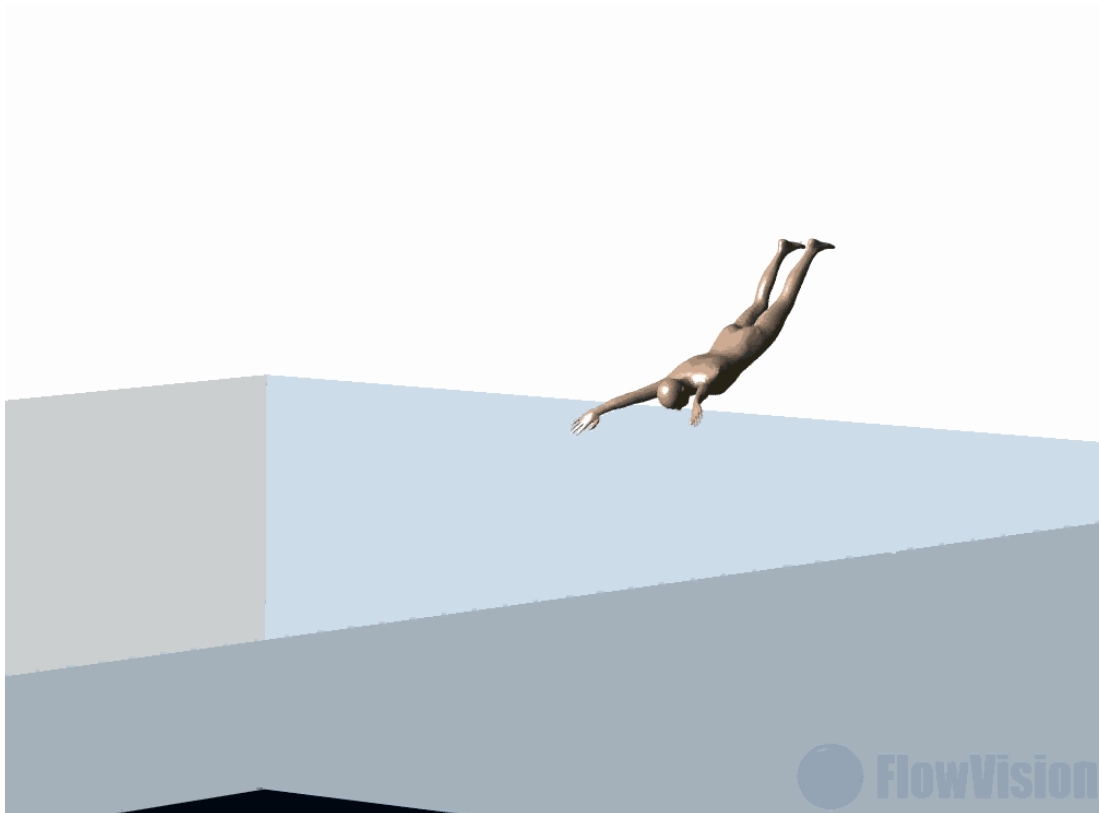


---

**Программный комплекс FlowVision как  
междисциплинарная платформа вычислительной механики**

---



**“Что нельзя рассчитать,  
невозможно построить”**  
*Исповедь ракетчика*

к.ф.-м.н. Андрей Александрович Аксенов  
Технический директор ООО ТЕСИС

## Что такое CAE-система

---

**CAE – Computer Aided Design, система автоматизации инженерных расчетов.**

**В машиностроении наиболее распространены CAE системы, предназначенные для:**

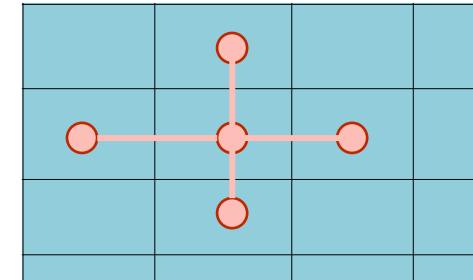
- **решения задач механики сплошной среды (МСС),**
- **кинематика и динамика многих тел,**
- **оптимизации различных процессов.**

## Метод сеток – основа CAE-систем

---

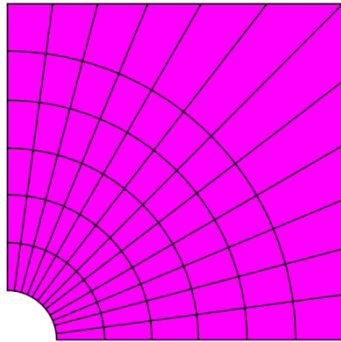
### Метод сеток:

- **Генерация сетки:** Расчетная область разбивается на огромное количество ячеек или точек (от  $10^3$  до  $10^9$ )
- **Аппроксимация:** В каждой ячейке (точке) уравнение жидкости линейризуется и аппроксимируется численной схемой. Получаем от  $10^3$  до  $10^9$  алгебраических уравнений
- **Решатель:** Решаем разными методами – от явных до прямых и итерационных неявных методов

