



РОССИЙСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ ЯДЕРНЫЙ ЦЕНТР  
всероссийский научно-исследовательский  
институт экспериментальной физики

# Новые функциональные возможности пакета программ ЛОГОС

Москва ИПМ 3-4 декабря

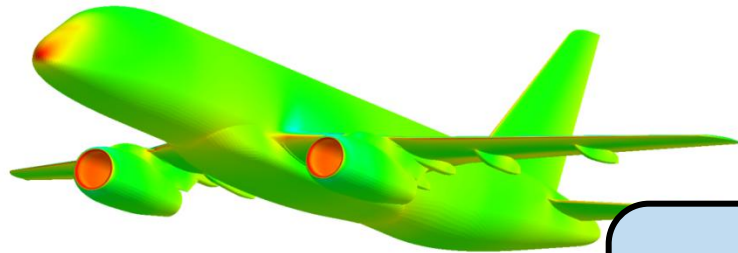
Зеленский Дмитрий Константинович

ИТМФ ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ»



Аэро-Гидродинамика

Прочность

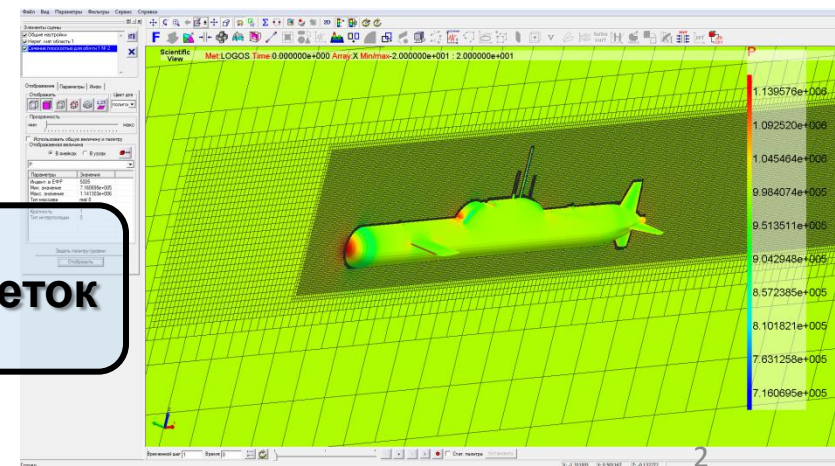
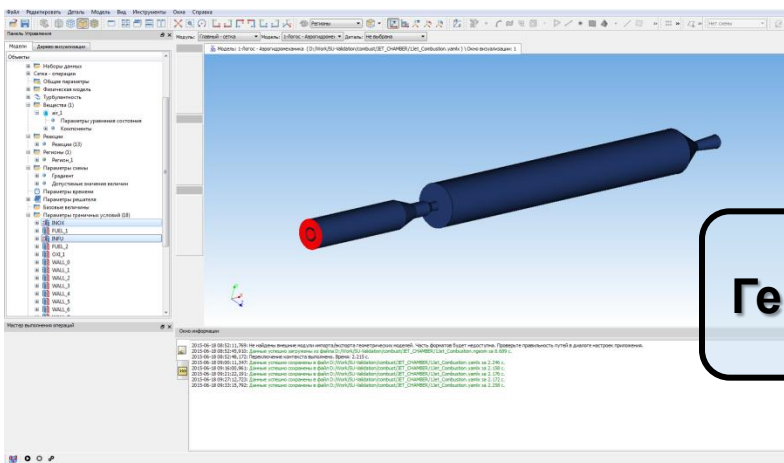


ЛОГОС

Постановка задачи

Обработка  
результатов

Генераторы сеток



# Программный пакет инженерного анализа ЛОГОС-CFD

(Зарубежные аналоги: Star-CCM+, Ansys CFX, Fluent )

## Моделируемы физические процессы:

- Гидродинамика и аэродинамика
- Турбулентные течения
- Тепломассоперенос
- Течения в пористых средах
- Аэромеханика и акустика
- Тепловое и радиационное излучение
- Многофазные течения
- Реагирующие потоки

## Основные характеристики пакета ЛОГОС-CFD

- Распараллеливание вычислений на десятки тысяч процессорных ядер
- Метод конечных объемов на неструктурированной сетке, состоящей из многогранников произвольной формы
- Решение междисциплинарных задач
- Многосеточный агрегативный метод решения СЛАУ
- RANS модели турбулентности (k- $\epsilon$ , SA, SST, RSM HIGH-LOW RE)
- LES, DES модели турбулентности (DDES, IDDES)
- Возможность расчёта на сетках с перекрытием – «Химера»
- Возможность расчёта на подвижных сетках
- Моделирование капельно-дисперсных сред
- Модели турбулентного горения (EddyBreakUp, EddyDissipationConcept)
- Модели анизотропных пористых сред
- Модель свободной поверхности
- ...



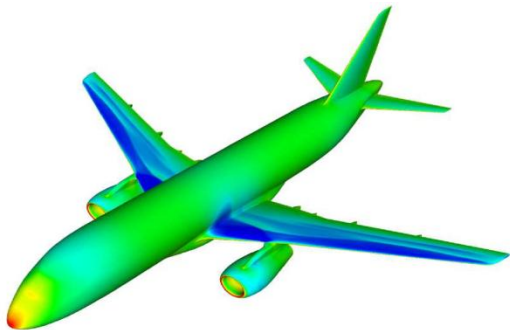
## Распараллеливание вычислений на универсальных процессорах:

- Декомпозиция расчётной сетки;
- Использование асинхронных MPI обменов;
- SIMD векторизация матричных операций с блоками (4x4, 5x5, ...);
- Параллельный алгебраический многосеточный решатель СЛАУ.



Эффективность распараллеливания:

$$K = \frac{t_{calc}}{t_{calc} + t_{MPI}}$$

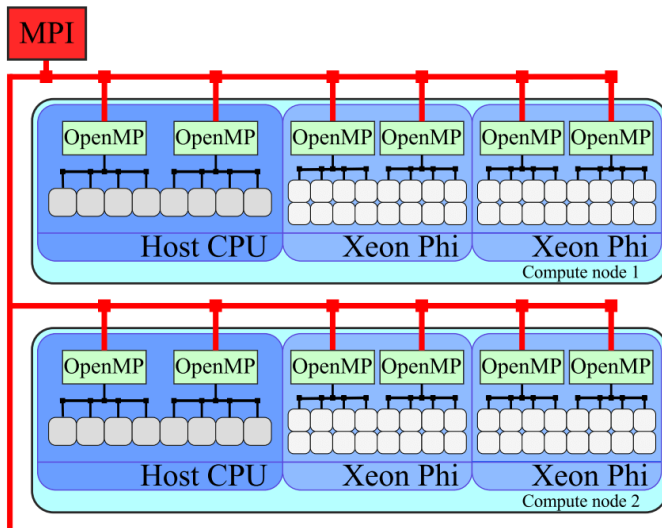


Тестовая задача – расчёт аэродинамики ЛА  
( 48 млн. ячеек, 240 процессорных ядер )

**K = 94%**

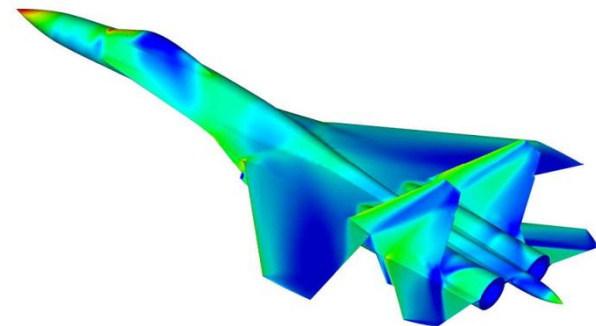
## Распараллеливание вычислений на сопроцессорах Intel Xeon Phi:

- Неоднородная декомпозиция расчётной сетки (статическая балансировка вычислений);
- Распараллеливание с использованием MPI + OpenMP;
- SIMD векторизация матричных операций с блоками (4x4, 5x5, ...);
- Параллельный алгебраический многосеточный решатель СЛАУ с многоцветными и конвейерными сглаживателями (SGS, ILU).



