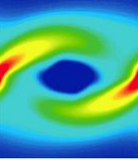




CFD - weekend 2017

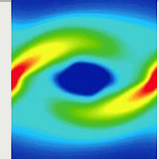


Комплекс программ SigmaFlow 2017

Литвинцев К.Ю.,

Гаврилов А.А., Дектерев А.А., Сентябов А.В., Филимонов С.А.

Институт Теплофизики СО РАН, Красноярский филиал



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

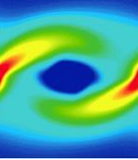
SigmaFlow – 2001

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

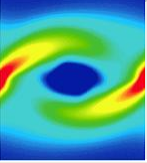
Дектерев А.А., Гаврилов А.А., Харламов, Е.Б., Литвинцев К.Ю. Использование программы SigmaFlow для численного исследования технологических объектов. Вычислительные технологии, т.8, ч.1, 2003



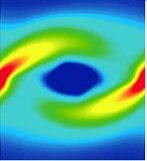
Численный метод. Несжимаемые течения



- **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



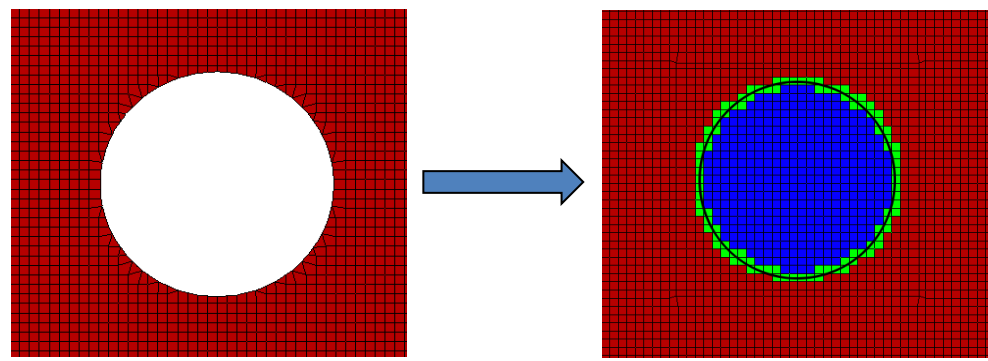
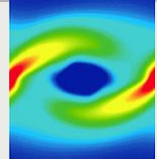
- стационарные и нестационарные течения;
- турбулентность (RANS, RANS/LES, LES);
- неньютоновские жидкости;
- процессы смешения и диффузии неоднородных газовых смесей;
- химические реакции в потоке , горение газообразного, жидкого и твердого топлива;
- конвективный, радиационный теплообмен, теплопроводность;
- 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



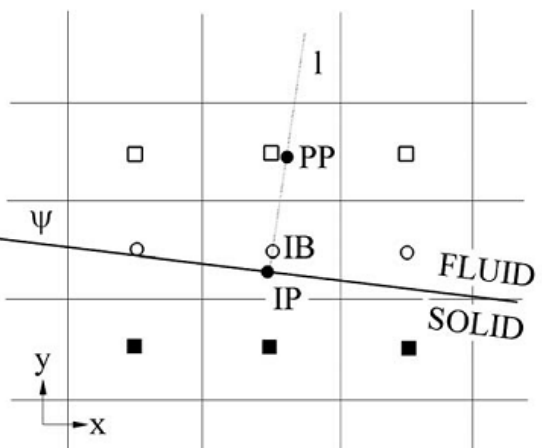
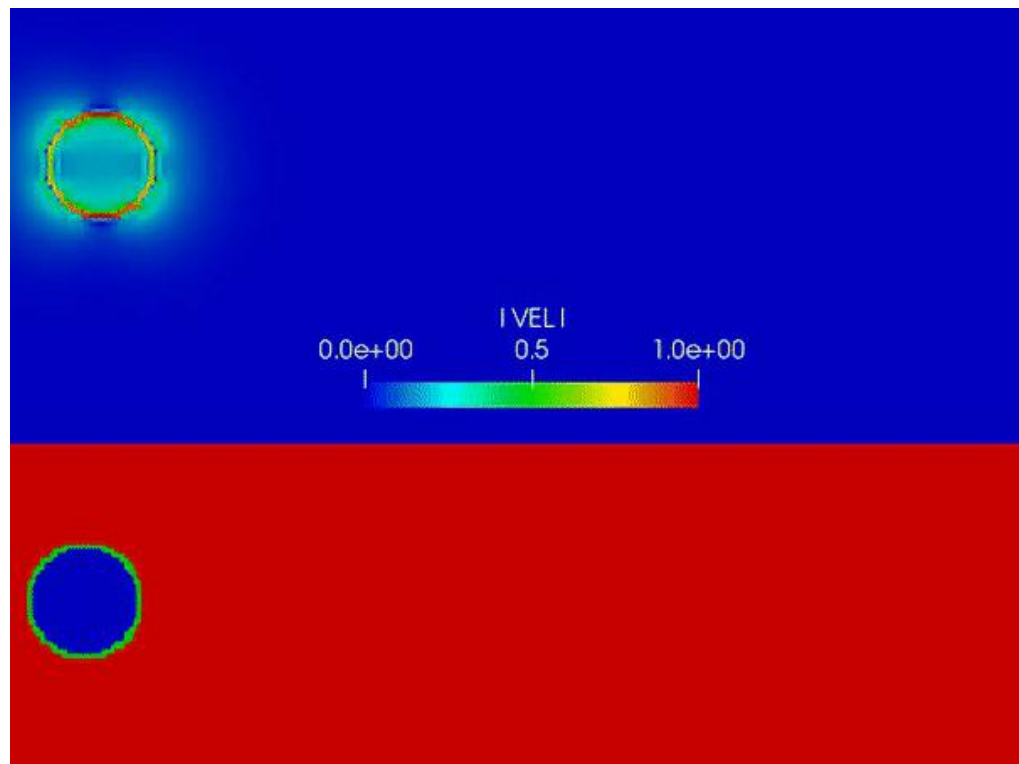
- **развитие модели для задач с подвижными телами;**
- разработка моделей и методов для расчета дисперсных потоков;
- развитие версии программы для расчета на multi-gpu кластерных системах;
- анализ URANS моделей турбулентности;
- создание специализированной программы для расчета химического реактора;
- развитие специализированной программы для расчета течения буровых растворов;
- создание свободно распространяемой версии программы SigmaFW.



Immersed Boundary Method



Сетка



$$F_{IB} = \frac{V_{IB}^S - V_{IB}^L}{t}$$

$$V_{IB}^S = \frac{V_{IP} \cdot h_2 + V_{PP} \cdot h_1}{h_1 + h_2}$$

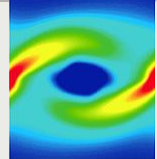
$$h_1 = |IB - IP|$$

$$h_2 = |PP - IP|$$

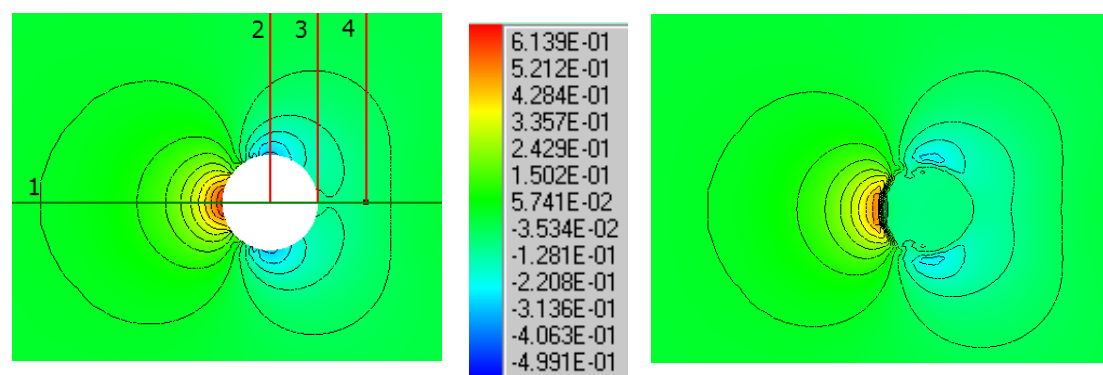
Roman, F.; Armenio, V.; Fröhlich, J. A simple wall-layer model for large eddy simulation with immersed boundary method *Physics of Fluids*, Volume 21, Issue 10, pp. 101701-101701-4 (2009) doi: 10.1063/1.3245294



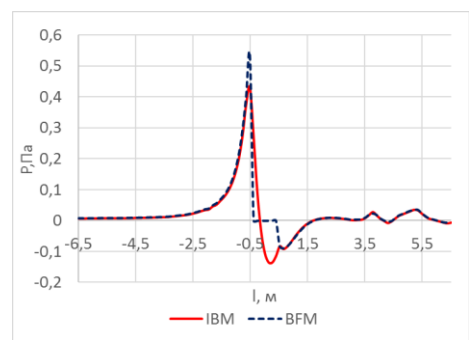
Immersed Boundary Method



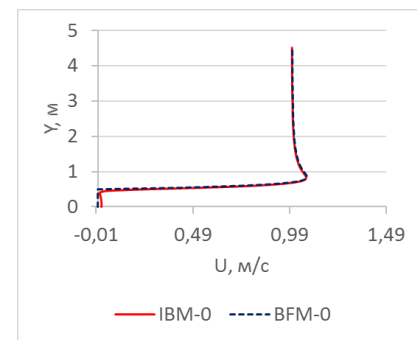
Обтекание шара $Re = 100$



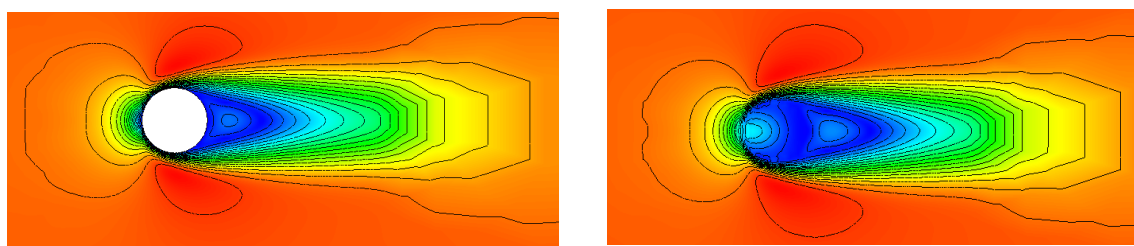
Поле давления (Па)



P вдоль сечения 1



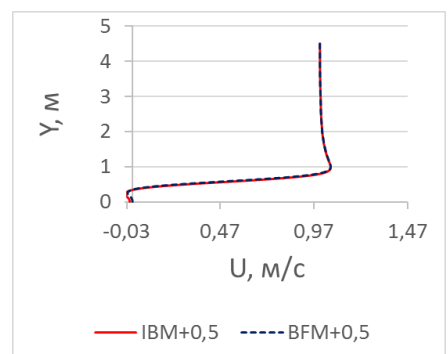
U вдоль сечения 2



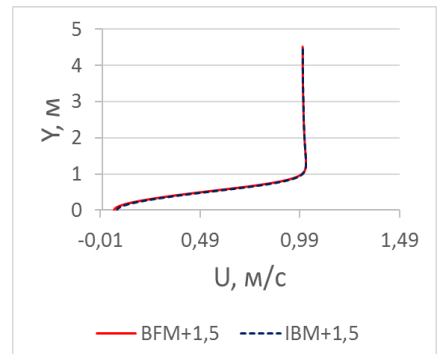
Магнитуда скорости

BFM

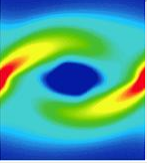
IBM



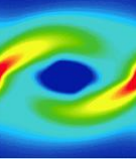
U вдоль сечения 3



U вдоль сечения 4



- развитие методов расчета задач с подвижными телами;
- **разработка моделей и методов для расчета дисперсных потоков;**
- развитие версии программы для расчета на multi-gpu кластерных системах;
- анализ URANS моделей турбулентности;
- создание специализированной программы для расчета химического реактора;
- развитие специализированной программы для расчета течения буровых растворов;
- создание свободно распространяемой версии программы SigmaFW.



