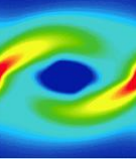




CFD - weekend 2016



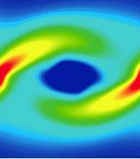
Комплекс программ SigmaFlow 2016

Дектерёв А.А., Гаврилов А.А.

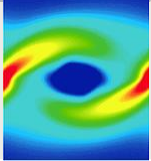
Институт Теплофизики СО РАН



Численный метод. Несжимаемые течения



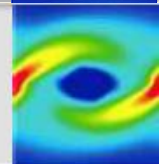
- **Метод контрольного объема** для неструктурированной сетки
- **SIMPLE** подобный метод для связи полей давления и скорости; совмещенные сетки с монотонизацией **Pxi—Чоу**
- Нестационарные слагаемые — неявный трёхслойный метод, метод Кранка—Николсона
- Аппроксимация конвективных потоков — **CDS, High-order CDS, QUICK**, family of **TVD** schemes ...
- Решение системы алгебраических уравнений:
стабилизированный метод бисопряжённых градиентов (**BiCGStab**),
алгебраический многосеточный метод (**amgcl, Демидов Д.**)
- **Распараллеливание** — разбиение на подобласти (MeTiS), MPI



- стационарные и нестационарные течения;
- турбулентность (RANS, RANS/LES, LES);
- 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 в потоке газа (Лагранж, Эйлер);
- процессы с фазовыми переходами (кавитация, кристаллизация);
- течения со свободной поверхностью;
- течения газа и жидкости с подвижными твердыми телами



Специализированное программное обеспечение



SigmaFlow

SigmaFlame

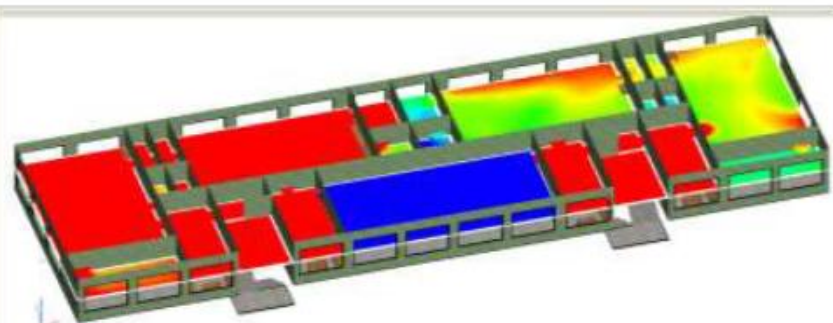
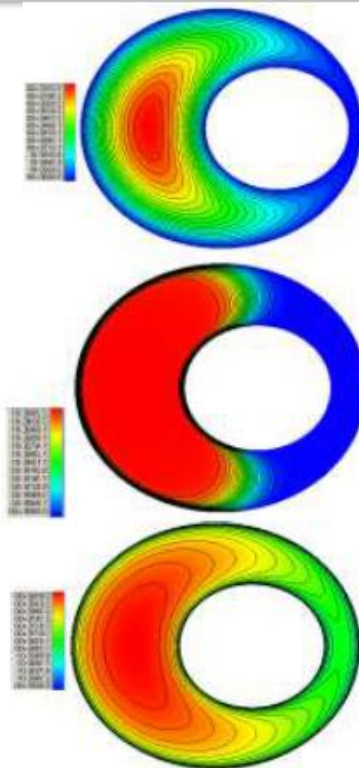
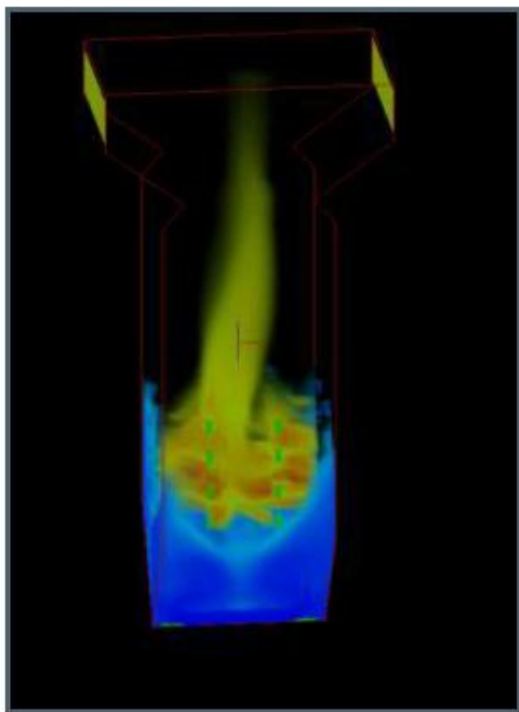
Моделирование топочных камер

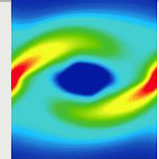
TubeFlow

Моделирование течения
бурового раствора в скважине

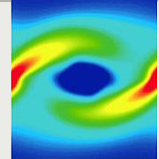
SigmaFire

Моделирование пожаров





- использование передачи геометрических данных из CAD систем и автоматическое построение пространственной расчетной сетки
- моделирование двухфазных ламинарных и турбулентных течений
- моделирование радиационного теплообмена
- гибридное моделирование CFD-гидравлические сети
- разработка версии программы для расчета на multi-гри кластерных системах



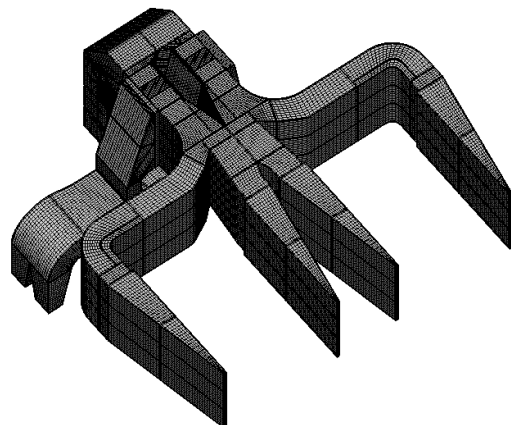
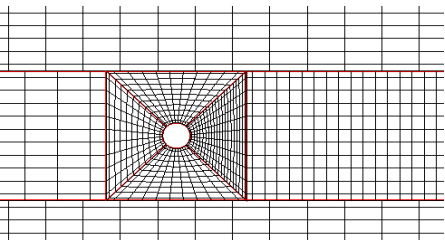
- **использование передачи геометрических данных из CAD систем и автоматическое построение пространственной расчетной сетки**
- моделирование двухфазных ламинарных и турбулентных течений
- моделирование радиационного теплообмена
- гибридное моделирование CFD-гидравлические сети
- разработка версии программы для расчета на multi-гри кластерных системах



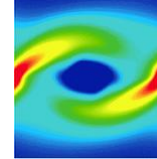
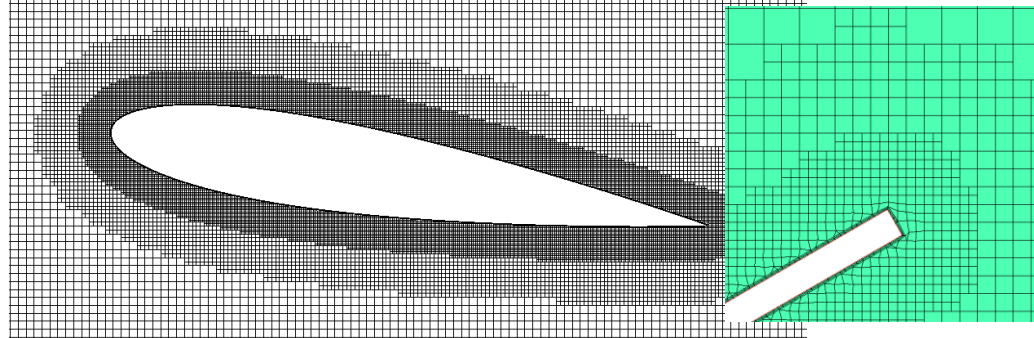
Расчетные сетки

Собственные генераторы сеток

1. Многоблочная структурированная сетка

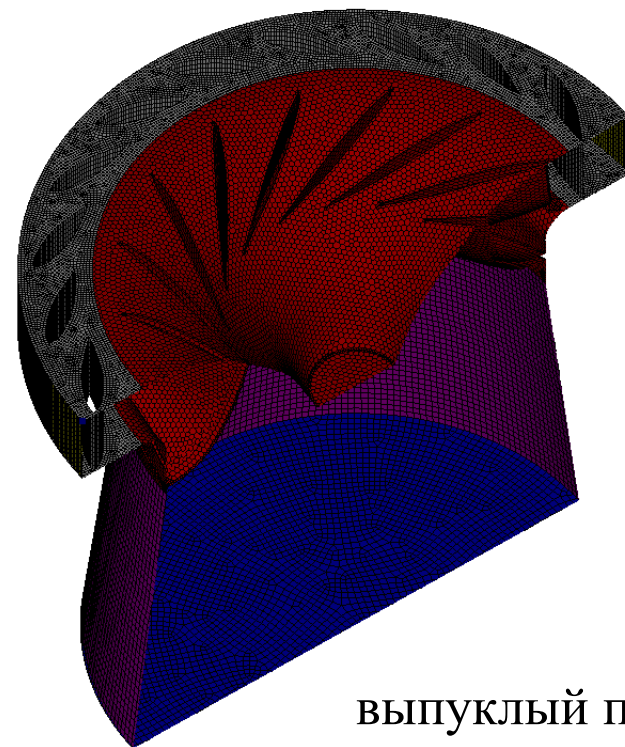
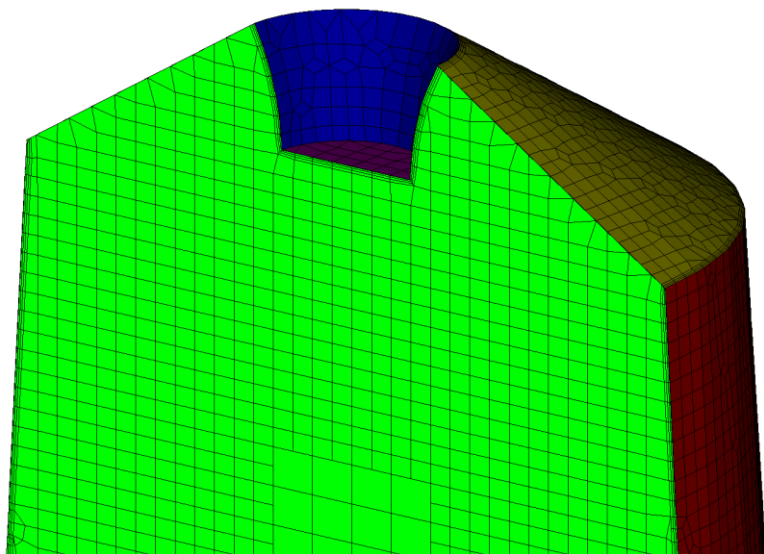


2. Гибридная сетка (квадратный элемент)



Импорт (Fluent) и объединение сеток

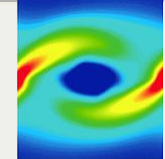
3. Гибридная сетка (кубический элемент)



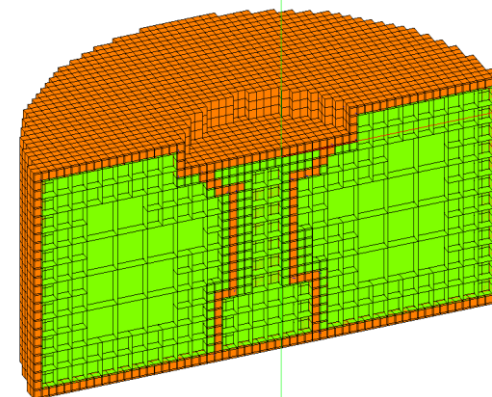
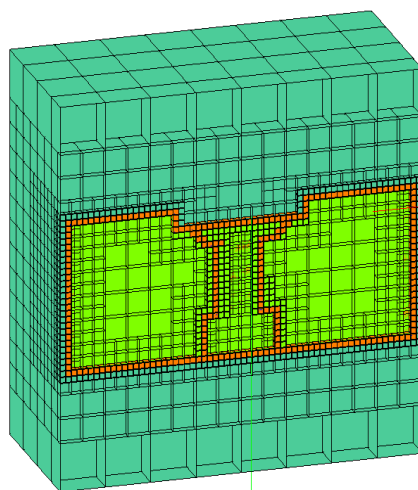
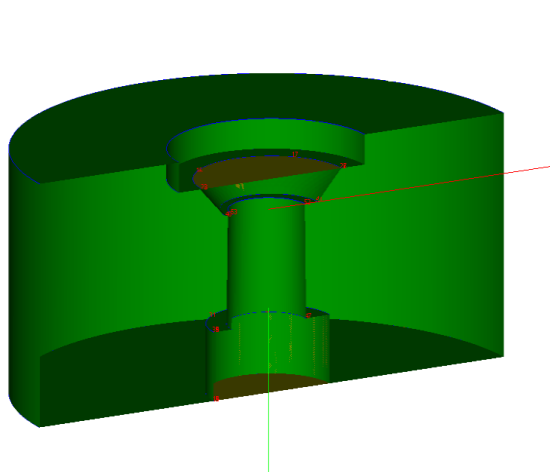
выпуклый полиэдр



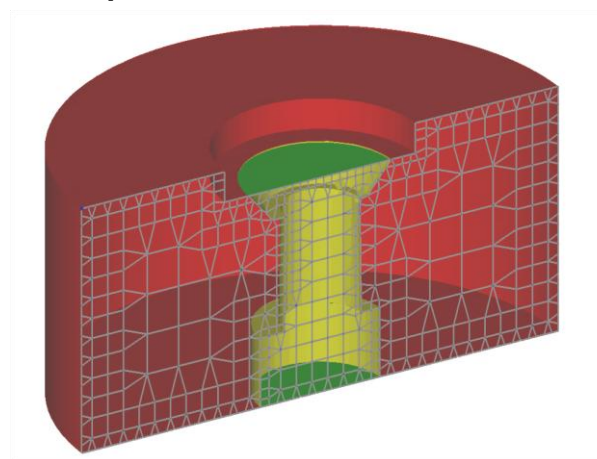
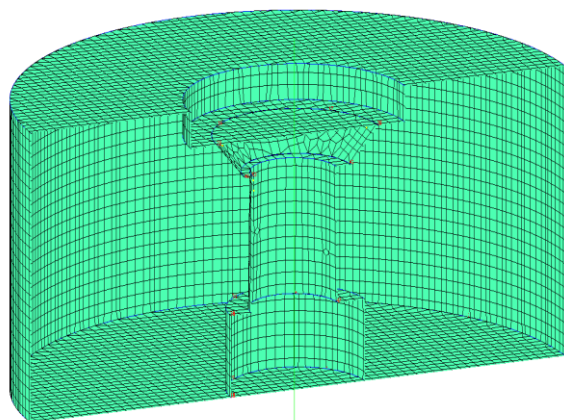
Передача геометрических данных из CAD систем и построение пространственной расчетной сетки