Тестовая задача – расчёт аэродинамики ЛА  
( 26 млн. ячеек, 30 CPU + 30 Intel Xeon Phi )

$K \sim 75\%$



## Векторизация вычислений:

Библиотека IAL векторизованных матрично-векторных операций малой размерности (SSE2, SSE4.1, AVX, Intel Xeon Phi)

Матрицы 5x5		Xeon Phi Си (такты)	Xeon Phi IAL (такты)	Ускорение
Mul_mm	Умножение матриц	2.99	1.3	<b>2.3</b>
MulSub_mavav	Умножение массива матриц на массив векторов с вычитанием	4.68	1.2	<b>3.9</b>
MulSub_mavva	Умножение массива матриц на вектор с вычитанием из массива векторов	4.55	1.3	<b>3.5</b>
MulSub_mavava	Умножение массива матриц на массив векторов с вычитанием	4.76	1.4	<b>3.4</b>
MulAdd_mavava	Умножение массива матриц на массив векторов с добавлением	4.9	1.4	<b>3.5</b>
Invert_m	Обращение матриц	25.48	8.22	<b>3.1</b>
Mul_mava	Умножение массива матриц на массив векторов	3.08	1.1	<b>2.8</b>

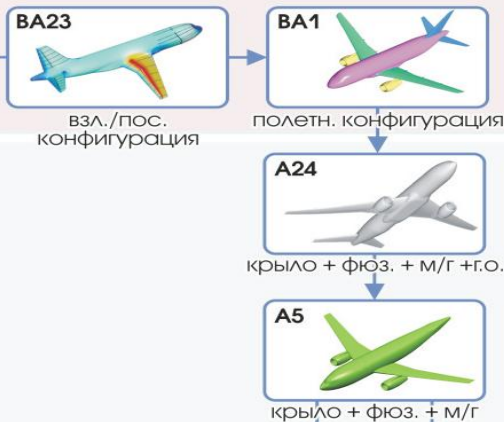
Общее ускорение работы LOGOS.CFD до **20%**

# Верификация и валидация прикладного программного обеспечения

реальные изделия и системы



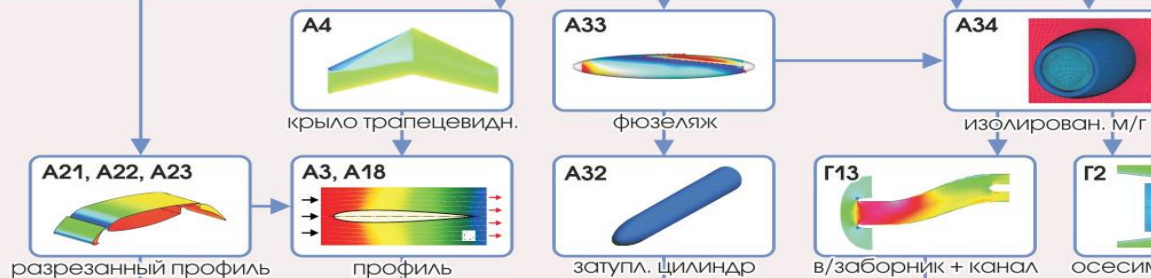
верификационный базис неманевренных ЛА



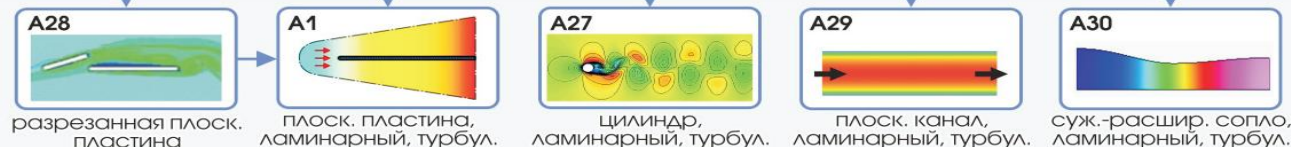
подсистемы



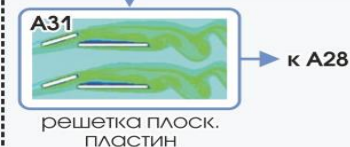
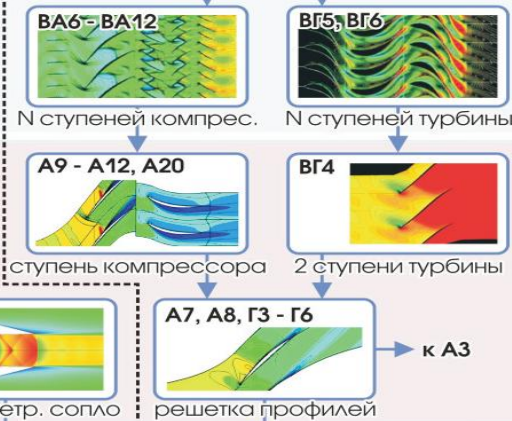
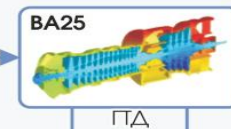
эталонные решения



единичные задачи



верификационный базис ГТД

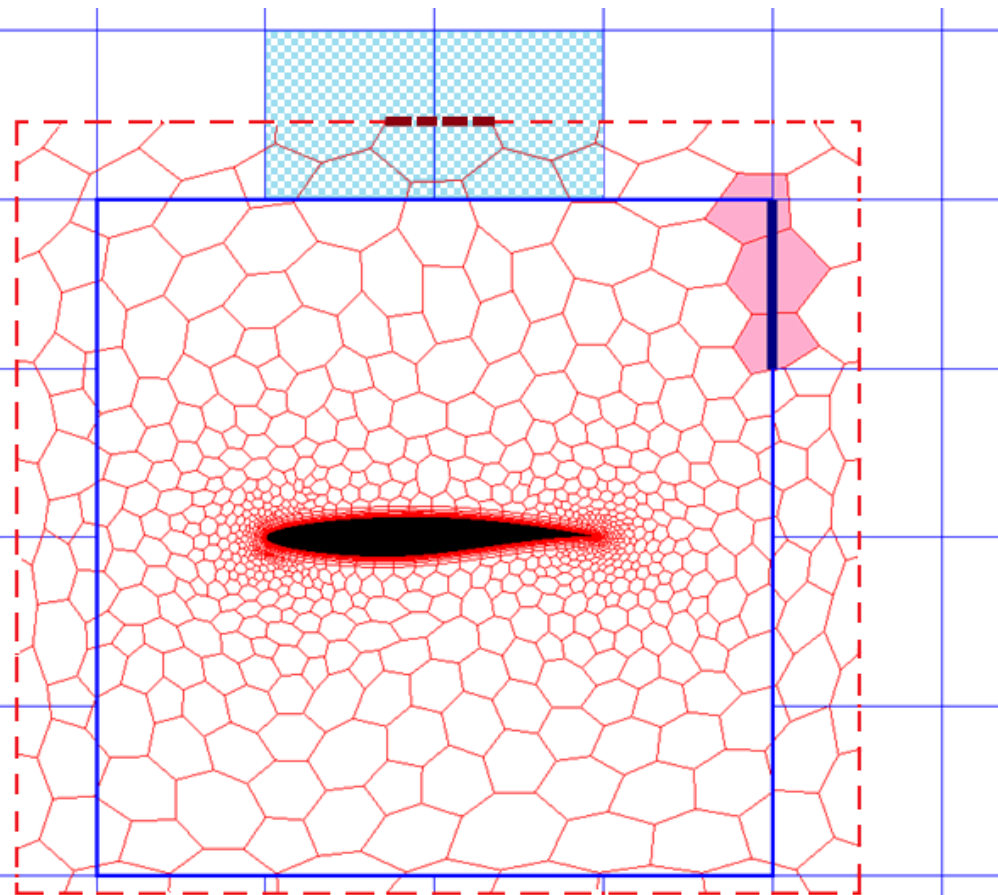


**Верификационная содержит более 300 задач различного уровня сложности для верификации и валидации БПО по вычислительной гидродинамике, аэродинамике, акустике, тепловому анализу, прочности, а также связанные задачи и задачи генерации дискретных моделей.**



