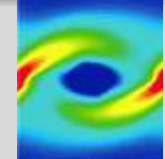


Современное состояние и направления развития пакета программ SigmaFlow

Гаврилов А.А., Дектерев А.А., Минаков А.В.

ИТ СО РАН, КРАСНОЯРСК

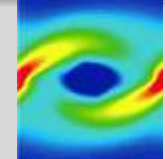


Группа объединяет специалистов:

- Красноярского филиала Института Теплофизики СО РАН
- Кафедры теплофизики ИИФиРЭ Сибирского федерального университета

Основные направления деятельности группы:

- исследование и анализ течений жидкостей и газов, тепломассообмена и химического реагирования в промышленности, в строительстве и окружающей среде;
- оптимизация технологических устройств и процессов на основе расчетного моделирования;
- разработка инженерного и учебного программного обеспечения;
- сопровождение и техническая поддержка программных продуктов;
- подготовка специалистов в области моделирования.



МАТОК – 1989г.

2D/3D неравномерные шахматные сетки с блокировкой подобластей
постоянная эффективная турбулентная вязкость
зональный метод теплообмен
метод решения –SMAC

Дектерев А.А., Ковалевский А.М. Программный комплекс МАТОК по расчету аэродинамики топочных камер энергетических котлов. Сибирский физико-технический журнал. № 6, 1992

AeroChem – 1993г.

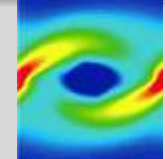
2D/3D криволинейные структурированные частично совмещенные одноблочные сетки с
блокировкой подобластей
турбулентность - стандартная k- ξ модель, Chen-Kim k- ξ
излучение - P1
реагирование – глобальные реакции + EBU модель
многофазность - лагранжев (частички угля – движение + эмпирическая модель горения)

Каменищikov Л.П., Быков В.И., Дектерев А.А., Ковалевский А.М. Численное моделирование реагирующих турбулентных течений в трехмерных областях сложной конфигурации. Химическая промышленность, N1, 1995

SigmaFlow – 2001

3D, криволинейные структурированные многоблочные сетки, совмещенные сетки, MSST
модель турбулентность, ...

Дектерев А.А., Гаврилов А.А., Харламов, Е.Б., Литвинцев К.Ю. Использование программы SigmaFlow для численного исследования технологических объектов. Вычислительные технологии, т.8, ч.1, 2003



SigmaFlow – не коммерческий универсальный CFD программный комплекс (широкий набор физических моделей, пре-постпроцессинг)

SigmaFlame – специализированная программа для моделирования топочных камер энергетических котлов (исследовательские и проектные организации, ВУЗы)

SigmaFire – специализированная программа для моделирования пожаров в зданиях и сооружениях (принята в МЧС в составе комплекса «Енисей» для оценки рисков, используется рядом организаций)

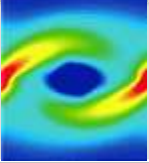
TubeFlow – специализированная программа для расчета установившихся течений бурового раствора в кольцевых зазорах (разработка для Бэйкер Хьюз)

модуль для расчета аэродинамики и движения капель при струйной печати (НР)

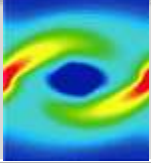
программа для расчета устройств по дожиганию электролизных газов (РусАл)

программа для расчета роторных печей для плавки алюминия (Мособлпромонтаж)

программа для расчета гидродинамики в проточном тракте ГЭС (Силовые машины)



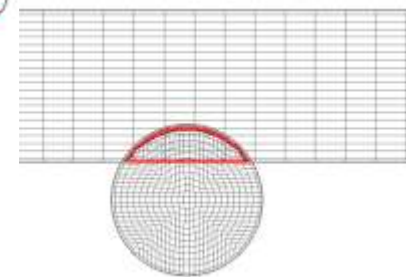
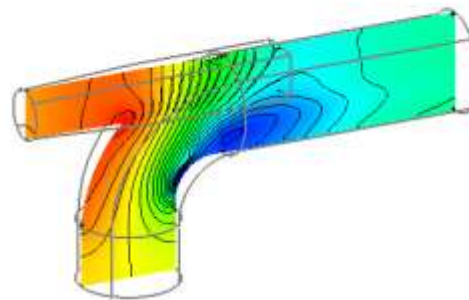
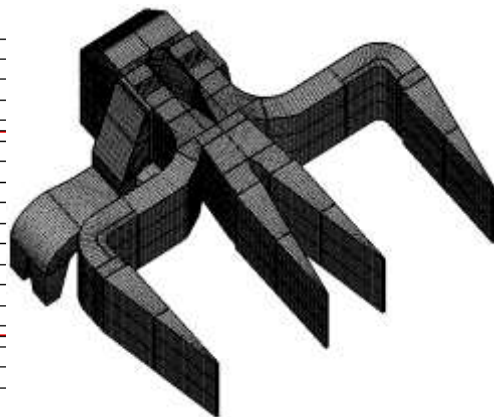
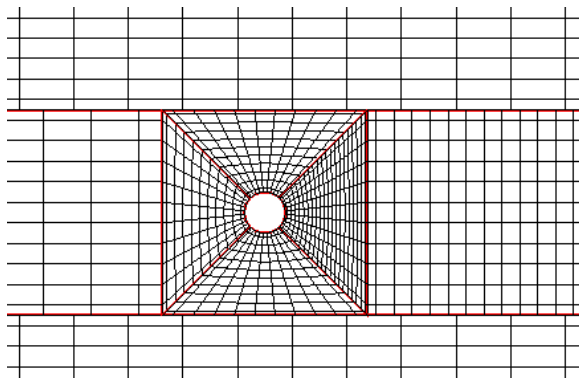
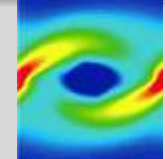
- **Метод контрольного объема** для неструктурированной сетки;
- **Метод наименьших квадратов** для реконструкции градиента;
- **SIMPLE**-подобный метод для связи полей давления и скорости;
- Совмещенные сетки с монотонизацией **Рхи-Чоу**;
- Аппроксимация конвективных потоков – противопоточные схемы второго порядка аппроксимации **QUICK**, семейство **TVD схем (UMIST, CUBISTA)**;
- Аппроксимация нестационарных членов – неявные схемы второго порядка точности;
- **СЛАУ**: для диффузионно-конвективных уравнений – **метод неполной факторизации (D-ILU)**; для эллиптического уравнения на давление – **BiCGStab, AMG**
- **C++**
- **MSDEV**
- **Windows, Linux**



- стационарные и нестационарные течения;
- турбулентность;
- неньютоновские жидкости;
- процессы смешения и диффузии неоднородных газовых смесей;
- химические реакции в потоке , горение газообразного, жидкого и твердого топлива;
- конвективный, радиационный теплообмен, теплопроводность;
- движение дисперсной фазы (твердые частицы, капли) в потоке газа;
- процессы с фазовыми переходами (кавитация, кристаллизация);
- течения со свободной поверхностью;
- течения газа и жидкости с подвижными твердыми телами

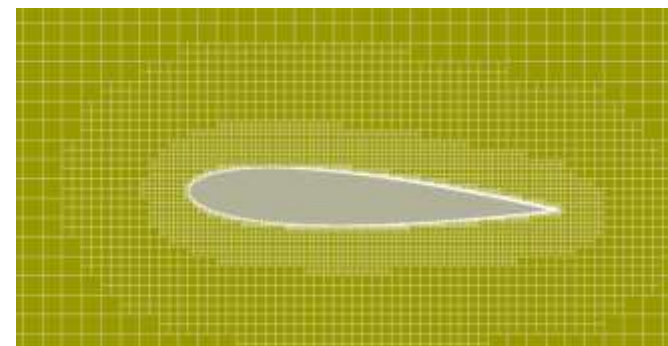
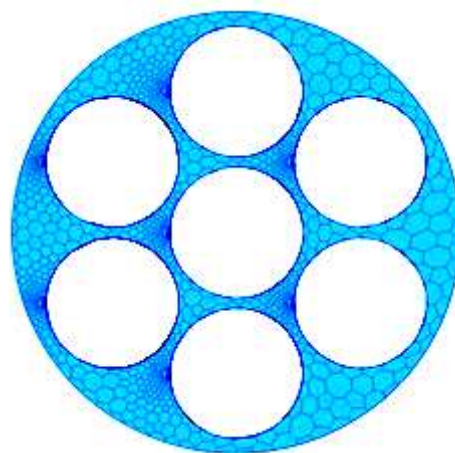


Расчетные сетки

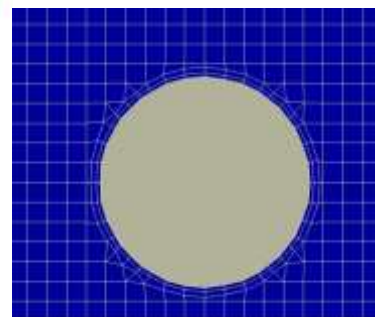


согласованные и несогласованные многоблочные сетки

перекрывающиеся сетки

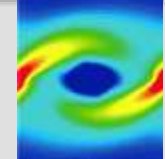


полиэдральные сетки

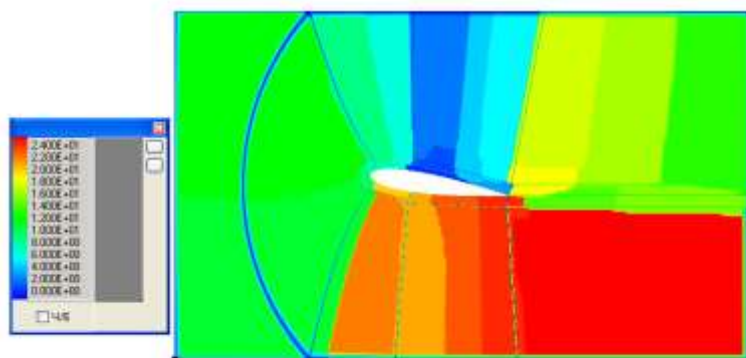




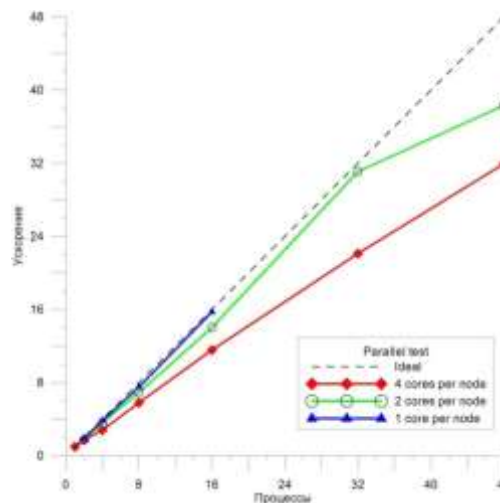
Параллельная реализация



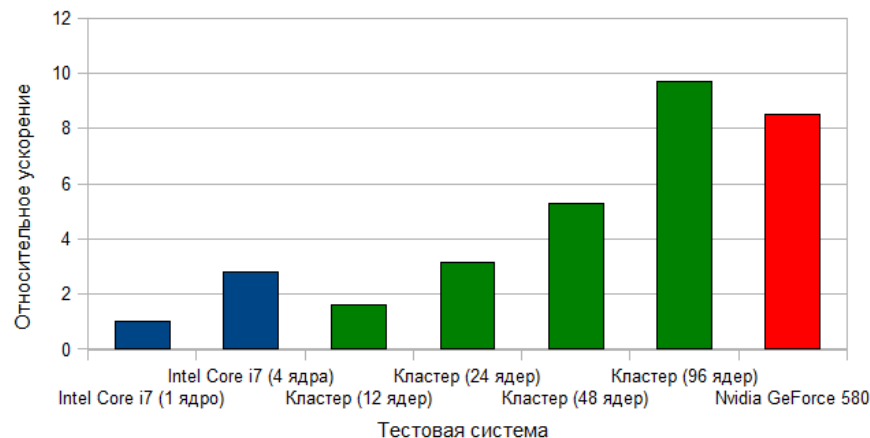
- Способ распараллеливания – декомпозиция расчетной области
- Передача данных между процессами посредством интерфейса MPI
- Разбиение сетки осуществляется с применением программы MeTiS



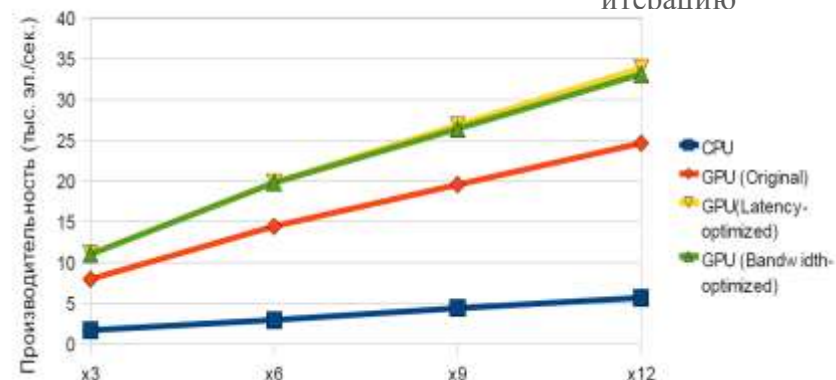
Пример декомпозиции расчетной сетки с помощью MeTiS



Время счета, с на итерацию



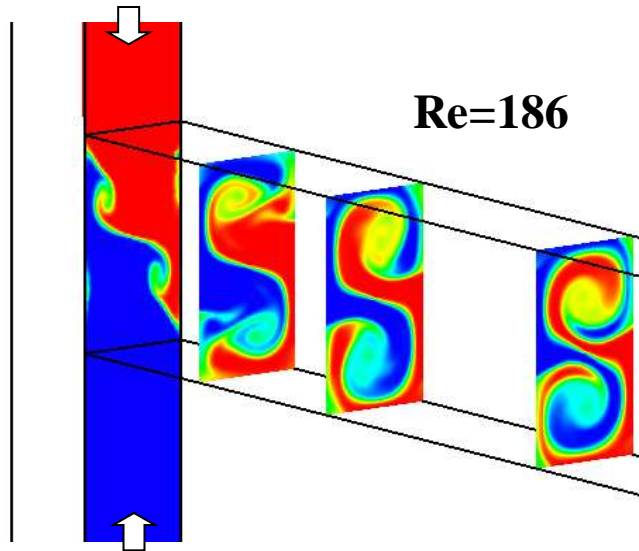
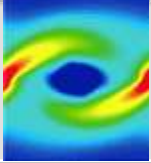
Ускорение относительно одного ядра процессора Intel Core i7 (4.4 ГГц) на сетке из 4 млн. узлов.



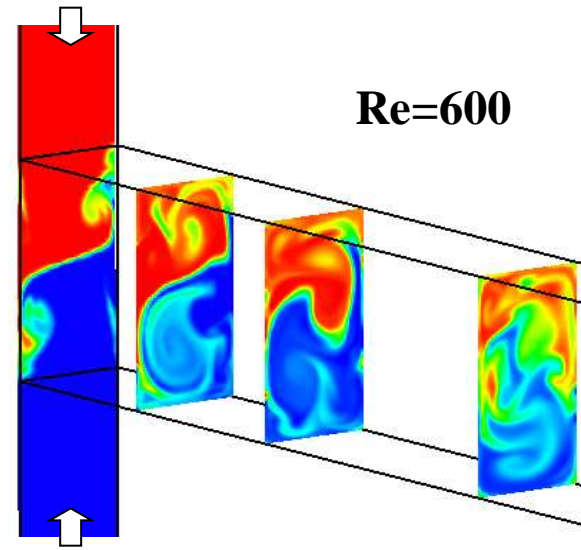
Расчет течения в каверне на кластере, каждый узел которого оснащён тремя GPU NVidia Tesla C2050 и двумя шестиядерными процессорами класса Intel Xeon



Mixing of fluid in T-shaped microchannel



$Re=186$



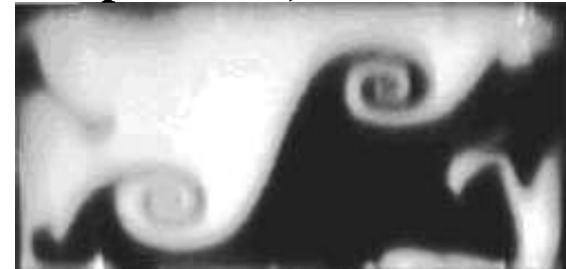
$Re=600$

$Re=186$

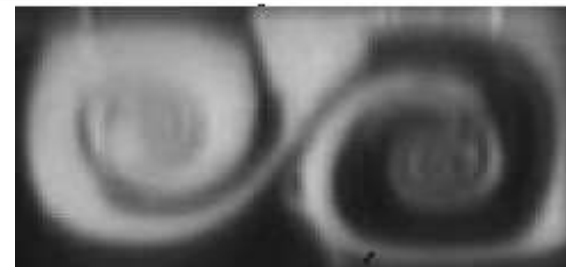
Simulation

Experiment, M. Hoffman et. al. 2005.

Cross section
 $x = 200$ micron

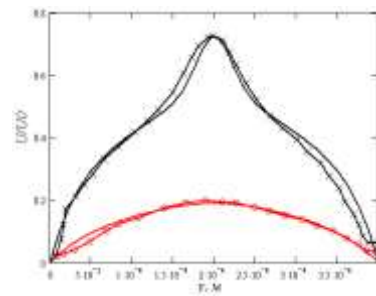
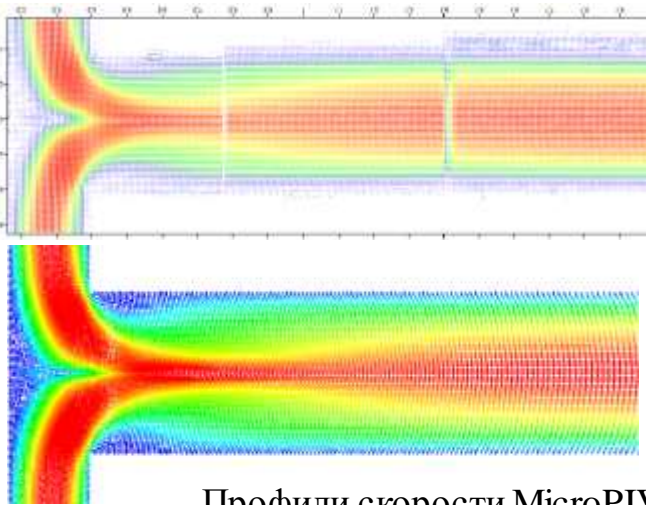
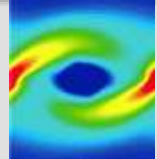


Cross section x
 $= 1000$ micron

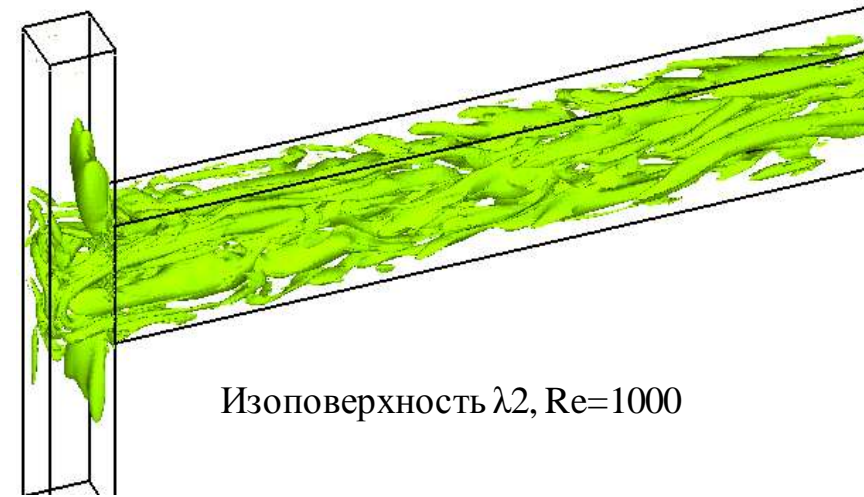




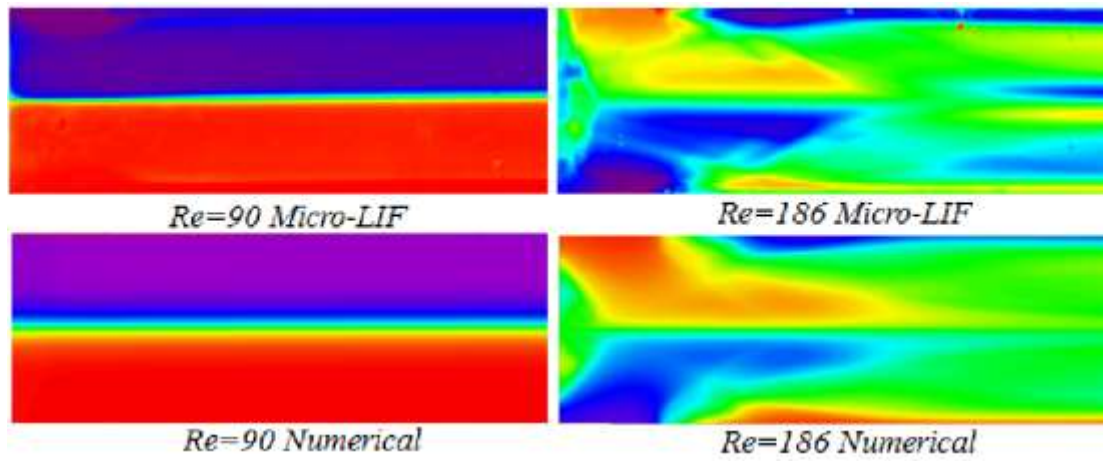
Течение и смешение в Т-образном микромиксере



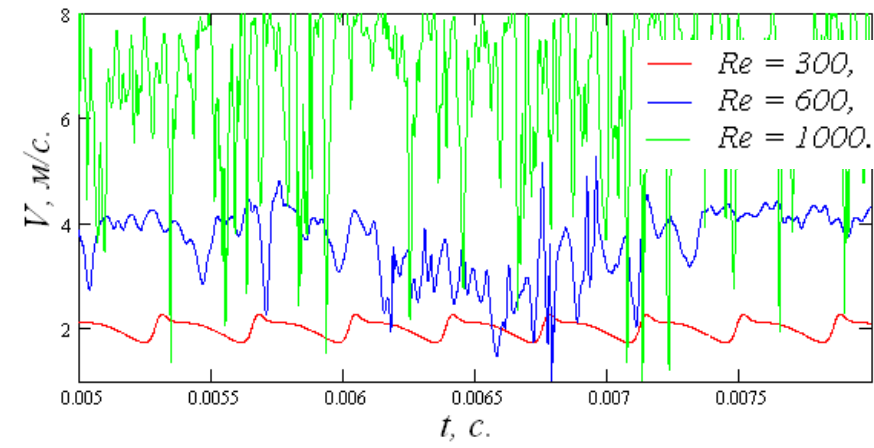
Профили скорости MicroPIV (ИТ СО РАН) и расчет.



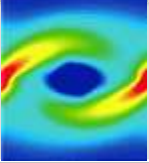
Изоповерхность λ_2 , $Re=1000$



Поля концентраций в центральном сечении микромиксера. MicroLIF (ИТ СО РАН) и расчет



Зависимость от времени скорости потока в точке мониторинга, расположенной на выходе из канала.



RANS модели

1. Стандартная k-ε модель
2. k-ε Kim-Chen модель
3. k-ε Abe-Kondoh-Nagano
4. Spalart-Allmaras модель (SA)
5. Menter модель (M-SST)
6. k-ε-ζ-f модель

RSM

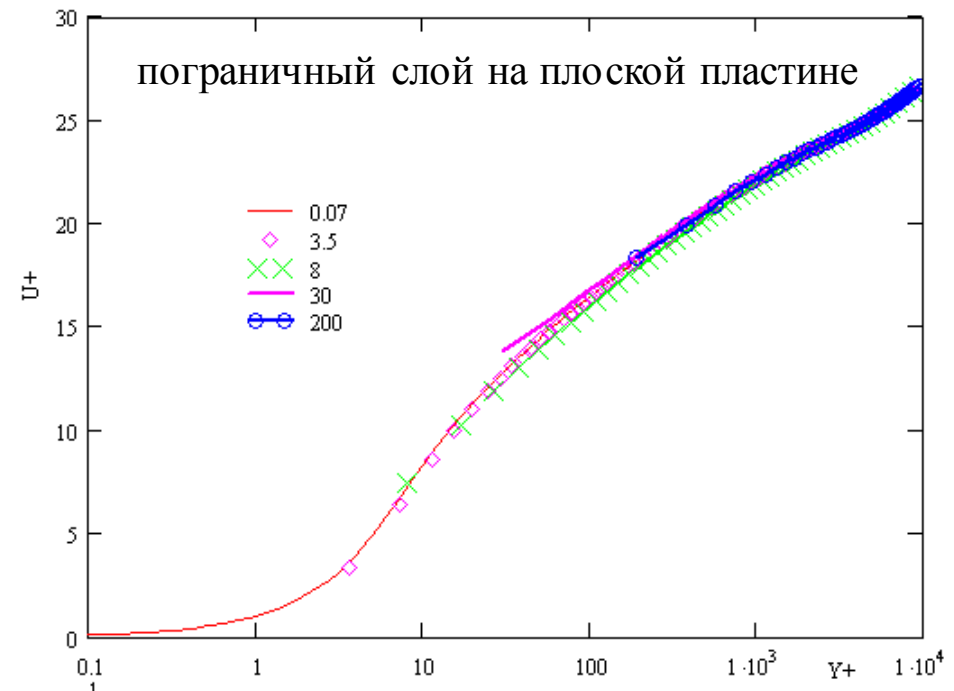
1. RSM LRR-QI
2. RSM SSG
3. RSM EBM (Elliptic blending second-moment closure)

RANS/LES модели

1. DES SA
2. DDES M-SST
3. RANS ζ-f/SGS LES
4. RANS ζ-f/Dynamic LES

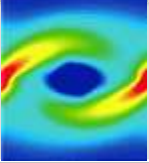
Прямое интегрирование до стенки (WIN)
Плавное сопряжение вязкого подслоя и
логарифмического турбулентного слоя (WF)

- Стандартные пристеночные функции
- SAWF (simplified analytical wall function)

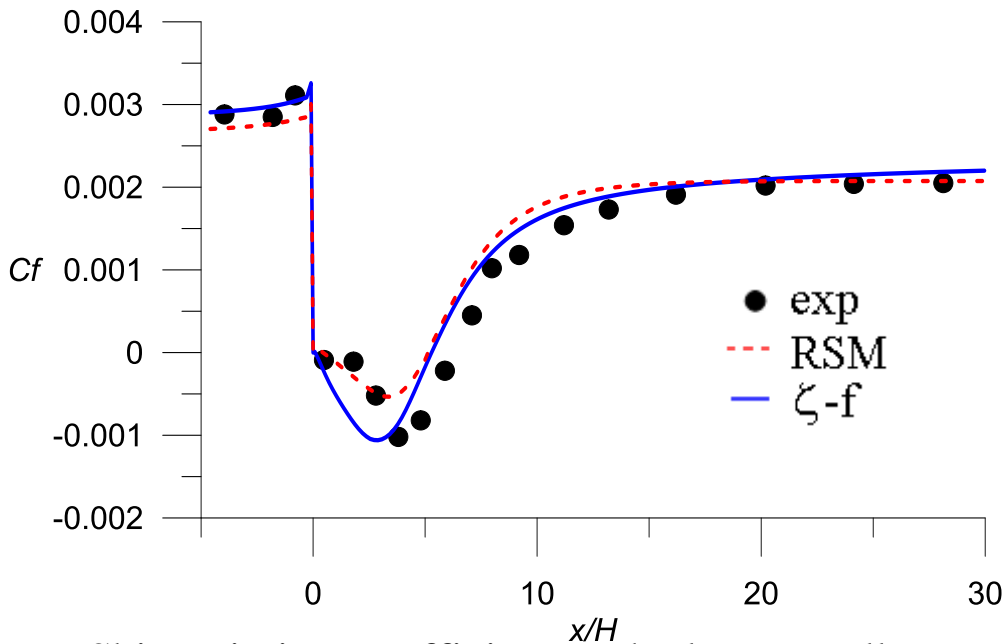
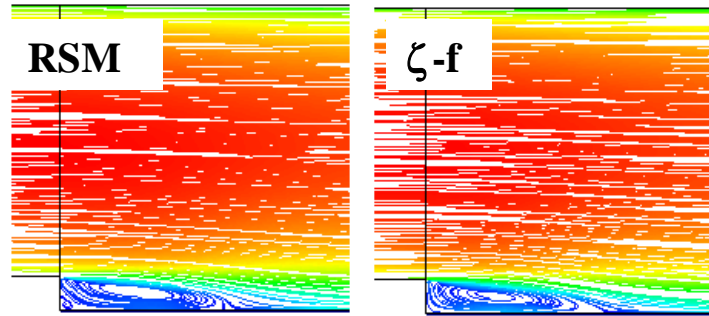




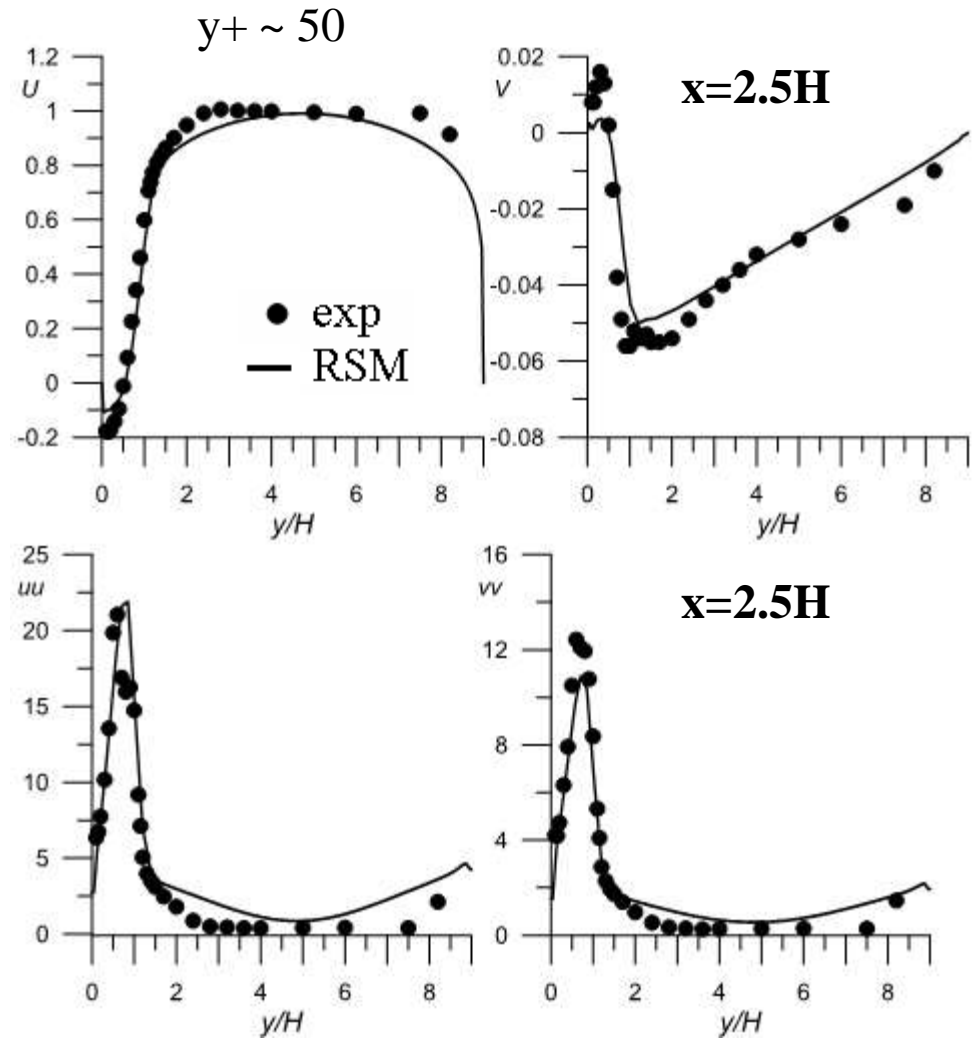
Backward Facing Step



2D Backward Facing Step, $Re_h=36000$



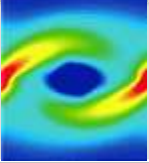
Skin Friction coefficient at the lower wall



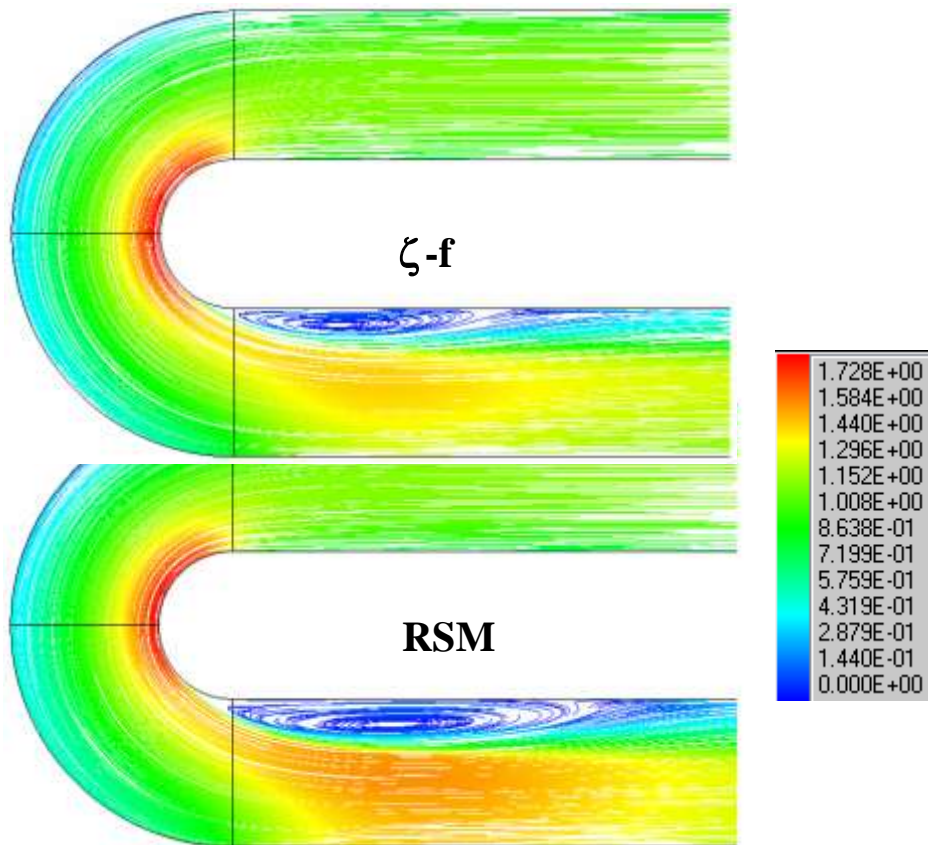
Driver, D. M. and Seegmiller, H. L., "Features of Reattaching Turbulent Shear Layer in Divergent Channel Flow," AIAA Journal, Vol. 23, No. 2, Feb 1985, pp. 163-171.