Процесс перехода от геометрии к построению расчетной сетки



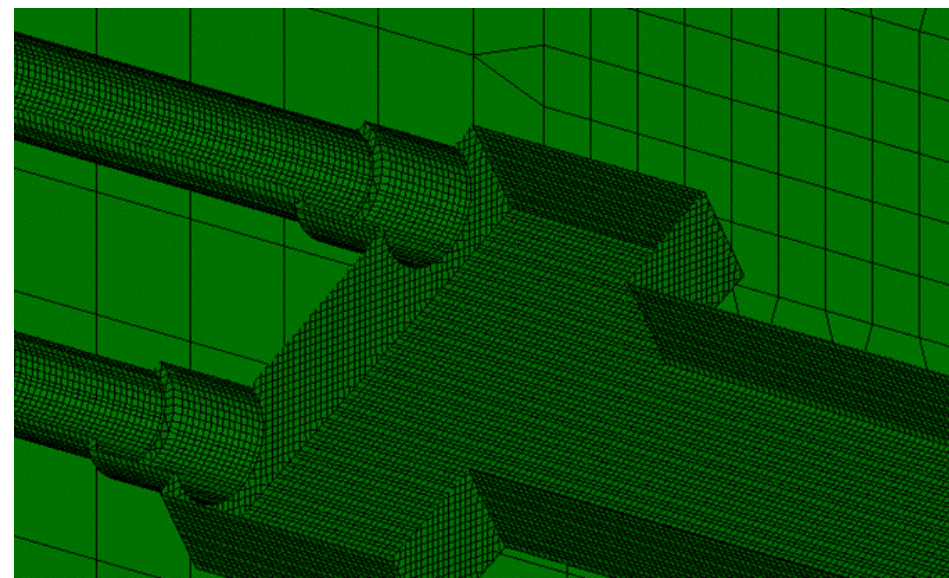
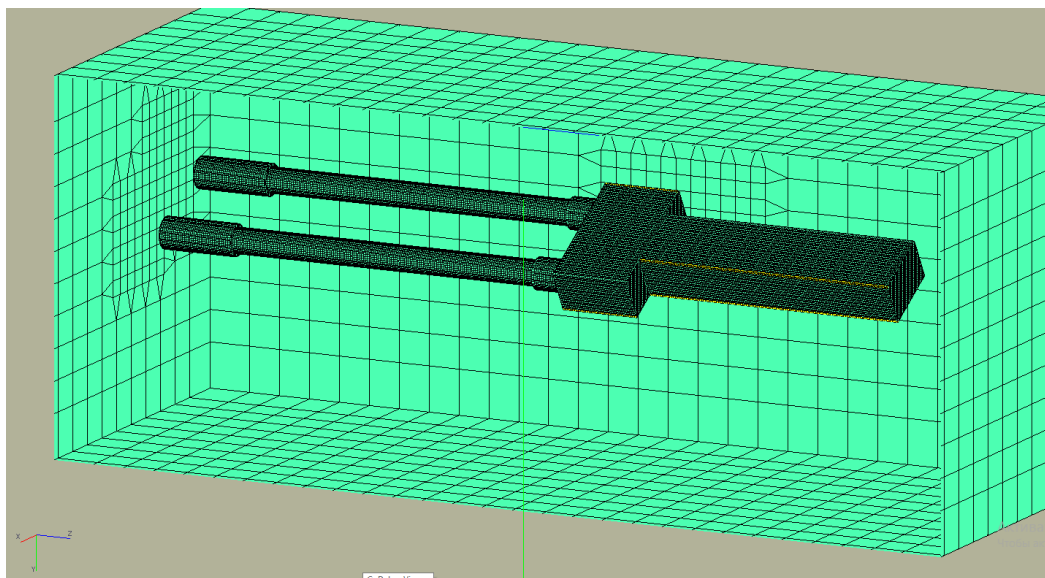
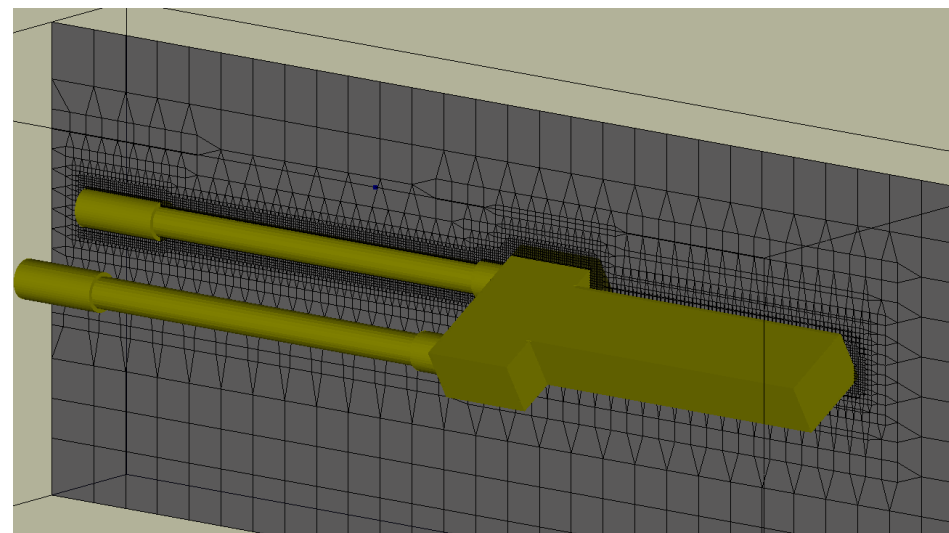
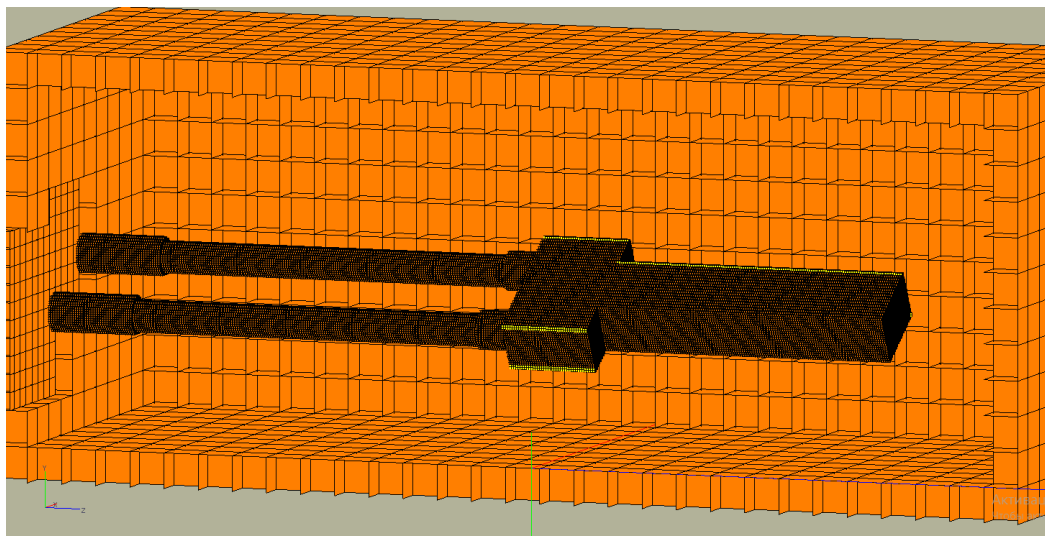
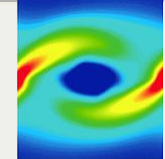
предварительное разбиения расчетной области



построение итоговой сетки

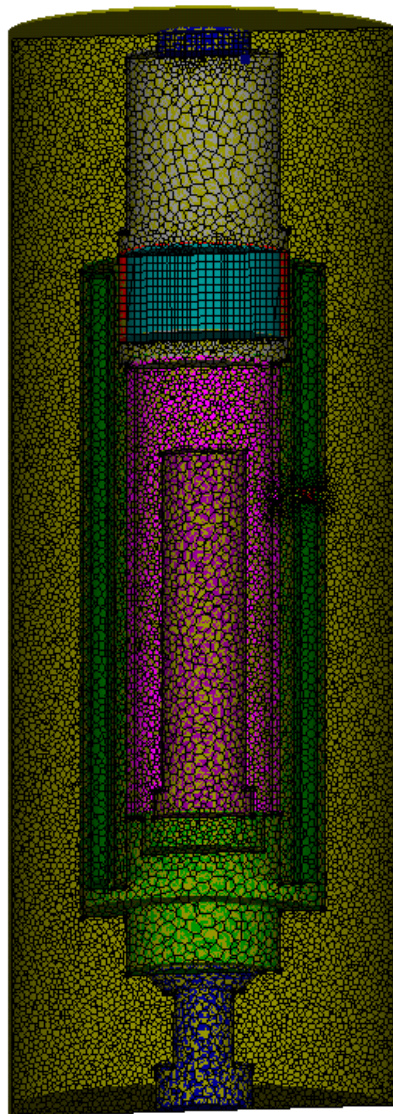
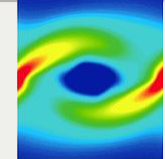


Пример расчетной сетки

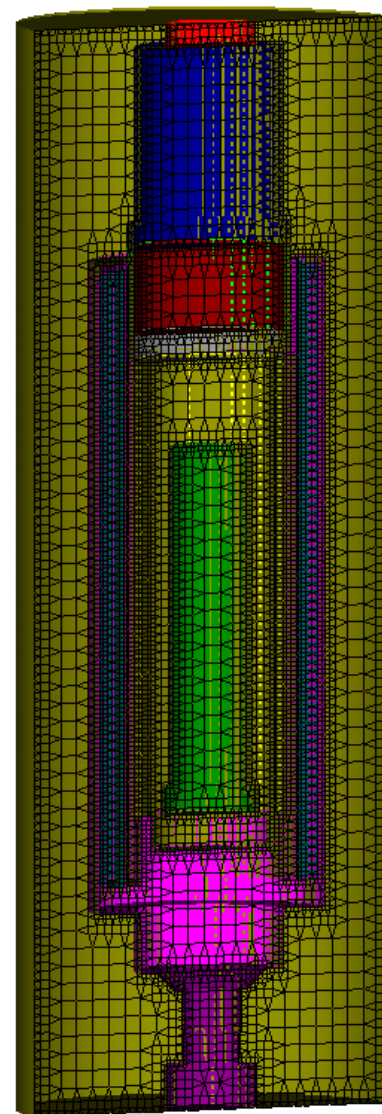




Моделирование химического реактора



850 000

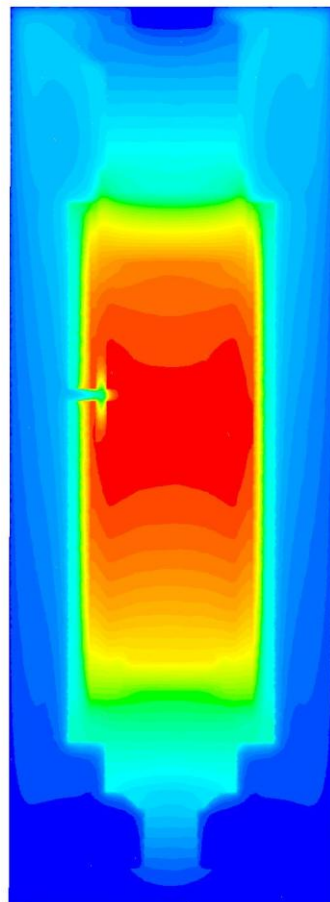
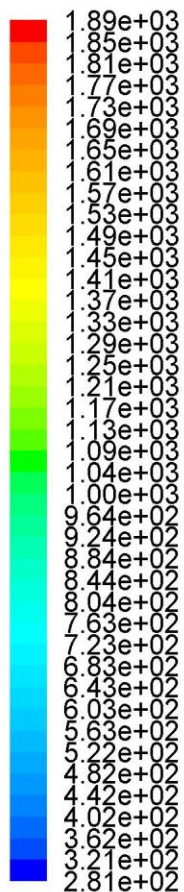
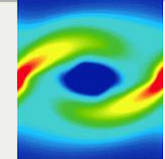


630 000

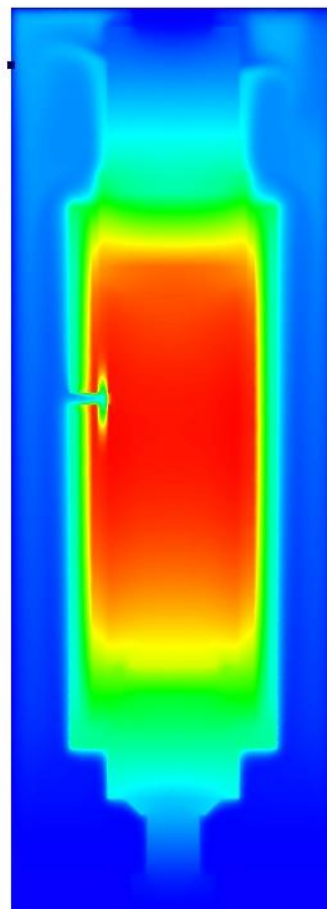
Расчетные сетки



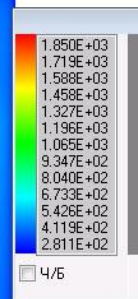
Моделирование химического реактора



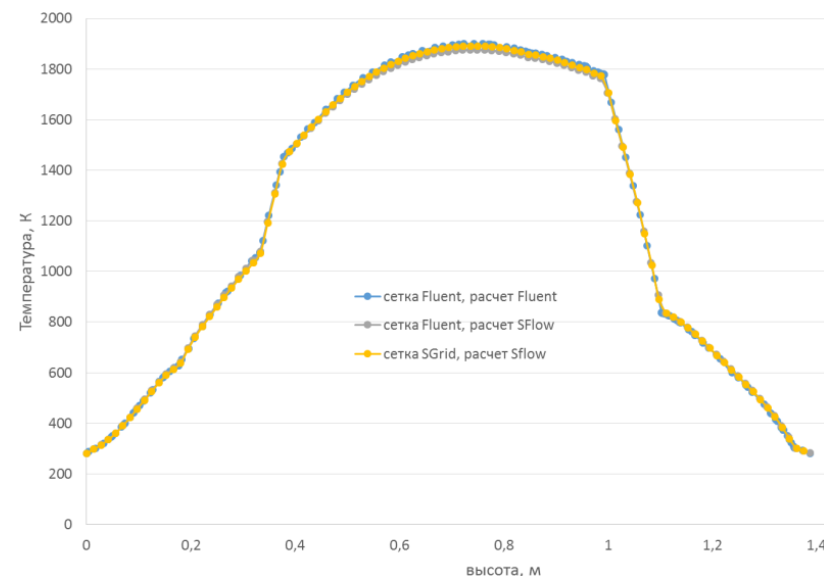
Ansys Fluent



SigmaFlow



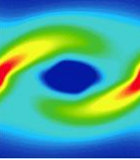
Распределение температуры
вдоль центральной вертикальной
оси реактора, K



Результаты расчета поля температуры, K



Оценка сеточного разрешения для получения сеточно-независимого (U)RANS решения



На практике к сетке предъявляются *дополнительные* требования :

1. Сетка должна описывать характерные особенности исходной геометрии.
2. Сетка должна быть экономной. Объем данных на сетке должен «помещаться» в выделенные на задачу вычислительные ресурсы. Расчёт на сетке должен выполняться за приемлемое время.
3. Процесс построения сетки также должен быть «экономным». Построения сетки должно выполняться за приемлемое время.
4. Степень детализации не должна ухудшать итерационную сходимость решения.
5. ...