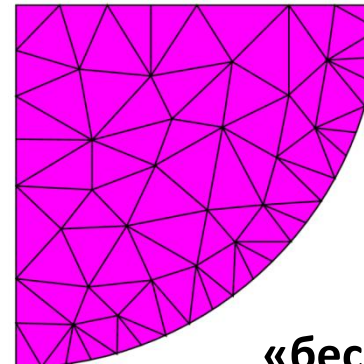


## Виды расчетных сеток

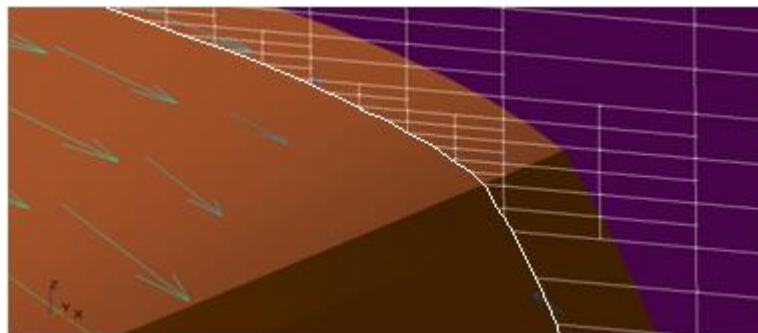
криволинейные сетки,  
строятся вручную



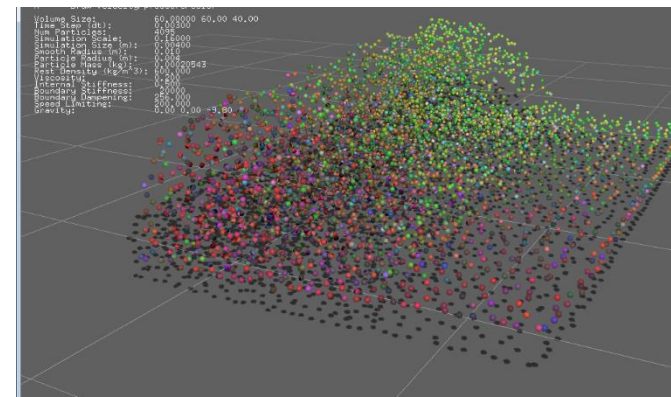
Тетраэдрические сетки и гекса-  
доминантные - автомат



В начале прямоугольная сетка, cut-  
cell метод - автомат



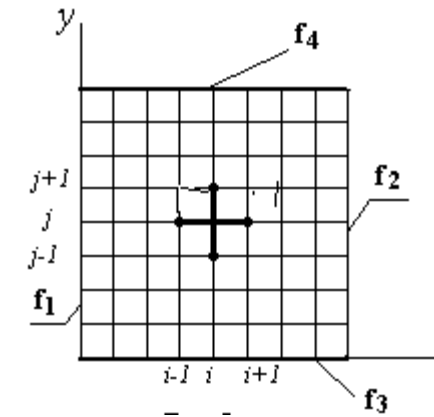
«бессеточные методы» - набор  
точек которые неподвижны  
(LBM) или движутся (SPH, DEM)



# Методы аппроксимаций уравнений

## 1. Конечно-разностные схемы – подтип «Конечно-объемные»

Вводятся конечные разности для уравнений. Если уравнение записано в дивергентном то аппроксимации потоков на сторонах ячеек



## 2. Спектральные – подтип «Конечные элементы»

Вводятся в ячейках-элементах базовые функции, по которым раскладываются искомые функции. Для амплитуд базовых функций ищется решение.

**Но в итоге получаем матрицу задачи, которая «не помнит» метод аппроксимации.**

$$A_{ij} * f_j = Q_i$$

**Матричное уравнение решаем либо явными, либо неявными методами**

## 1. SPH – smooth particle hydrodynamics

Проблема – какую функцию взаимодействия частиц выбрать?

## 2. LBM – Lattice Boltzmann Method

Проблема – низкий порядок аппроксимации, плохая аппроксимация стенок, разрешения погранслоев, мгновенная передача взаимодействия в несжимаемой жидкости невозможна

## 3. DEM - Discrete element method

Проблема – значительные численные затраты на обработку контактов частиц.

Классика  
КО, КЭ



?



Модерн  
SPH,  
LBM,  
DEV...

## 1. Многодисциплинарность

Решения типа FSI разных кодов – уже прошлое. Вся физика – в одном флаконе!

## 2. Простота использования

CAE используют инженеры-расчетчики, но этот процесс плавно переходит к конструкторам

## 3. Шаблоны расчетных проектов CAE и автоматизация расчетов

Два узких места – расчетная сетка и расчетчик. Необходимо создавать методики расчетов, сохранять их как шаблоны расчетных проектов и на базе них автоматизировать процесс решения задач.

## 4. Интеграция CAE в PLM

Весь мир идет к единым информационным системам.

## 5. Создание САПР (не CAD!!!)

Решение обратных задач (САПР) на базе параметрической и топологической оптимизаций

## 6. Использование AI

AI не будет «рисовать» результаты, потому что AI – интерполятор, а CAE – экстраполятор, предсказатель.