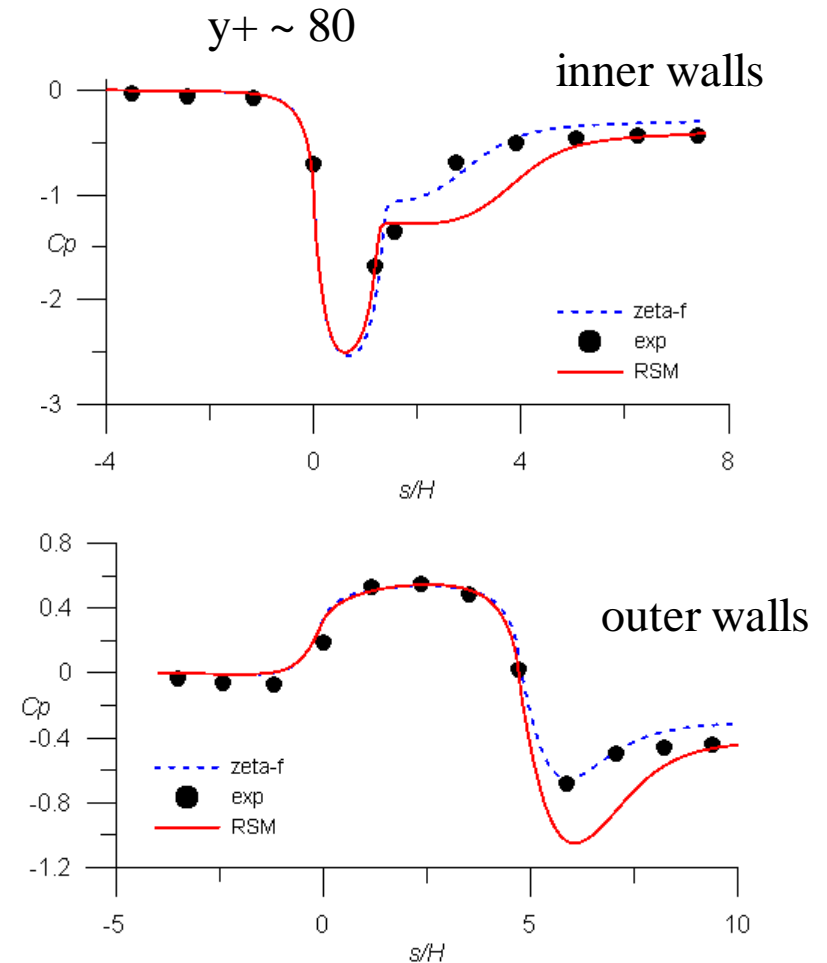
U-bend



180° turn-around duct (U-bend), $Re=10^6$



Streamlines colored by velocity magnitude

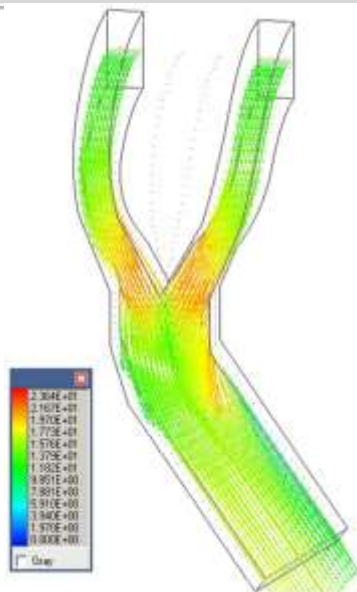
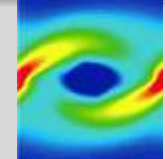


Pressure coefficient profiles along bend walls

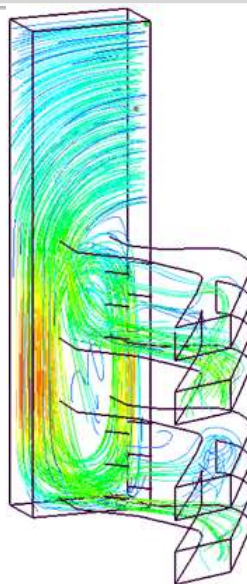
Monson, Daryl J., Seegmiller, H. Le, An Experimental Investigation of Subsonic Flow in a Two-Dimensional U-Duct, NASA Technical Memorandum, 1992



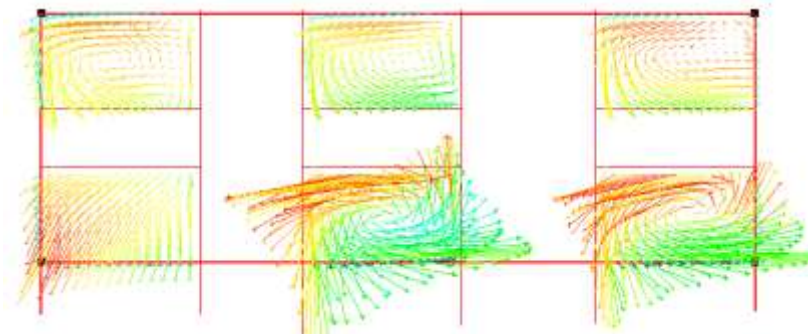
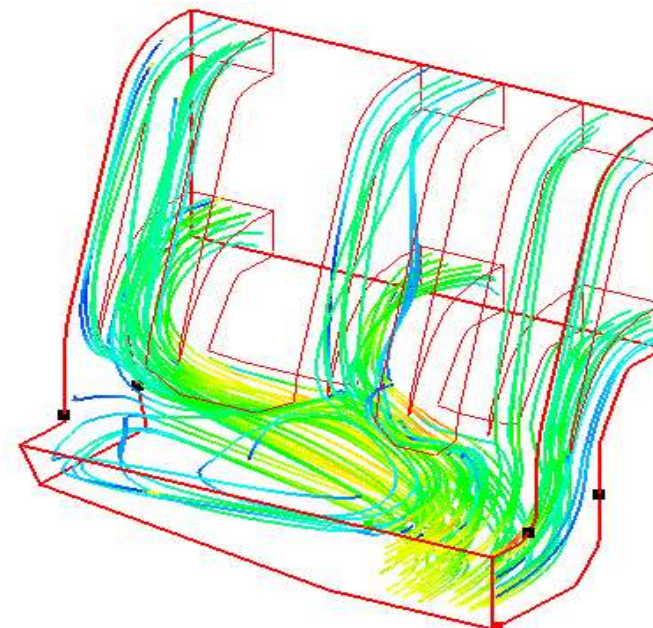
Движение жидкости в каналах



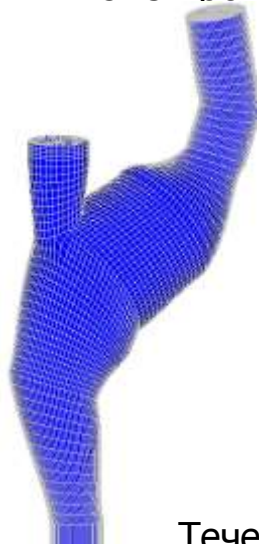
Собирающий газопровод
электролизера



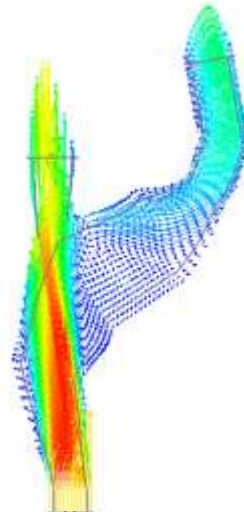
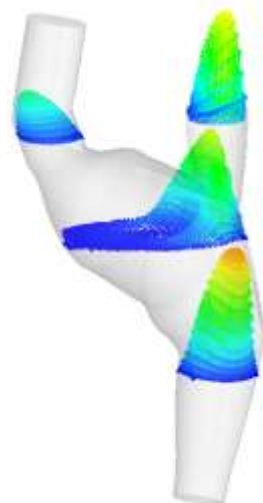
Раздача воздуха по
ярусам горелок в топке



Раздающий короб перед
электрофильтрами

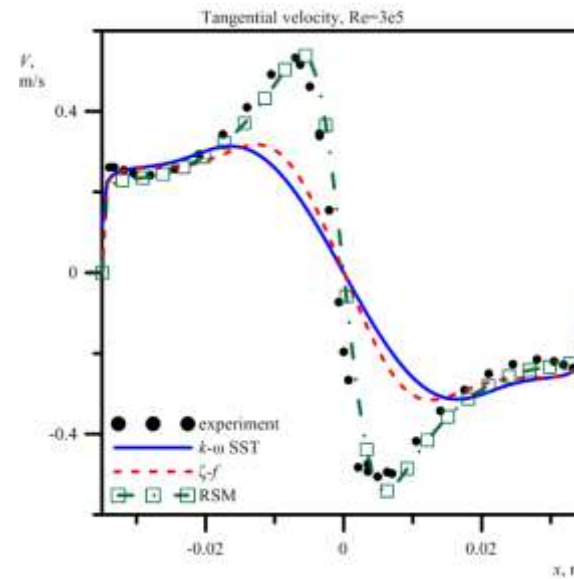
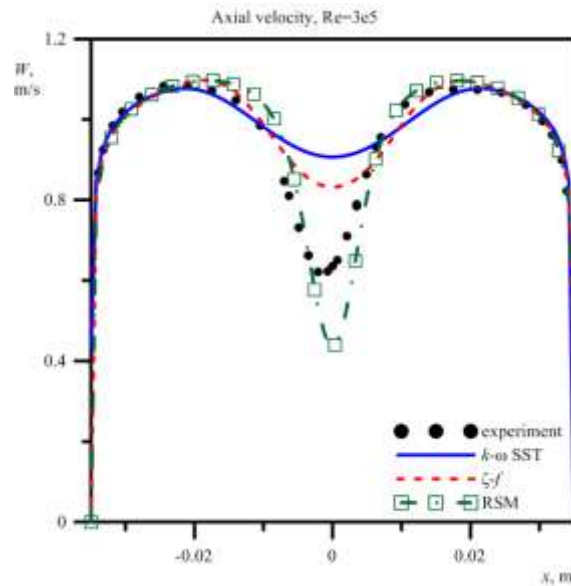
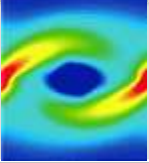


Течение в области бифуркации сонной
артерии

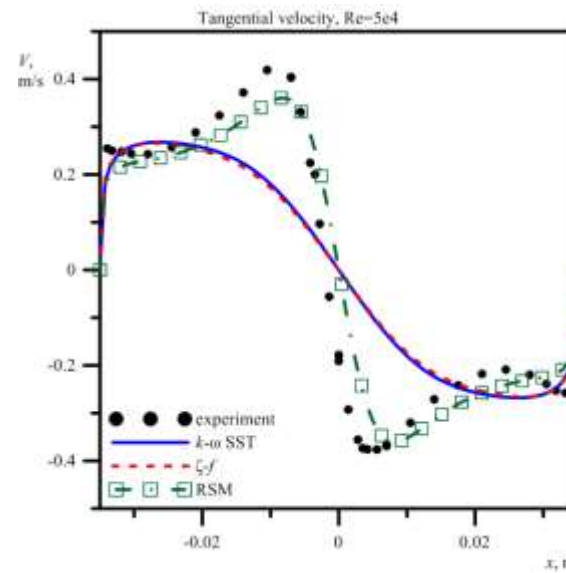
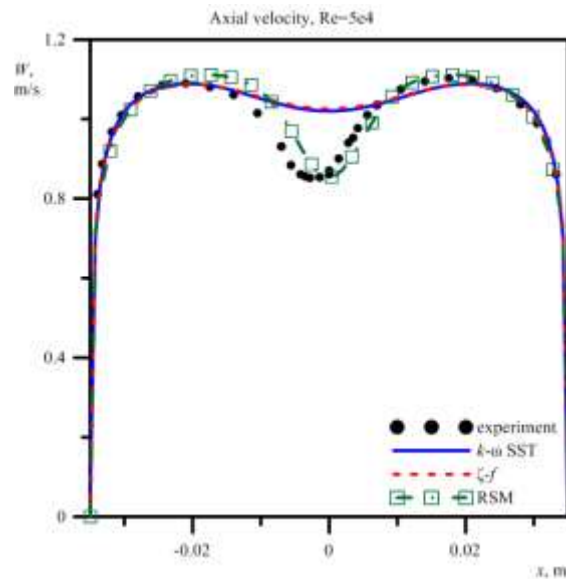




Swirling flow in long pipe



$S=0.1, Re = 3 \cdot 10^5$

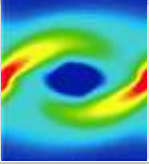


$S=0.1, Re = 5 \cdot 10^4$

Steenbergen, W. Turbulent pipe flow with swirl. Eindhoven University of Technology, PhD Thesis, 1995.

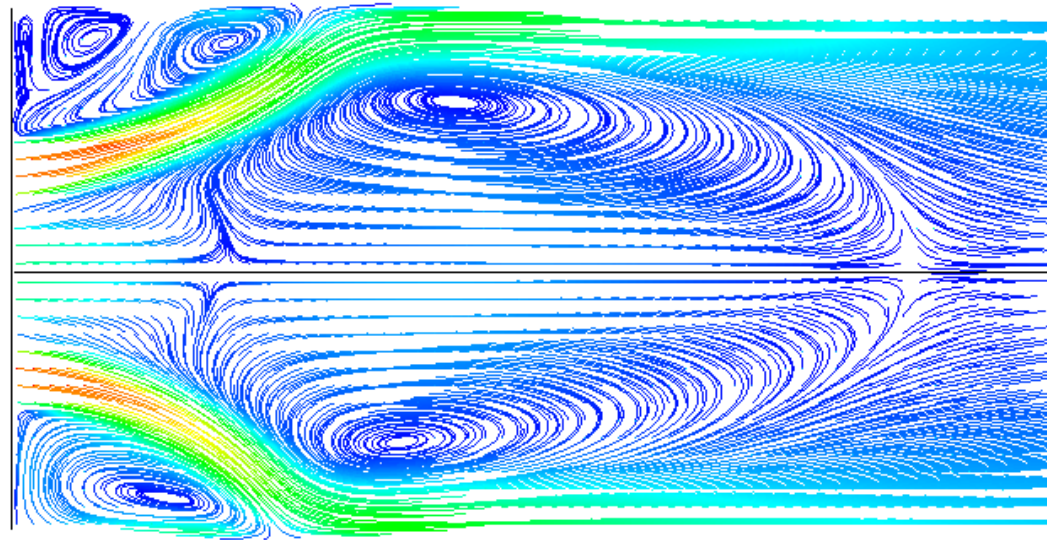


Swirling confined flow

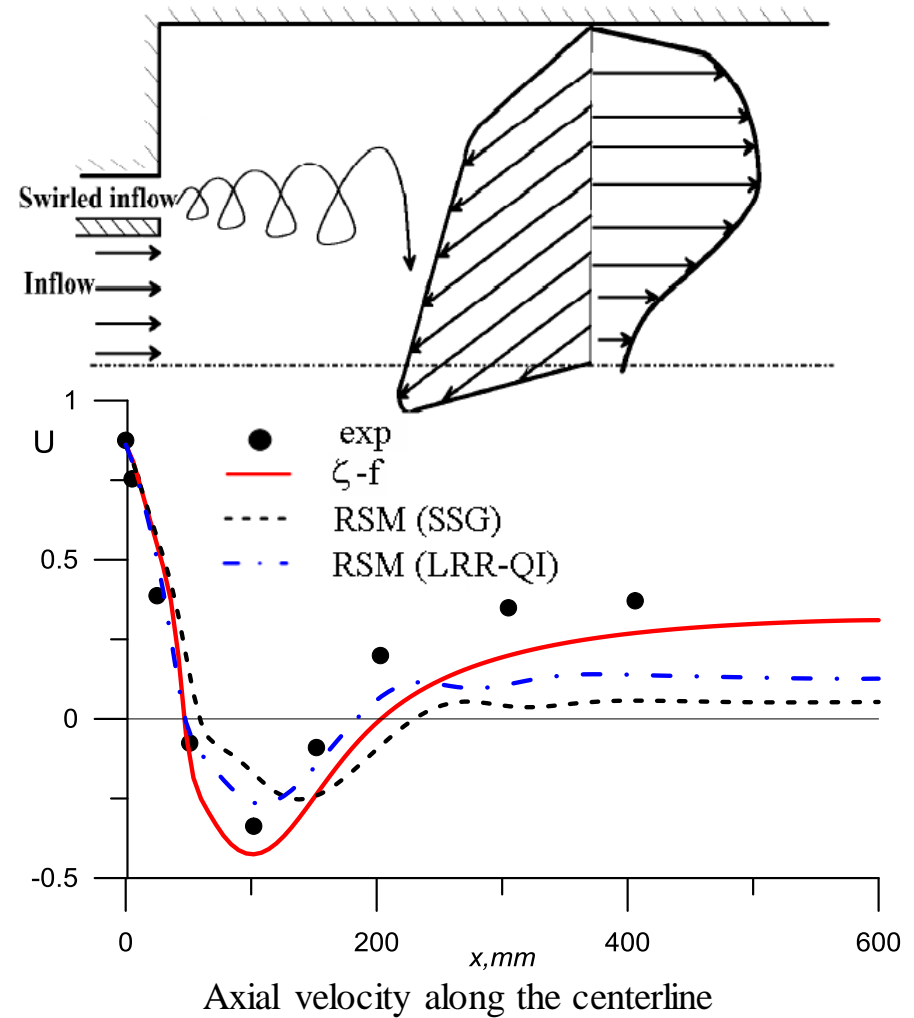


Swirling flow in the combustor chamber, swirl intensity $S=0.45$

RSM



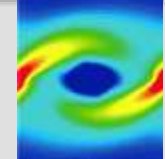
ζ -f



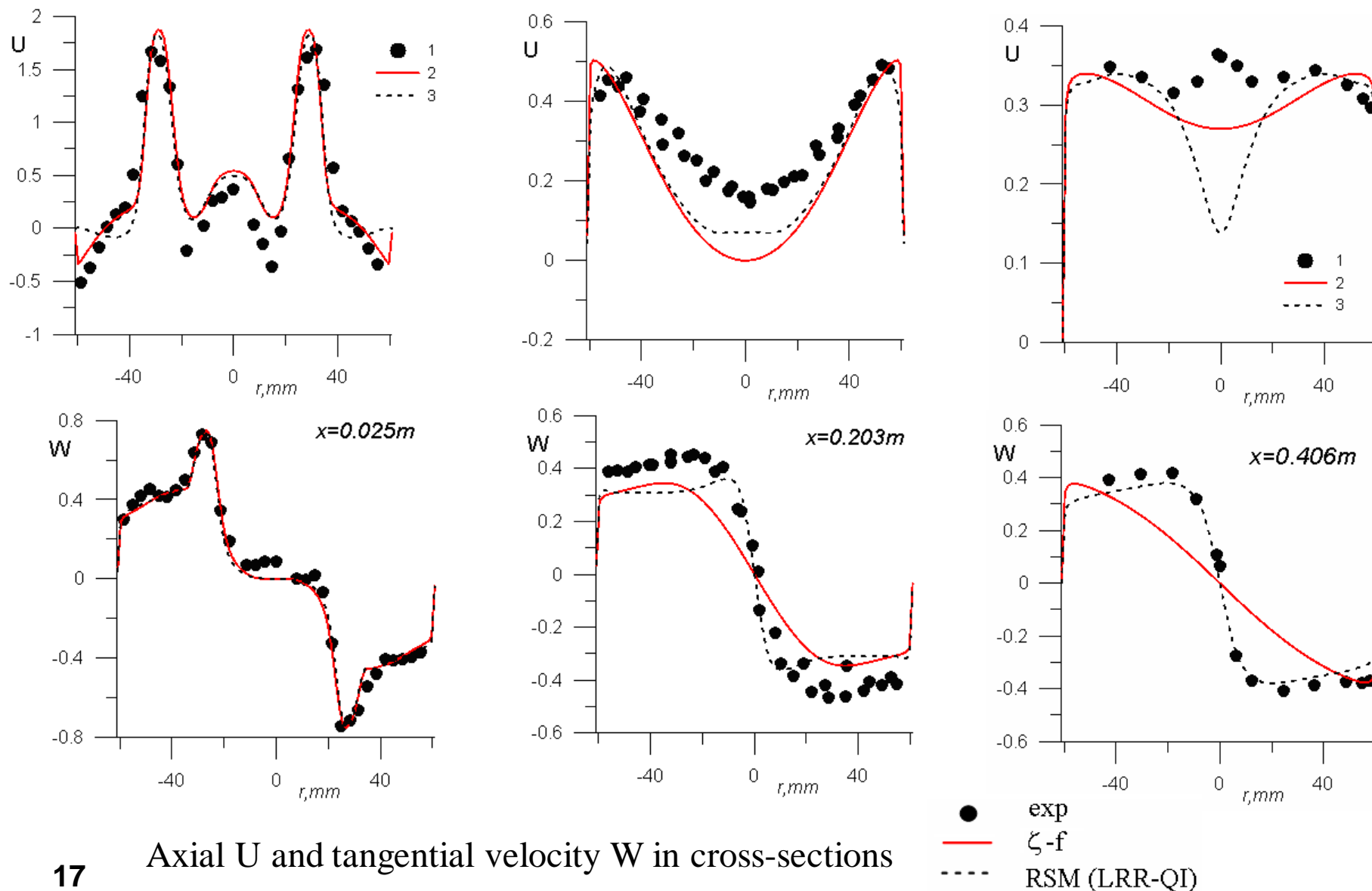
Roback, R. and Johnson, B. V. (1983) Mass and Momentum Turbulent Transport Experiments with Confined Swirling Coaxial Jets, NASA CR-168252.



Swirling confined flow

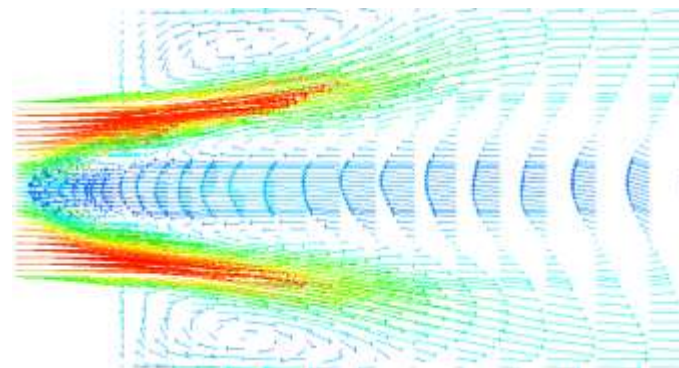
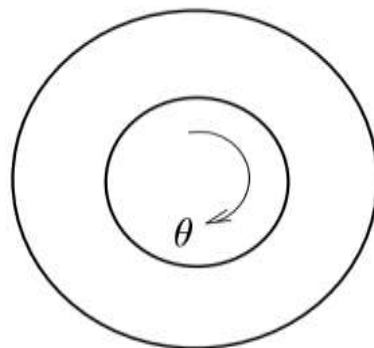
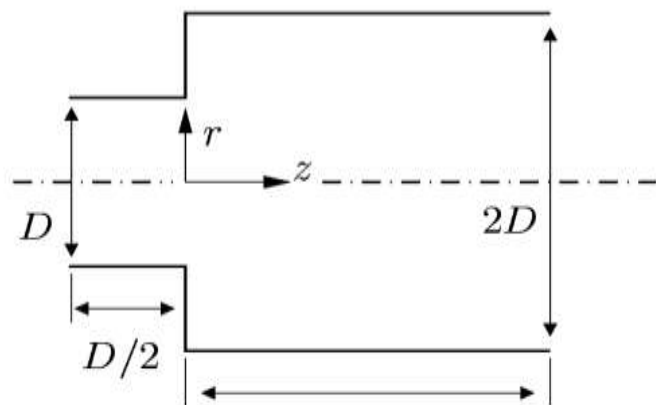
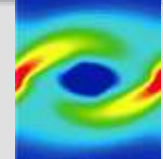


Swirling flow in the combustor chamber, swirl intensity $S=0.45$

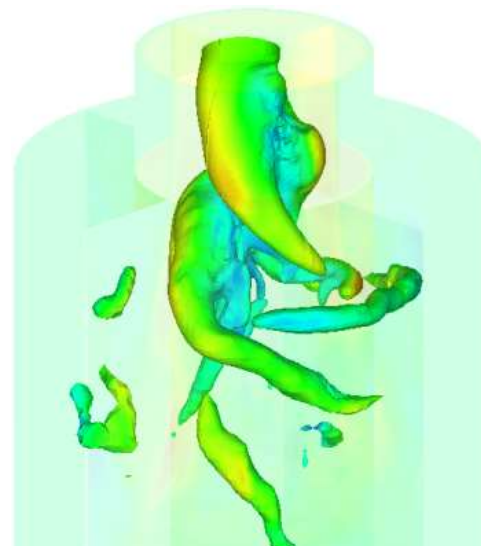
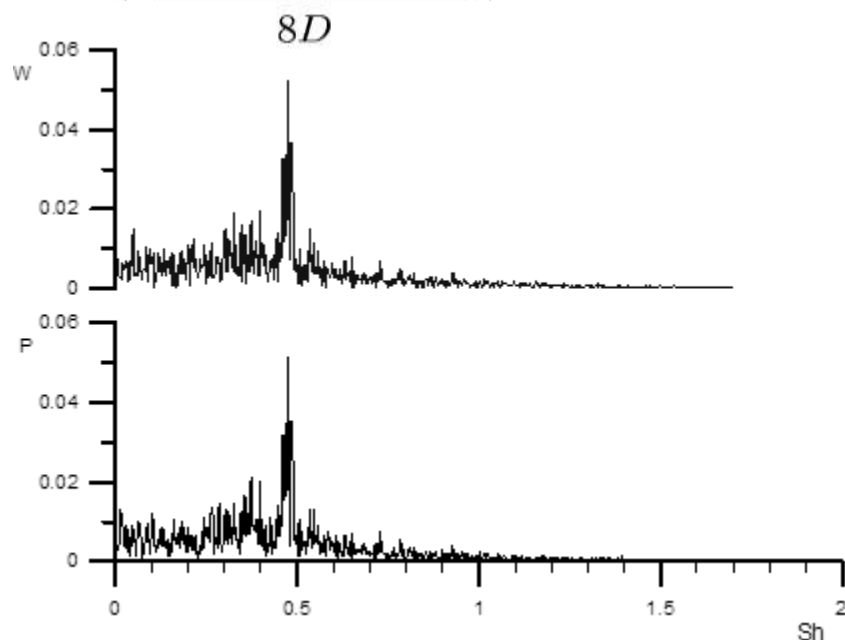




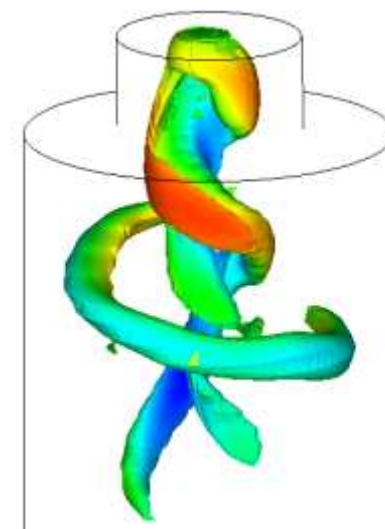
Закрученное течение после внезапного расширения



$Re = 30000$
 $S = 0.6$



LES, 2M cells



URANS RSM, 0.3M cells

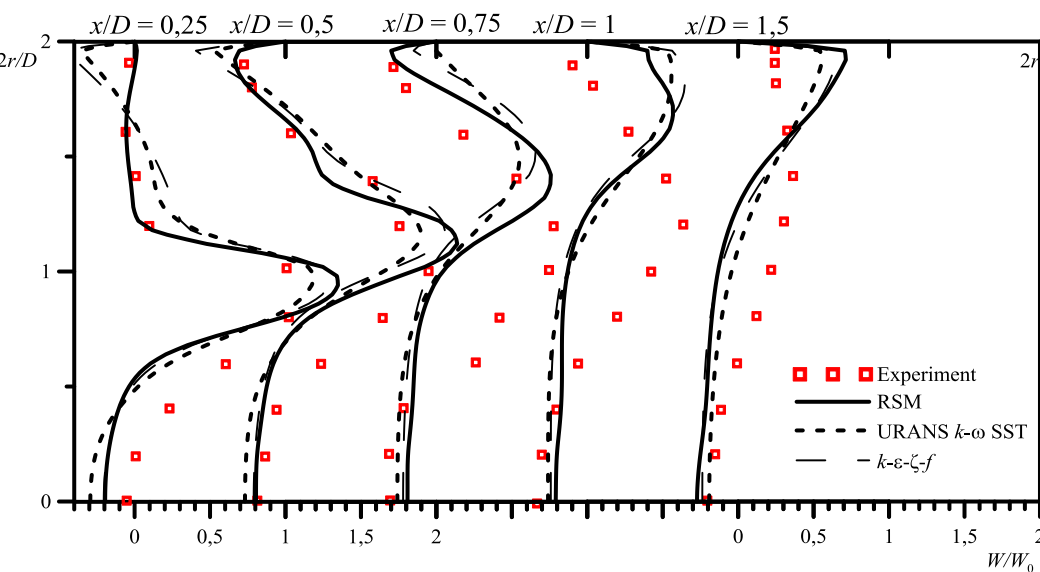
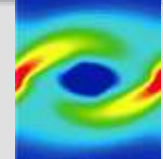
Режим с прецессией вихревого ядра

1. Dellenback P.A. Measurements in turbulent swirling flow through an abrupt expansion // AIAA J. 1988. Vol. 26, No. 6. P. 669–681.