Предложен критерий оценки **шага сетки** Δ на основе апостериорной оценки локальной ошибки интерполяции поля кинетической энергии турбулентности (хорошая сетка - малые значения ошибки интерполяции поля турбулентной энергии)

$$Q_m = \Delta / L_m < 1$$

$$L_m = \left[(\nu + \nu_t) \min \left(\frac{1}{0.3S}, T_t \right) \right]^{1/2}$$

пространственный масштаб

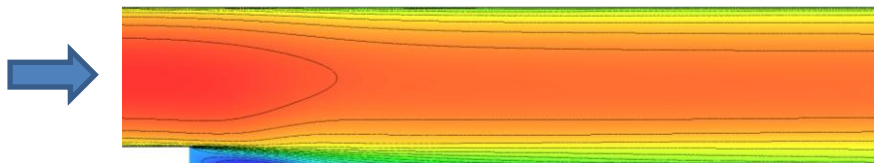
$$T_t = \min \left(\frac{k}{\varepsilon}, 6 \sqrt{\frac{\nu}{\varepsilon}} \right)$$

турбулентный временной масштаб

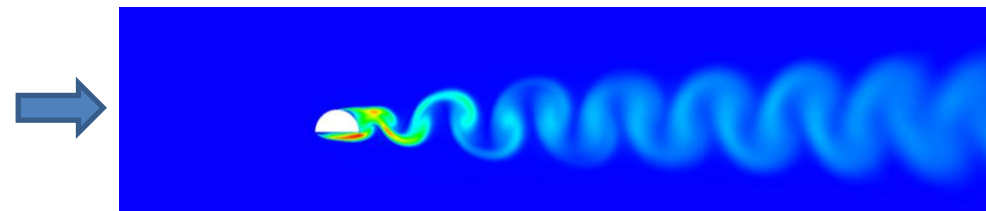
$$S = (2S_{ij}S_{ij})^{1/2}$$

скорость деформации

Тестовые задачи



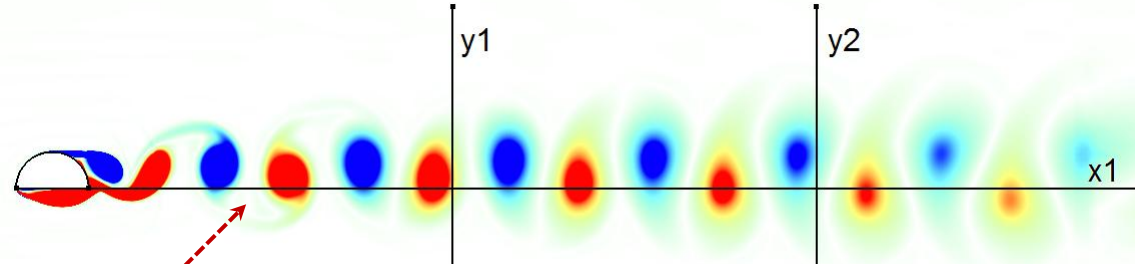
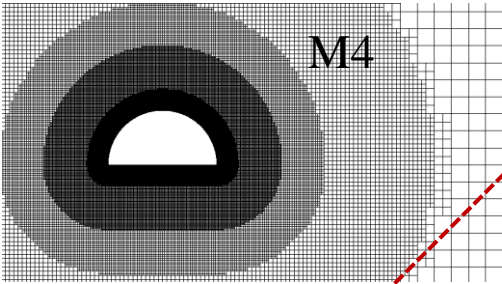
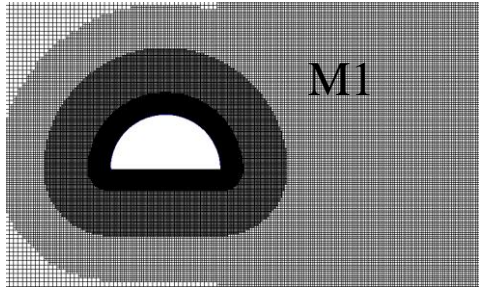
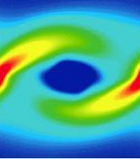
Стационарное течение за уступом



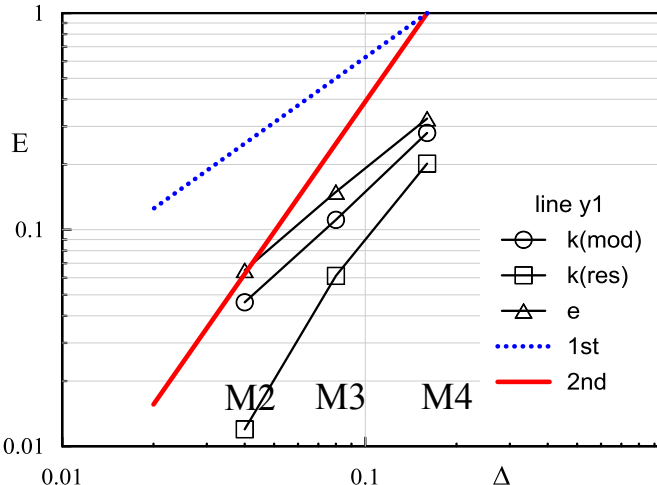
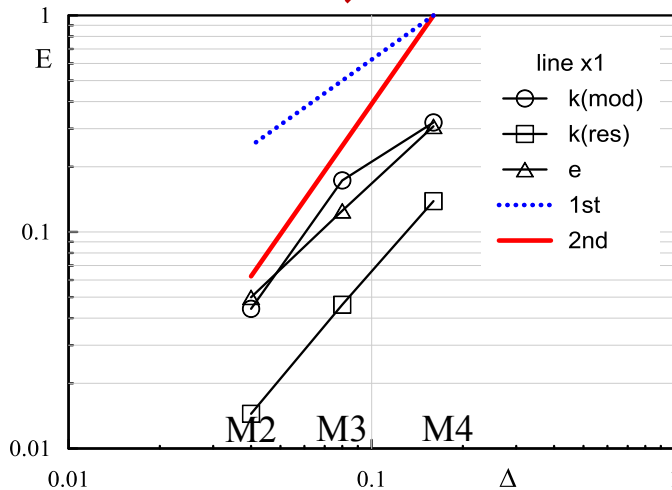
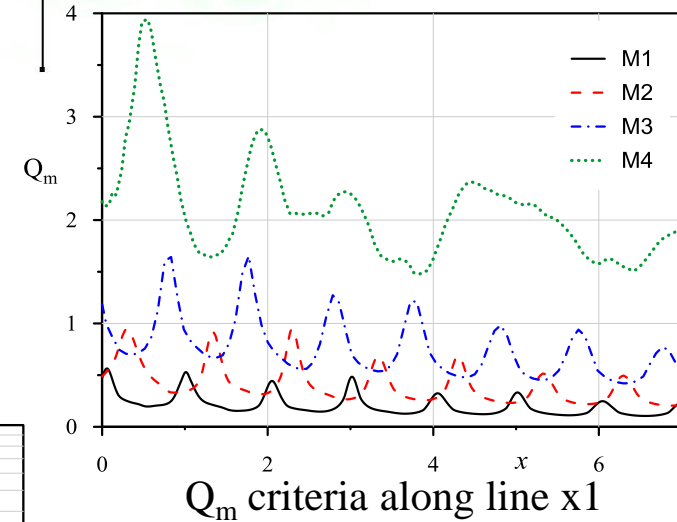
Нестационарное обтекание полукруга



Оценка сеточного разрешения для получения сеточно-независимого U-RANS решения



$$E_{\Delta}(f) = \|f_{\Delta} - f_{\Delta/2}\| / \|f_{\Delta/2}\|$$



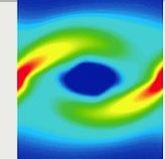
Time averaged quantities

$$k(mod) = \langle k \rangle$$

$$k(res) = 0.5 \langle u'_i u'_i \rangle$$

$$e = \langle 2S'_{ij} S'_{ij} \rangle$$

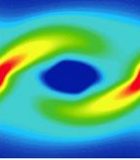
Change the solution by detailing mesh along lines. k- ω SST (cc) model



- использование передачи геометрических данных из CAD систем и автоматическое построение пространственной расчетной сетки
- **моделирование двухфазных ламинарных и турбулентных течений**
- моделирование радиационного теплообмена
- гибридное моделирование CFD-гидравлические сети
- разработка версии программы для расчета на multi-gpu кластерных системах



Дисперсные потоки. Лагранжев подход



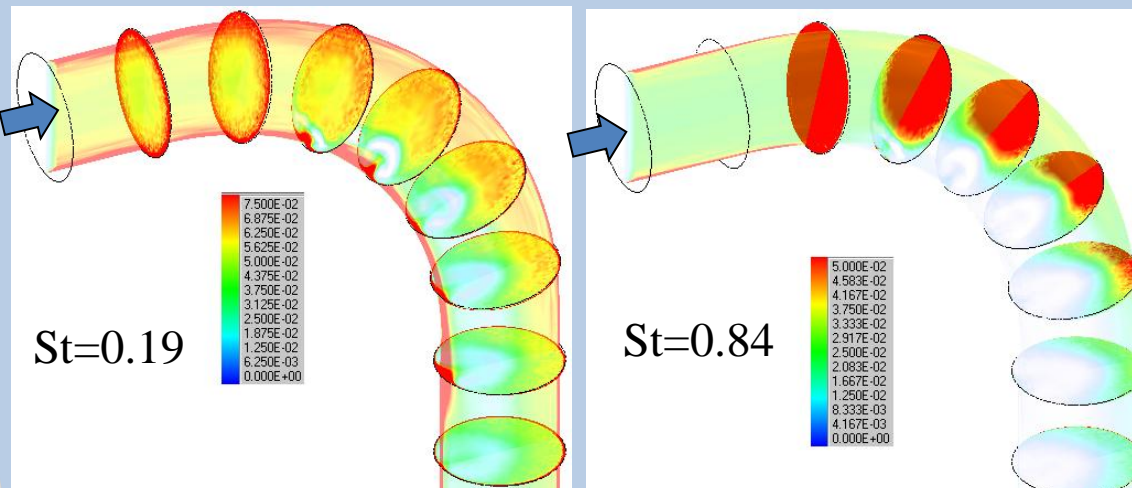
Траекторное моделирование динамики невзаимодействующих частиц в турбулентном потоке на основе **стохастического уравнения типа Ланжевена на нормализованную скорость**

Дисперсное течение в гйбе $Re=10000$

Модель турбулентности – дифференциальная модель рейнольдсовых напряжений с эллиптической релаксацией (**RSM EBM**)

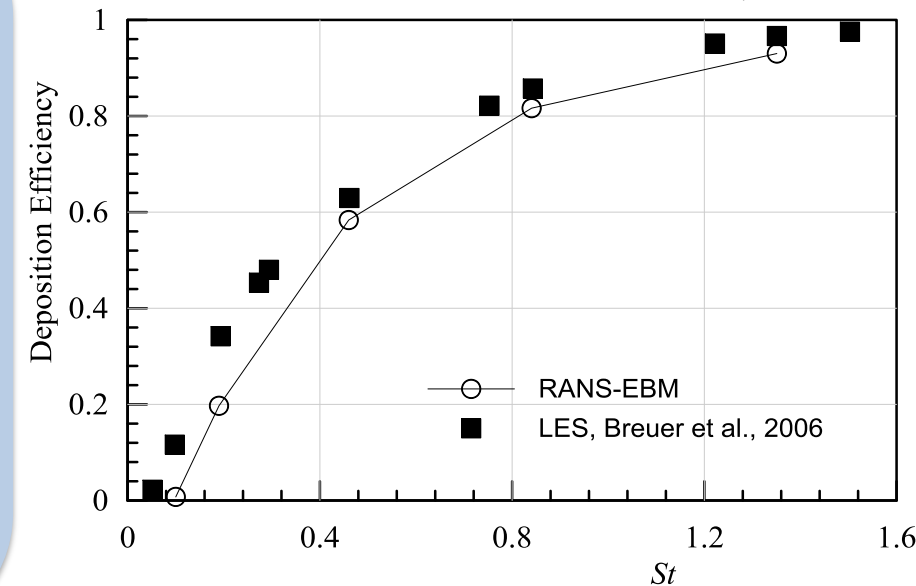
Сетки – 580 тыс., 2 млн. ячеек, $y^+(1) < 1$

Концентрации частиц в потоке



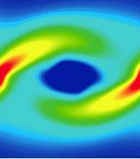
$$St = \tau_p U / L$$

Коэффициент эффективности осаждения в зависимости от числа St частиц





Плотные дисперсные потоки. Эйлеров подход



Модель смеси в приближении малости времени релаксации частиц
(диффузионно-инерционная модель, Зайчик Л.И.)

уравнение движения смеси + уравнение переноса
концентрации частиц

$$\frac{\partial \rho_p \phi}{\partial t} + \nabla \cdot (\mathbf{u} \rho_p \phi) + \nabla \cdot ((1 - \phi) \mathbf{u}_r \rho_p \phi) = 0$$

относительная скорость

$$\mathbf{u}_p - \mathbf{u}_f = \mathbf{u}_r = \frac{\tau_p}{\rho_p} \left[\underbrace{(\rho_p - \rho_f) \left(\mathbf{g} - \frac{d\mathbf{u}_m}{dt} \right)}_{\text{силы плавучести и инерции}} + \underbrace{\frac{1}{\phi} (\mathbf{F}_{Lift})}_{\text{межчастичные взаимодействия}} + \underbrace{\nabla \cdot \boldsymbol{\Sigma}_p}_{\text{подъёмная сила...}} - \underbrace{\nabla \cdot (M \langle \mathbf{u}' \mathbf{u}' \rangle)}_{\text{турбофорез}} \right] - \underbrace{\frac{1}{(1 - \phi)} \frac{\nu_t}{\sigma_t} \frac{\nabla \phi}{\phi}}_{\text{турбулентная дисперсия}}$$

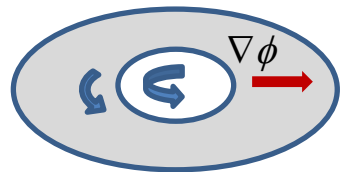
- ✓ Частичное скольжение смеси на стенке
- ✓ Учёт стеснённости частиц на время релаксации
- ✓ Степень вовлеченности частиц турбулентным потоком

- ☐ Влияние частиц на турбулентность несущей жидкости
- ☐ Анизотропия тензора напряжений частиц
- ☐ Турбофорез
- ☐ ...

индексы f и p относятся соответственно к несущей жидкости и частицам.



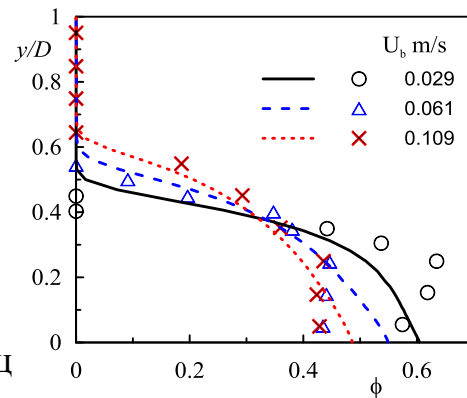
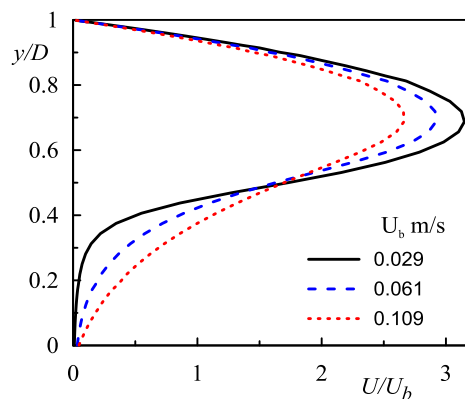
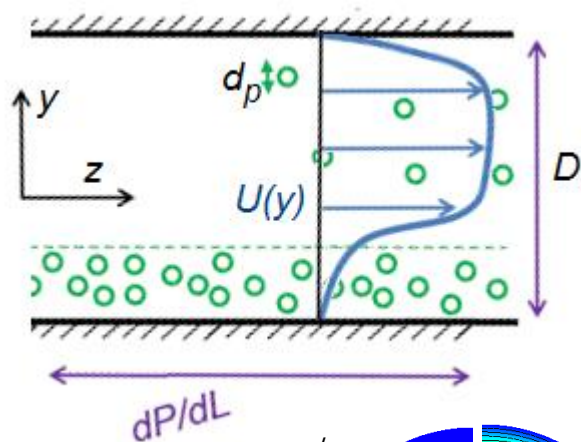
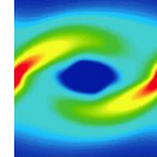
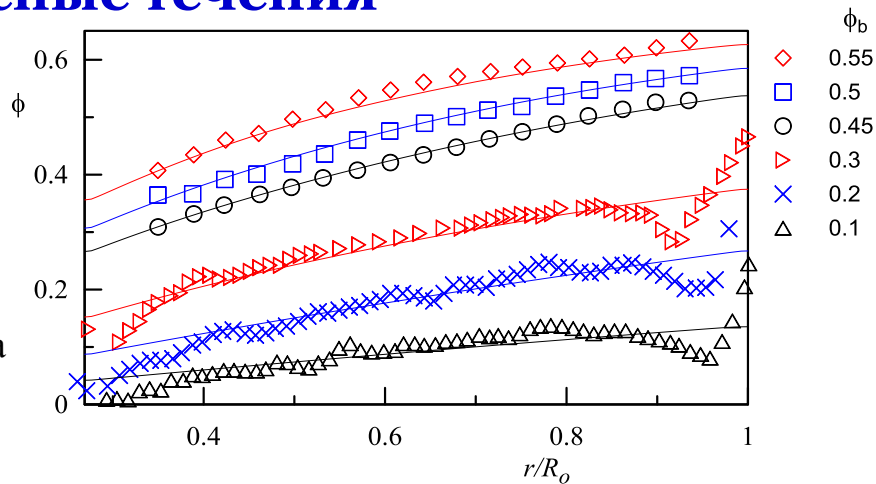
Ламинарные дисперсные течения



