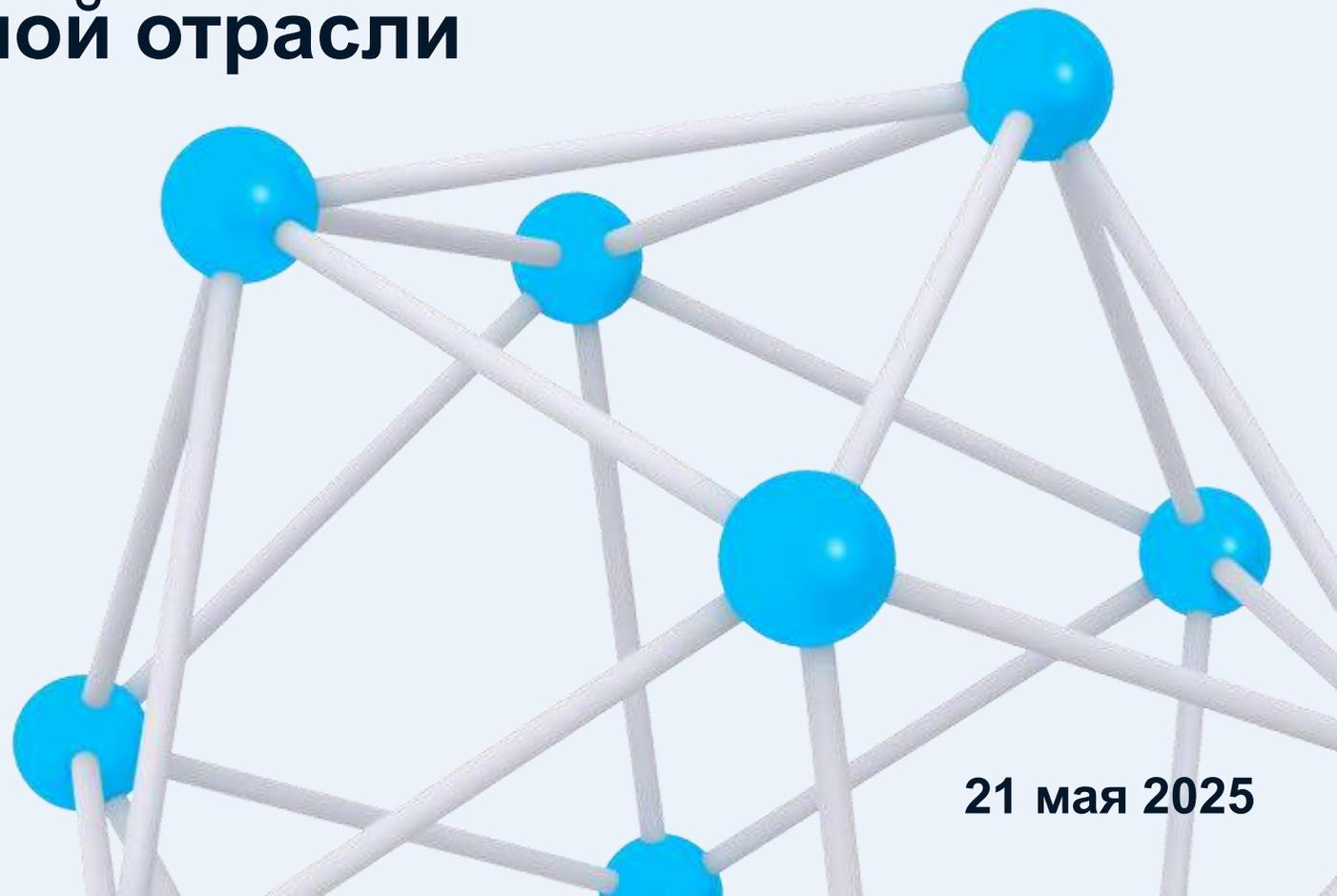


Новые CAE технологии CADFLO на примерах задач атомной отрасли

Новаковский Геннадий,
T1 Интеграция



21 мая 2025

Содержание



О программном комплексе CADFLO – 6 мин

- История команды, наши заказчики
- Ключевые технологии

Примеры отраслевых задач - 8 мин

- Анализ перемешивания теплоносителя в реакторе ВВЭР-1000 в условиях аварии
- Тепловые потоки при больших числах Маха
- Баллистика полезной нагрузки после отделения от самолёта
- Детонация
- Тепловая заметность
- Рассеяние плоской электромагнитной волны на объекте

Сертификация CADFLO в НТЦ ЯРБ - 1 мин

Вопросы и ответы - 5 мин



CADFlo^{EFD}

О программном комплексе CADFLO

История команды, наши заказчики



Свидетельство в Роспатенте
№ 2022663085



В реестре Российского ПО
№ 15125



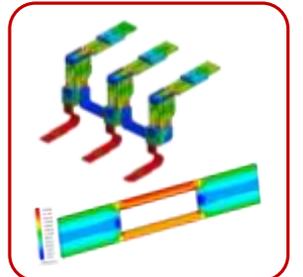
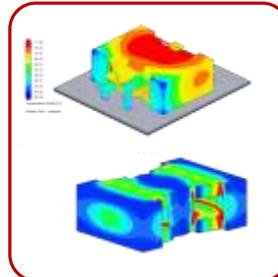
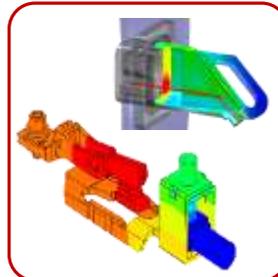
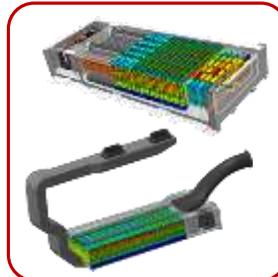
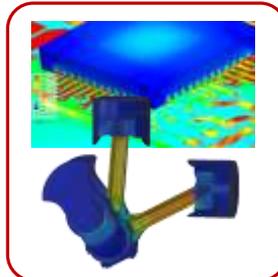
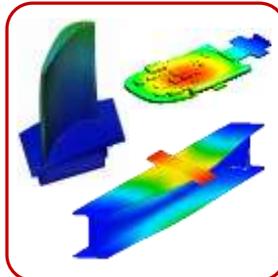
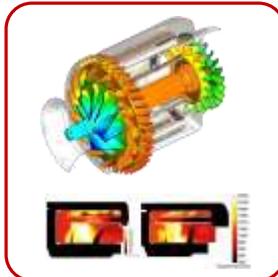
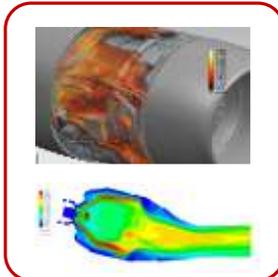
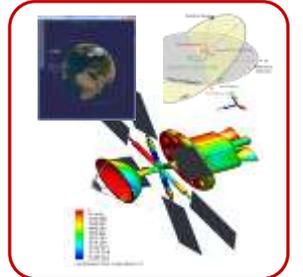
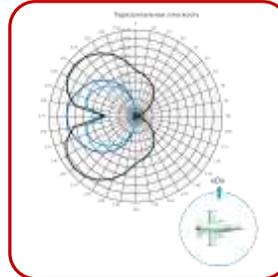
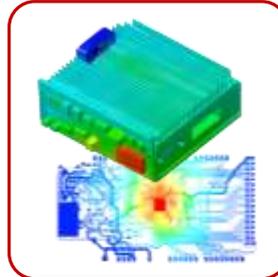
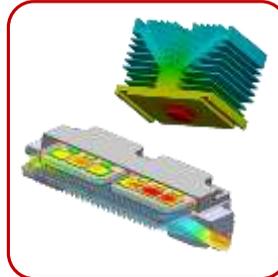
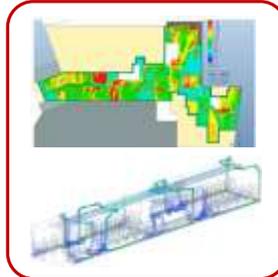
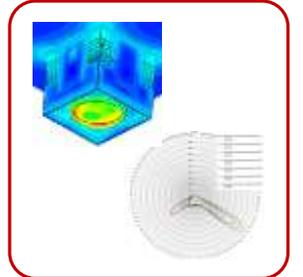
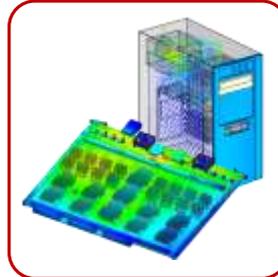
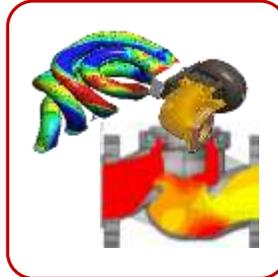
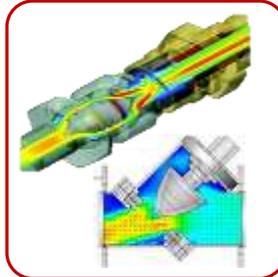
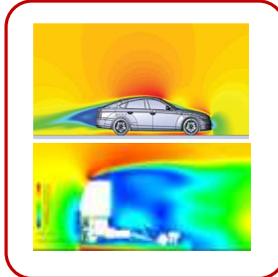
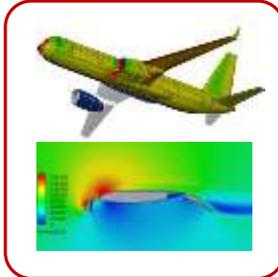
Член АРПП
«Отечественный СОФТ»

АЭРОДИНАМИКА

ГИДРАВЛИКА

ТЕПЛОБМЕН

ИЗЛУЧЕНИЕ и ОПТИКА



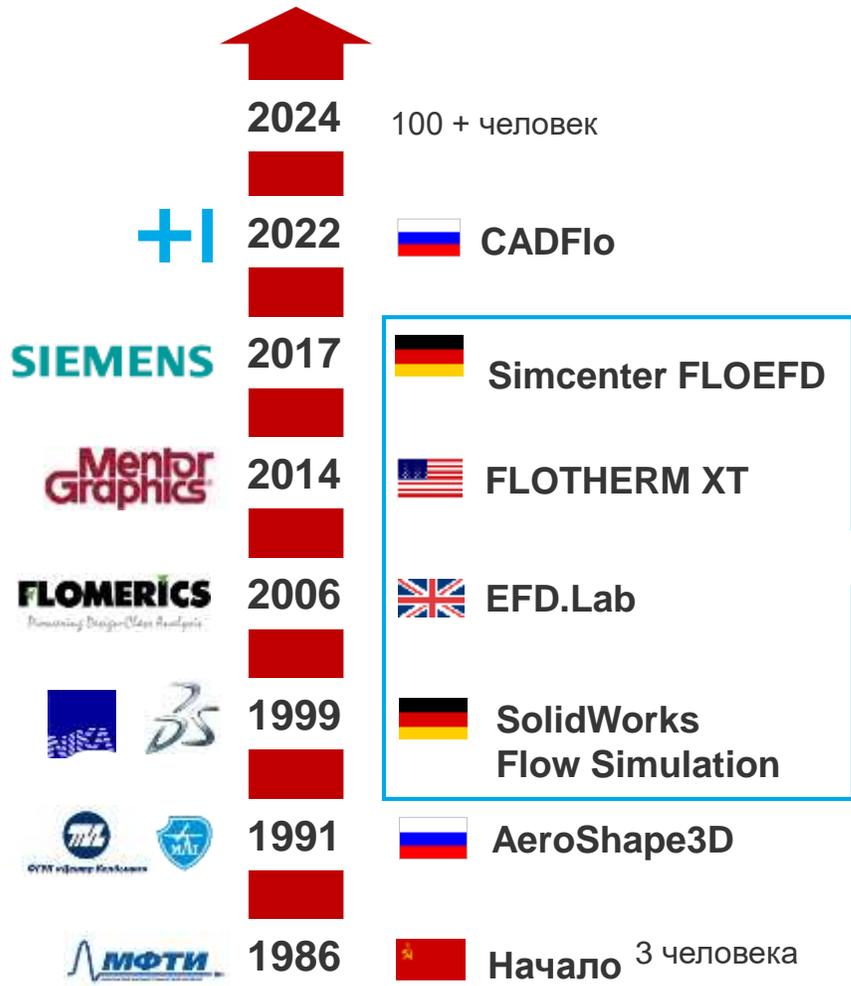
ГОРЕНИЕ и ФАЗОВЫЕ ПЕРЕХОДЫ

ПРОЧНОСТЬ

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК

ЭЛЕКТРОМАГНЕТИЗМ

История команды, наши заказчики



Продукты, разрабатываемые командой

Российские пользователи



РОСКОСМОС							
ОАК, Вертолеты России							Центральный аэрогидродинамический институт имени профессора Н.Е. Жуковского
Росатом				ОДК			
ВПК							
ПРИБОРОСТРОЕНИЕ							



CADFlo^{EFD}

О программном комплексе CADFLO

Ключевые технологии



Свидетельство в Роспатенте
№ 2022663085

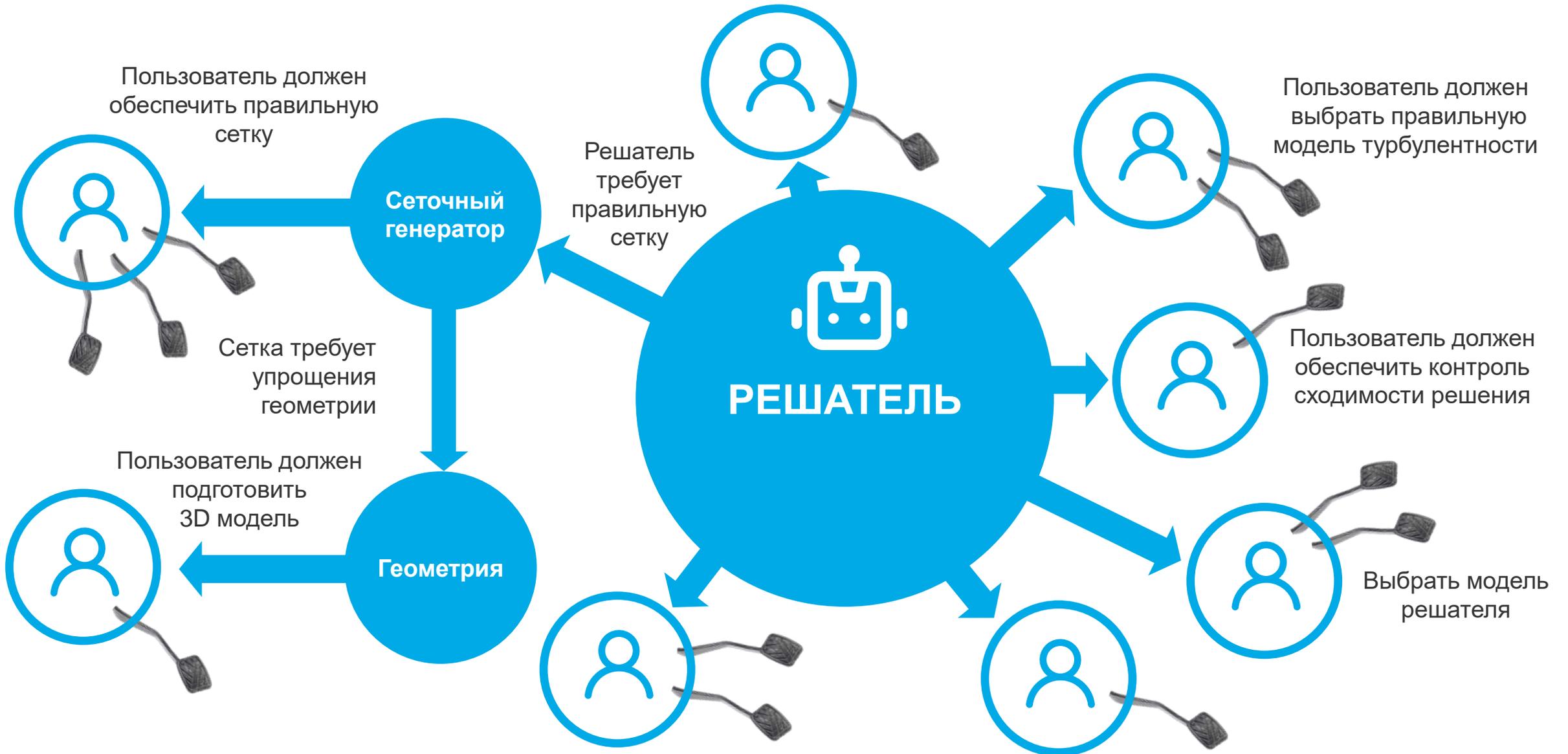


В реестре Российского ПО
№ 15125



Член АРПП
«Отечественный СОФТ»