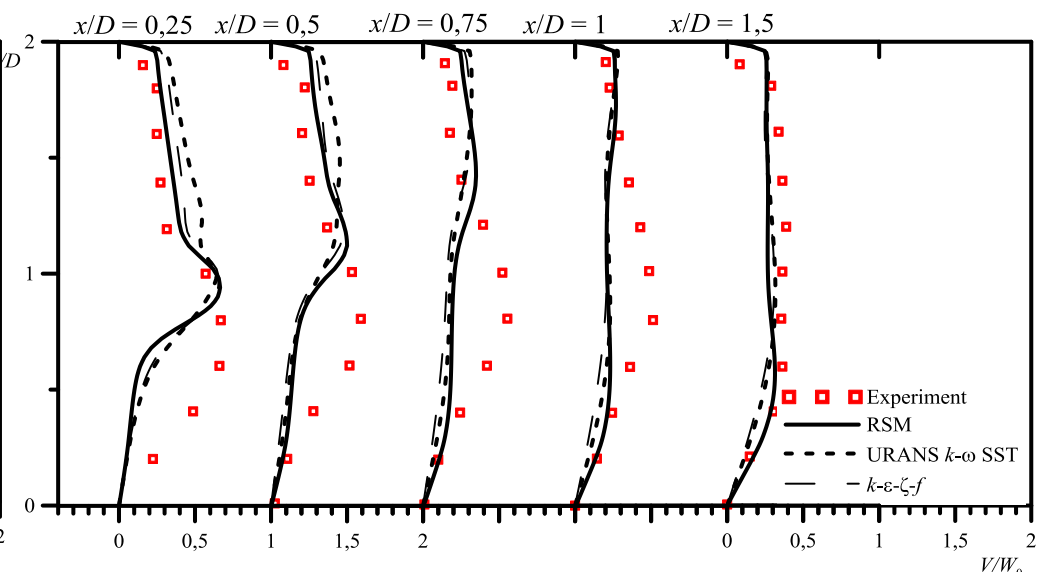
σFlow



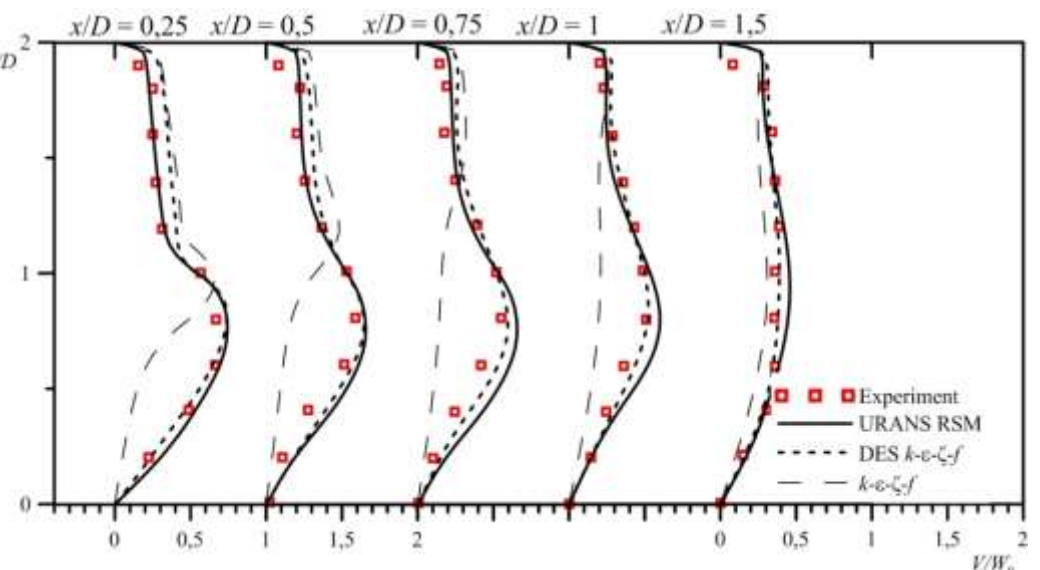
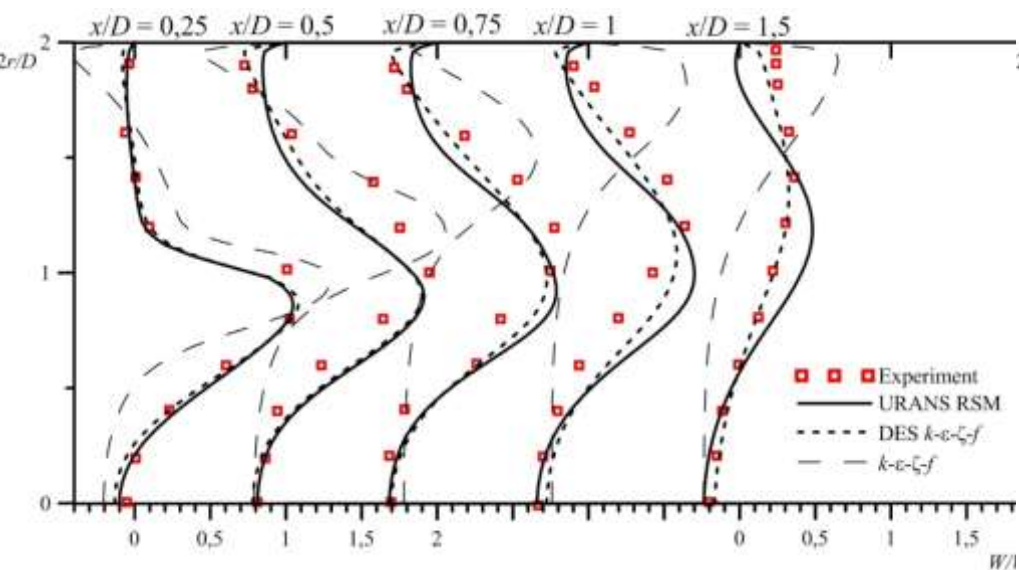
Закрученное течение после внезапного расширения



аксиальная компонента скорости

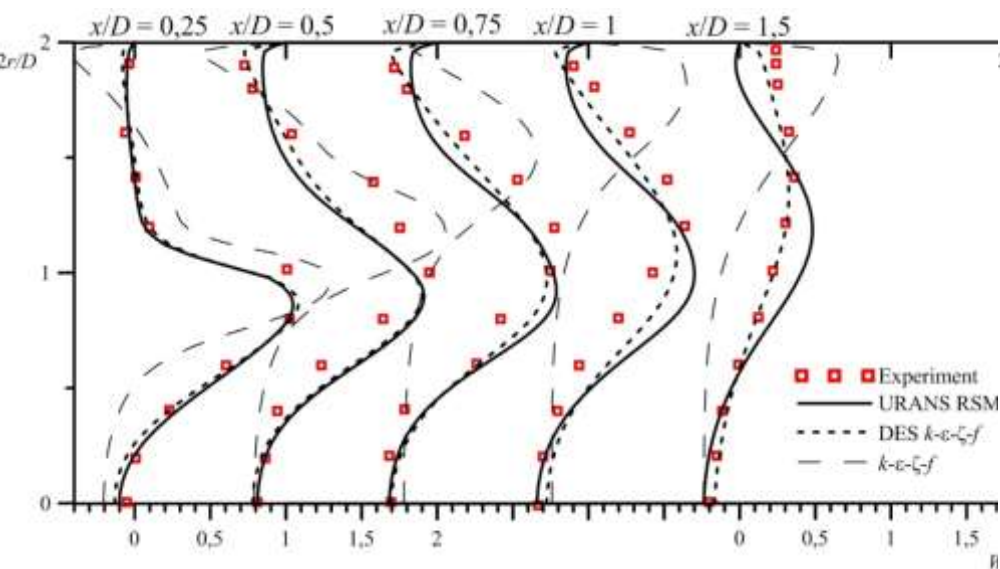
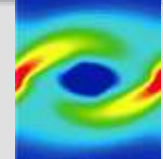


тангенциальная компонента скорости

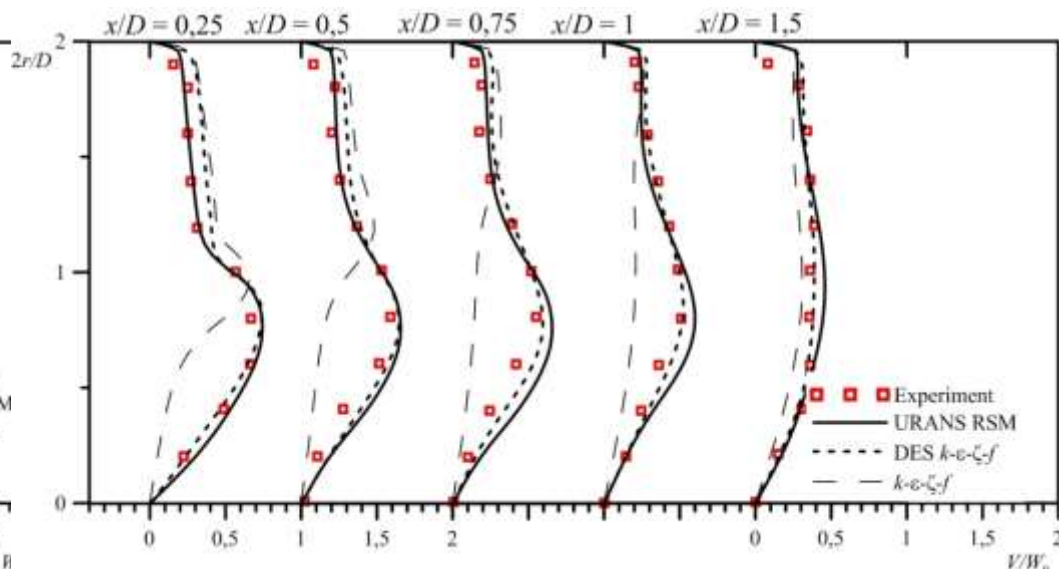




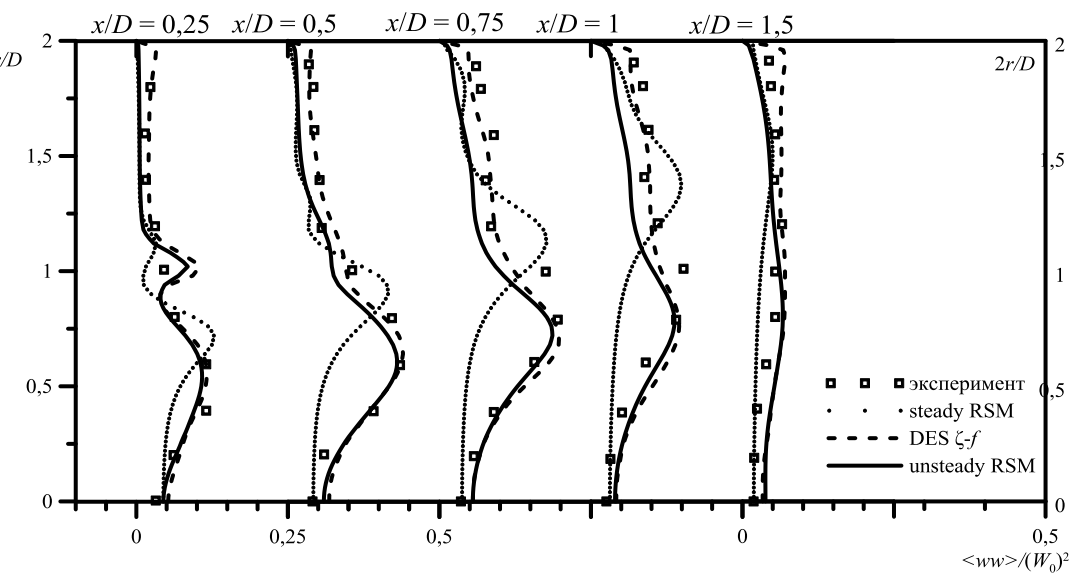
Закрученное течение после внезапного расширения



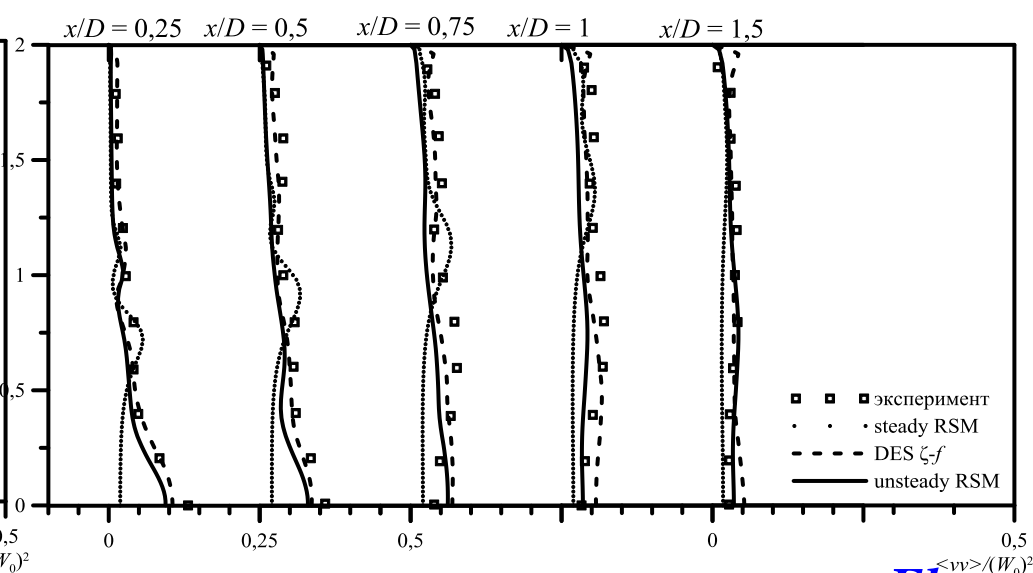
аксиальная компонента скорости



тангенциальная компонента скорости



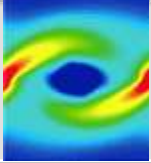
$\langle ww \rangle / (W_0)^2$



$\langle vv \rangle / (W_0)^2$

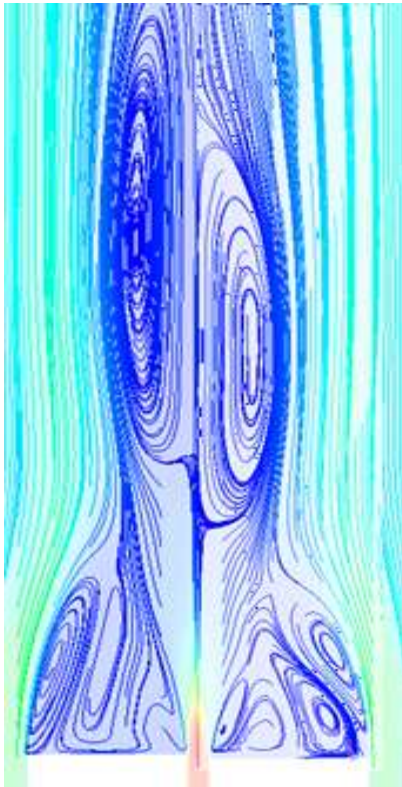


Swirling flow: Sydney swirl burner (non-reacting), $S=0.54$



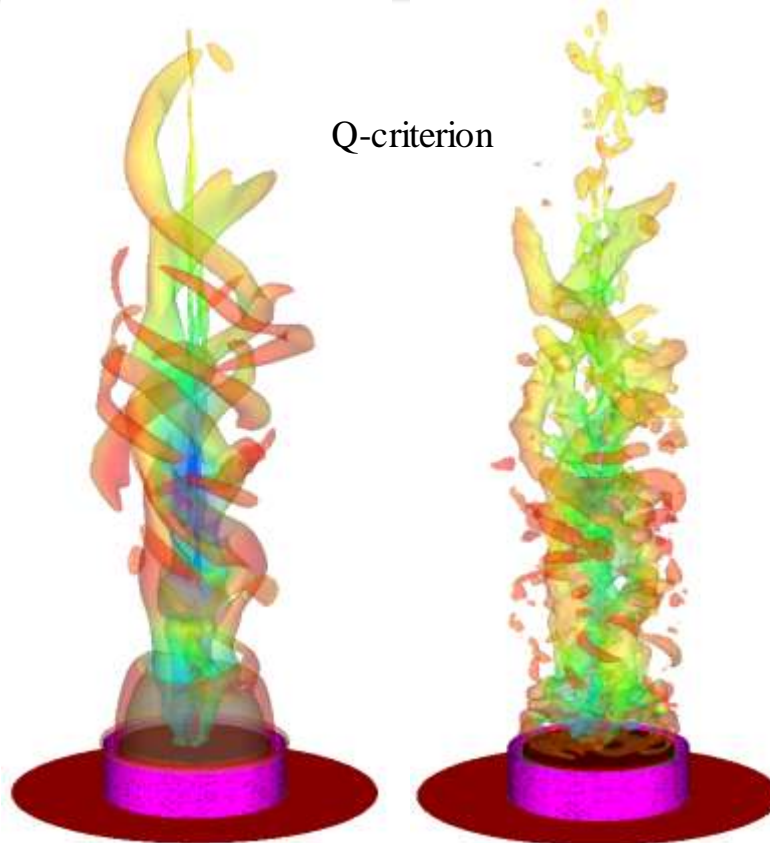
Different approaches for turbulence modeling

Averaged flows



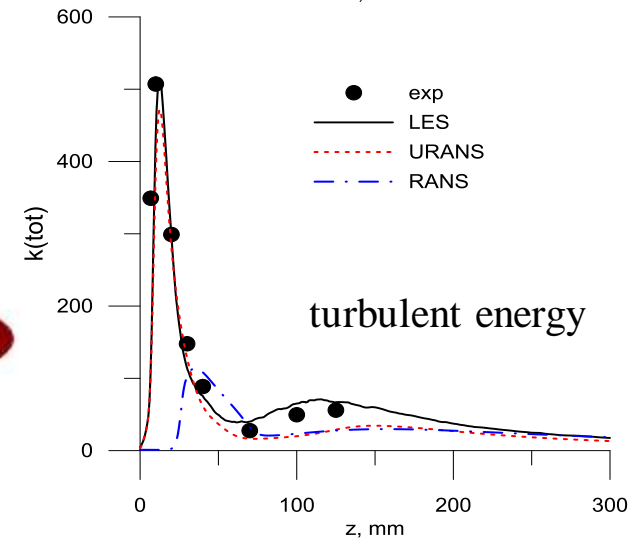
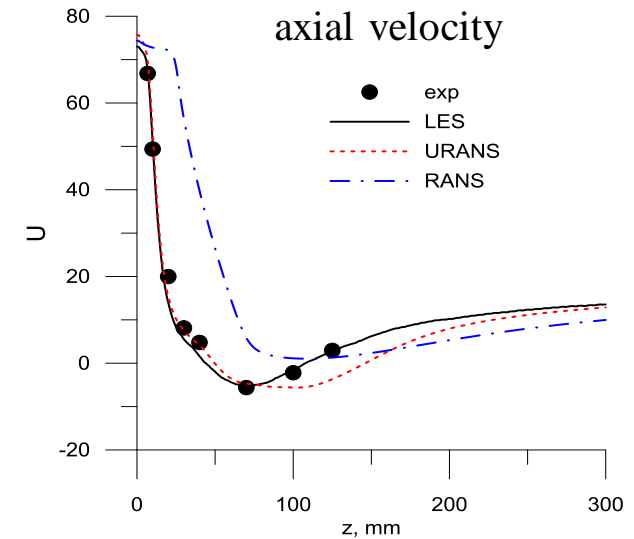
RANS URANS

Q-criterion



URANS RSM

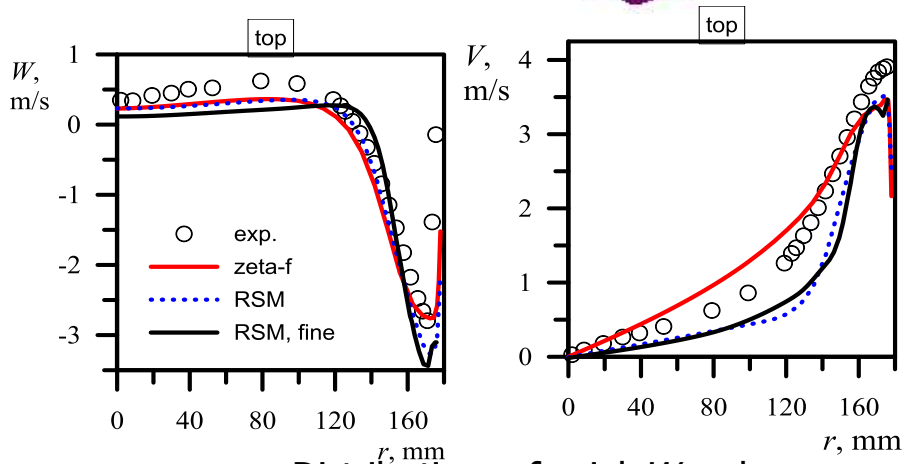
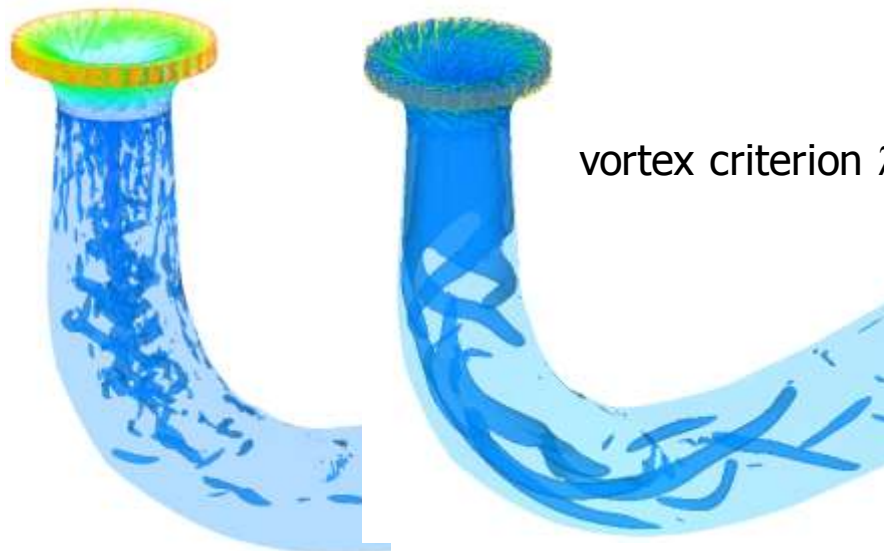
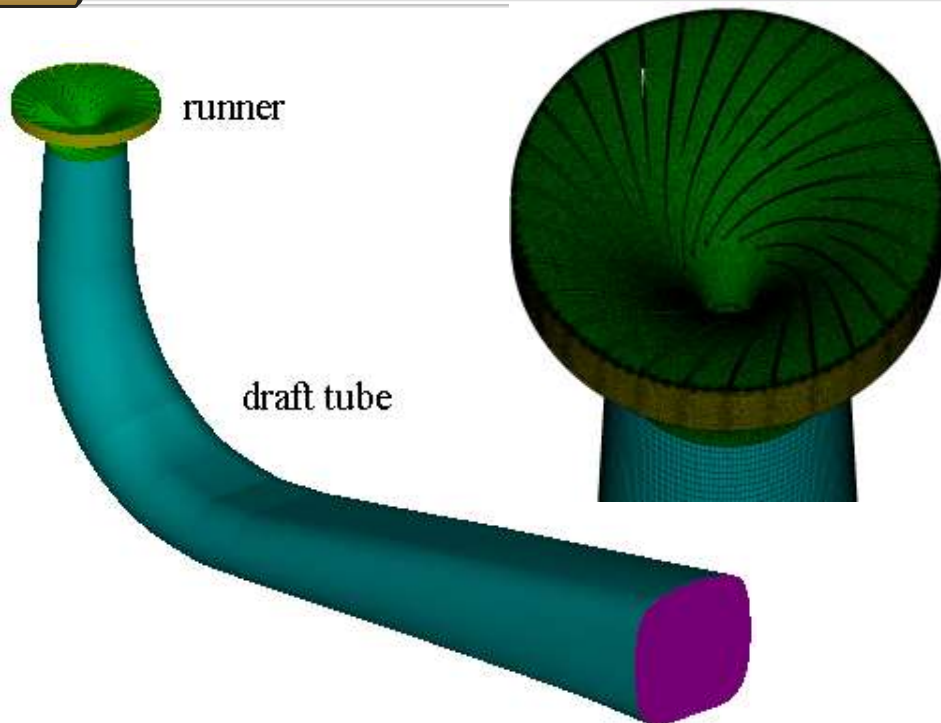
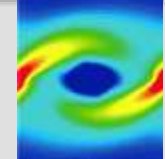
Dynamic LES



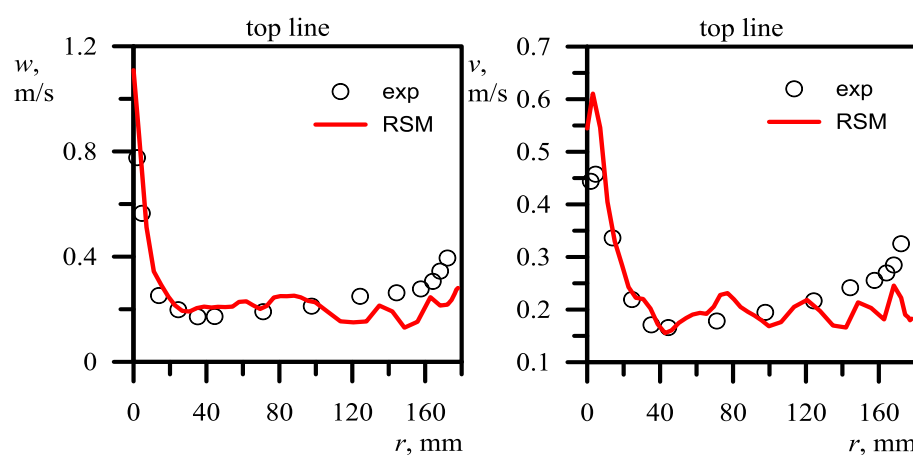
Y. Al-Abdeli, P. Kempf, R. Barlow (2004). Swirl Flows and Flames Database, Thermo fluids Research Group in the School of Aerospace, Mechanical and Mechatronic Engineering at the University of Sydney



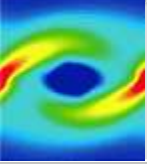
Model hydroturbine Francis-99



Distributions of axial W and tangential V velocity



Distributions of fluctuations (rms) of axial W and tangential V velocity.



Rheological models

Newtonian fluid

$$\tau = k\dot{\gamma},$$

$$\mu(\dot{\gamma}) = k$$

Power Law

$$\tau = k\dot{\gamma}^n,$$

$$\mu(\dot{\gamma}) = k\dot{\gamma}^{n-1}$$

Bingham Plastic

$$\tau = k\dot{\gamma} + \tau_0,$$

$$\mu(\dot{\gamma}) = \frac{k\dot{\gamma} + \tau_0}{\dot{\gamma}}$$

Herschel – Bulkley

$$\tau = k\dot{\gamma}^n + \tau_0,$$

$$\mu(\dot{\gamma}) = \frac{k\dot{\gamma}^n + \tau_0}{\dot{\gamma}}$$

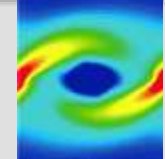
Robertson – Stiff

$$\tau = k(\dot{\gamma}_0 + \dot{\gamma})^n,$$

$$\mu(\dot{\gamma}) = \frac{k(\dot{\gamma}_0 + \dot{\gamma})^n}{\dot{\gamma}}$$



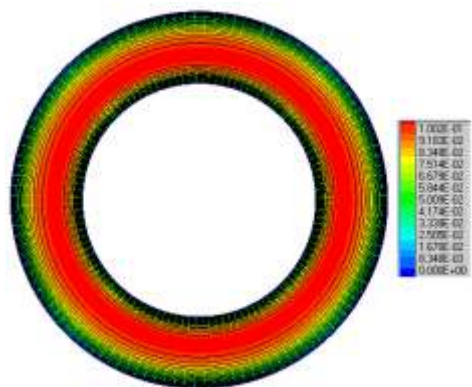
Движение неньютоновских жидкостей в зазорах



Herschel-Bulkley

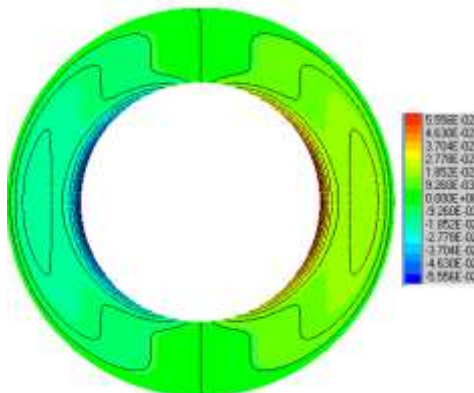
$$\tau = k\dot{\gamma}^n + \tau_0, \quad \mu(\dot{\gamma}) = \frac{k\dot{\gamma}^n + \tau_0}{\dot{\gamma}}$$

$Re = 0.527, Ta = 2.58$



Изолинии аксиальной компоненты скорости

$Re = 0.12, Ta = 0.0014$

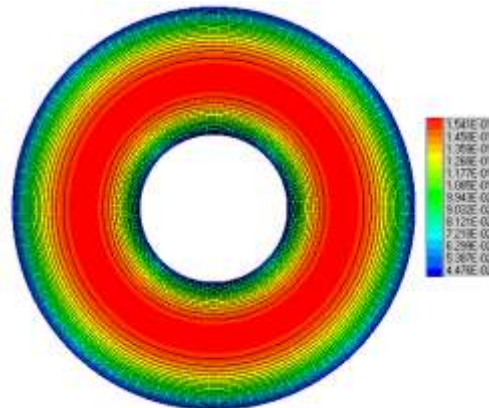


Изолинии Y компоненты скорости

Power Law

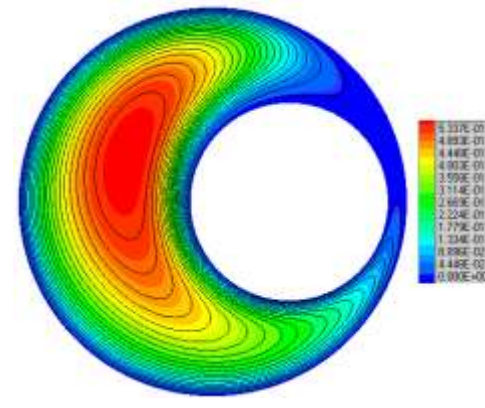
$$\tau = k\dot{\gamma}^n, \quad \mu(\dot{\gamma}) = k\dot{\gamma}^{n-1}$$

$Re = 3.04, Ta = 789$

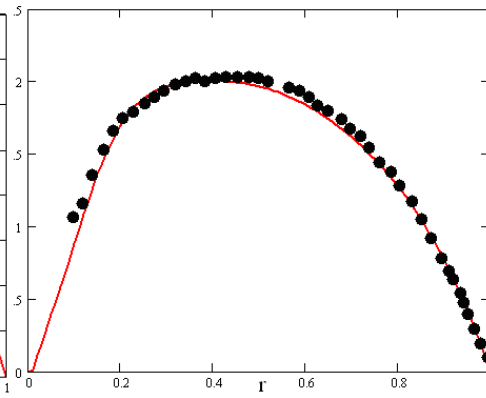
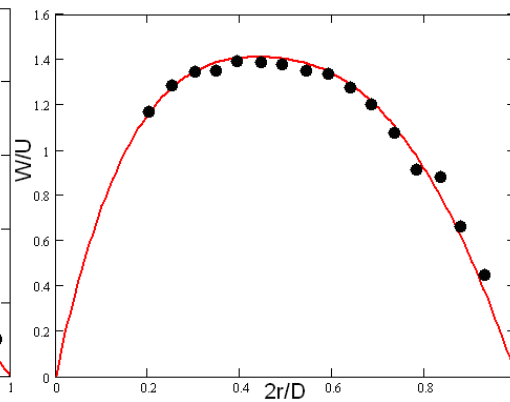
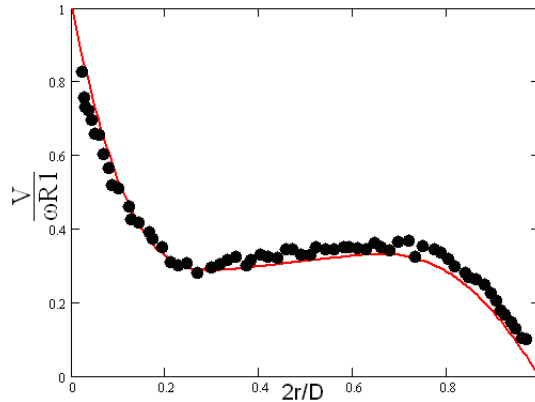
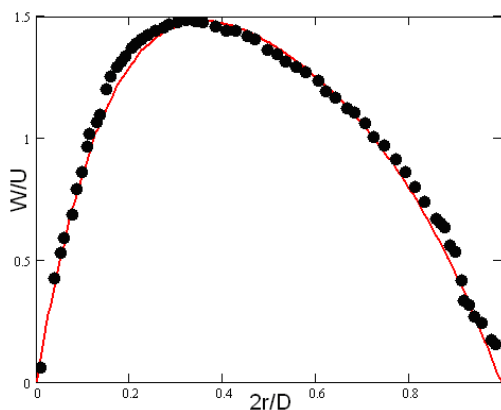


Изолинии аксиальной компоненты скорости

$Re = 241, Ta = 3500$



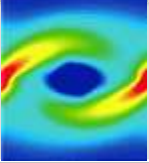
Изолинии аксиальной компоненты скорости



Профили компонент скорости



Turbulent pipe flow of shear-thinning fluids

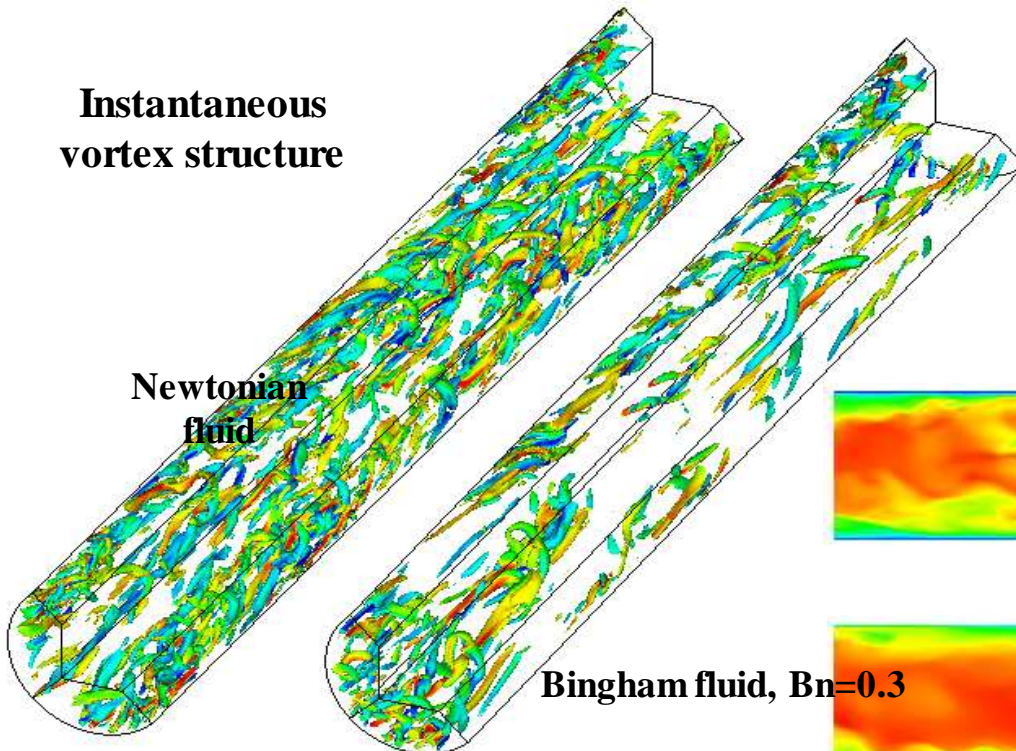


flow index n ↓

yield stress τ_0 ↑

- increasing the streamwise vortex size, decreasing the streamwise vortex strength
- reduction of transverse velocity fluctuation => drag reduction
- growth of turbulence anisotropy (in comparison with Newtonian fluids)
- increasing the value of Re at which laminar-turbulent transition occurs