Цилиндрическое течение Куэтта с нейтрально плавучими частицами

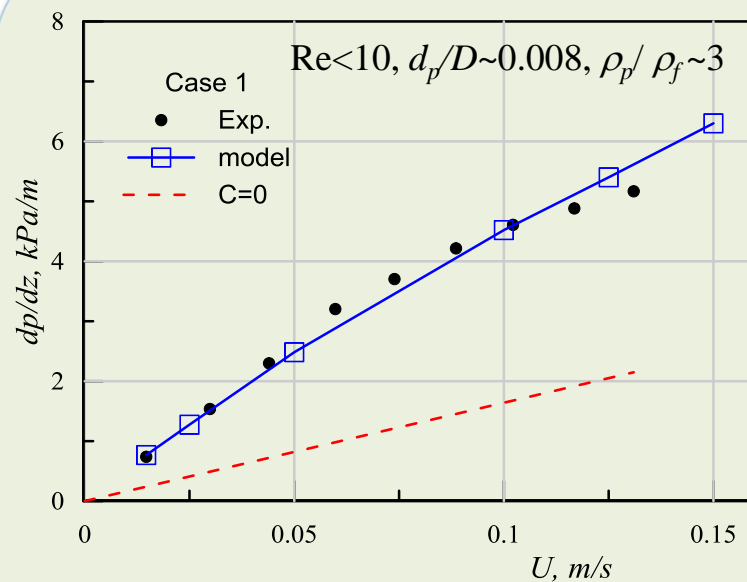
эффект миграции частиц в область пониженной скорости сдвига

experiments – Phillips et al., 1992, Tetlow et al, 1998

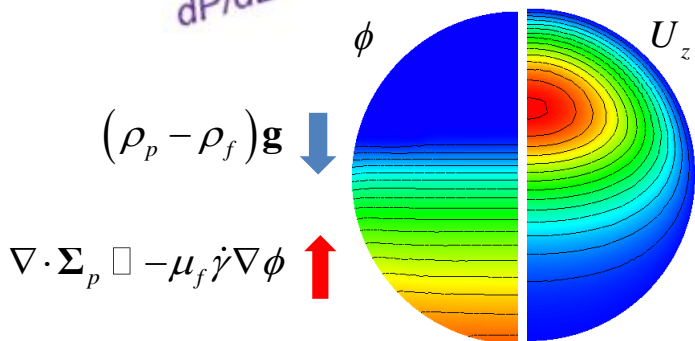


Установившееся горизонтальное течение

Перепад давления



experiment – Gilles et al., 1999

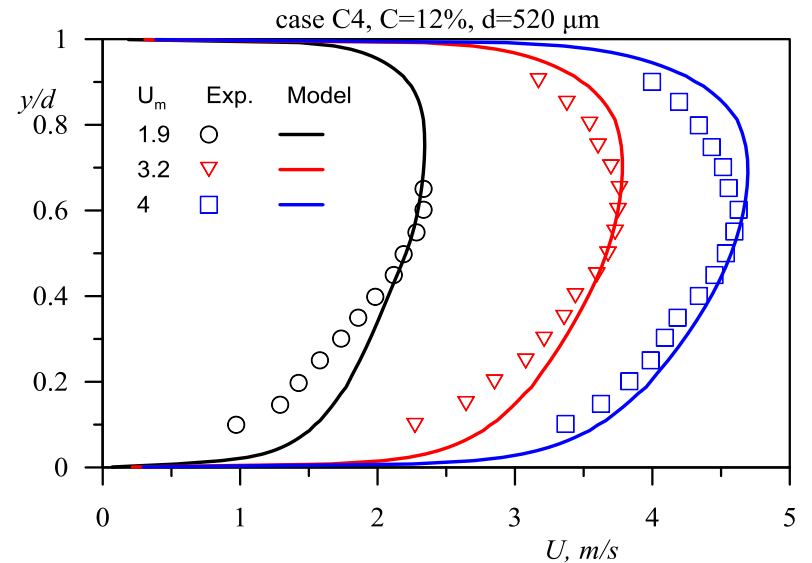
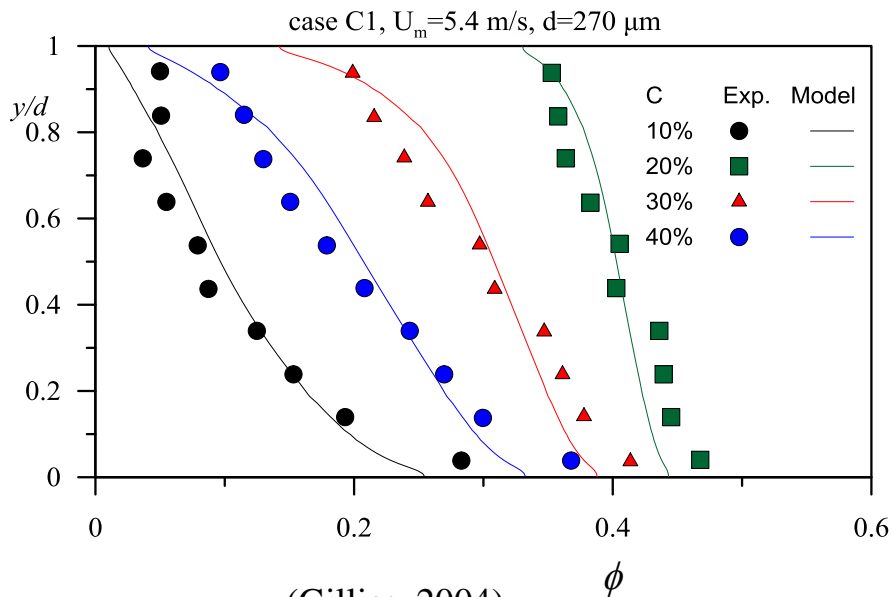
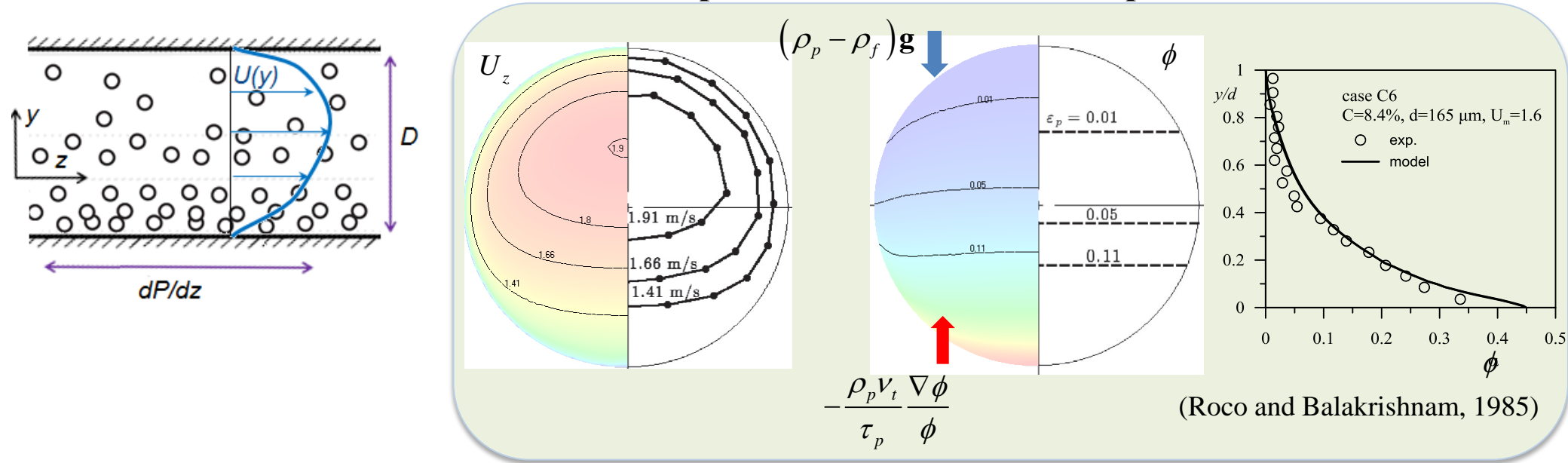
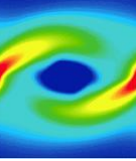


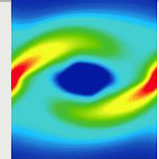
баланс силы тяжести и силы давления частиц



Турбулентные дисперсные течения

Установившееся горизонтальное течение гидросмеси

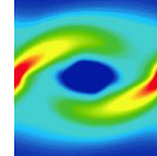




- использование передачи геометрических данных из CAD систем и автоматическое построение пространственной расчетной сетки
- моделирование двухфазных ламинарных и турбулентных течений
- **моделирование радиационного теплообмена**
- гибридное моделирование CFD-гидравлические сети
- разработка версии программы для расчета на multi-gpu кластерных системах



Перенос излучения. Метод конечных объемов.



Интенсивность излучения. Уравнение переноса излучения (УПИ) в приближении «серого» газа

$$\frac{dI(\vec{r}, \vec{s})}{ds} = -\underbrace{\beta(\vec{r}) I(\vec{r}, \vec{s})}_{\text{затухание излучения}} + \underbrace{\kappa(\vec{r}) I_b(\vec{r})}_{\text{излучение среды}} + \underbrace{\frac{\sigma(\vec{r})}{4\pi} \int_{4\pi} I(\vec{r}, \vec{s}') \Phi(\vec{s}', \vec{s}) d\Omega'}_{\text{перераспределение энергии излучения по угловому пространству}}$$

S

Метод конечных объемов для решения УПИ (Raithby G.D., Chui E.H., 1990)

$$\int_{\Delta\Omega^l} \int_{\Delta A} I^l(\vec{s}^l \cdot \vec{n}) dA d\Omega = \int_{\Delta\Omega^l} \int_{\Delta V} (-\beta I^l + S^l) dV d\Omega$$



Интегрирование УПИ по контрольным объему и углу

$$\sum_{nb} I_{nb}^l A_{nb} \int_{\Delta\Omega^l} (\vec{s}^l \cdot \vec{n}_{nb}) d\Omega^l = (-\beta I^l + S^l) \Delta V \Delta\Omega^l$$

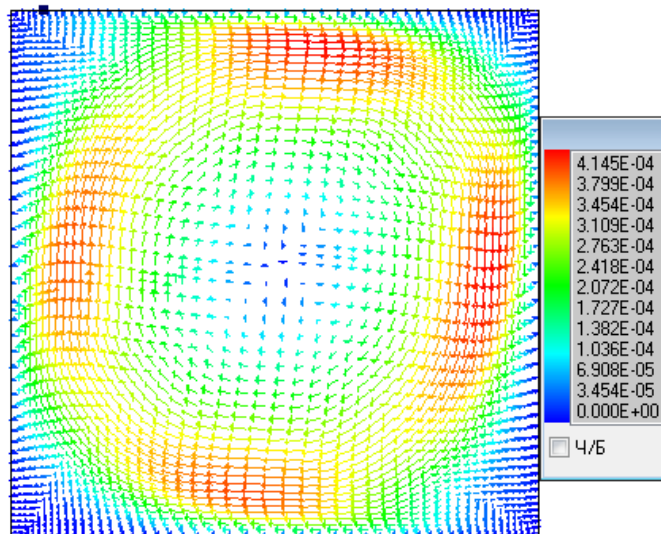
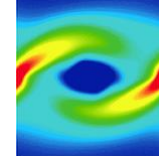
$$S^l = \kappa I_b + \frac{\sigma}{4\pi} \sum_{l'=1}^L I^{l'} \bar{\Phi}^{ll'} \Delta\Omega^{l'}$$



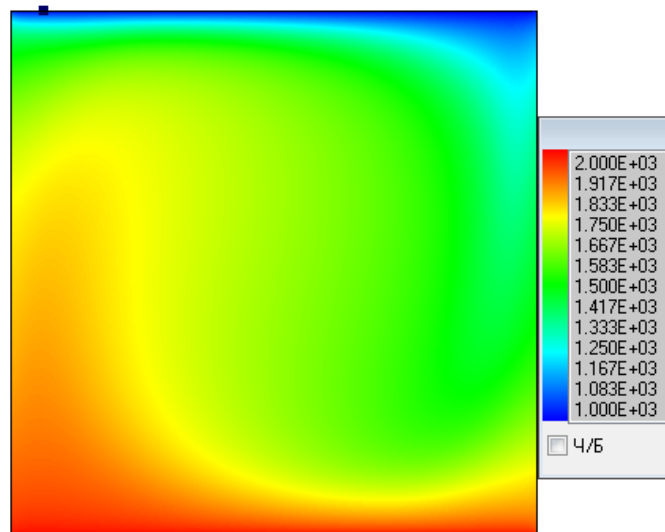
Дискретный аналог УПИ для метода конечных объемов



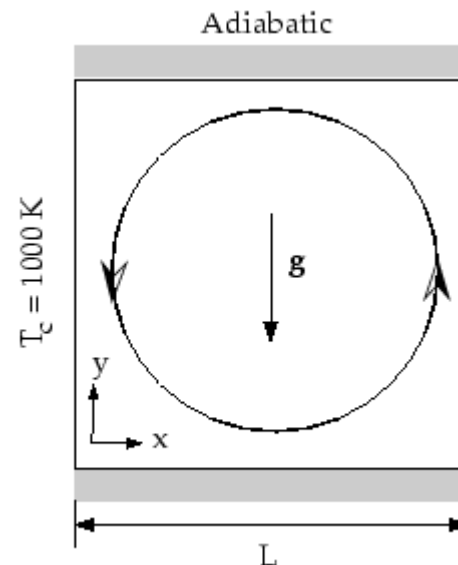
Перенос излучения. Метод конечных объемов. Тестирование.



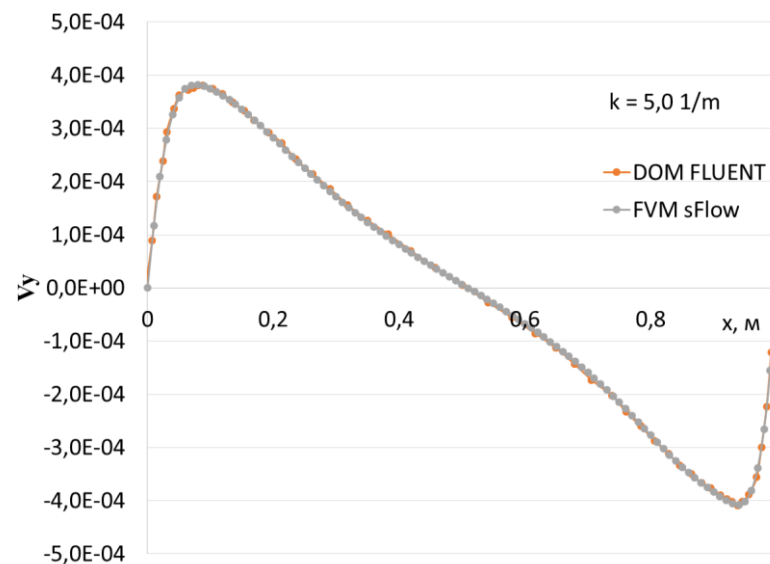
Поле скорости



Поле температур

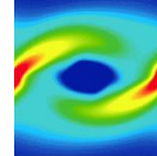


$\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$
 $c_p = 1.1030 \times 10^4 \text{ J/kgK}$
 $k = 15.309 \text{ W/mK}$
 $\mu = 10^{-3} \text{ kg/ms}$
 $\beta = 10^{-5} \text{ 1/K}$
 $g = -6.96 \times 10^5 \text{ m/s}^2$
 $a = 0, 0.2, 5 \text{ 1/m}$
 $L = 1 \text{ m}$
 $Ra = 5 \times 10^5$
 $Pr = 0.71$
 $Pl = 0.02$
 $\tau = 0.2, 5$

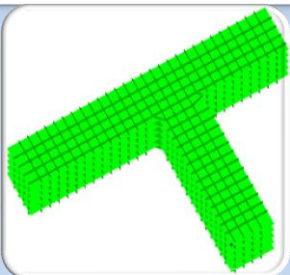




Перенос излучения. Метод конечных объемов.