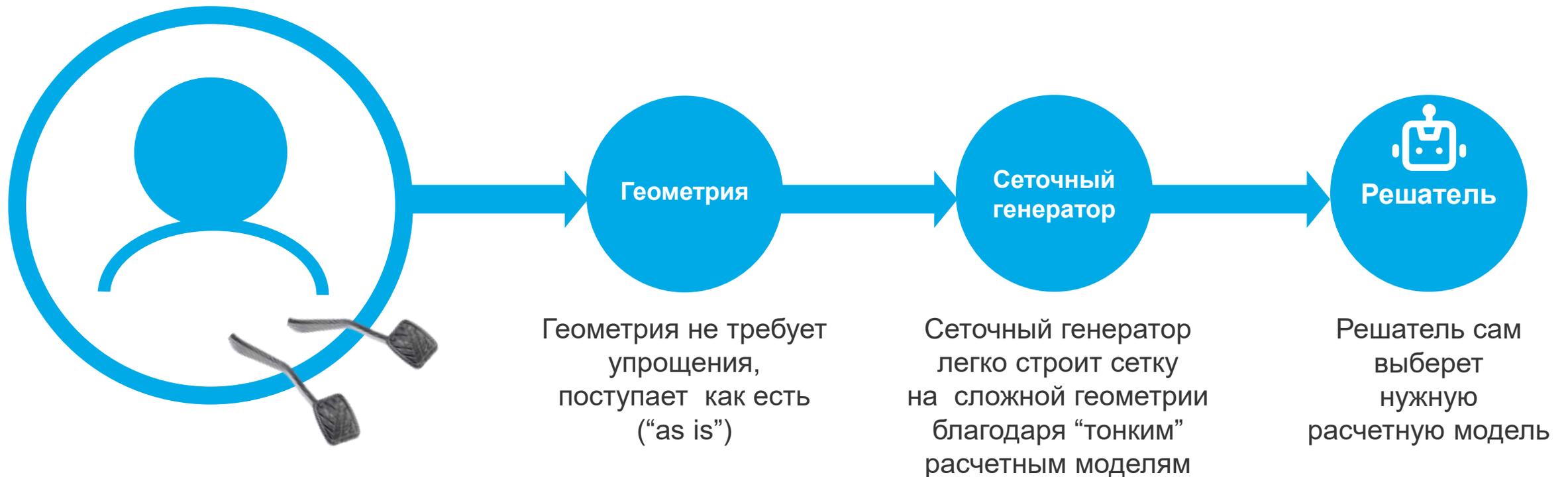
Особенности традиционных CAE систем



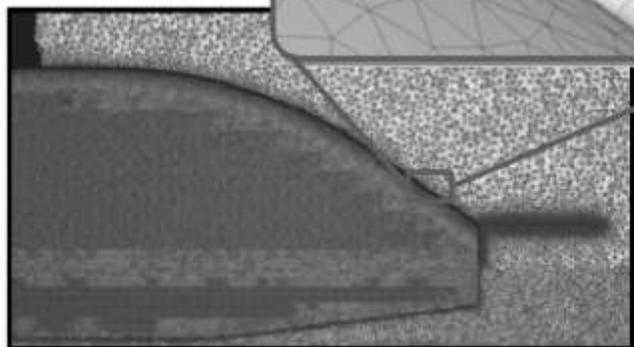
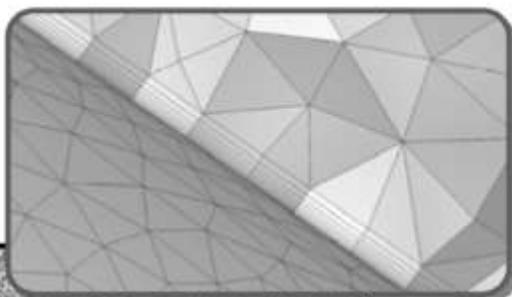
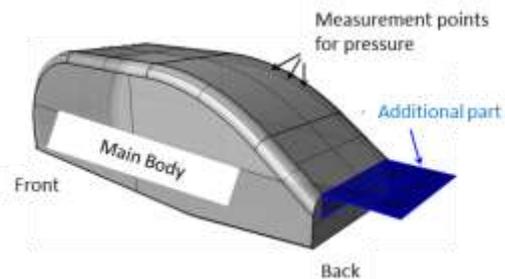
CADFlo: Приоритет пользователя = вызов разработчикам



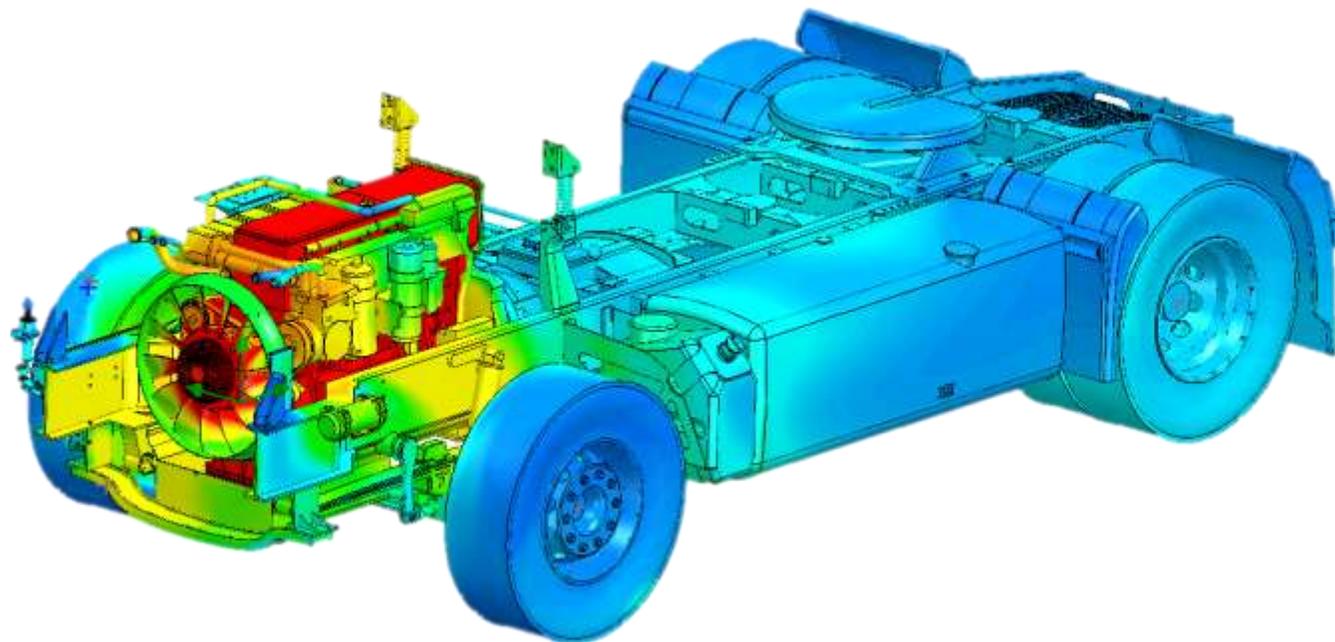
Решатель и сеточный генератор должны обеспечить нужный результат при заданной геометрии и постановке задачи. Такой подход требует более сложной технологии и нетривиальных решений, но позволяет переложить сложность решения CFD задачи с плеч пользователя на разработчиков кода.