Течения высококонцентрированных суспензий на основе континуального подхода

Уравнение движения смеси + уравнение переноса концентрации частиц

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

Уравнение на относительная скорость

$$\mathbf{u}_p - \mathbf{u}_f = \mathbf{u}_r = \frac{\tau_p}{\rho_p} \left[\underbrace{(\rho_p - \rho_f) \left(\mathbf{g} - \frac{d\mathbf{u}_m}{dt} \right)}_{\text{силы плавучести и инерции}} + \frac{1}{\phi} (\mathbf{F}_{Lift} + \underbrace{\nabla \cdot \Sigma_p}_{\text{межчастичные взаимодействия}}) - \underbrace{\nabla \cdot (M \langle \mathbf{u}'\mathbf{u}' \rangle)}_{\text{Турбофорез}} \right] - \frac{1}{(1 - \phi)} \frac{v_t}{\sigma_t} \frac{\nabla \phi}{\phi}$$

сила сопротивления
подъёмная сила
турбулентная дисперсия

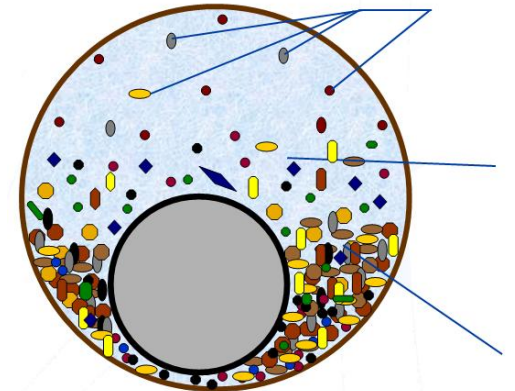
Учтённые дополнительные эффекты:

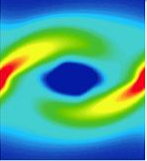
- ✓ концентрационной стеснённости частиц
- ✓ частичное скольжение частиц на стенке
- ✓ анизотропия тензора напряжений частиц
- ✓ неравновесность относительной скорости

индексы f и p относятся соответственно к несущей жидкости и частицам

Сложности и неизвестности:

- ✓ влияние формы частиц
- ✓ полидисперсный состав
- ✓ усложнение модели взаимодействия частиц с турбулентным потоком
- ✓ движение ансамбля частиц в неньютоновской жидкости
- ✓ ...

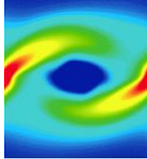




- развитие методов расчета задач с подвижными телами;
- разработка моделей и методов для расчета дисперсных потоков;
- развитие версии программы для расчета на multi-gpu кластерных системах;
- анализ URANS моделей турбулентности;
- создание специализированной программы для расчета химического реактора;
- **развитие специализированной программы для расчета течения буровых растворов;**
- создание свободно распространяемой версии программы SigmaFW.



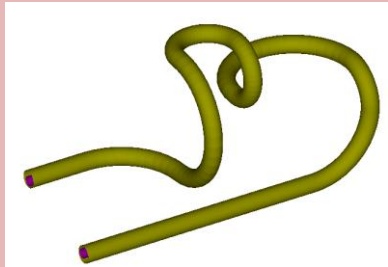
Специализированная программа



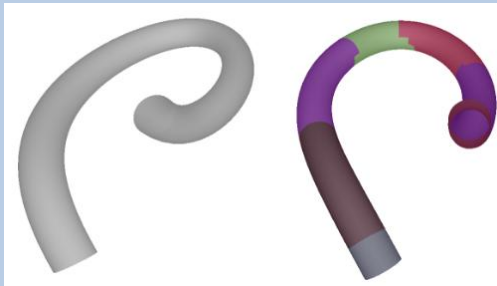
Для моделирования нестационарных канальных течений неньютоновских (вязкопластических) жидкостей с твердыми частицами

Модули

Генератор сетки



Программа построения и декомпозиции многоблочной структурированной сетки



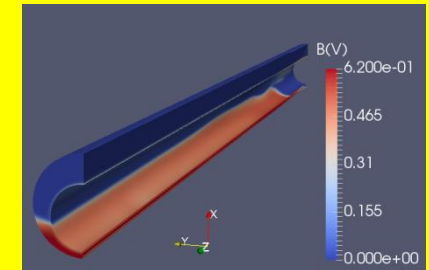
CFD программа

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0$$

$$\rho \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \rho (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} = -\nabla p + (\rho - \rho_{ref}) \mathbf{g} + \nabla \cdot (\mathbf{T}_v + \mathbf{T}_t)$$

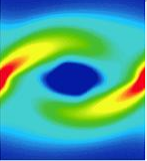
$$\rho \frac{\partial f_s}{\partial t} + \rho (\mathbf{u} \cdot \nabla) f_s = -\nabla \cdot (\rho_s (1 - f_s) \mathbf{u}_r f_s)$$

Экспорт сетки и результатов



CFD проблемы:

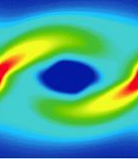
- ✓ наличие участков с переходным и установившимся течениями – необходим автоматический (полуавтоматический) подбор детализации сетки
- ✓ сильная связь полей скорости, давления и концентрации – затратная итерационная процедура на каждом временном шаге
- ✓ моделирование несмешивающихся жидкостей – размывание границы раздела
- ✓ сильно анизотропная сетка с вытянутыми вдоль канала ячейками, решение – использование многосеточного решателя с декомпозицией расчетной области вдоль канала



- развитие методов расчета задач с подвижными телами;
- разработка моделей и методов для расчета дисперсных потоков;
- **развитие версии программы для расчета на multi-gpu кластерных системах;**
- анализ URANS моделей турбулентности;
- создание специализированной программы для расчета химического реактора;
- развитие специализированной программы для расчета течения буровых растворов;
- создание свободно распространяемой версии программы SigmaFW.



GPGPU-версия



Реализация:

- CUDA 7.0
- MPI (GPU/GPU, CPU/CPU, CPU/GPU)

Решение СЛАУ:

- вариационный метод сопряженных невязок
- варианты метода Гаусса-Зейделя

Сетка:

- неструктурированная из гексаэдральных ячеек

Модели:

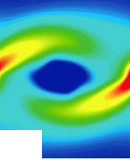
- стационарное/нестационарное течение
- ламинарное/турбулентное течение

Моделирование турбулентности:

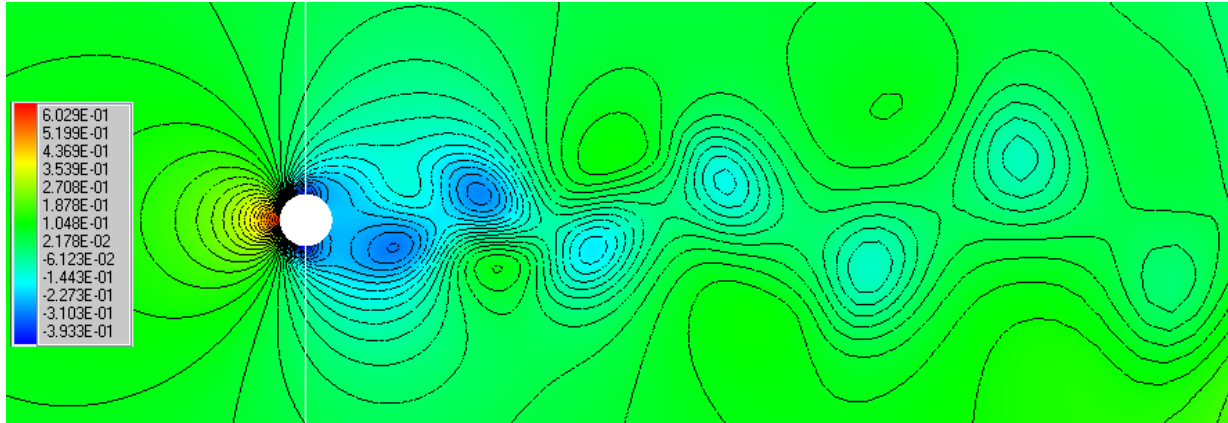
- LES WALE
- RANS: k - ω , k - ω SST
- DES/DDES на основе k - ω SST
- Пристеночные функции/WIN



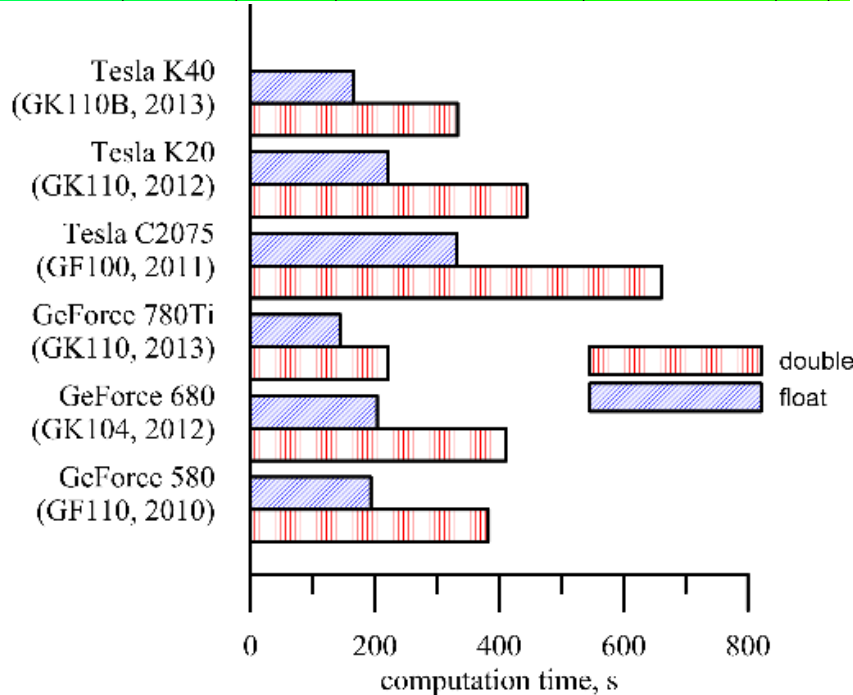
Тестирование производительности GPGPU



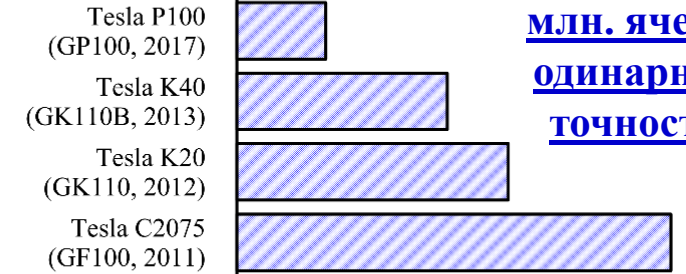
Обтекание цилиндра:



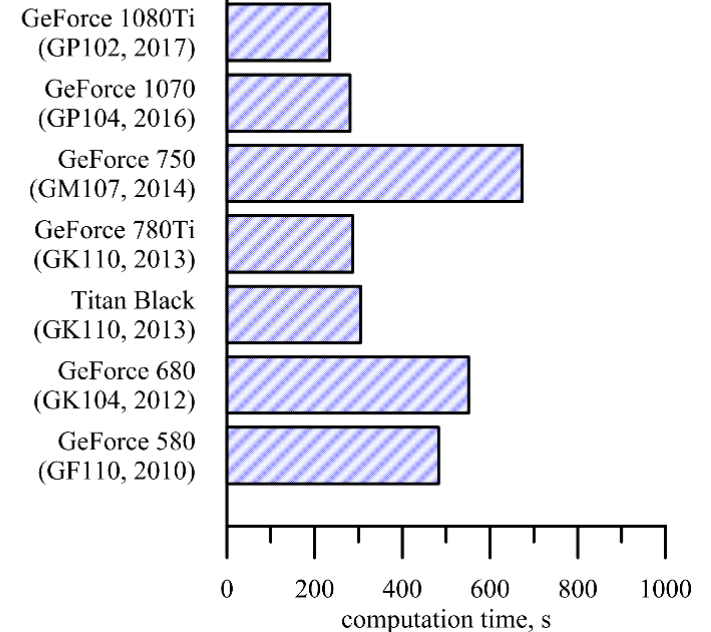
**Сетка: 0,75 млн.
ячеек, одинарная и
двойная точность**



14 CPU Intel Core i9 7940X
(SkyLake-X, 4GHz, 2017)
8 CPU AMD Ryzen 7 1700
(Zen, 3.6 GHz, 2017)
6 CPU Intel Core i7-5820K
(Haswell-E, 2014)

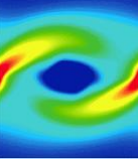


**Сетка: 1,5
млн. ячеек,
одинарная
точность**





Турбулентное течение в плоском канале

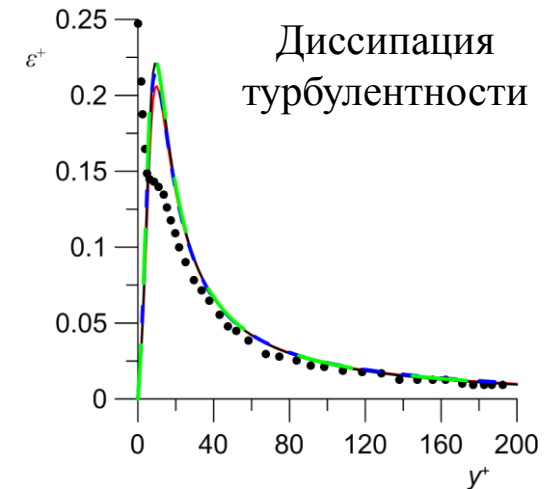
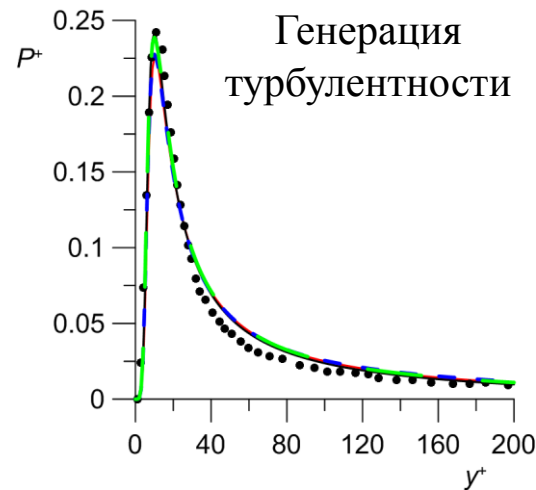
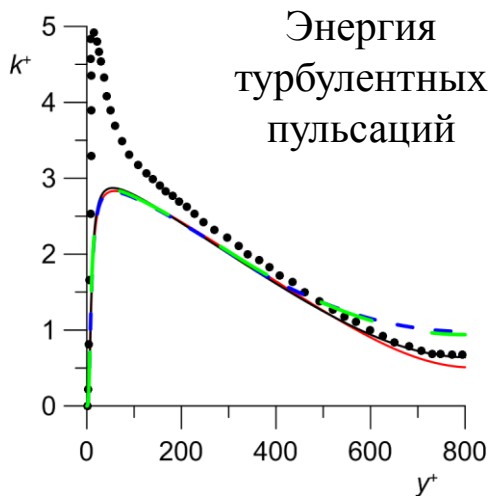
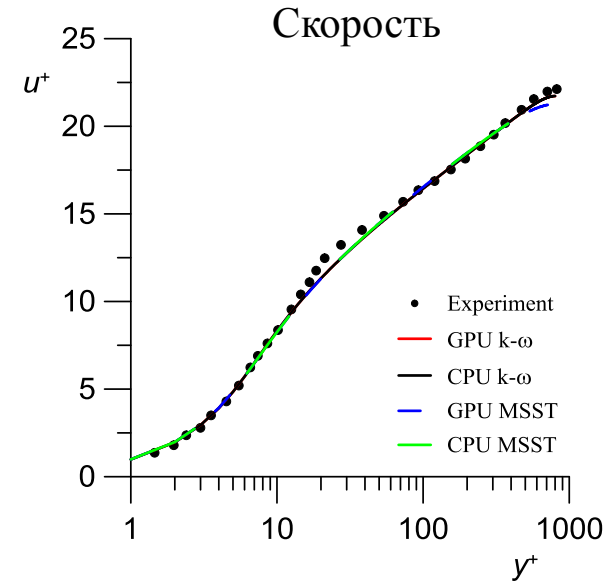


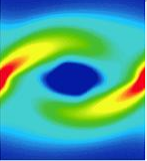
$$Re_\tau = 800$$

$y^+ = 0.2$, 1000 узлов поперек канала,
периодические условия вдоль канала

Напряжение на стенке, Па

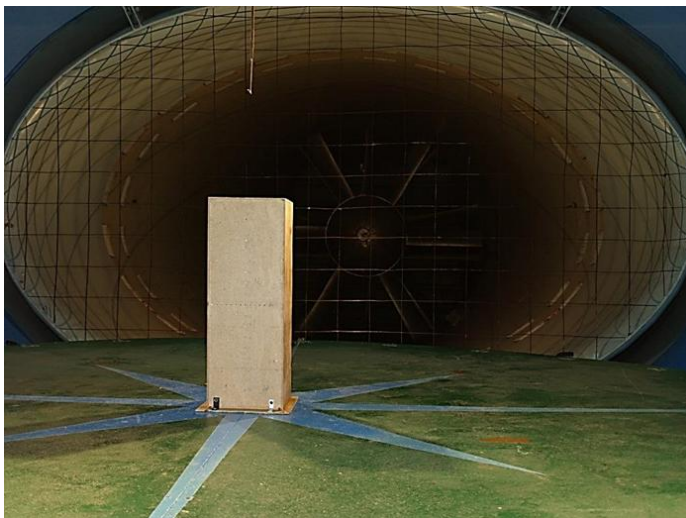
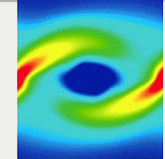
	k-ω	k-ω SST
CPU	$6.2 \cdot 10^{-5}$	$6.28 \cdot 10^{-5}$
GPU	$6.2 \cdot 10^{-5}$	$6.28 \cdot 10^{-5}$
эксперимент	$6.40 \cdot 10^{-5}$	





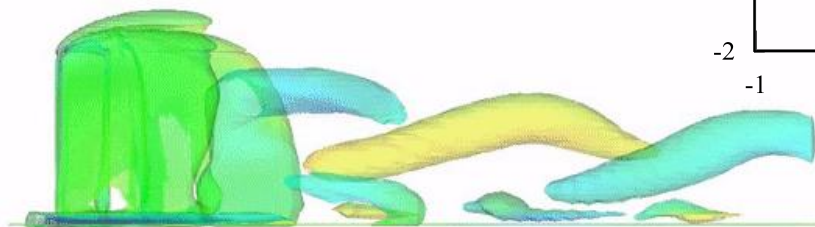
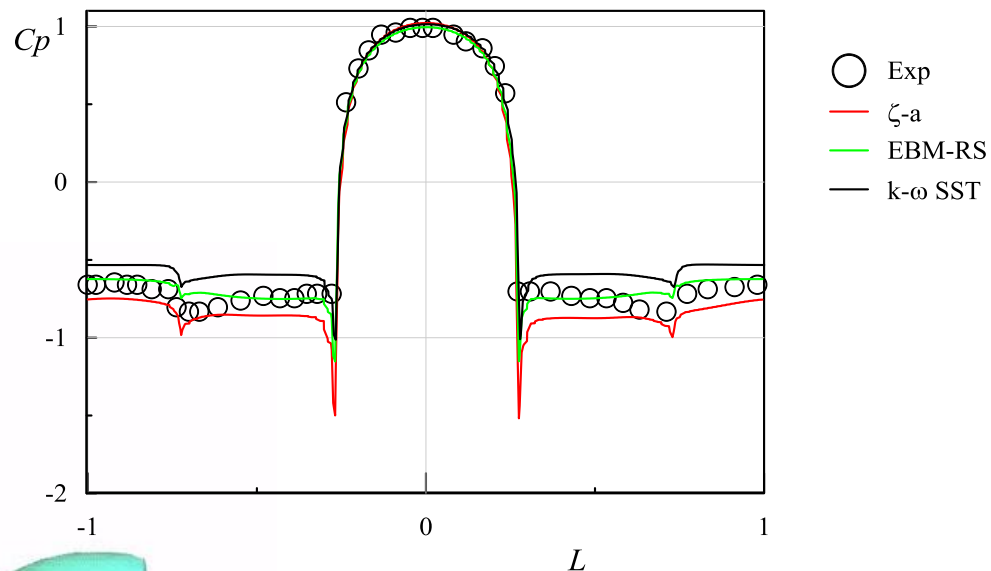
- развитие методов расчета задач с подвижными телами;
- разработка моделей и методов для расчета дисперсных потоков;
- развитие версии программы для расчета на multi-gpu кластерных системах;
- **анализ URANS моделей турбулентности;**
- создание специализированной программы для расчета химического реактора;
- развитие специализированной программы для расчета течения буровых растворов;
- создание свободно распространяемой версии программы SigmaFW.

Турбулентное обтекание параллелепипеда



Геометрические размеры тела:
ширина $a - 1$ м, длина $b - 0,866$ м, высота $h - 2,75$ м.
 $Re = 4.3 \cdot 10^5$.

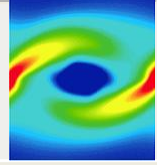
Распределение коэффициента давления вокруг
параллелепипеда на высоте $h = z/2$.



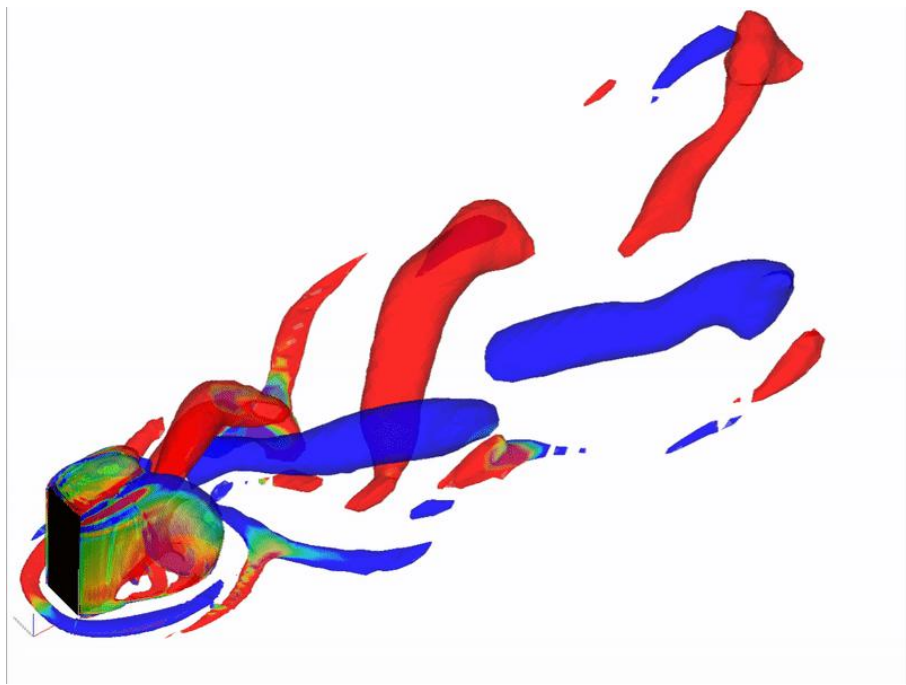
Мгновенные изоповерхности $\lambda_2 = -0,2$ окрашенные продольной компонентой завихренности. Модель турбулентности EBM-RS - модель переноса реинольдсовых напряжений с эллиптическим смешиванием.