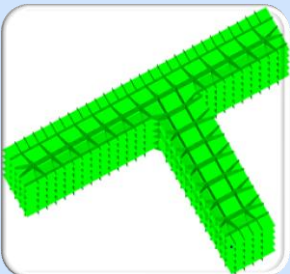


Сравнение методов решения СЛАУ для неструктурированных сеток:
BiCGSTAB и схема бегущего счета



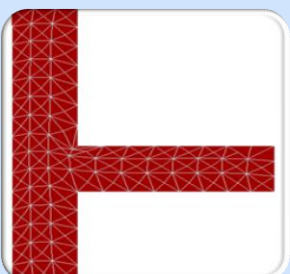
Гекса ячейки

- $\tau = 0,0, t^* = 4.5$
- $\tau = 1,0, t^* = 4.6$
- $\tau = 10,0, , t^* = 3.4$



Гекса+тетра ячейки

- $\tau = 0,0, t^* = 4.8$
- $\tau = 1,0, t^* = 5$
- $\tau = 10,0, , t^* = 3.9$



Тетра ячейки

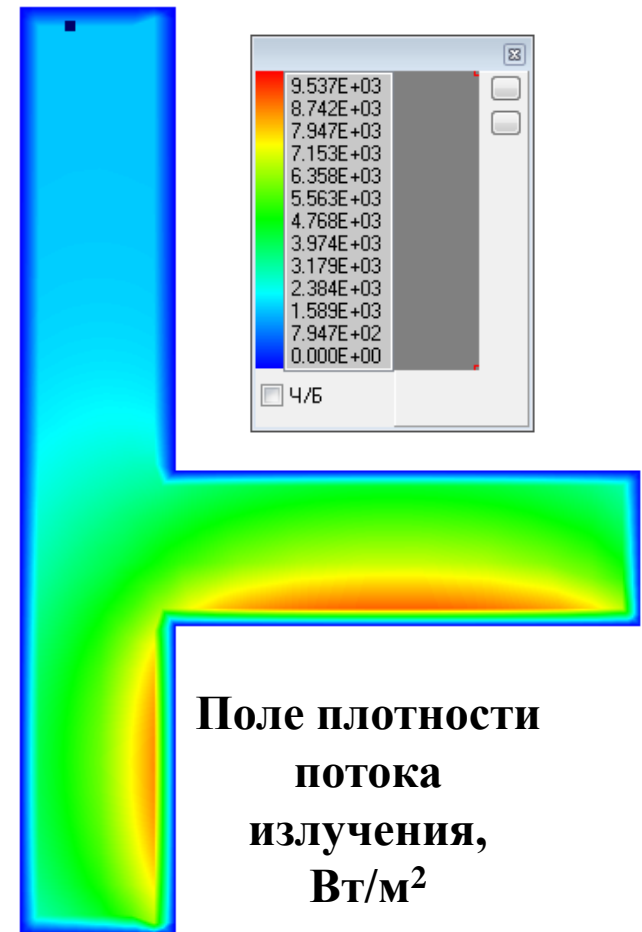
- $\tau = 0,0, t^* = 5.6$
- $\tau = 1,0, t^* = 5.5$
- $\tau = 10,0, , t^* = 3.8$

Совместно решалась
задача переноса
излучения и
теплопроводности.

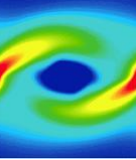
Окончание расчета –
достижение заданной
сходимости по полю
температур.

τ – оптическая
толщина

$$t^* = \frac{t_{BiCGSTAB}}{t_{\text{бегущий счет}}}$$



Поле плотности
потока
излучения,
Вт/м²



Перенос излучения. Модели коэффициента поглощения.

Weighted Sum of Gray Gases (WSGG)

В WSGG модели спектральная зависимость коэффициента поглощения газа представляется в виде суммы взвешенных серых газов.

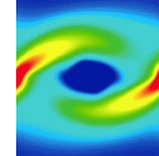
Полосная модель на базе данных спектральных свойств газов HITRAN (High-resolution TRANsmission molecular absorption database)

Полосная модель строится на основании базы данных HITRAN по свойствам излучения газов в линиях, на основе которых рассчитывается спектральный коэффициент поглощения.

Модели «серого газа» (на основе WSGG)



Перенос излучения. Влияние модели.

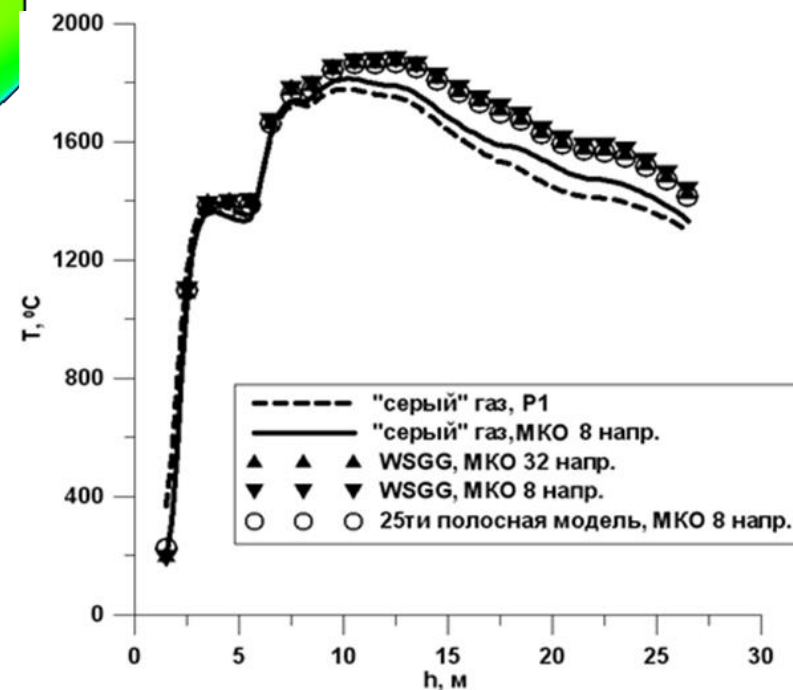
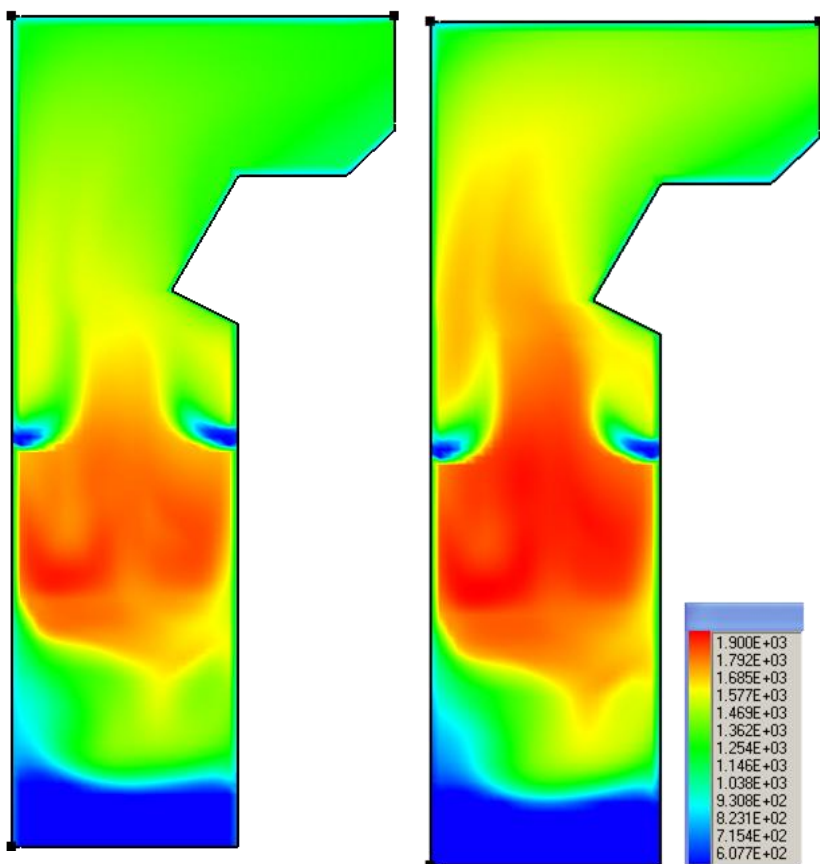


(Моделирование газовой топки)

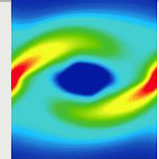
P1, «серый» газ

WSGG модель,
МКО 8 напр.

25-ти полосная
модель, МКО 8 напр.



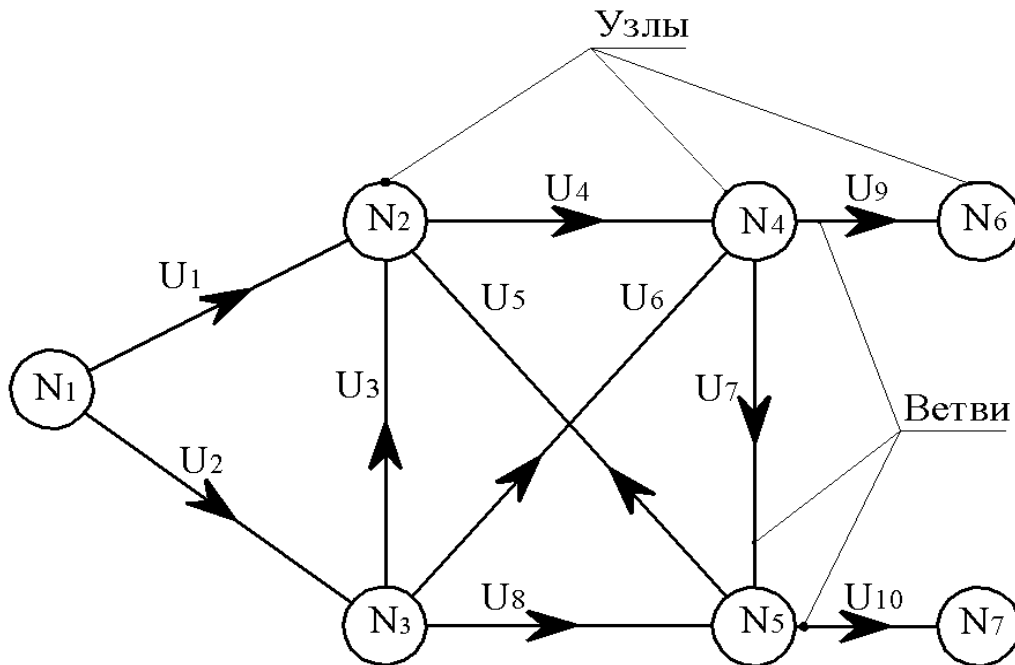
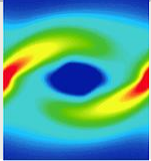
Распределение температуры по
высоте в центральной части топки



- использование передачи геометрических данных из CAD систем и автоматическое построение пространственной расчетной сетки
- моделирование двухфазных ламинарных и турбулентных течений
- моделирование радиационного теплообмена
- **гибридное моделирование CFD-гидравлические сети**
- разработка версии программы для расчета на multi-gpu кластерных системах



Основные уравнения сетевой части задачи



i – индекс узла

l – индекс ветви

$$D_{il} = \begin{cases} 1, & \text{если } l \in O_i \\ -1, & \text{если } l \in I_i \\ 0, & \text{иначе} \end{cases}$$

Уравнение сохранения массы

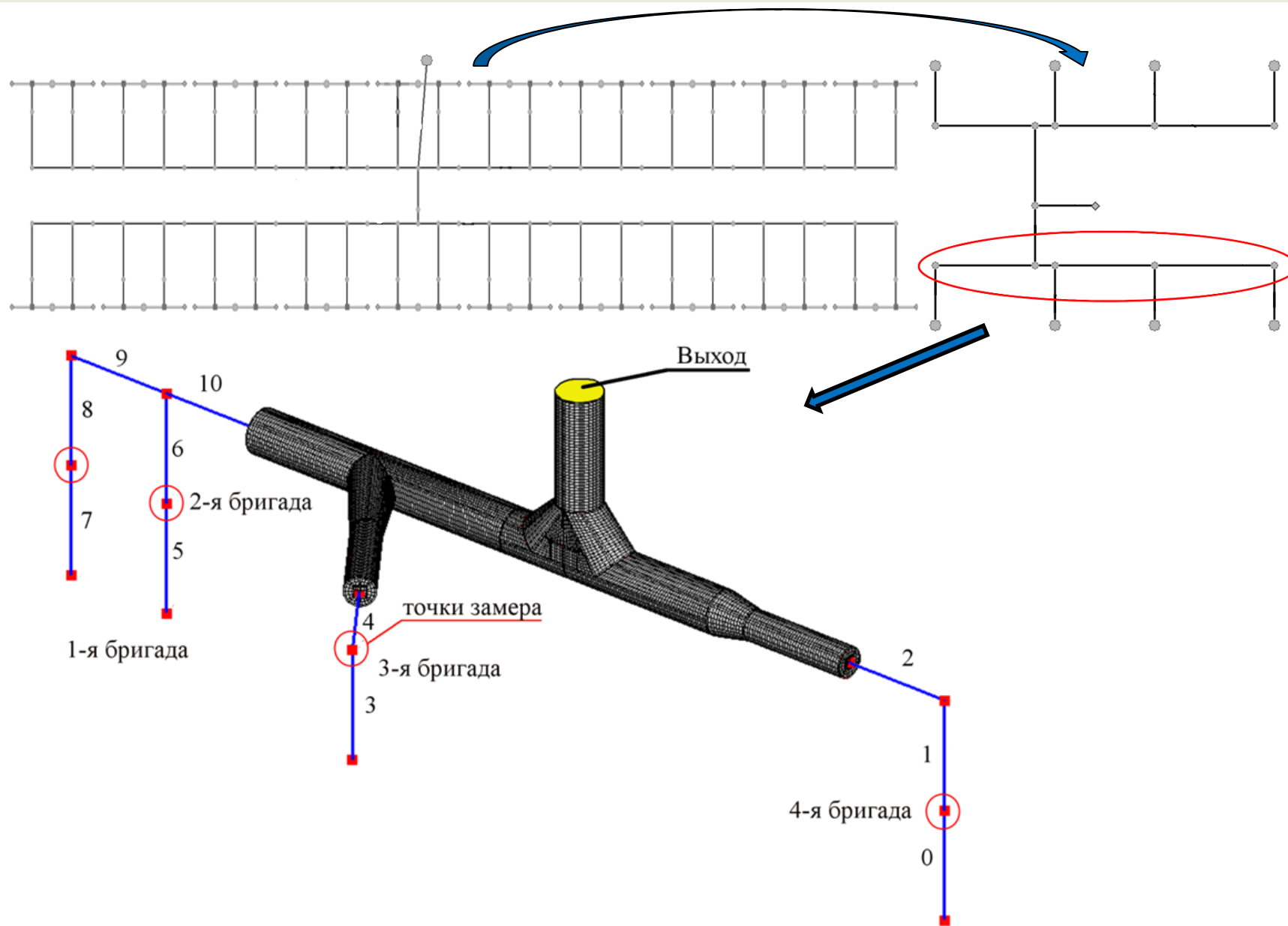
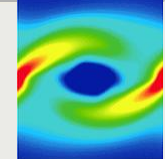
$$\sum_{l \in U_i} D_{il} \cdot q_l = Q_i, i \in N$$