Простая геометрия

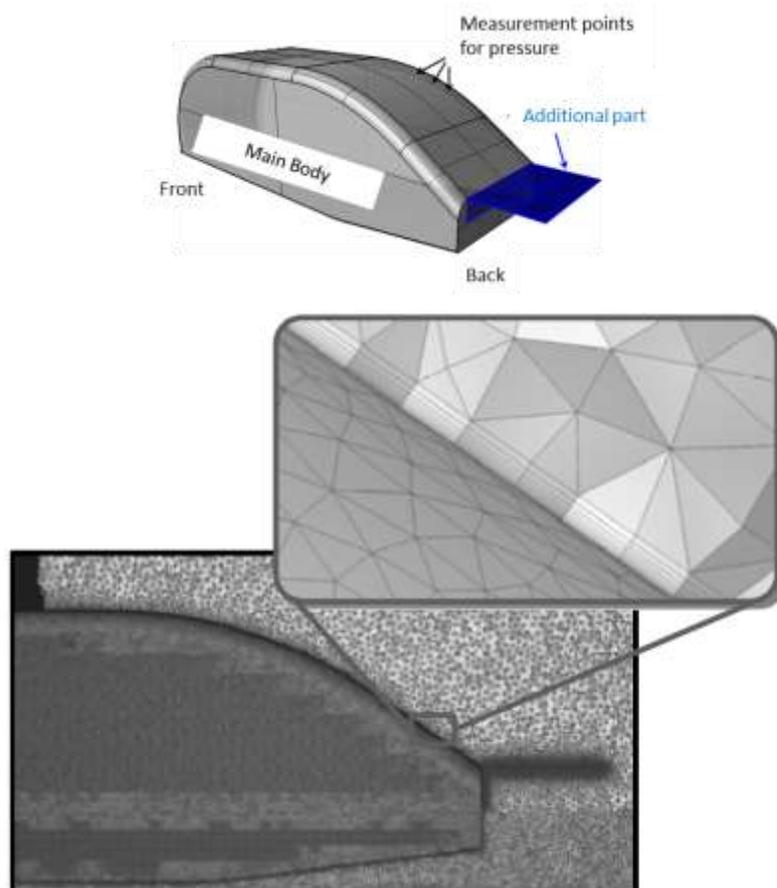


Сложная геометрия

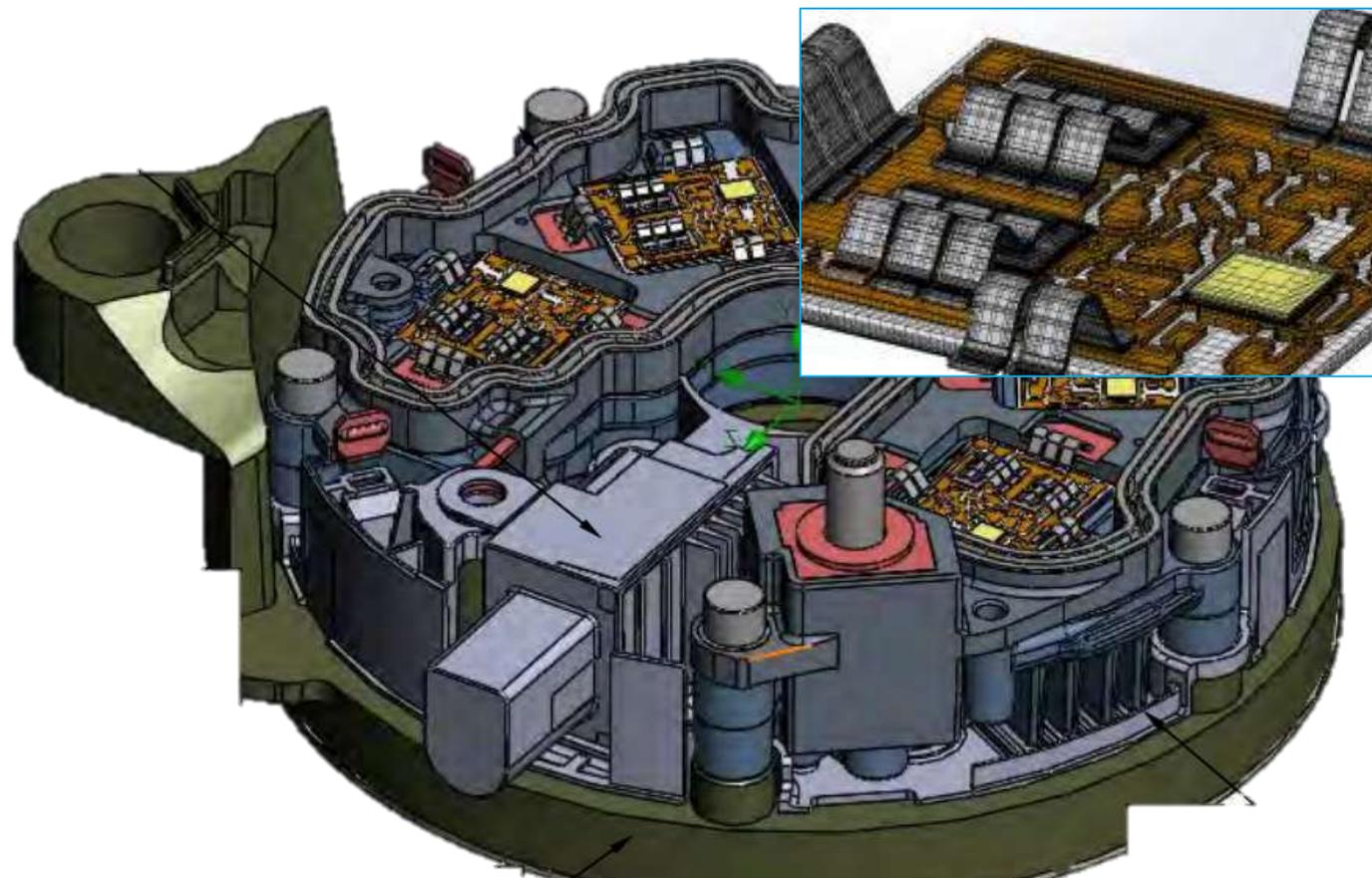


Разрешение погранслоя в классических пакетах

Простая геометрия

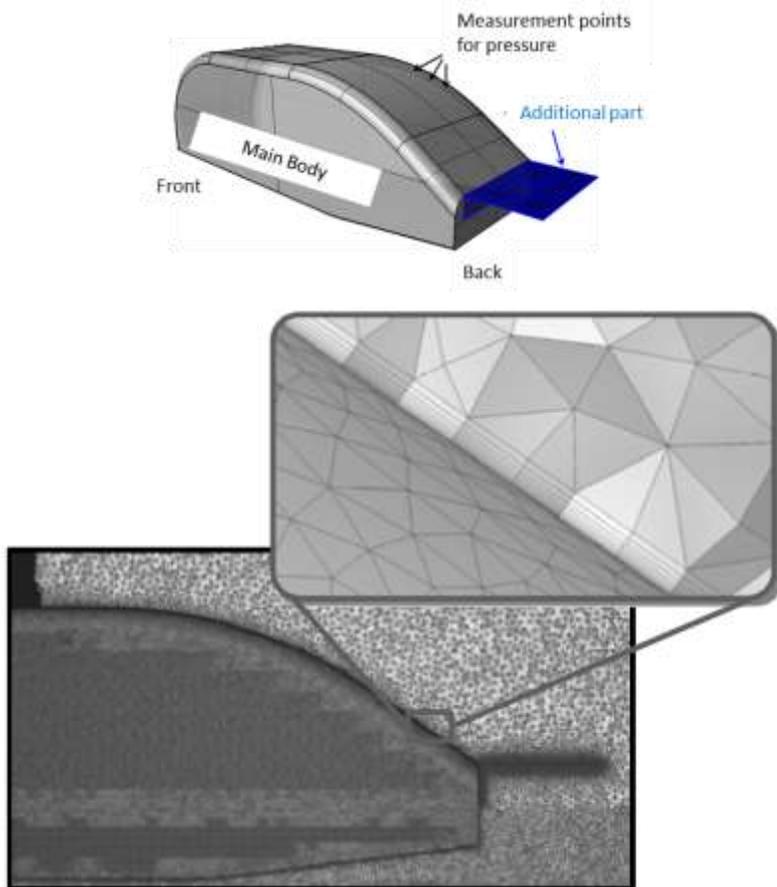


Сложная геометрия

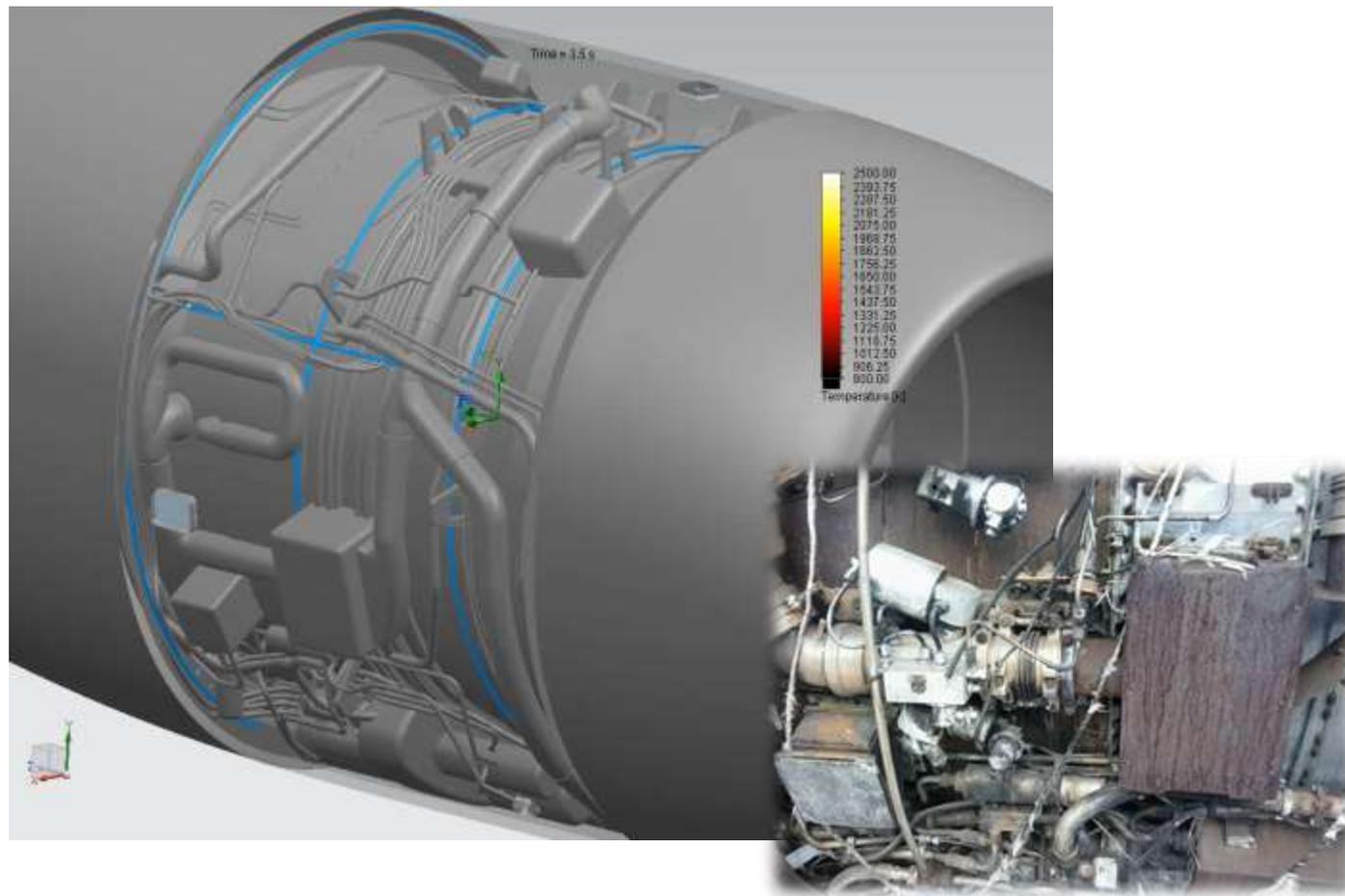


Разрешение погранслоя в классических пакетах

Простая геометрия

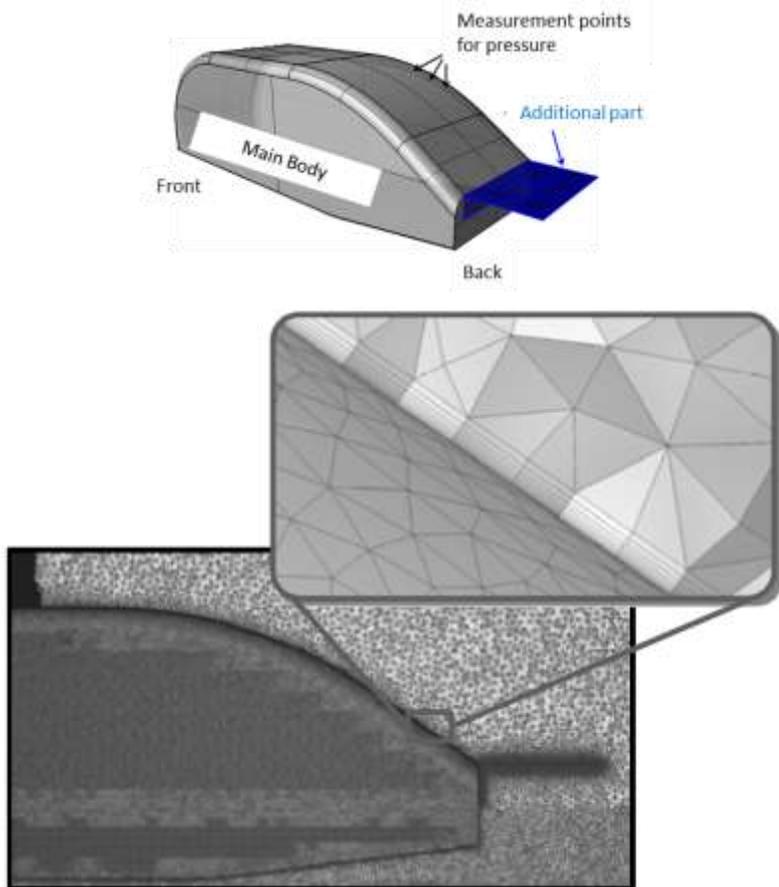


Сложная геометрия

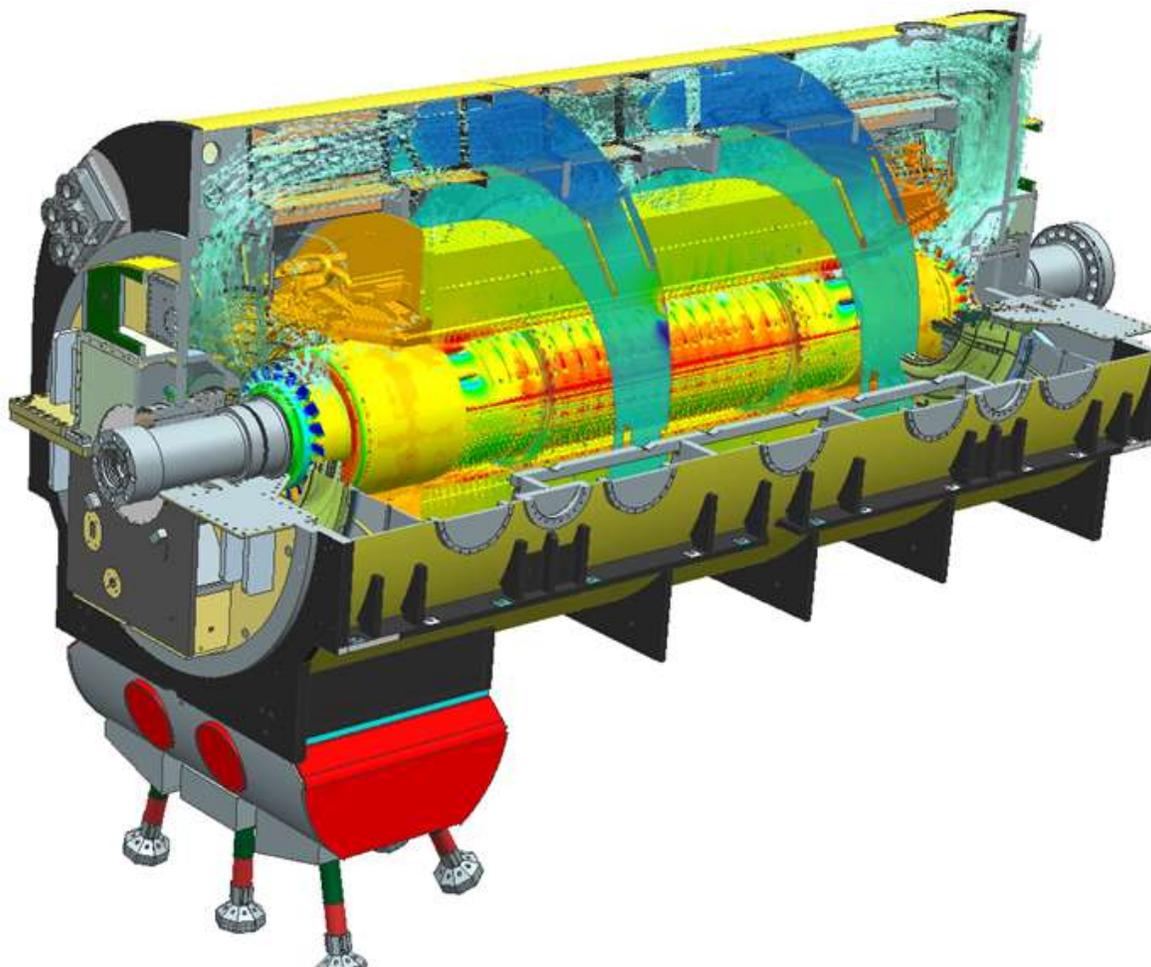


Разрешение погранслоя в классических пакетах

Простая геометрия



Сложная геометрия



Разрешение погранслоя в классических пакетах

Сопряженный теплообмен
Радиационный теплообмен

Несжимаемые течения

Течения смесей жидкостей

Течения жидкостей с кавитацией

Течения неньютоновских жидкостей

Pressure-based решатель
SIMPLE схема с
монотонизацией

Сжимаемые течения

Сжимаемые жидкости
Учет кавитации

Течения идеальных газов и их смесей ($M < 3$)

Течение водяного пара с
возможностью конденсации ($M < 3$)

Газовое и газо-капельное горение

Высокоскоростные течения

Течения совершенных газов и их смесей ($M < 30$)

Течение воздуха как реального газа ($M < 30$)

Течение атмосферы Марса как реального газа ($M < 30$)

Density-based решатель
на схеме типа Годунова с
поправками, ув. порядок

Свободная поверхность

Течение двух несмешивающихся жидкостей (VOF): жидкость/жидкость, жидкость/газ

Модели для Электроники

Тепло-электро-прочностная модель платы
Тепло-электрическая модель Li-Ion источников питания

Электромагнетизм НЧ

Прочность

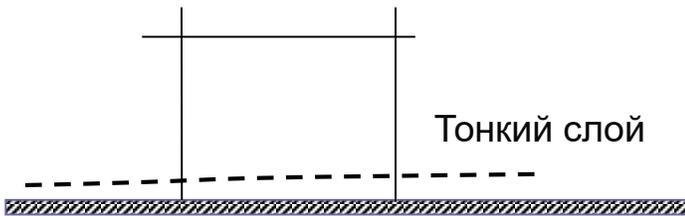
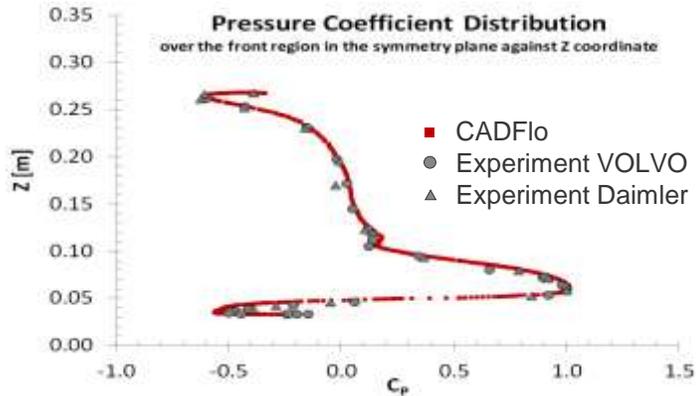
Упругие деформации
Собственные частоты
Линейная устойчивость

Решатель дополнен уникальными моделями!

В отличие от традиционных CFD пакетов, инженерный анализ T1 дополняет классические методы уникальными моделями, что позволяет получить результат **в десятки раз** быстрее и проще **без потери точности**.

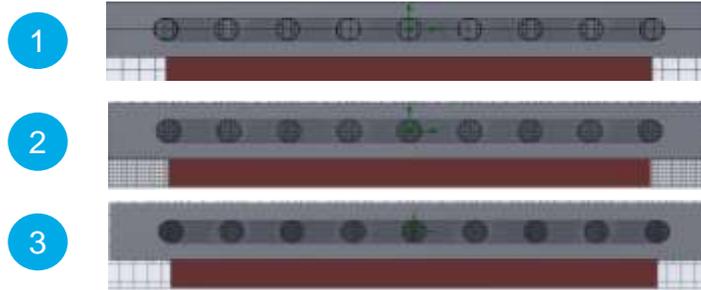


“Тонкий” слой



Интегральная модель погранслоя:
решение уравнений Прандтля
вдоль траектории

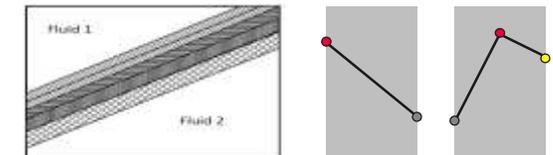
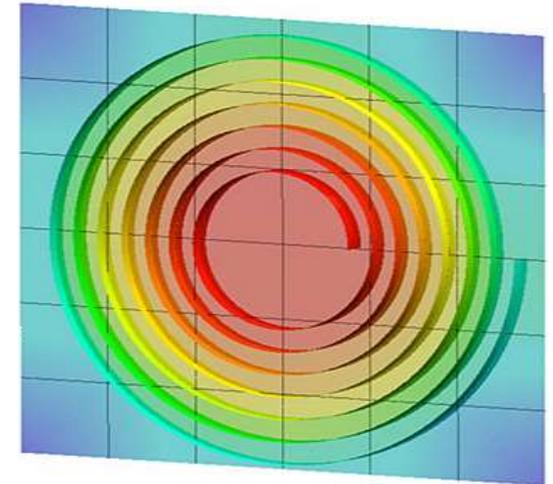
“Тонкие” каналы



	1	2	3
Ячеек/диаметр	5	7	12
Число ячеек	252 245	610 607	966 193
Δt_{water}	14.64	14.79	14.77
ΔP_{water} , Pa	270	277	276
Q_{water} , W	98.26	98.42	98.14

Эмпирическое решение заменяет
численное в особых
геометрических ситуациях

“Тонкие” стенки



Аналитическое решение в твердых
телах, разрешенных одной ячейкой
поперек

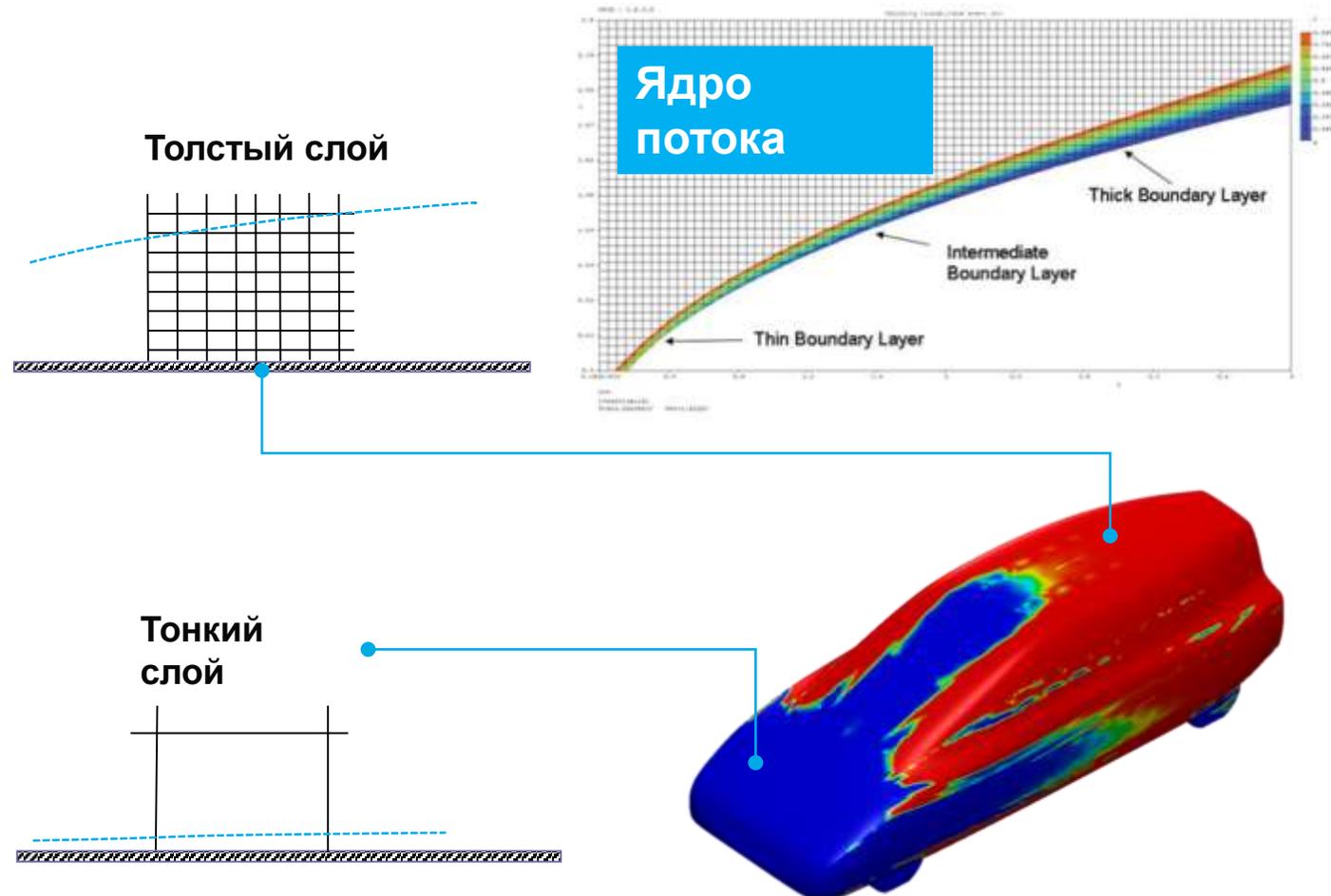
Модель “Тонкого” слоя

Разделение на ядро потока и пограничный слой.