Но AI будет использоваться для

- 1) Генерация расчетных проектов
- 2) Помощь в визуализации расчетных данных
- 3) Помощь в нахождении оптимальных конструкторских решений
- 4) Лечение и упрощение геометрии для быстрого создания расчетных проектов

AI должна убрать рутинные функции расчетчика



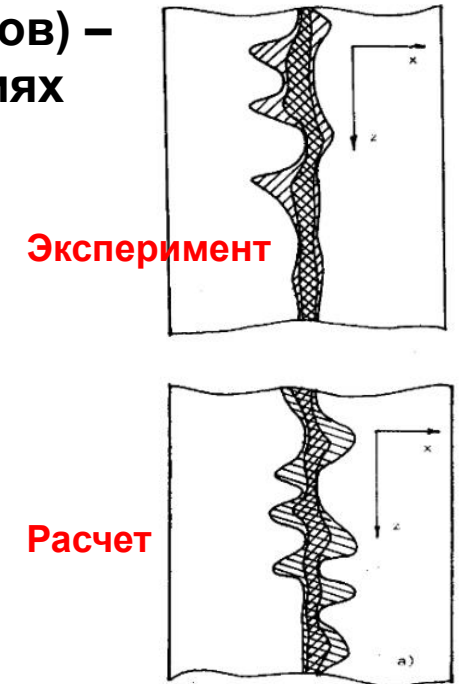
# FlowVision

Мы делаем междисциплинарную CAE систему будущего



## FlowVision – история

- Первые работы (для НПО Энергии, руководитель – космонавт А.А. Серебров) – исследование гидродинамики установок для производства белка в условиях невесомости, МФТИ. <sup>1)</sup>
- Начало разработки FlowVision 1.0 – ИАП РАН, 1991г.
- 1999 года – коммерциализация разработки в компании ТЕСИС. <sup>2)</sup>
- 2010 Создана совместная лаборатория ОИВТ РАН -МФТИ-ТЕСИС
- Ядро команды - научная школа академика О.М.Белоцерковского и академика Э.Е.Сона
- Разработчики - выпускники МФТИ (ФАКИ, ФУПМ, ФОПФ) , МГУ (ВМК, Мехмат), МАИ, МГТУ им. Баумана, МИФИ, НГУ



*ЭГД неустойчивость струйки биопрепарата*

- <sup>1)</sup> Aksenov A.A., Gudzovsky A.V., Serebrov A.A. Electrohydrodynamic instability of fluid jet in microgravity// Proc. of 5th Int. Symp. on Computational Fluid Dynamics (ISCFD), Aug. 31 - Sept. 3 1993, Sendai, Japan. Japan Society of Computational Fluid Dynamics, Vol. 1, P. 19-24.
- <sup>2)</sup> A. Aksenov, A. Dyadkin, V. Pokhilko. Overcoming of barrier between CAD and CFD by modified finite volume method. Proc. 1998 ASME Pressure Vessels and Piping Division Conference, San Diego, ASME PVP-Vol. 377-1

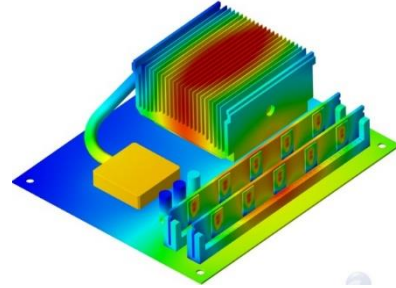
- FlowVision – 100% российский код, успешно конкурирующий с такими гигантами систем автоматизированного инжиниринга, как Fluent и CFX(ANSYS), StarCCM+ (Siemens).
- Поддержка российских ОС – AltLinux, RedOS, AstraLinux
- Поддержка процессора Эльбрус
- Используется 20 лет на предприятиях Роскосмоса, Росатома, КТРВ, Ростеха, а также в компаниях Европы, США, Китая и Тайваня, Южной Кореи