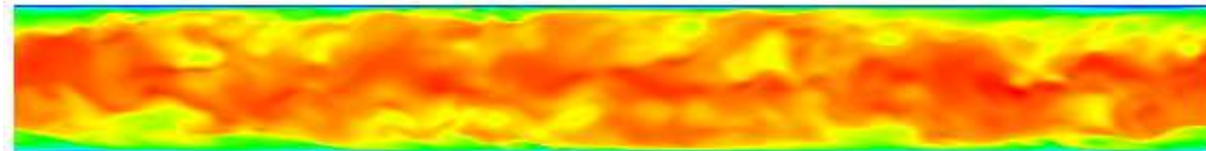
Instantaneous
vortex structure



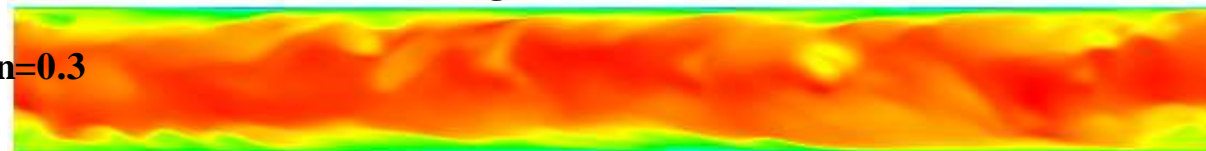
$Re_m = 10000$ $Re_\tau = 310$

Instantaneous axial velocity magnitude

Newtonian fluid

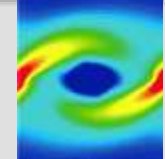


Bingham fluid, $Bn=0.3$

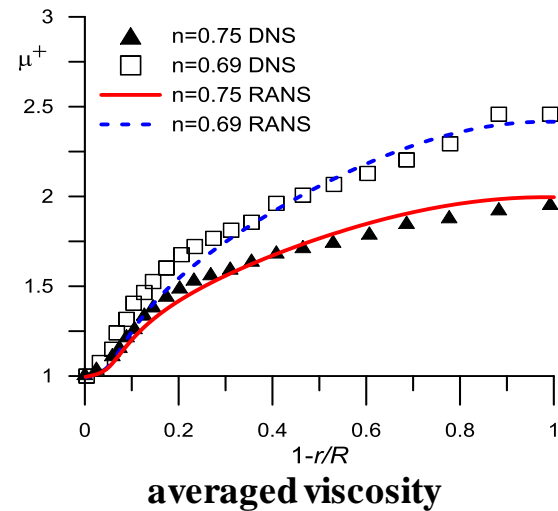
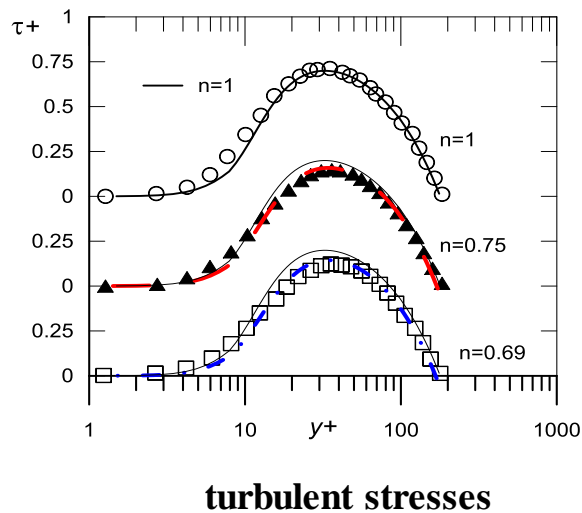
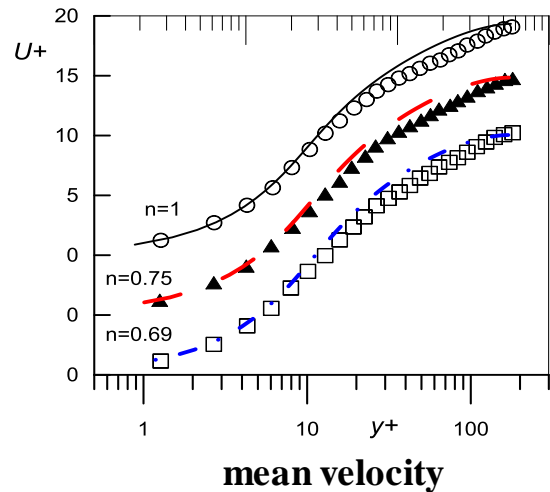




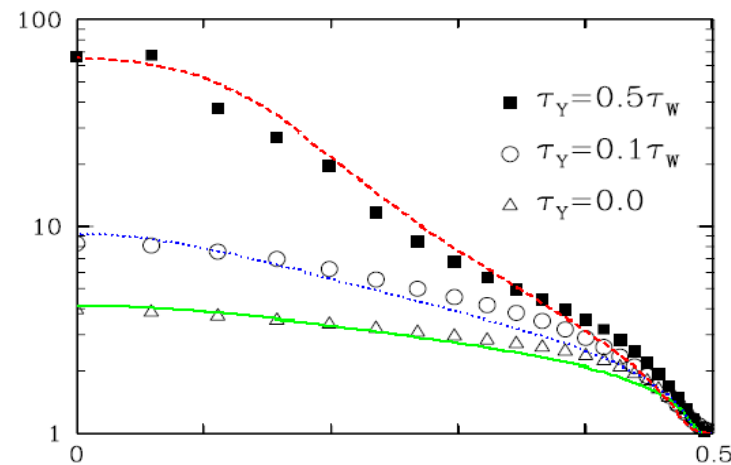
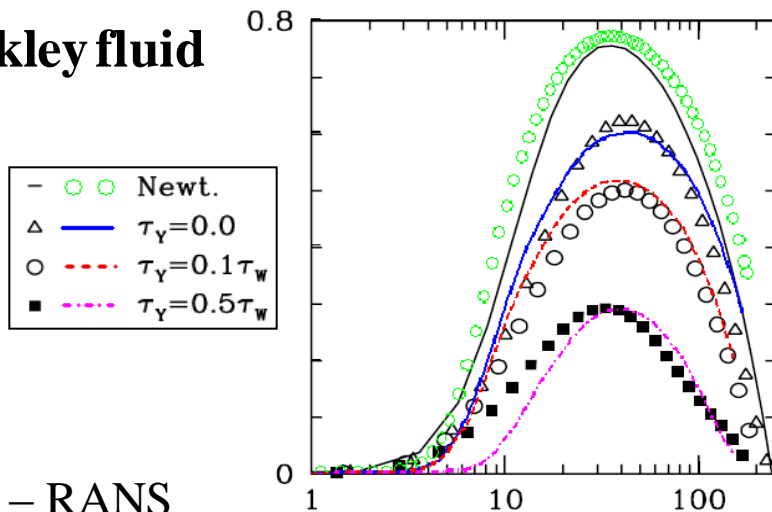
RANS vs. DNS



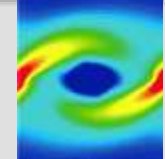
Power law fluid



Herschel–Bulkley fluid



symbols – DNS, lines – RANS



•Обтекание цилиндрического тела с полусферическим торцом

$\sigma=0,5$:

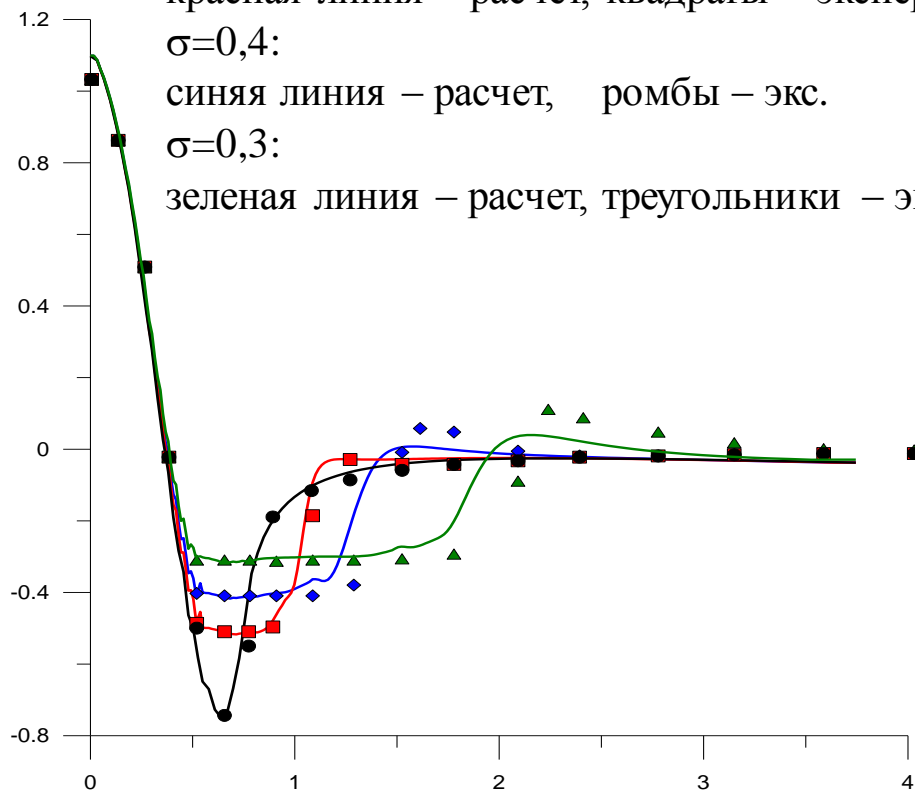
красная линия – расчет, квадраты – эксперимент

$\sigma=0,4$:

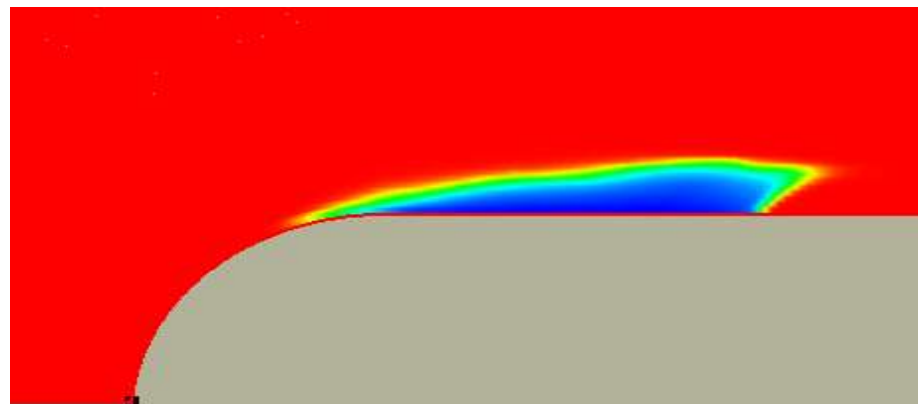
синяя линия – расчет, ромбы – экс.

$\sigma=0,3$:

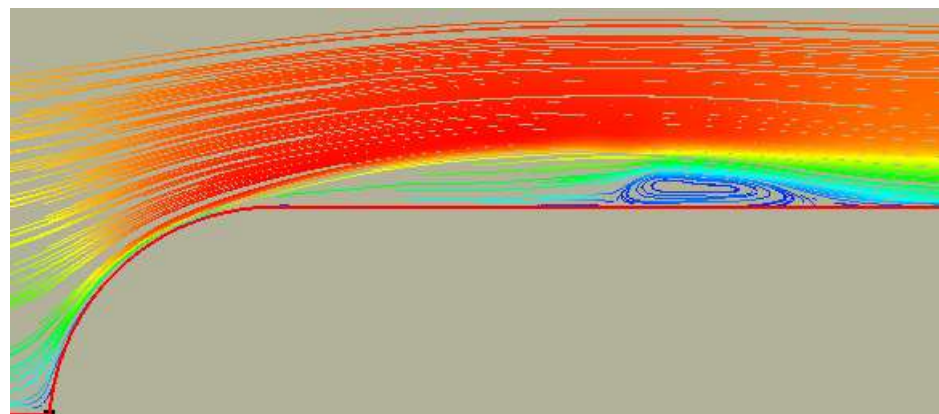
зеленая линия – расчет, треугольники – экс.



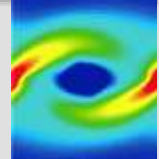
распределение C_p на поверхности тела



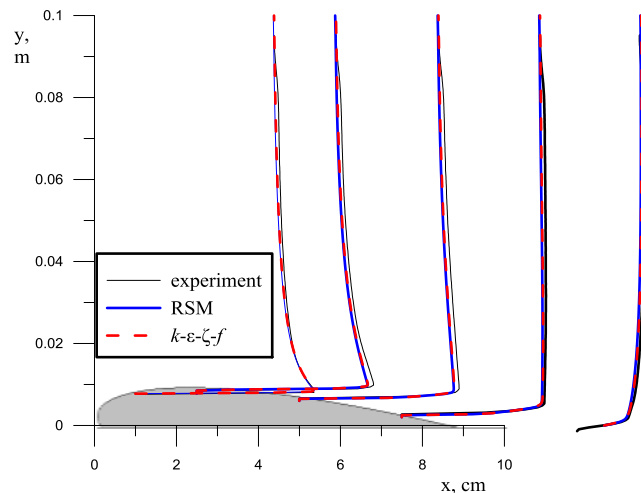
поле плотности $\sigma=0,3$



траектории частиц жидкости $\sigma=0,3$

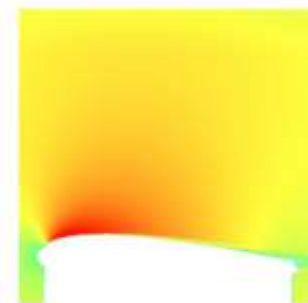


NACA0015, $\alpha = 3^\circ$

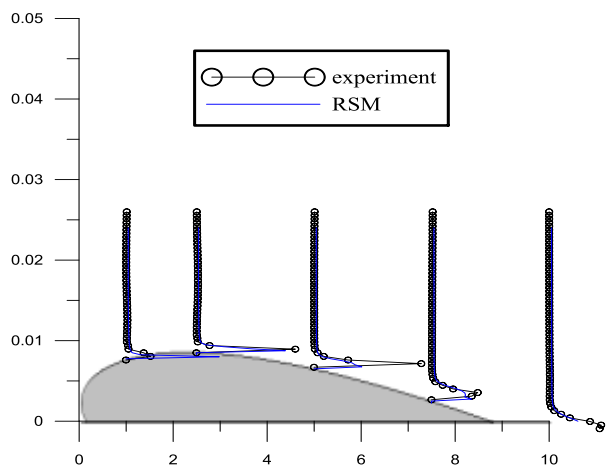


Velocity magnitude

experiment

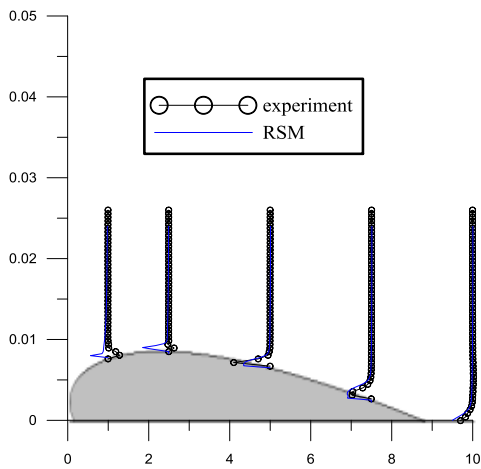


longitudinal velocity U



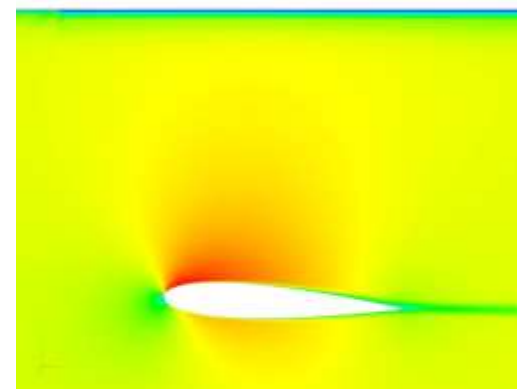
28

uu

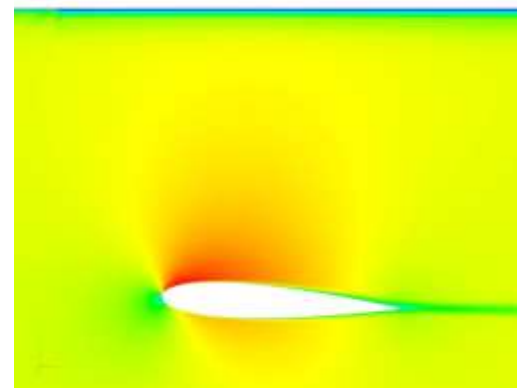


uv

zeta-f

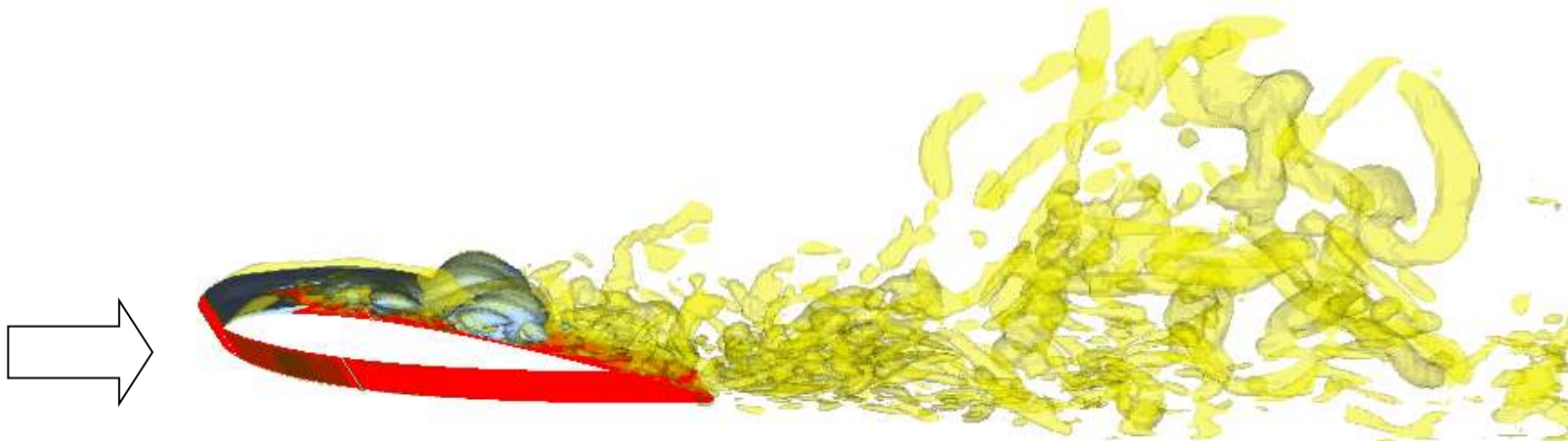
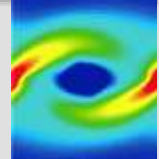


RSM





Кавитационные течения

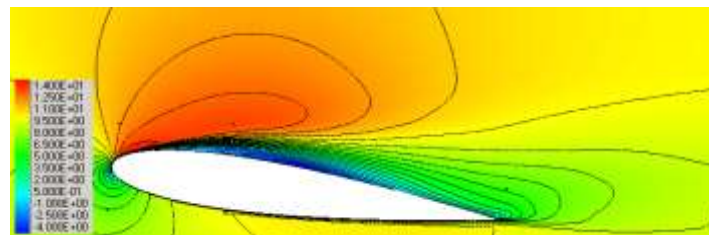
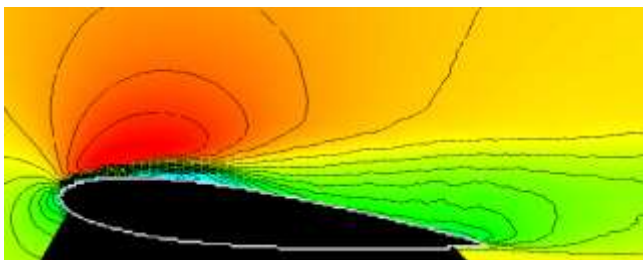


vapor volume fraction $\alpha=0.1$ (blue) and vortex structure (λ^2 vortex criterion) (yellow)

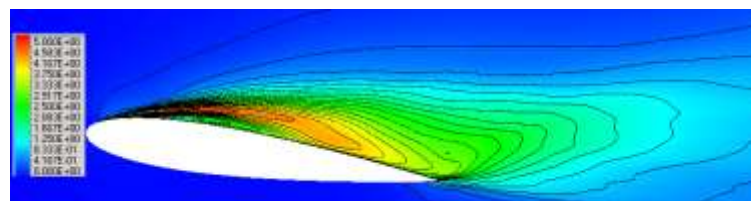
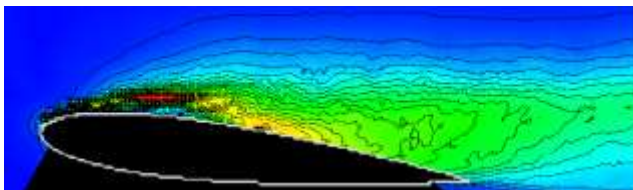
Experiment PIV (IT SB RAS)

Simulation, DES

streamwise
velocity

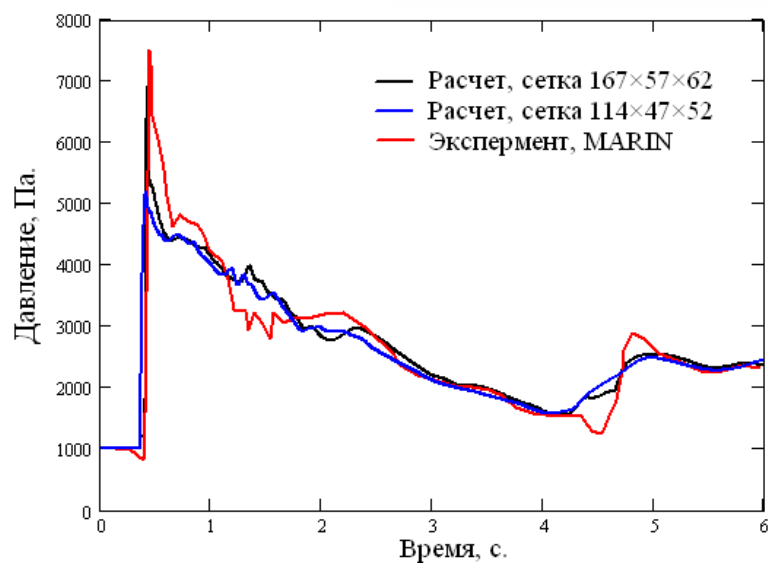
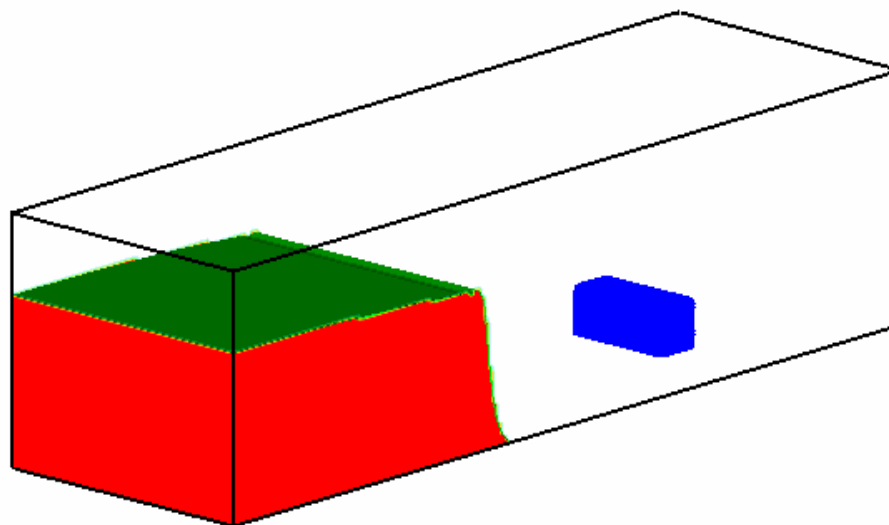
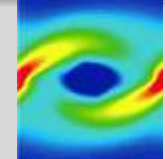


fluctuation

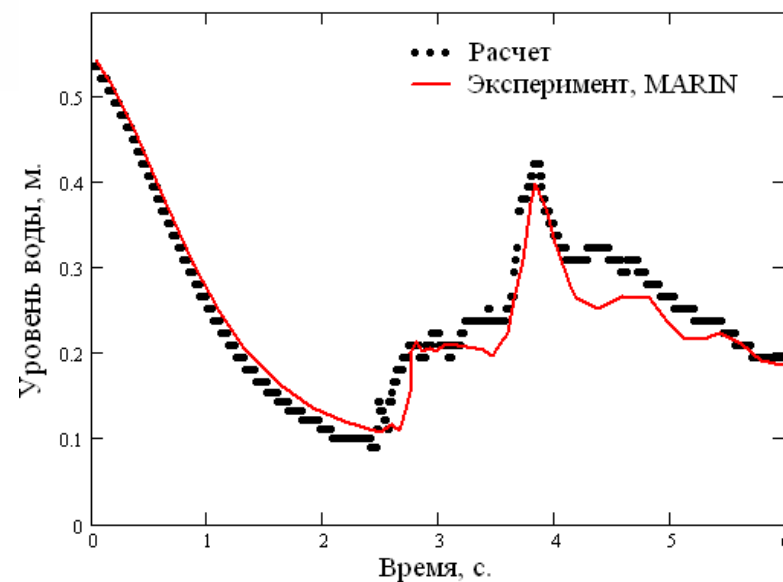




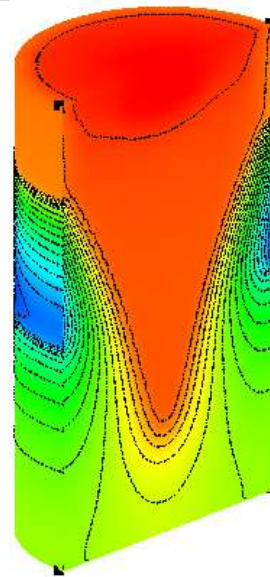
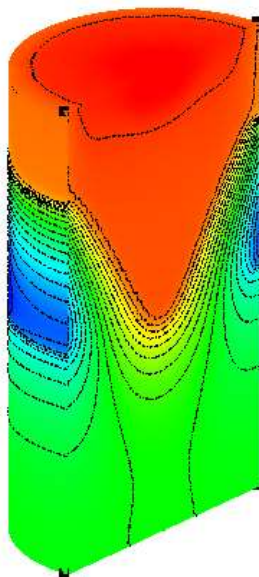
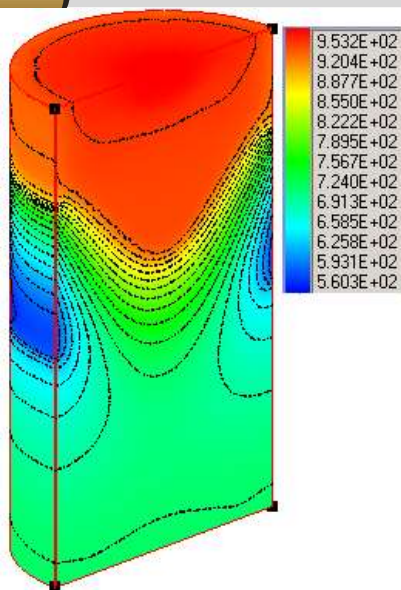
Течения со свободной поверхностью. Разрушение дамбы



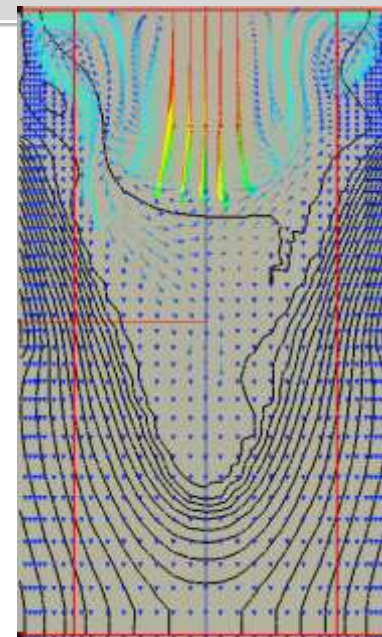
Давление в центре левой грани бруска



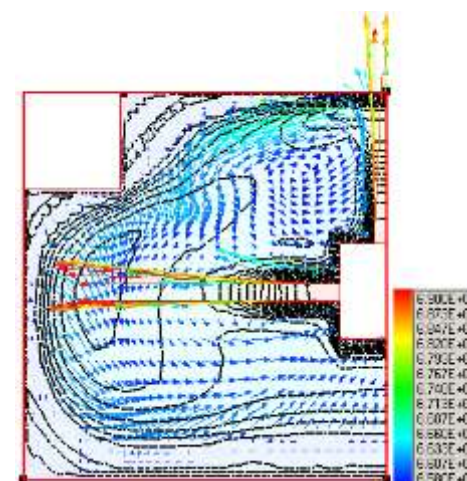
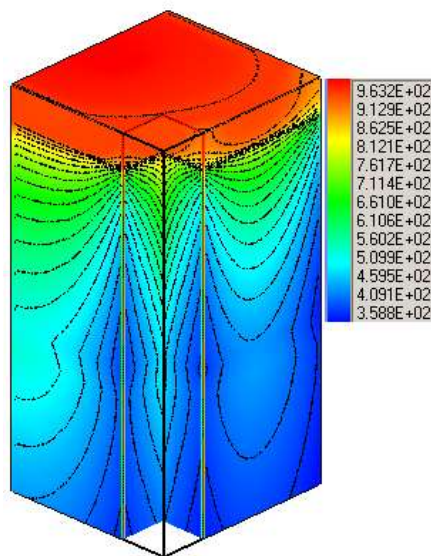
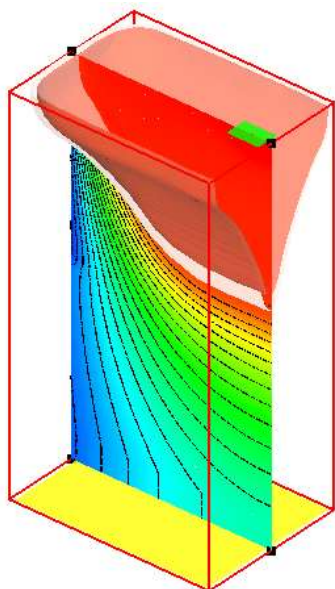
Уровень воды над брусом *σFlow*



Распределение температур

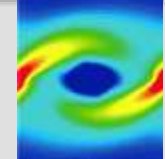


Поле течения и температура

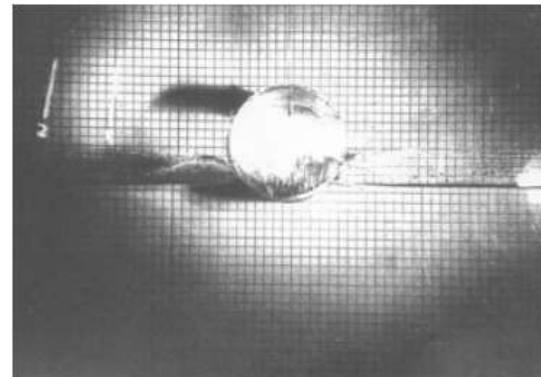
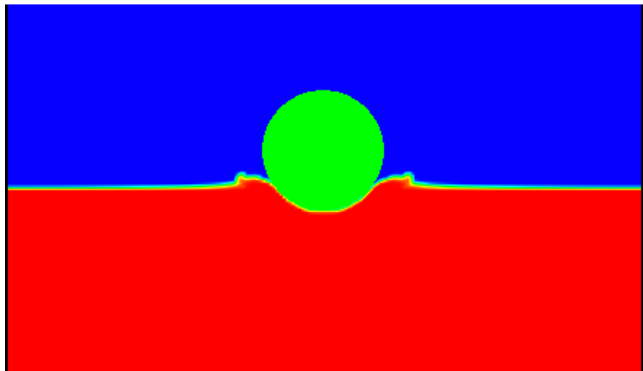




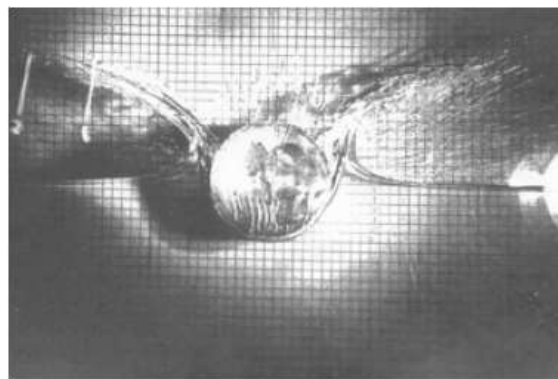
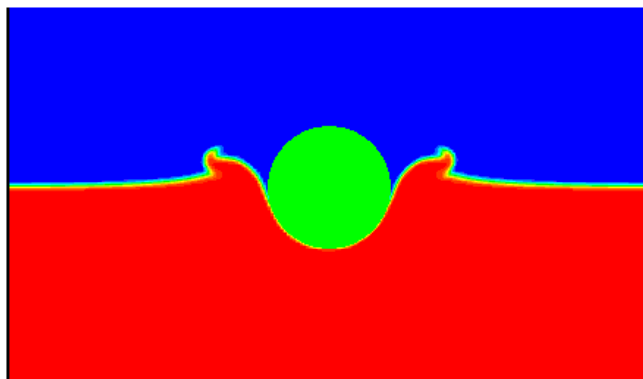
Падение цилиндра в бассейн с водой



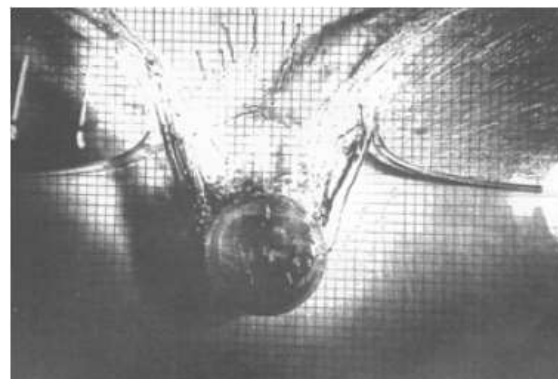
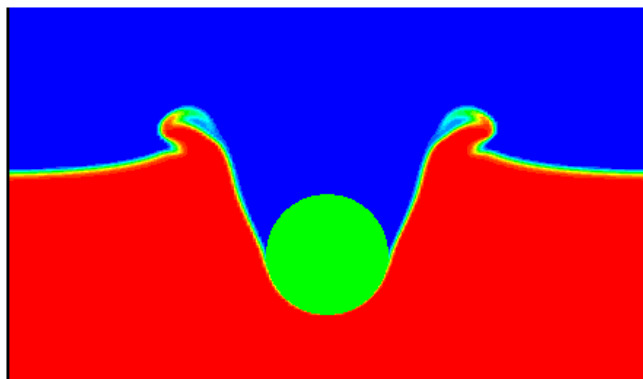
Диаметр цилиндра $D=11$ см. Плотность цилиндра 1000 кг/м³.
Экспериментальные данные — Greenhow M. и Lin W.M.