Уравнение количества движения

$$s_l |q_l| q_l = \sum_{i \in N} D_{il} \cdot p_i + h_l, l \in U$$

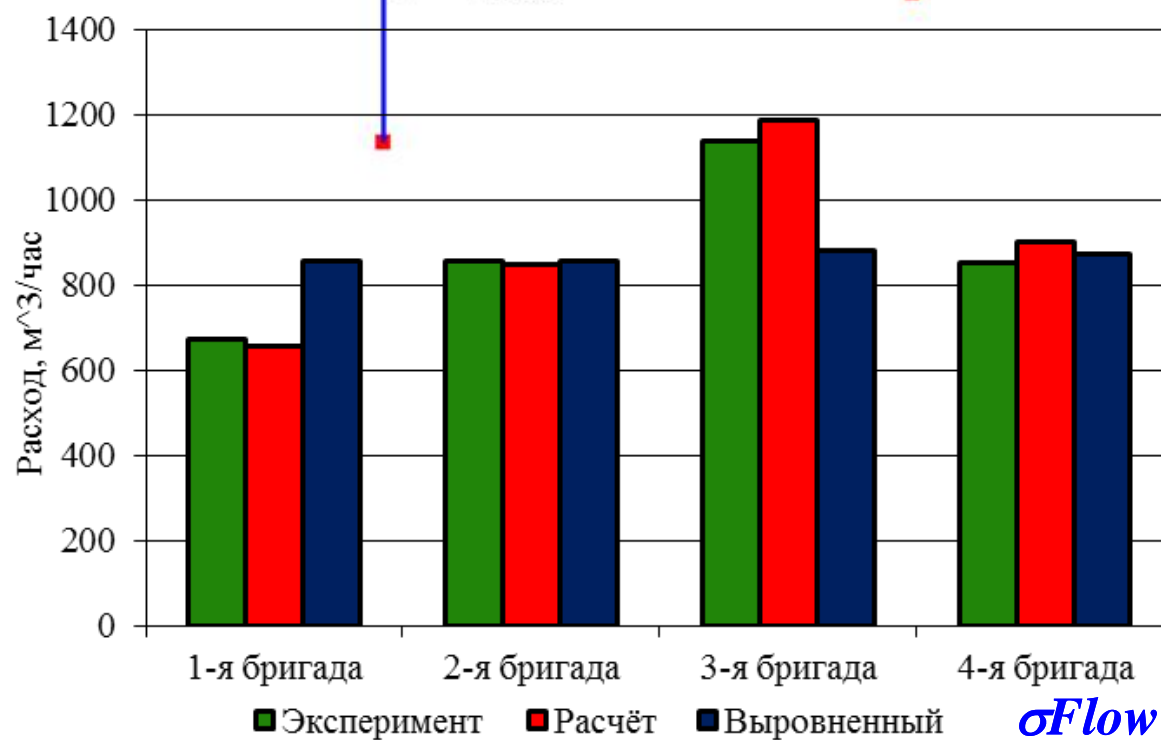
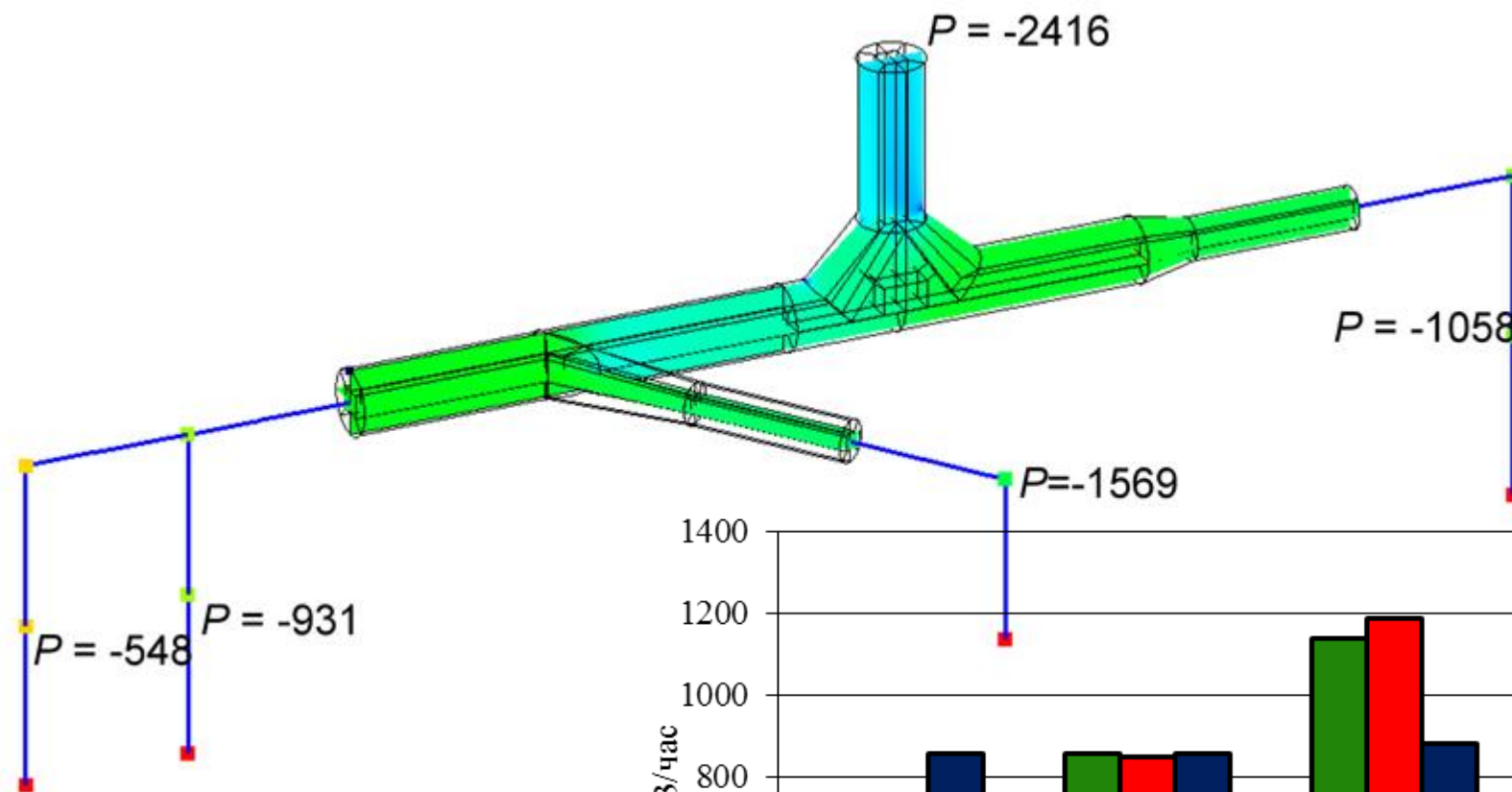
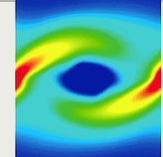


Гибридная модель газоходного участка



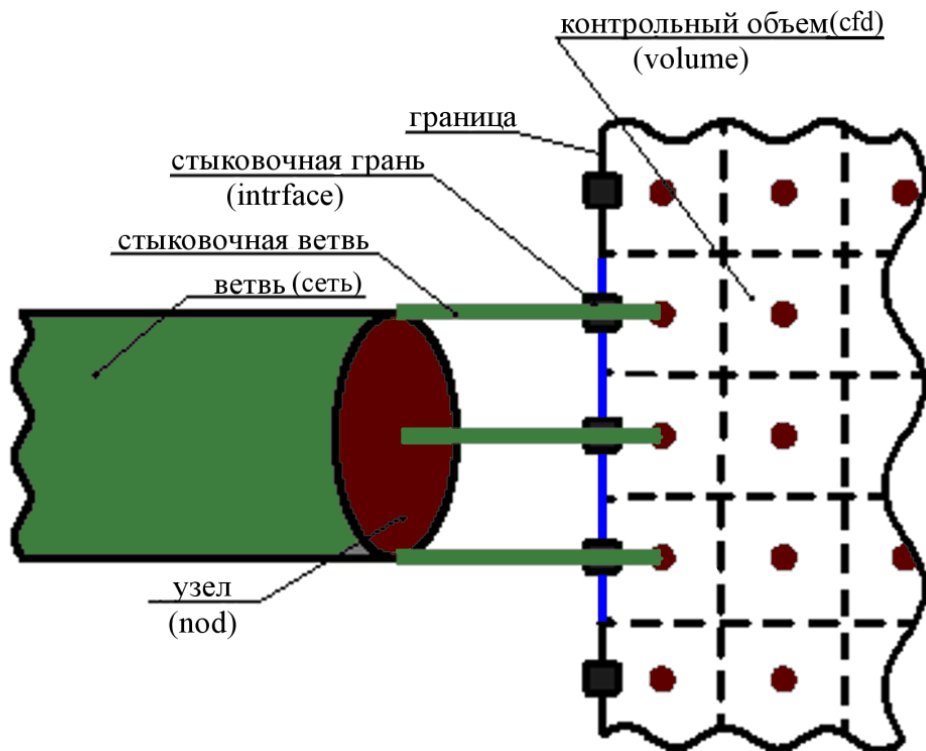
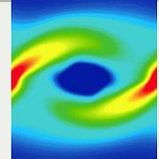


Результаты расчета газохода





Взаимодействие сетевой и CFD моделей



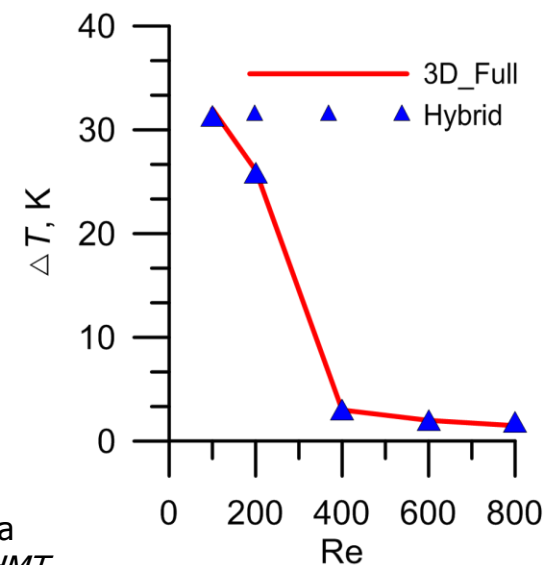
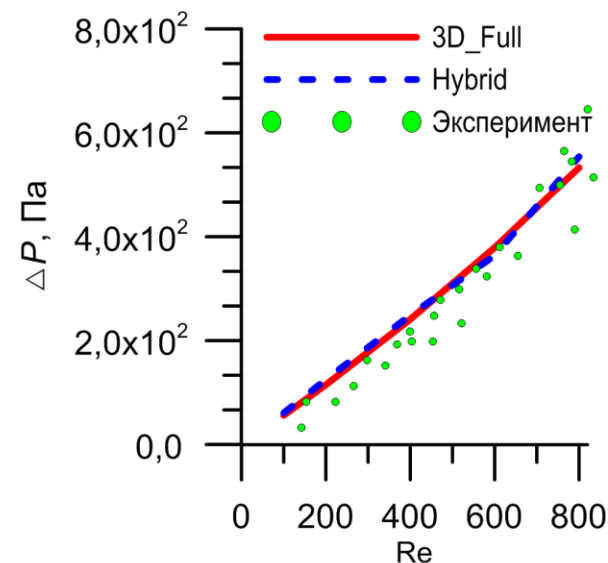
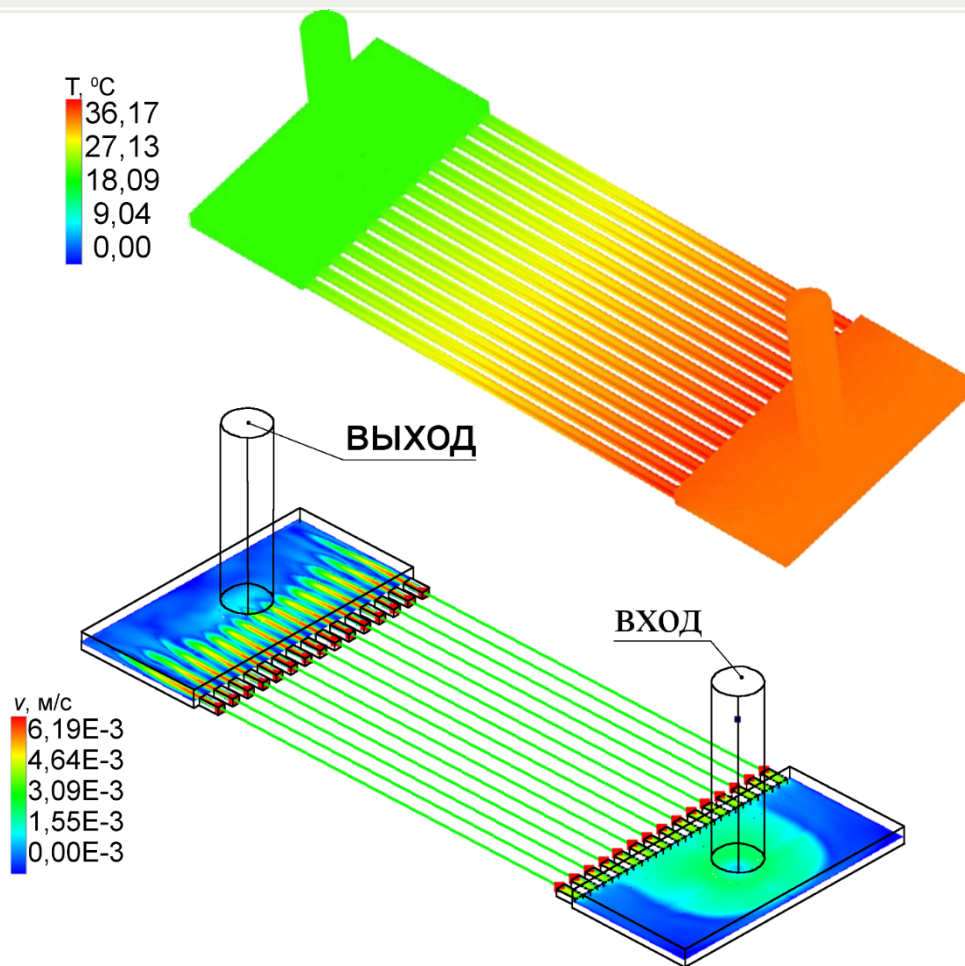
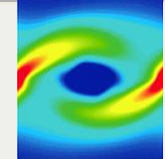
$$p = p^* + p'$$

$$\nabla(\tau_{cfd} \cdot \nabla p') = \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}^*) + Q$$

$$\sum_{l \in U} D_{jl} \left(\tau_{net} \cdot \sum_{i \in N} D_{il} p' \right) = \sum_{l \in U} D_{jl} q_l^* + Q$$

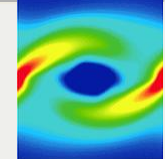


Моделирование микроканального теплообменника

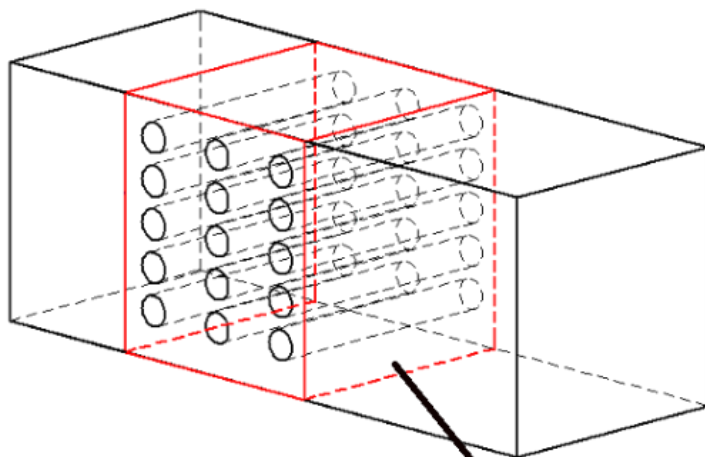




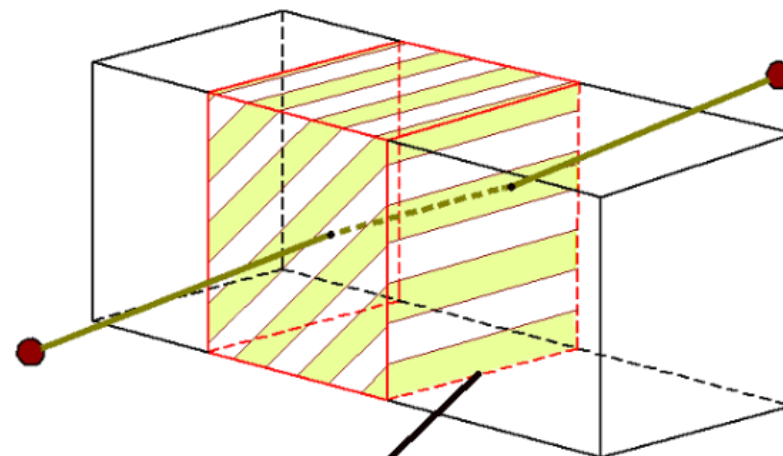
Модель гибридного теплообменника



Пространственное
представление



Гибридная модель



Область теплообменника

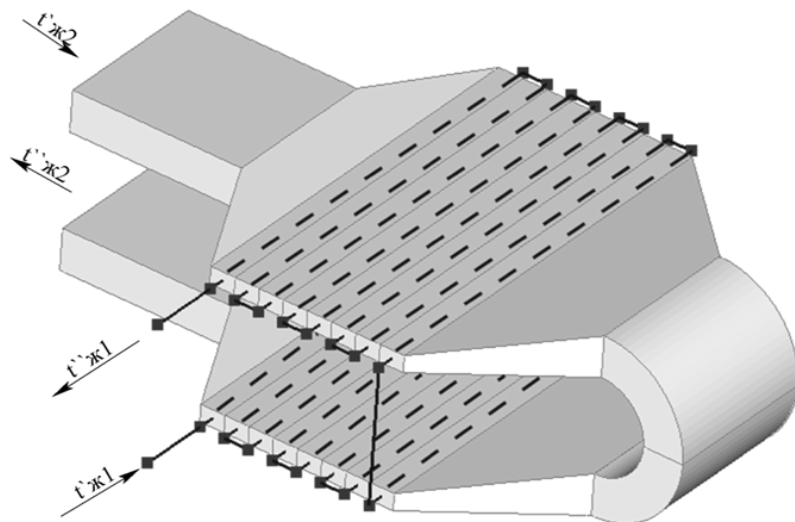
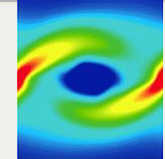
**Тепловой источник в
гибридном
теплообменнике:**

