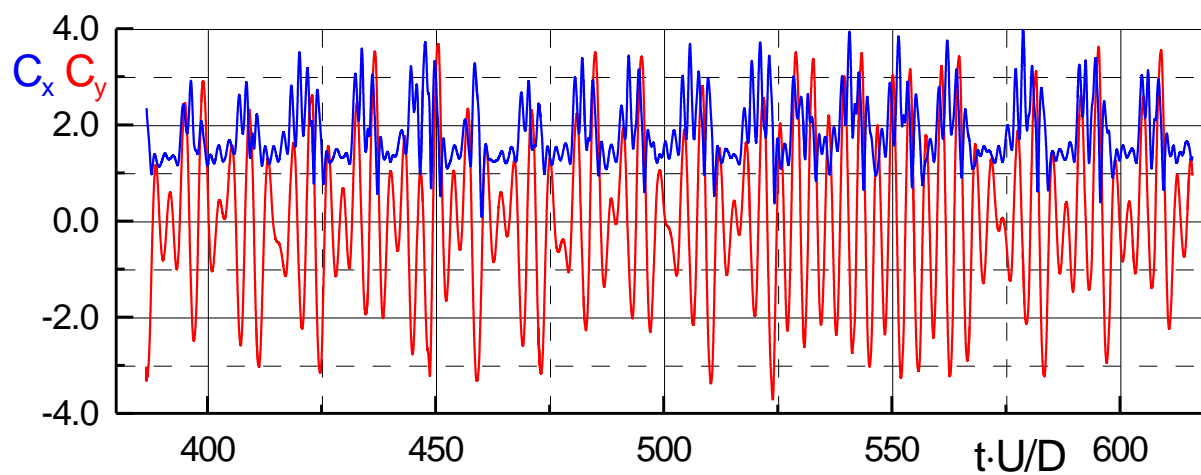
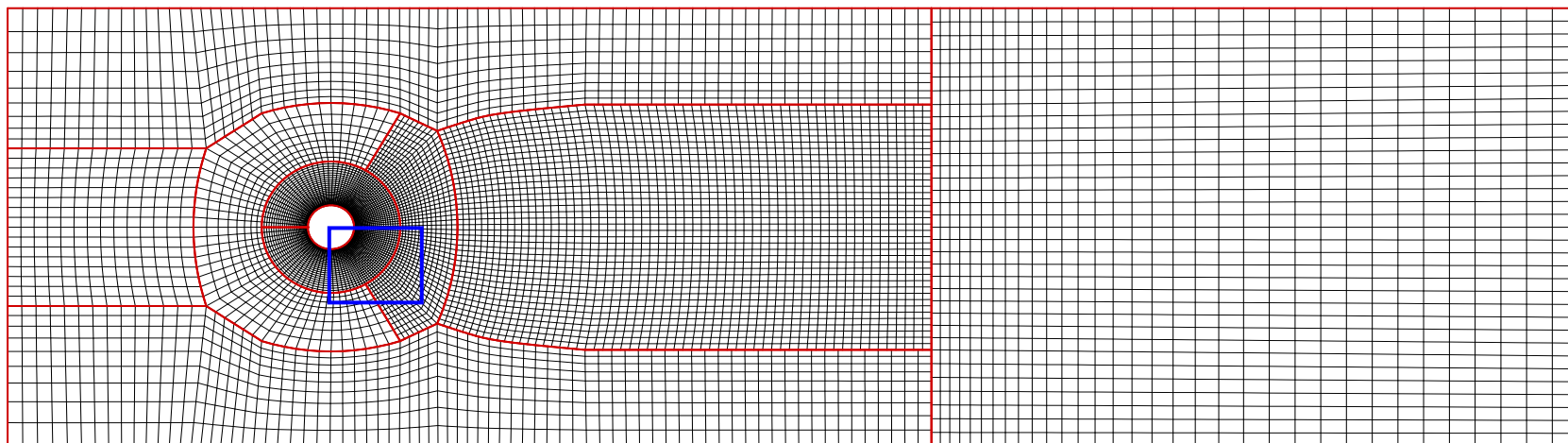
$$m\ddot{y} + C\dot{y} + Ky = f_y(t)$$

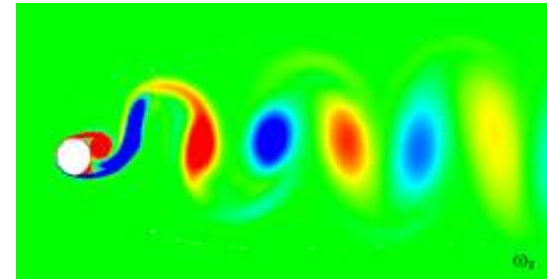
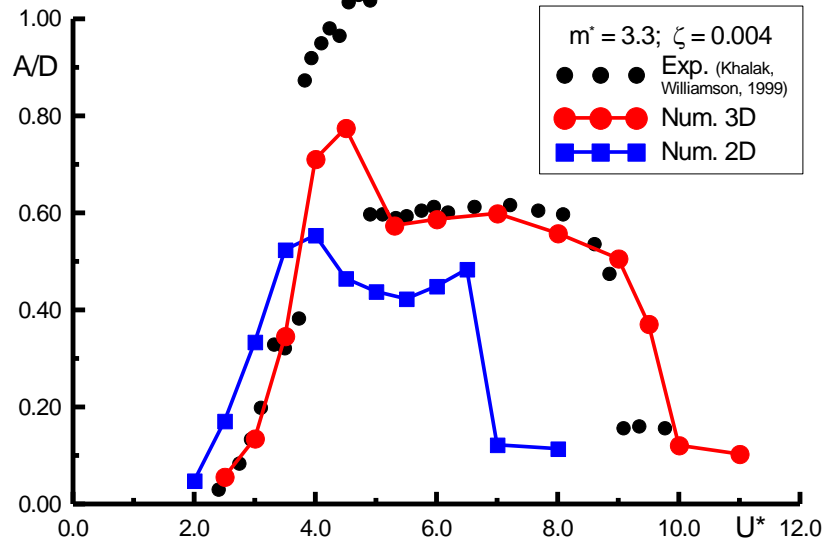
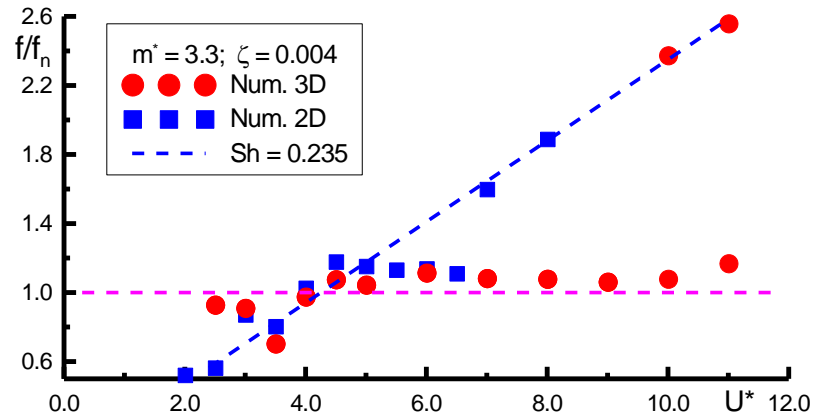
Экспериментальные данные

Источник	m^*	ζ	Re
Voorhees, Wei (2002)	1.9	0.054	4,000
Hover, Davis, Triantafyllou (2003)	3	0.032	30,000
Khalak, Williamson (1999)	3,3	0,004	4,000
Govardhan, Williamson (2000)	8,63	0,0015	4,000
Blackburn <i>et al.</i> (2000)	50,8	0,002	600
Anagnostopoulos, Bearman (1992)	149	0.0012	110
Koide, Takahasi, Shirakashi (2004)	250	0.01	4,000

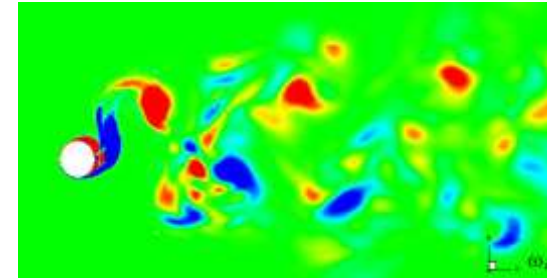
$$\ddot{\bar{y}} + \frac{2\zeta\dot{\bar{y}}}{U^*} + \frac{\bar{y}}{(U^*)^2} = \frac{2\pi C_y}{m^*}, \quad C_y = \frac{2f_y}{\rho U^2 DL}$$

$$m^* = \frac{4m}{\pi \rho D^2 L}, \quad \zeta = \frac{C}{2\sqrt{mK}}, \quad U^* = \frac{U}{D} \sqrt{\frac{m}{K}}$$



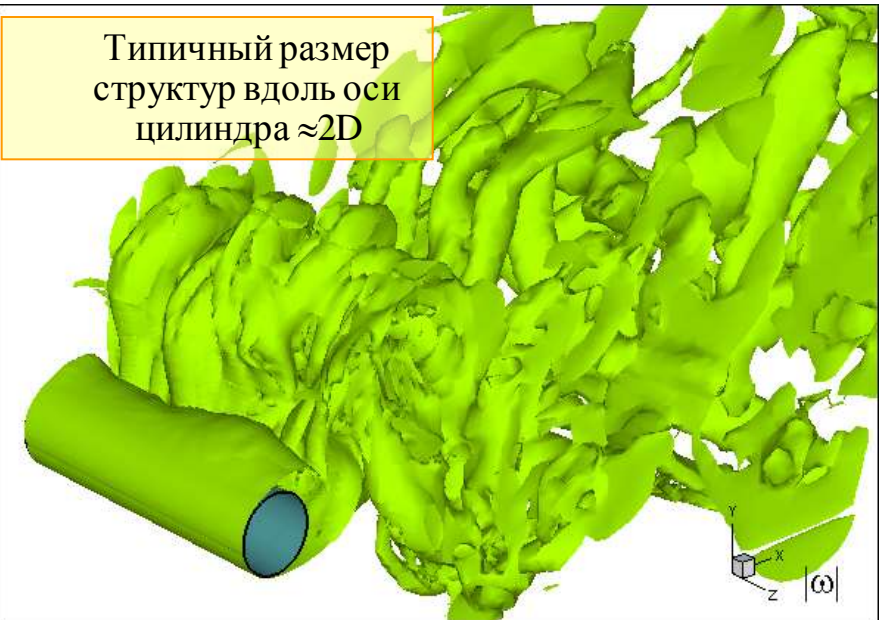


2D - URANS



3D - DES

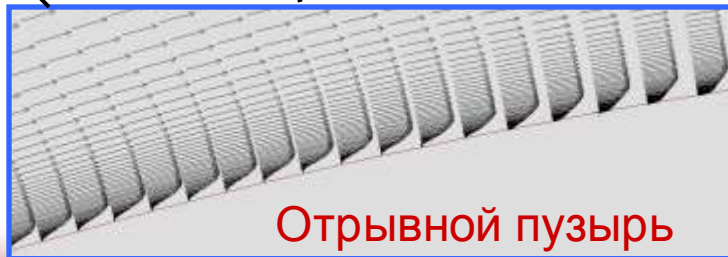
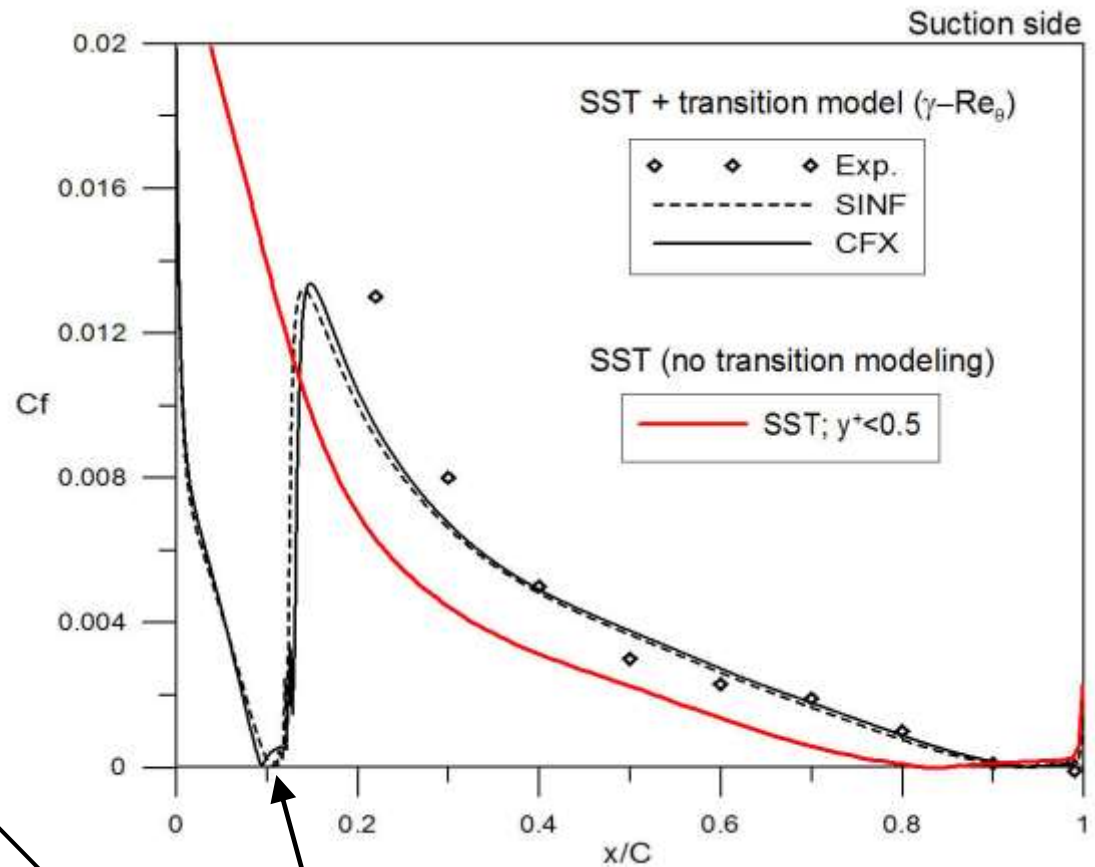
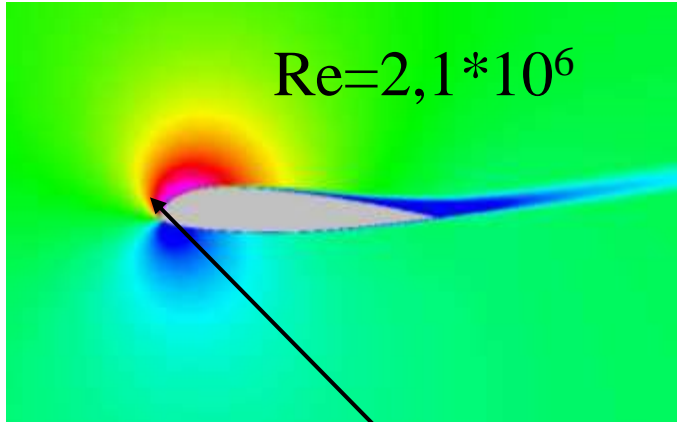
Типичный размер структур вдоль оси цилиндра $\approx 2D$



Применение модели ламинарно-турбулентного перехода

A-Airfoil

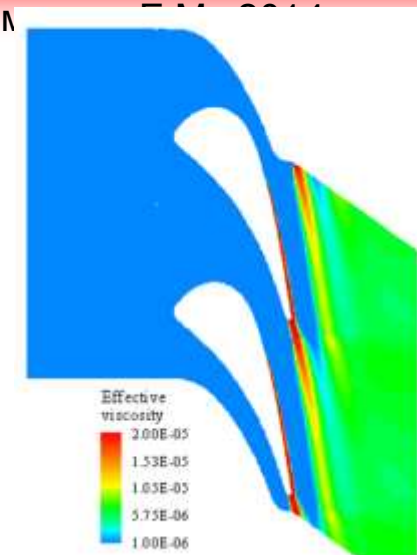
$Re=2,1 \cdot 10^6$



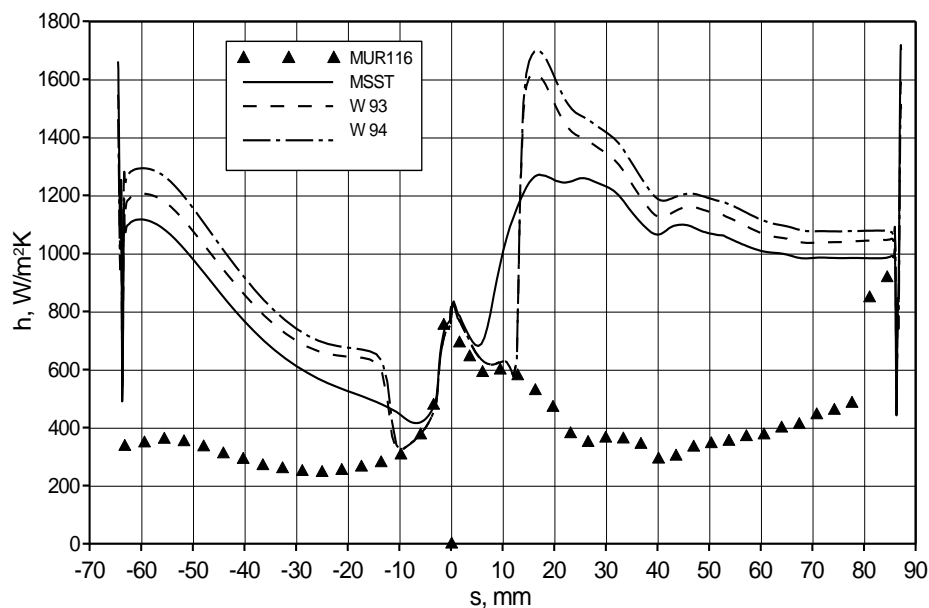
Отрывной пузырь

Effect of laminar-turbulent transition modeling on prediction of heat transfer coefficient in a turbine transonic cascade