## Многоблочные сетки

Моделирование на сетках с перекрытием – «Химера»



Донор регулярной сетки



Донор нерегулярной сетки



Непроницаемая область



Акцептор регулярной сетки



Акцептор нерегулярной сетки



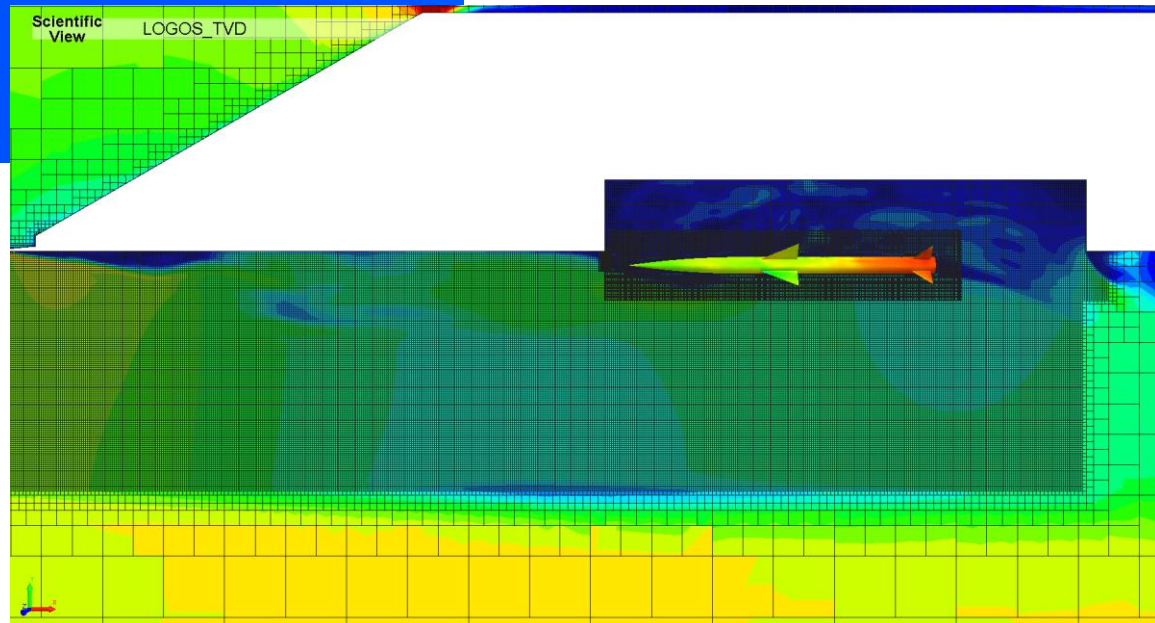
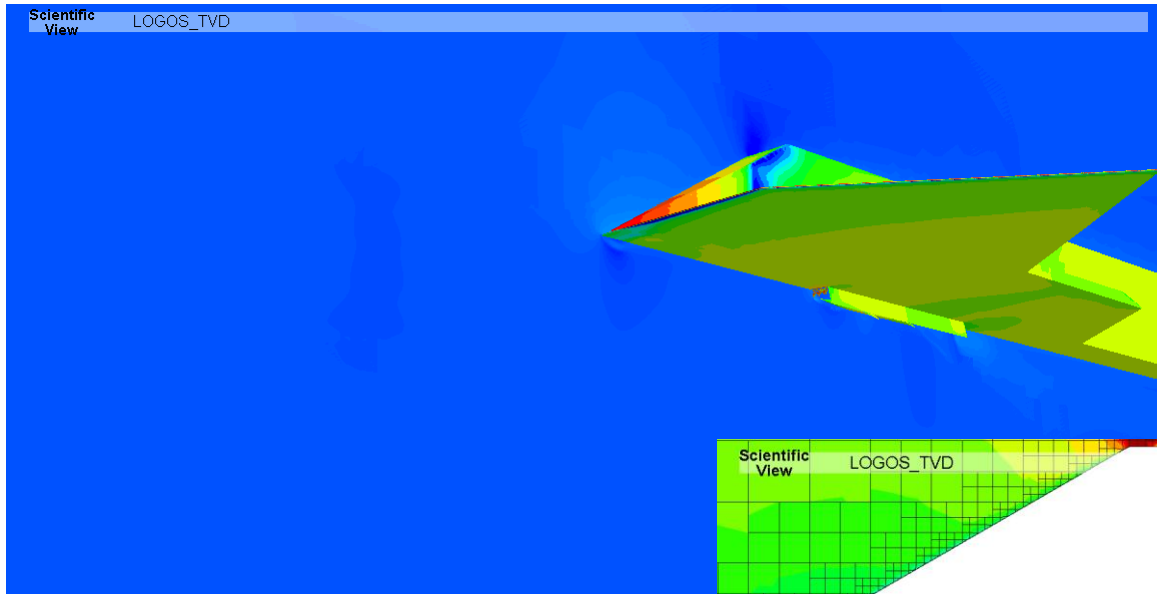
Интерфейс регулярной сетки



Интерфейс нерегулярной сетки

## Многоблочные сетки

### Моделирование движения АСП в присутствии носителя



#### Информация о задаче:

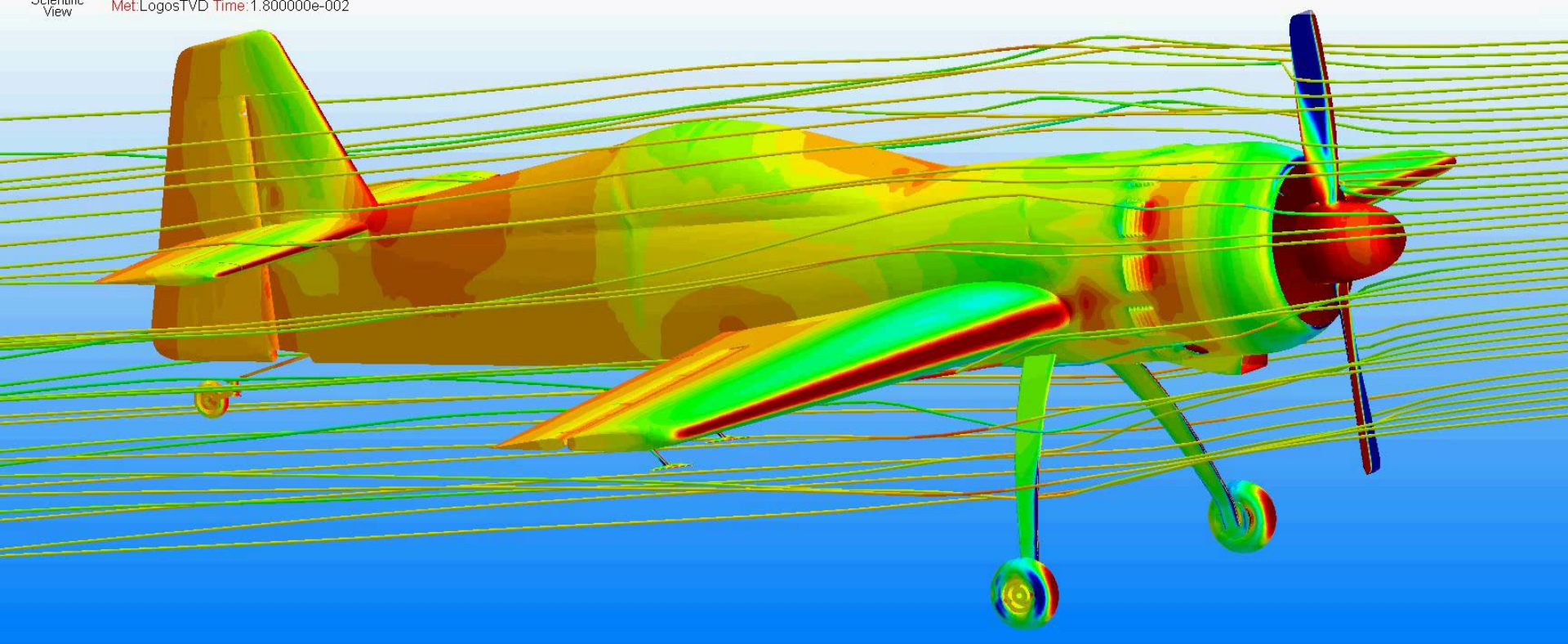
- Трансзвуковое течение;
- 10 млн. ячеек;
- Количество ядер 240;
- Время расчёта 6 часов;
- Шаг по времени  $1.0e-6$  сек.