$$S_{\text{cfd}(i)} = K \cdot F \cdot (T_{\text{net}}^{\text{mid}} - T_{\text{cfd}(i)}); \quad S_{\text{net}} = - \sum S_{\text{cfd}(i)}$$

$$F = -\xi_{\text{п.т.}} \cdot \frac{\rho \cdot v^2}{2}$$

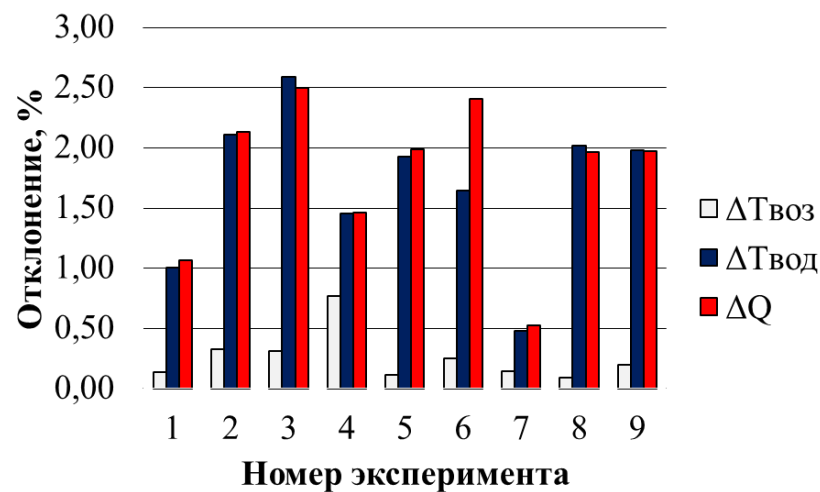
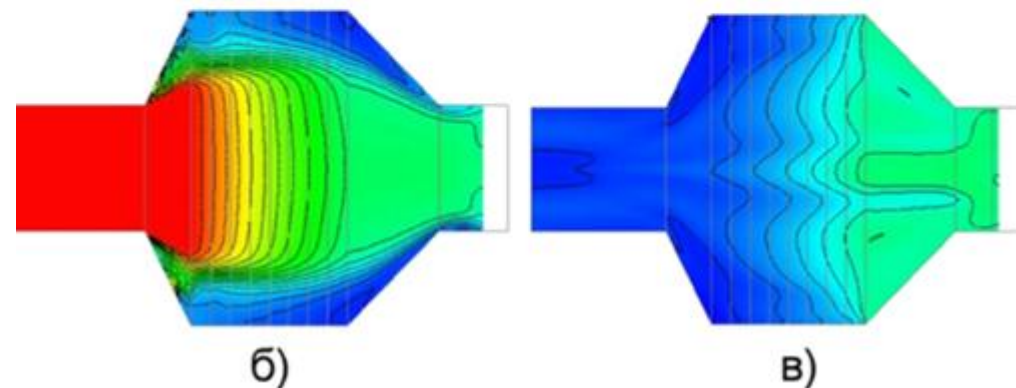
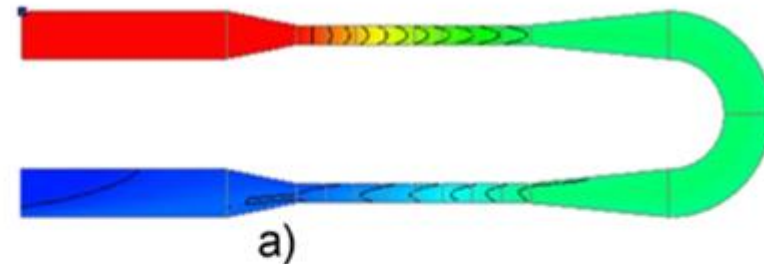


Моделирование теплообменника

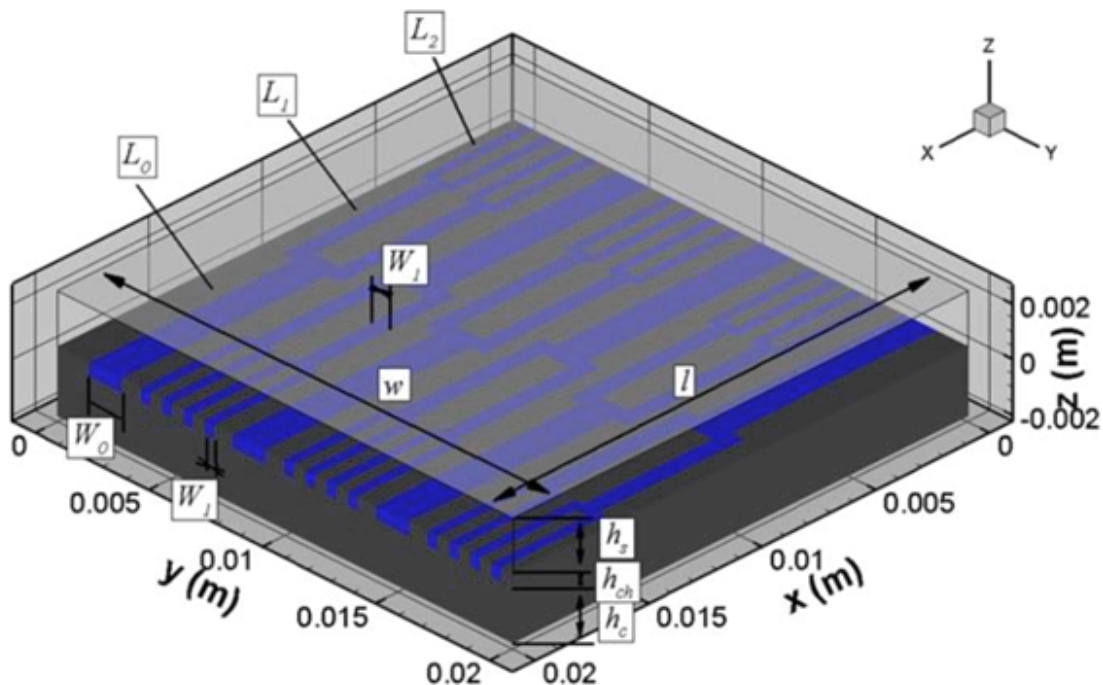
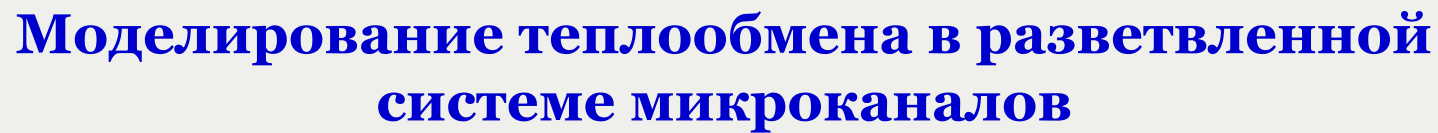


Модель экспериментальной установки

66.10 °C
52.41
38.73
25.04
11.35



Распределение температуры по теплообменнику в различных сечениях

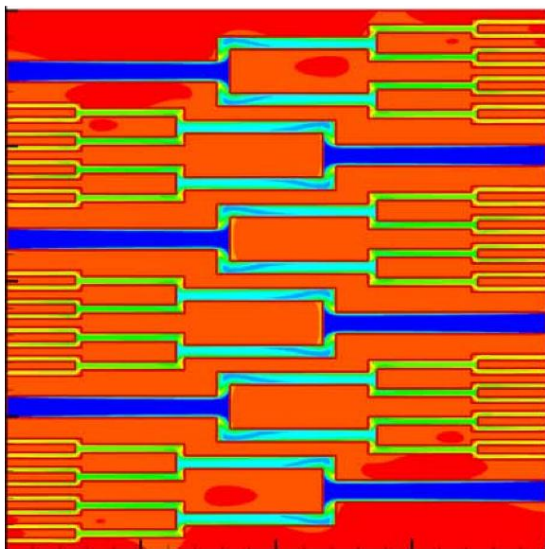
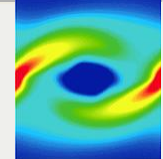


Гибридная модель теплообменника (поле скоростей)

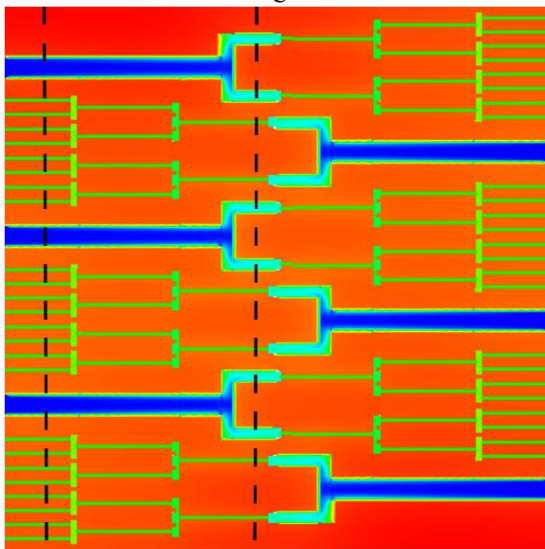
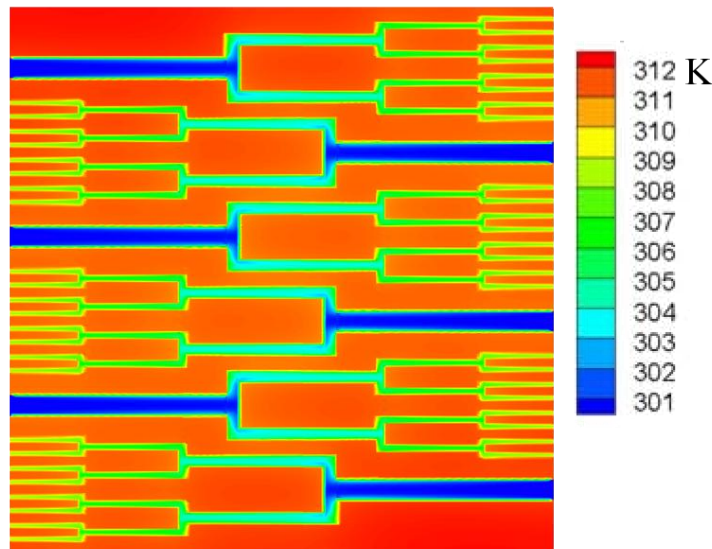
Wang X., Mujumdar A. S., Yap C., "Thermal characteristics of tree-shaped microchannel nets for cooling of a rectangular heat sink," *International Journal of Thermal Sciences*, vol. 45, p. 1103–1112, 2006



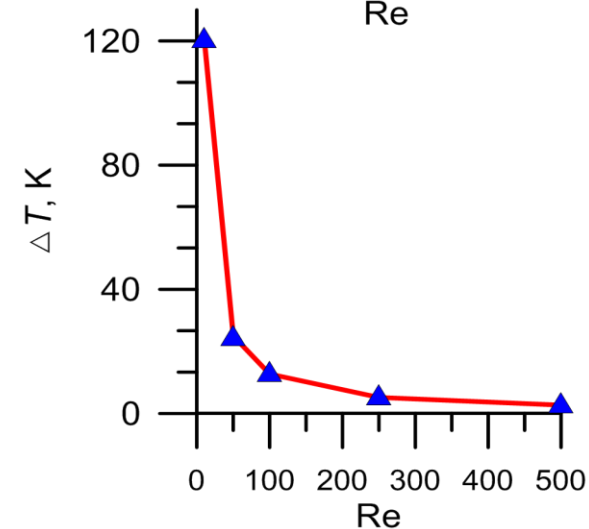
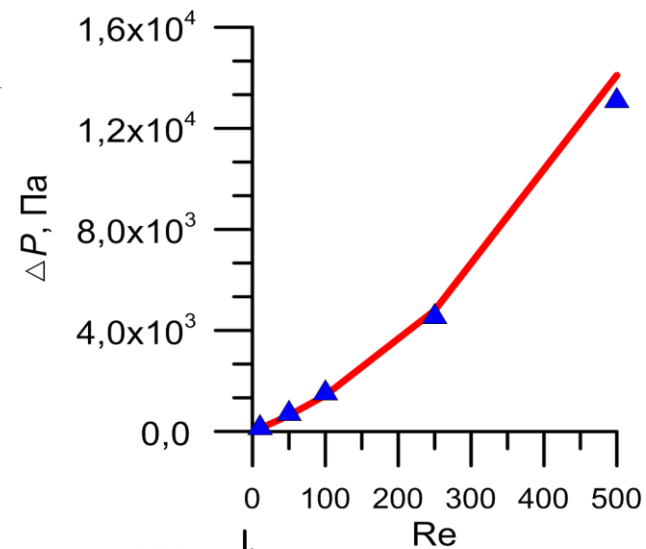
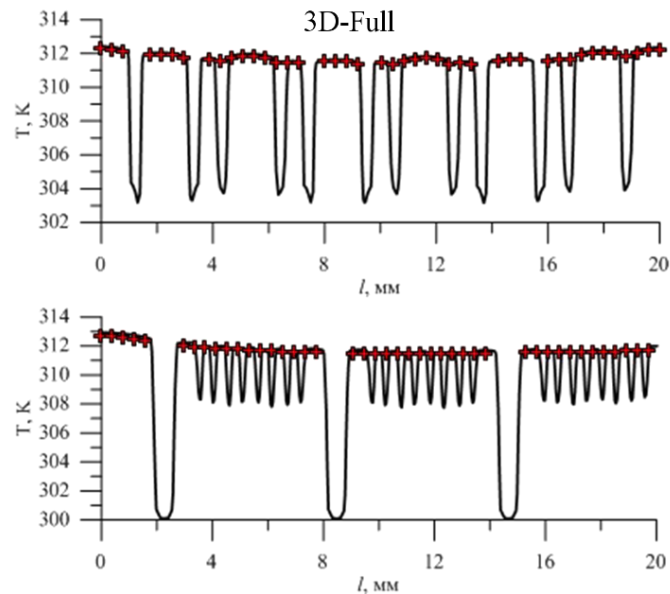
Моделирование теплообмена в разветвленной системе микросканалов



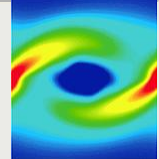
Wang X. et al



Hybrid



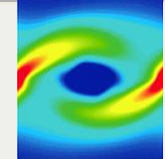
— 3D_Full
▲ Hybrid



- использование передачи геометрических данных из CAD систем и автоматическое построение пространственной расчетной сетки
- моделирование двухфазных ламинарных и турбулентных течений
- моделирование радиационного теплообмена
- гибридное моделирование CFD-гидравлические сети
- **разработка версии программы для расчета на multi-gpu кластерных системах**



GPU-версия программы SigmaFlow (ttGlabs)



Физические модели

- Стационарные и нестационарные течения
- Ламинарные течения уравнения Навье-Стокса
- Турбулентные течения
 - LES WALE
 - RANS

$k-\epsilon$

MSST

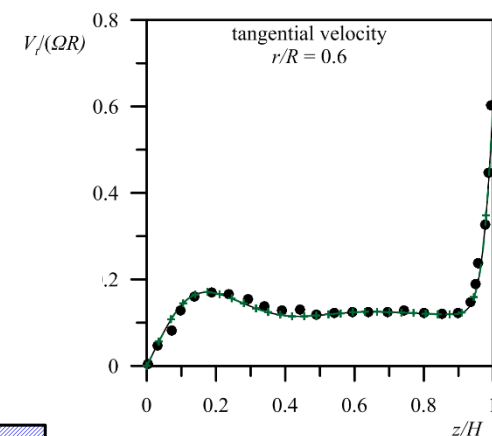
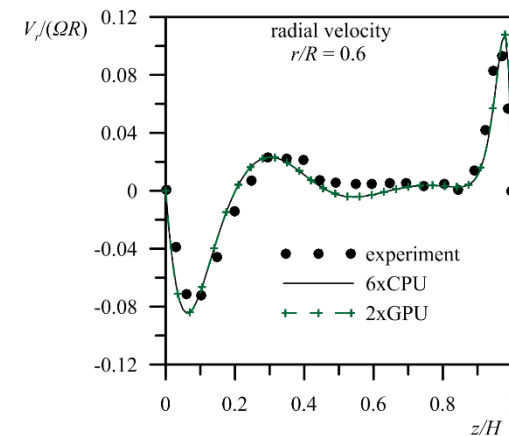
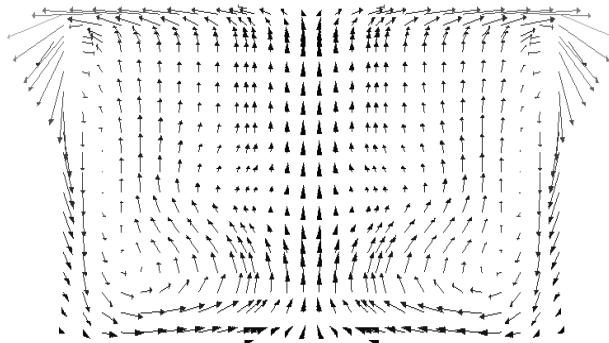
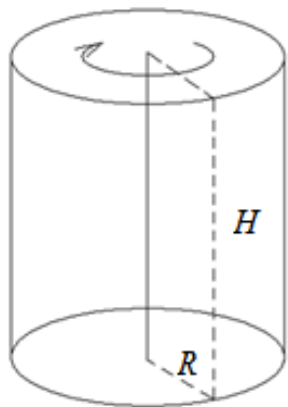
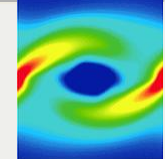
$k-\epsilon-\zeta-f$