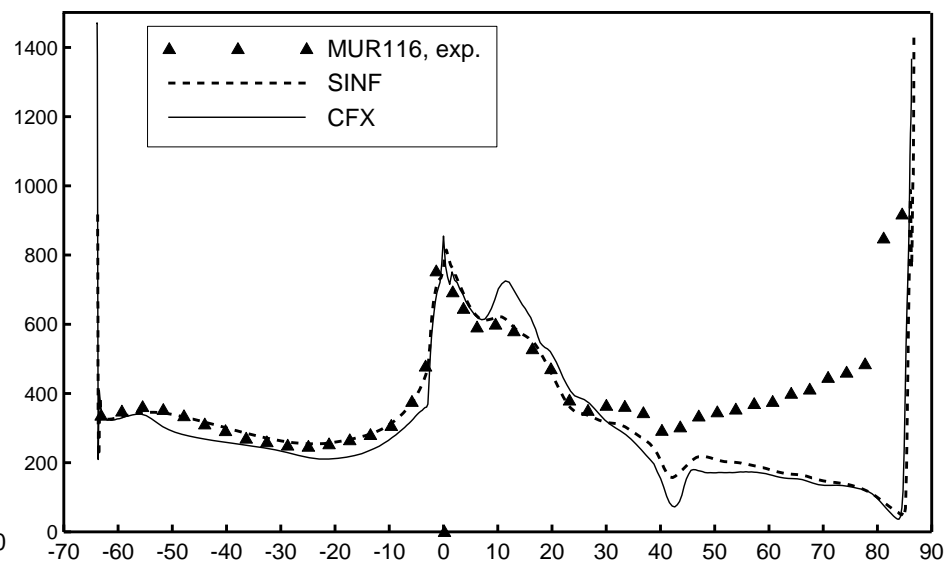
Cascade VKI/LS8, Case MUR 116



No L-T transition model



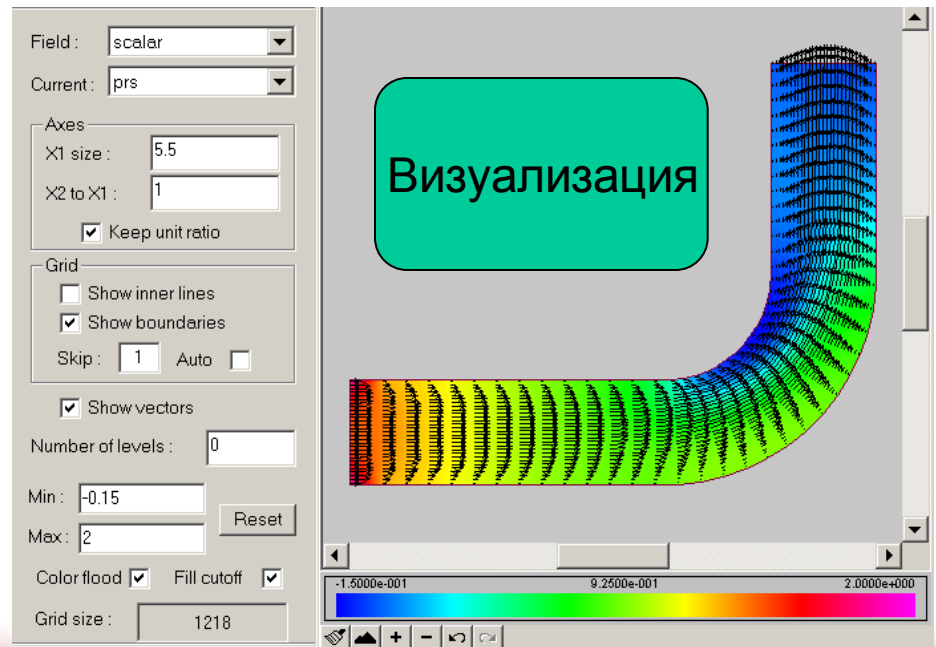
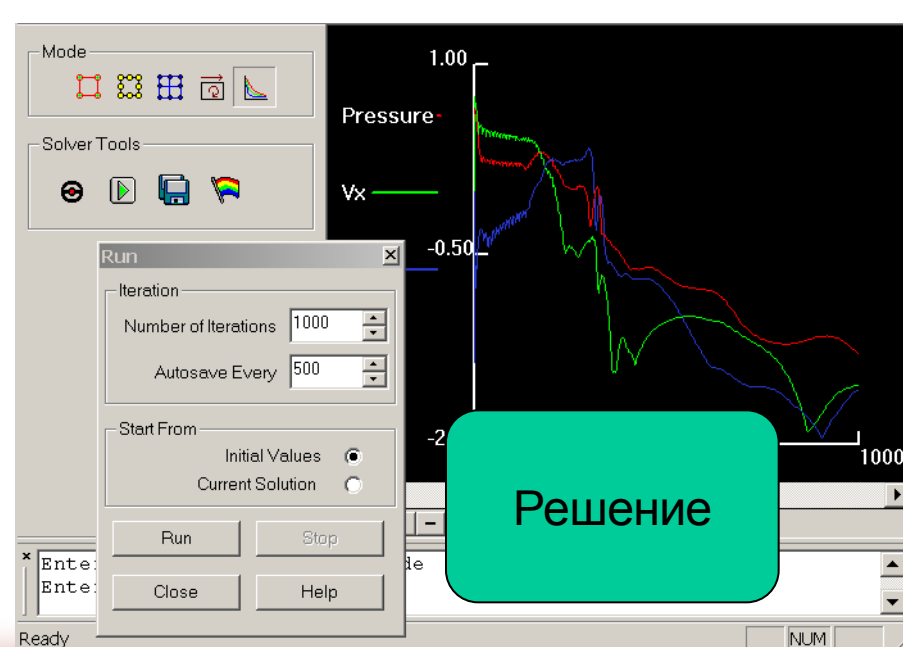
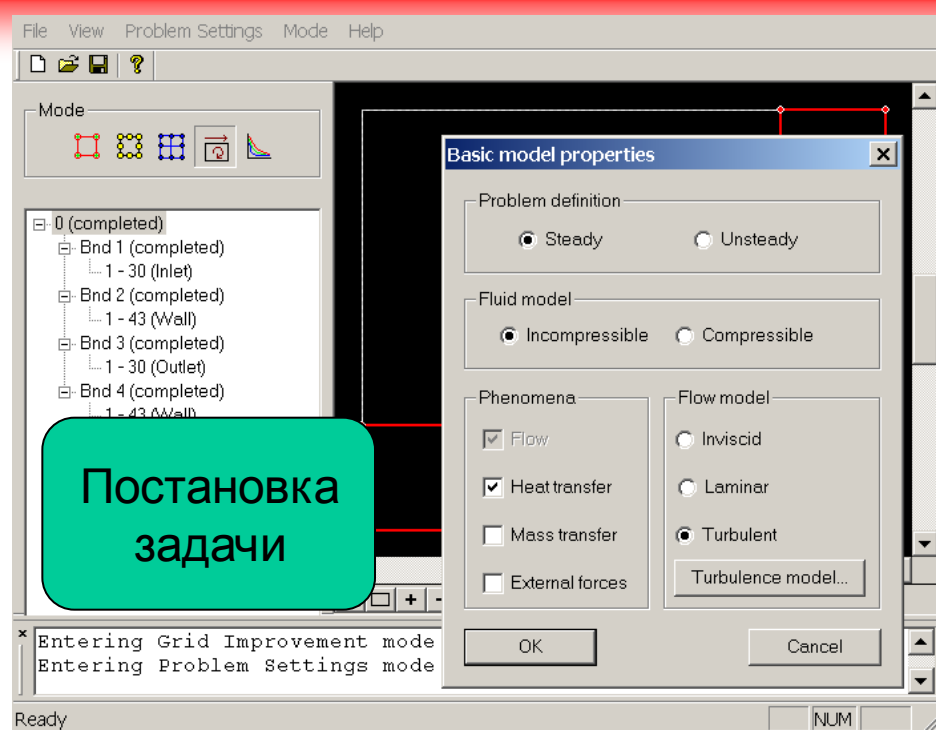
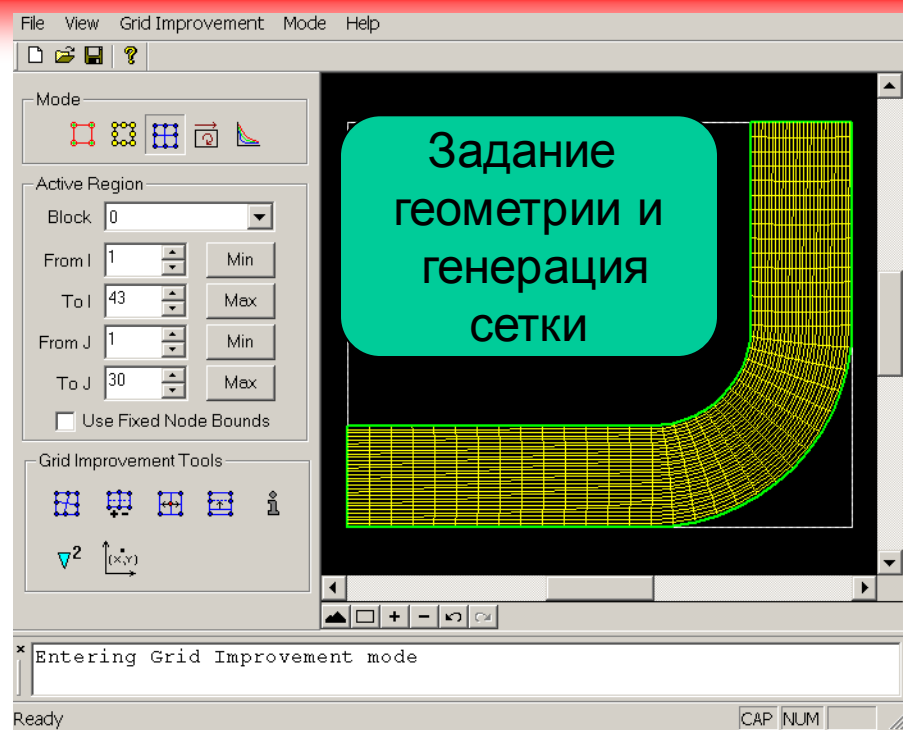
With L-T transition model by Menter-Langtry



Пакет “Flos” (*Flow* *Studio*)

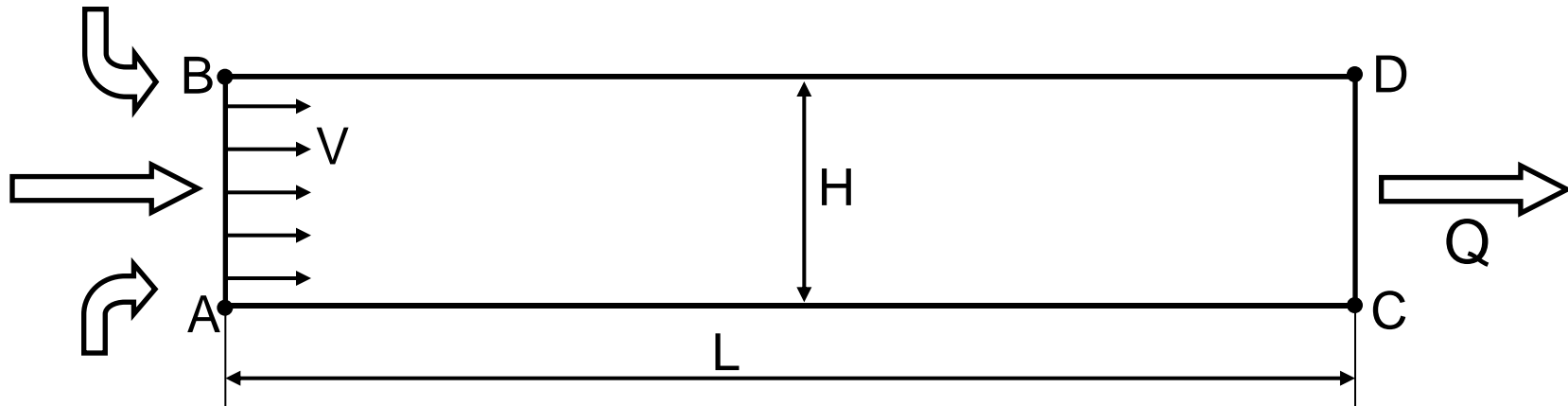
***Flos* – это созданная на базе пакета SINP интегрированная дружественная среда для решения двумерных и трехмерных задач гидрогазодинамики и сопряженного теплообмена с преимущественной ориентацией на использование в учебном процессе и начинающими исследователями**

Интегрированная среда – это геометрический модельер, генератор сеток, препроцессор для задания параметров и граничных условий задачи, вычислительное ядро и развитые средства визуализации результатов



Преппроцессорная подготовка

Задача: течение в начальном участке плоского канала



Исходные данные: высота канала H , расход Q , свойства жидкости

Построение геометрии: определение длины расчетной области L

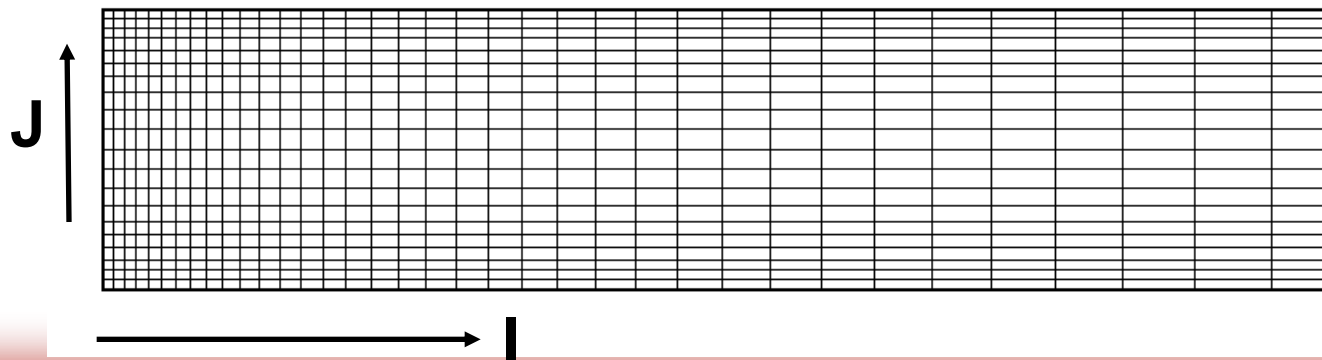
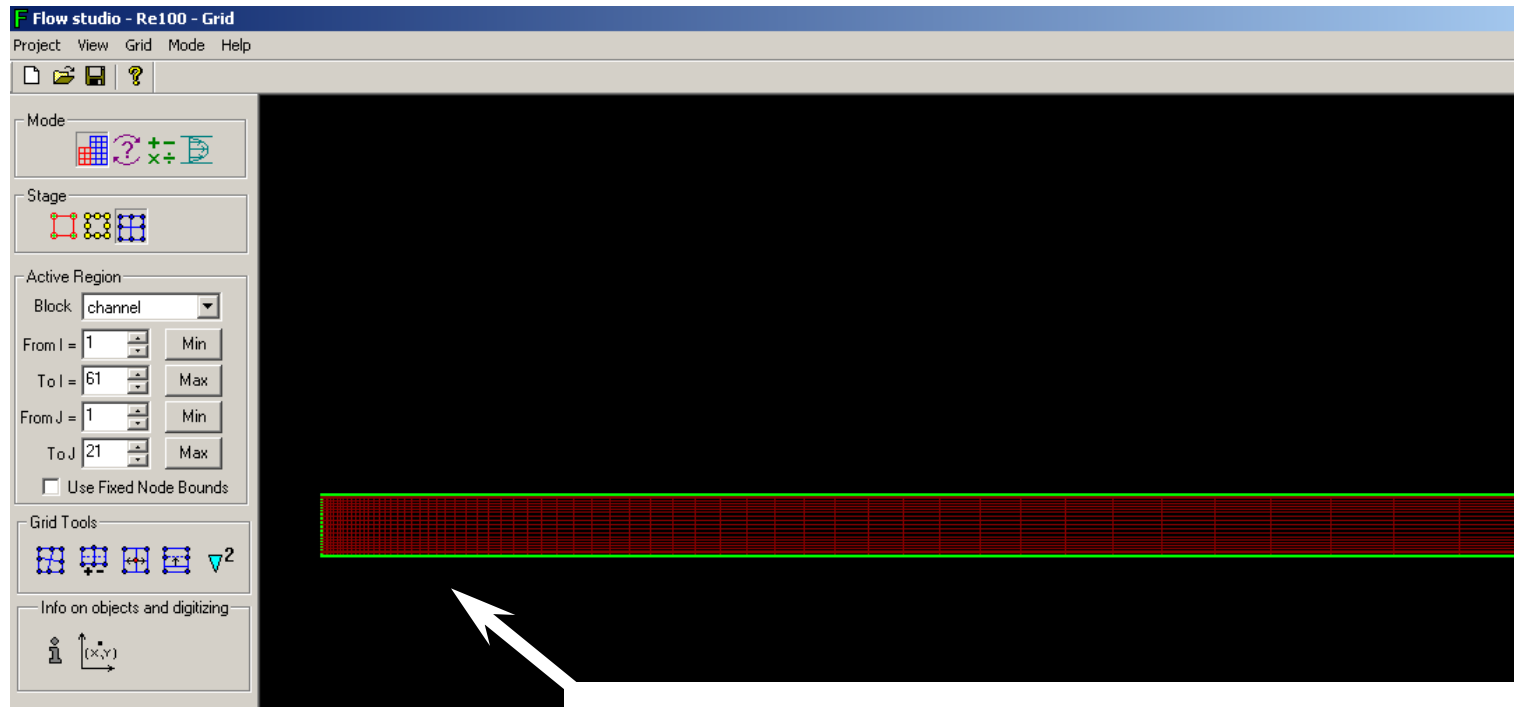
Математическая модель: стационарное ламинарное течение
несжимаемой жидкости

Граничное условие на входе: однородный профиль скорости V

Всё это – п.1. Общая постановка задачи. Формулировка приближенной физической модели.