Модели пограничного слоя в CADFlo:

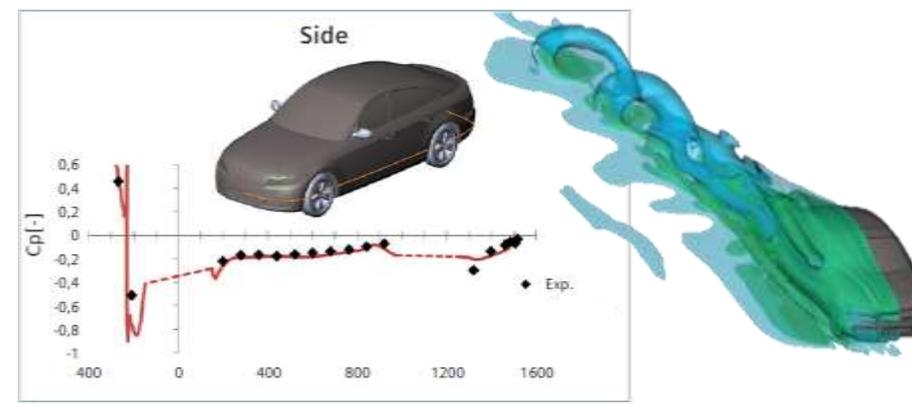
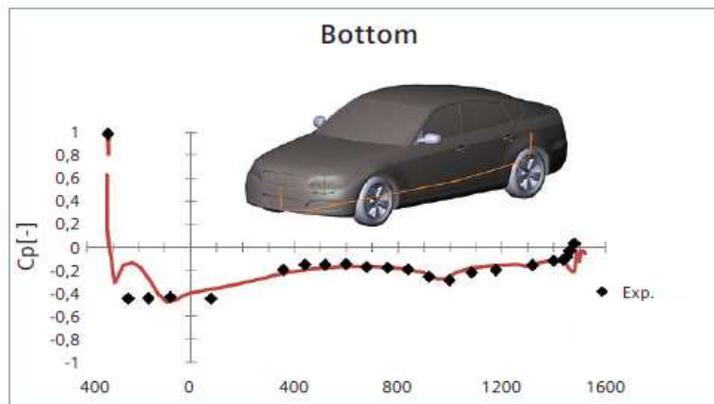
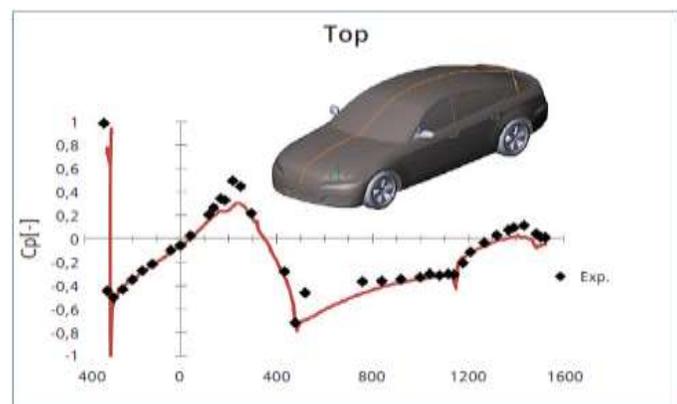
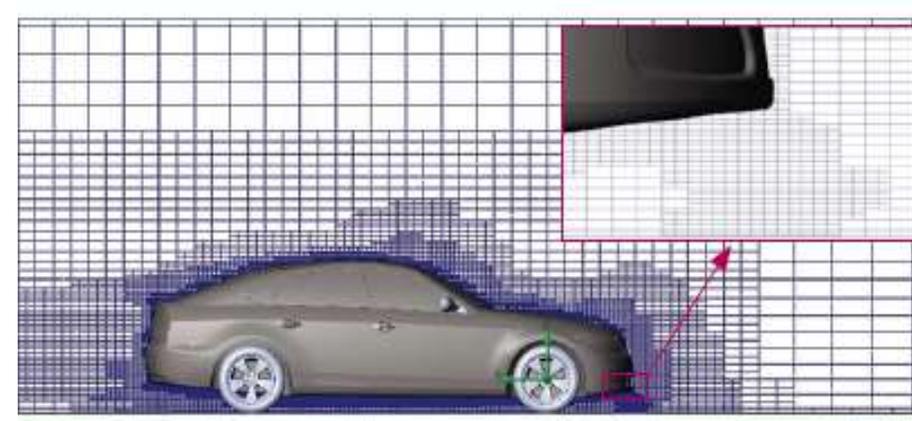
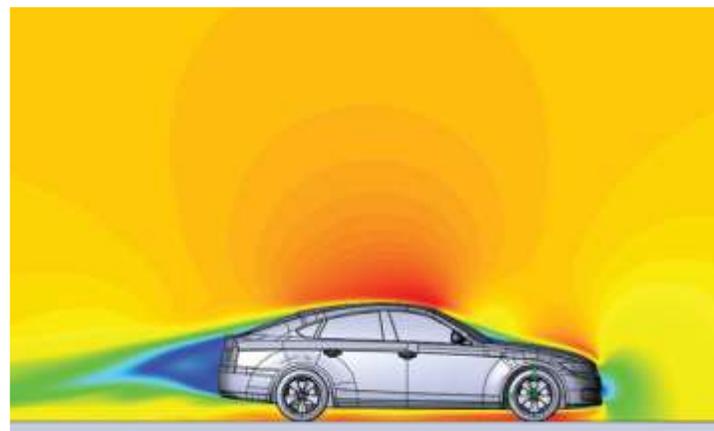
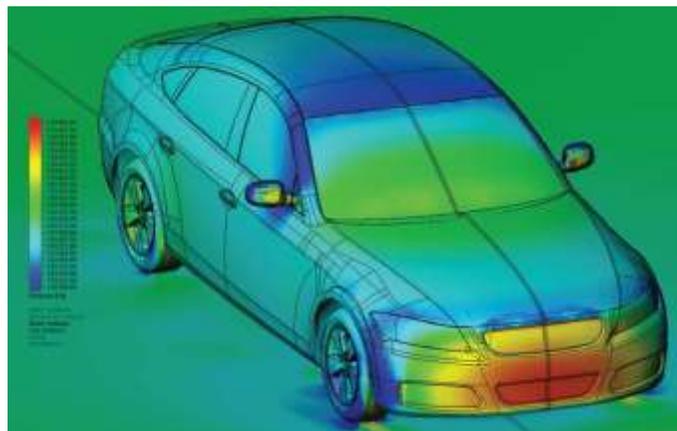
1. “Модель «толстого» пограничного слоя пограничный слой хорошо разрешен сеткой, расчет производится по классической технологии с использованием пристеночных функций.

2. Модель «тонкого» пограничного слоя пограничный слой **не разрешен** сеткой, расчет *напряжения трения* и *теплового потока* производится на основе решения интегральных уравнений Прандтля. Далее полученные потоки используются в расчете ядра подобно технологии пристеночных функций.



- + Модель работает для ламинарного, переходного и турбулентного течений.
- + В модели учитывается:
 - кривизна поверхности
 - ламинарно-турбулентный переход
 - сжимаемость
 - диссипация кинетической энергии
 - шероховатость поверхности
 - массовые силы в виде гравитации и центробежных сил
 - течение в точке растекания и отрыв потока.
- + Модель не требует детального разрешения пограничного слоя у стенки.
- + В следствии отсутствия требования разрешать сеткой погранслоем, возможно получить решения для экстремально сложной геометрии без ее предварительного упрощения.
- + Модель заменяет собой несколько (но не все) моделей турбулентности ввиду своего универсального подхода

Проверка модели пограничного слоя



Модель “Тонкие” каналы

Особая геометрия



плоский канал

ρ
 V
 H



$\Delta y \rightarrow Re, Pr$

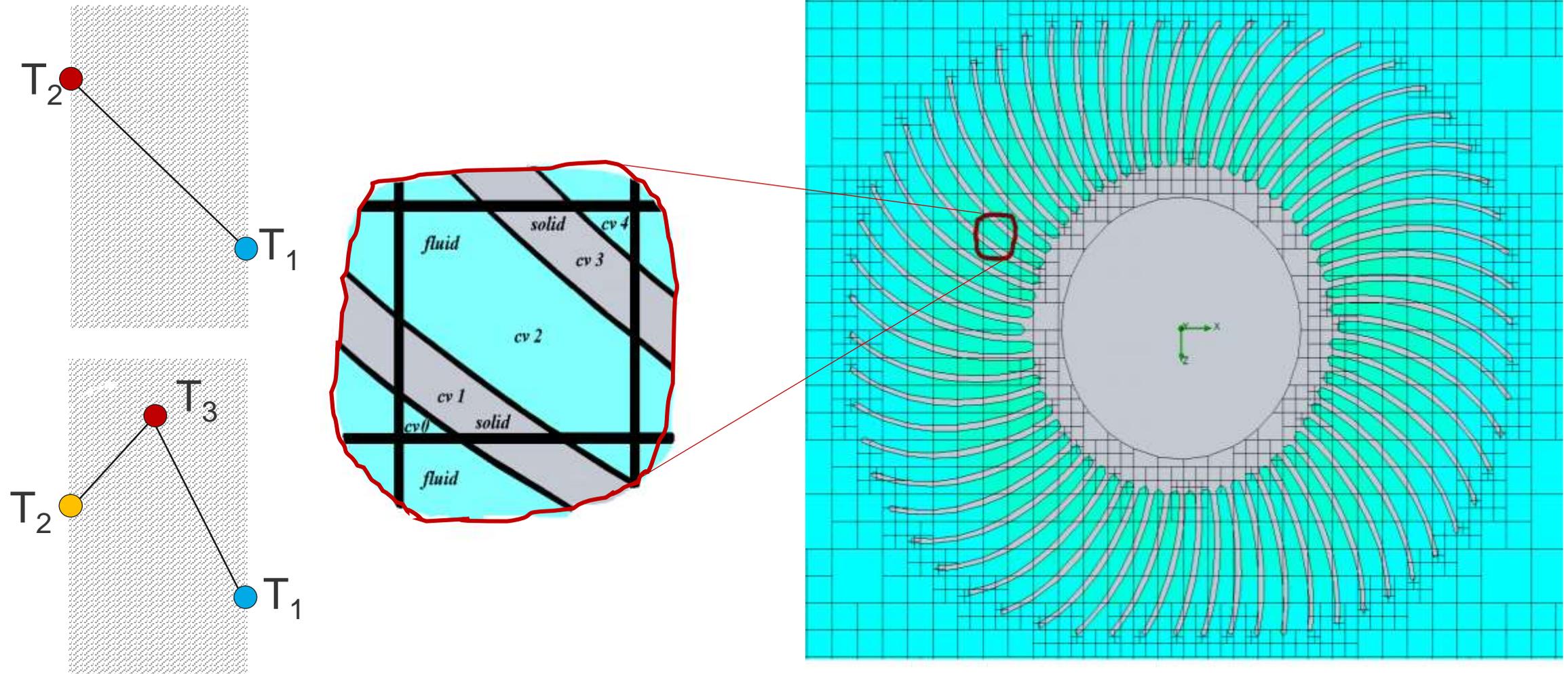


$\xi, Nu \rightarrow \tau_w, q_w$



Δx

Модель “Тонкие” стенки

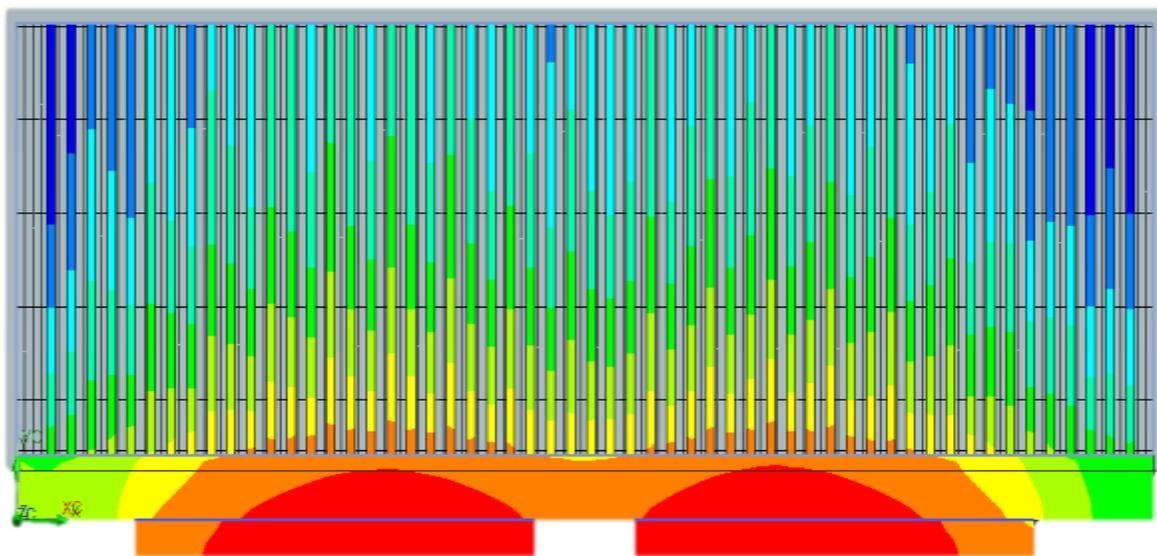


Проверка модели тонких каналов

Уникальные оригинальные решения обеспечивают высокую точность, лучшую производительность и автоматизацию решения.

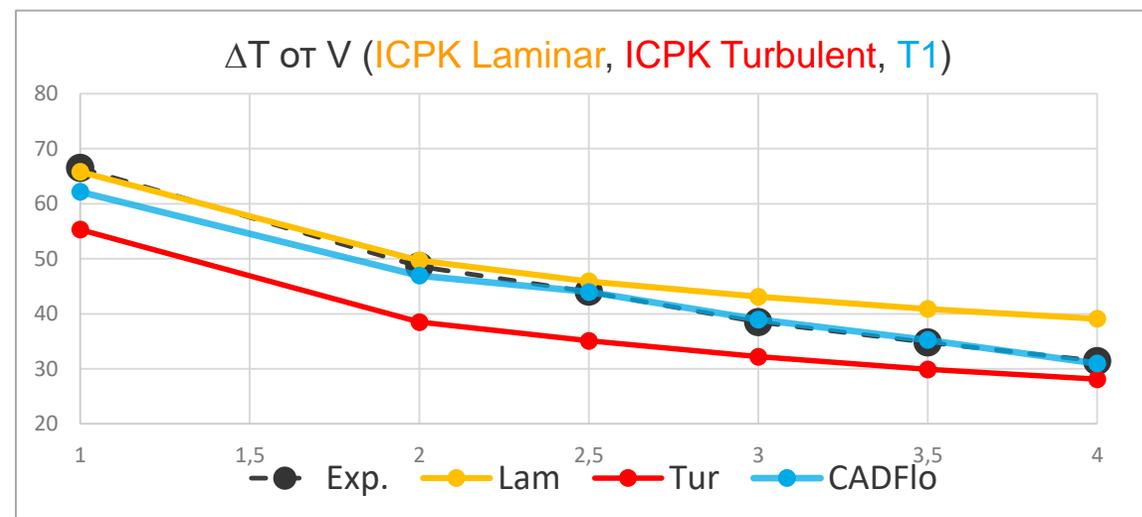
Решение T1 = 5 минут

Точное и быстрое решение
на автоматических настройках



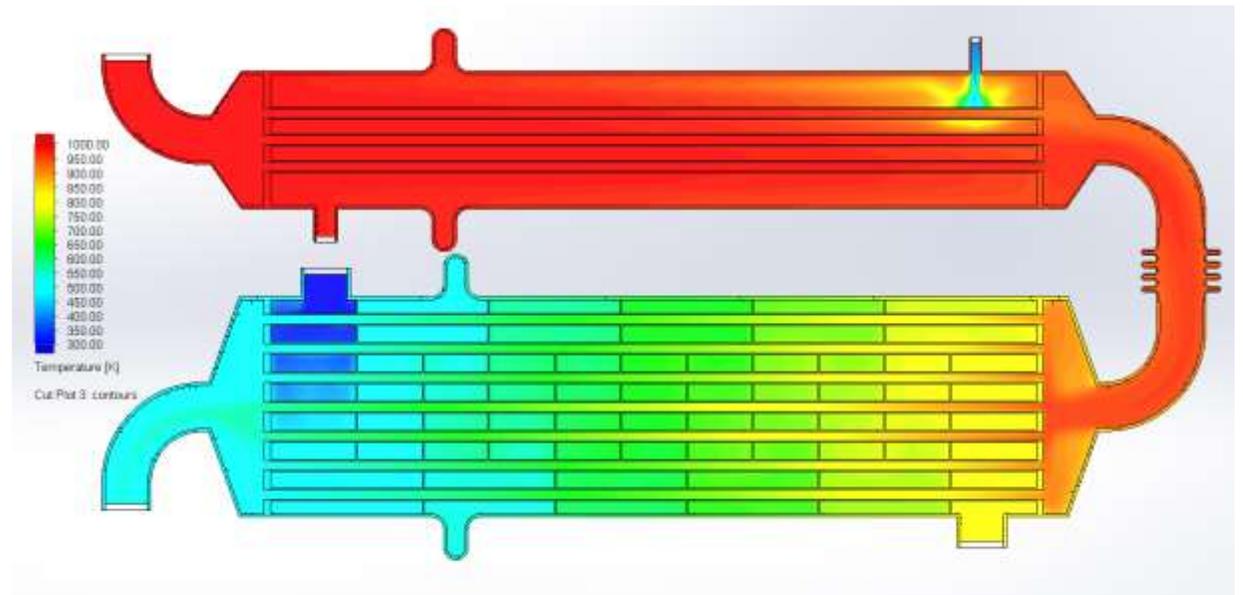
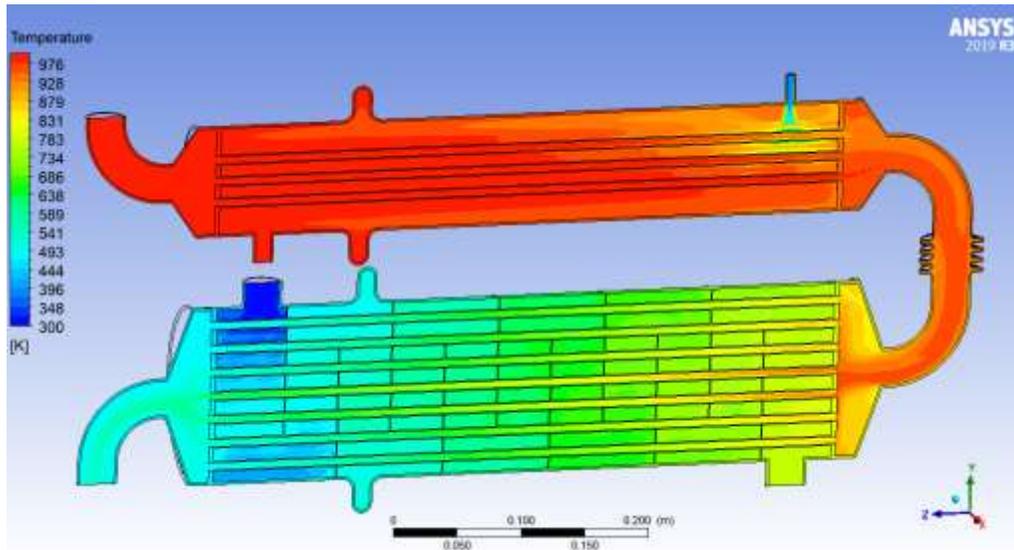
ANSYS Iсерак = 180 минут