## Многоблочные сетки

Обтекание спортивного самолёта с учётом работы двигателя

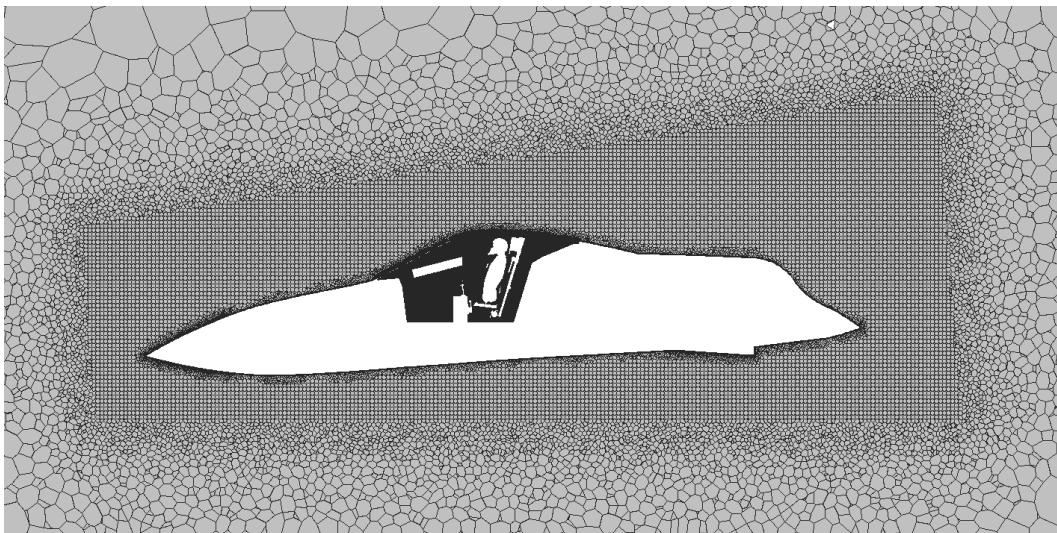
Scientific View Met:LogosTVD Time:1.800000e-002



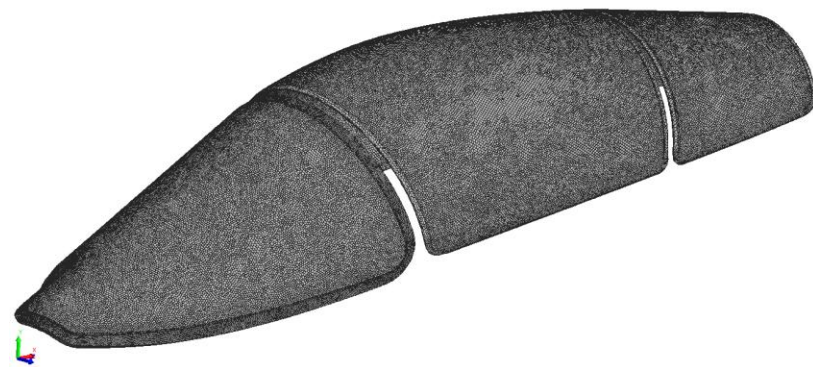
## Междисциплинарные задачи

### Решение связанных задач сопряжённого теплообмена

Расчет тепловых потоков в кабине пилота маневренного самолёта с учётом аэродинамического разогрева остекления кабины и тепловыделения от оборудования