# Решаемые задачи - промышленность, медицина, спорт

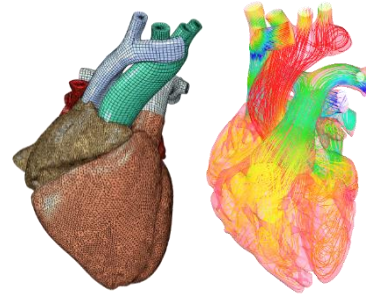
Авиастроение



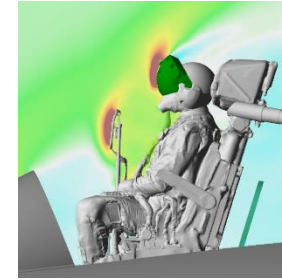
Электроника



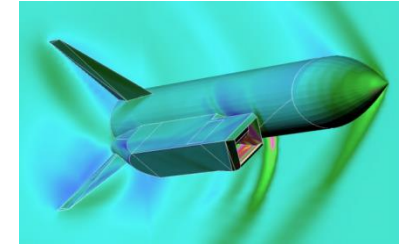
Медицина



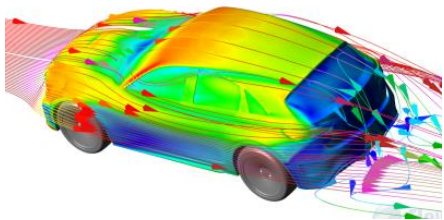
Спец.изделия



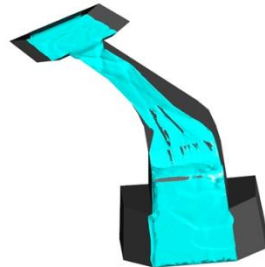
Ракетостроение



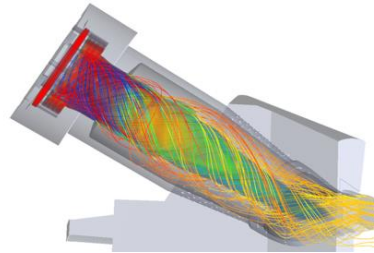
Автомобилестроение



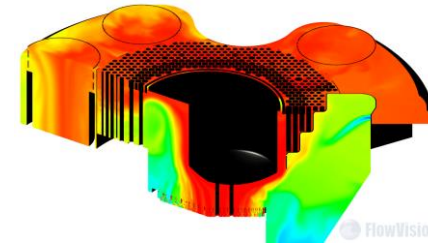
Промтехбезопасность



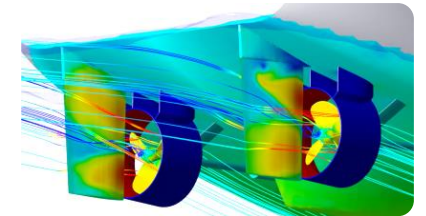
Энергетика



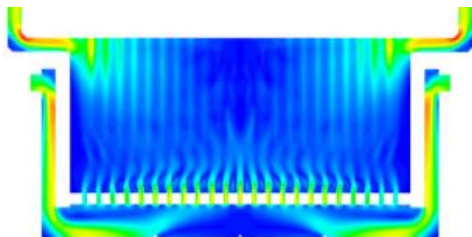
Атомная энергетика



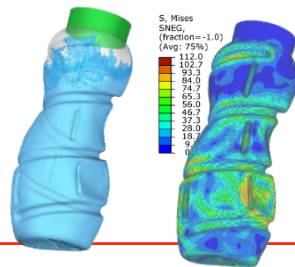
Судостроение



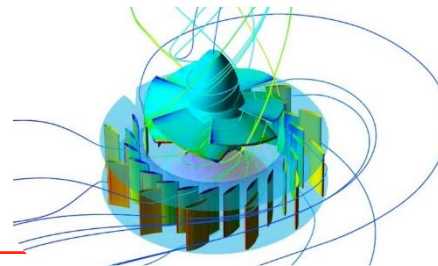
Вентиляция



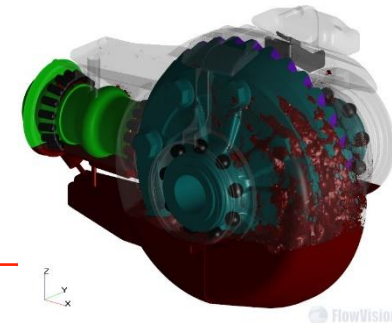
FSI



Турбомашиностроение



Детали машин



Спорт



## Платформа численного междисциплинарного моделирования

---

- CFD – расчет уравнений движений жидкости и газа с учетом
  - Уравнения Навье-Стокса, Дарси, скоро – Эйлера.
  - Химреакции/Горение
  - Турбулентности
  - Перенос дисперсных частиц, спектр частиц по диаметру
  - Пористые среды
  - Свободной поверхности
- Лучистый теплообмен (P1, MDO, спектр излучения)
- Электрические и магнитные поля
- Динамика твердых тел
- Акустическая модель
- Динамика деформируемых тел
  - FSI: Взаимодействие течения и конструкции с помощью SIMULIA Abaqus, MSC Nastran, Win.Machine, Fidesys

Имеет развитые сервисы поддержки пользователей

---

- **Внедрение и консалтинг**
  - Выполнение проектов на заказ
  - Разработка методик моделирования для решения типовых задач клиента
  
- **Обучение**
  - Полезные статьи и how to
  - Базовое и индивидуальное обучение
  
- **Техподдержка**
  - Помощь в решении проблем, исправление ошибок, помощь с документацией
  - Обновление программы. Версии – 1-2 раза в год

## Клиент-серверная архитектура

- Пользователь работает на своем родном ноутбуке
- Считает где-то на удаленной мощной машине