$t = 0.005c$



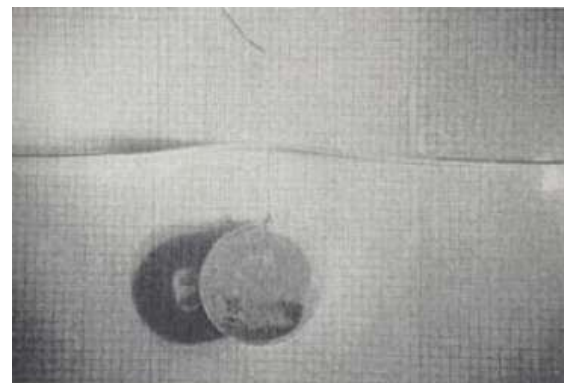
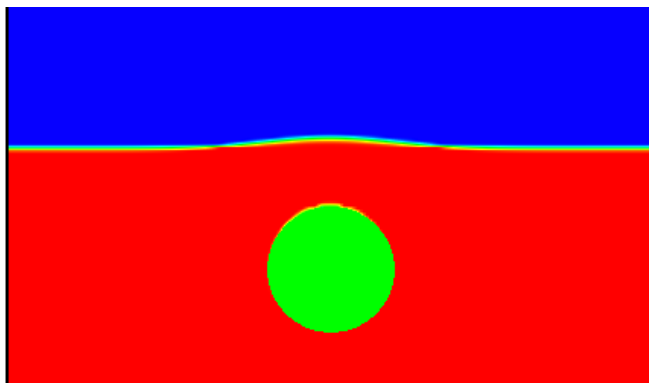
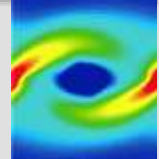
$t = 0.03c$



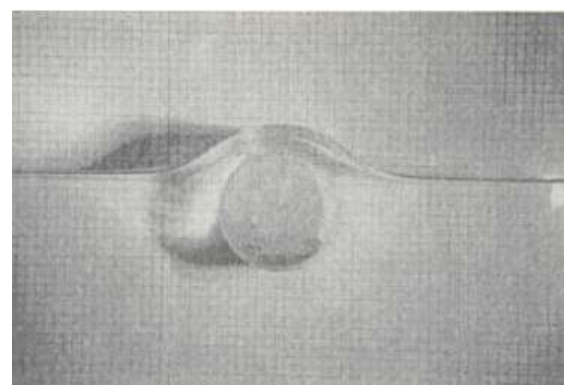
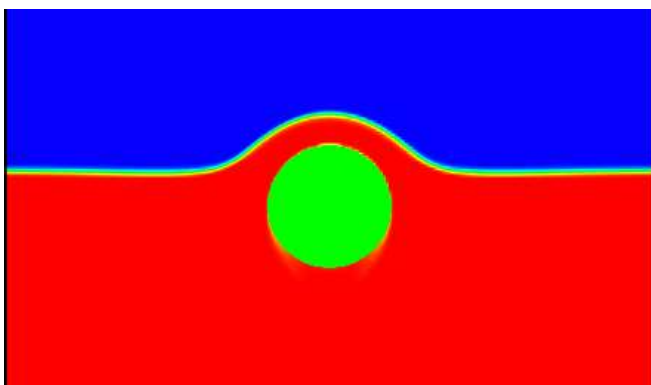
$t = 0.085c$



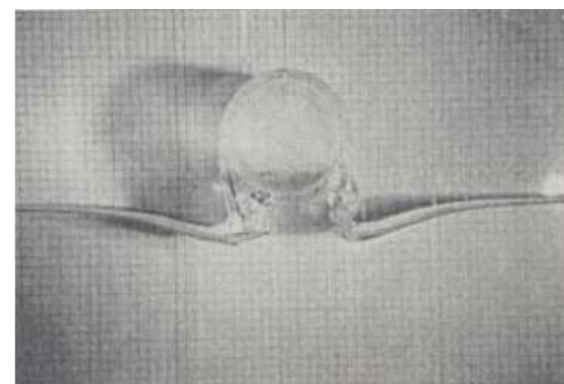
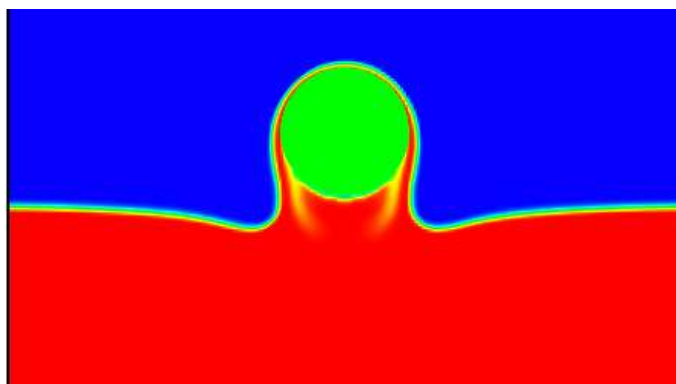
Всплытие цилиндра



$t = 0.072c$



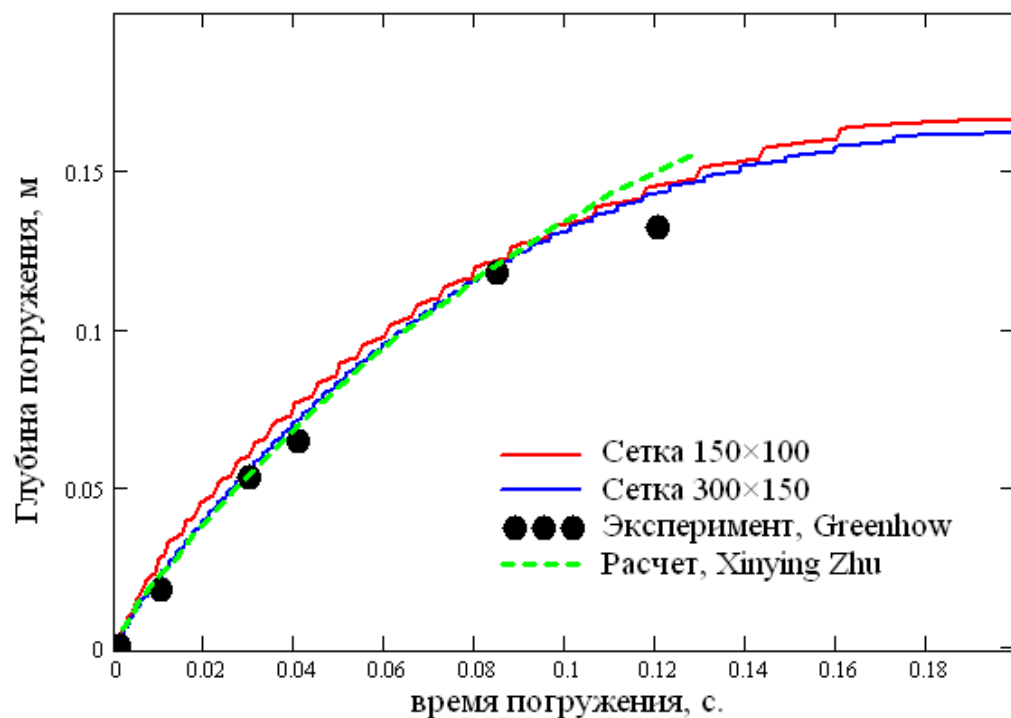
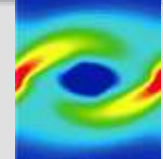
$t = 0.165c$



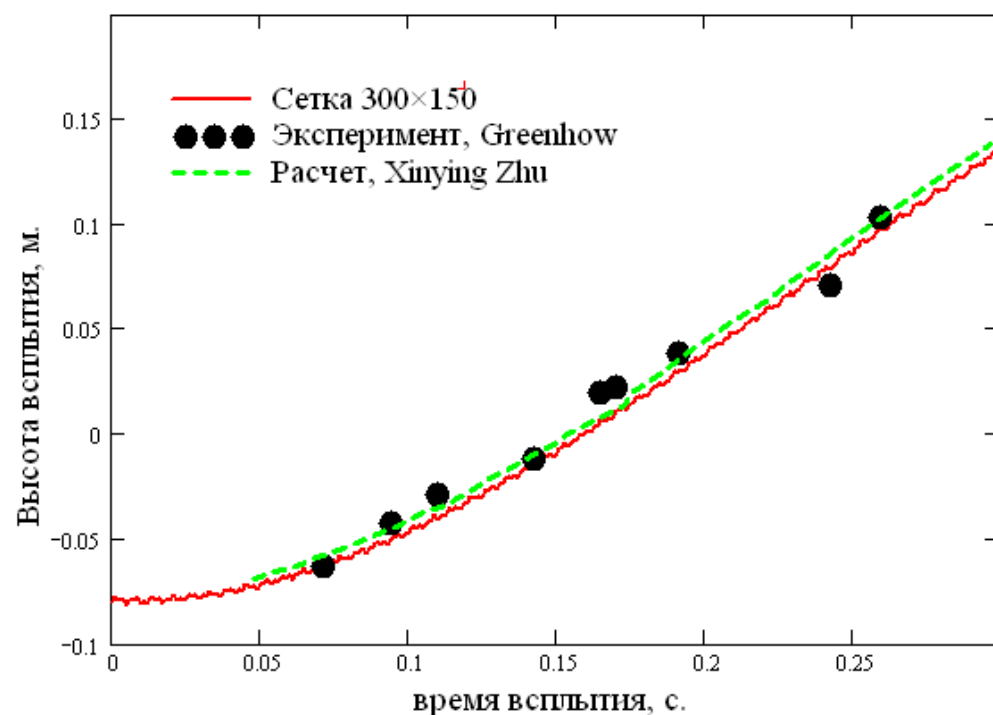
$t = 0.22c$



Сопоставление результатов с экспериментом и расчетами X. Zhu



Погружение цилиндра

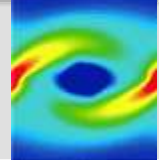


Всплытие цилиндра

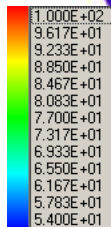
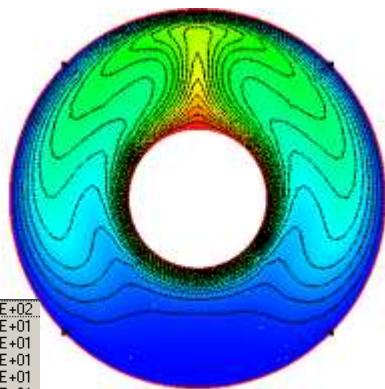


Естественная конвекция

Топливная ячейка



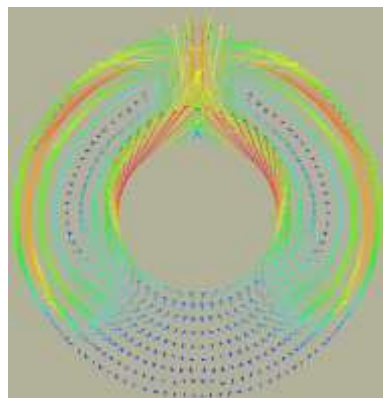
Естественная конвекция в
полости между двумя
цилиндрами. $Gr=49500$



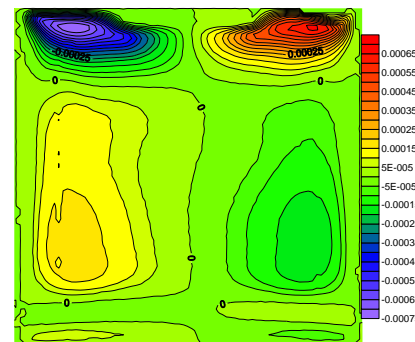
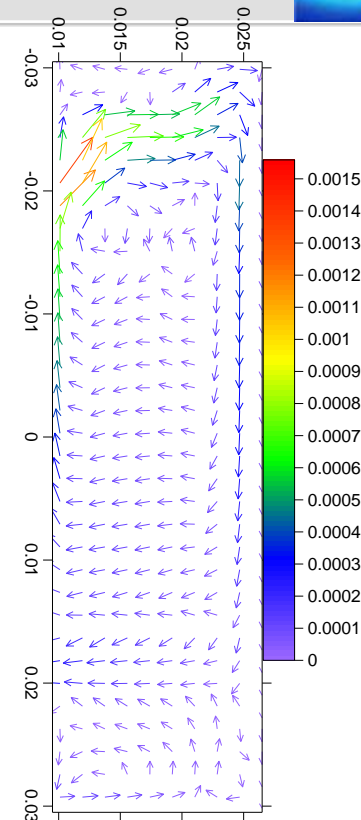
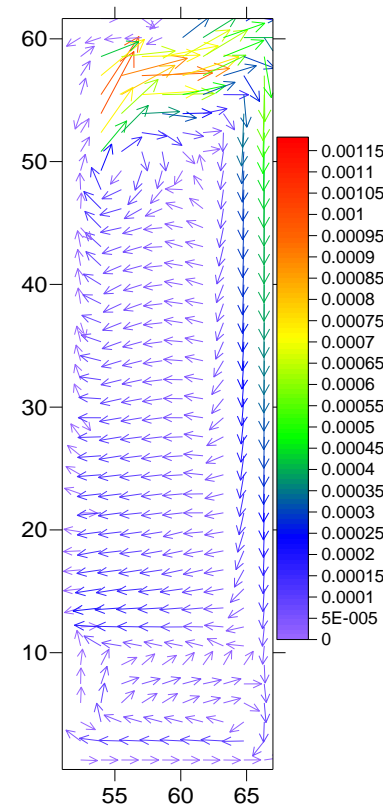
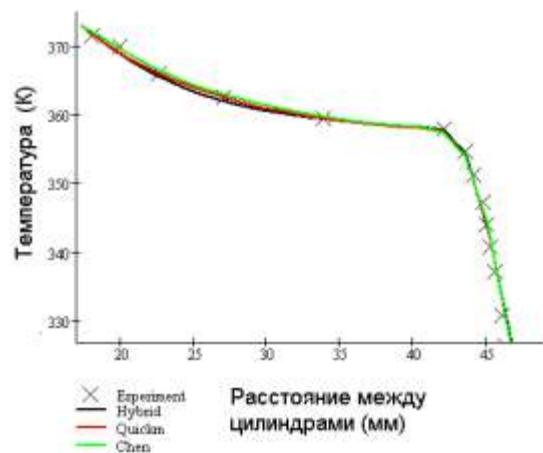
температура



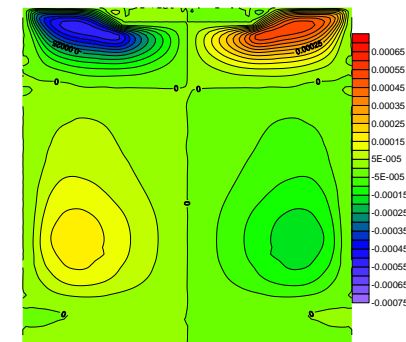
Интерферограмм
а поля
температур



Скорость



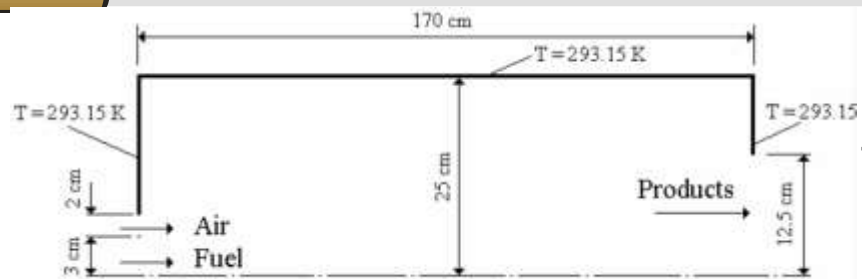
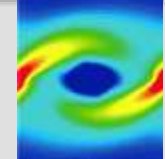
Эксперимент, PIV



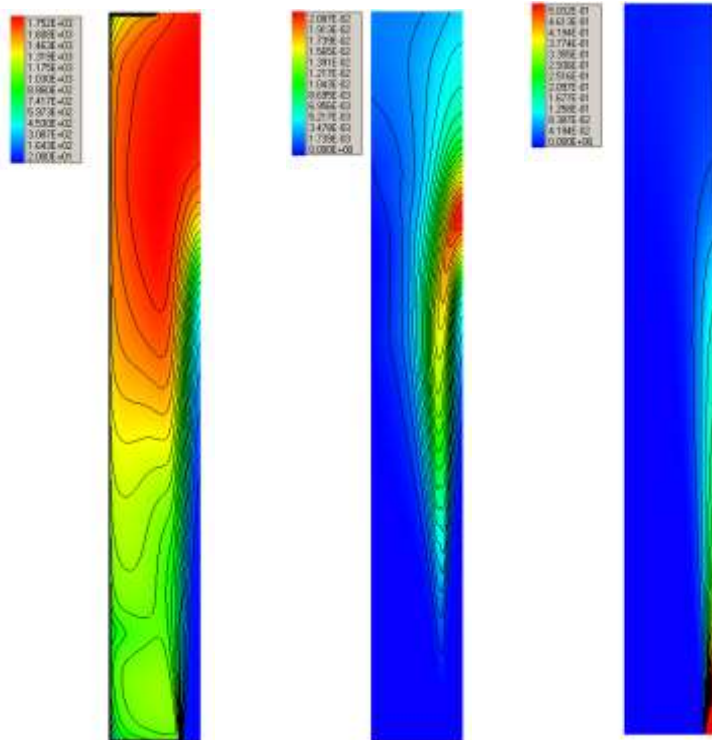
Расчет *σFlow*



Горение метана



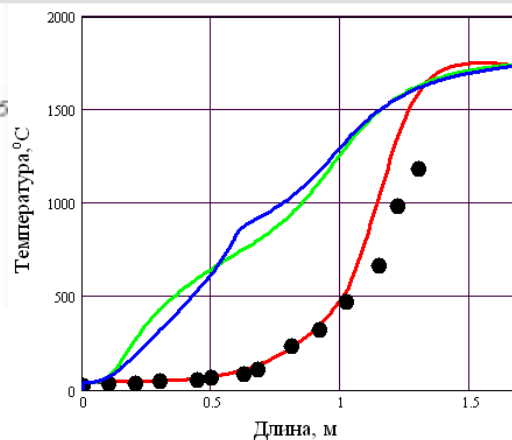
Состав топлива: CH₄ (90%) и N₂ (10%).
В воздухе присутствует 1% водяного пара.
Температура топлива 40°C и температура воздуха 50°C.
Скорость топлива 7,76 м/с, скорость воздуха – 36,29 м/с.
Температура стенок – 20°C



температура

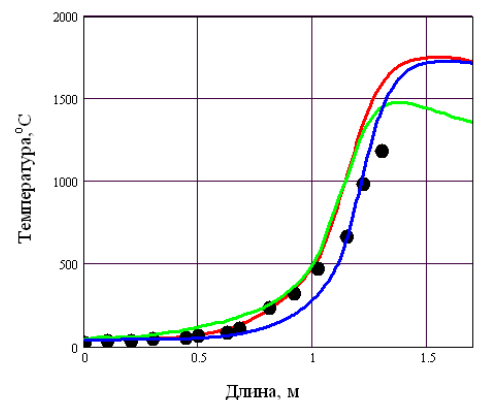
концентрация CO

концентрация CH₄



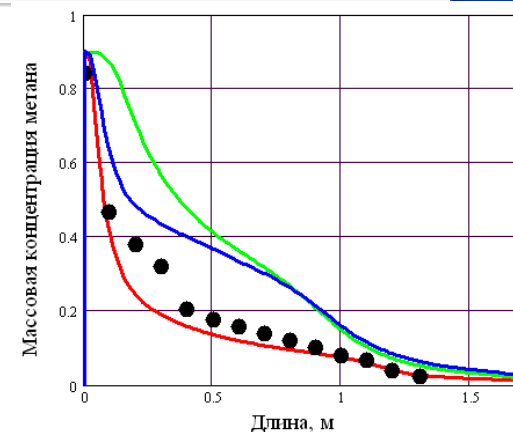
— Hybrid ● ● ● эксперимент
— EBU — Kinetic

Осевое распределение температуры



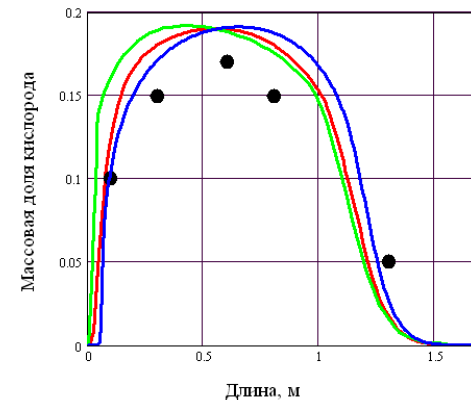
— s-Flow ● ● ● эксперимент
— расчёт Silva et al — Fluent

Осевое распределение температуры



— Hybrid ● ● ● эксперимент
— EBU — Kinetic

Осевое распределение массовой концентрации метана



— s-Flow ● ● ● эксперимент
— расчёт Silva et al — Fluent

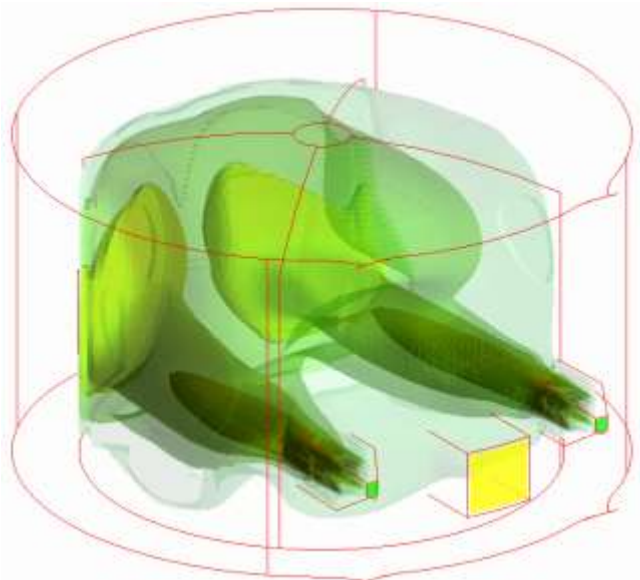
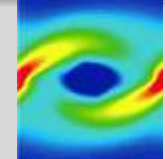
Осевое распределение массовой концентрации кислорода

C. V. da Silva et al. Numerical Simulation the Combustion of Methane and Air in a Cylindrical Chamber

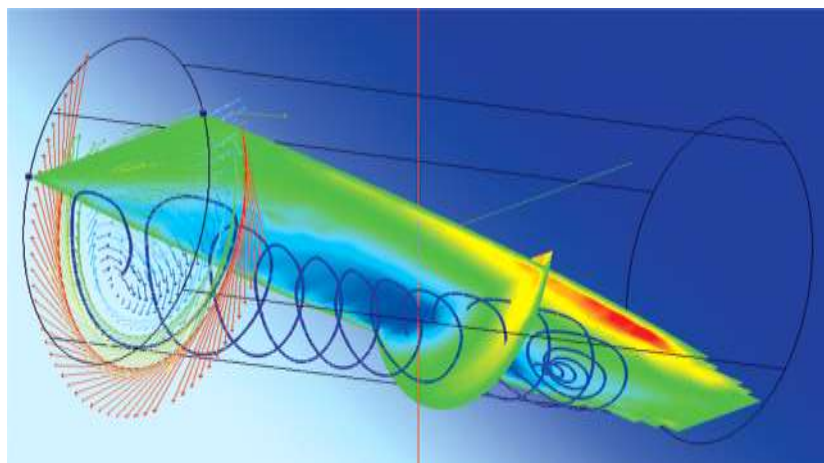
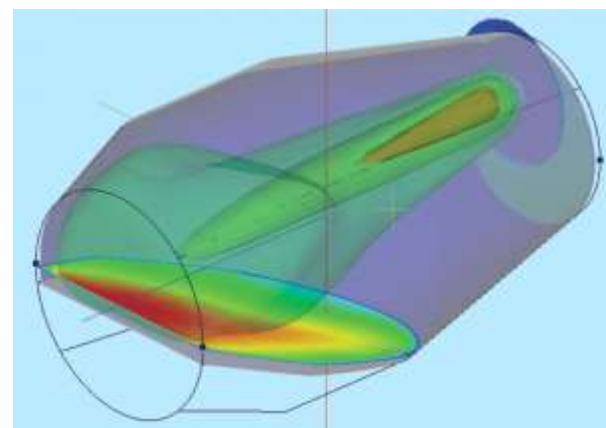
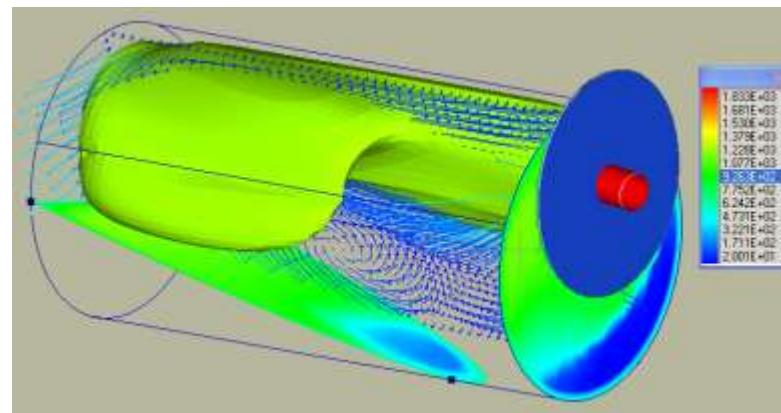
σFlow



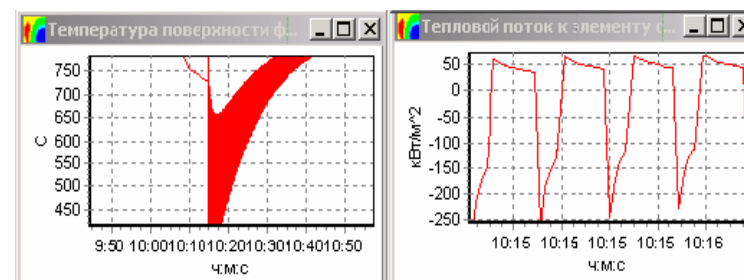
Металлургические печи



Факел в отражательной печи



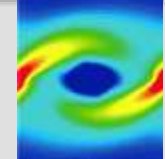
Движение металла в роторной печи



Температура факела и поверхности шихты в роторной печи



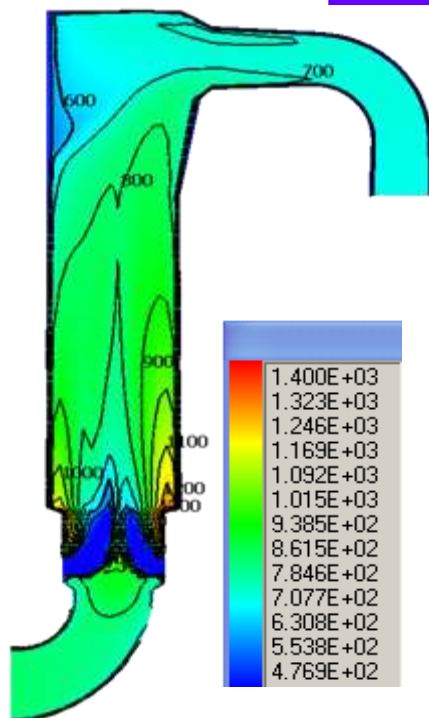
Перенос тепла излучением



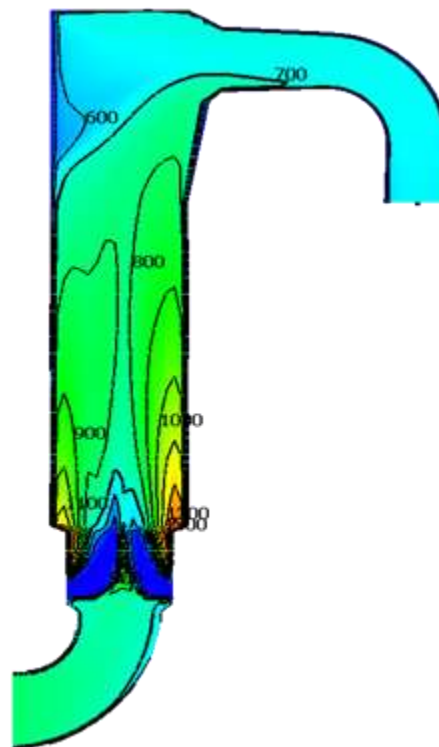
CO - 26 %, $T_1 = 800$ °C, $Q_3 - 107$ нм³/ч.