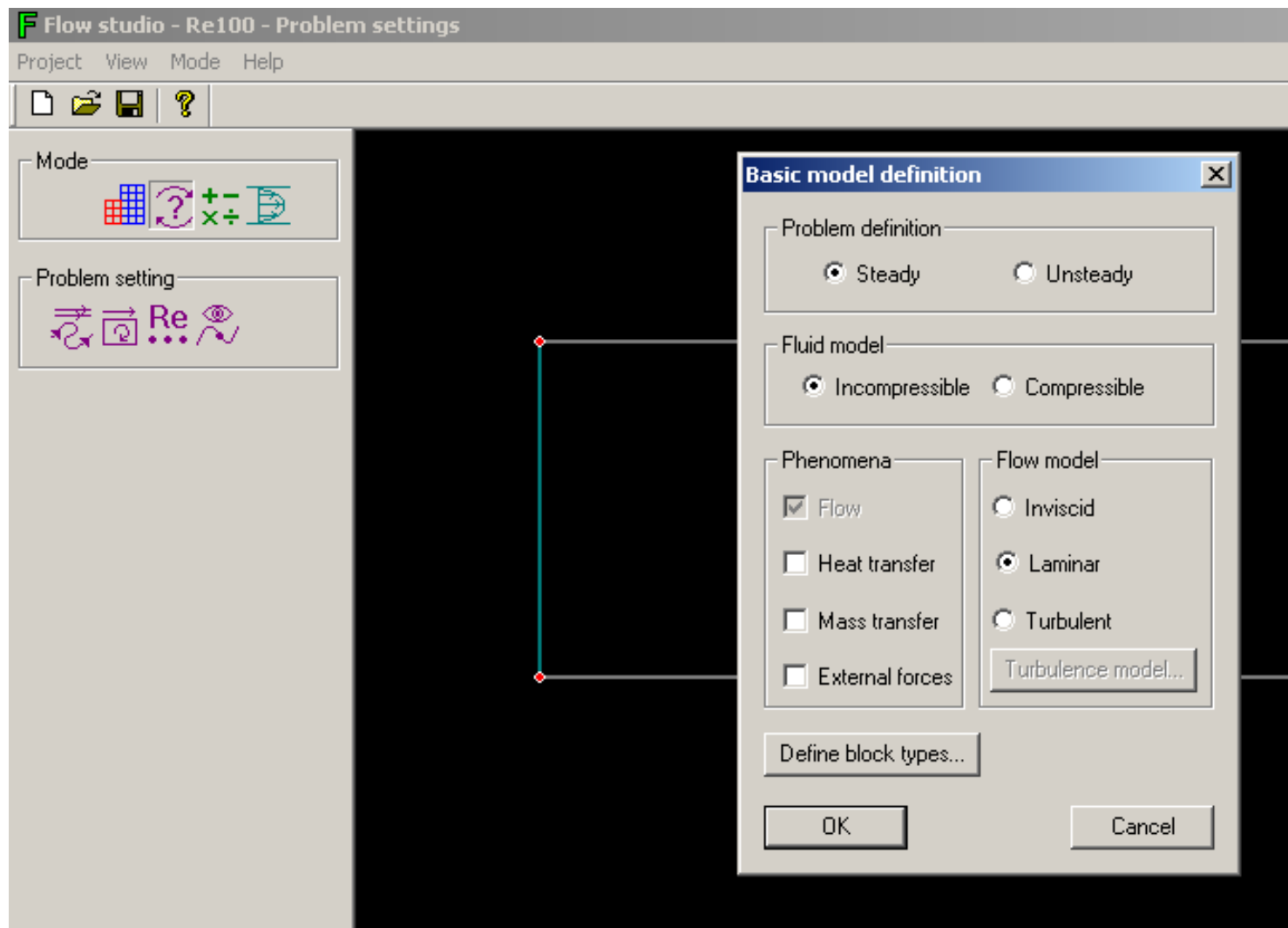
Препроцессорная подготовка (2)

Построение геометрии и расчетной сетки:



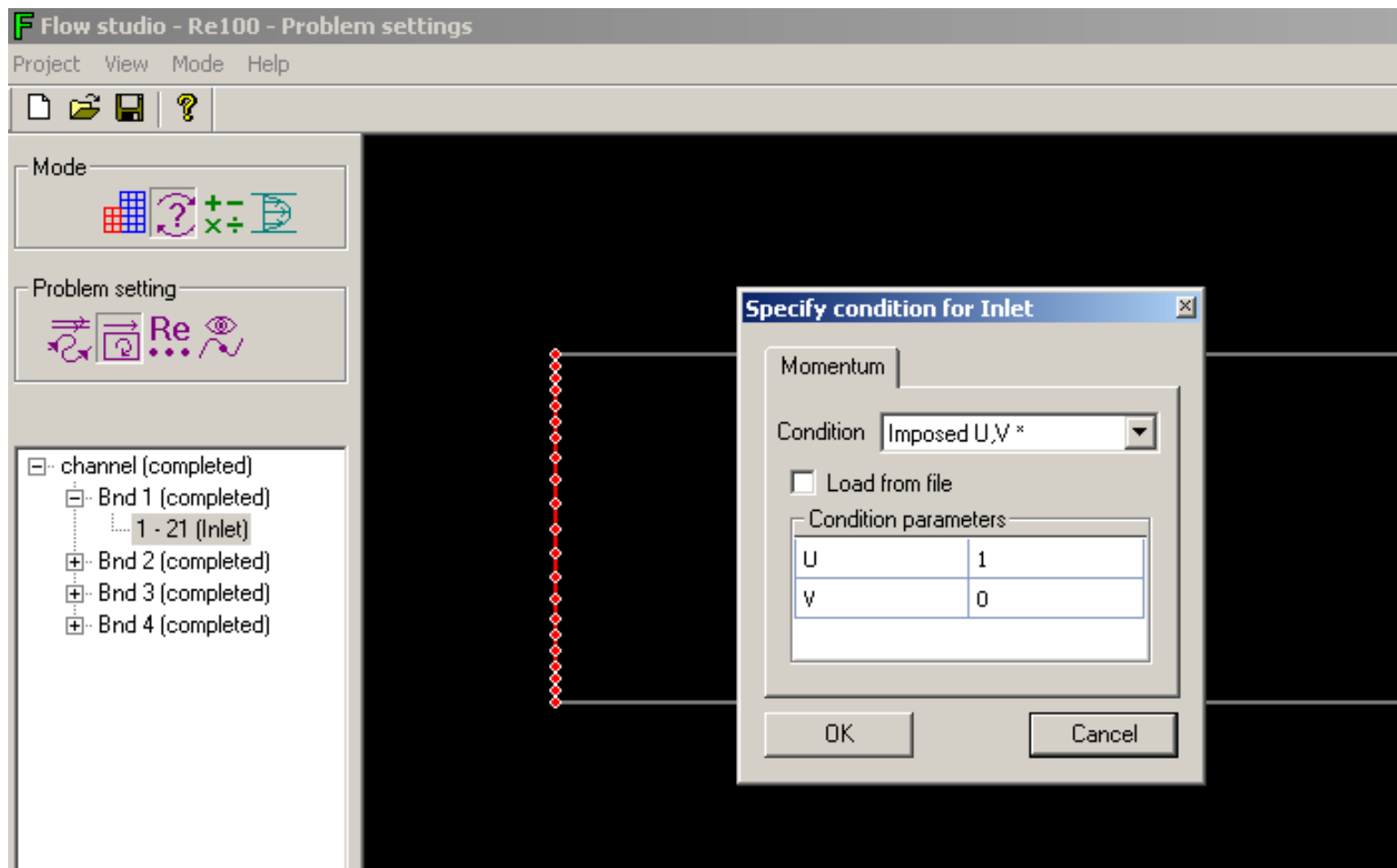
Подготовка солвера к работе

Задание математической модели:



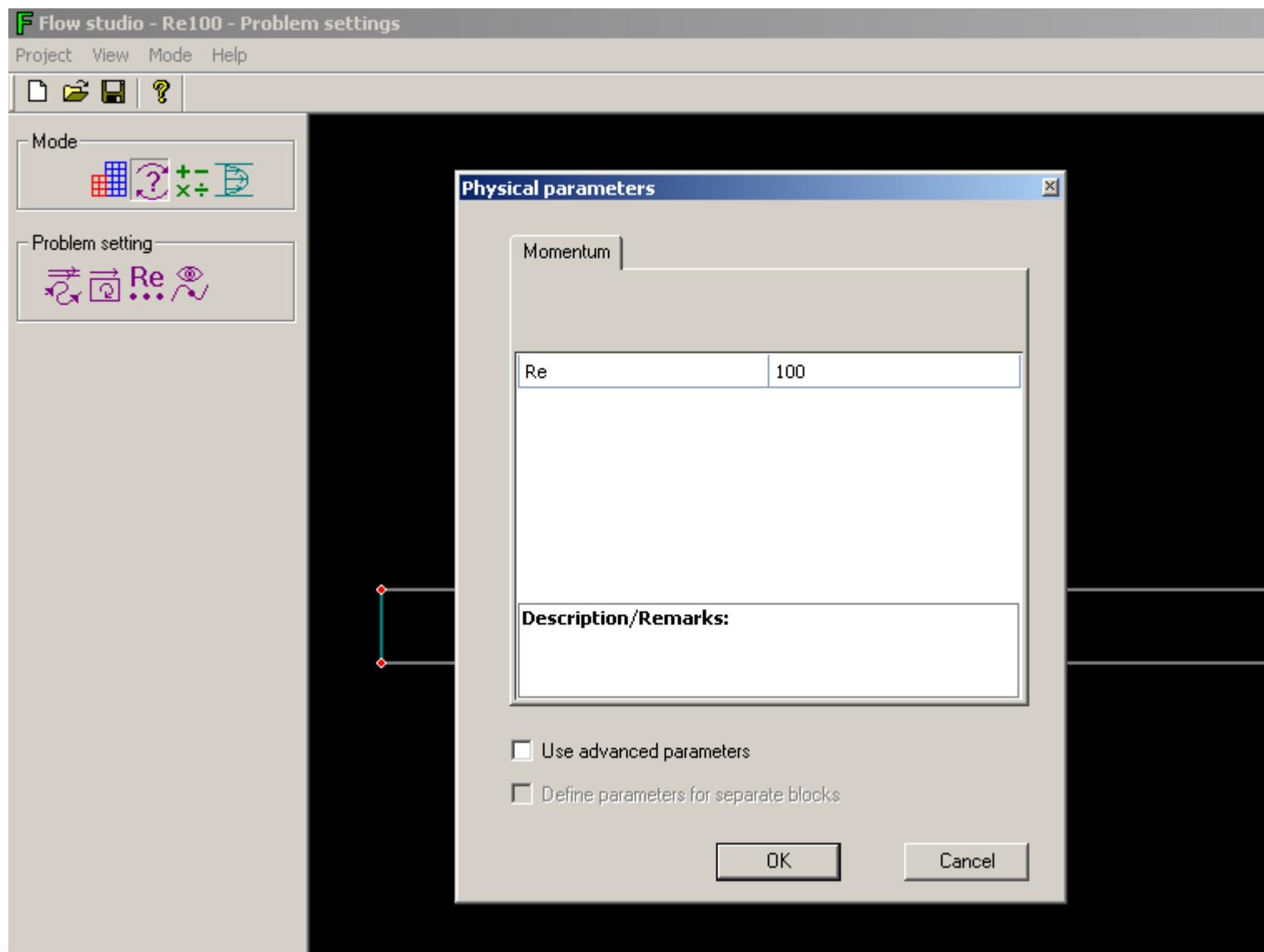
Подготовка солвера к работе (2)

Задание граничных условий:



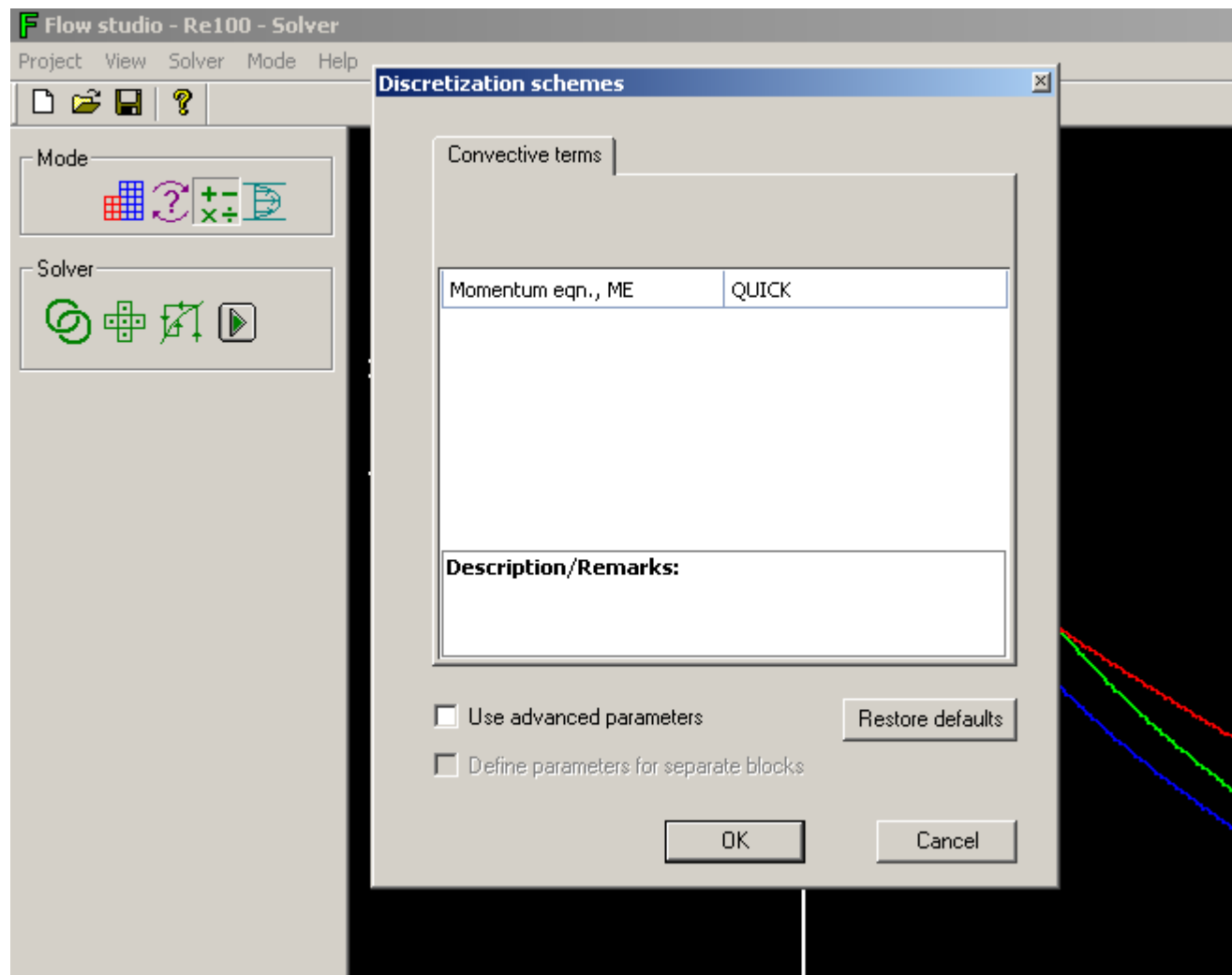
Подготовка солвера к работе (3)

Задание физических параметров:

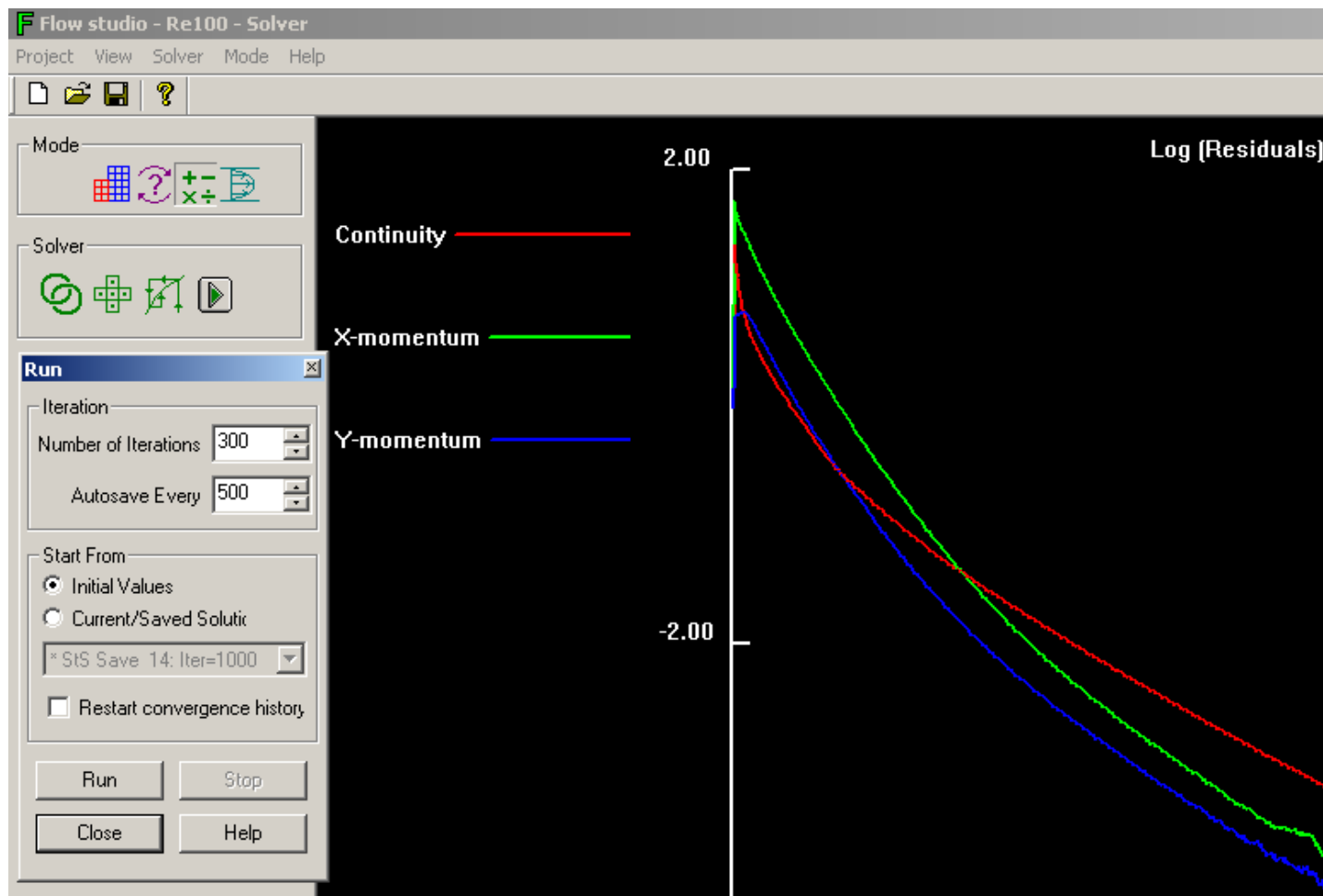


Подготовка солвера к работе (4)

Задание параметров численной схемы:



Расчёт: процесс сходимости к искомому решению



Контроль сходимости

Iteration	Continuity	X-momentum	Y-momentum	Pressure	Temperature
52	0.285E+00	0.152E+00	0.735E-01	0.000E+00	
53	0.265E+00	0.284E+00	0.260E+00	0.000E+00	
54	0.218E+00	0.155E+00	0.148E+00	0.000E+00	
55	0.301E+00	0.349E+00	0.183E+00	0.000E+00	
56	0.267E+00	0.203E+00	0.114E+00	0.000E+00	
57	0.224E+00	0.339E+00	0.908E-01	0.000E+00	
58	0.211E+00	0.193E+00	0.656E-01	0.000E+00	
59	0.186E+00	0.337E+00	0.725E-01	0.000E+00	
60	0.142E+00	0.191E+00	0.543E-01	0.000E+00	
61	0.741E-01	0.221E+00	0.653E-01	0.000E+00	
62	0.205E-01	0.133E+00	0.533E-01	0.000E+00	

Код ПГС-ТК

(Паро-Газовая Смесь - Тепломассобмен и Конденсация)

Разработка 2009-2012 гг. по заказу СПбАЭП

Трехмерный нестационарный код, исходно предназначенный для численного моделирования турбулентного течения и тепломассопереноса в защитной оболочке (контейнменте) реактора АЭС при условиях, типичных для «проектной» аварии, связанной с разрывом трубопровода первого контура. Может быть использован и для решения широкого круга смежных проблем.

Код «отчужден» и снабжен полной документацией

Код ПГС-ТК: математическая модель

- Низкоскоростное (существенно дозвуковое) течение
- Многокомпонентная паро-газовая смесь
- Температурная и концентрационная плавучесть в поле силы тяжести
- Турбулентный тепло-массоперенос (RANS и RANS/LES подходы)
- Объемная конденсация пара (модель равновесной конденсации)
- Поверхностная конденсация пара; стекание пленки конденсата
- Сопряженный теплообмен (тепловые структуры, внешний теплообмен, нестационарные граничные условия)
- Накачка давления в Защитной Оболочке реактора АЭС
- Учет работы рекомбинаторов водорода

Основные особенности вычислительных технологий, реализованных в коде ПГС-ТК

1. Аппроксимация по методу конечного объема
 - **Блочно-структурированные сетки** с регулярной или нерегулярной стыковкой на межблочных границах
 - Второй порядок точности по пространству и времени
2. **SIMPLE-подобные алгоритмы** для решения уравнений Навье-Стокса. Итерационные методы сопряженных и би-сопряженных градиентов для решения СЛАУ.
3. Использование как **RANS моделей** турбулентности, так и **вихреразрешающих подходов**
4. **Параллельные расчеты** на мощных суперкомпьютерах кластерного типа

Матрица тестирования кода ПГС-ТК

Сравнение с аналитическими решениями

- ✓ Смешанная конвекция в вертикальном плоском канале
- ✓ Объемная конденсация в потоке с распределенным отводом тепла
- ✓ Накачка давления в замкнутой полости
- ✓ Выгорание (рекомбинация) водорода в замкнутой полости
- ✓ Прогрев многослойной тепловой структуры (стенки)
- ✓ Стеkanie пленки конденсата по вертикальной стенке

Сравнение с эталонными расчетами

- ✓ Течение и теплообмен в квадратной полости с движущейся крышкой
- ✓ Свободно-конвективное течение в квадратной полости
- ✓ Свободно-конвективное течение в кубической полости
- ✓ Естественная конвекция в горизонтальном слое, подогреваемом снизу
- ✓ Течение и конденсация в замкнутой полости с переменной во времени температурой стенок

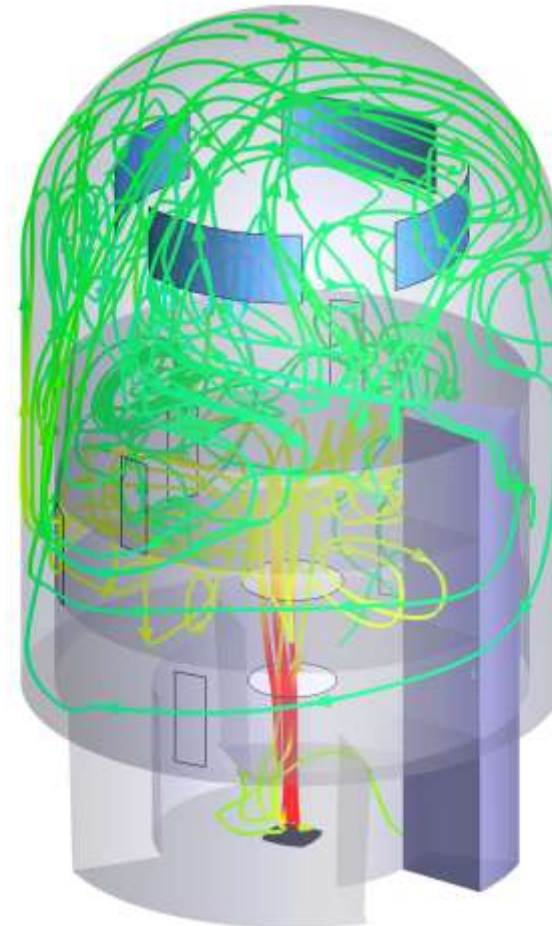
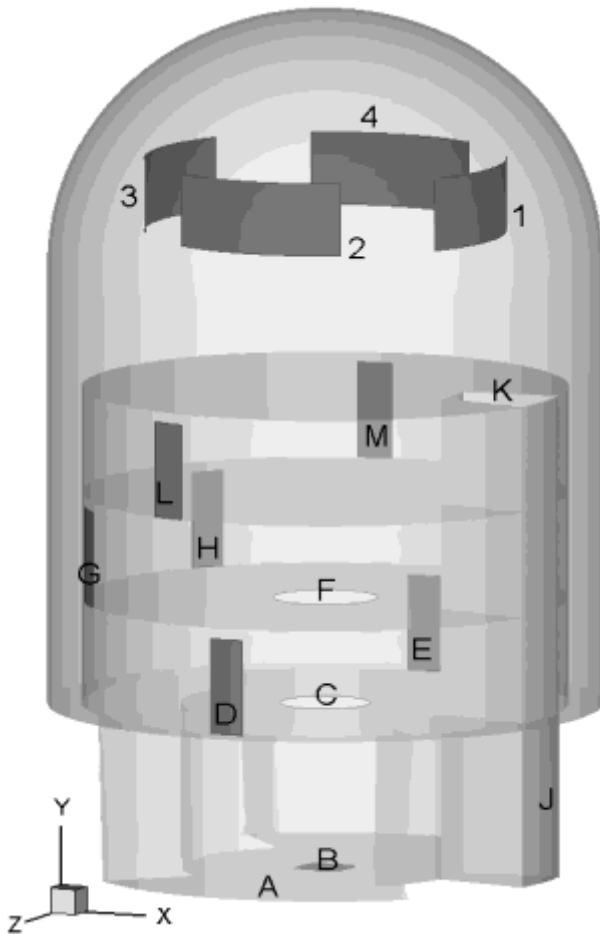
Сравнение с экспериментальными данными

- ✓ Естественная конвекция около горизонтального цилиндра
- ✓ Нестационарное обтекание цилиндра однородным потоком
- ✓ Свободно-конвективный турбулентный пограничный слой на вертикальной пластине
- ✓ То же при наличии конденсации пара

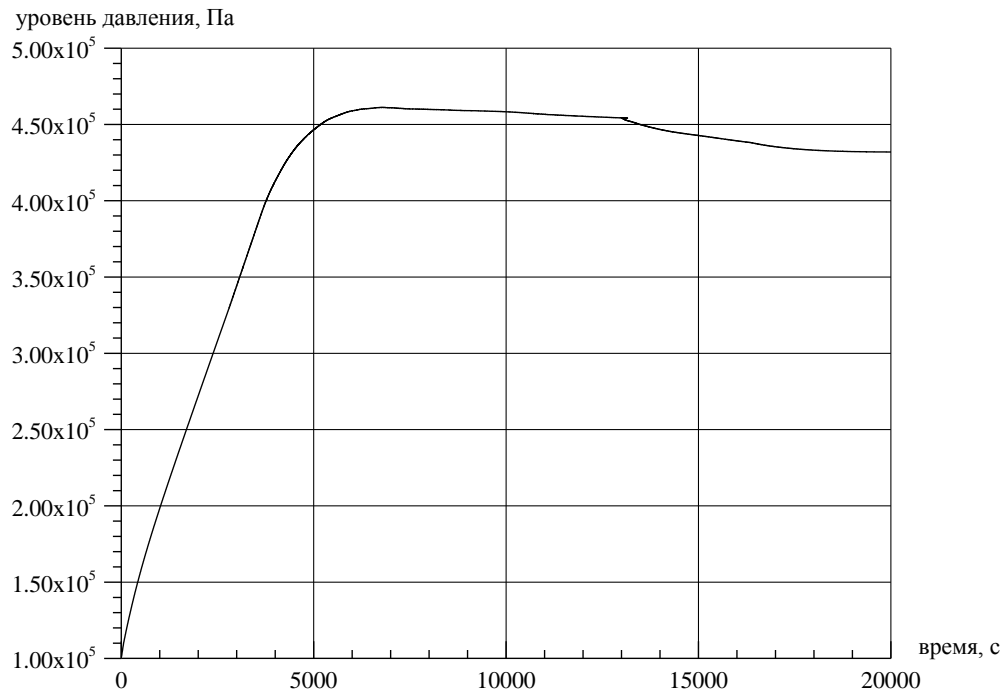
Расчеты для модели контейнмента АЭС

Упрощенная модель крупномасштабного стенда (КМС)

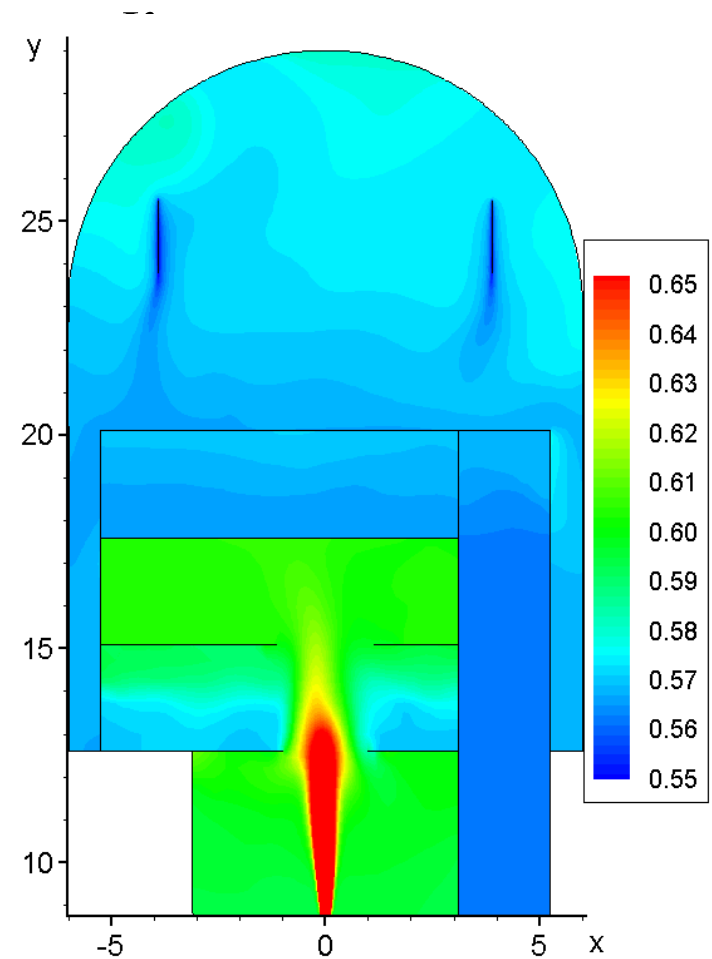
Линии тока, окрашенные в температуру



Поле концентрации пара



Накачка давления при подаче пара



Сравнение экспериментальных и расчетных данных для стенда КМС

Параметр		Эксперимент	ПГС-ТК
Мощность, снимаемая теплообменниками, кВт	1	82	76
	2	79	71
	3	79	80
	4	77	74
Суммарная мощность, кВт		316	301
Давление в защитной оболочке, кПа		374±2	352
Температура в защитной оболочке, °C		122±2	117.5

Код SINF/Flag-S, оперирующий с 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**

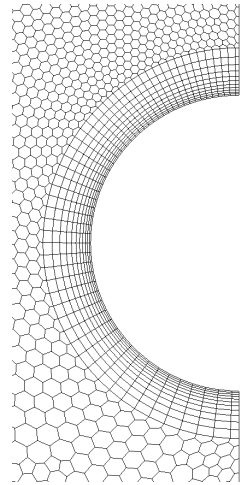
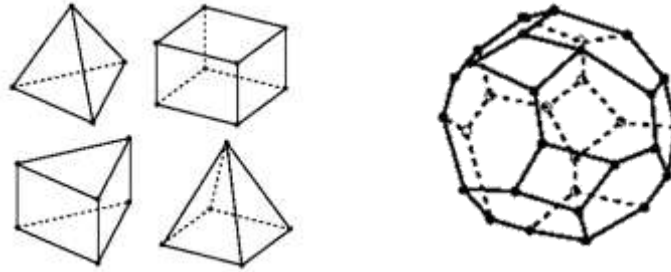
Классы задач, решаемых с использованием неструктурированного кода SINF/Flag-S (на текущий момент)

- **Течения несжимаемой жидкости, включая случай свободных поверхностей)**
- **Дозвуковые течения однородного газа**
- **Свободно- и смешанно-конвективные течения в полях гравитационных сил**
- **Задачи сопряженного теплообмена (без радиационного)**
- **Задачи конвективно-диффузионного переноса примеси**

Модели, реализованные в неструктурированном коде SINF/Flag-S

- Вязкая текучая среда (уравнения Навье-Стокса)
- RANS-модели турбулентности (k , ν_t -SA, k - ε , k - ω , MSST)
- Расширенные («автоматические») пристенные функции
- Вихреразрешающие модели турбулентности (LES, DES)
- 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
- Подвижные деформируемые 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 неструктурированном коде SINF/Flag-S

- 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) полу-неявная схема метода дробных шагов
- Солверы для СЛАУ: GMRES, CG, Bi-CGstab
- Локальный шаг по времени установления
- Многосеточный (геометрический) алгоритм с агломерацией ячеек