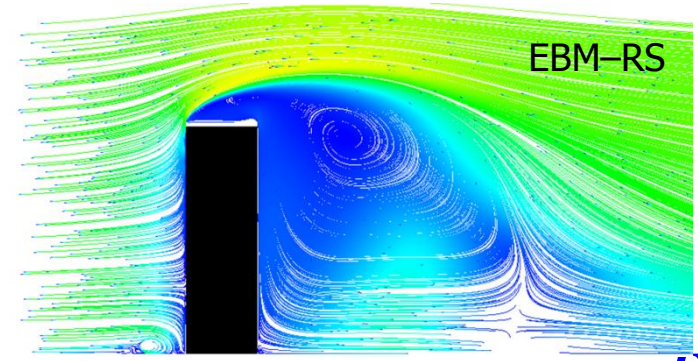
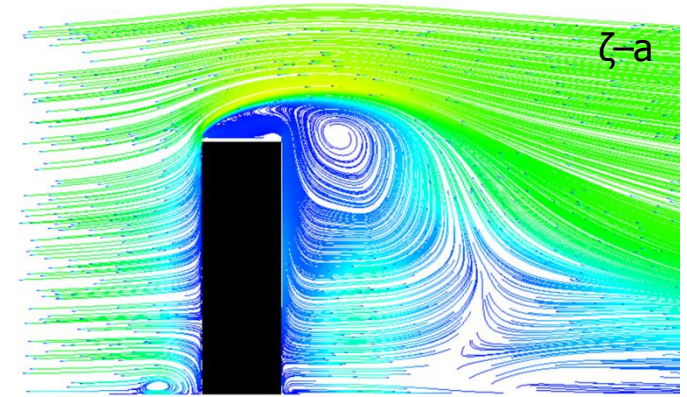
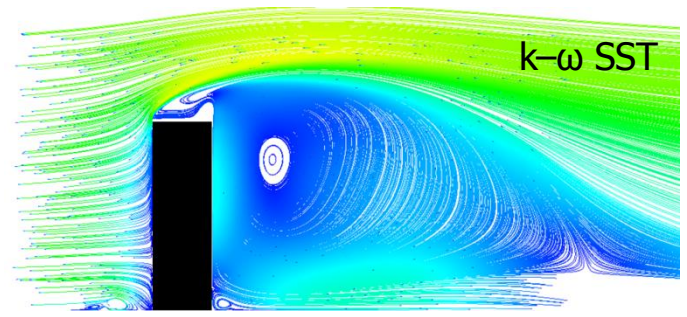
Турбулентное обтекание параллелепипеда



Мгновенные изоповерхности $\lambda_2 = -0,1$ окрашенные продольной компонентой завихренности. Модель ζ -a.

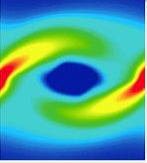


Траектории частиц осредненного течения в центральном сечении

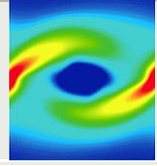


Интегральные характеристики течения

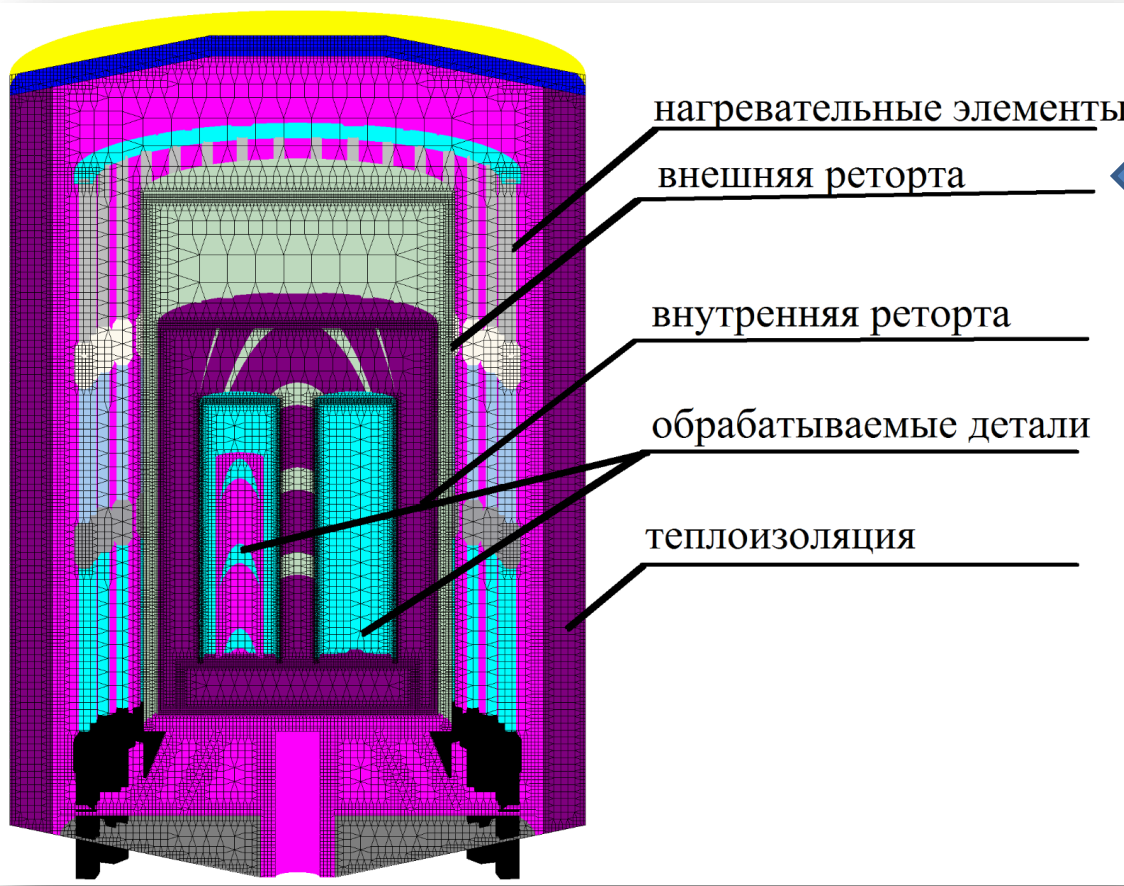
	Sh	Rx	RMS (Ry)
k- ω SST	-	1.29	0.08
ζ -a	0.104	1.5	0.74
EBM-RS	0.111	1.37	0.166
Experiment	0.11-0.12	-	-



- развитие методов расчета задач с подвижными телами;
- разработка моделей и методов для расчета дисперсных потоков;
- развитие версии программы для расчета на multi-gpu кластерных системах;
- анализ URANS моделей турбулентности;
- **создание специализированной программы для расчета химического реактора;**
- развитие специализированной программы для расчета течения буровых растворов;
- создание свободно распространяемой версии программы SigmaFW.



Постановка задачи



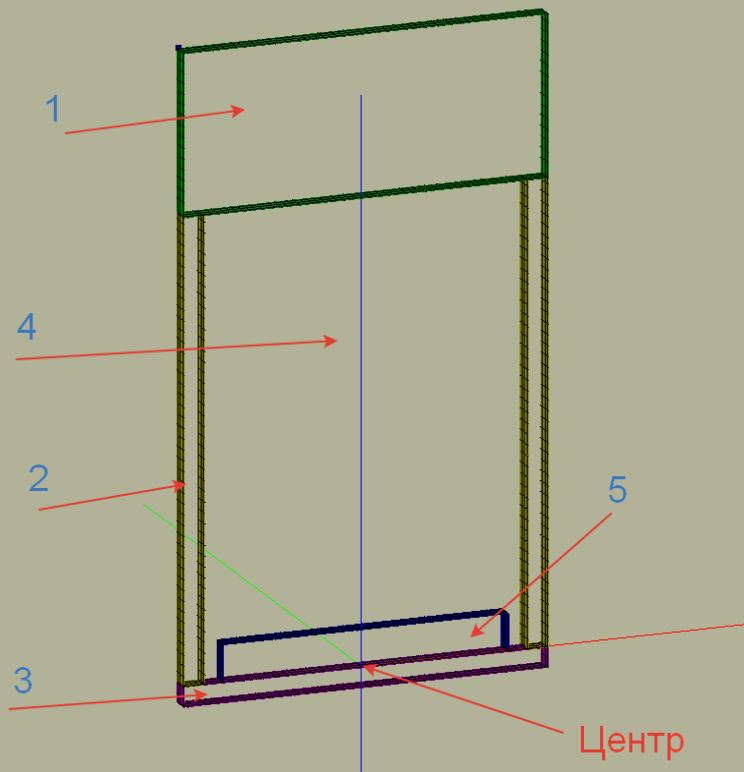
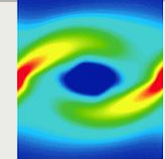
Вакуумная электропечь
СШВГ с объемом рабочего
пространства 14,7 м³

$T_{\text{макс}} = 1800 \text{ }^{\circ}\text{C}$
 $Re = 0,01-1$
 $P = 10 - 1000 \text{ Па}$

Расчетная сетка SigmaFlow для
модельной задачи переноса
энергии установки СШВГ
(13,3 млн ячеек)



Упрощение модели тепломассообмена



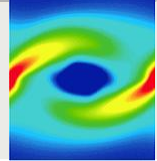
- верхняя часть межреторной области, домен 1;
- средняя часть межреторной области, домен 2;
- нижняя часть межреторной области, домен 3;
- газовая область, домен 4;
- подставка, домен 5.

➤ Расчет течения газов вне внутренней реторты не проводился. Подобное упрощение физической модели возможно в связи с отсутствием влияния течения газов вне внутренней реторты на основные технологические процессы.

➤ Внутри реторты число $Sh \approx 0,1$, что позволяет рассматривать только диффузионный перенос массы.