Долго, решение зависит
от выбранной численной модели

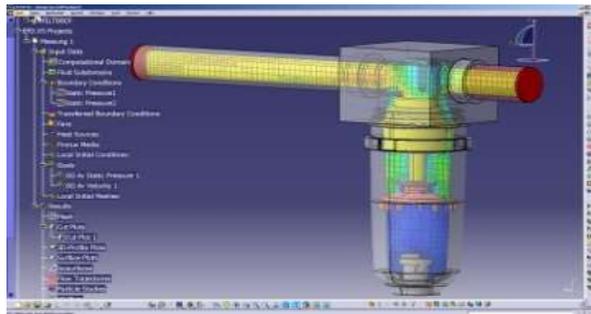
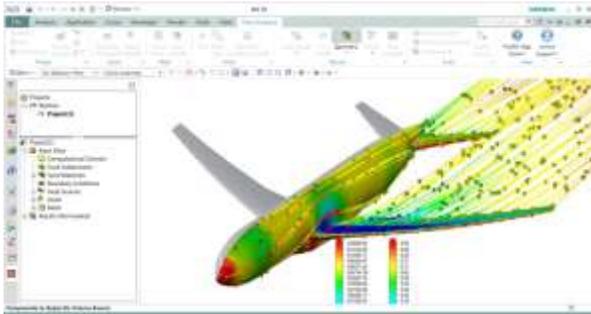
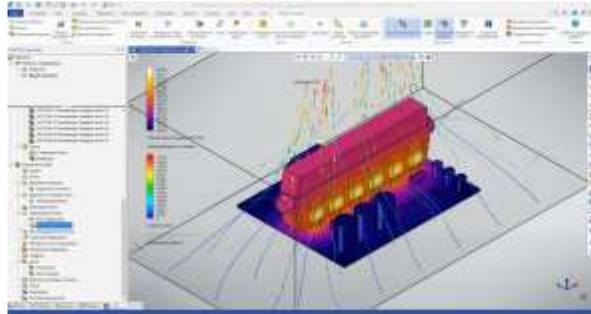


Проверка модели тонких каналов

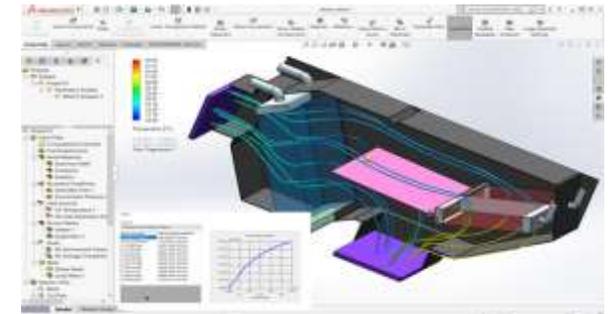
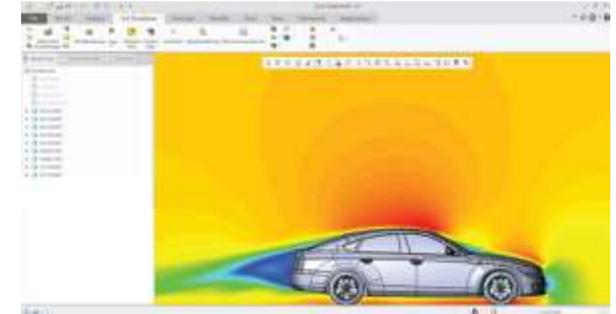
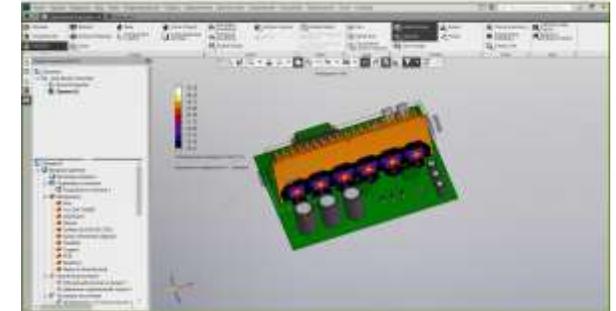
Контур	Твх, °K	Твых, °K	ΔT , °K	Твых, °K	ΔT , °K	Разница
		ANSYS		CADFlo		
Дымовые газы	1000	508	-492	524	-476	3,25 %
Воздух	300	814	514	796	496	3,51 %
Пар	380	991	611	992	612	0,16 %
Число ячеек, 10^6		15		2		x7
Время счета, ч		25		4		x6



Возможность проведения расчетов инженерами-конструкторами



- + Бесшовная интеграция в T-FLEX CAD, КОМПАС-3D, SolidWorks, NX, Creo, Solid Edge, CATIA V5
- + Не требует упрощения геометрии
- + Автоматическое извлечение жидкостного объема
- + Задание исходных данных и визуализация результатов на модели в окне CAD
- + Синхронизация проекта анализа при изменении геометрии CAD
- + UI в стиле CAD, знакомом инженеру-конструктору
- + Высокая надежность и степень автоматизация: автоматический контроль сходимости
- + Автоматический решатель: нет выбора моделей турбулентности и сложных настроек решателя - универсальная “Тонкая” модель заменяет многообразие моделей и упрощает работу с CAE не специалистам в области инженерного анализа





CADFlo^{EFD}

Примеры отраслевых задач



Свидетельство в Роспатенте
№ 2022663085



В реестре Российского ПО
№ 15125



Член АРПП
«Отечественный СОФТ»

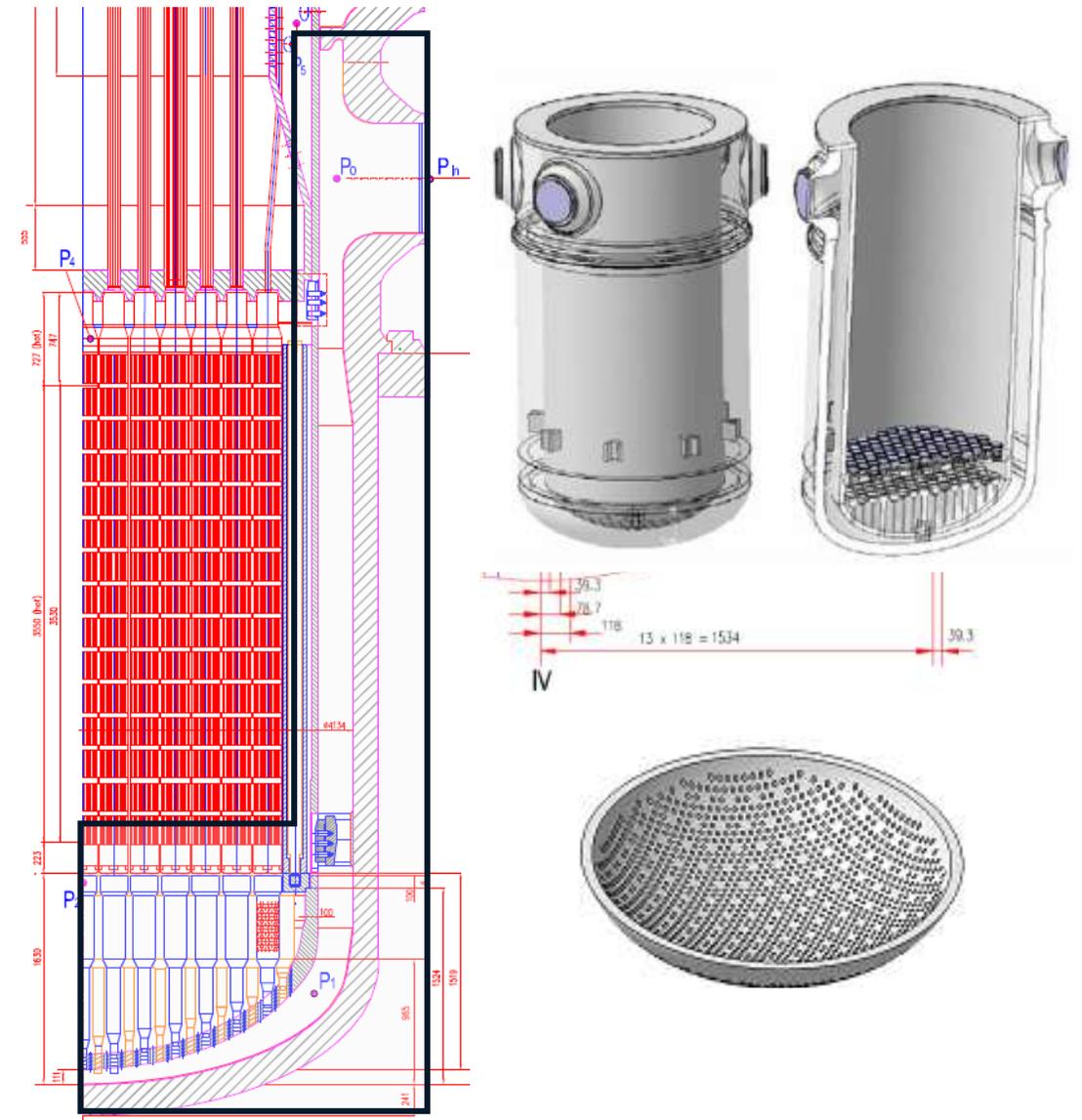
Перемешивание теплоносителя в реакторе в условиях аварии

Расчетная область, граничные условия

- Расчетная область выделена контуром на чертеже справа
- В нижней камере расположено 163 топливных опорных колонн, соответствующих количеству топливных сборок.
- Перфорированная пластина состоит из 1344 отверстий диаметром 0,04 м.
- ГУ на входе: скорость и температура воды 4-х холодных ветках циркуляционного контура (данные, измеренные в ходе эксперимента на реакторе).

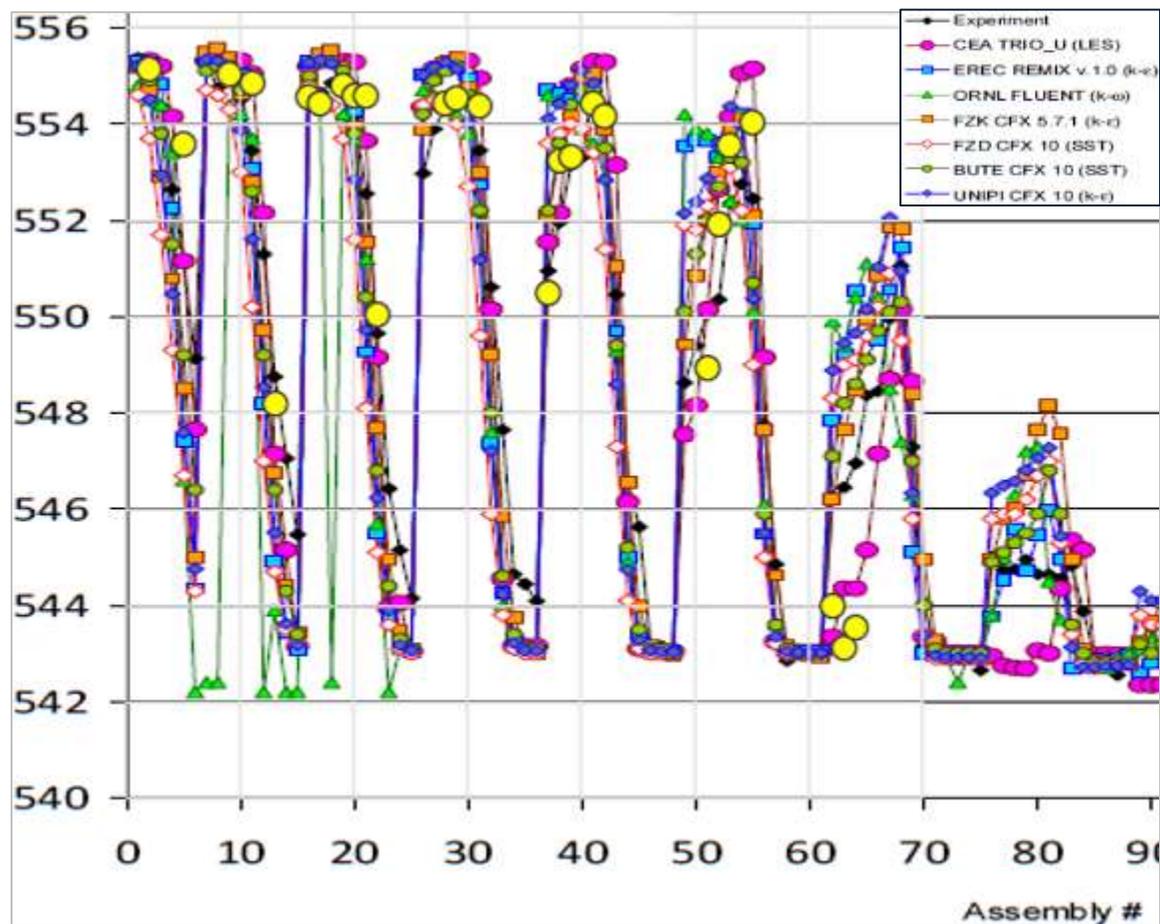
Parameter	Loop 1	Loop 2	Loop 3	Loop 4
Mass flow rate, [kg/s]	4566	4676	4669	4819
Velocity, [m/s]	10,57	10,53	10,50	10,84
Temperature, [K]	555,35	543,05	542,15	542,35

- Более высокая температура в 1-м входном патрубке соответствует имитируемым аварийным условиям.
- Погрешность измерения расхода +/-110 кг/с, температуры +/- 1,5°K [2].