Дополнительная информация о неструктурированном коде SINF/Flag-S

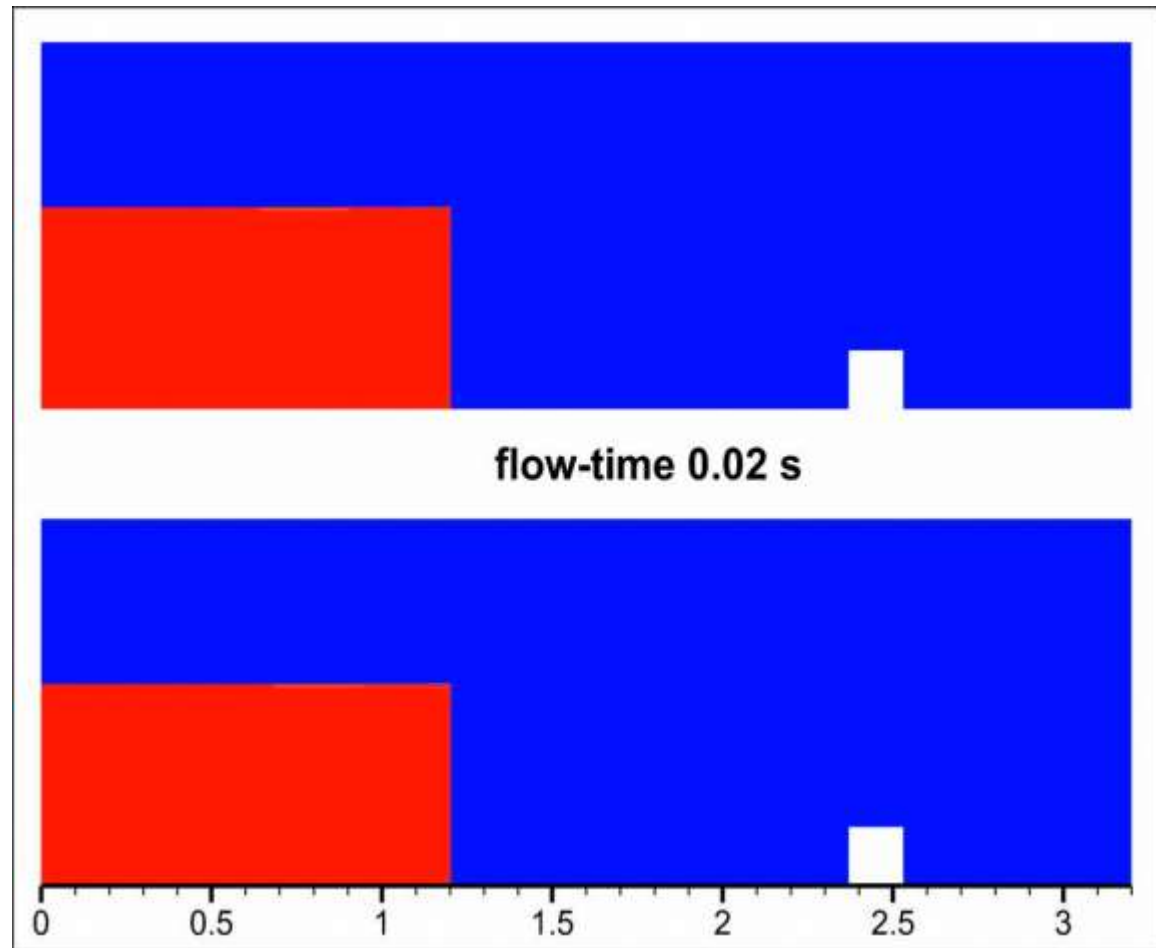
- **Целевые архитектуры ВК и ОС: Linux, Windows**
- **Параллельные вычисления: тип распараллеливания – одноуровневое MPU; рабочий диапазон числа ядер – до 1000, без гетерогенных вычислений**
- **Техника и политика тестирования: не устоялась, база основных рабочих тестов – около 30**
- **Ведение документации: 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 6**
- **Язык исходного кода: FORTRAN-90**

Расчет по коду SINF/Flag-S течений со свободными поверхностями

Effect of turbulence in the flow core

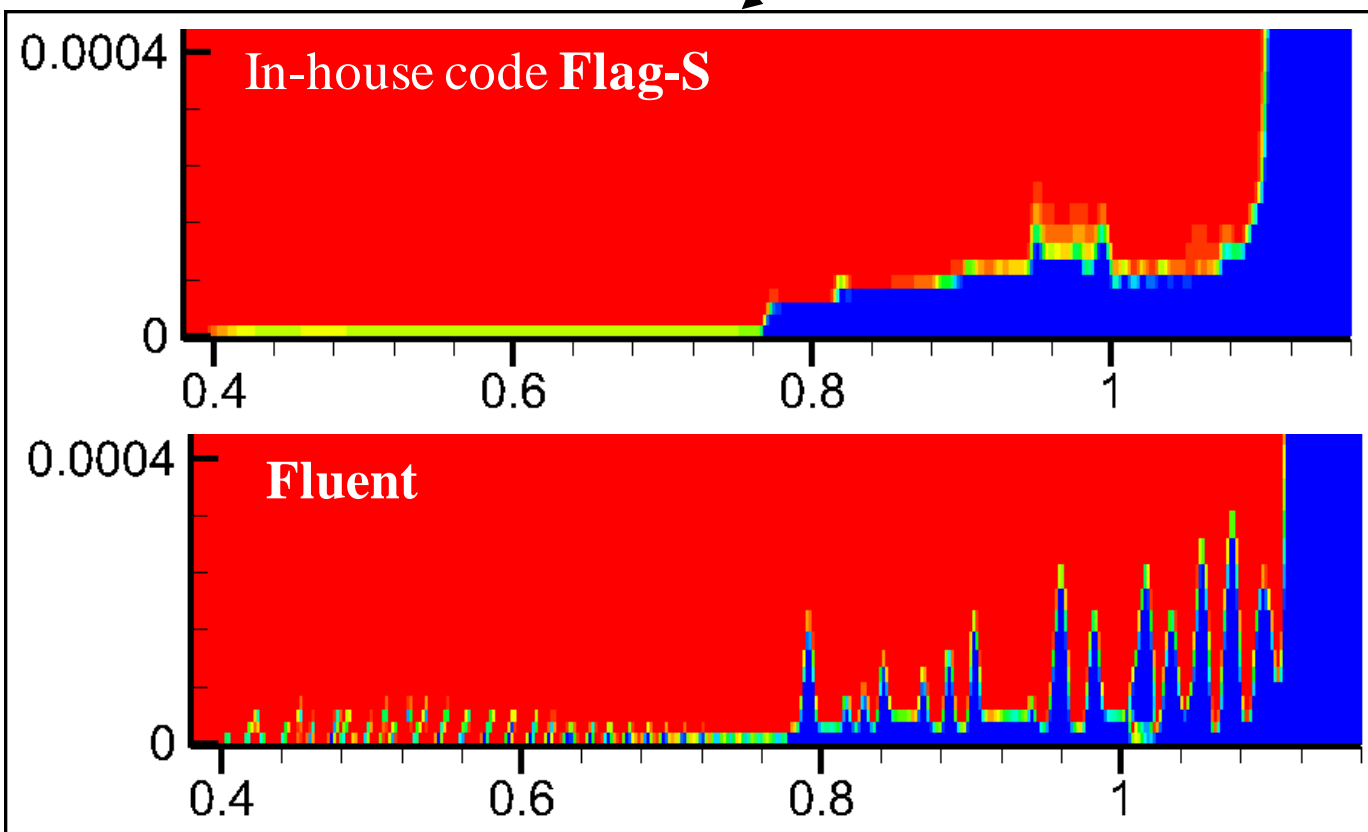
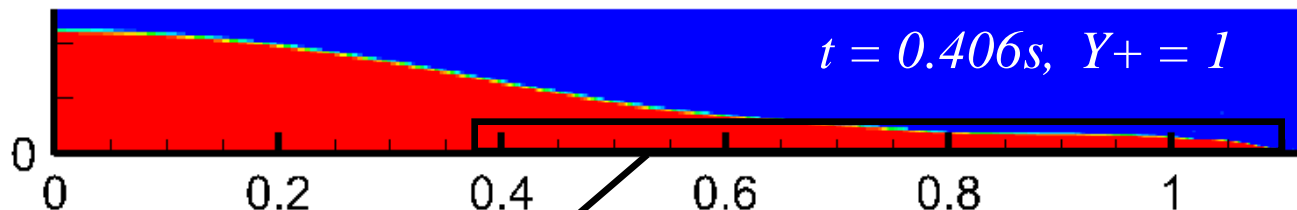
Slip conditions on the wall

SST turbulence model



No turbulence model

Occurrence of nonphysical air layer in the case of dry bottom and low-Re grid

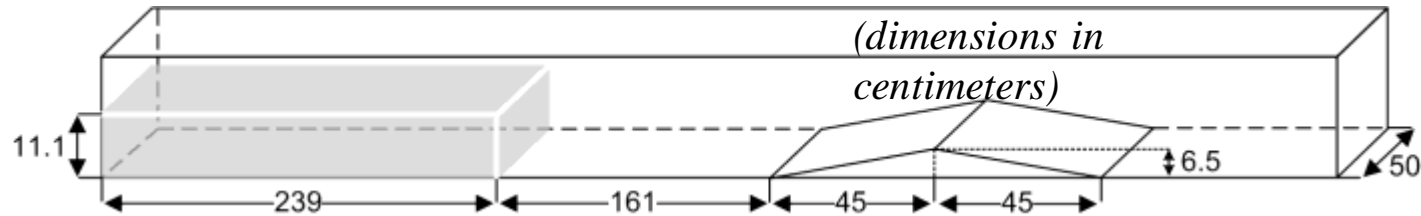


- Similar effect is detected in results obtained with ANSYS Fluent
- A special “artificial diffusion” procedure was developed to remove this artifact

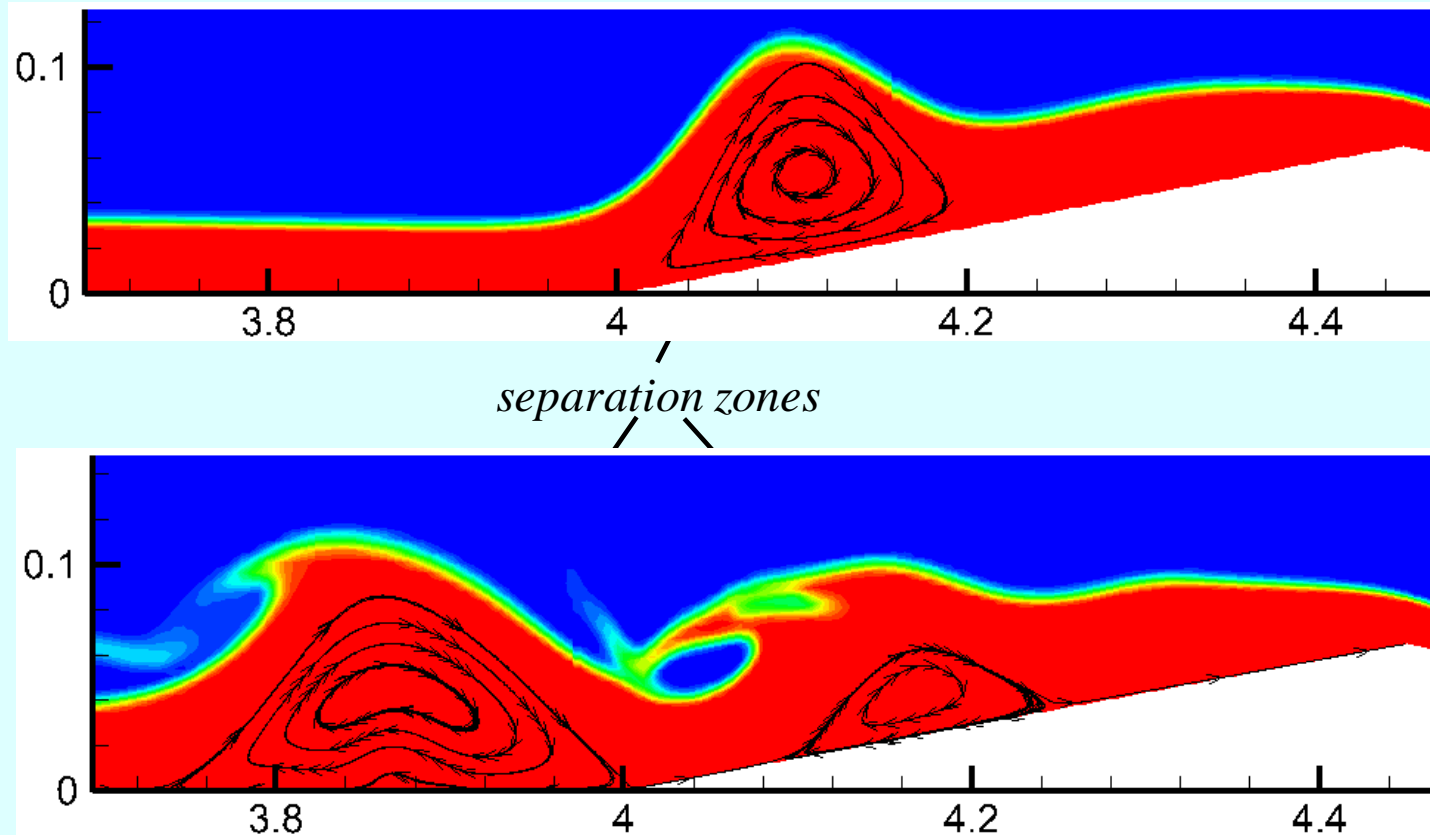
Triangular obstacle test case

Смирнов Е.М., 2014

Experimental setup :
(Soares-Frazao, 2007)



Results of 2D computation ($Y^+ = 1$):

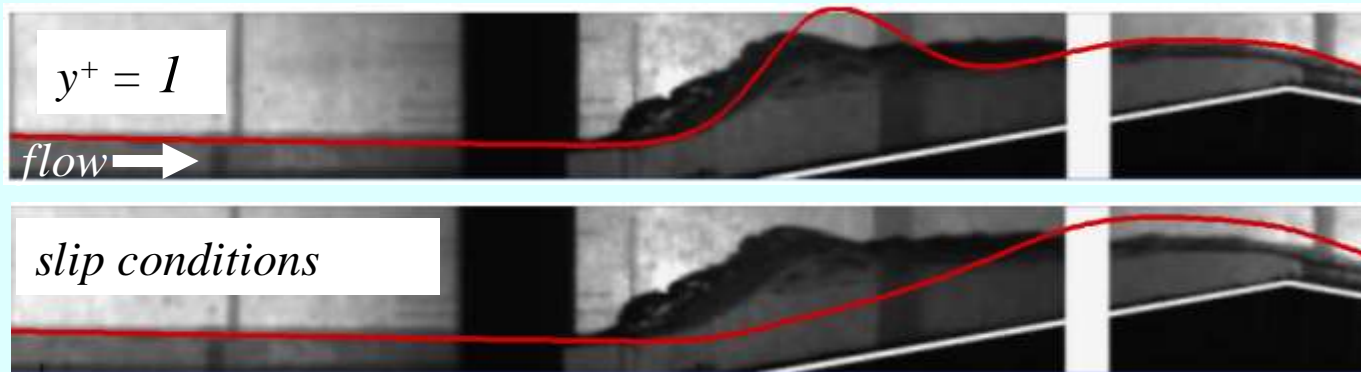


- *Friction effects are well pronounced:*
 - several separation zones can occur
 - these zones lead to formation of «hills» on free surface

Comparison with experiments (triangular obstacle)

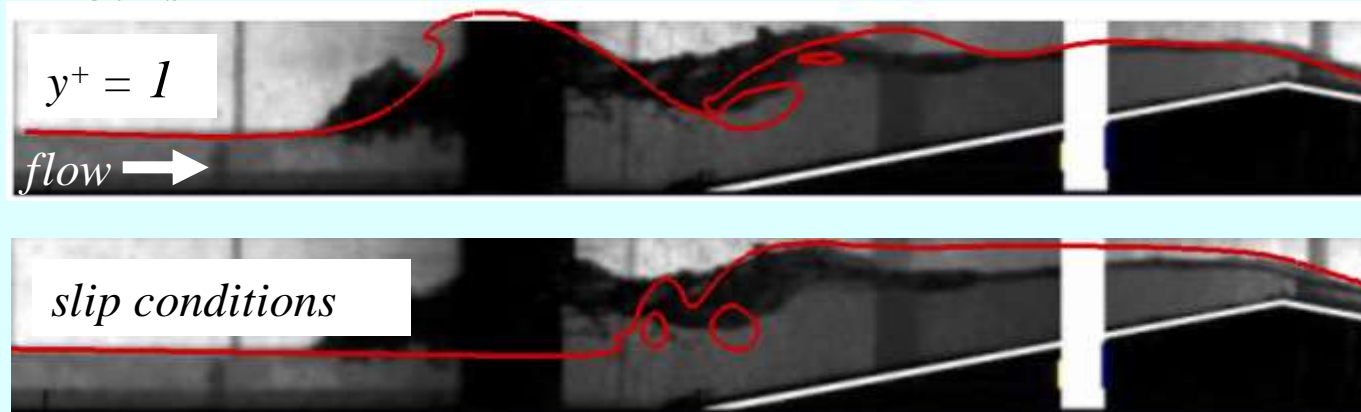
*Results of 2D computations (free surface position)
superposed on experimental photos:*