Модели

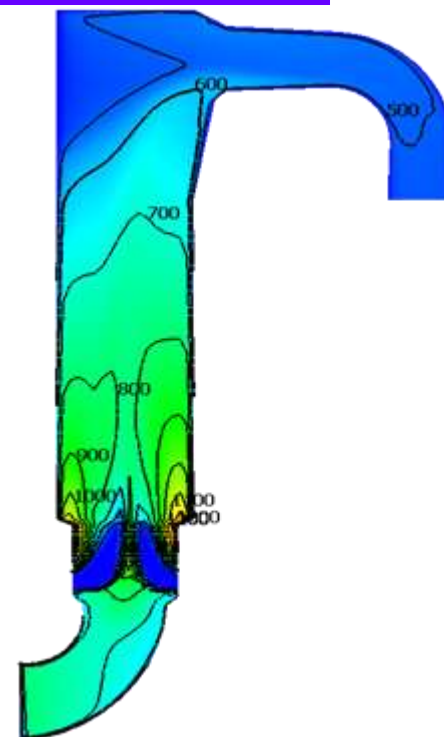
- P1
- DO
- FVM
- рассеяние
- селективность
 - WSGG
 - многополосная



WSGG

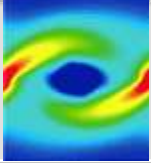


15 полосная модель



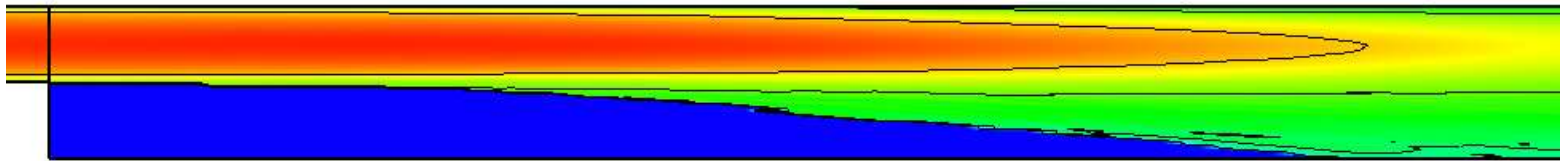
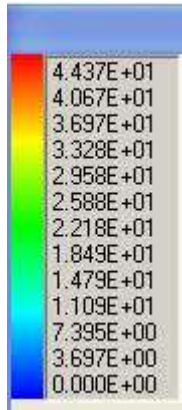
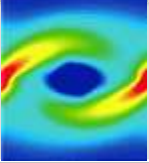
«серый» газ

Точка мониторинга	Замеряемая величина	Расчетные значения на разных моделях			Данные эксперимента
		WSGG	15ти полосная модель	«серый» газ	
1	T , °C	900-950	840-880	900-950	870-945
2	T , °C	800-900	790-890	640-700	780-990
3	T , °C	670-750	660-740	500-550	620-845

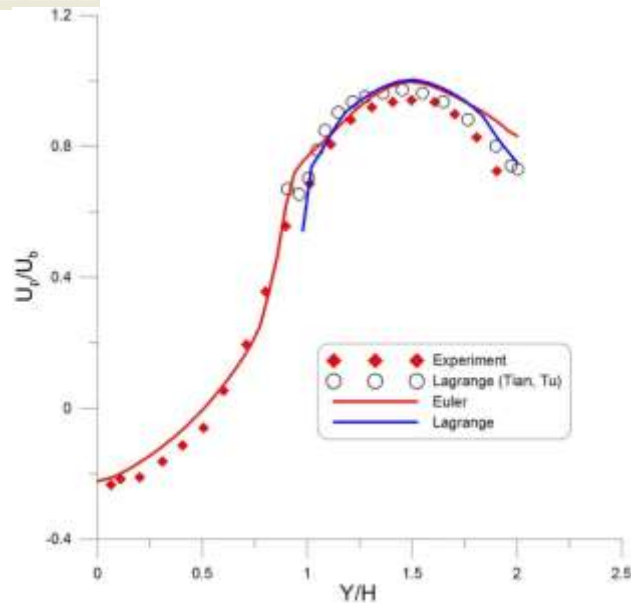




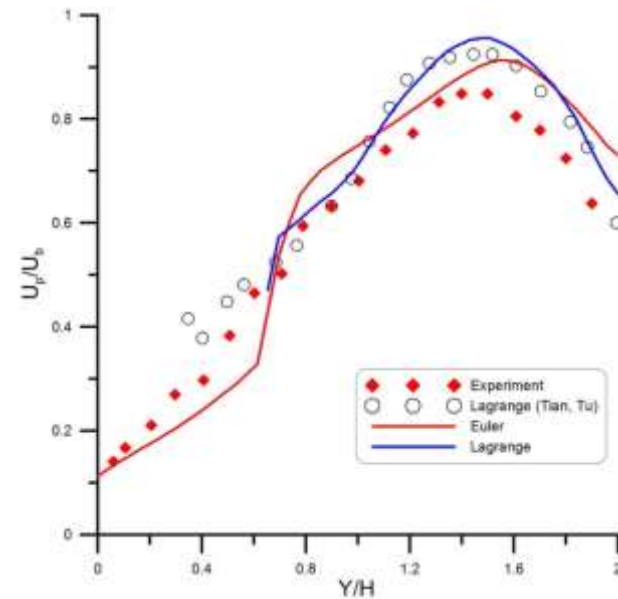
Backward-facing step



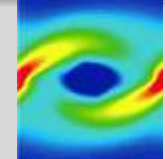
Particle phase velocity field ($Re=64000$, $d_p=70 \mu m$), m/s



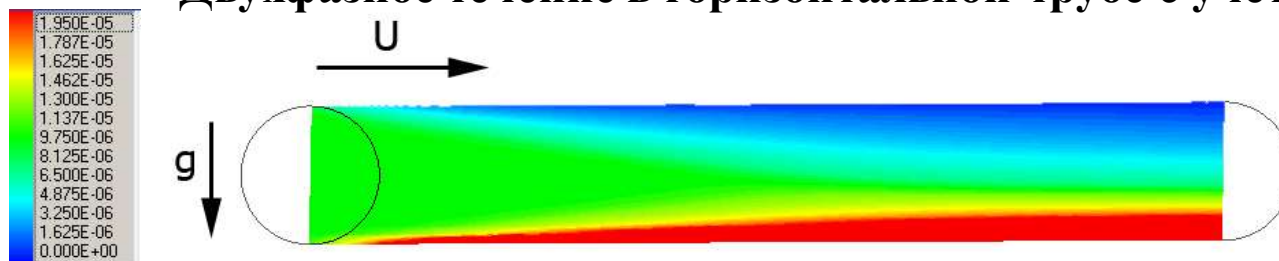
Velocity of the particle phase
at $X/H=3$



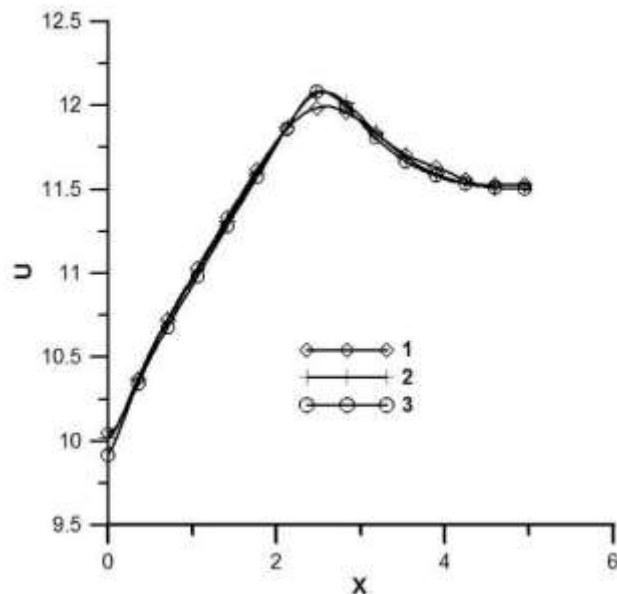
Velocity of the particle phase
at $X/H=9$



Двухфазное течение в горизонтальной трубе с учетом гравитации



Поле объемной концентрации частиц, $d_p=35\mu\text{м}$, $\rho_p=2900\text{ кг/м}^3$, $Re=65000$



Модель	Лагранж	Эйлер	ДИМ
Время счета (с)	265	230	130

Распределение скорости вдоль оси канала

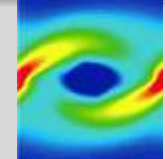
1 – подход Лагранжа,

2 - подход Эйлера,

3 – диффузионно-инерционная модель



Прецессия вихря в газожидкостном потоке



параметр крутки потока $S = 1,1$

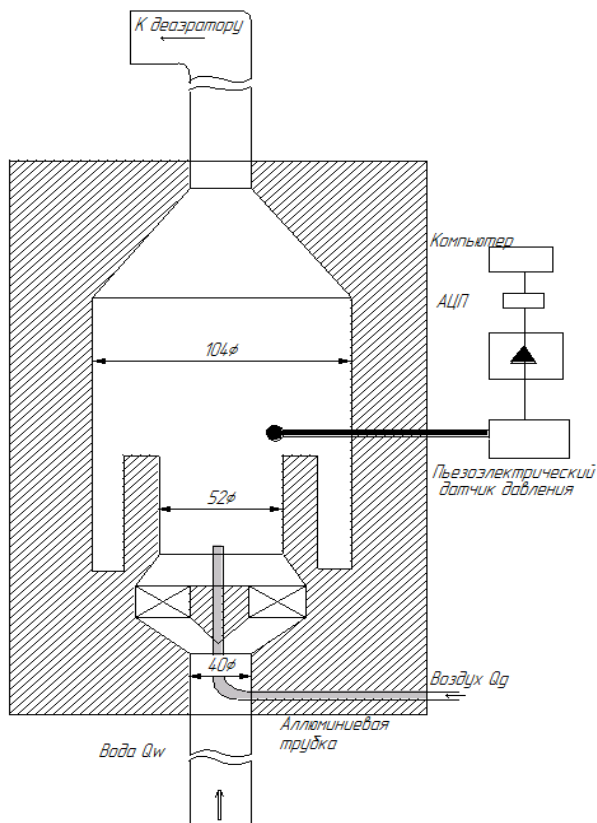
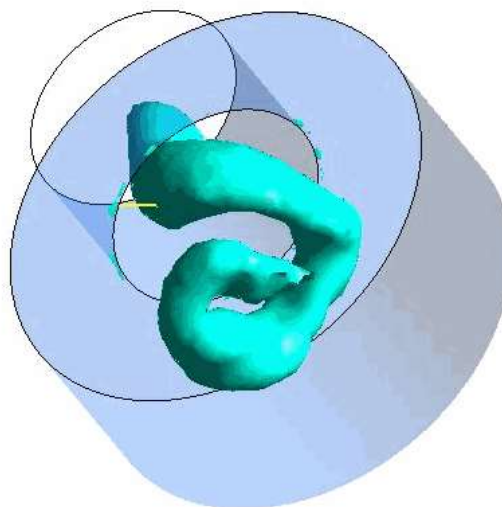
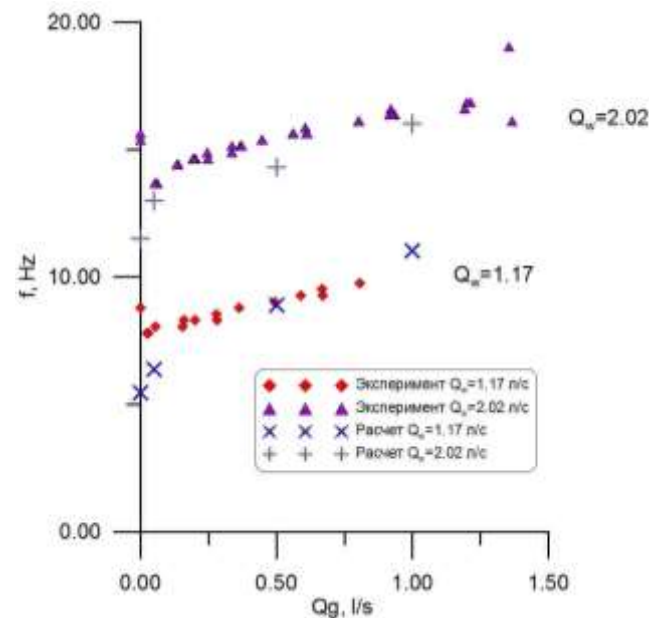


Схема экспериментальной установки ИТ СО РАН



Изоповерхность объемной доли воздуха ($Q_w=2.02$ л/с, $Q_g=1$ л/с)

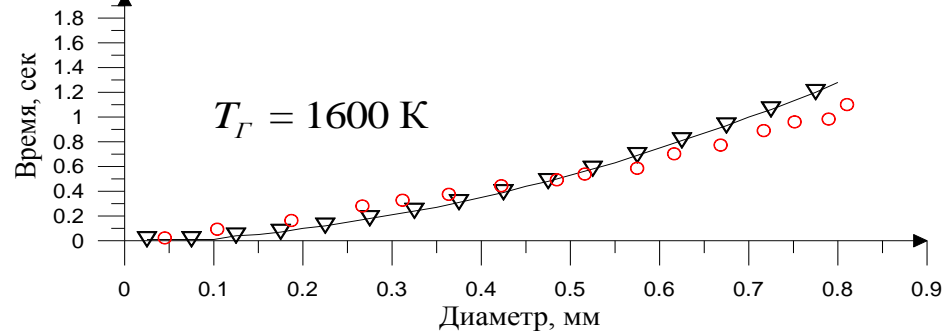
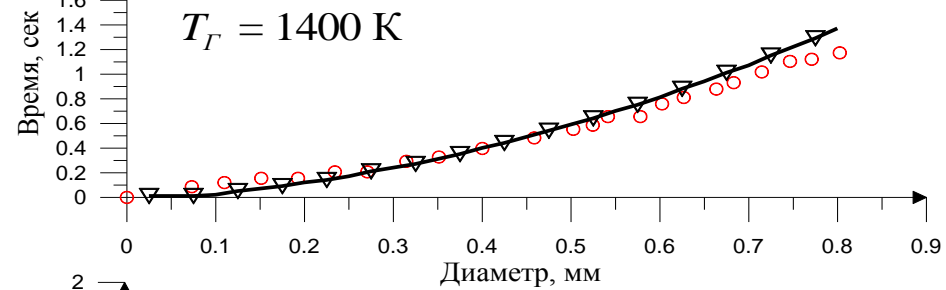
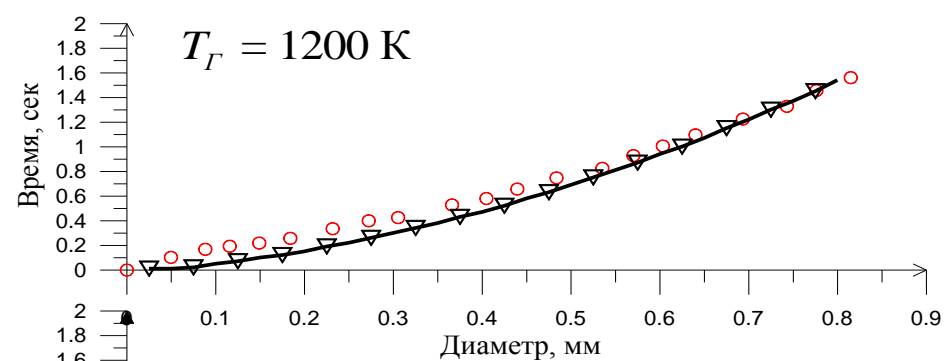
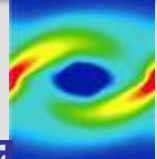


Зависимость частоты прецессии от расходов газа и жидкости

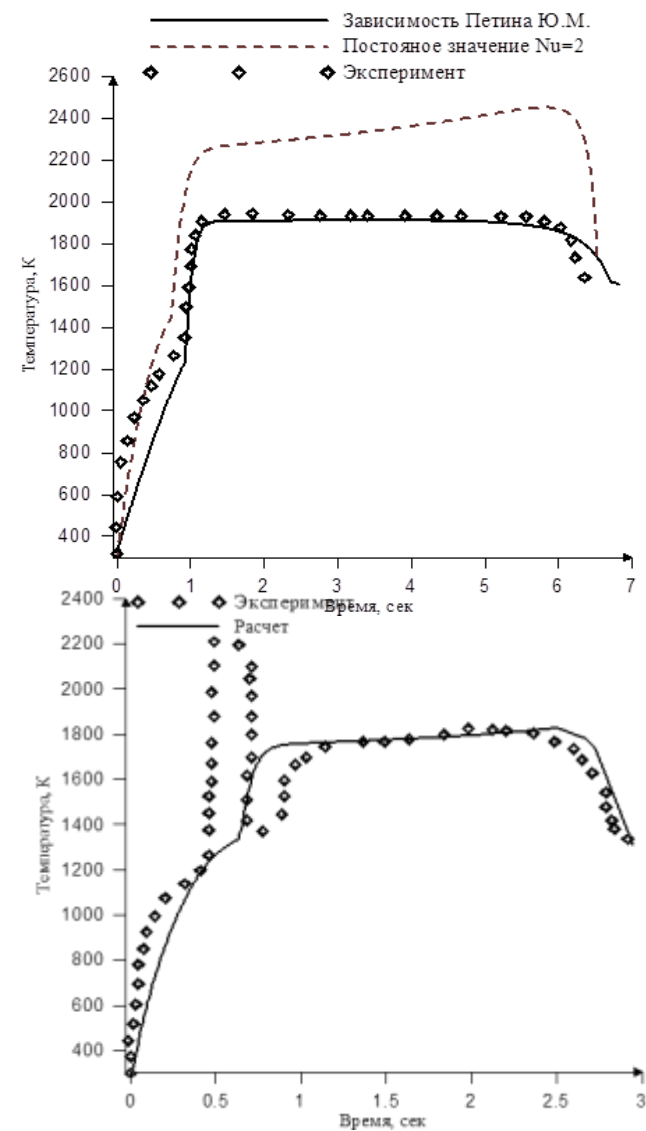


Время воспламенения коксового остатка частиц пыли назаровского угля пр

Изменение температуры частицы антрацита и назаровского угля диаметром 545 мкм. по мере выгорания при $T=1600\text{ K}$ и $O_2=21\%$

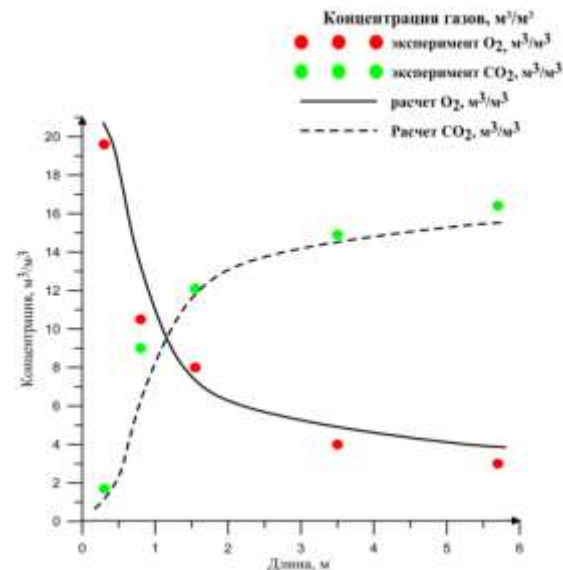
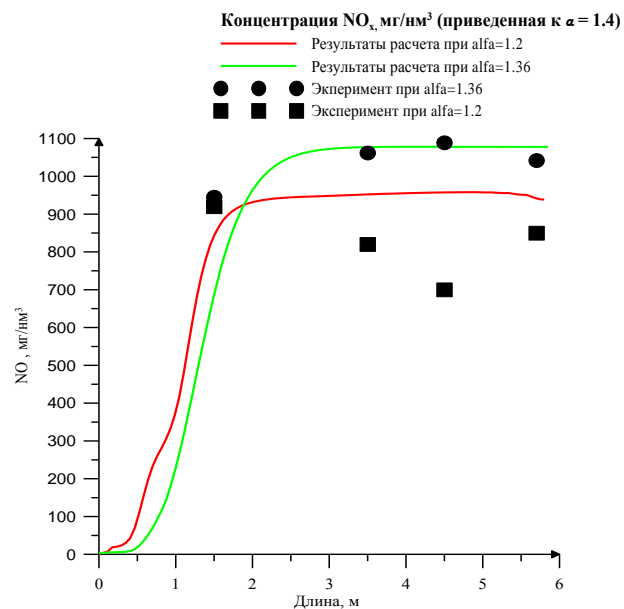
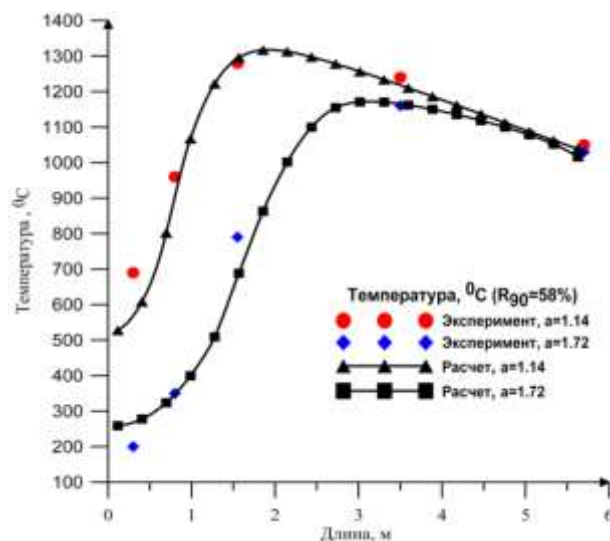
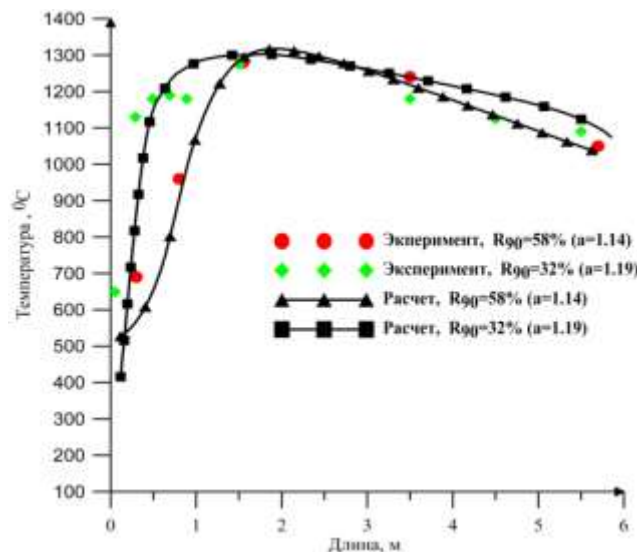
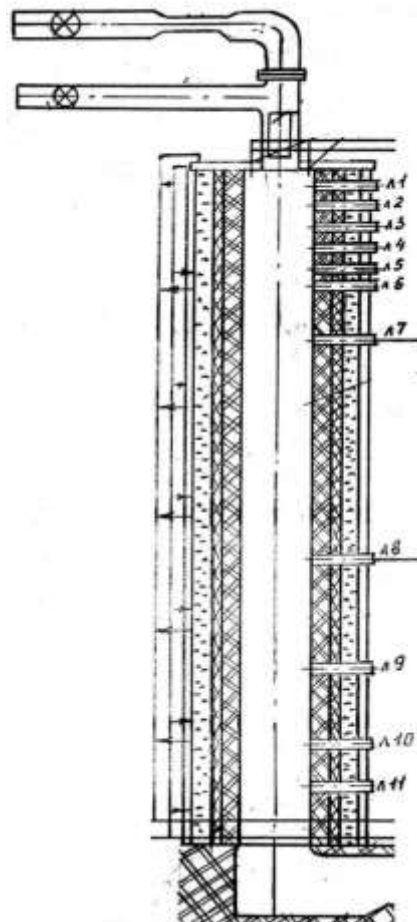
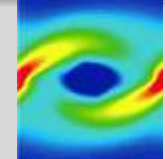


○ — ○ — ○ Эксперимент (В.И.Бабий, Ю.Ф.Куваев)
× — × — × Расчет



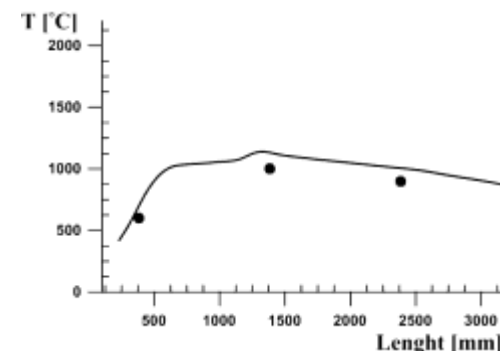
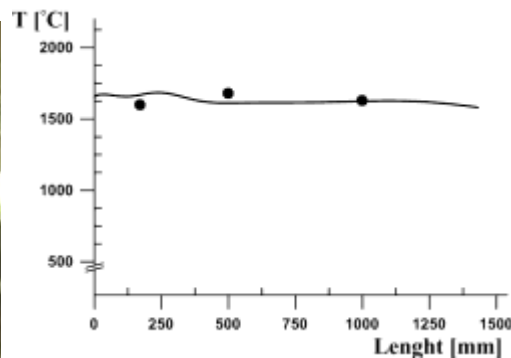
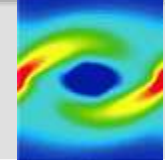


Моделирование огневого пылеугольного стенда

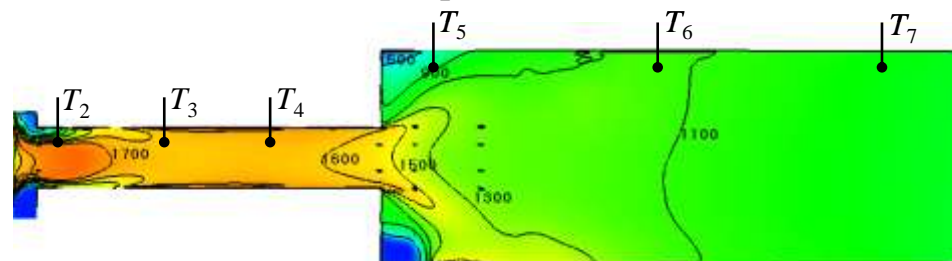
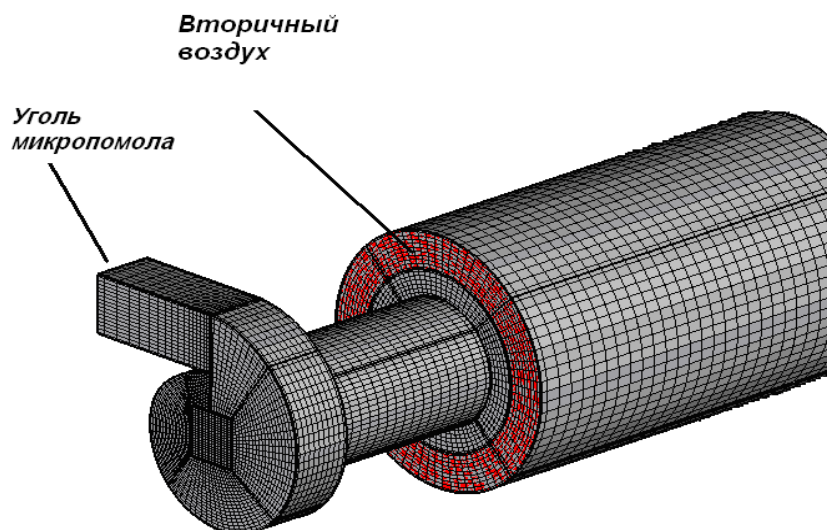




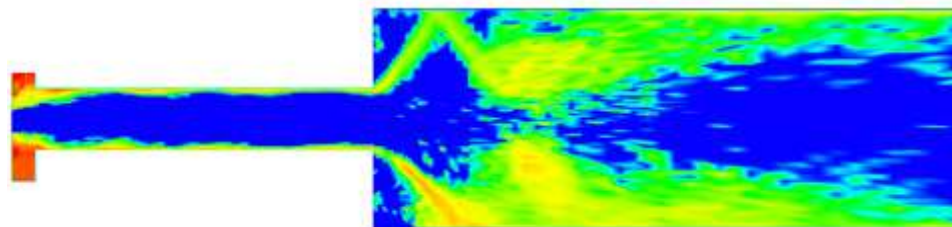
The swirl burner with ultrafine coal particles (Institute of Thermophysics of SB RAS)



Comparison of the computed and measured temperatures in the combustor for mechanically activated coal. Symbols: experiments; lines: computations. Left: temperature along the line of thermocouples in the burner. Right: temperature along the line of thermocouples in the furnace.



Temperature distribution in the combustor

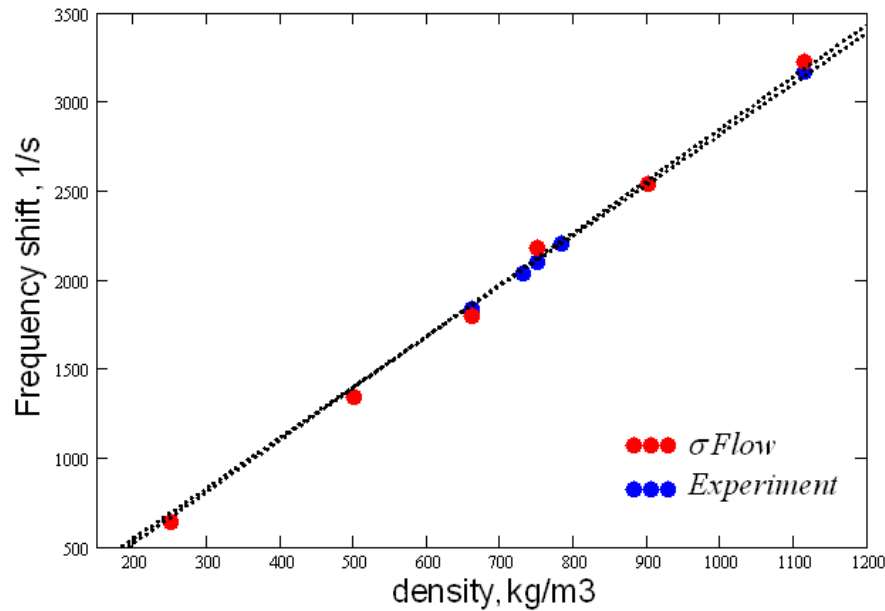
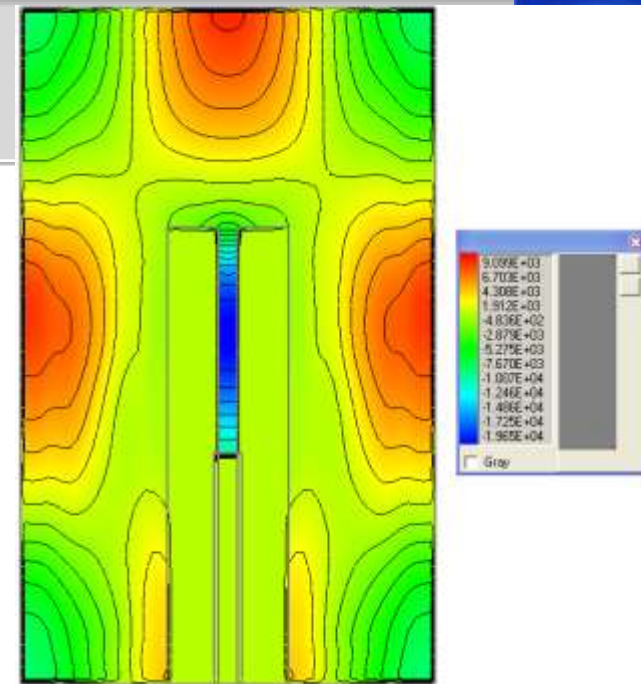
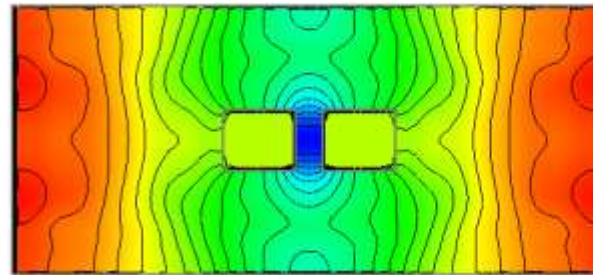
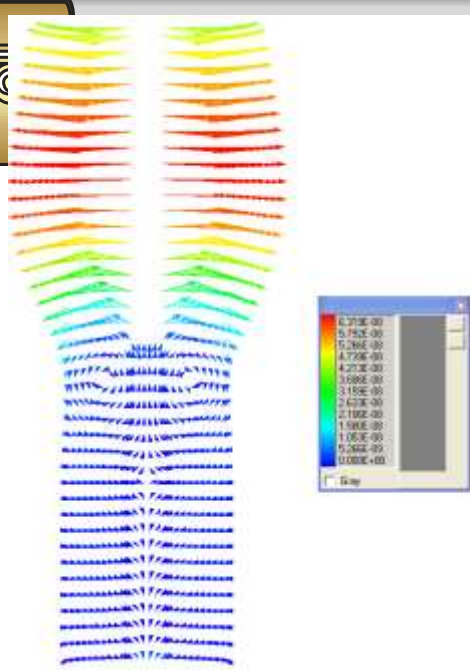


Particle concentration [kg/m³]

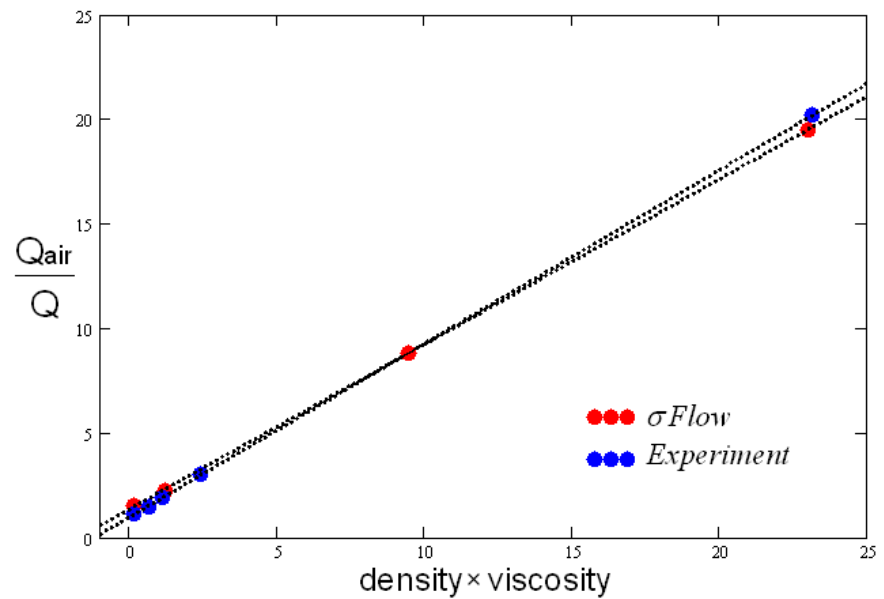


Задача виброакустики

Исследование датчика трения



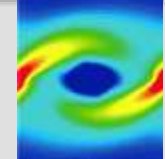
Зависимость сдвига
резонансной частоты датчика



Зависимость обратной
добротности колебаний датчика



Специализированное программное обеспечение



SigmaFlow

SigmaFlame

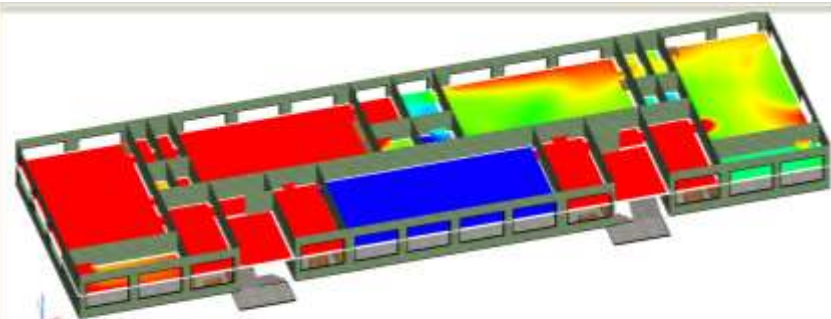
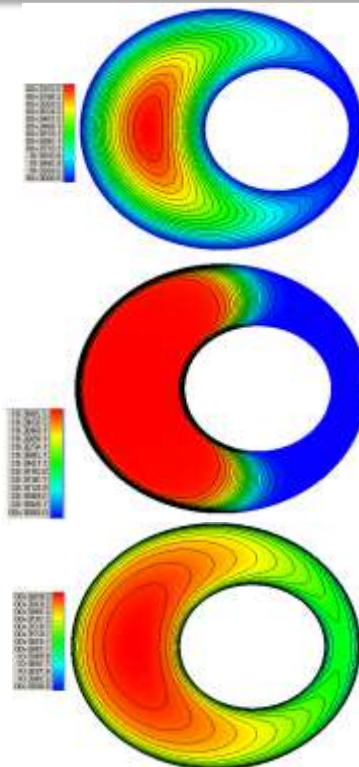
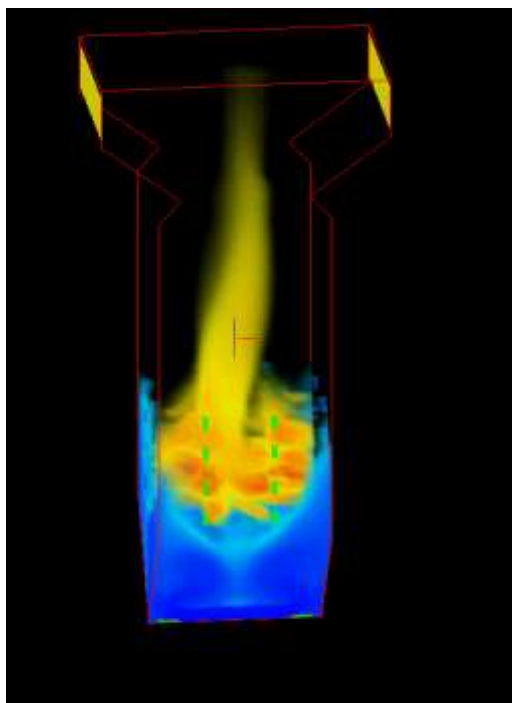
Моделирование топочных камер