Газодинамическая сетка ~ 17 млн. ячеек

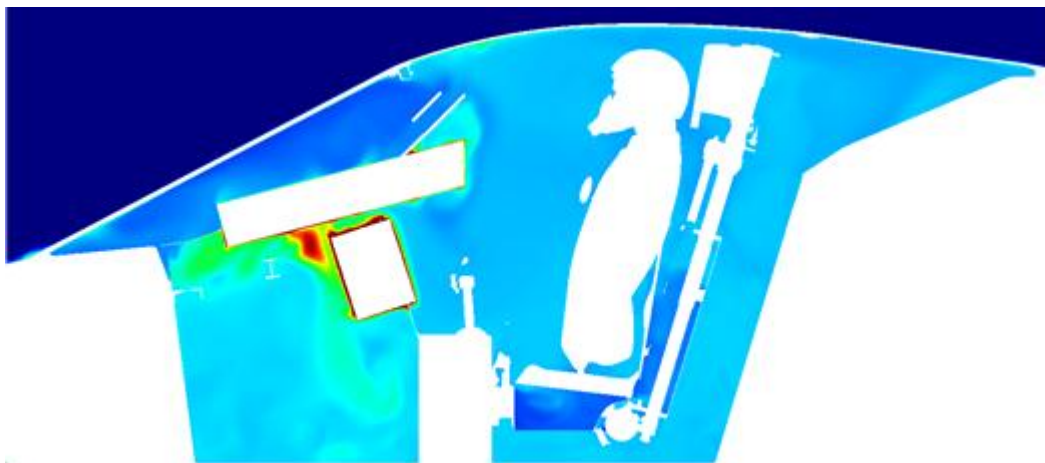


Тепловая сетка ~ 3.5 млн. ячеек

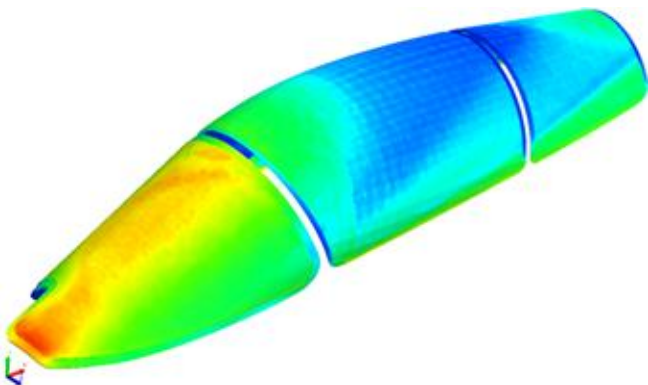


## Междисциплинарные задачи

Решение связанных задач сопряжённого теплообмена



Поле температуры в кабине, К



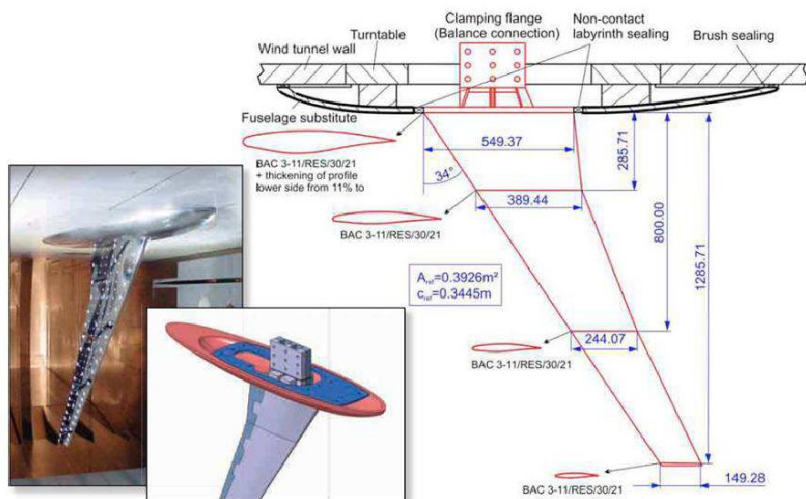
Поле температуры остекления, К



Поле температуры на пилоте и  
тепловыделяющих элементах, К

## Междисциплинарные задачи

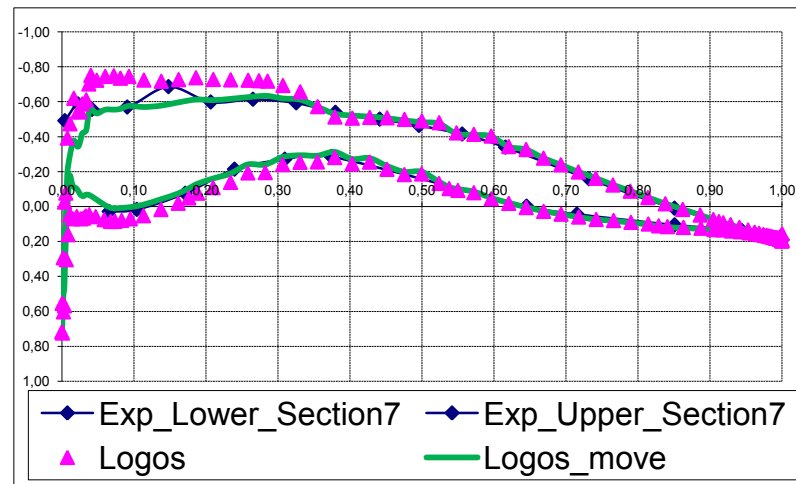
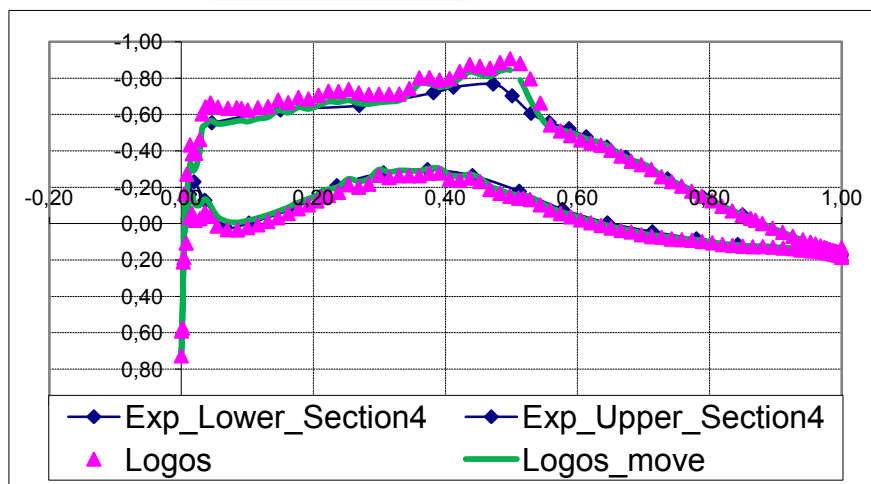
## Решение задачи аэроупругого равновесия крыла



Физическая постановка:  
характеристики набегающего потока  
соответствуют реальным условиям  
полёта

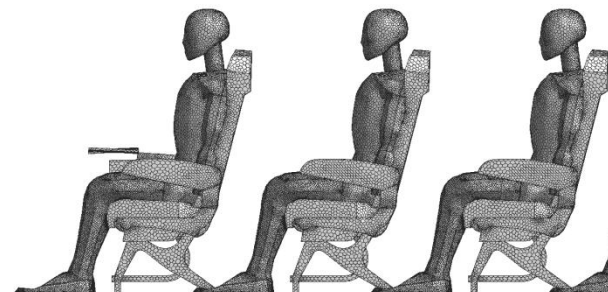
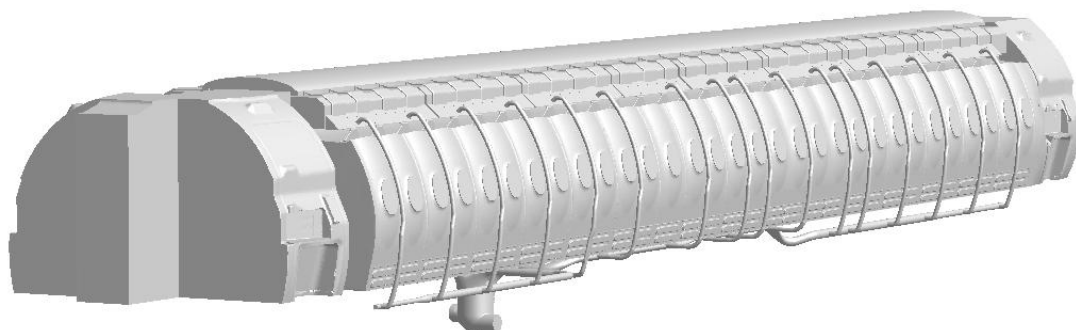
Декомпозиция: 203:1

Время моделирования: ~4 часа.

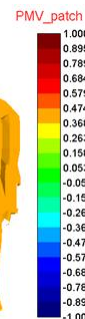
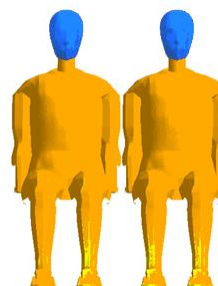
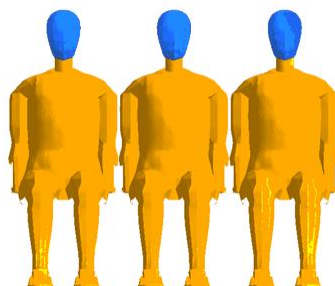
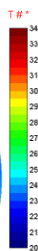
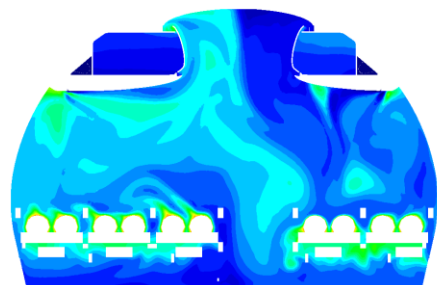
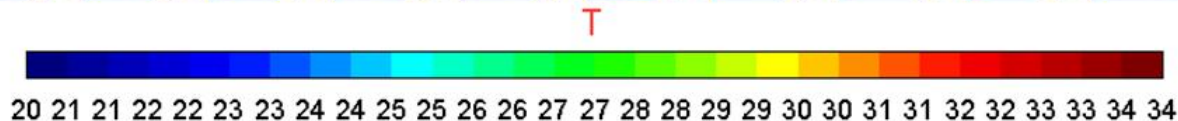
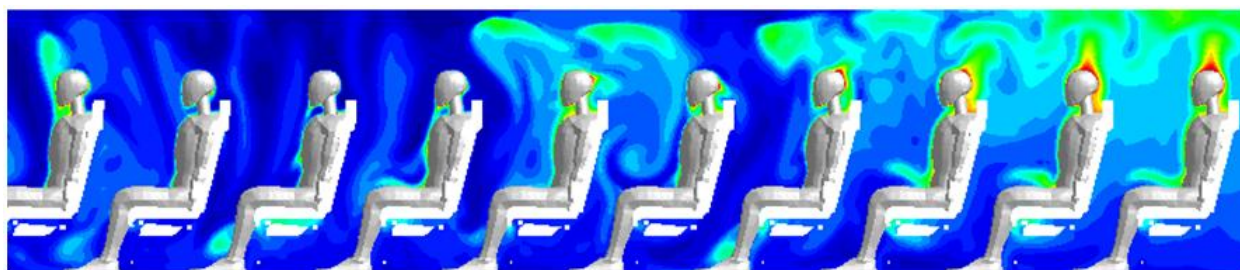