$t = 3.0\text{ s}$



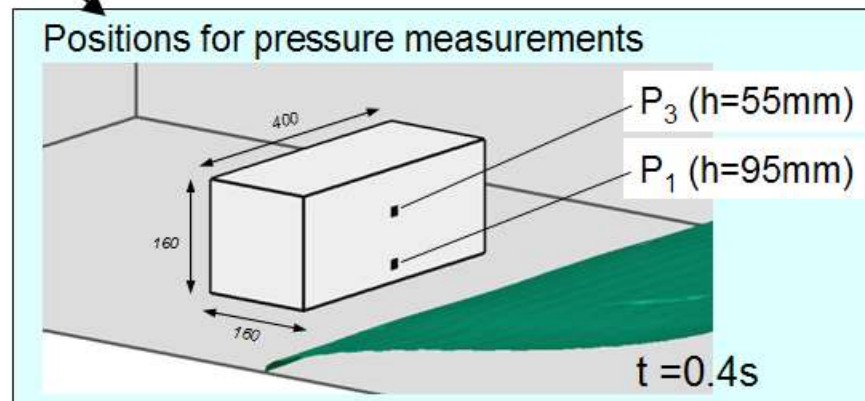
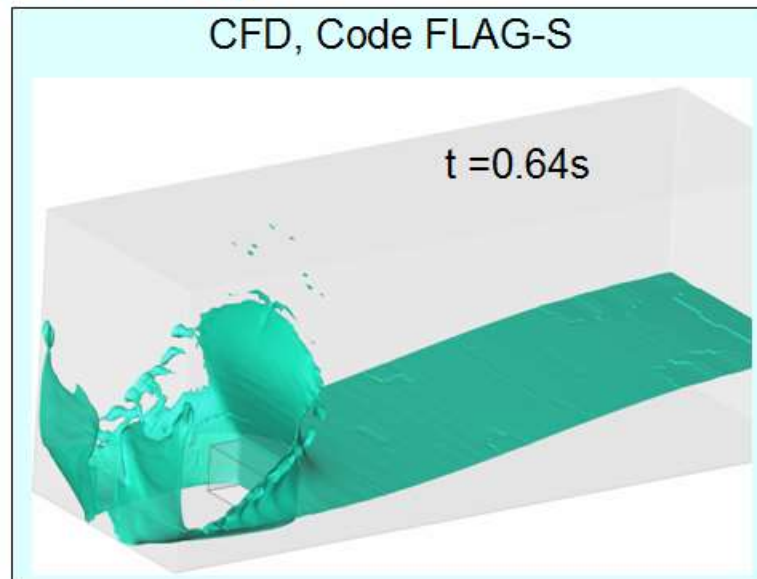
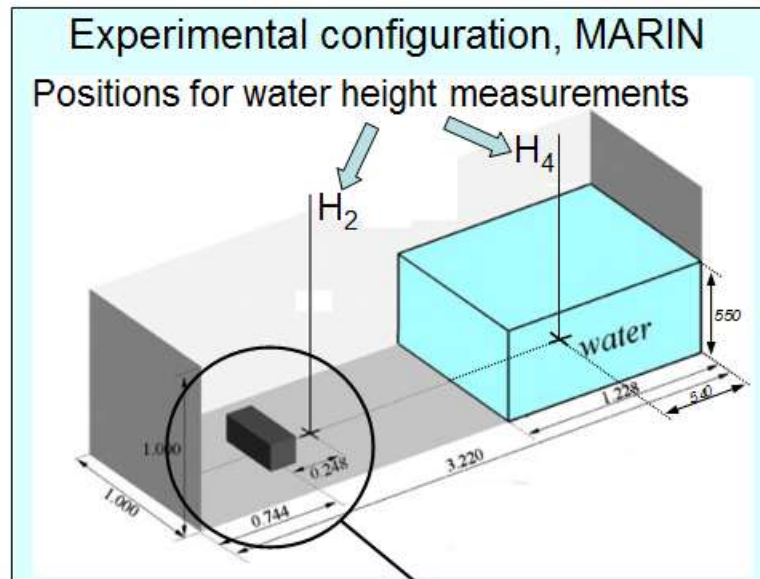
- Free surface "hills" caused by separation zones are visible in the experimental photo as well

$t = 3.7\text{ s}$

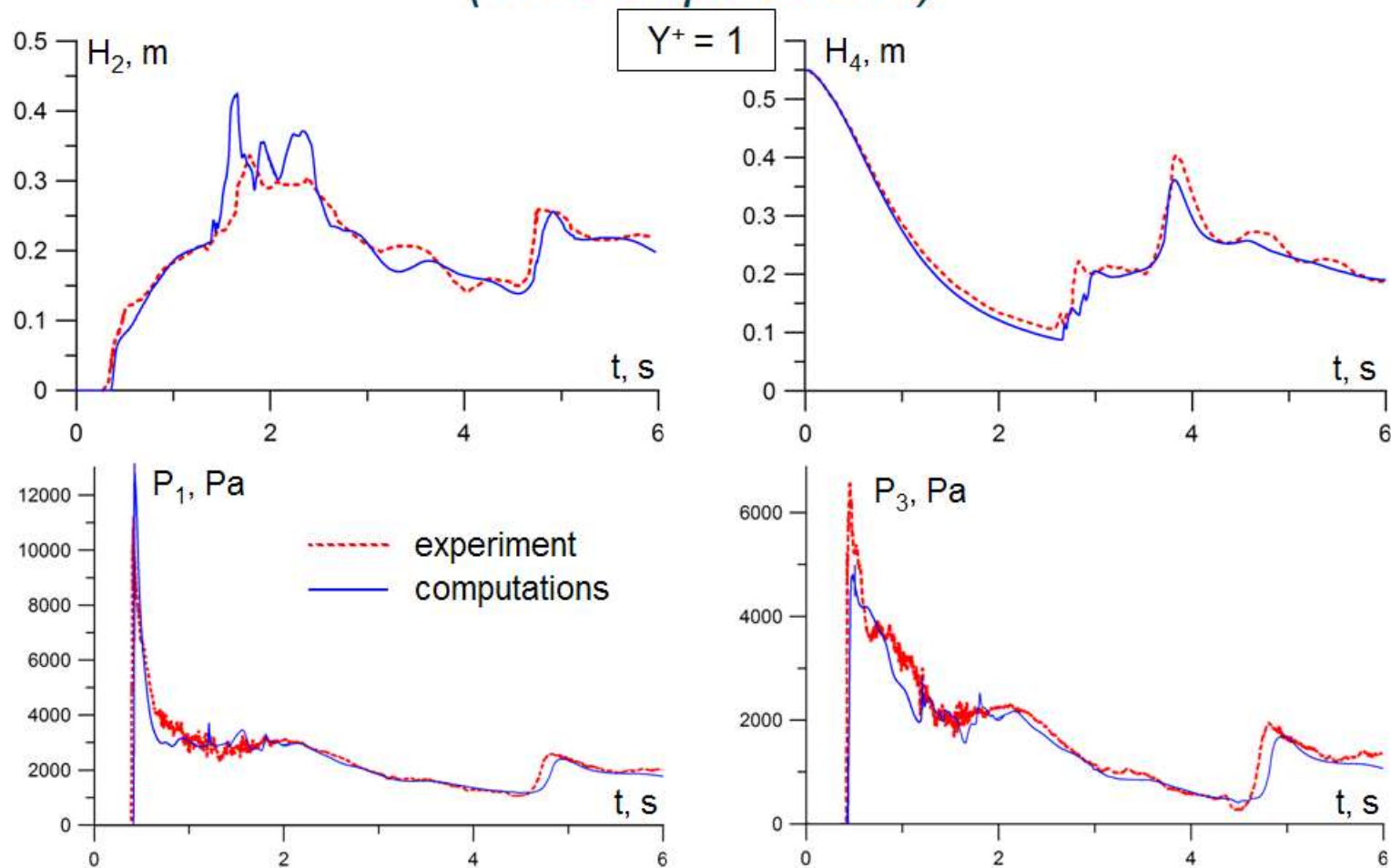


- Computations with slip conditions provide wrong prediction of the flow

Flow interaction with a square obstacle (3D computations)

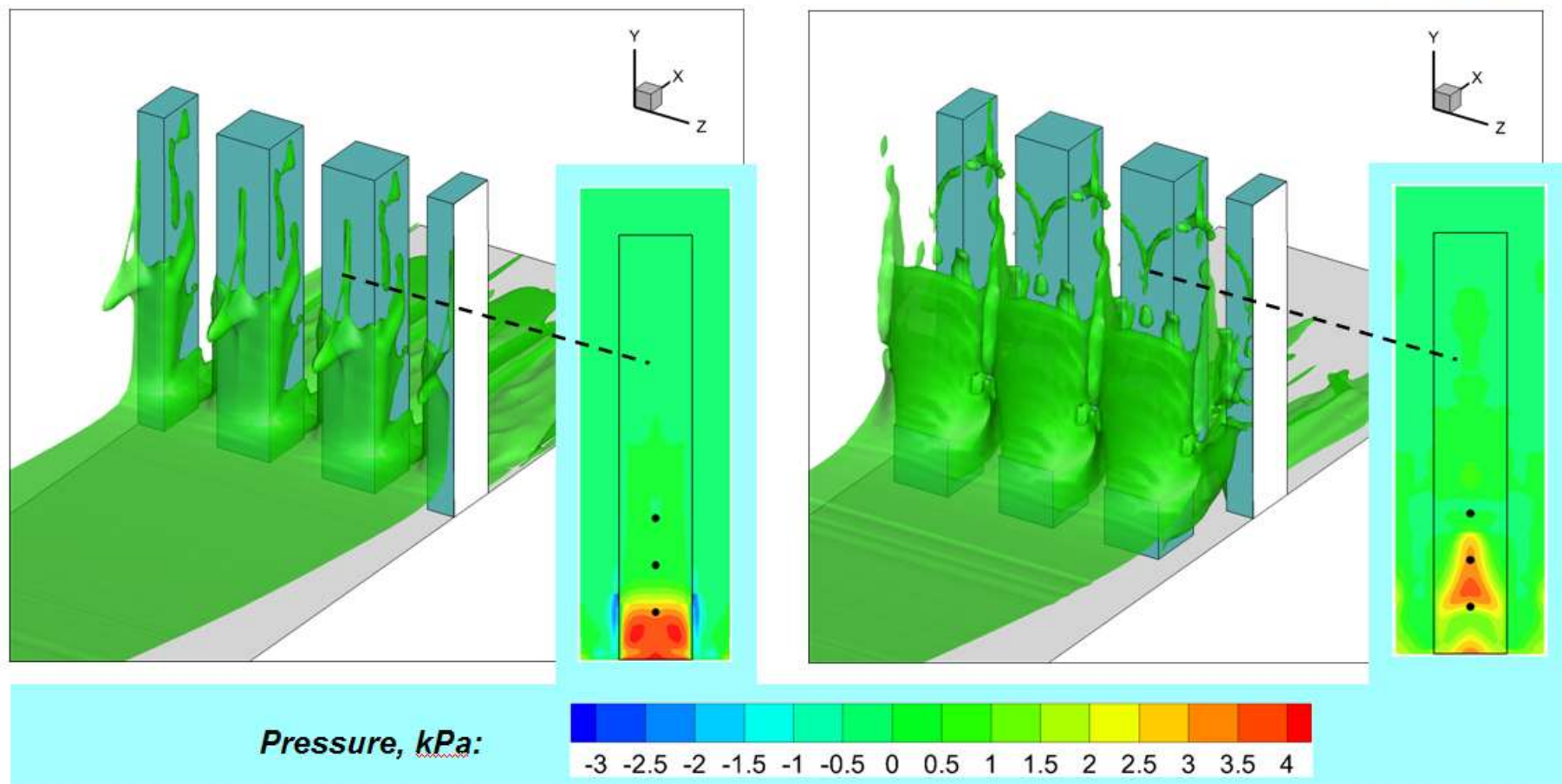


Flow interaction with a square obstacle (3D computations)



- Computational results agree with experiments

Cases with one or two rows of obstacles

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

Код ТЕМБР

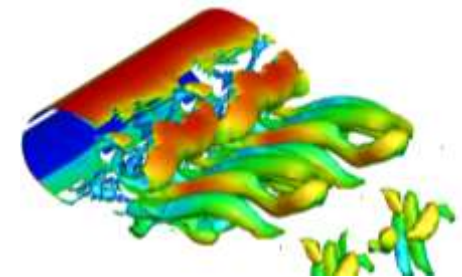
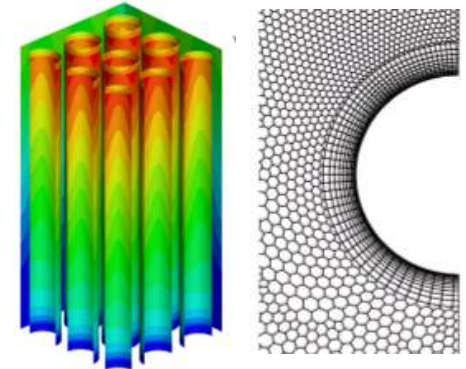
(ТЕплогидродинамика жидких Металлов в Быстрых Реакторах)

Разработка 2013-2014 гг. в интересах ГК «Росатом»

Код предназначен для численного решения проблем теплогидродинамики жидкометаллических теплоносителей с использованием суперкомпьютерных вычислительных технологий и вихреразрешающих моделей турбулентности

Основные особенности кода ТЕМБР

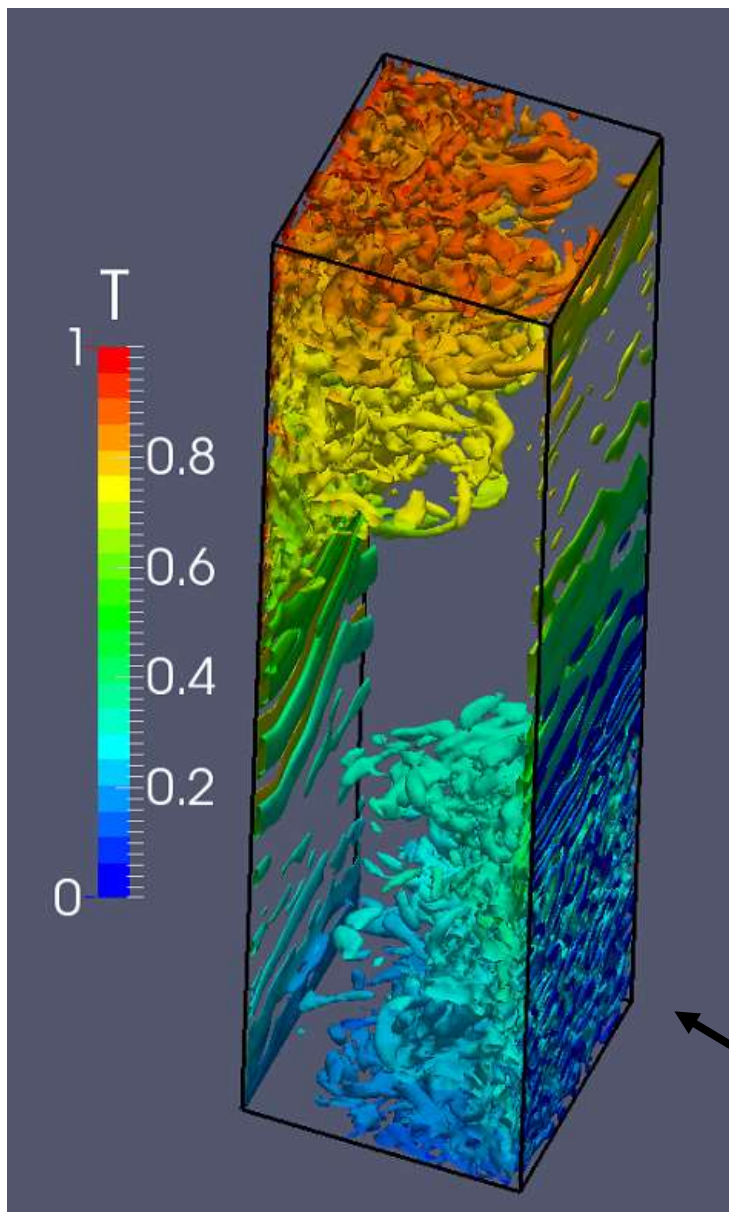
1. Аппроксимация по методу конечного объема
 - **Неструктурированные сетки** с ячейками произвольной формы (от тетраэдра до полиэдра)
 - Второй порядок точности по пространству и времени
2. Использование как RANS моделей турбулентности, так и **вихреразрешающих подходов**:
 - Прямое численное моделирование (DNS)
 - Метод моделирования крупных вихрей (Implicit LES, Explicit LES)
 - Гибридные RANS/LES подходы
3. **Параллельные расчеты** на мощных суперкомпьютерах кластерного типа



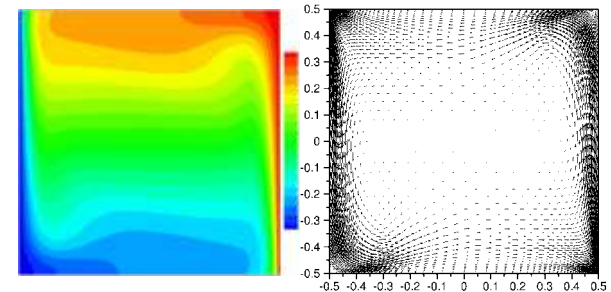
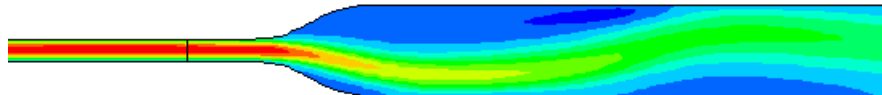
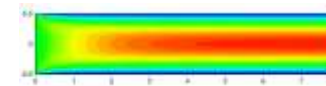
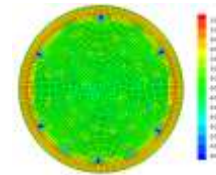
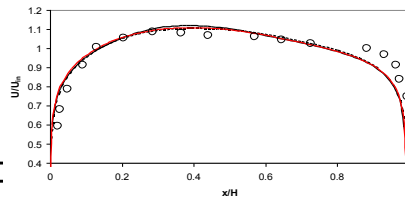
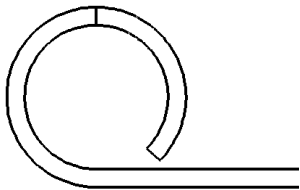
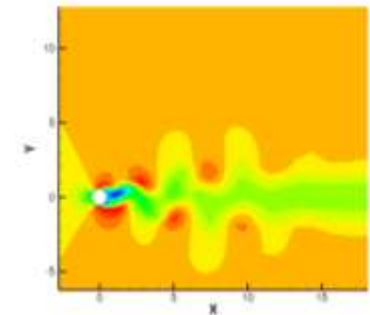
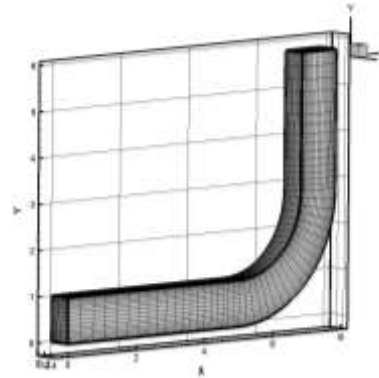
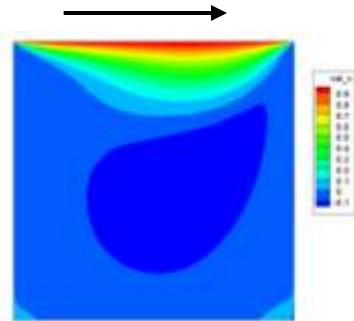
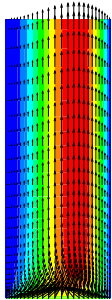
Дополнительные особенности кода ТЕМБР

Использование стандарта “cgns” для ввода-вывода данных, что позволяет использовать открытые коды для пре-и постпроцессинга (Salome, ParaView и др.)