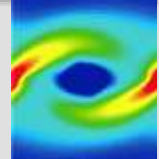
TubeFlow

Моделирование течения
бурового раствора в скважине

SigmaFire

Моделирование пожаров



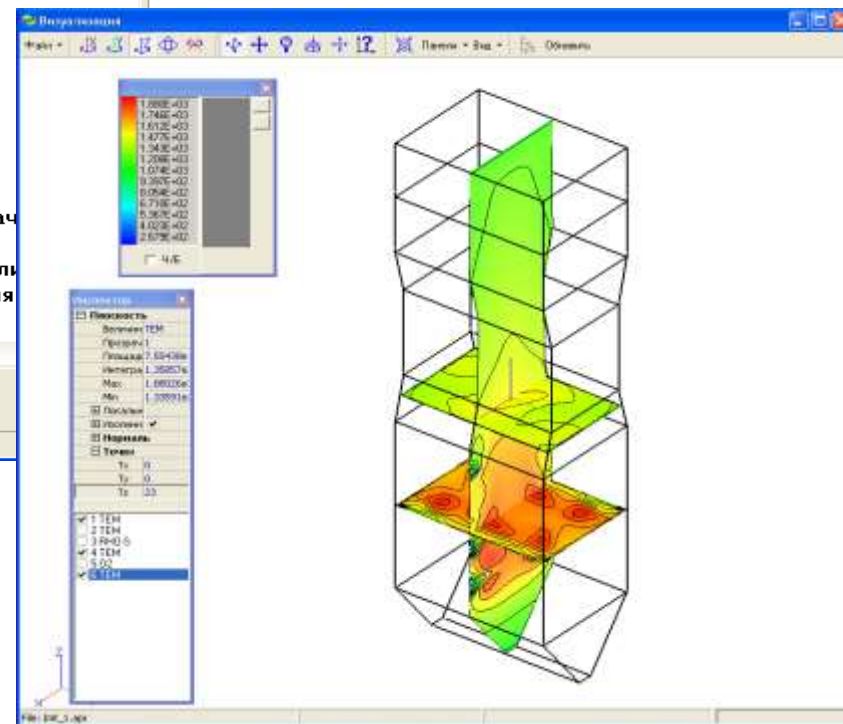
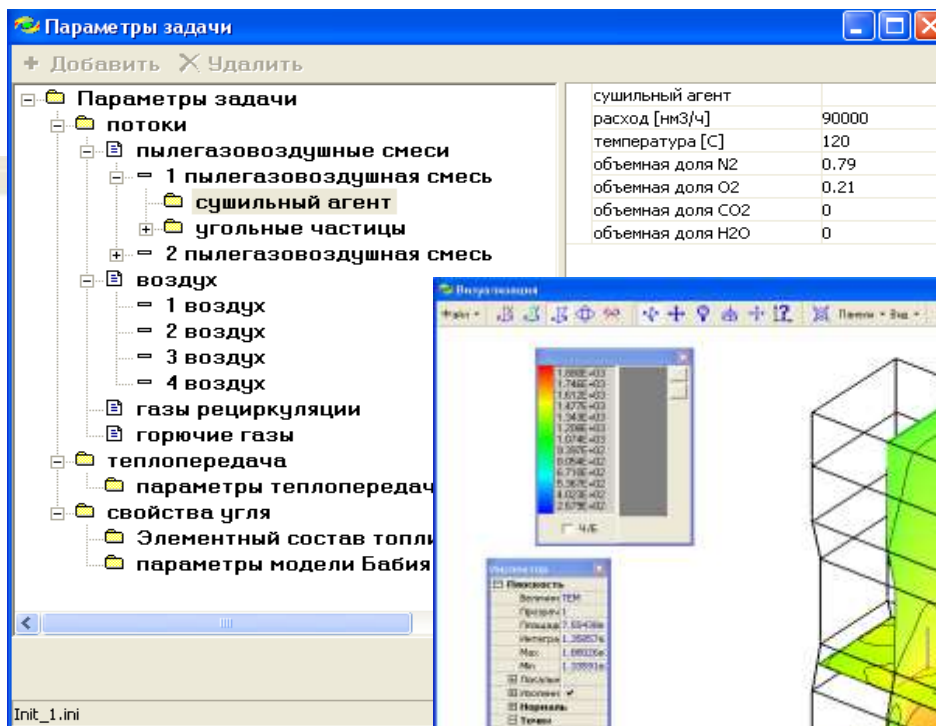
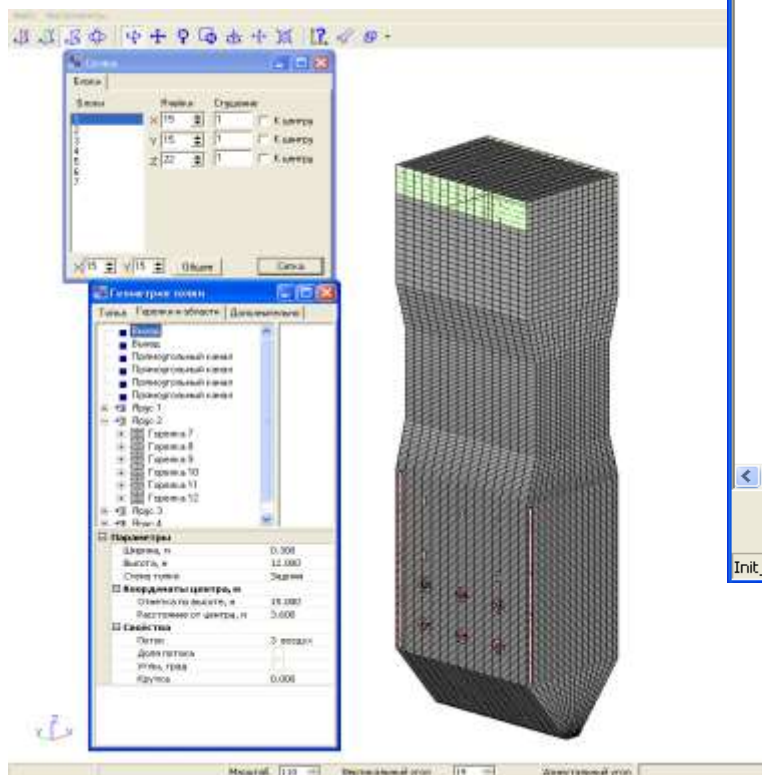


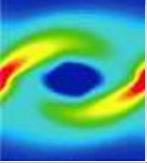
Основные требования:

пользователь инженер технолог;

быстрый расчет для многовариантной оптимизации

- геометрия и сетка / задание данных
- расчет / 3D визуализация





- **turbulence:**

modified high-Reynolds $k-\epsilon$ model
wall function (coarse grid $< 10^6$ cells)

- **radiative heat transfer:**

P-1 approximation for a grey medium + WSGG

- **volatile fuel components combustion:**

eddy break-up model

- **coal dust motion:**

PSI-cell method

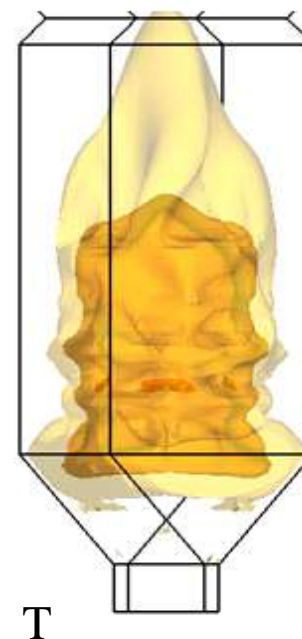
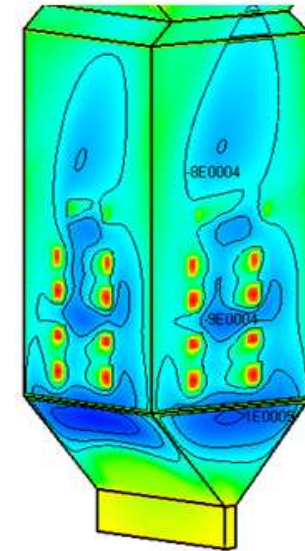
- **coal dust combustion:**

empirical four-stage model

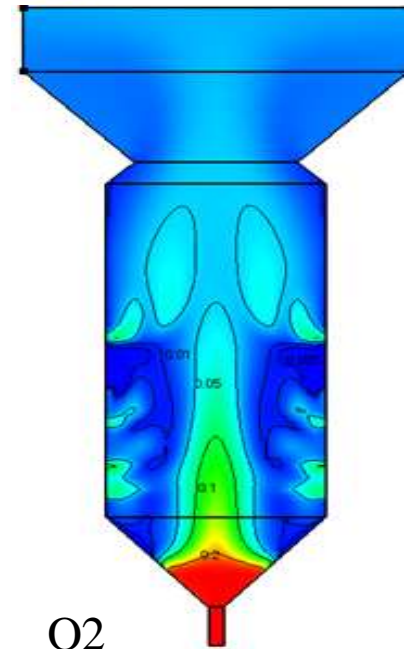
- **NO_x formation:**

thermal, prompt, fuel NO_x

Heat flux

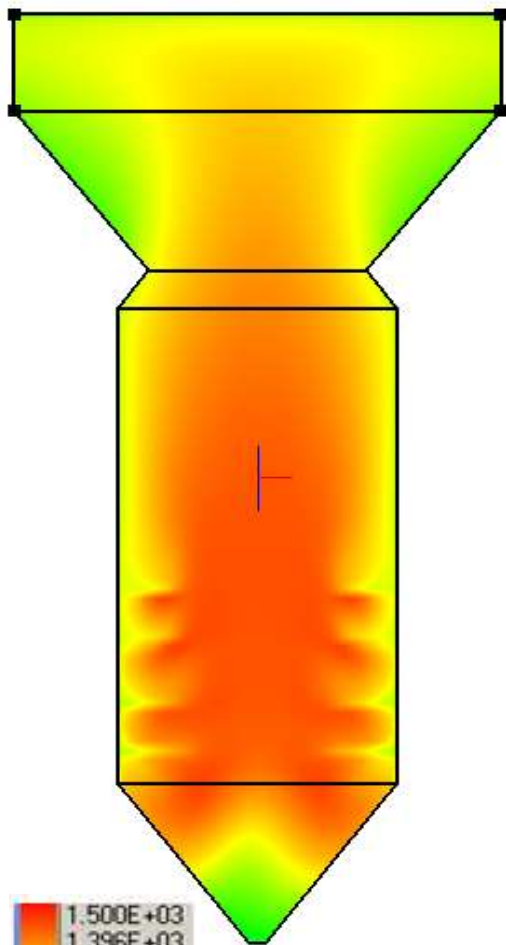
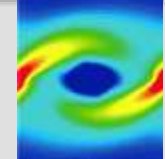


T

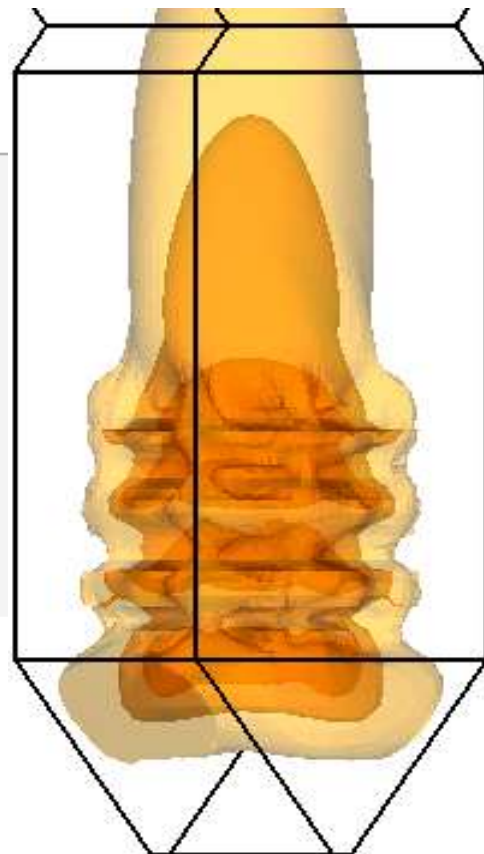


O₂

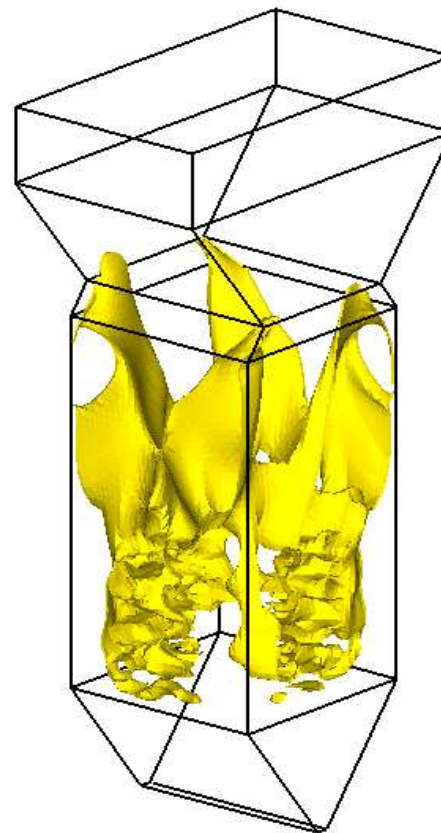
σflow



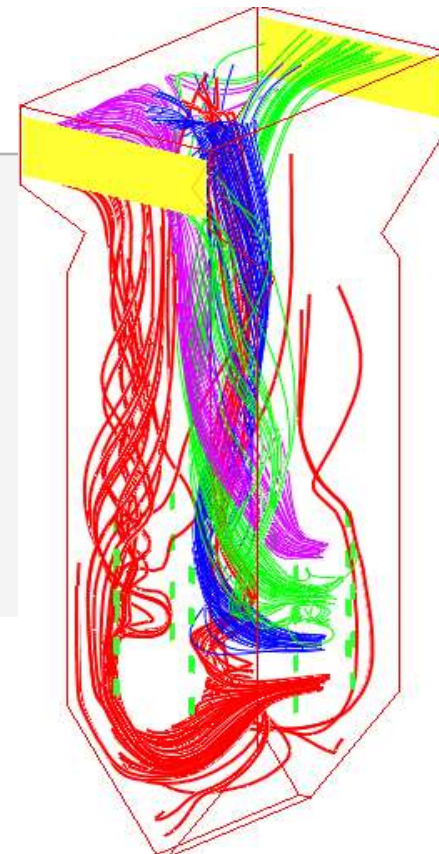
а)



б)



в)



г)

а) — температура в центральном сечении топочной камеры;

б) - изоповерхности температур факела (1400, 1300, 1200 °C)

в) - изоповерхность концентрации NO, мг/м³

г) - траектории частиц угля





Результаты расчета

коэффициент теплопередачи - 234 Вт/м²К. (без значительных локальных шлаковых отложений)
Температура среды в экранях 410 °С

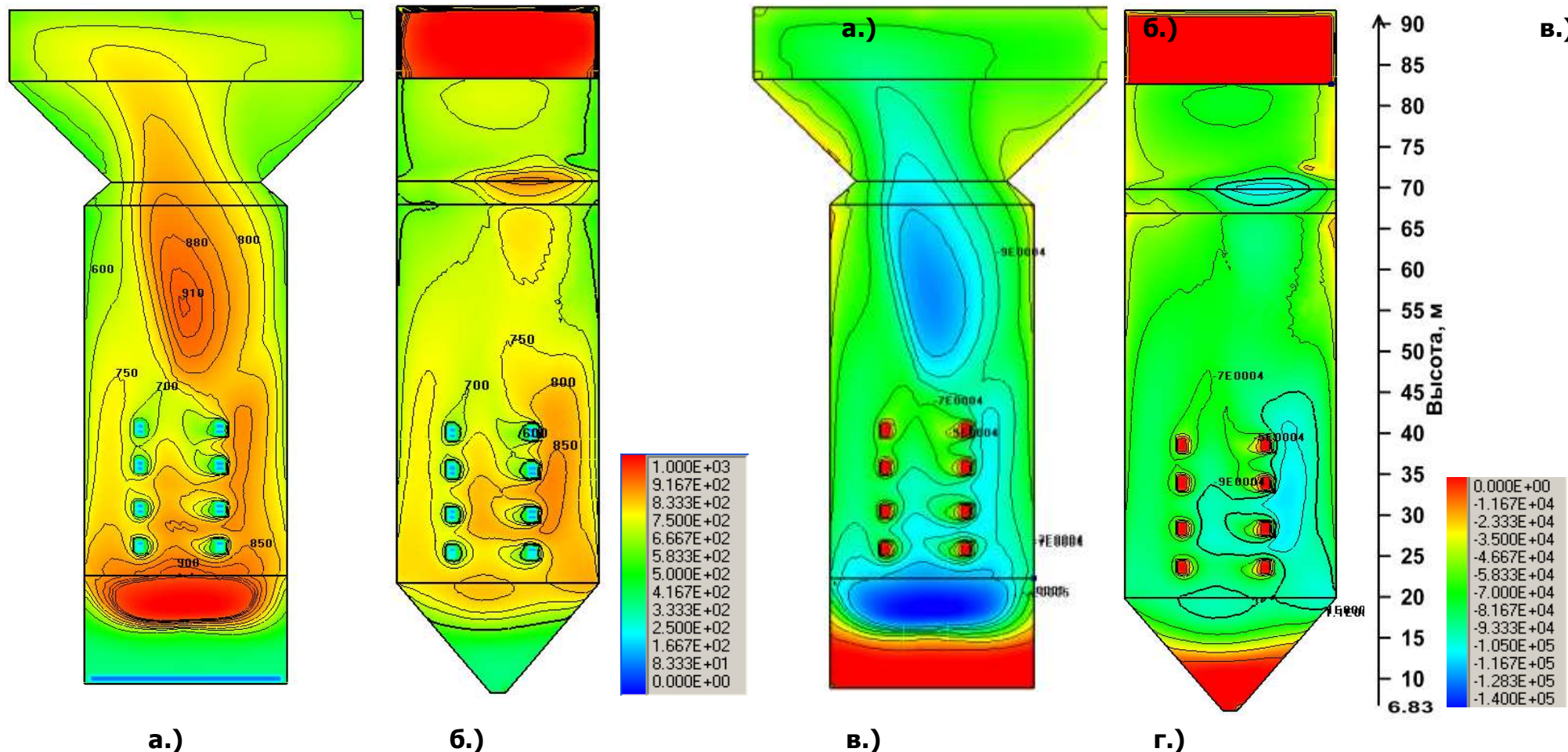
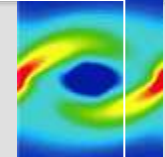


Рисунок а) поле температур на фронтальной стене, °С б) поле температур на левой стене, °С
в) Воспринятый тепловой поток на фронтальной стене, Вт/м²
г) Воспринятый тепловой поток на левой стене, Вт/м²



Результаты расчета. Шлакование фронтального экрана

Средняя температура на выходе из топке - 1068 °C

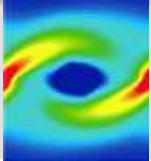
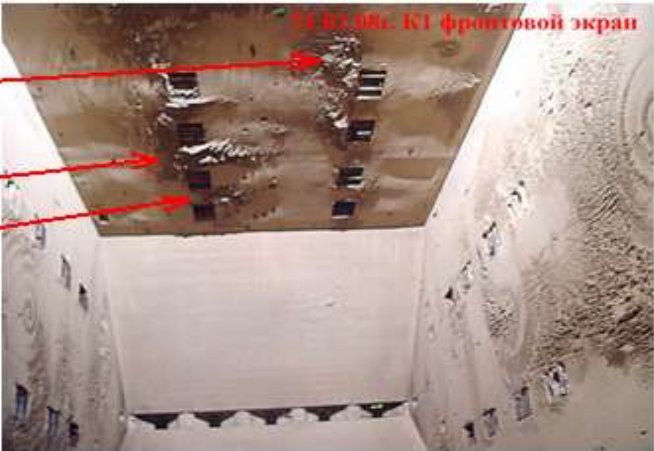


Рис. 18 -
Распределение
интенсивности
шлакования на
поверхности
топочной камеры,
кг/м²с

Таблица 3 -
Значение
температуры на
выходе из
топочной камеры
(73 м.)

$q(расч)=50 \text{ кВт/м}^2$
 $q(эксп)=60 \text{ кВт/м}^2$

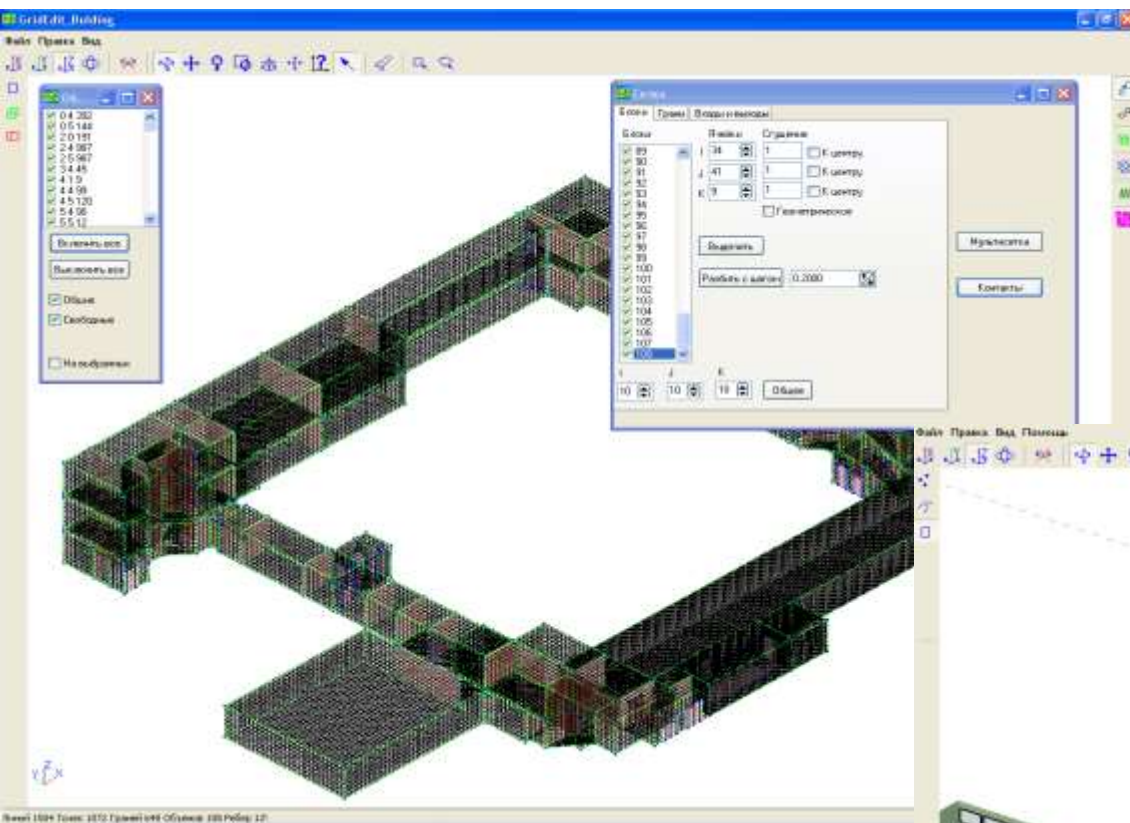
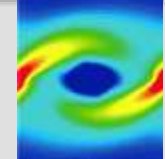
$q(расч)=75 \text{ кВт/м}^2$
 $q(эксп)=80 \text{ кВт/м}^2$



Начальное состояние экранов ($\alpha_{ср}=237 \text{ Вт/м}^2\text{К}$)	После шлакования экранов без учета локального шлакования ($\alpha_{ср}=207 \text{ Вт/м}^2\text{К}$).	После шлакования экранов с учетом локального шлакования ($\alpha_{ср}=207 \text{ Вт/м}^2\text{К}$). ($\alpha_{лок}=40 - 207 \text{ Вт/м}^2\text{К}$)
1041 °C	1051 °C	1060 °C

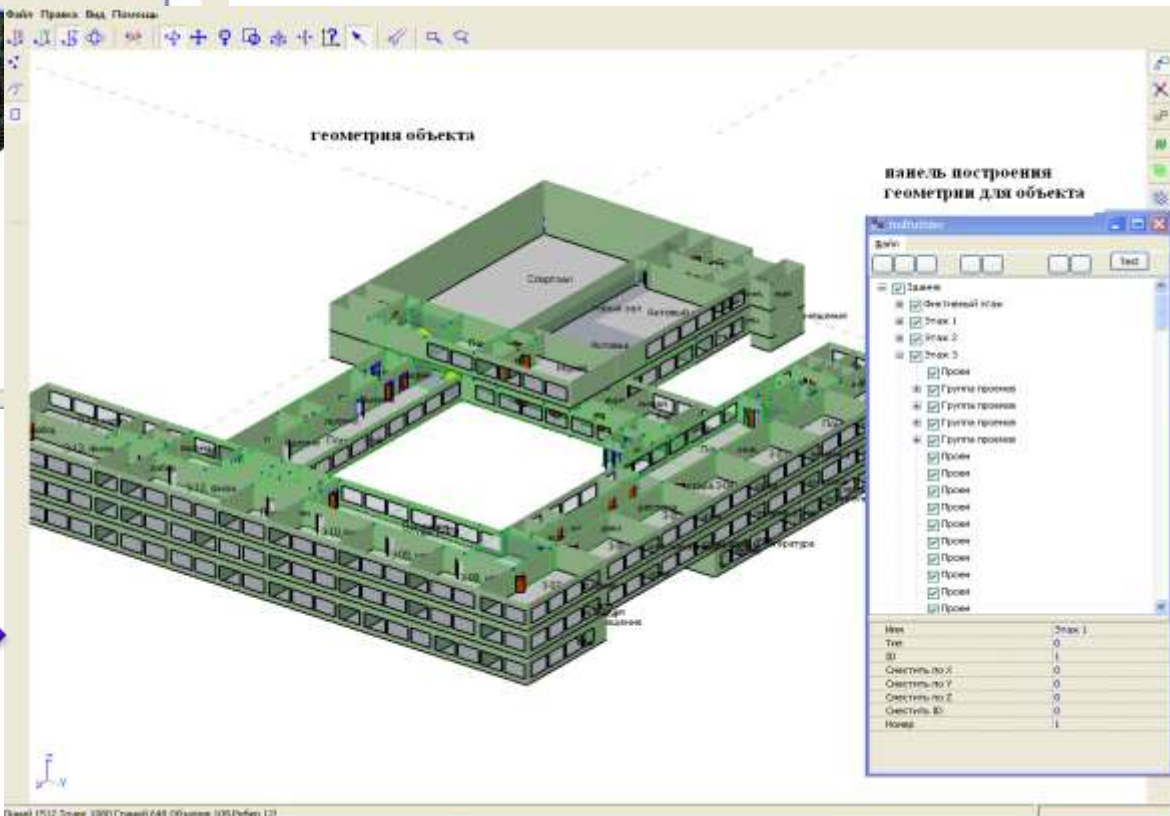


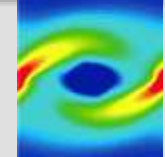
SigmaFire. Построение геометрии здания и расчетной области для моделирования пожара и эвакуации



каркас здания и сетка для расчета распространения ОФП

геометрия здания и расчетная область для расчета эвакуации



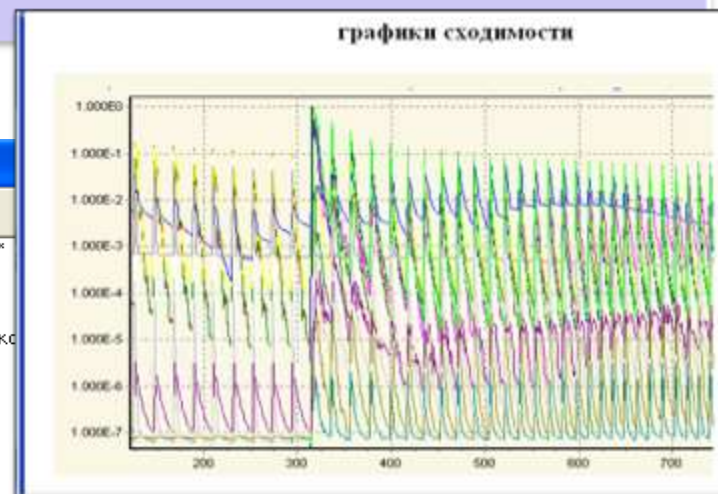
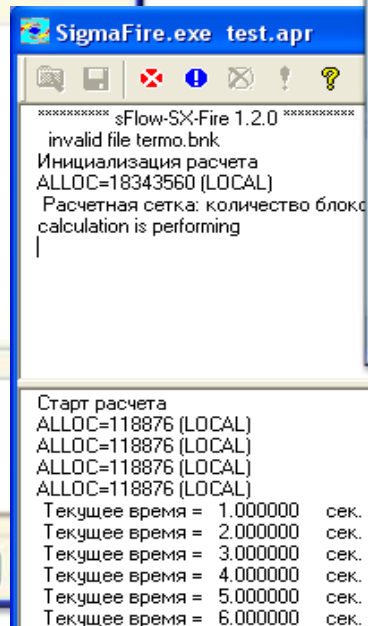
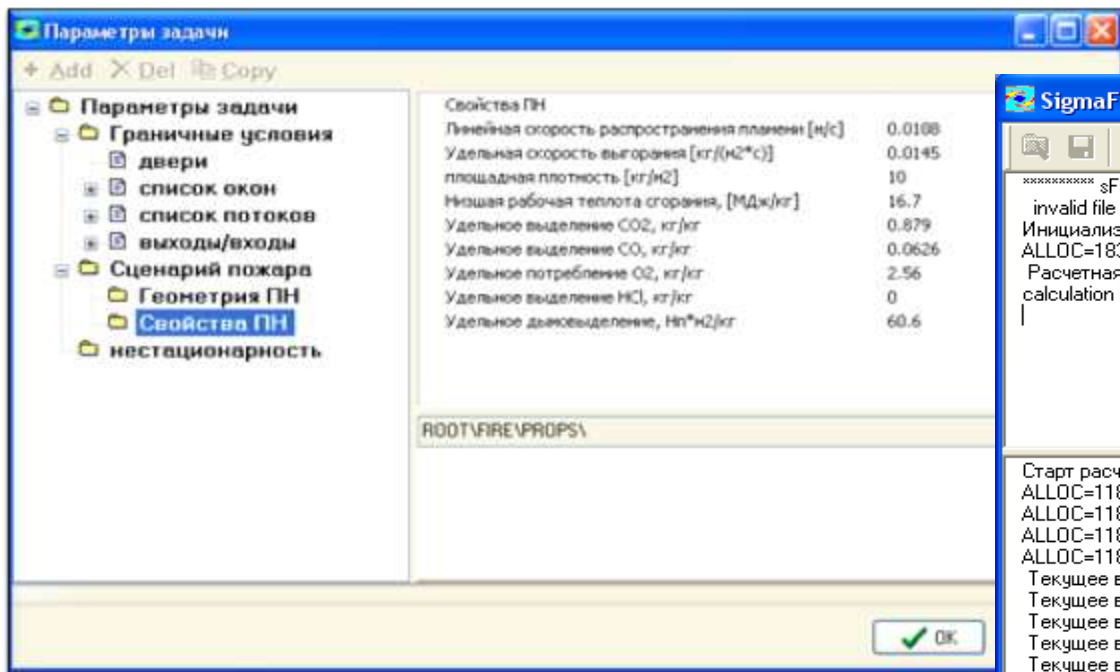