### Распределение коэффициента $C_p$ в сечениях

## Модель теплокомфорта человека (ASHRAE 55 и ISO 7730:1995)



Модель салона пассажирского самолёта

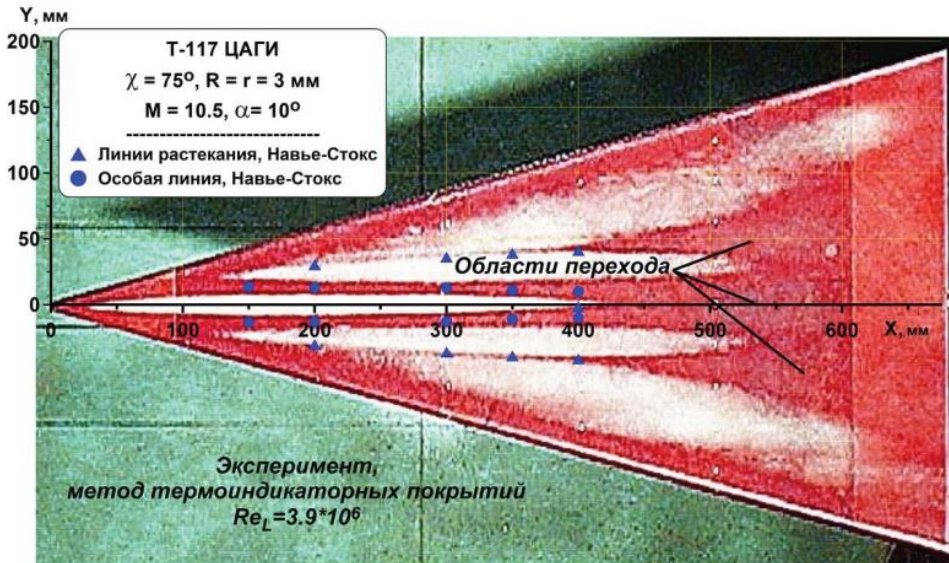


Сетка 115 млн. ячеек  
Расход воздуха 2000 м<sup>3</sup>/ч  
Температура воздуха 21°C

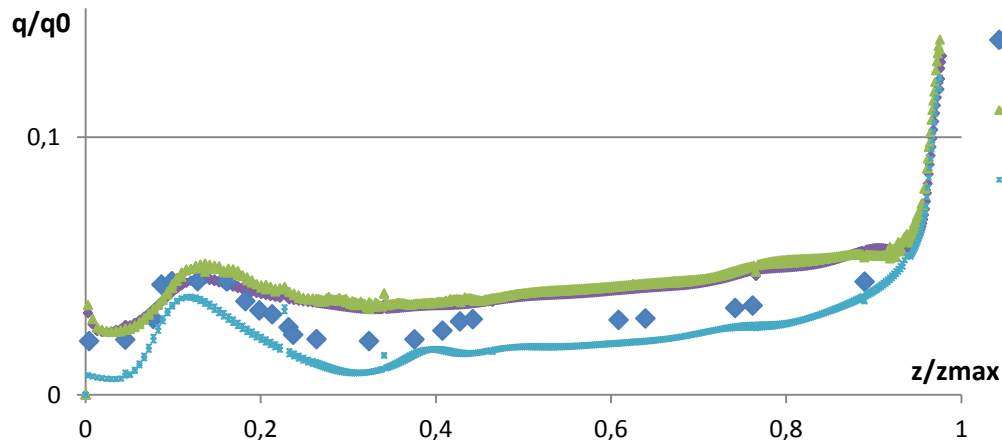
Осредненный  
уровень комфорта по  
всем пассажирам  
составил PMV=0.2



## Расчёт тепловых потоков при гиперзвуковых скоростях



Тепловые нагрузки на наветренной стороне треугольного крыла.  
Эксперимент в аэродинамической трубе Т-117 ЦАГИ.



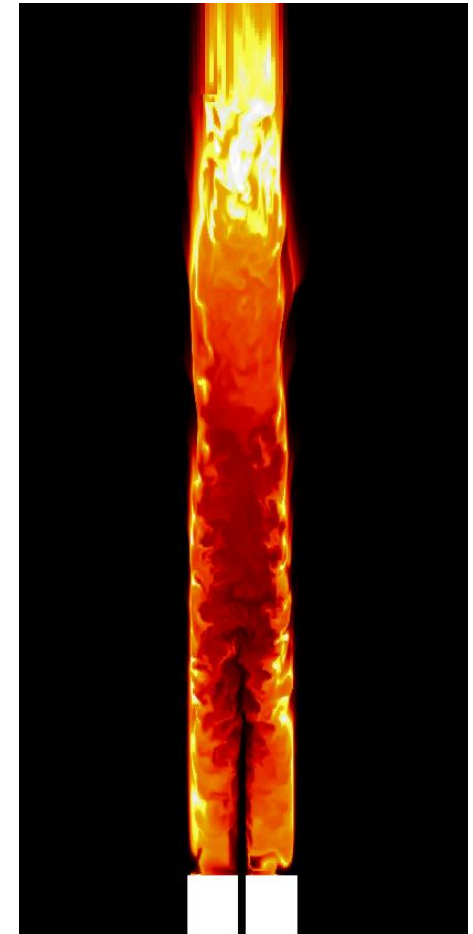
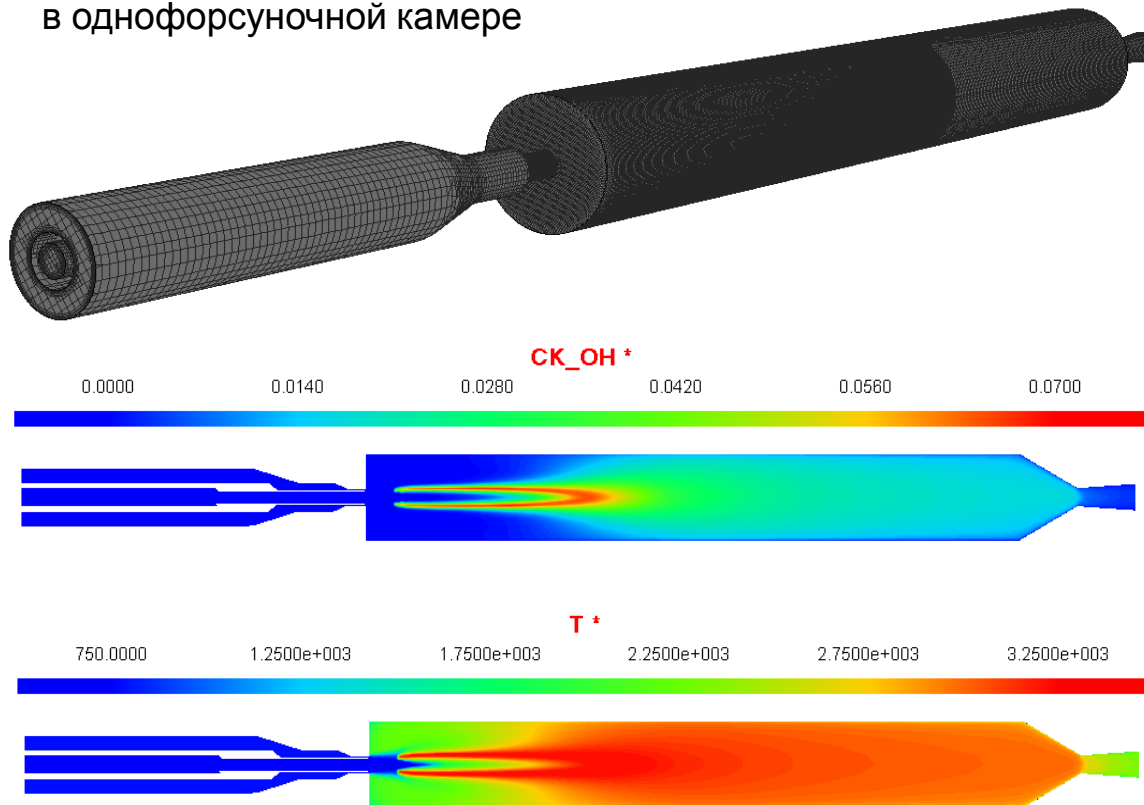
- ◆ SST\_CFX
- ◆ exp
- ▲ SST\_LOGOS
- laminar\_LOGOS