Управление расчетным проектом

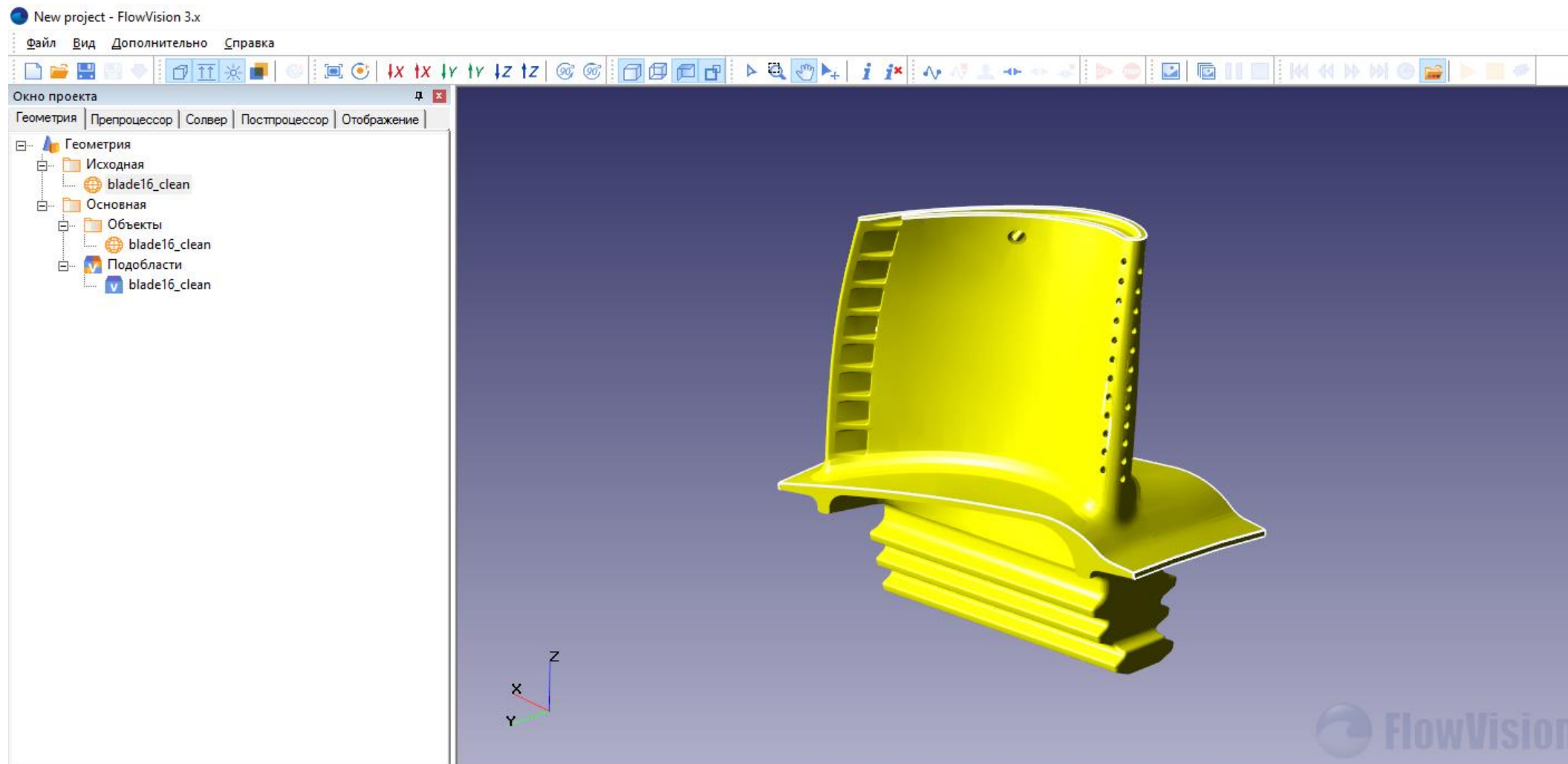
Передача графических метаданных

- Визуализирует там же
- Причем смотреть результаты можно с коллегами, начальниками и заказчиками на разных компьютерах



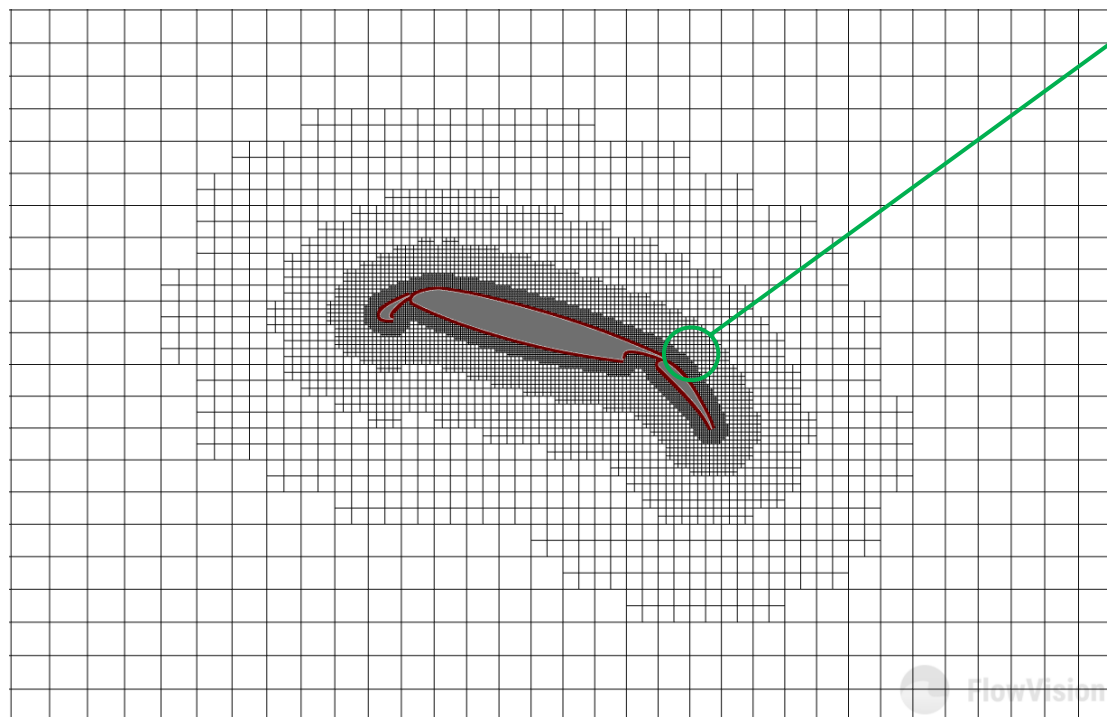


## Импорт геометрии из CAD



## Адаптация сетки и разрешение пограничного слоя

- Полное решение всех уравнений основной сетки
- Наложенная сетка (пока, работаем над встраиваемой)
- $Y^+ \leq 1$