Визуализация с помощью пакета ParaView рассчитанной по коду ТЕМБР свободной конвекции в прямоугольной полости с разогретыми вертикальными стенками при $Ra=10^{11}$.

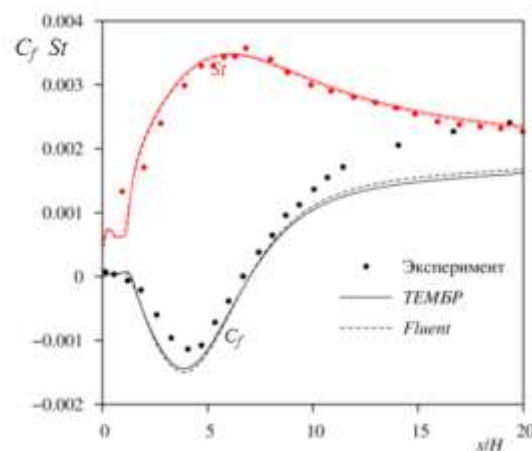
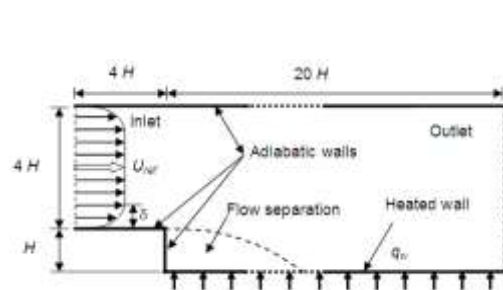


Решено множество «канонических» задач термогидродинамики

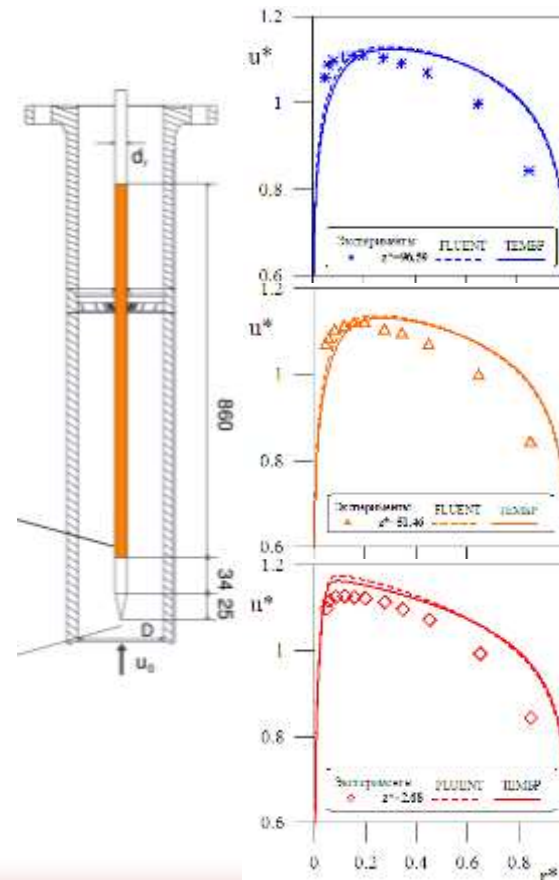


Сопоставление с RANS расчетами по коду ANSYS Fluent

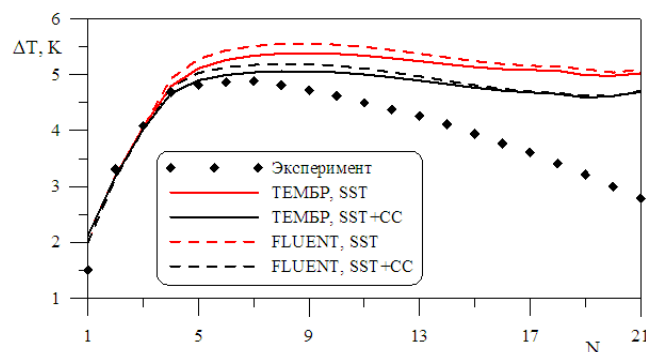
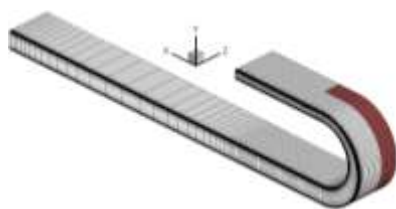
Течение и теплообмен в канале с обратным уступом



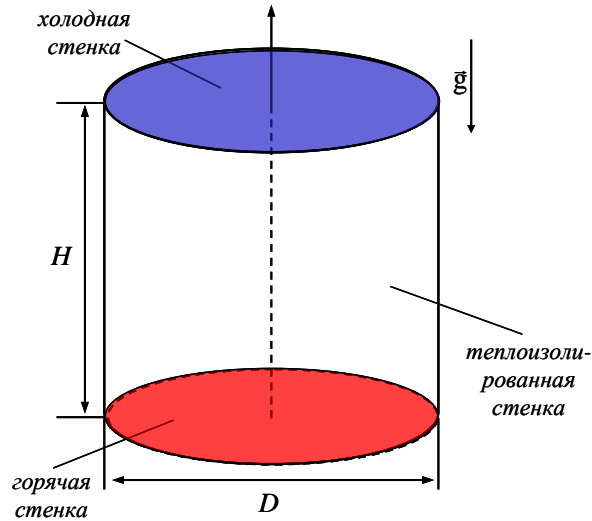
Течение и теплообмен сплава Pb-Bi в кольцевом канале с нагреваемым внутренним цилиндром



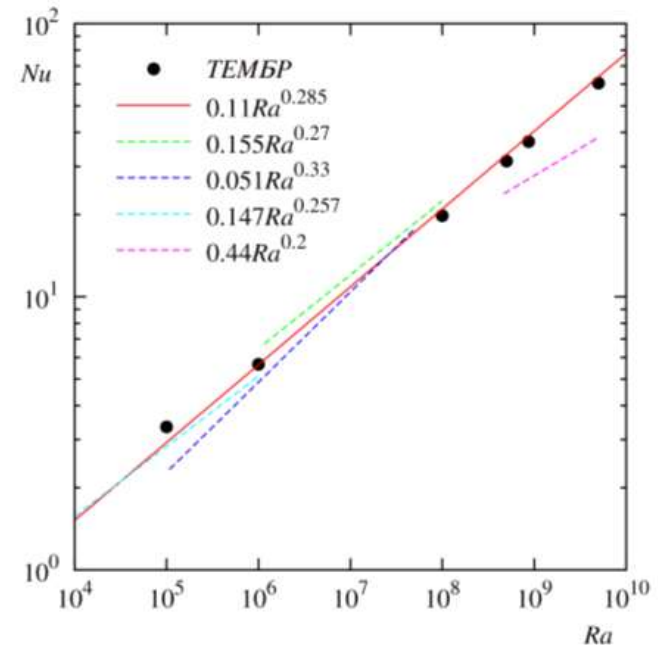
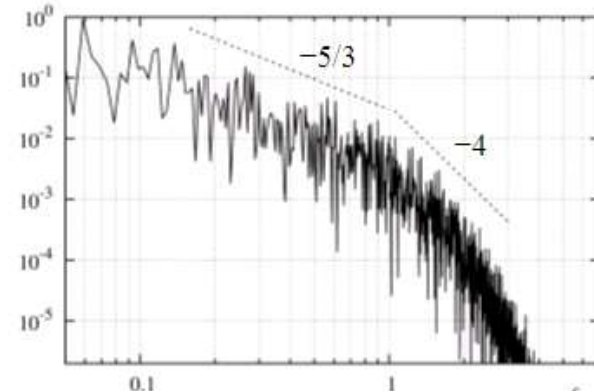
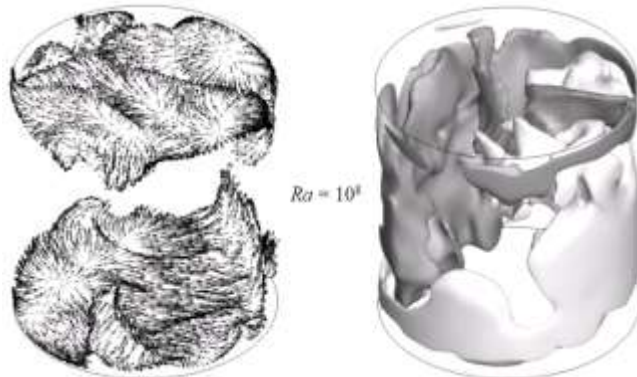
Течение и теплообмен ртути в криволинейном сужающемся канале



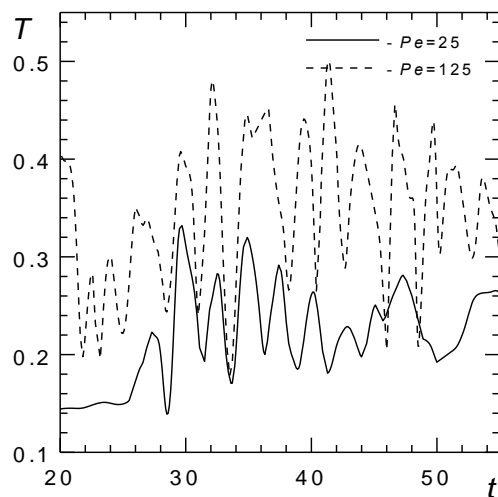
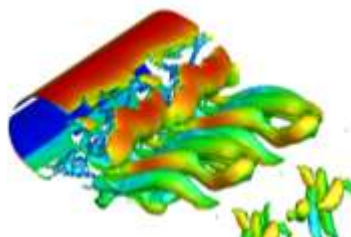
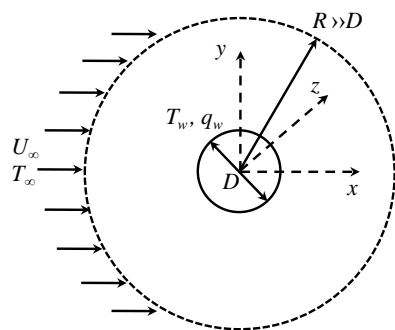
Свободная конвекция ртути в цилиндрическом контейнере, подогреваемом снизу



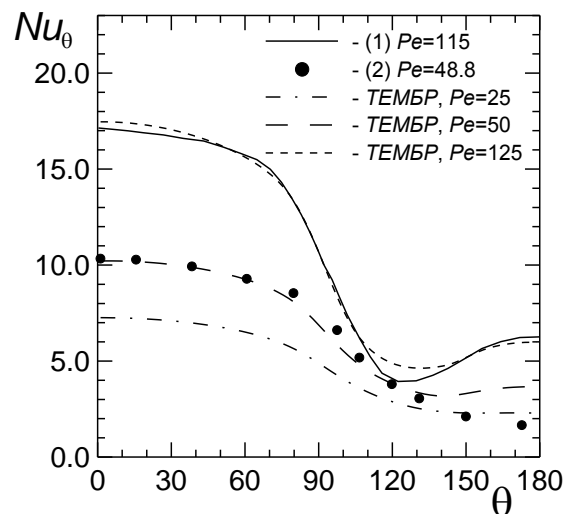
$10^8 \leq Ra \leq 5 \times 10^9$
Сетка 2×10^5



Теплообмен при обтекании натрием круглого цилиндра

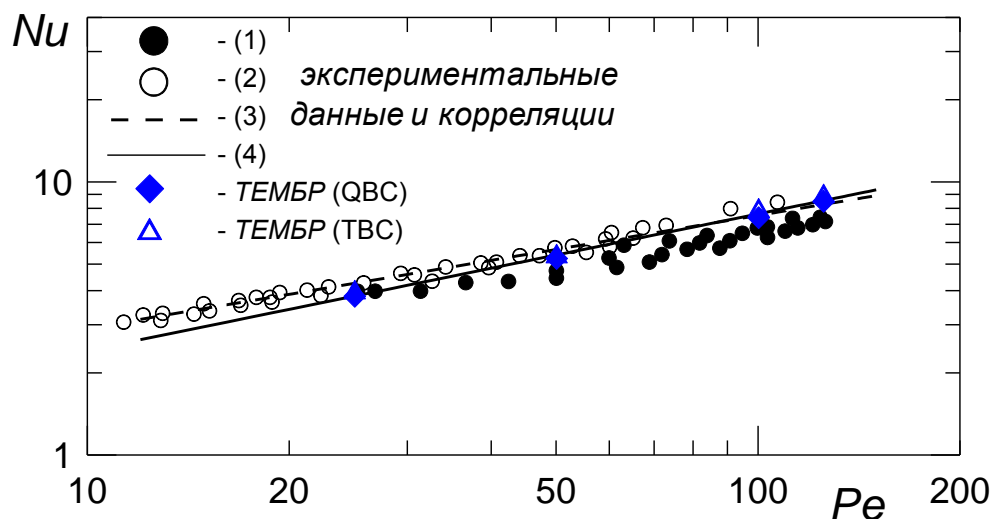


Временная эволюция
нормированной
температуры в точке
мониторинга в следе
за цилиндром

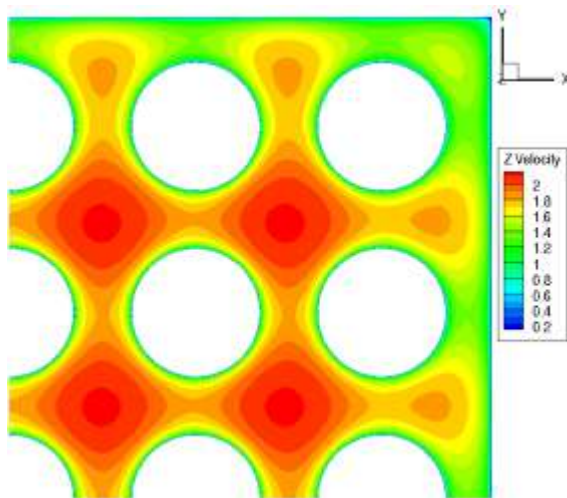
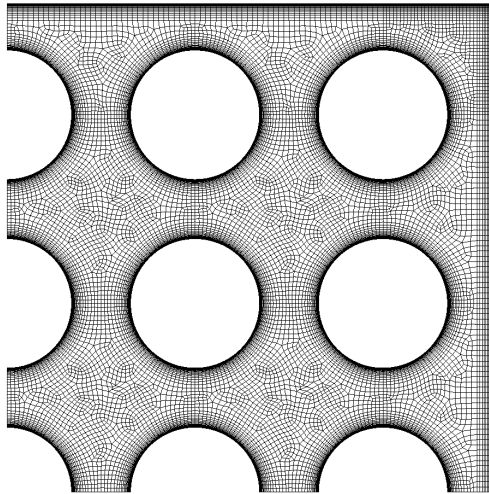


(1) – эксперименты
Ishiguro et al
(1979),

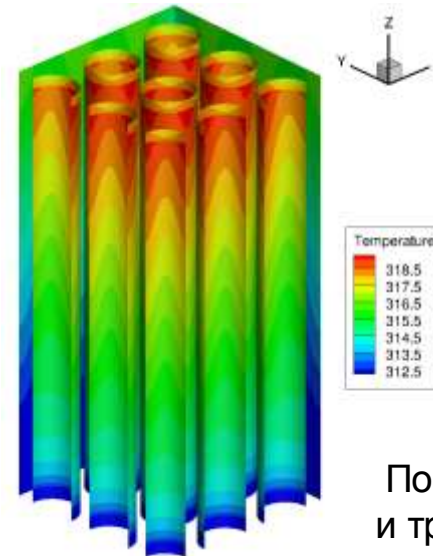
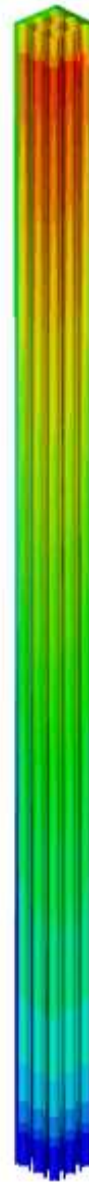
(2) – расчеты
Sugiyama et al
(1978)