Тепловые нагрузки на наветренной стороне крыла в сечении  $X=300$  мм



## Введены модели неравновесных течений с учётом турбулентности: EddyBreakUp (EBU), EddyDissipationConcept (EDC)

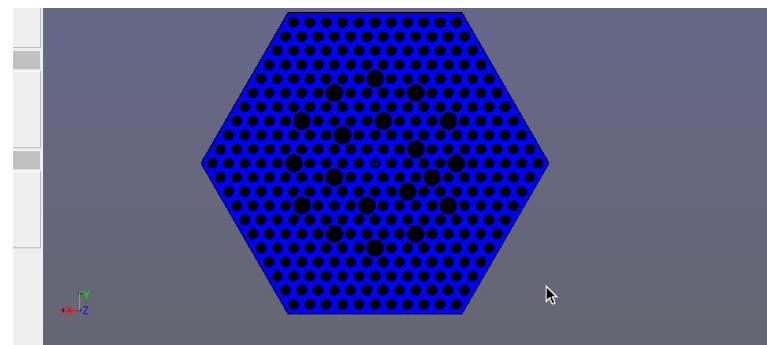
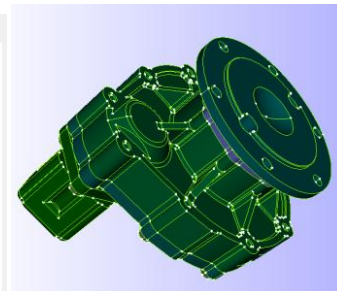
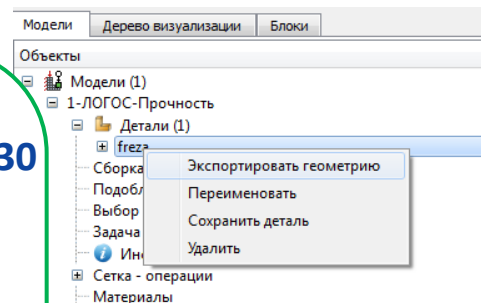
Моделирование горения кислород-водородной смеси  
в однофорсуночной камере



Горение углеводородных топлив

# Препроцессор ЛОГОС

- ✓ Возможность конвертации (импорта/экспорта) сеточных данных из основных CAE-систем (более 30 форматов);
- ✓ Генерация расчётной сетки;
- ✓ Физ. постановка задачи и параметров счёта;
- ✓ Макроязык, позволяющий автоматизировать сценарии подготовки расчётной модели;
- ✓ Средства информационной поддержки пользователя (Интерактивная документация);
- ✓ Управлением счёта и онлайн визуализация;



но информации

Консоль Редактор кода Результаты

```

uppPyExecutor().NewModel( { 'ModelName': 'LogosUnionModels' } );
uppPyExecutor().ImportModelMesh( { 'FileName': inputFile, 'Mode': 0 } );

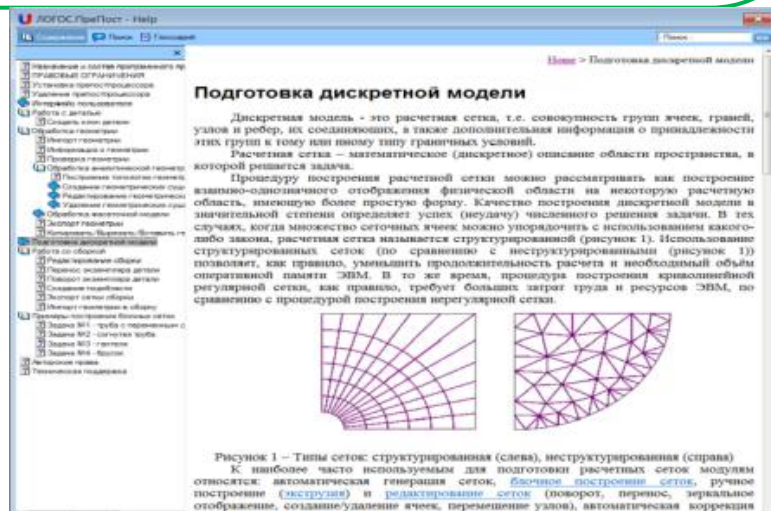
setId = uppPyExecutor().CreateSet( { 'Type': 3, 'Name': "Segment", 'MeshId': 0, 'StartId': startId } )( "Id" );

output = uppPyExecutor().GetBoundingBoxOperation( { 'GridId': 0, 'InputDataType': 8, 'Index': setId } );
segmentDepth = output( "zMax" ) - output( "zMin" );
zMin = output( "zMin" );

input = uppPyDataSet();
i = 0
while i < len( positions ):
    input.AddValue( i, "SegmentPosition", positions[i] );
    input.AddValue( i, "SegmentDepth", segmentDepth );
    i += 1

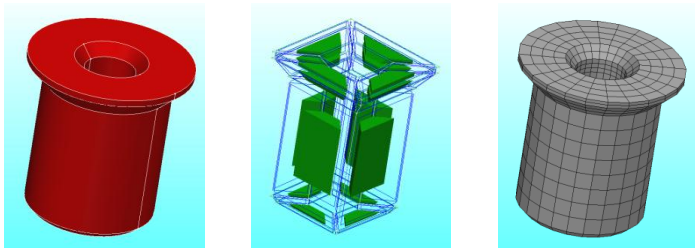
uppPyExecutor().RemoveMeshSegments( input );