Перенос излучения



Метод конечных объемов (МКО)

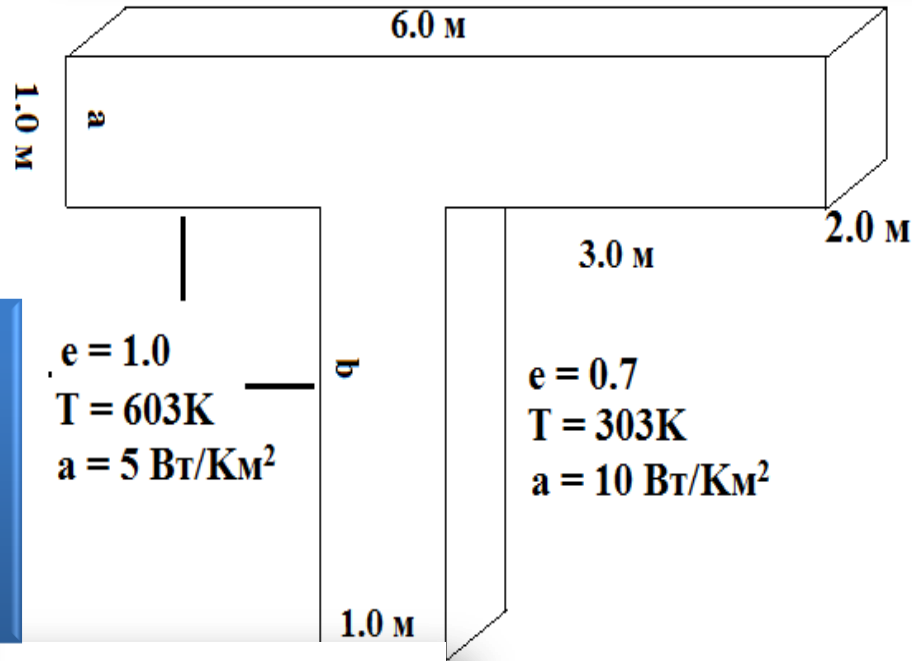
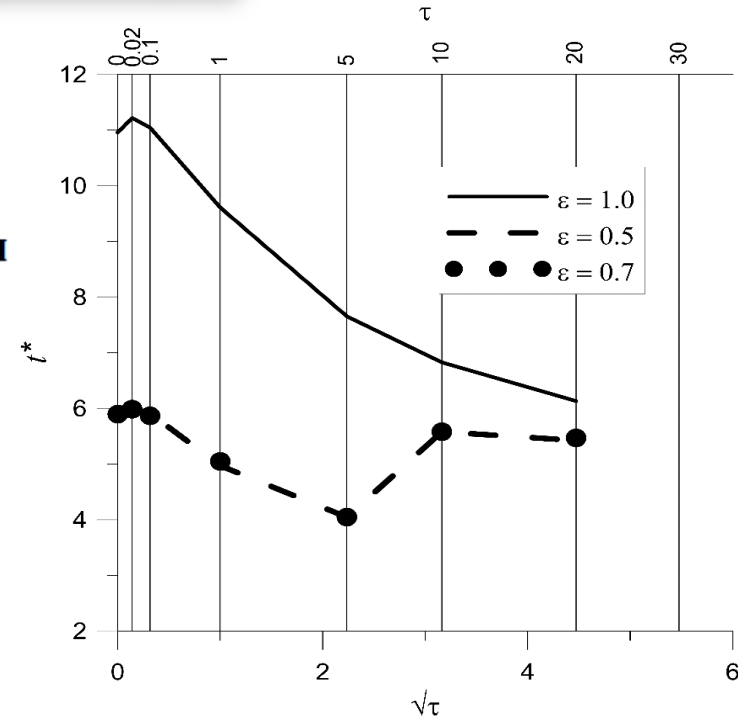
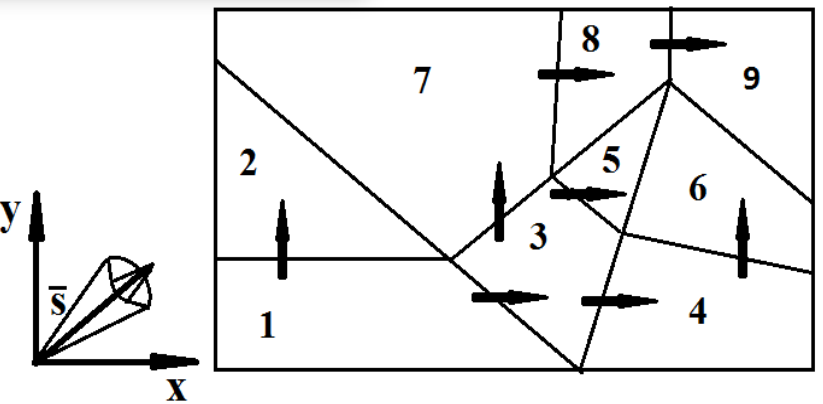


Схема «бегущего счета». Порядок обхода.

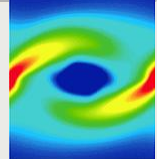


Зависимость отношения времен счета на основе схемы «бегущего счета» и метода DILU в зависимости от оптической толщины среды.



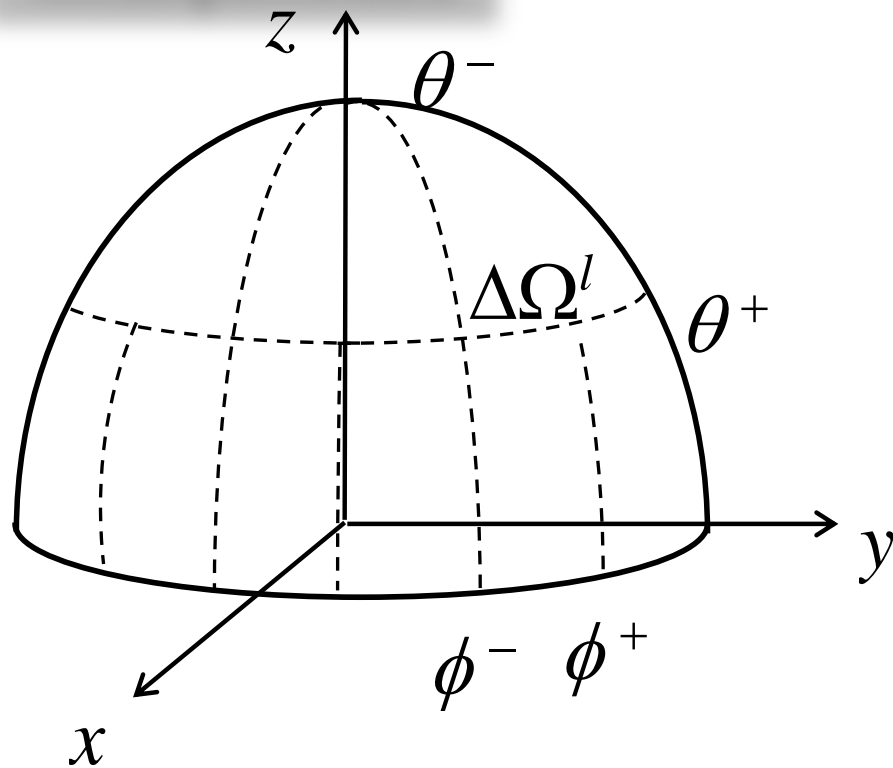


Перенос излучения

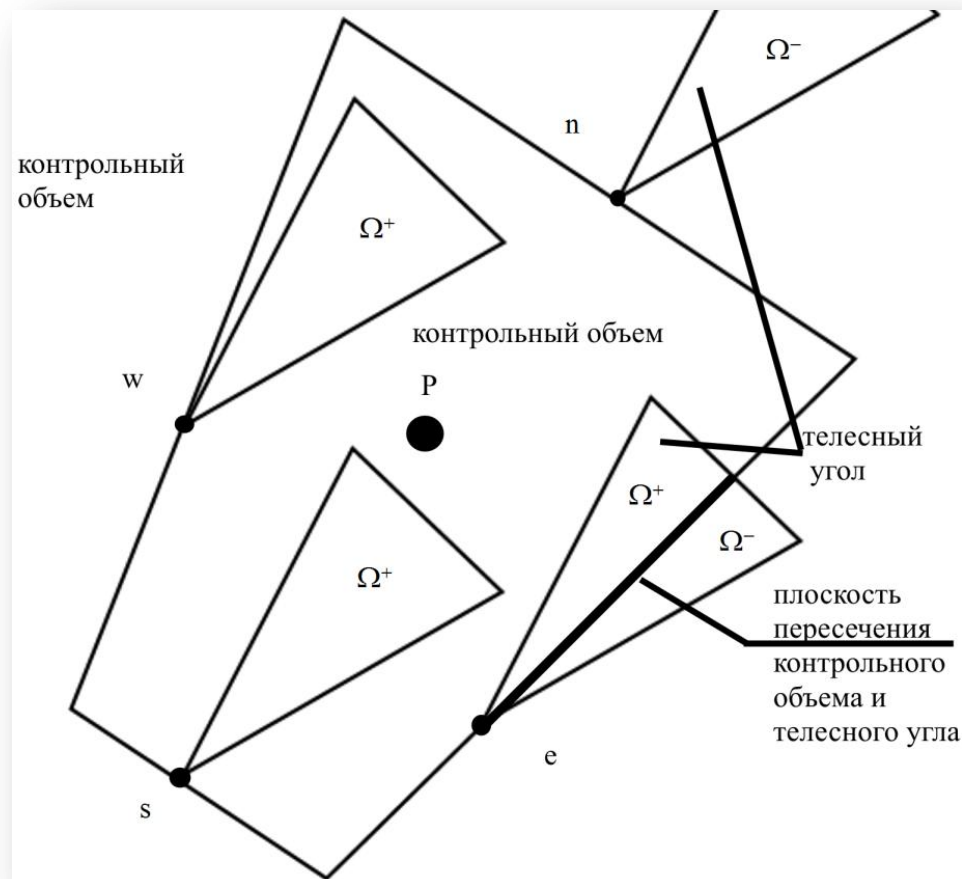


Разбиение углового пространства

FTn
модификация

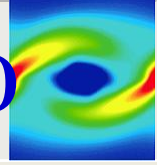


локальное
расщепление телесного угла





Импорт внутренней геометрии из CAD (формат stl)



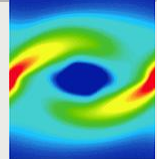
```
h_lr 3 //1,2,3 задать размер газовой области,  
h_sub 0.267 // задать высоту стола H mm  
stand1 0 -0.3 0.8 2 0 // трапециевидная область subzone = 60  
//stand2 0 0 0.34 2 0 //прямоугольная малая subzone = 61  
//stand3 0 0.35 0.34 1.5 0 //прямоугольная большая subzone = 62  
оболочка1.stl 9 // domen = 6  
оболочка2.stl 9 // domen = 7  
подставка.stl 7 // domen = 8  
кольцо1.stl 7 // domen = 9 .....  
кольцо2.stl 7  
кольцо3.stl 7  
цилиндр.stl 7  
цилиндр1.stl 7  
цилиндр2.stl 7  
цилиндр3.stl 7  
цилиндр4.stl 7  
цилиндр5.stl 7  
цилиндр6.stl 7  
  
slice1 1 0 0 0 // срезы параметры: nx ny nz d  
//slice2 0 1 0 0 // максимум 3 среза  
//slice3 0 0 1 0
```

Обновить

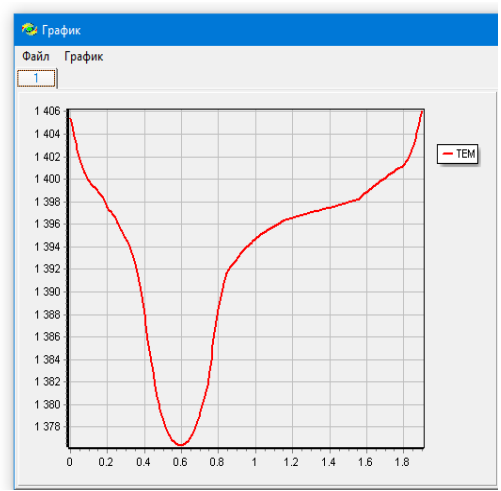
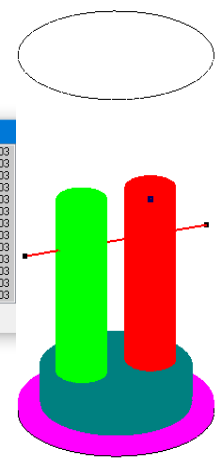
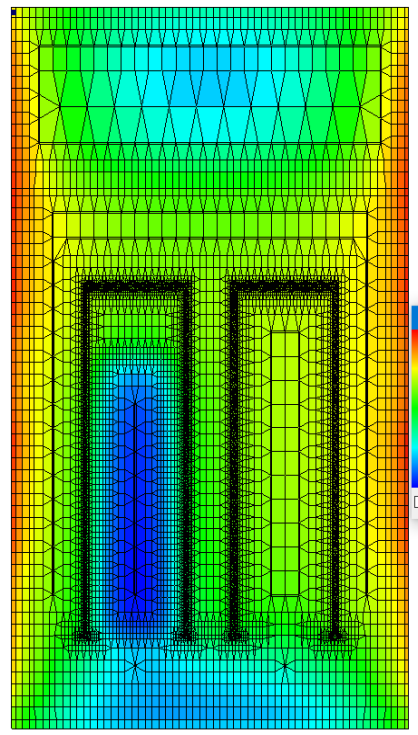
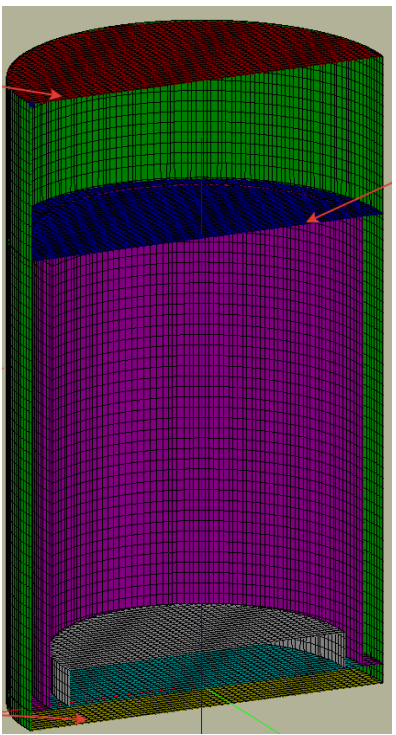
Выполнить



Расчет теплообмена внутри реторты



Распределение температур через 36 часов работы печи.