Инструментарий

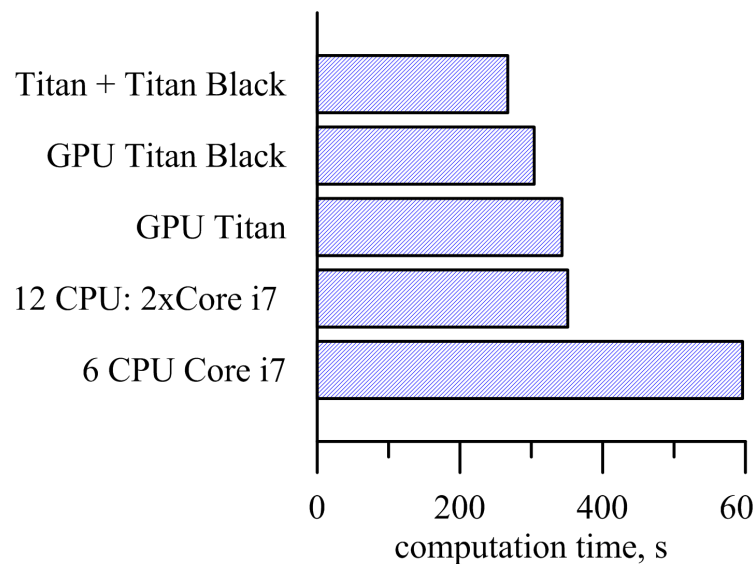
- CUDA
- Multi GPU - MPI



Течение в сосуде с вращающейся крышкой

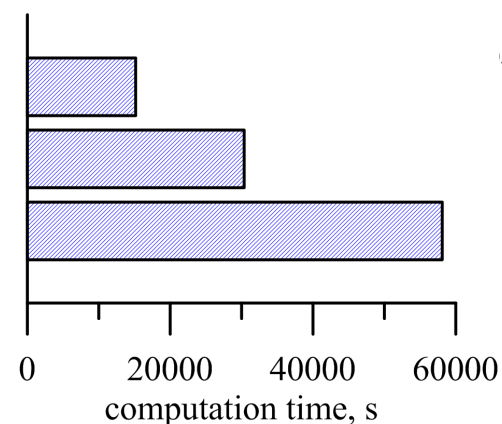


Время расчёта



800 тыс. ячеек

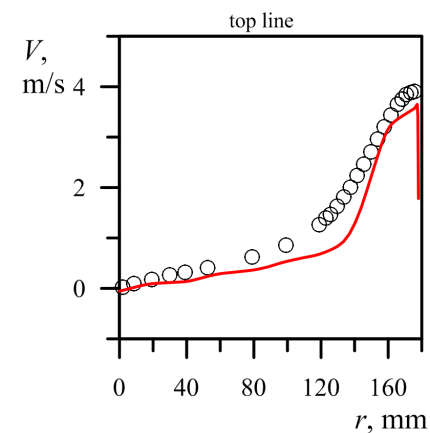
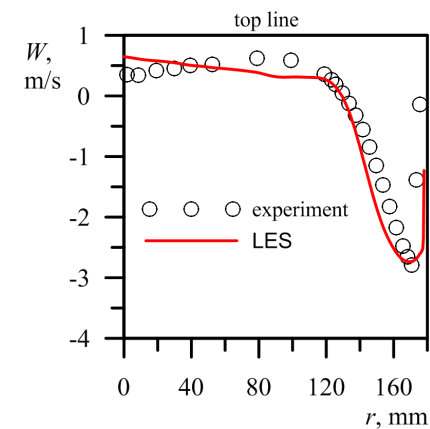
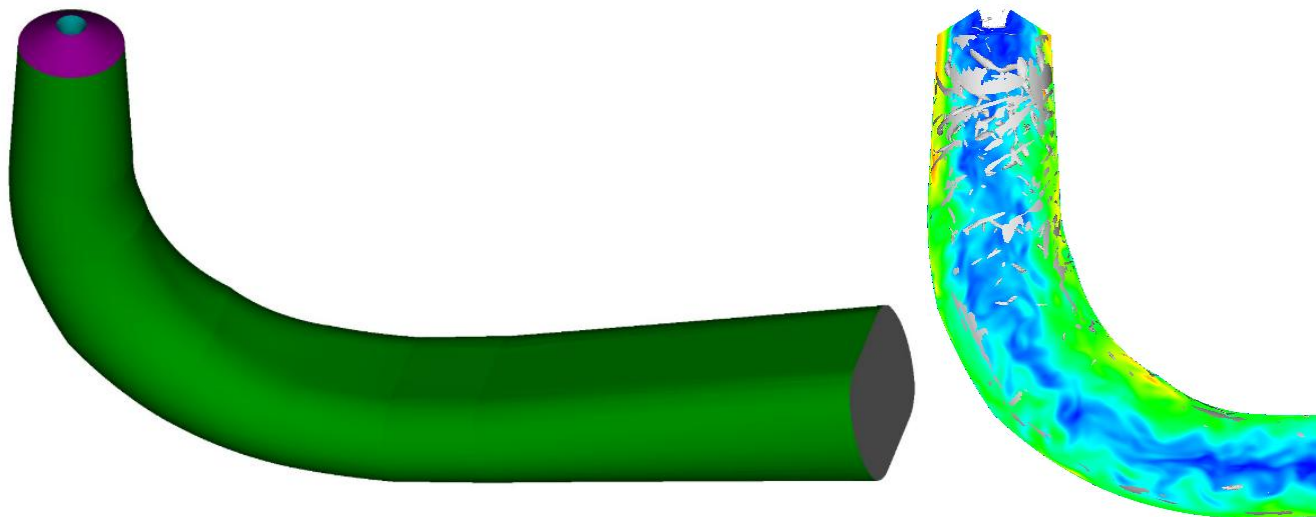
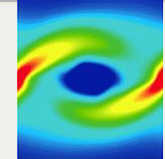
Titan + Titan Black
12 CPU: 2xCore i7
6 CPU Core i7



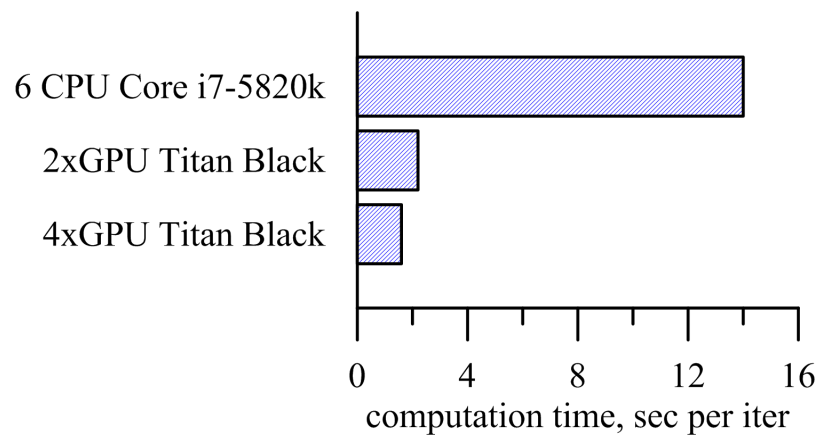
10 млн. ячеек



LES расчет течения в отсасывающей трубе гидротурбины



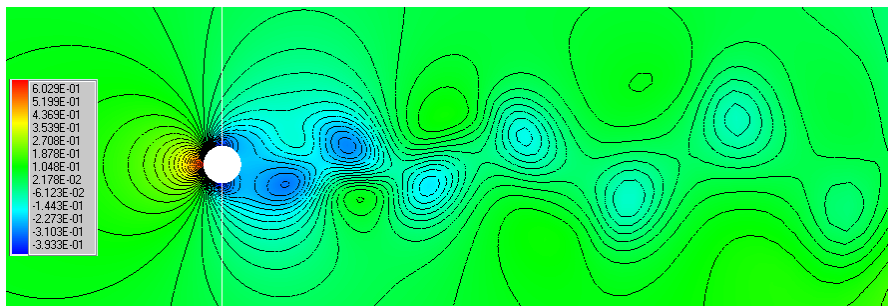
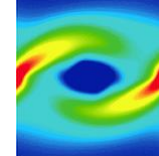
Время расчёта на 1 итерацию



7,8 млн. ячеек

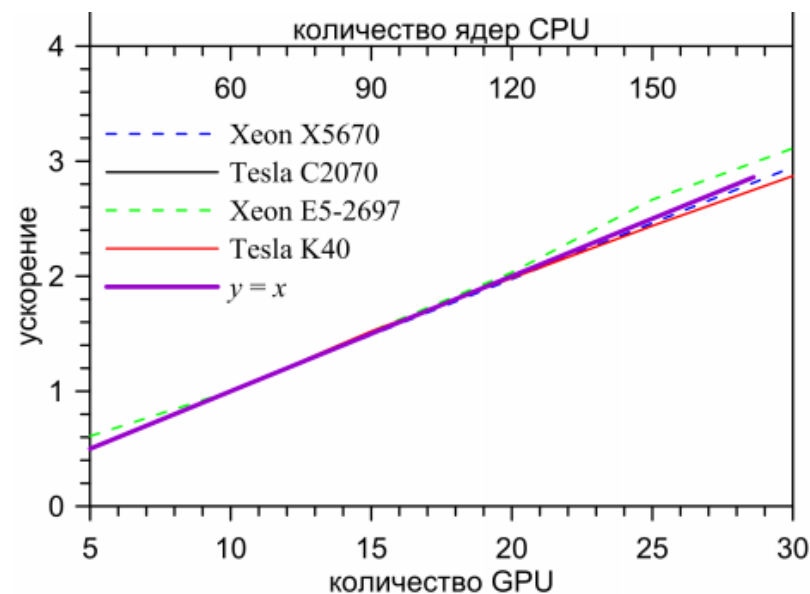
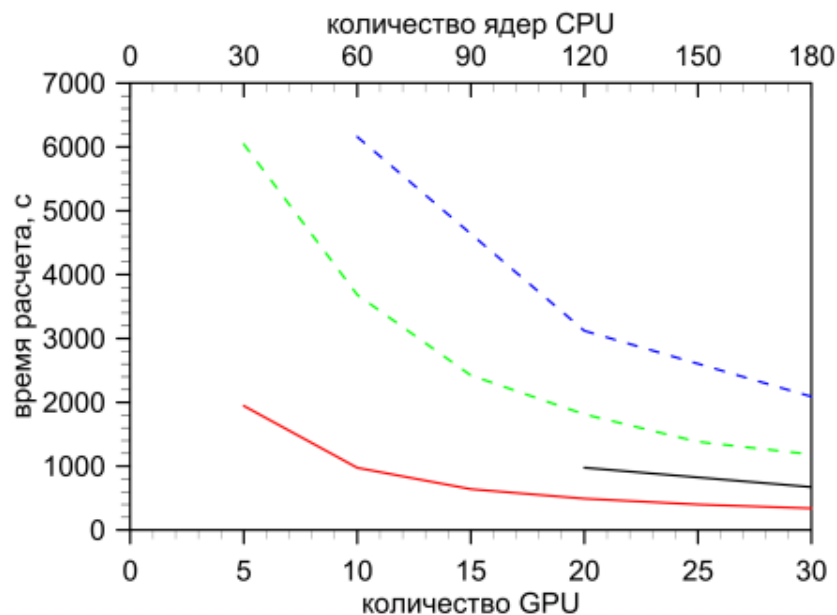


GPU-версия программы SigmaFlow



Характеристики вычислительных узлов
кластера «Ломоносов»

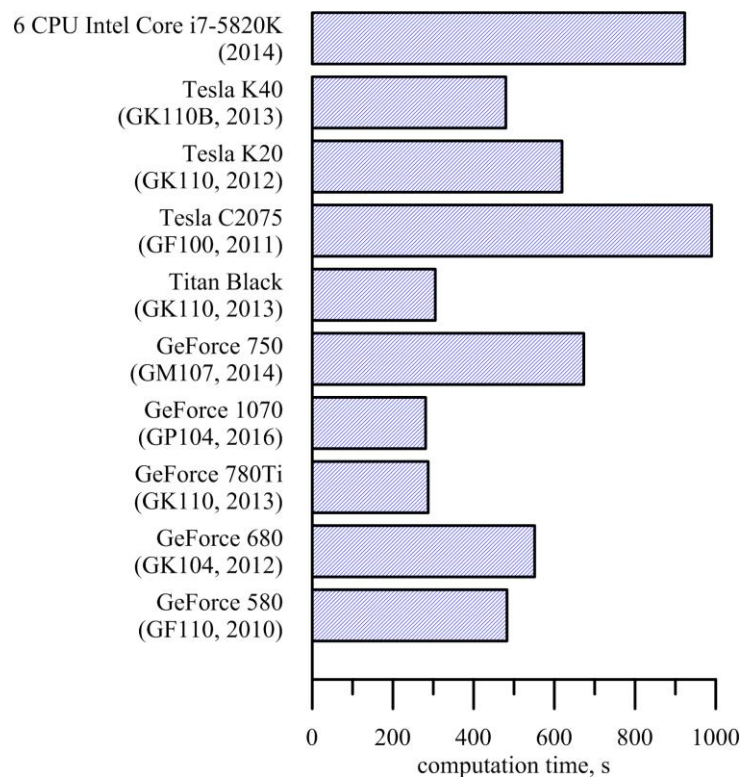
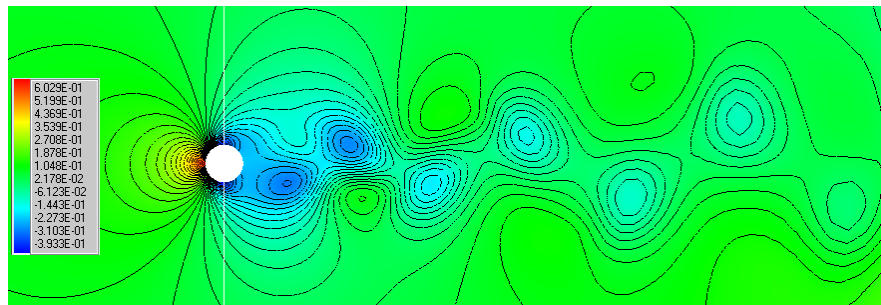
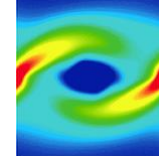
Вычислительный узел	Частота, ГГц	Объем памяти узла, Гб
Nvidia Tesla C2070	1,15	6
Nvidia Tesla K40	0,745	12
Intel Xeon 5670	2,93	48
Intel Xeon E5-2697v3	2,6	64



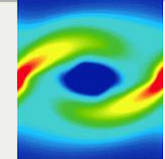
50 млн. ячеек



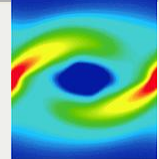
GPU-версия программы SigmaFlow



1,5 млн. ячеек, одинарная точность



- Специализированная версия программы для расчета динамики распространения примеси над городом (на примере г. Красноярск)
- Ряд специализированных версий программы для моделирования процессов в технологических аппаратах
- Развитие версии программы для расчета на GPU
- Свободно распространяемая версия программы для ВУЗов



Спасибо за внимание!