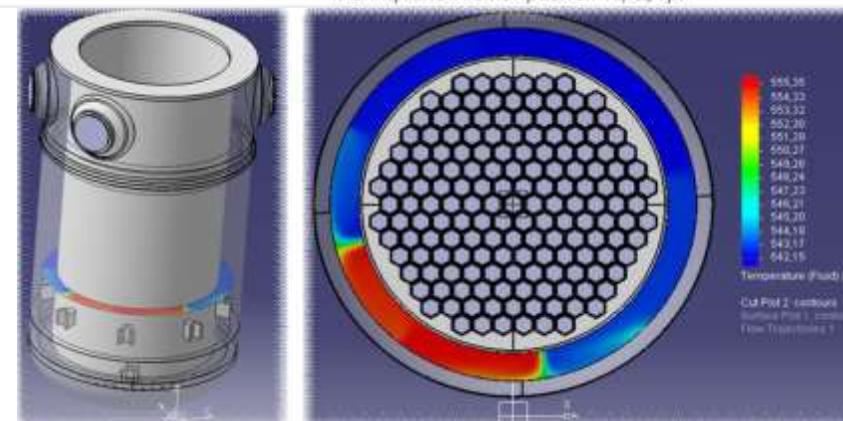
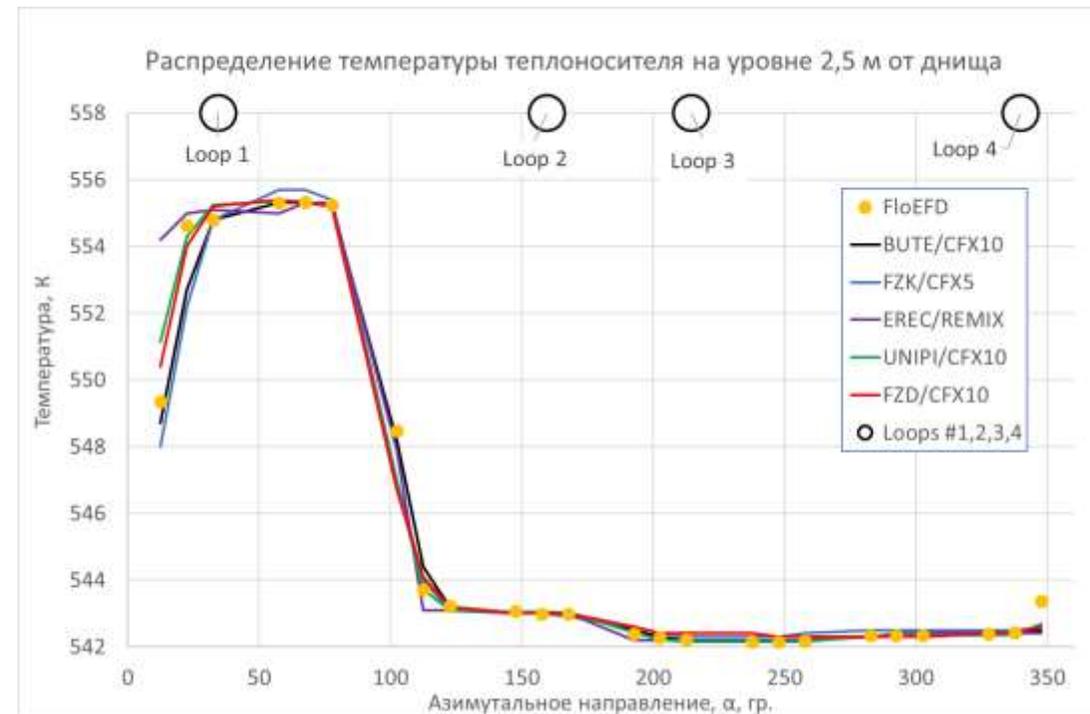


Перемешивание теплоносителя в реакторе в условиях аварии

Температура на входе в активную зону от номера сборки



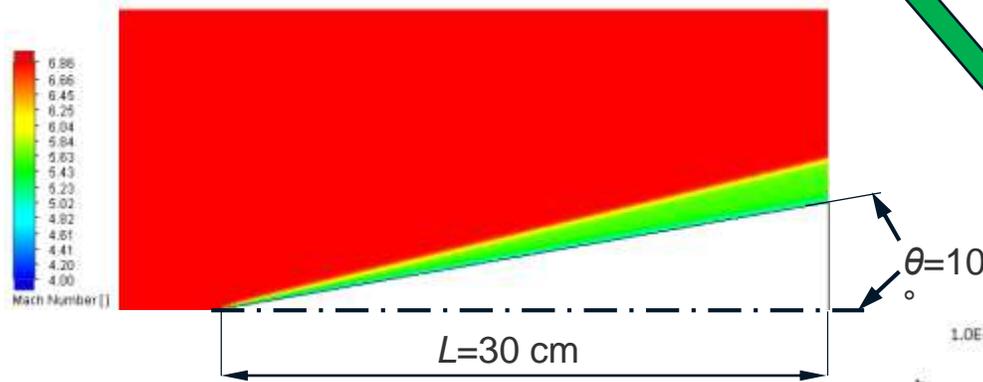
Распределение температуры в сечении на высоте 2,5 м от дна



Тепловые потоки при больших числах Маха. Заостренный конус*

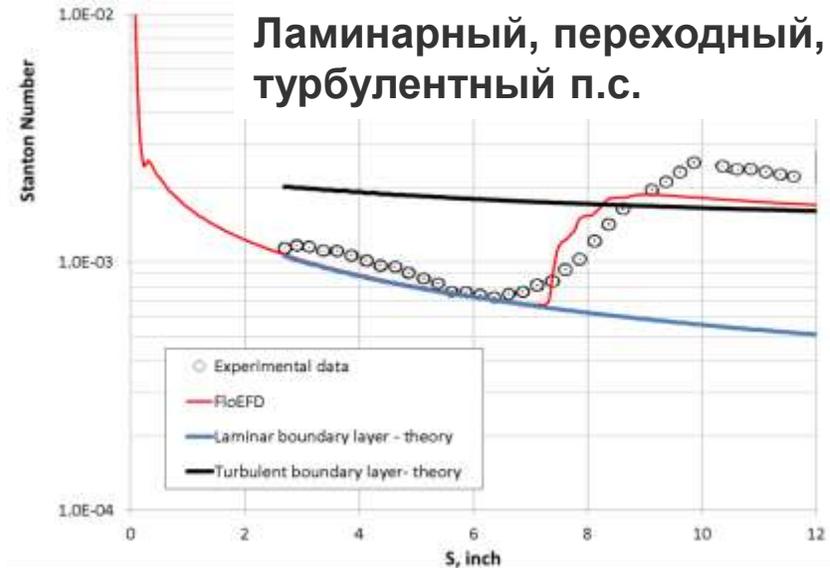
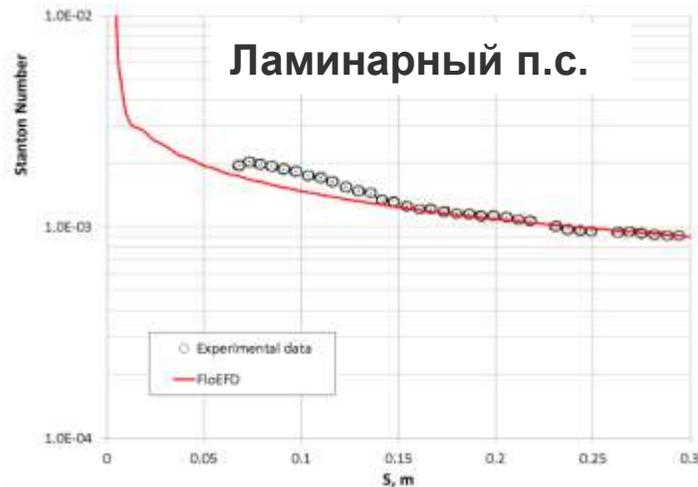
Параметры потока: $M_\infty=6.86$; $T_\infty=57$ K; $P_\infty = 363...1145$ Pa

Температура стенки: $T_w=293.2$ K



Пограничный слой – ламинарный, переходный, турбулентный

Пограничный слой - ламинарный

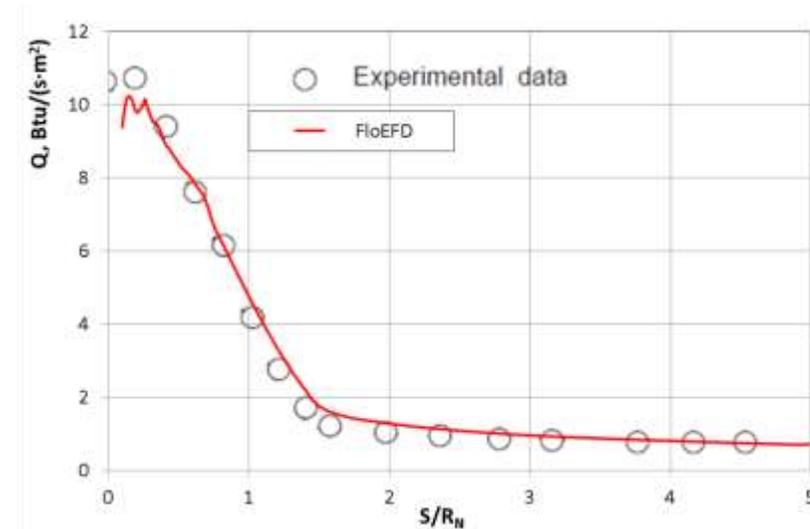
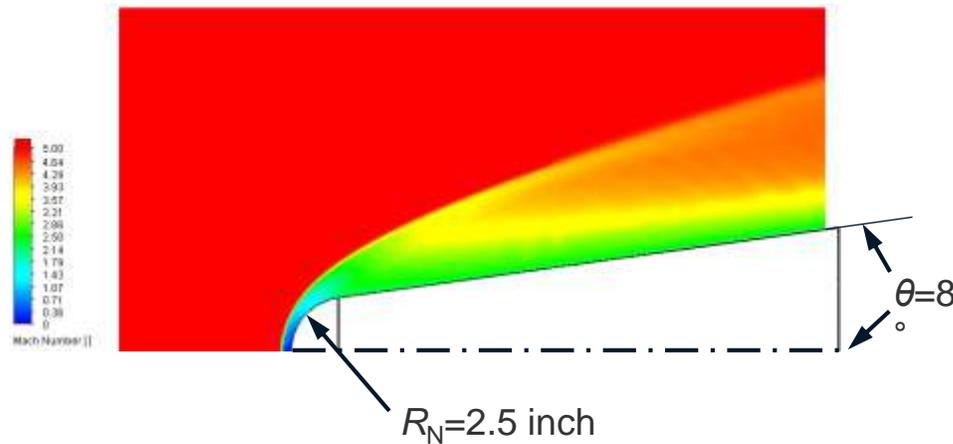


*Fischer, M.C. An experimental investigation of boundary-layer transition on a 10-deg. half-angle cone at Mach 6.9. Technical Report NASA TN-D-5766, 1970.

Тепловые потоки при больших числах Маха. Затупленный конус*

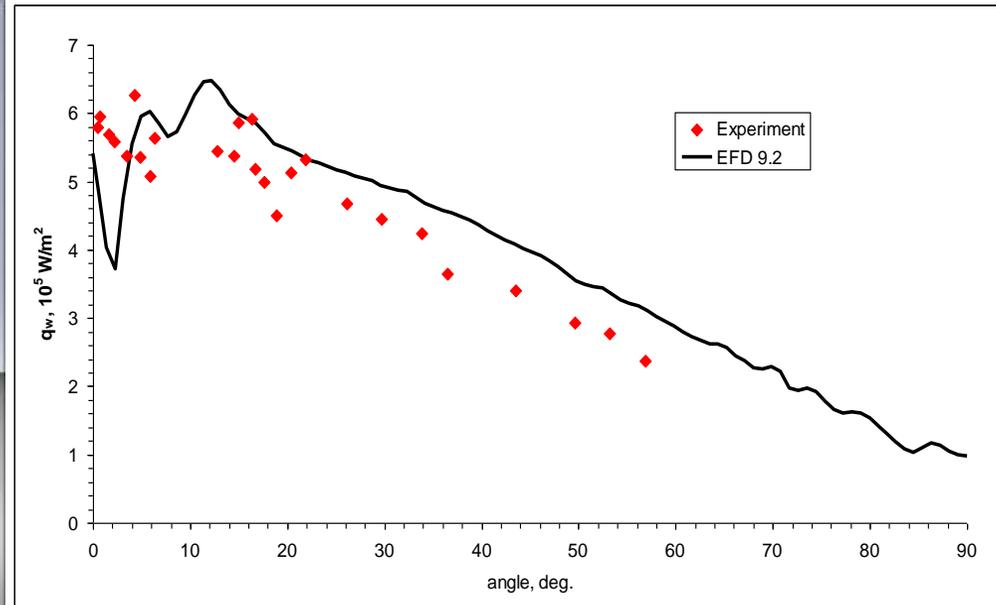
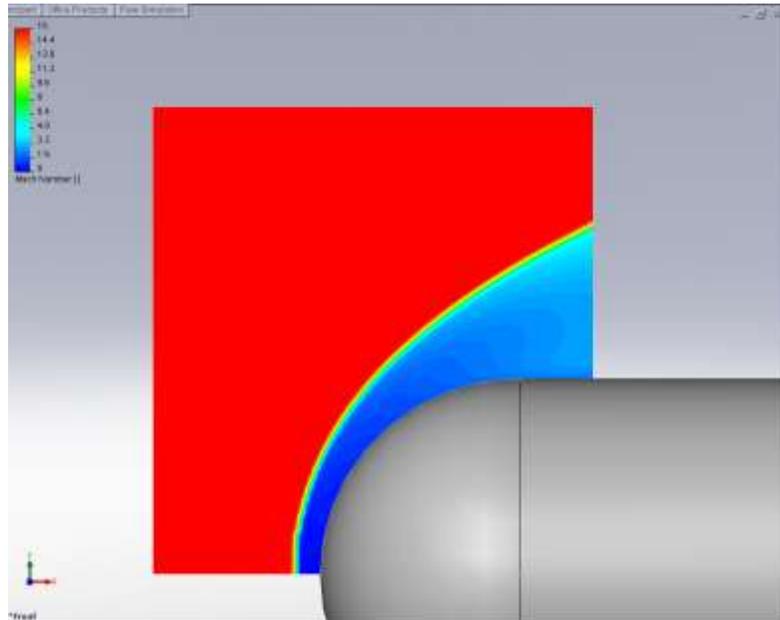
Параметры течения: $M_\infty=5$; $T_\infty=115$ K; $P_\infty=1650$ Pa

Температура стенки: $T_w=293.2$ K



* Jackson, M. D., and Baker, D. L. Interim Report - Passive Noretip Technology (PANT) Program. Volume III. Surface Roughness Effects, Part I. Experimental Data. SAMSO-TR-74-86, Vol. III, Pt. I, U.S. Air Force, Jan. 1974.

$M = 16.34$ $T = 52$ K $T_w = 294$ K $p = 82.95$ Pa



*AIAA Journal vol.31 №7 p. 1215

Тепловые потоки при больших числах Маха. Теплозащитный наконечник



Испытания модели проводились на ударной трубе

Параметры набегающего потока:

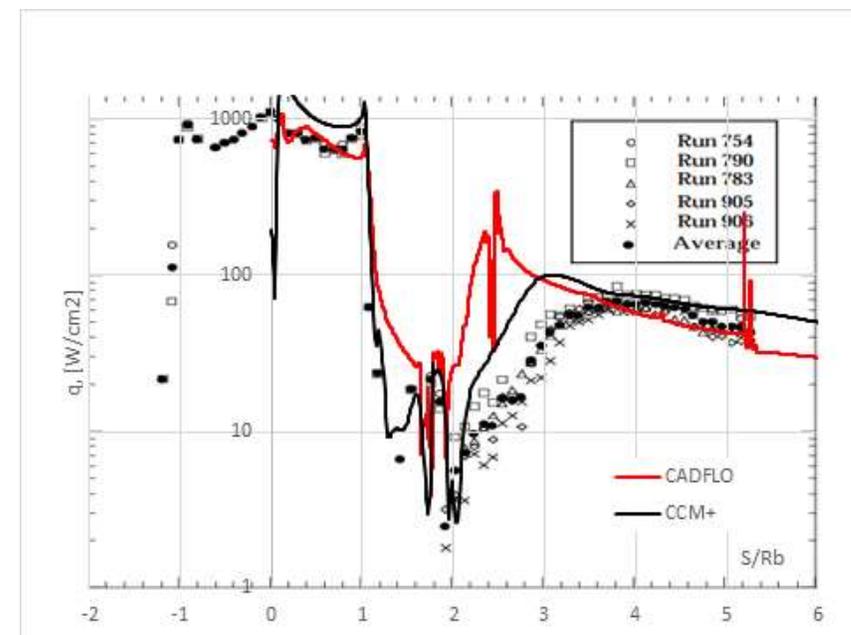
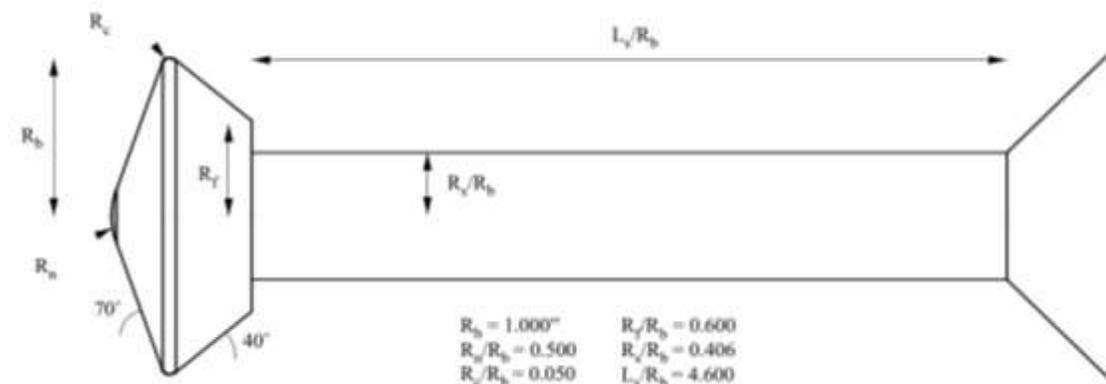
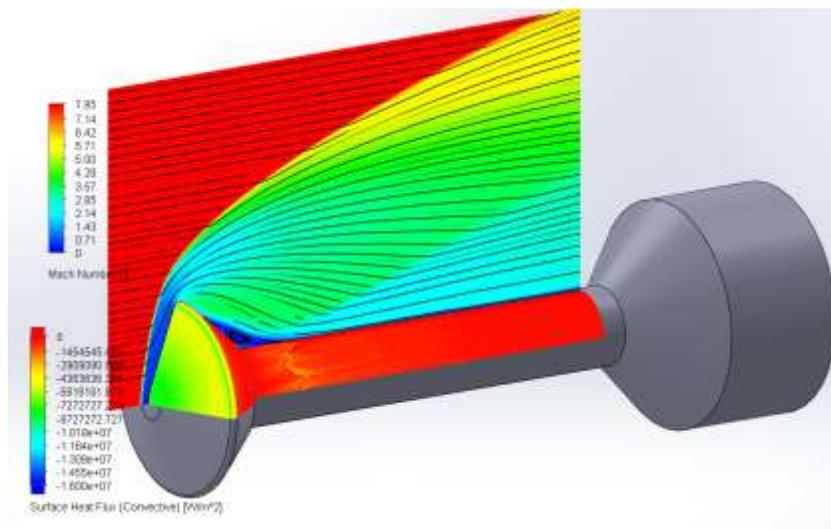
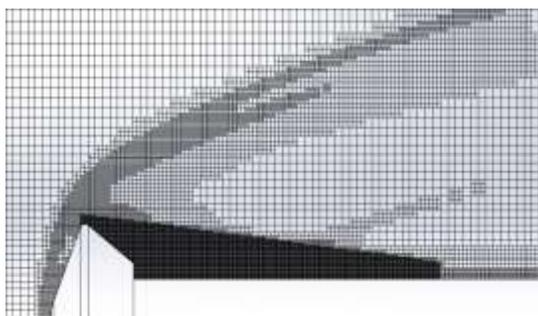
Скорость потока – 5162 м/с