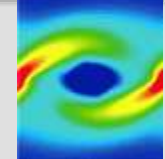
ЗАДАНИЕ СЦЕНАРИЯ ПОЖАРА

- формирование краевых условий задачи
- настройки решателя

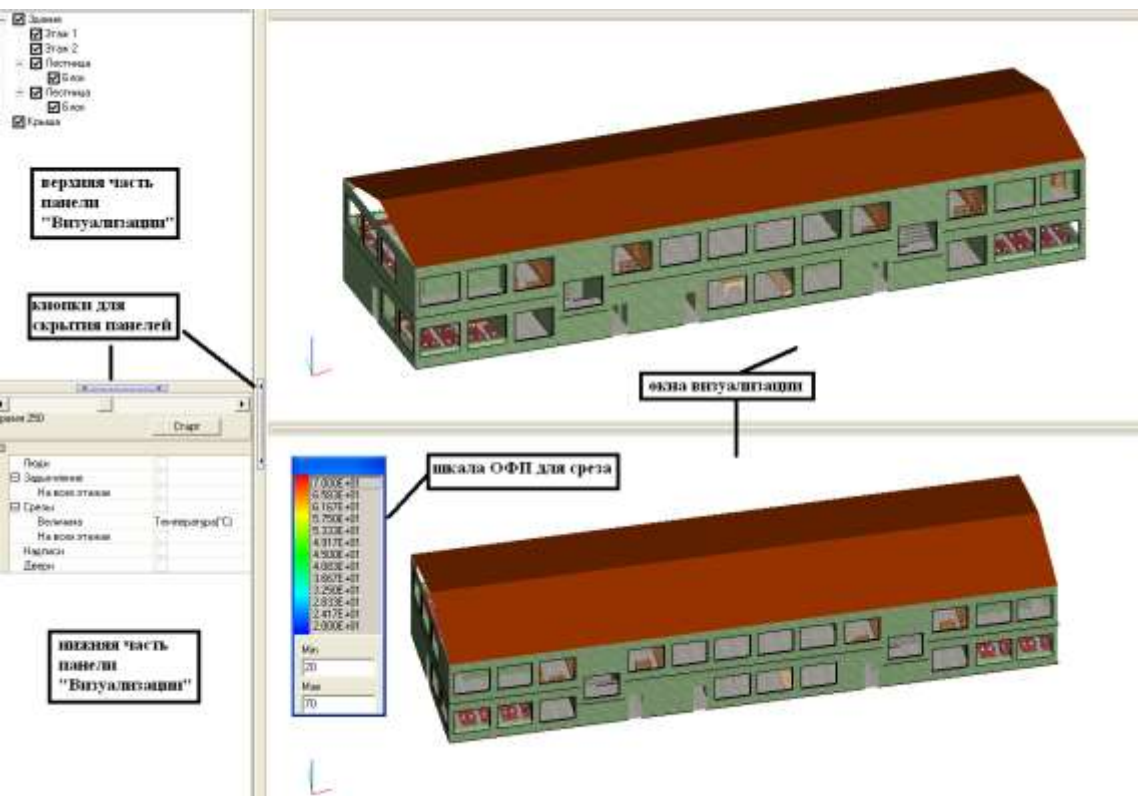
РАСЧЕТ ДИНАМИКИ ОПАСНЫХ ФАКТОРОВ ПОЖАРА

- однопроцессорный расчет
- мониторинг расчета

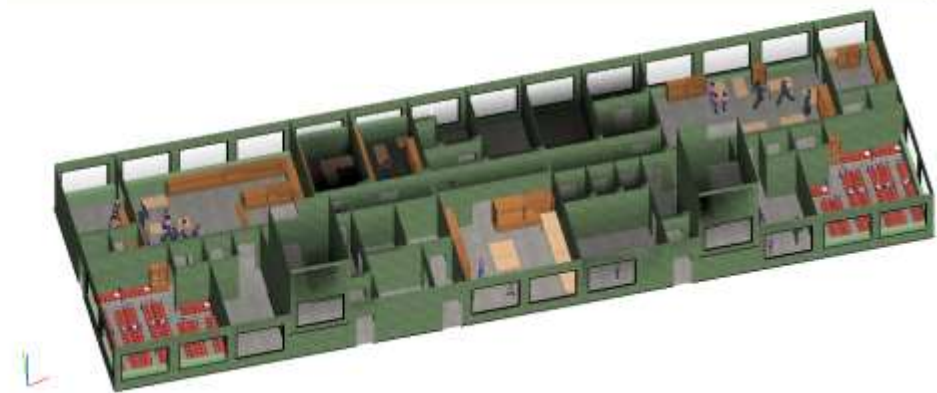
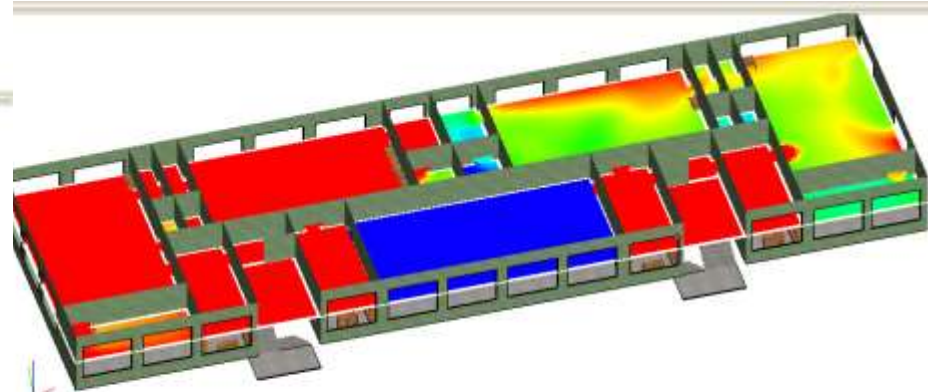




3D МОДЕЛЬ ЗАДАНИЯ

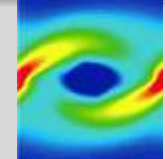


ВИЗУАЛИЗАЦИЯ РАЗВИТИЯ ПОЖАРА И ЭВАКУАЦИИ



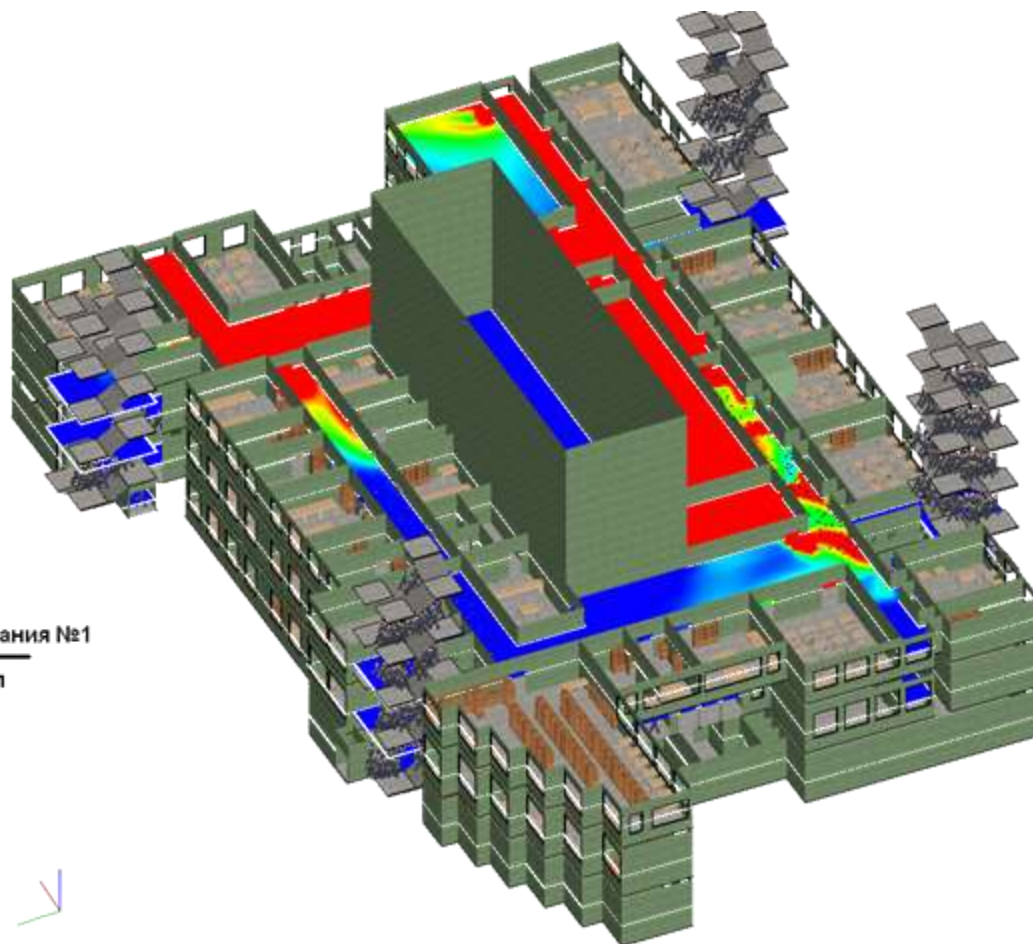
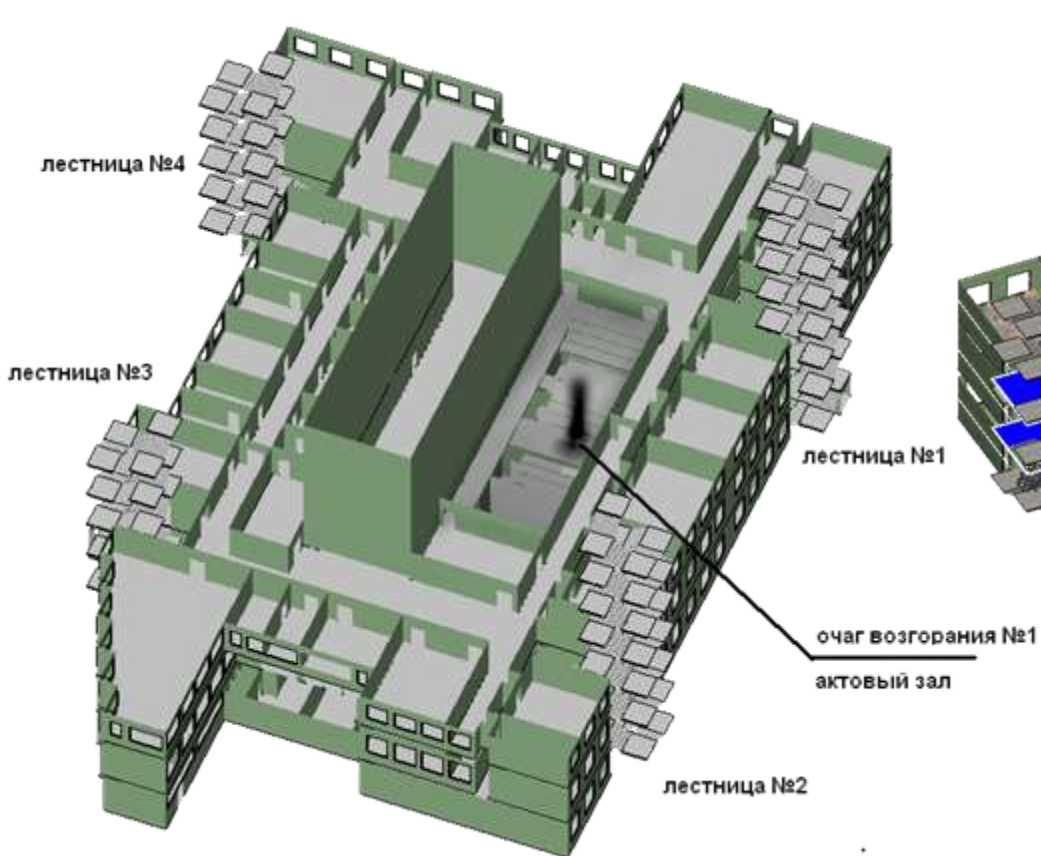


Модельный сценарий пожара в здании Института нефти и газа Сибирского федерального университета



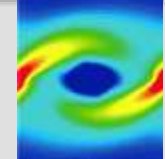
СЦЕНАРИЙ ПОЖАРА

250 СЕК. ПОСЛЕ НАЧАЛА ПОЖАРА

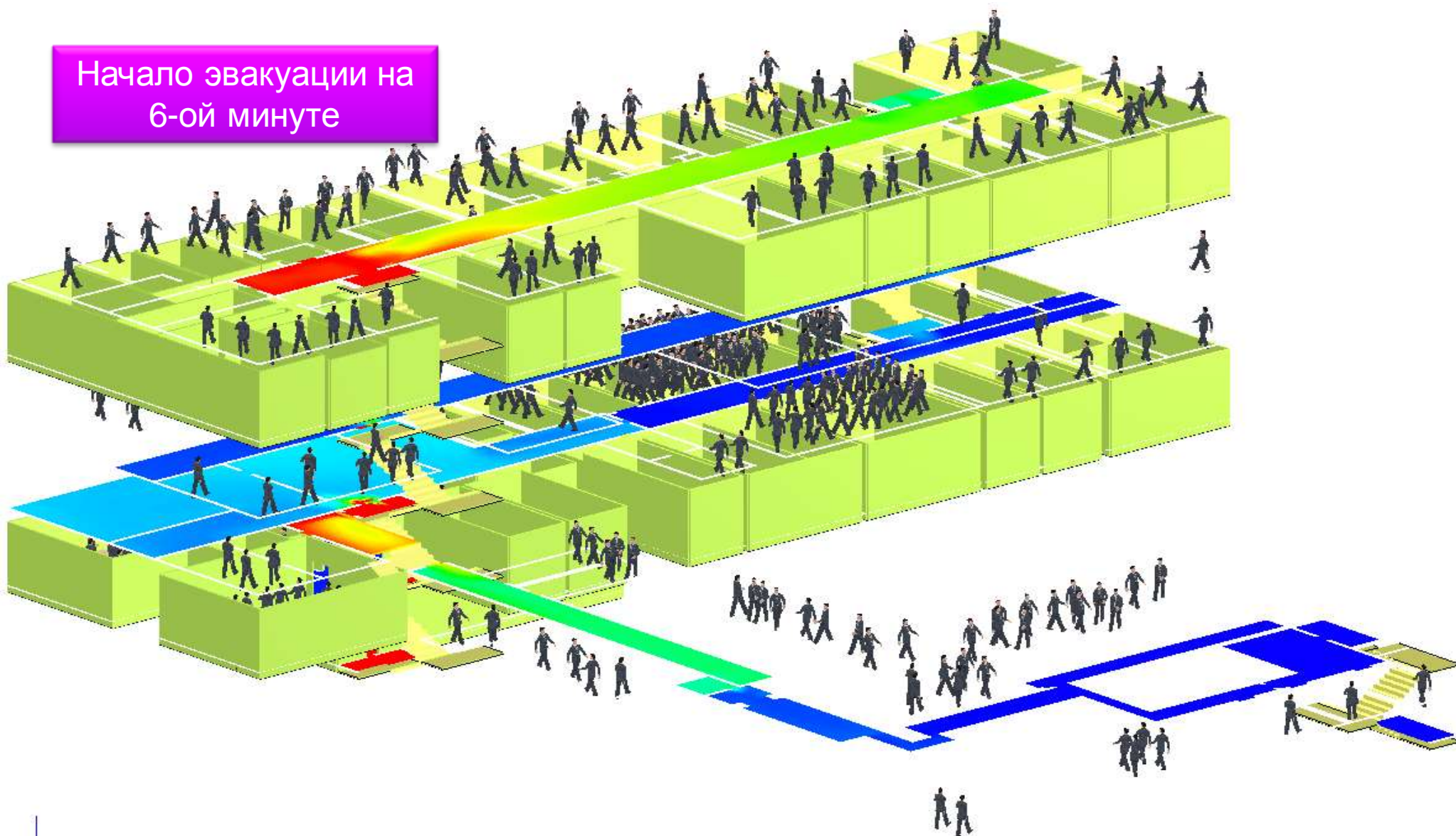




Пример расчета развития пожара и эвакуации из офисного здания

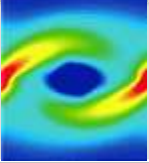


Начало эвакуации на
6-ой минуте





TubeFlow. Mud flow through the annulus

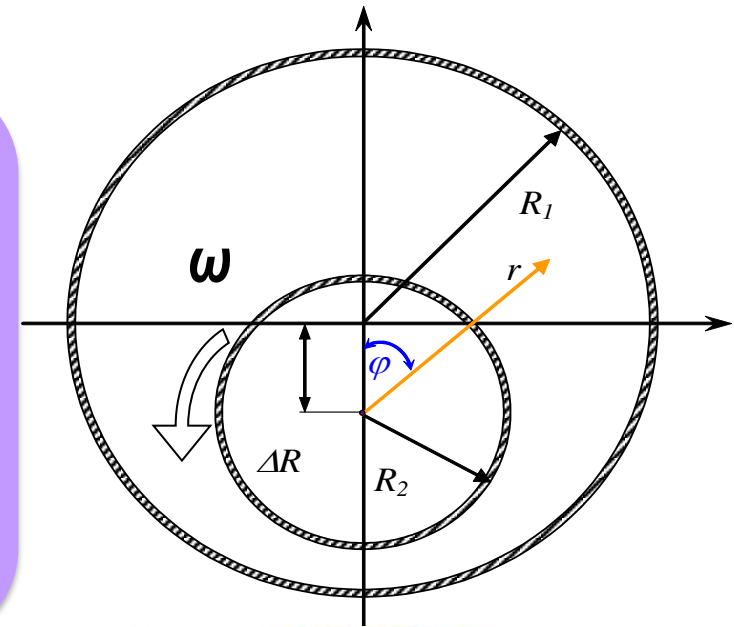


Algorithms and software development for numerical modeling of mud flows in the borehole.

Input parameters

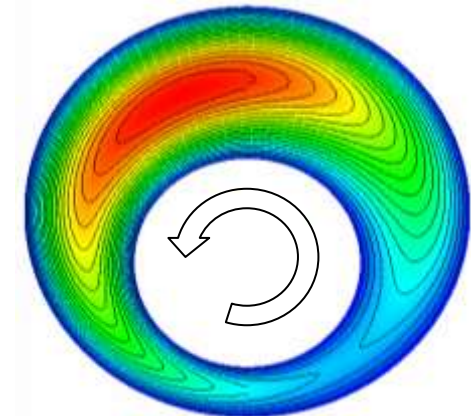
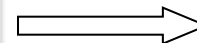
radius of outward cylinder,
radius of inner cylinder,
dimensionless eccentricity,
fluid density,
fluid rheology,
inner cylinder rate of rotation,
axial flow rate [kg/s],

R_{Ir}
 R_2
 $e = \Delta R / (R_1 - R_2)$
 ρ
Herschel – Bulkley
 ω
 Q



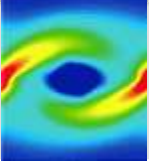
Output parameters

pressure drop, dp/dz
torques
velocity distribution in cross-section

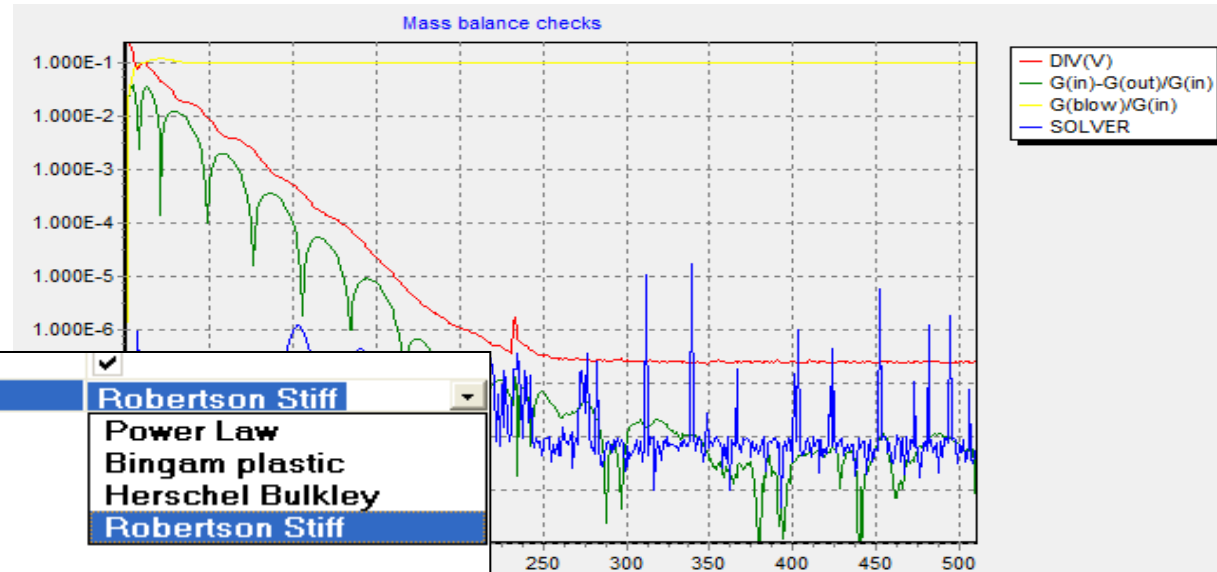
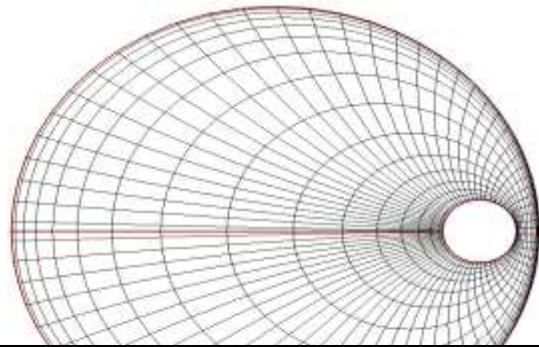




TubeFlow. Mud flow through the annulus



Special CFD software for simulation of drilling fluid flow in borehole



- Parameters of calculations
 - Geometry of borehole
 - Computational grid
 - Physical parameters
 - ☒ non-Newtonian fluid
 - Power Law
 - Bingham plastic
 - Herschel Bulkley
 - Robertson Stiff

- ☐ non-Newtonian Fluid
 - Reology model

- ☒ Robertson Stiff
- Power Law
- Bingham plastic
- Herschel Bulkley
- Robertson Stiff

- Parameters of calculations
 - Geometry of borehole
 - Computational grid
 - Physical parameters
 - ☒ non-Newtonian fluid
 - Power Law
 - Bingham plastic
 - Herschel Bulkley**
 - Robertson Stiff

Herschel Bulkley	
n	0.98
K (Pa*s^n)	0.15
tau0 (Pa)	40

PIPE GEOMETRY: L (m), D1 (m), D2 (m)
1.000000 0.500000 0.250000

INTEGRAL PARAMETERS:
Area of section (m2), mass flow rate (kg/s), average (bulk) velocity (m/s)
0.1470739 1.000000 6.7993100E-03

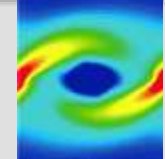
NONDIMENSIONAL FLOW PARAMETERS: Re, Re (Rotational), Taylor number
0.1049397 1.9292351E-02 3.7219480E-04

PRESSURE DROP: Hydrostatic (Pa), Hydrodynamic (Pa), Full (Pa)
9810.000 8.230088 9818.230

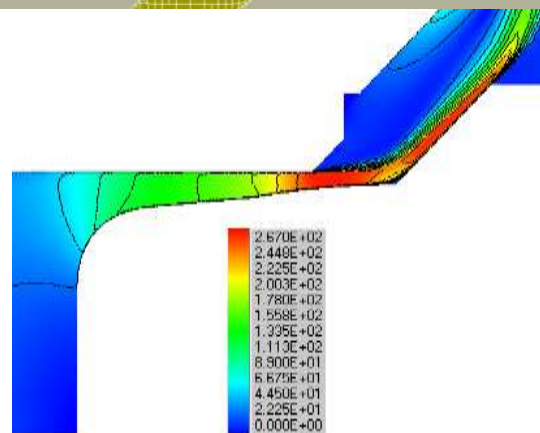
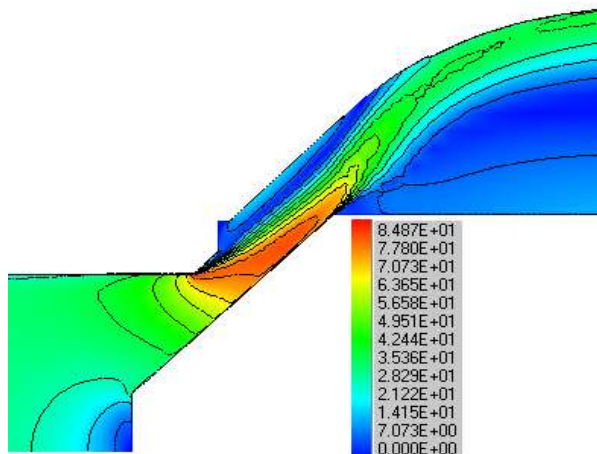
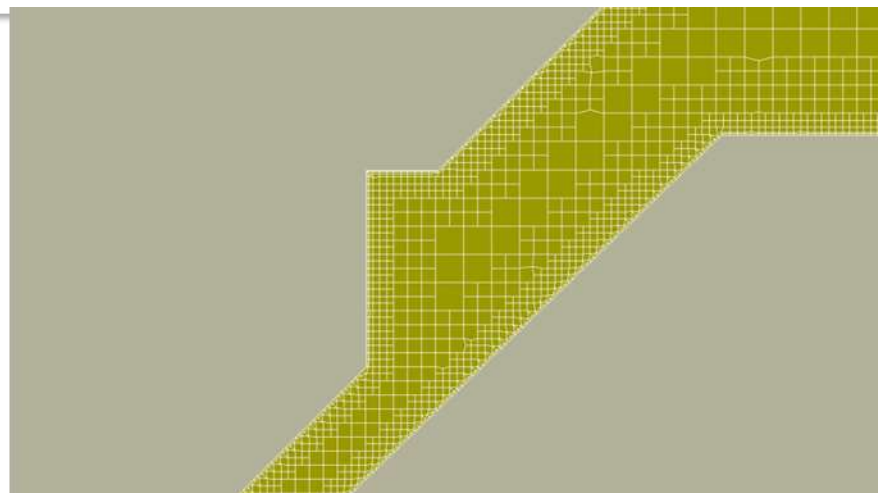
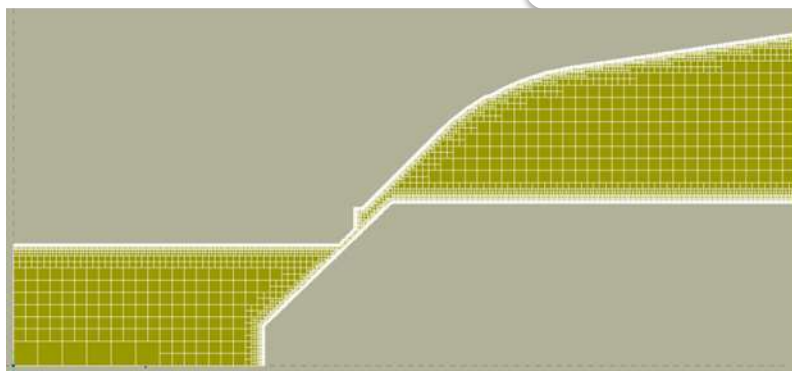
PRESSURE DROP PER UNIT LENGTH:
Hydrostatic (Pa/m), Hydrodynamic (Pa/m), Full (Pa/m)
9810.000 8.230088 9818.230



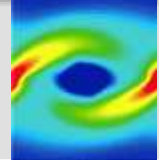
Направления развития



CAD– автоматический построитель сеток



velocity magnitude, m/s



1. MultiGPU, Xeon Phi

2. Турбулентность:

PANS

RANS/LES

3. Многофазность:

эйлер

гранулированные среды

ELSA для распыливания жидкости

4. Горение:

EDC

flamelet

5. Конденсация пара

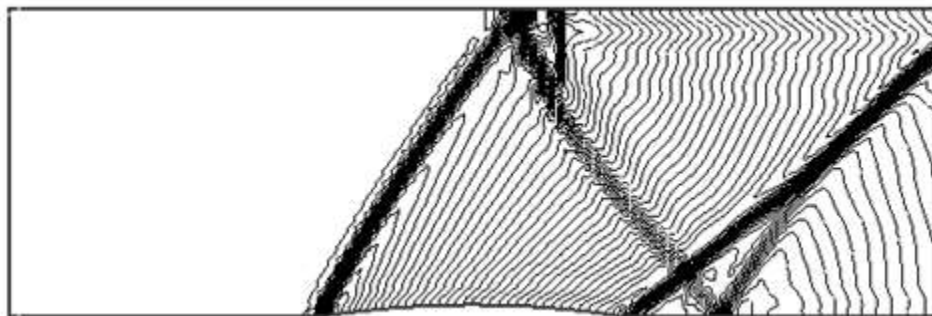
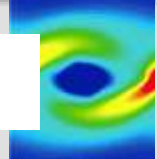
6. Гибридные модели CFD-гидравлические сети

7. Шум FWH

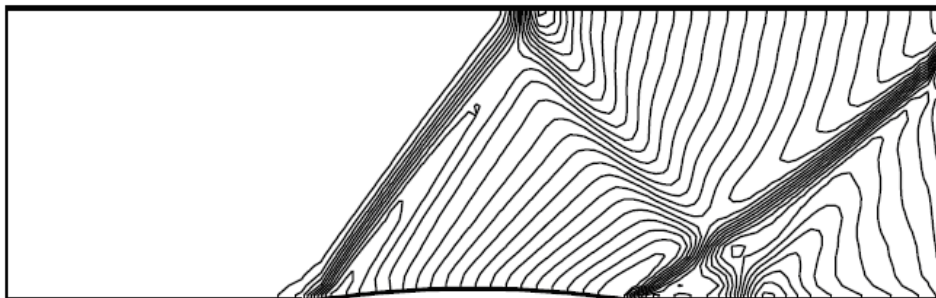


СЖИМАЕМЫЕ ТЕЧЕНИЯ, СВЕРХЗВУКОВЫЕ ТЕЧЕНИЯ

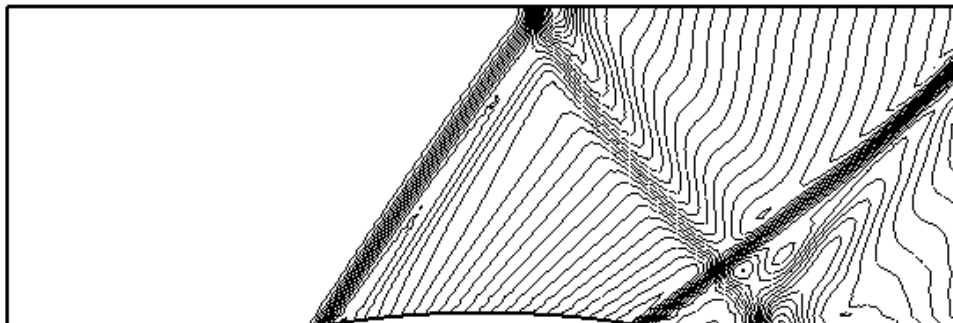
Обтекание выпуклости $M=1,4$.



FLUENT

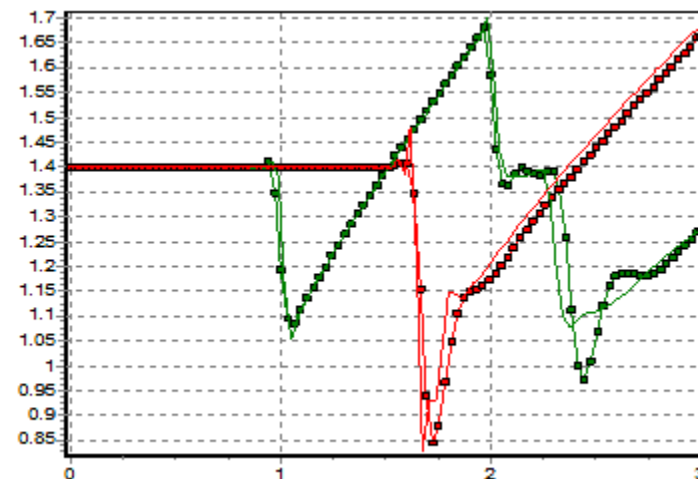


CFD AUB

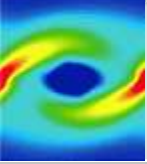


σ Flow

Распределение числа Маха
на нижней поверхности



линия- FLUENT
точки - σ Flow



(U)RANS

1. k - ω SST model
2. Elliptic relaxation eddy viscosity model k - ε - ζ - f
3. Differential Reynolds Stress model

Hybrid (RANS/LES)

Zeta- f model:

$$\frac{\partial \rho k}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v} k) = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] + P - \rho \varepsilon \cdot F_{DES}$$

$$\frac{\partial \rho \varepsilon}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v} \varepsilon) = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon \right] + \frac{C_{\varepsilon 1} P - C_{\varepsilon 2} \rho \varepsilon}{T}$$

$$\frac{\partial \rho \zeta}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v} \zeta) = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\zeta} \right) \nabla \zeta \right] + \rho f - \frac{P}{k} \zeta$$

$$L^2 \nabla^2 f - f = \frac{1}{T} (\zeta - \zeta_{iso}) \left(C_{1f} - 1 + C_{2f} \frac{P}{\rho \varepsilon} \right)$$

Closure equations:

$$\mu_t = \rho C_\mu k T \zeta$$

$$T = \max \left[\min \left(\frac{k}{\varepsilon}, \frac{0.6}{C_\mu \sqrt{6} |S| \zeta} \right), c_T \left(\frac{\nu}{\varepsilon} \right)^{1/2} \right]$$

$$L = C_L \max \left[\min \left(\frac{k^{3/2}}{\varepsilon}, \frac{k^{1/2}}{C_\mu \sqrt{6} |S| \zeta} \right), c_\eta \left(\frac{\nu^3}{\varepsilon} \right)^{1/4} \right]$$

DES:

$$F_{DES} = \max \left(\frac{L_t}{C_{DES} \Delta}, 1 \right) \quad L_t = \frac{k^{3/2}}{\varepsilon} \quad \Delta = \max(\Delta_x, \Delta_y, \Delta_z)$$