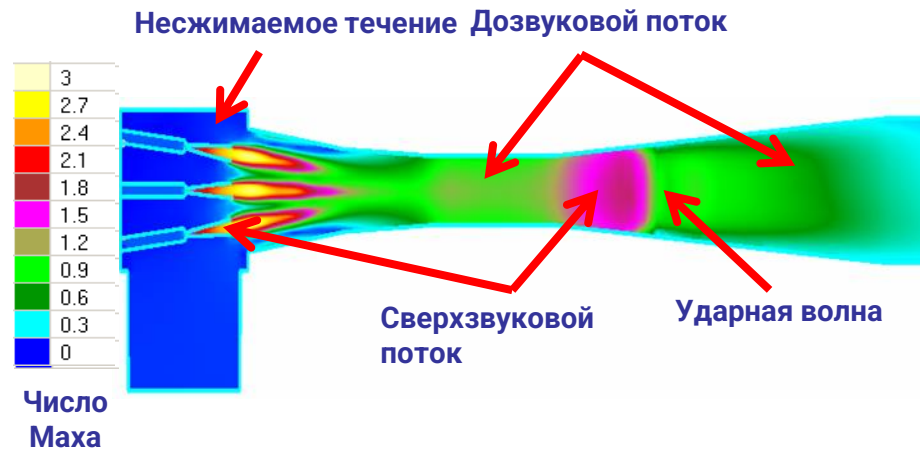


# Все-Маховый решатель уравнений Навье-Стокса

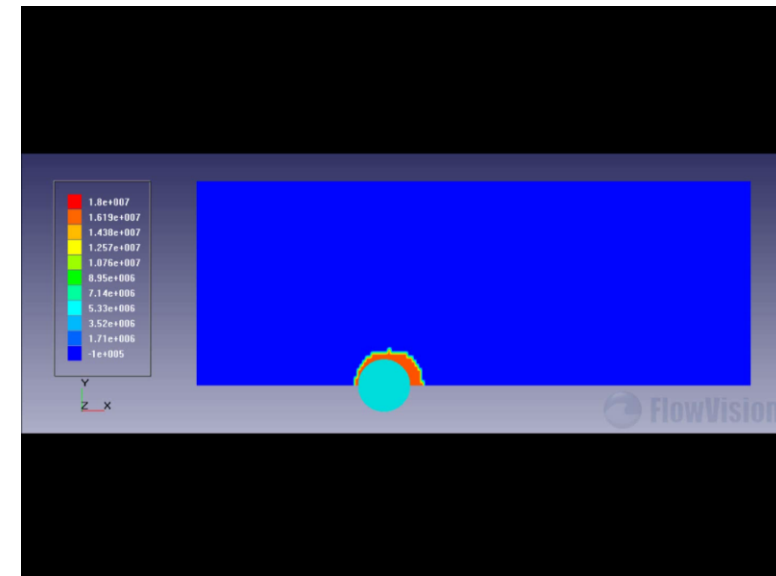
- В расчетной области может быть несжимаемой и сверх- гиперзвуковой течение одновременно.
- Неявный метод решения – CFL>1



Гиперзвуковое обтекание цилиндра при  $M=15$   
Шаг по времени: конвективный CFL =10. Сетка:  
200x50



Течение в паровоздушном эжекторе



## Методы решения уравнений Навье-Стокса

---

- Имеется два подхода для расчета Н-С:
  - В переменных скорость – давление
  - В переменных скорость – плотность
- В переменных скорость – плотность невозможно считать несжимаемые течения => используем только плотность-давление
- Расщепление по физическим переменным (p-v) для несжимаемых течений ->
  - Быстрый (один раз считает НС и один раз уравнение для P)
  - В явном варианте – точный (для несжимаемых течений)

## Классика метода расщепления

---

- Чорин (1969) - проекционный метод МАК, Белоцерковский, Гущин, Щенников (1975) – схема расщепления по физическим переменным, SIMPLE, PISO...
- Идея методов - введение уравнения для коррекции скорости, где  $\tilde{\mathbf{V}}$  - дополнительная переменная

$$(1) \quad \frac{\mathbf{V}^{n+1} - \tilde{\mathbf{V}}}{\tau} = -\frac{\nabla p^{n+1}}{\rho} + \frac{\nabla p^n}{\rho}$$

Уравнение Н-С записывается через старый градиент давления и скорость  $\tilde{\mathbf{V}}$

$$(2) \quad \frac{\tilde{\mathbf{V}} - \mathbf{V}^n}{\tau} + CD(\mathbf{W}_f^n, \mathbf{V}^n) = -\frac{\nabla p^n}{\rho}$$

Если сложить (1) и (2) получим уравнение Н-С, которые хотели рассчитать

$$\frac{\mathbf{V}^{n+1} - \mathbf{V}^n}{\tau} + CD(\mathbf{W}_f^n, \mathbf{V}^n) = -\frac{\nabla p^{n+1}}{\rho}$$

# Алгоритм решения Н-С методом расщепления

- Этап 1. Получение тильдованной скорости

$$\frac{\tilde{\mathbf{V}} - \mathbf{V}^n}{\tau} + CD(\mathbf{W}_f^n, \mathbf{V}^n) = -\frac{\nabla p^n}{\rho}$$

- Этап 2. Используя условие несжимаемости  $\nabla \mathbf{V}^{n+1} = 0$ , получим уравнение для давления из коррекции скорости

$$\frac{\nabla \tilde{\mathbf{V}}}{\tau} = -\frac{\Delta p^{n+1}}{\rho} + \frac{\Delta p^n}{\rho}$$