Статическое давление в потоке – 1824 Па

Статическая температура потока – 1113 К

Рабочее тело - воздух

Число ячеек сетки –
2.5 млн



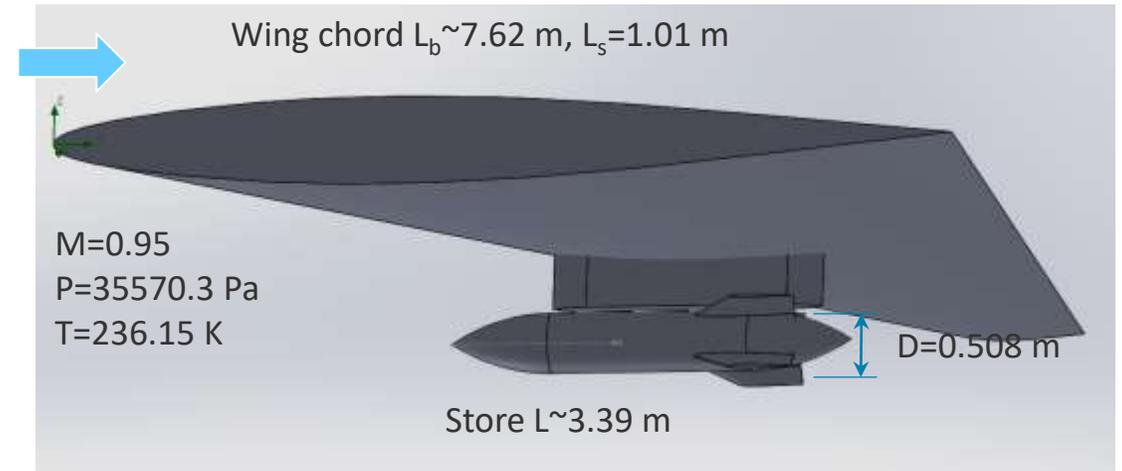
Баллистика тела после отделения от самолёта

+ Условия:

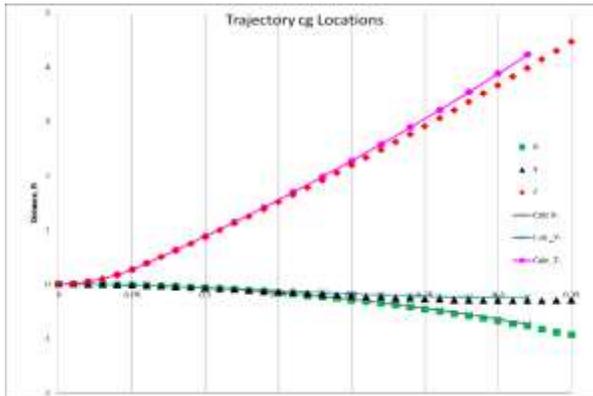
- Высоте полёта = 8 000 м
- Масса тела = 907 кг
- Моменты инерции: $I_x = 27.12 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$,
 $I_y = 488.1 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$, $I_z = 488.1 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$

+ Анализ:

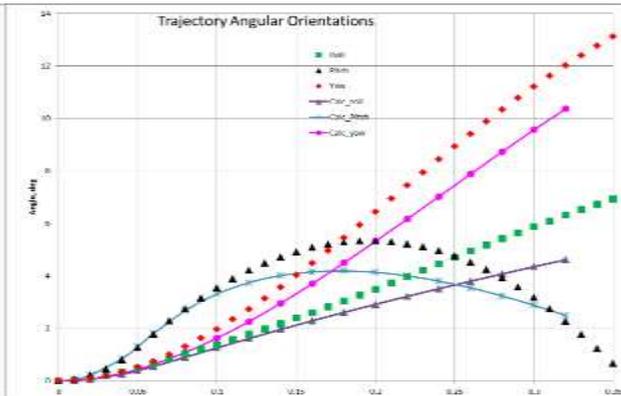
- Аэродинамика – серия стационарных расчётов
- Совместно с CFD решаются уравнения динамики тела по 6 степеням свободы
- Определяется новое положение тела на каждом шаге, CFD-сетка перестраивается.



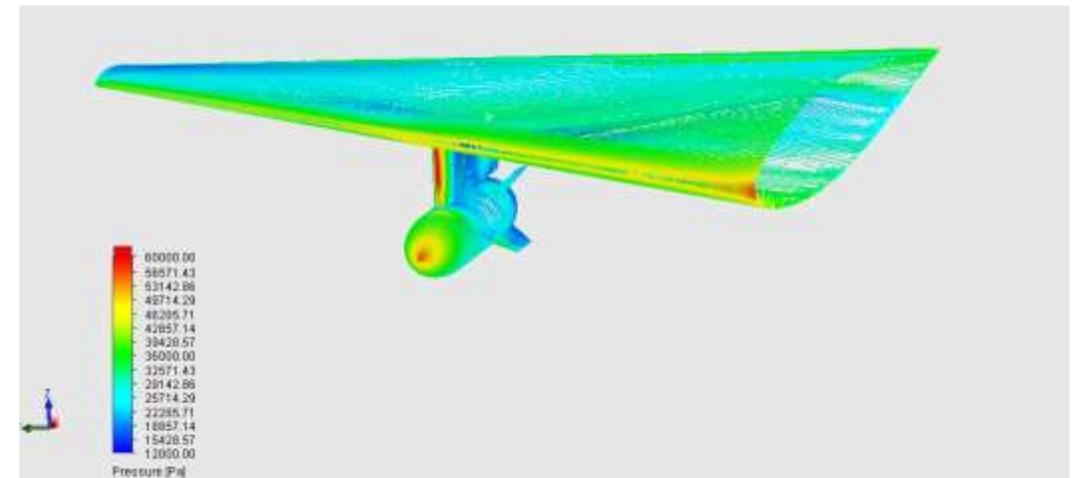
$\Delta t = 0.01 \dots 0.02 \text{ s}$ – временной шаг для решения баллистических уравнений



Перемещение центра масс по времени



Угол поворота относительно Ц.М.



* Thoms, R.D. and Jordan, J.K., "Investigation of Multiple-Body Trajectory Prediction Using Time-Accurate Computational Fluid Dynamics", AIAA Paper 95-1870, June, 1995

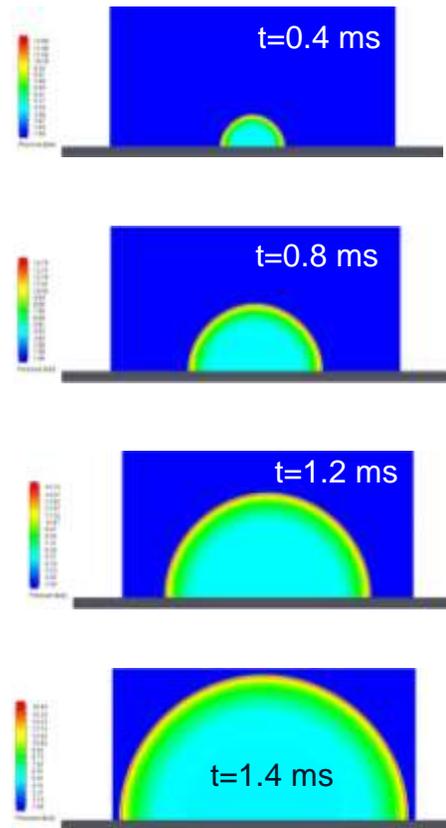
Детонация

+ Условия:

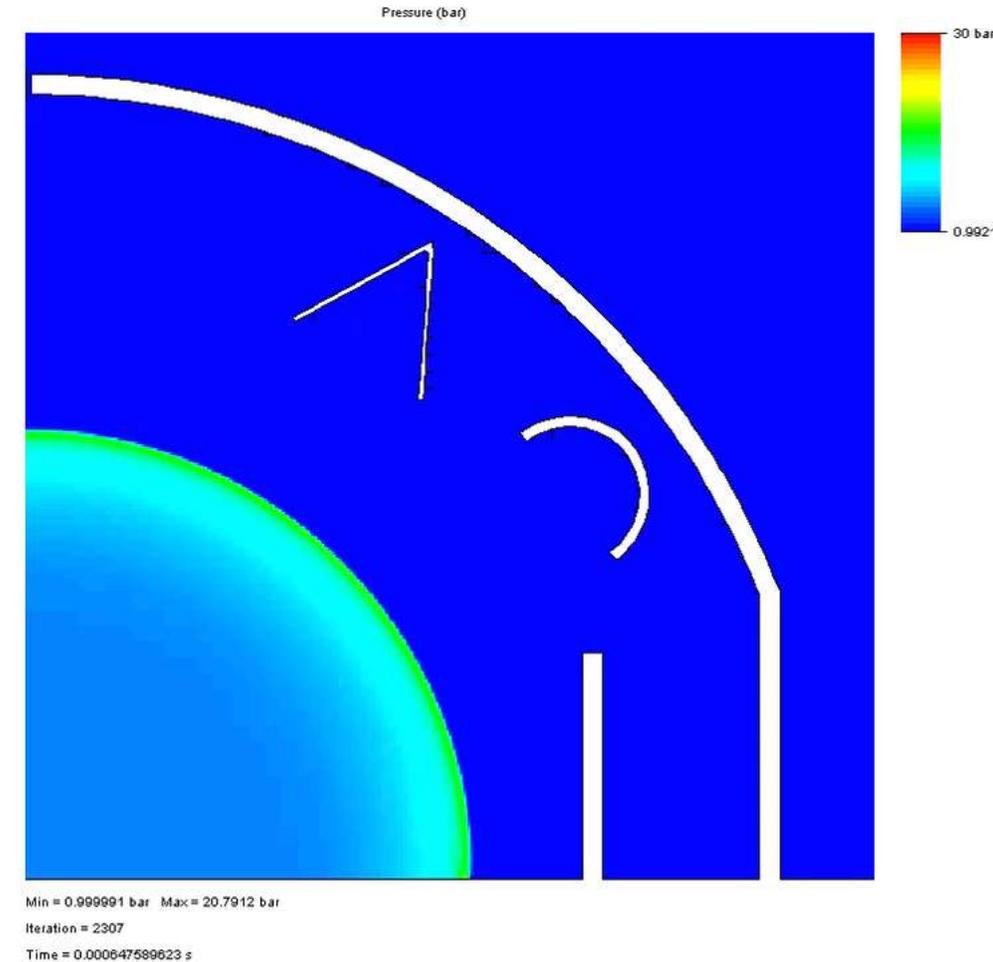
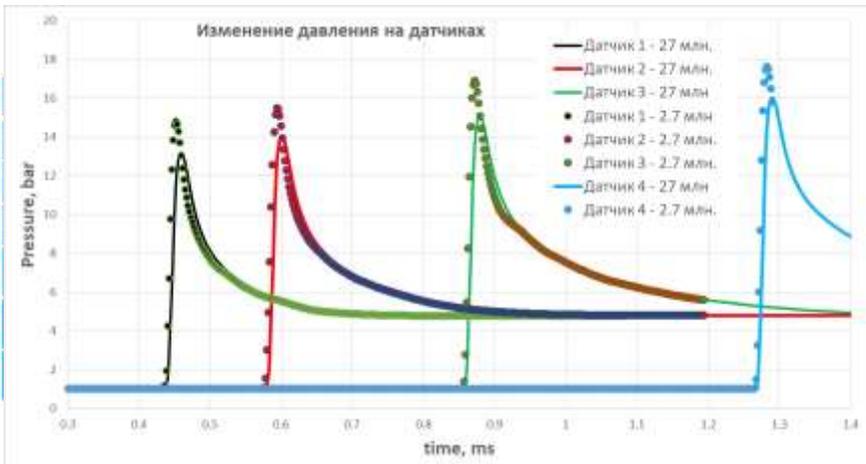
- Смесь водорода и воздуха
- 1D и 3D постановки
- Объемная концентрация $H_2 = 0,297$ (стехиометрия)
- Начальные условия: 1 bar, 20 °C
- Сетка равномерная и с адаптацией (дроблением по фронту волны)

+ Анализ:

- Скорость волны и потока газа
- Давление в пике и за фронтом
- Температура
- Требуемый размер ячеек сетки
- Влияния концентрации H_2



27 млн
2.7 млн
ЭЛЕМЕНТ

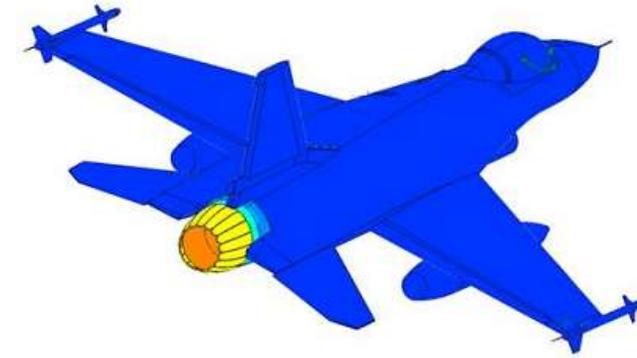


*А. И. Гавриков, А. Данилин, А. А. Канаев, А. Е. Киселев, МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЕТОНАЦИИ В УСТАНОВКАХ КРУПНОГО МАСШТАБА С ПОМОЩЬЮ ПРЕЦИЗИОННОГО ВИХРЕРАЗРЕШАЮЩЕГО КОДА САВАРЕТ-COMBUSTION

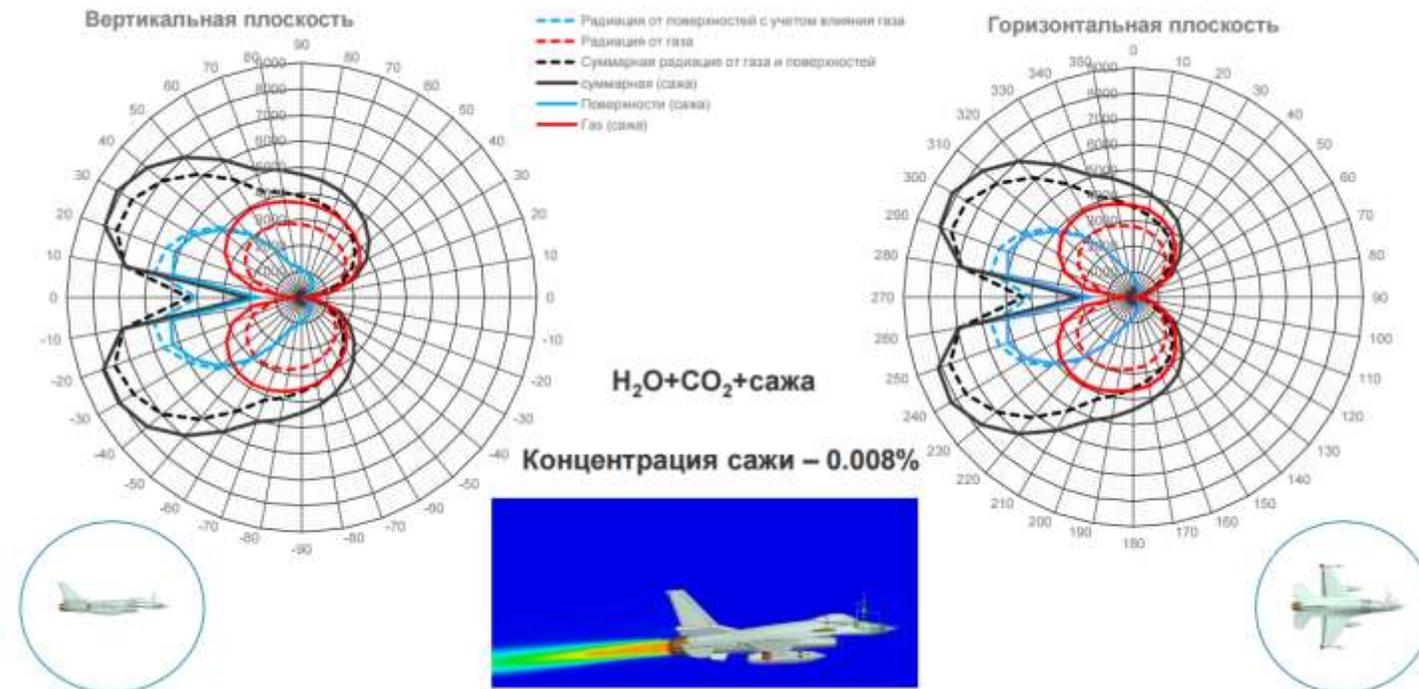
Тепловая заметность

Расчет заметности F16 на высоте 1 км с расстояния 1 км

- + Параметры планера
 - Температура – 45°C
 - Коэффициент черноты – 0,88
- + Параметры струи двигателя
 - Температура – 1000°C
 - Состав - CO₂ – 9,2%, H₂O – 3,6%, сажа – 0,008%
- + Диапазон длин волн наблюдения – 1,5..3,5 мкм
- + Определение излучения на больших расстояниях от объекта
- + Учет влияния газов (H₂O и CO₂) и сажи
- + Спектр излучения H₂O и CO₂ изменяется от 1 до 40 мкм и температурном диапазоне 200-4000K
- + Сажа рассматривается как идеальный газ