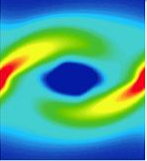


- 15 часов нагрева
- 2.1 млн. ячеек
- 24 телесных угла
- 7 потоков
- 12,7 часов расчета

Реторты без оснастки

Поле температур в сечении

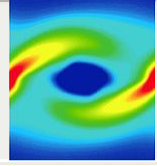
График распределения температуры вдоль заданного отрезка



- развитие методов расчета задач с подвижными телами;
- разработка моделей и методов для расчета дисперсных потоков;
- развитие версии программы для расчета на multi-gpu кластерных системах;
- анализ URANS моделей турбулентности;
- создание специализированной программы для расчета химического реактора;
- развитие специализированной программы для расчета течения буровых растворов;
- **создание свободно распространяемой версии программы SigmaFW.**



SigmaFW



свободно распространяемая версия программы
параллельная версия без ограничений на размер расчетной сетки

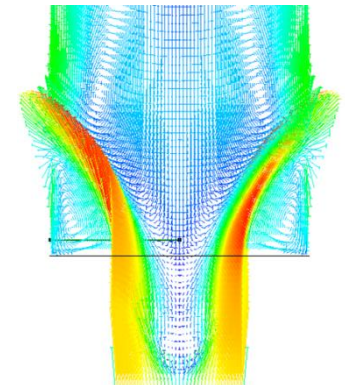
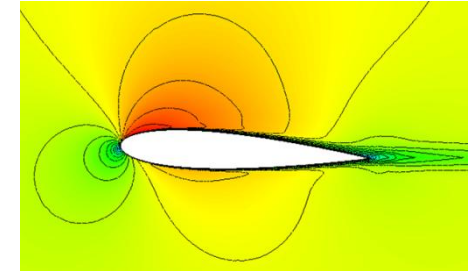
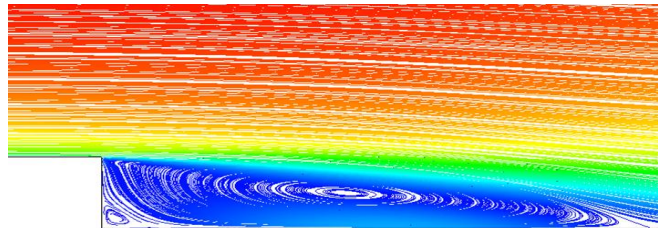
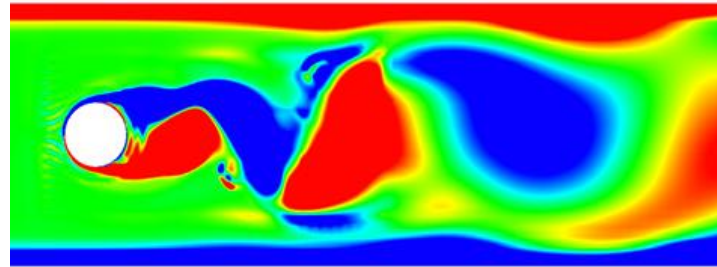
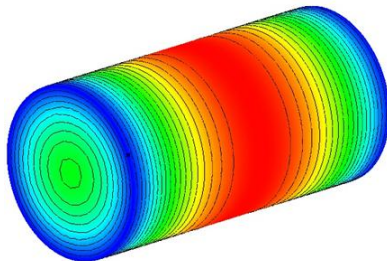
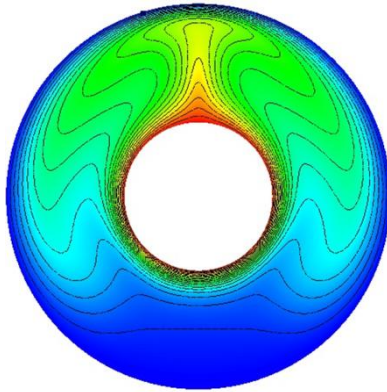
Решаемый класс задач:

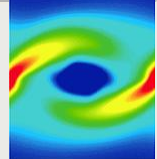
стационарные нестационарные;

ламинарные и турбулентные течения (RANS);

сложный теплообмен (теплопроводность, конвекция, **излучение**);

многофазность (Лагранж, Эйлер)





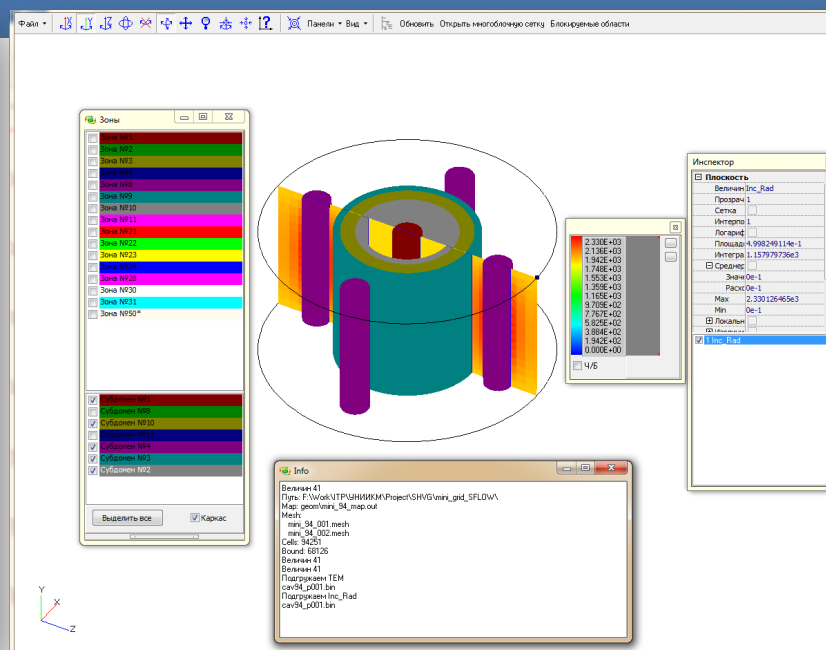
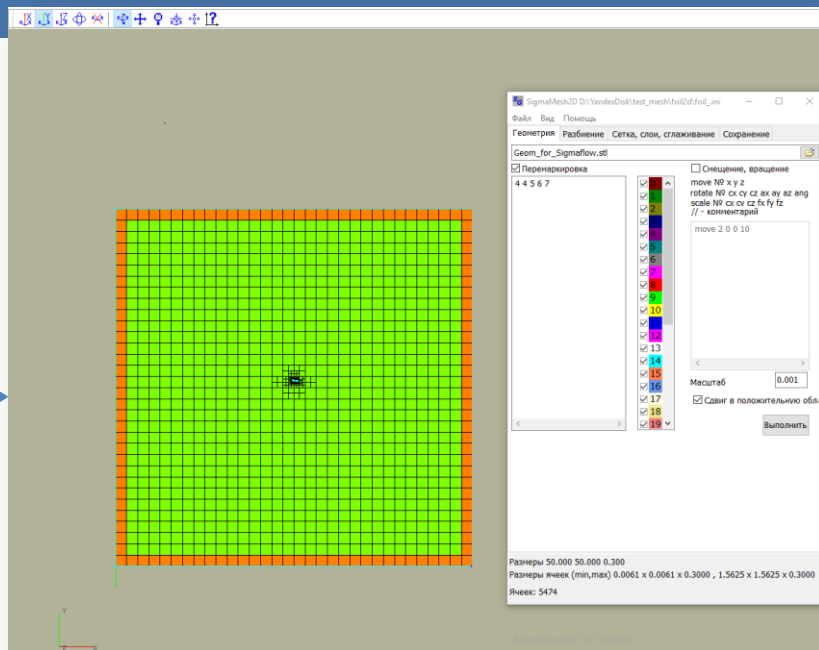
СОСТАВ ПРОГРАММЫ

МОДУЛЬ
генерации
сетки

МОДУЛЬ
задания
параметров
задачи

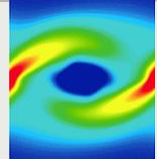
расчетный
МОДУЛЬ

МОДУЛЬ
анализа
результатов

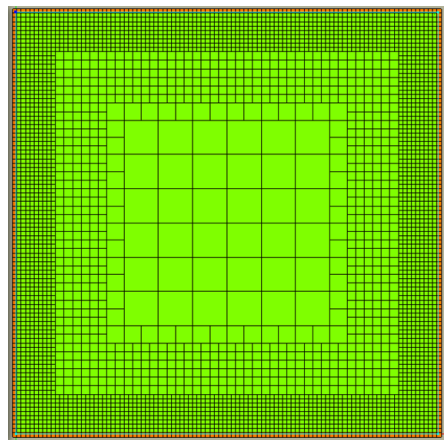
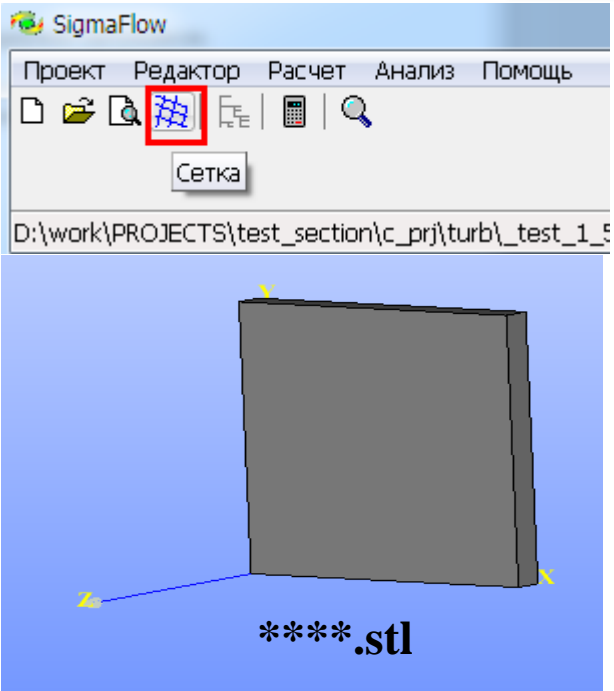