- Этап 3. Получим окончательную дивергентную скорость в центре ячейки и на ее гранях

Скорость в центре ячейки

$$\frac{\mathbf{V}_c^{n+1} - \tilde{\mathbf{V}}_c}{\tau} = -\frac{\nabla p^{n+1}}{\rho} \Big|_c + \frac{\nabla p^n}{\rho} \Big|_c$$

Скорость на грани ячейки

$$\frac{W_f^{n+1} - \tilde{\mathbf{V}}_f}{\tau} = -\frac{\nabla p^{n+1}}{\rho} \Big|_f + \frac{\nabla p^n}{\rho} \Big|_f$$

## «передний привод» для сжимаемого реального газа

**Адиабатическая  
сжимаемость**

$$\frac{d\rho}{dp} = \left. \frac{\partial \rho}{\partial p} \right|_T + \frac{1}{\rho^n C_p} \left. \frac{\partial \rho}{\partial T} \right|_p$$

**давление**

$$\frac{d\rho}{dp} \frac{p_c^{n+1} - p_c^n}{\tau} + \nabla(p_c^{n+1} \frac{d\rho}{dp} \mathbf{V}_c^n) = \tau(\Delta p^{n+1} - \Delta p^n) - \nabla(\rho_c^n \mathbf{V}_c^n) - \nabla(p_c^n \frac{d\rho}{dp} \mathbf{V}_c^n)$$

**переносные  
скорости**

$$\mathbf{W}_f^{n+1} = -(\rho_c^n \mathbf{V}_c^n) - (p_c^{n+1} \frac{d\rho}{dp} \mathbf{V}_c^n) - \tau(\nabla_f p^{n+1} - \nabla_f p^n)$$

**плотность**

$$\rho^{n+1} = \rho^n + \frac{d\rho}{dp} (p^{n+1} - p^n)$$

**Энергия**

$$\frac{\rho^{n+1} H^{n+1} - \rho^n H^n}{\tau} + CD(\mathbf{W}_f^{n+1}, H^{n+1}) = \frac{p^{n+1} - p^n}{\tau}$$

**Н-С**

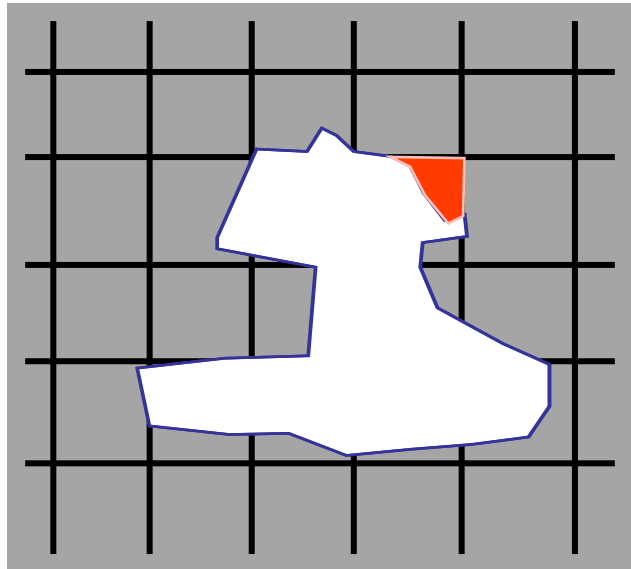
$$\rho_c^{n+1} \mathbf{V}_c^{n+1} - \rho_c^n \mathbf{V}_c^n + \tau CD(\mathbf{W}_f^{n+1}, \mathbf{V}_c^{n+1}) = -\tau 2 \nabla p^{n+1} + \tau \nabla p^n$$