```

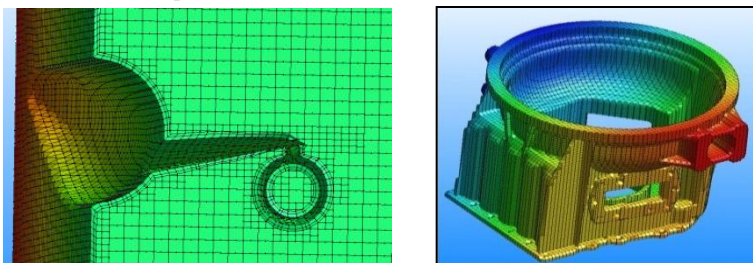


# Генерация сеточных моделей и анализ качества

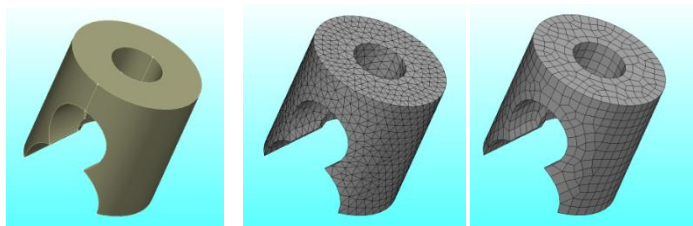
- Генератор блочно-регулярных сеток



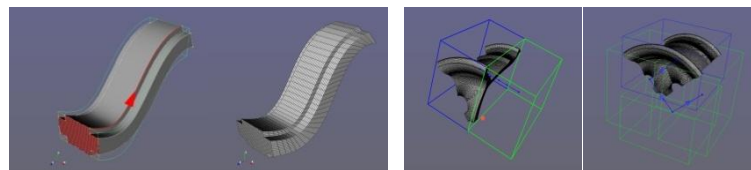
- Автоматический генератор неструктурированных многогранных сеток с призматическими слоями



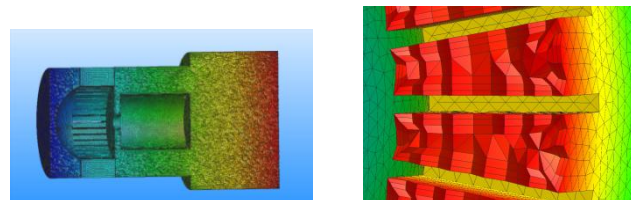
- Автоматический генератор неструктурированных тетраэдральных и преимущественно шестигранных сеток



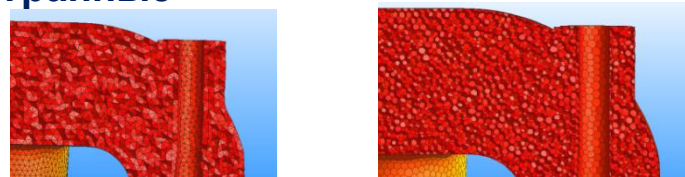
- Операции прямой генерации сеток: экструзия, перемещение, копирование, масштабирование, поворот, отображение



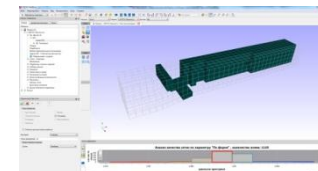
- Автоматический генератор тетраэдральных сеток с призматическими слоями



- Преобразование тетраэдральных сеток в многогранные



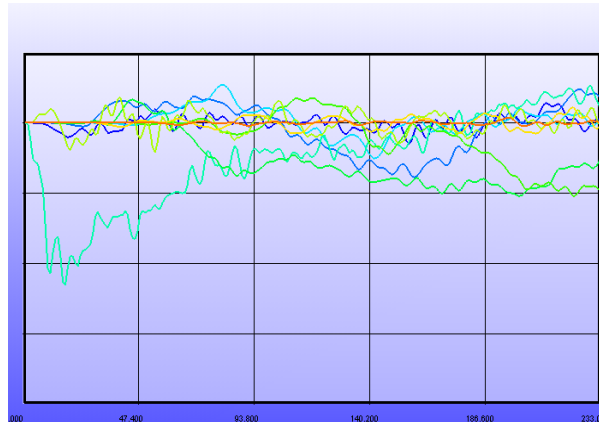
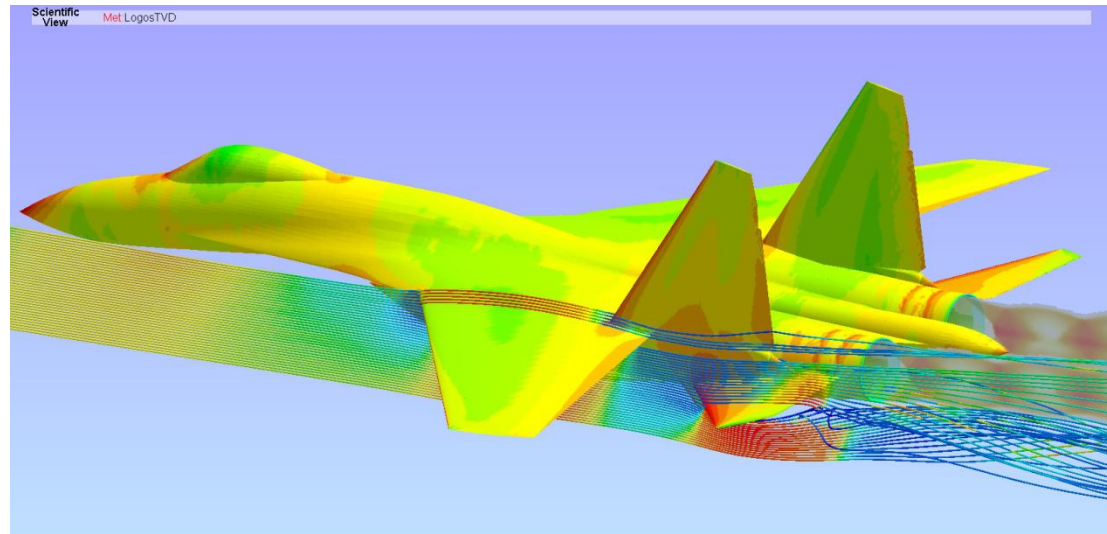
- Анализ качества сетки





# Визуализация и постобработка результатов счёта

- Визуализация и постобработка результатов счёта в параллельном режиме (сетки  $\sim 10^9$ );
- Архитектура Клиент-Сервер;
- Более 50 алгоритмов обработки результатов моделирования;
- Специализированные алгоритмы обработки данных:
  - построение турбоповерхностей;
  - поиск экстремумов и интегралов;
  - расчет новых величин по имеющимся с использованием predefined формул или калькулятора;
  - построение зависимостей величин от времени;
  - ...



Вычисление сеточных массивов

Перевод данных из ячеек в узлы  
Калькуляция величин

Стандартные массивы  
Дополнительные вычисления

Имя нового массива: MOD\_Vorticity

Величина: ☒ В Ячейках ☐ В Узлах

Список допустимых величин: 2015\_MATERIAL

$\text{sqrt}(5522\_Vorticity\_x^2 + 5523\_Vorticity\_y^2 + 5524\_Vorticity\_z^2)$

Удалить/Изменить массив:  Удалить Изменить

Сохранить/Загрузить строку:  Сохранить Загрузить

1	2	3	+	sin	asin	(	)	Очистить
4	5	6	-	cos	acos	ln	log	
7	8	9	*	tan	atan	x*y	sqrt	
pi	0	.	/	abs	exp			

Заменять не вычисляемые значения на: 0

Рассчитать

OK Отмена Применить



## Планы развития:

- ☐ Междисциплинарные задачи: отработка технологии построения согласованных расчётных моделей и проведения расчётов;
- ☐ Гиперзвук:
  - учёт физической и химической кинетики;
  - учёт излучения;
  - нагрев и абляция ТЗП;
- ☐ Магнитная гидродинамика и электродинамика;
- ☐ Многофазные течения включая обледенение;
- ☐ Повышение точности и скорости расчётов;
- ☐ Технология построения расчётных моделей:
  - лечение геометрии;
  - врапер;
  - поверхностные сетки;
  - генерация объёмных сеток с призматическими слоями.



***Спасибо за  
внимание***