SigmaFW



Импорт и построение расчетной сетки



Список граней

Коэффициент масштабирования

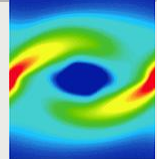
Габаритные размеры

Размеры 1.000 1.000 0.100
Размеры ячеек (min,max)
Ячеек

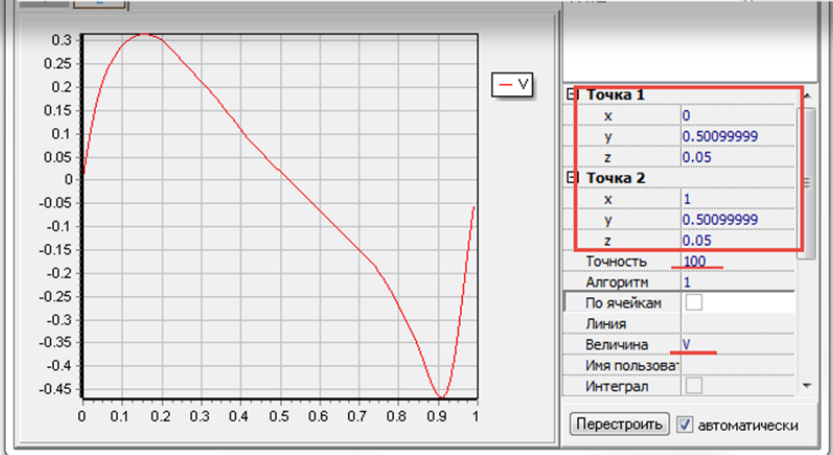
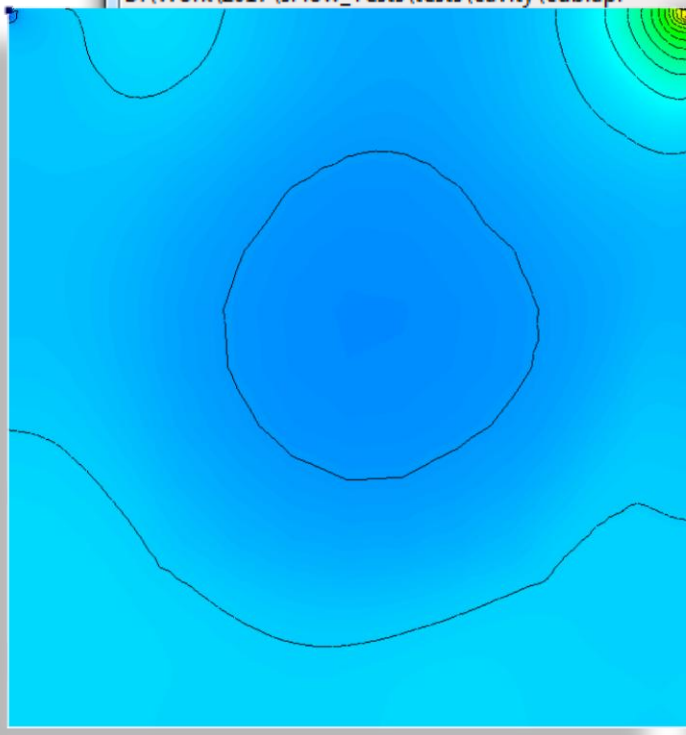
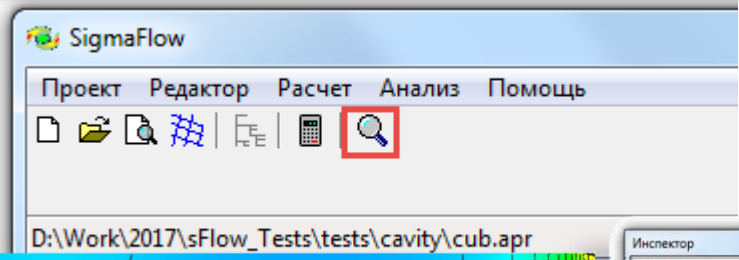
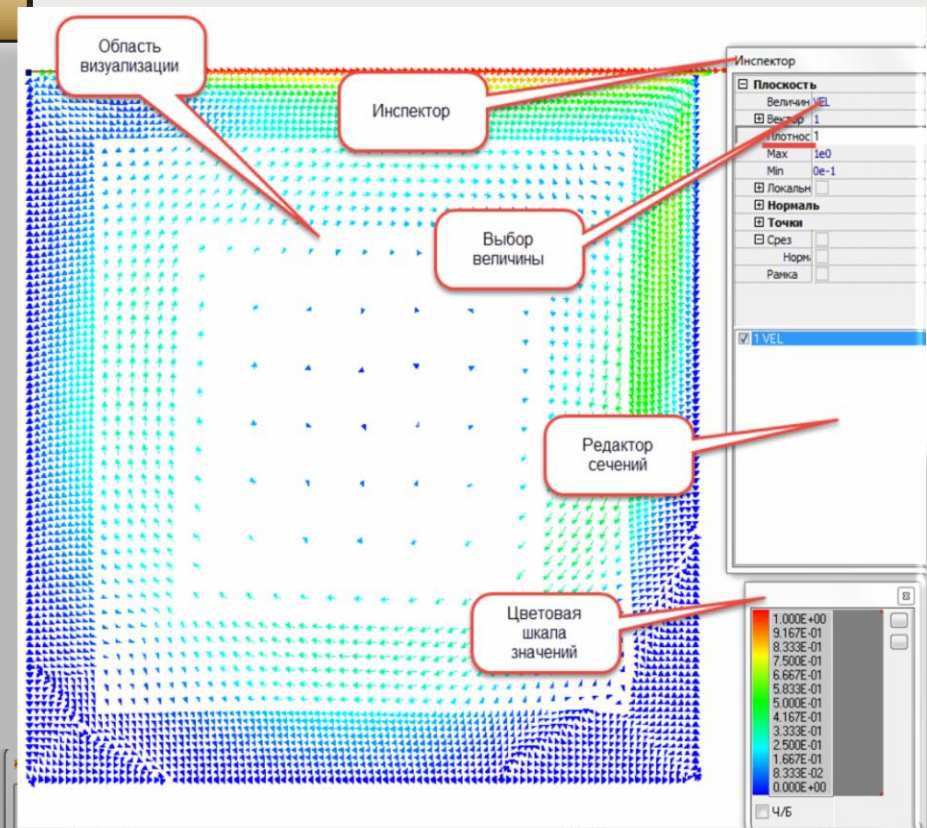
Выполнить



SigmaFW

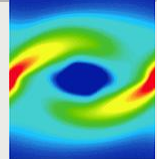


Модуль анализа результатов моделирования





SigmaFW



Файл | [иконки] | Панели | Вид | Обновить | Открыть многоблочную сетку | Блокируемые области

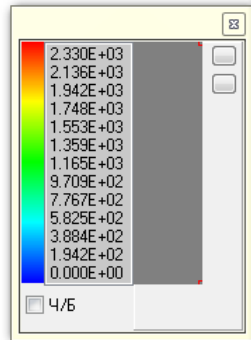
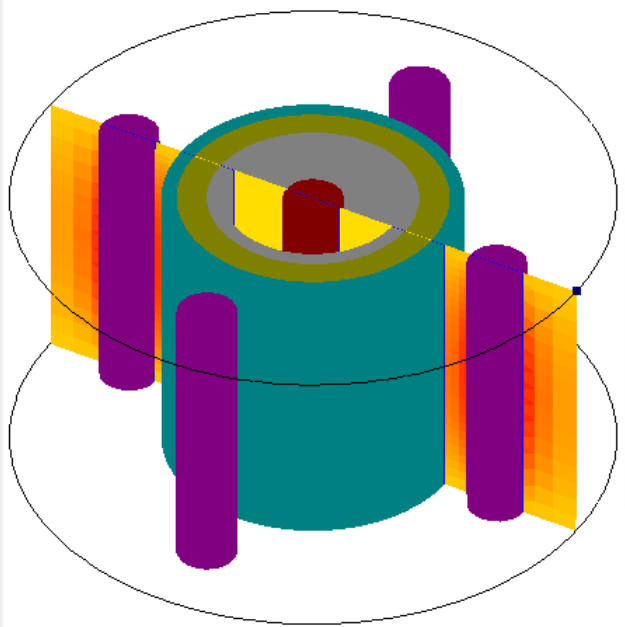
Модуль анализа результатов моделирования

Зоны

- Зона №1
- Зона №2
- Зона №3
- Зона №4
- Зона №8
- Зона №9
- Зона №10
- Зона №11
- Зона №21
- Зона №22
- Зона №23
- Зона №24
- Зона №28
- Зона №30
- Зона №31
- Зона №50*

- Субдомен №1
- Субдомен №8
- Субдомен №10
- Субдомен №11
- Субдомен №4
- Субдомен №3
- Субдомен №2

Выделить все Каркас



Инспектор

Плоскость

Величин Inc_Rad

Прозрач 1

Сетка

Интерпо 1

Логариф

Площади 4.998249114e-1

Интегра 1.157979736e3

Среднер

Знач 0e-1

Расхс 0e-1

Мах 2.330126465e3

Мин 0e-1

Локальн

1 Inc_Rad

Info

Величин 41

Путь: F:\Work\ITP\УНИИИКМ\Project\SHVG\mini_grid_SFLOW\

Map: geom\mini_94_map.out

Mesh:

- mini_94_001.mesh
- mini_94_002.mesh

Cells: 94251

Bound: 68126

Величин 41

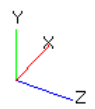
Величин 41

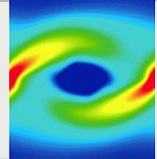
Подгружаем TEM

sav94_p001.bin

Подгружаем Inc_Rad

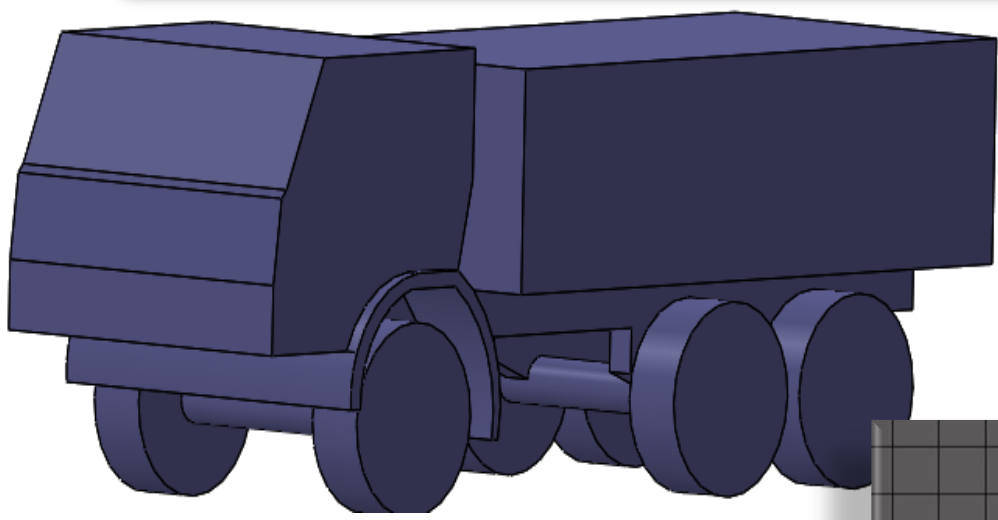
sav94_p001.bin





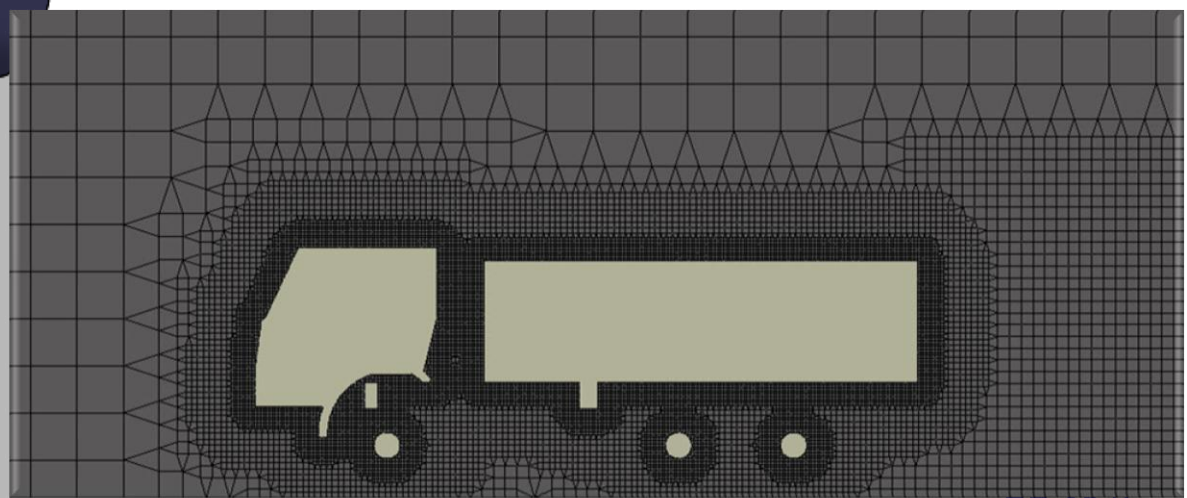
Обтекание грузового автомобиля

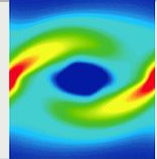
Для демонстрации возможностей программы «SigmaFW» приведены результаты численного моделирования обтекания грузового автомобиля. Скорость набегающего потока принималась равной 60 км/ч.