Интенсивность излучения [Вт/ср]



Рассеяние плоской электромагнитной волны на объекте

- + Полномасштабная модель самолета F-22, идеальный проводник
- + Падающая электромагнитная волна – плоская с частотой 200 МГц, 1 ГГц, 12 ГГц падающая под углом 45° к оси объекта в плоскости планера
- + Сравнение получаемых результатов по возбуждаемым токам и эффективной площади рассеяния (ЭПР) производится с программным аналогом фирмы Dassault Systems - CST

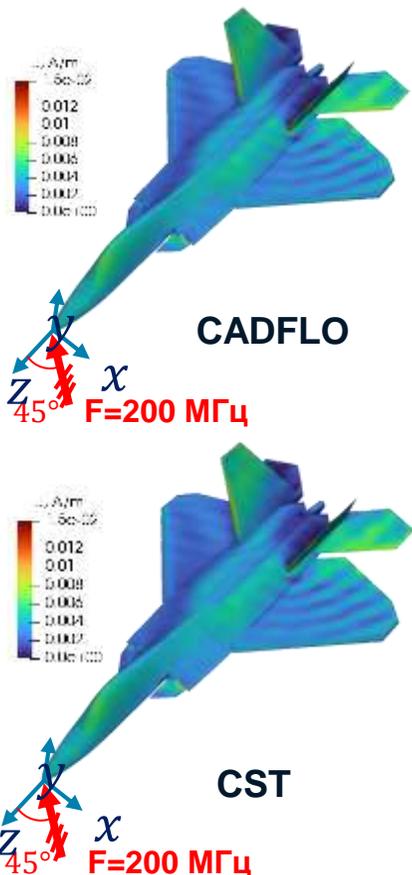
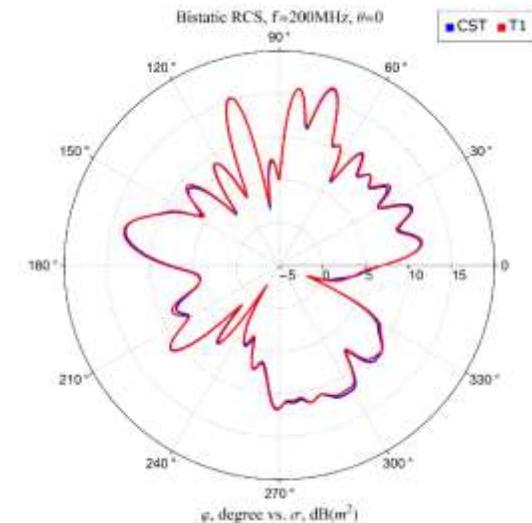
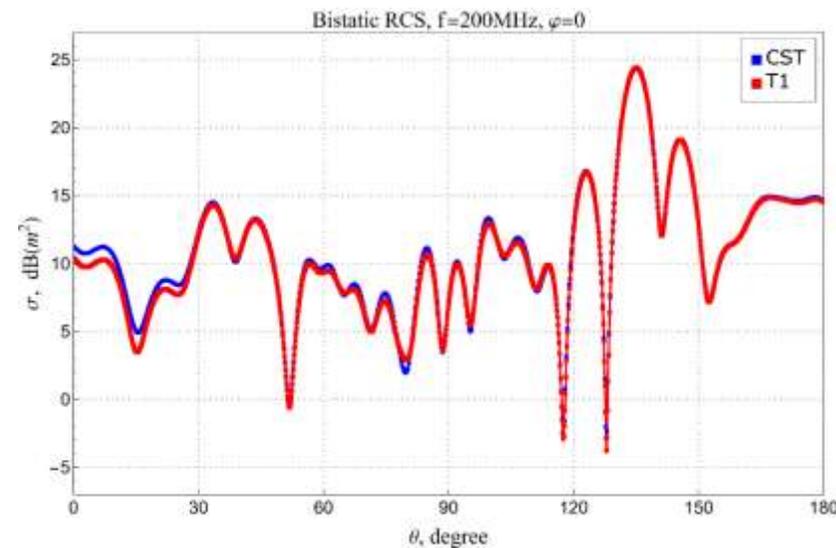


Диаграмма эффективной площади рассеяния



$$\sigma = 10 \lg \left(4\pi R^2 \frac{E_2^2}{E_1^2} \right), dB (m^2)$$

R – расстояние до РЛС, E_1 – напряженность поля волны в месте объекта, E_2 – напряженность поля отраженной волны в месте РЛС

Рассеяние плоской электромагнитной волны на объекте

- + Полномасштабная модель самолета F-22, идеальный проводник
- + Падающая электромагнитная волна – плоская с частотой 200 МГц, 1 ГГц, 12 ГГц падающая под углом 45° к оси объекта в плоскости планера
- + Сравнение получаемых результатов по возбуждаемым токам и эффективной площади рассеяния (ЭПР) производится с программным аналогом фирмы Dassault Systems - CST

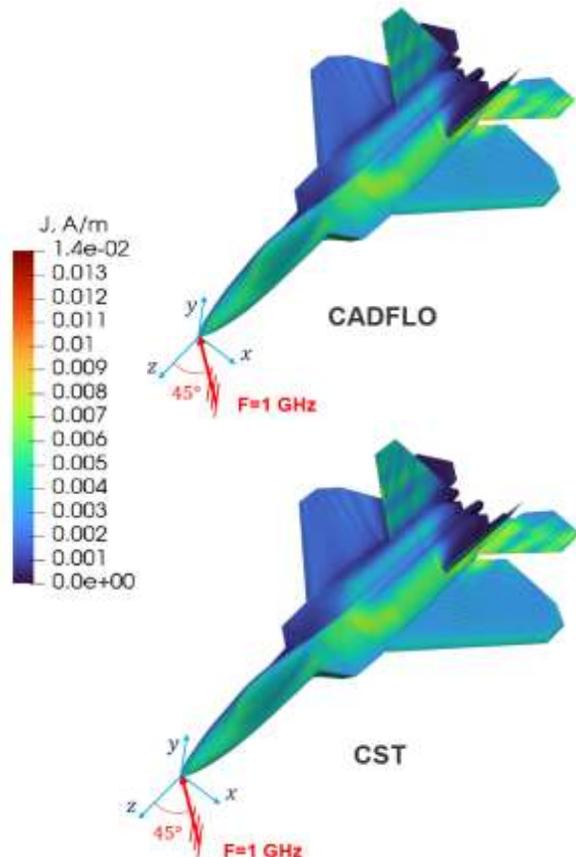
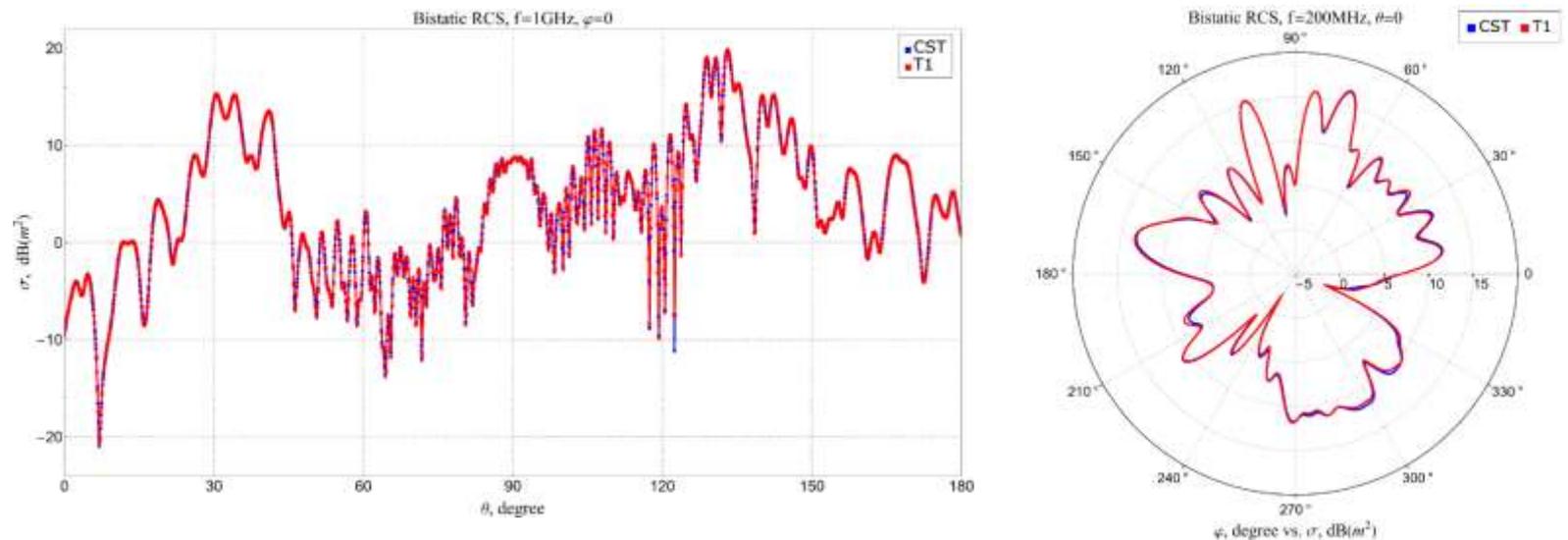


Диаграмма эффективной площади рассеяния



$$\sigma = 10 \lg \left(4\pi R^2 \frac{E_2^2}{E_1^2} \right), dB (m^2)$$

R – расстояние до РЛС, E_1 – напряженность поля волны в месте объекта, E_2 – напряженность поля отраженной волны в месте РЛС

CADFlo^{EFD}

Сертификация CADFLO в НТЦ ЯРБ

Работу по верификации кода проводит технологический партнёр – компания "Научный Инжиниринг"



Свидетельство в Роспатенте
№ 2022663085



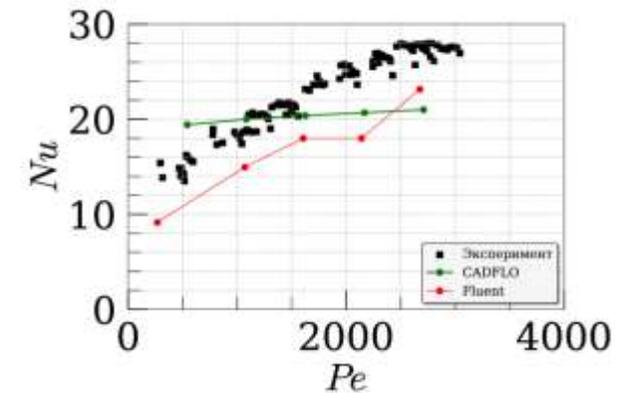
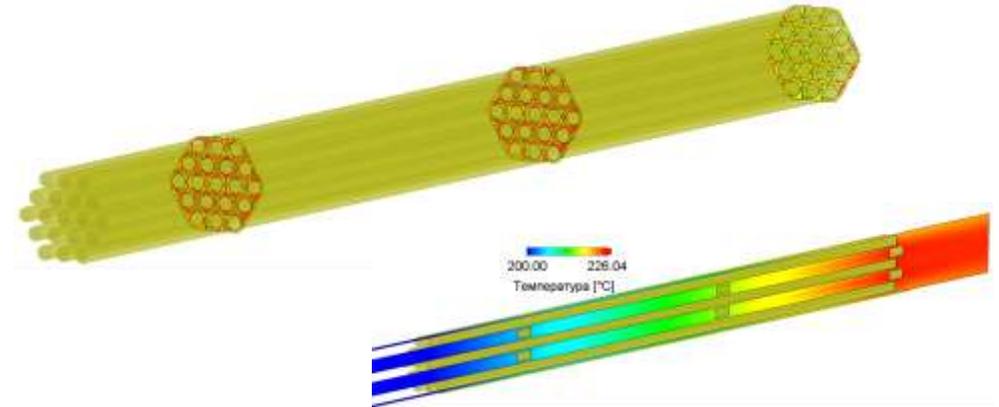
В реестре Российского ПО
№ 15125



Член АРПП
«Отечественный СОФТ»

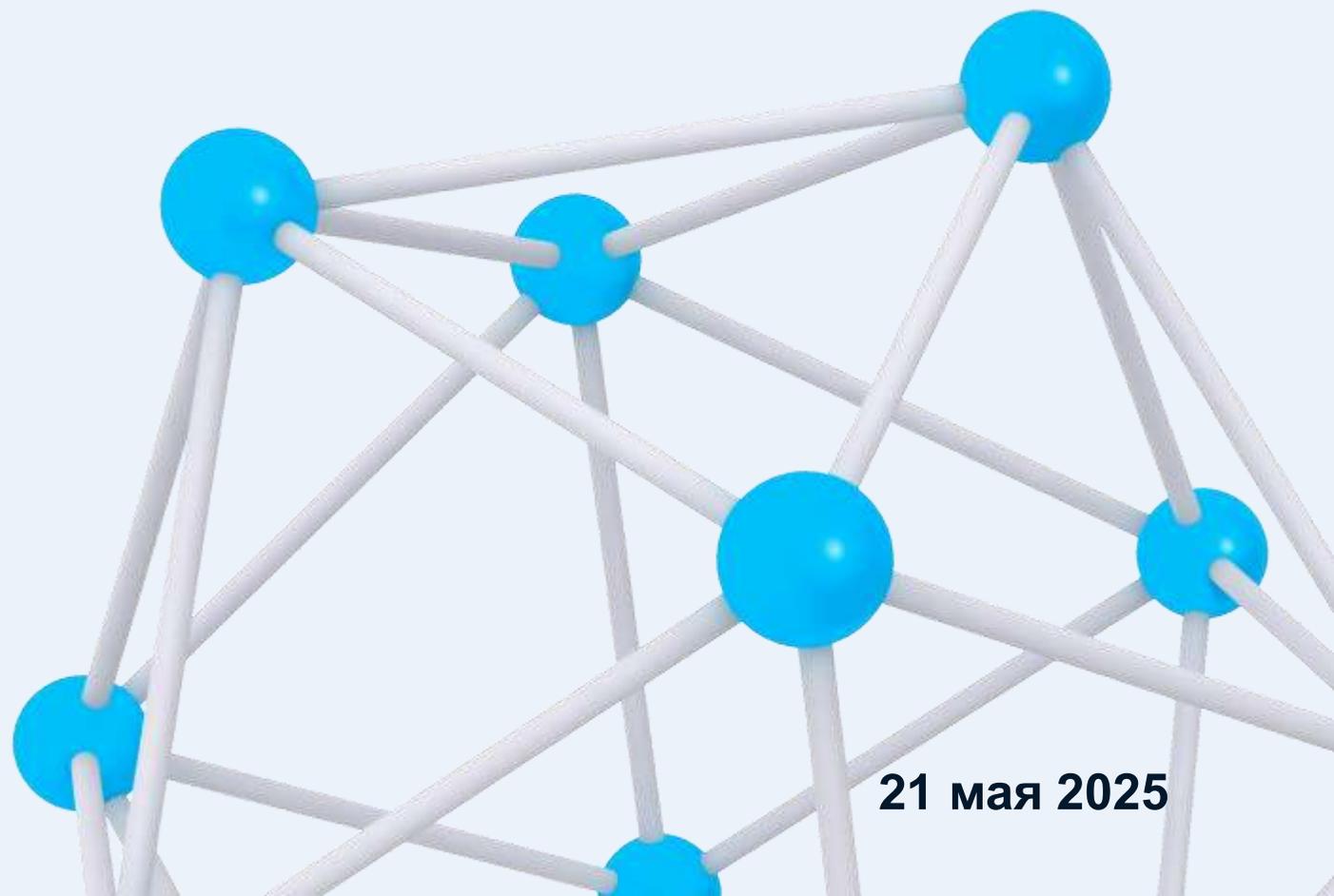
МАТРИЦА ВЕРИФИКАЦИИ:

- 1 Турбулентное течение в канале круглого сечения
 - 1.1 Гладкая труба
 - 1.2 Труба с равномерной шероховатостью
- 2 Турбулентное течение в канале круглого сечения с гибом 180°
- 3 Турбулентное течение в канале квадратного сечения с гибом 180°
- 4 Турбулентное течение в переходном канале “круг-прямоугольник”
- 5 Течение в круглом канале с внезапным расширением
- 6 Турбулентное течение с отрывом в несимметричном диффузоре
- 7 Турбулентное течение за обратным уступом
- 8 Взаимодействие струи круглого сечения со стенкой
- 9 Теплопроводность в цилиндрической оболочке с граничными условиями первого рода
- 10 Теплопроводность в цилиндрической оболочке с граничными условиями второго рода
- 11 Теплопроводность в толстостенной цилиндрической оболочке с внутренним источником тепла
- 12 Гидродинамика и теплообмен в потоке натриевого теплоносителя в пучке обогреваемых стержней (эксперимент TEGENA)
- 13 Моделирование гидродинамики и теплообмена в кольцевом зазоре при наличии обогреваемого стержня
- 14 Гидродинамика и теплообмен в пучках стержней с дистанционирующими решетками, омываемого жидкометаллическим теплоносителем
- 15 Гидравлическое сопротивление и массоперенос в модели ТВС с оребренными твэлами



Спасибо за внимание

+ | ТІ Интеграция



21 мая 2025