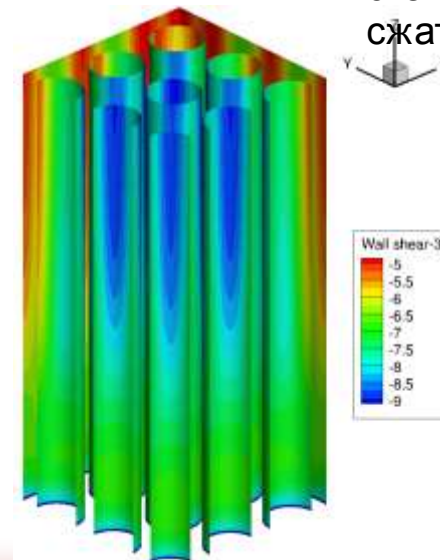
Развивающееся течение натрия и теплообмен в продольно обтекаемых пучках труб с квадратной упаковкой



Развившееся поле
продольной скорости

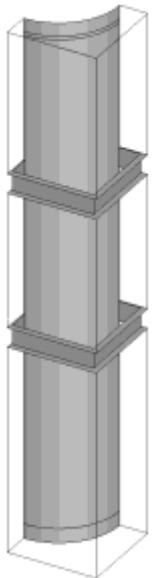
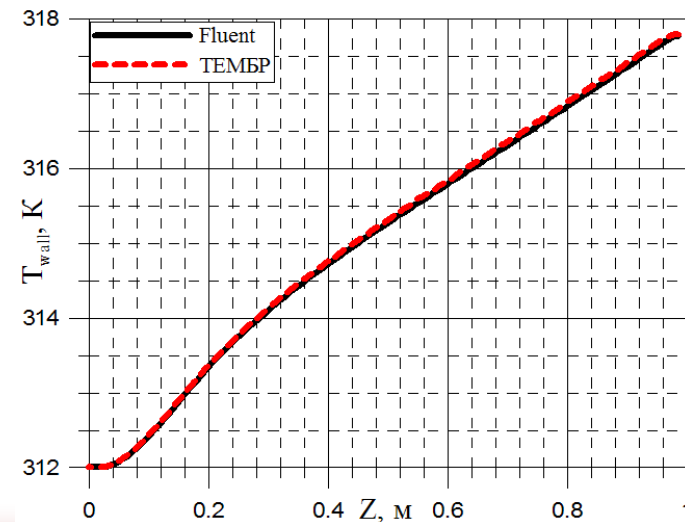
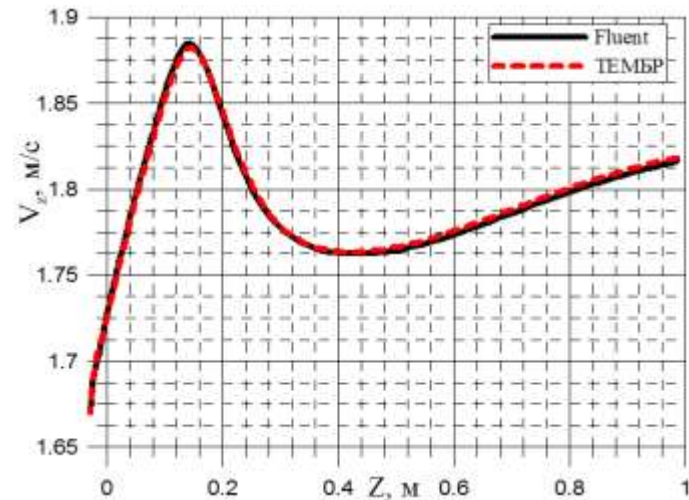
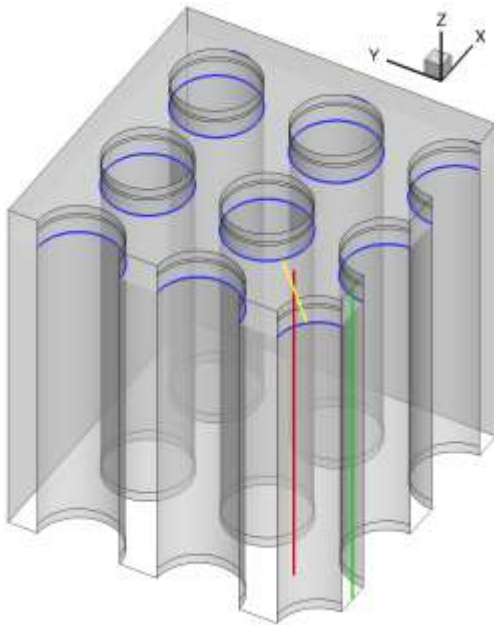
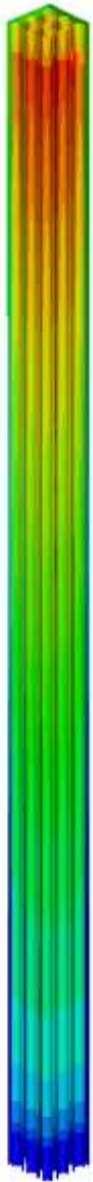


Поля температуры
и трения на
стенках (сильно
сжато по Z)



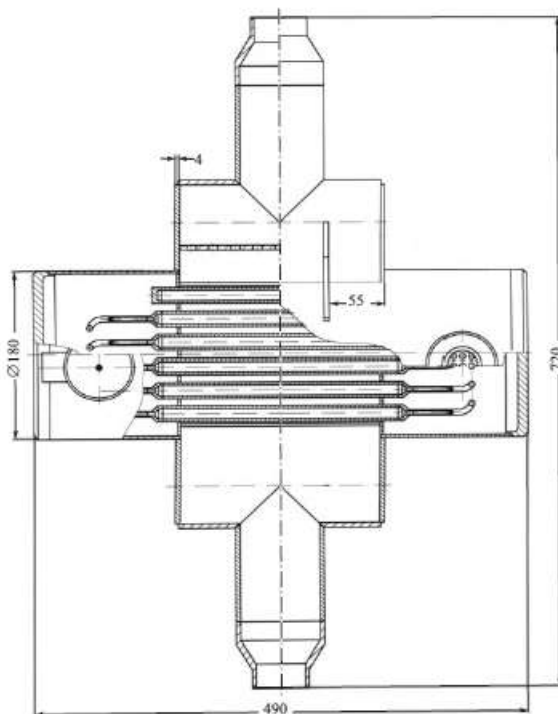
Развивающееся течение и теплообмен в продольно обтекаемых пучках труб с квадратной упаковкой

Изменение скорости и температуры вдоль межтрубной (зеленой) линии: сопоставление расчетов по двум кодам



Теплообмен сплава Рb-Ві в поперечно обтекаемом пучке труб

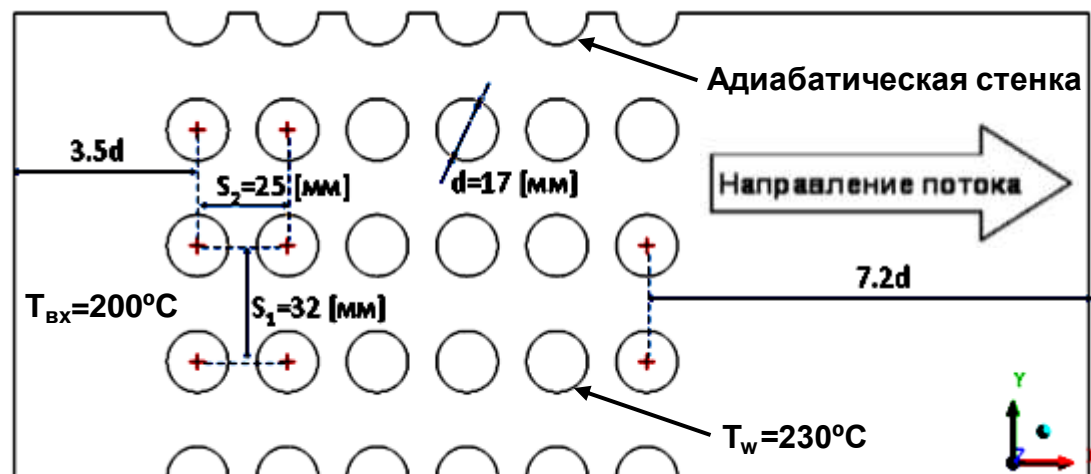
Эксперимент ФЭИ (Калякин, Грабежная, РНКТ-2006)



$$s_1/d = 1.88$$

$$s_2/d = 1.47$$

$$Pr = 0.032$$



Варианты расчетов

Re	Pe	V_{BX} , см/с	Расчёт
5900	190	3,60	URANS, WMLES
9300	300	5,69	URANS
12500	400	7,64	URANS, WMLES
15600	500	9,54	URANS
18900	610	11,57	URANS, WMLES

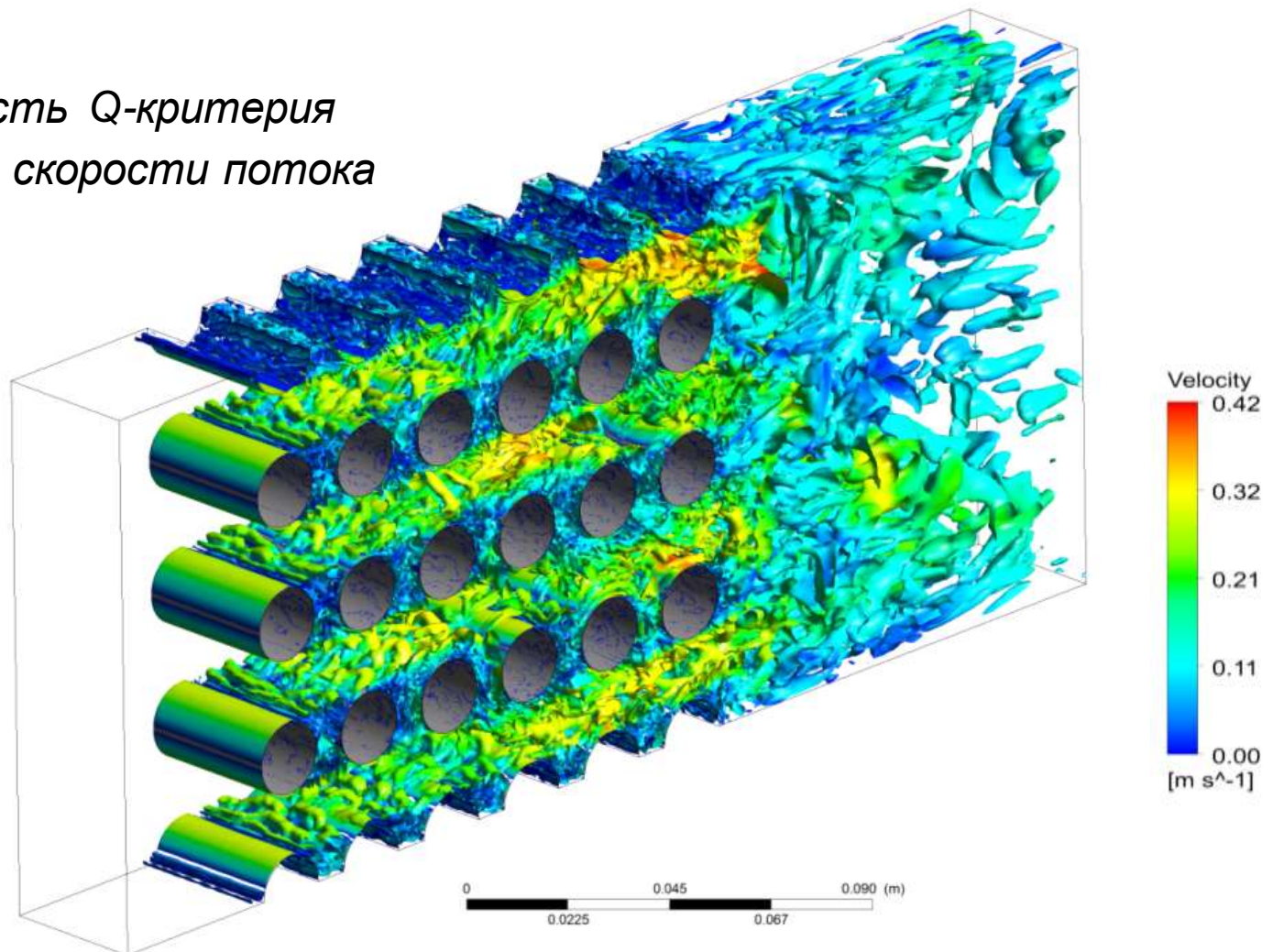
Течение сплава Рb-Vi в пучке труб

*Изоповерхность Q-критерия
окрашенная по скорости потока*

$Re = 18900$
($Pe = 610$)

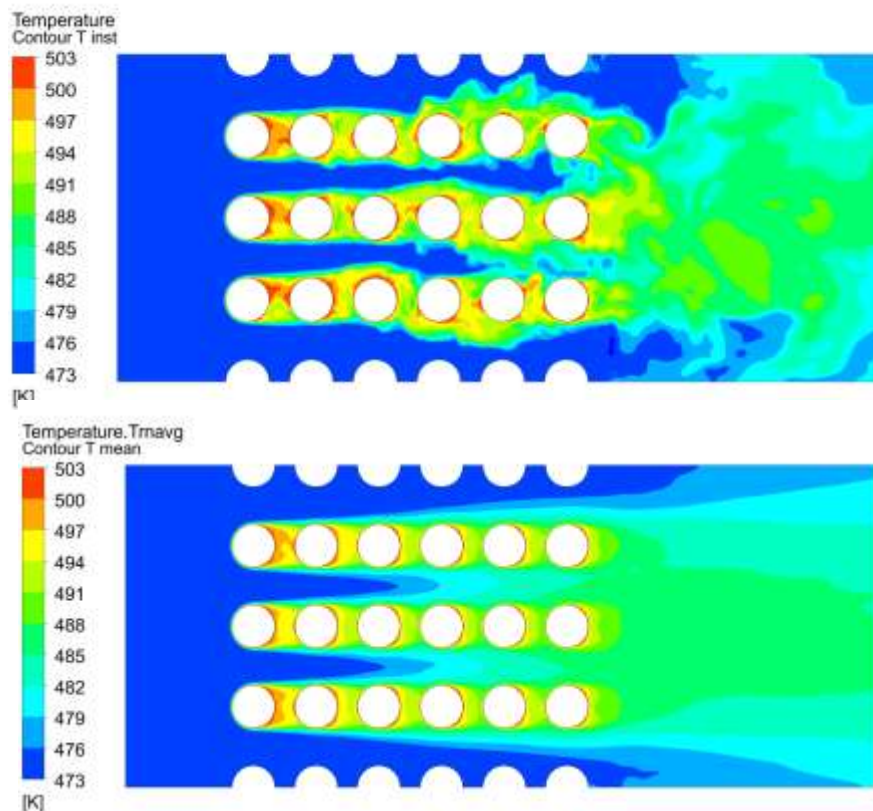
Сетка 8×10^6
($y^+ < 1$)

Расчет WMLES



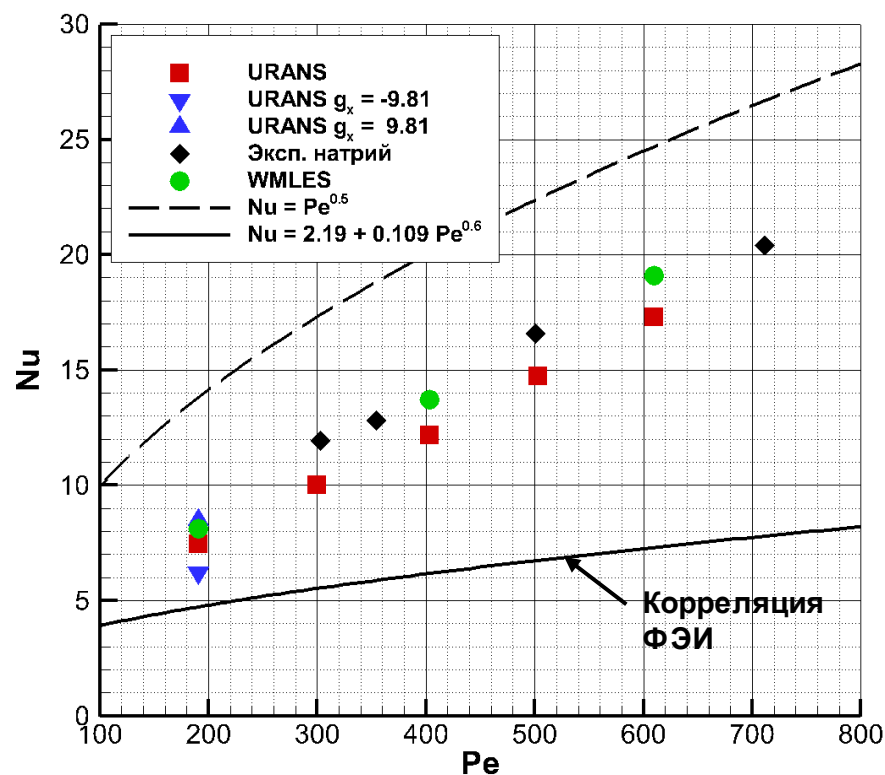
Теплообмен сплава Рb-Vi в пучке труб

Мгновенное и осредненное во времени поле температур



*Расчет WMLES
Re=18900 (Pe=610)*

Расчетные и экспериментальные данные по числу Нуссельта



Спасибо за внимание!