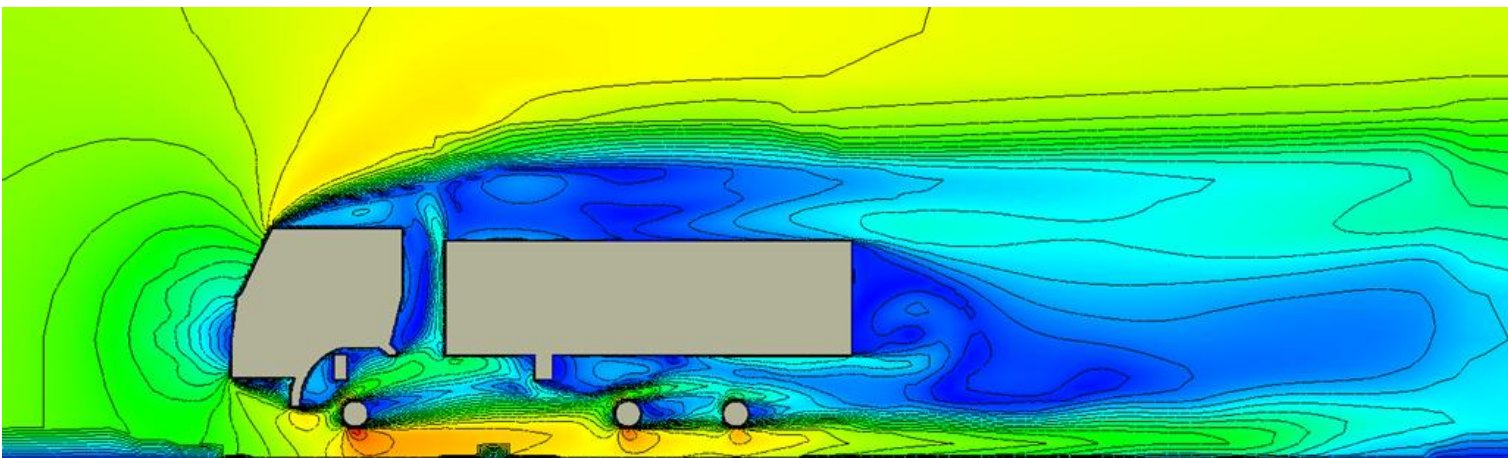
Сетка на основе окторазбиения
размером 1200000 ячеек

твёрдотельная модель
грузового автомобиля в
формате stl



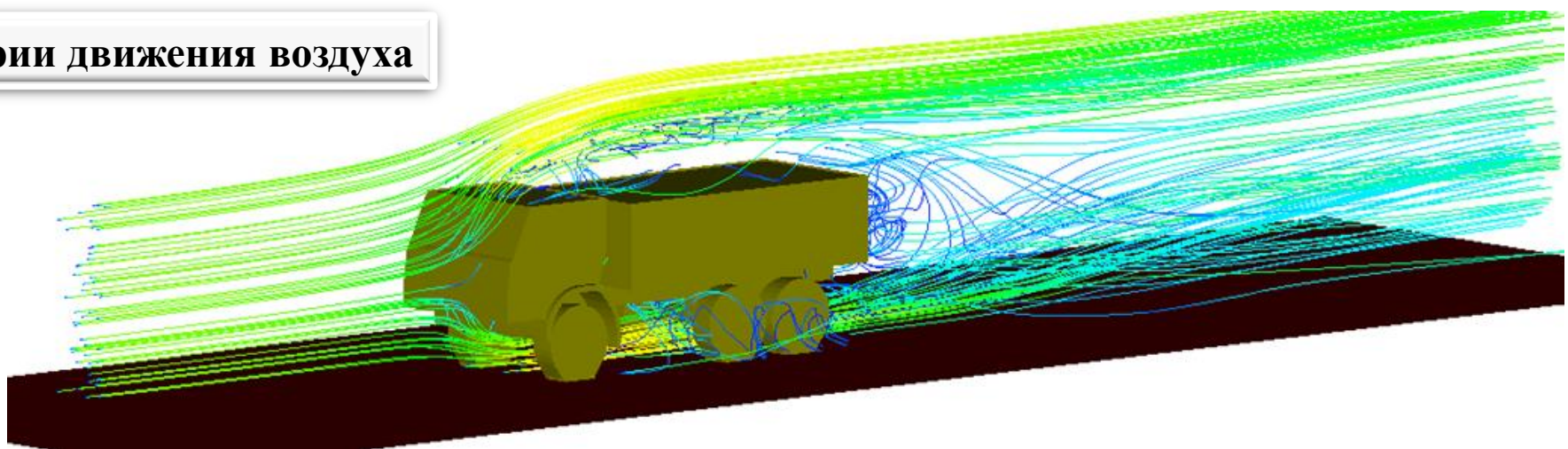


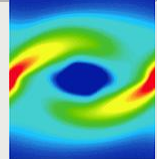
Обтекание грузового автомобиля



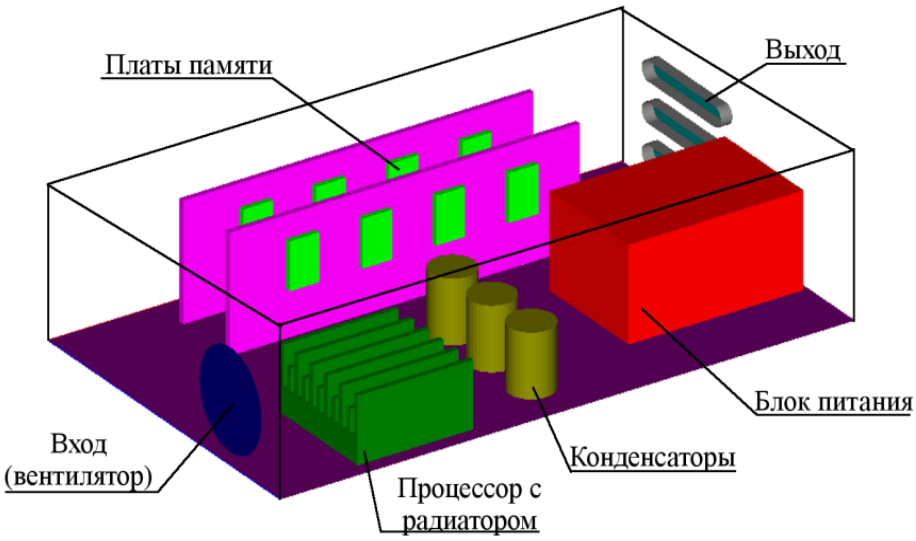
поле скорости

Траектории движения воздуха

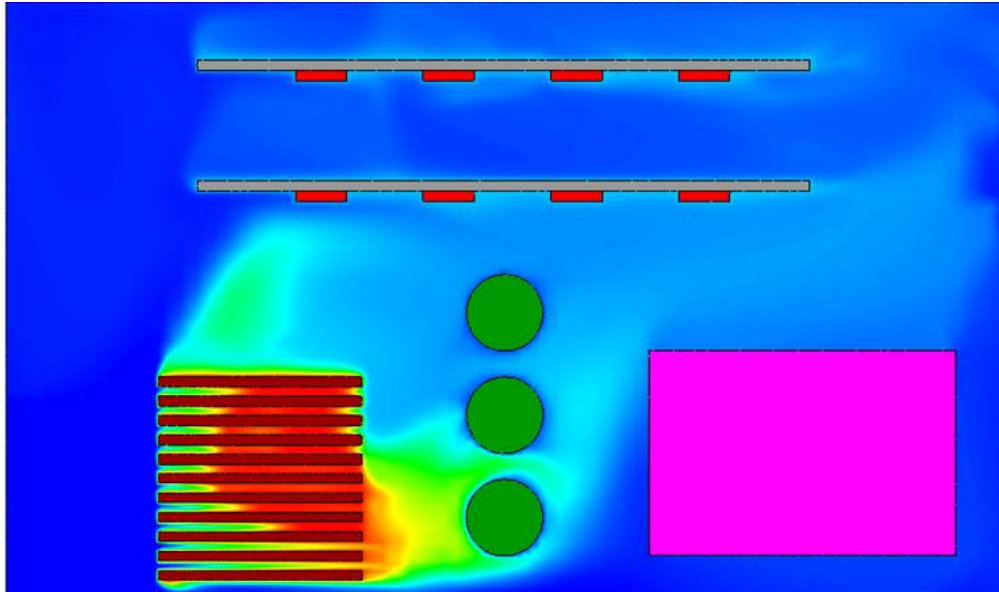




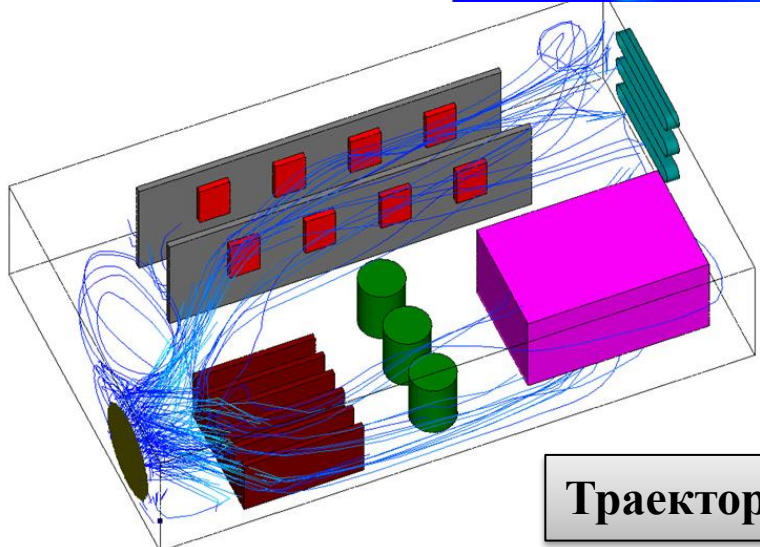
Охлаждение компьютерной материнской платы



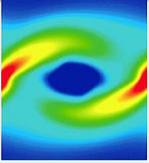
Геометрия



Поле температуры



Траектории движения воздуха



Спасибо за внимание!