**Определяем окончательную плотность и температуру**

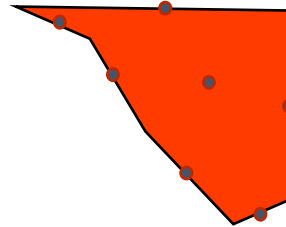
$$T^{n+1} = T(H^{n+1}, p^{n+1})$$

$$\rho^{n+1} = \rho(p^{n+1}, T^{n+1})$$

## Автоматический генератор сетки/Subgrid Geometry Resolution<sup>1)</sup>



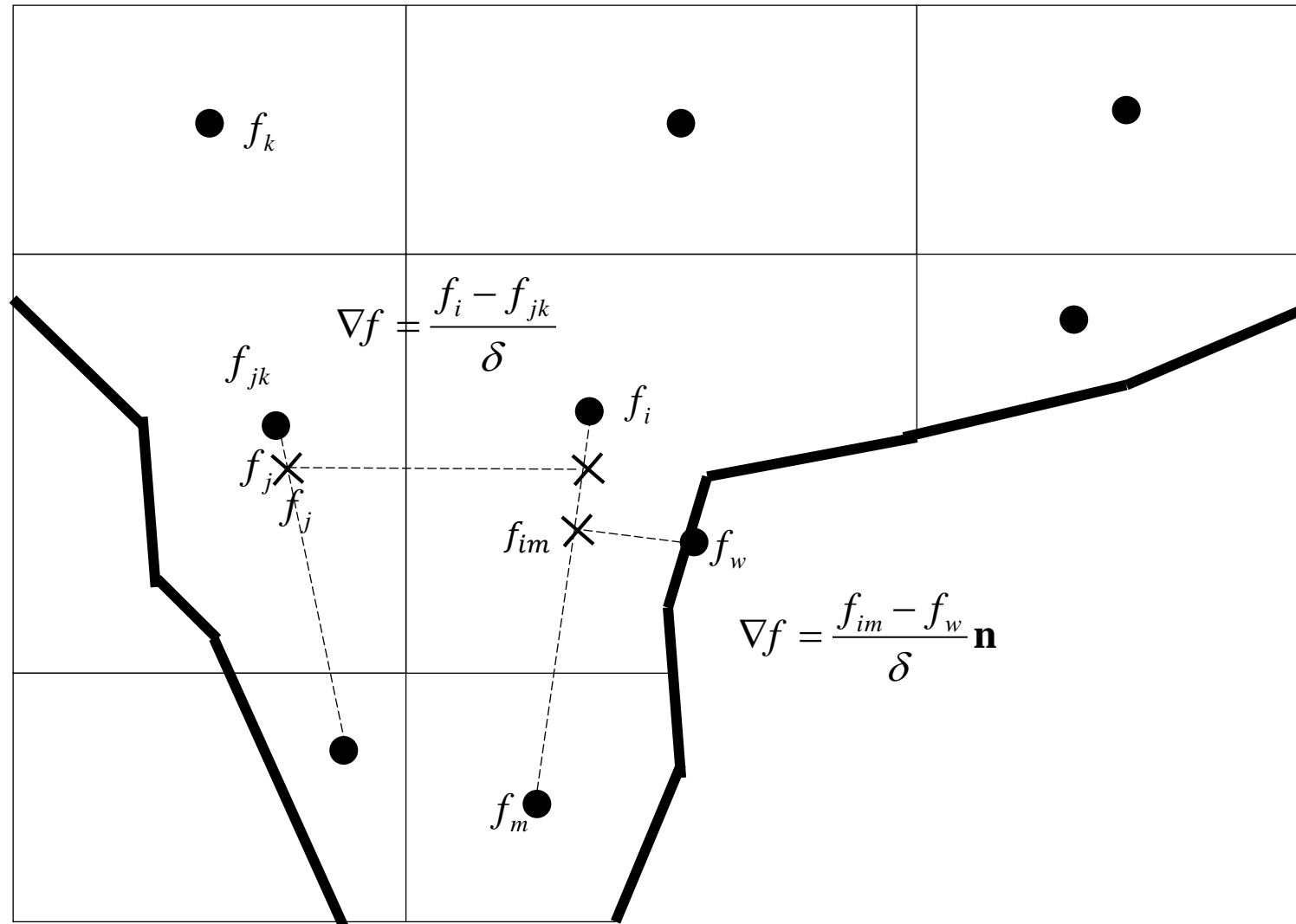
Конечно-объемная  
аппроксимация исходных  
уравнений



- Прямоугольная неоднородная расчетная сетка
- Поверхность импортируется в виде сеточных форматов (STL, WRL)
- Ячейка – произвольный многогранник
- Булево вычитание объема из начальной сетки

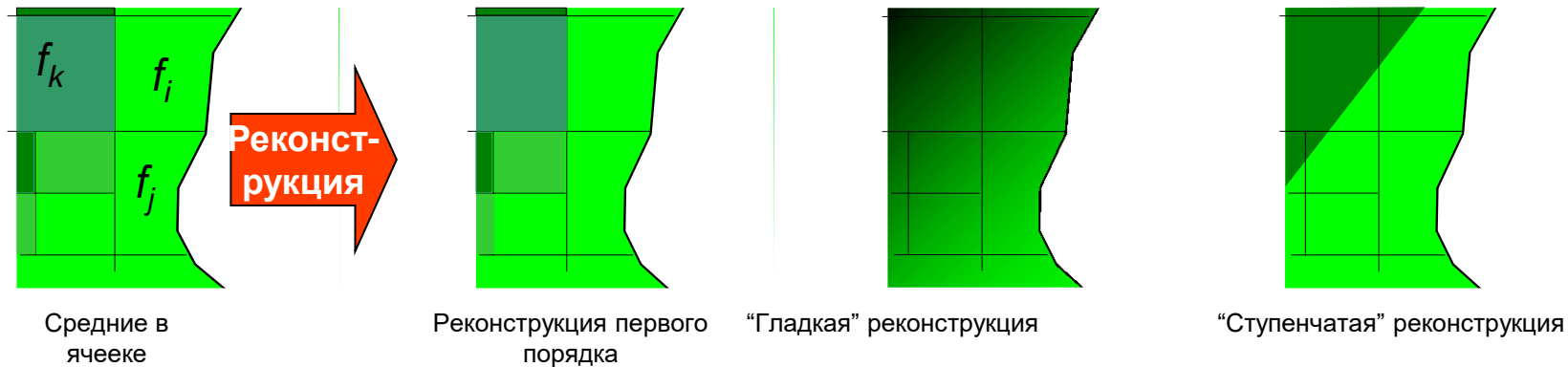
<sup>1)</sup> A. Aksenov, A. Dyadkin, V. Pokhilko. Overcoming of barrier between CAD and CFD by modified finite volume method. Proc. 1998 ASME Pressure Vessels and Piping Division Conference, San Diego, ASME PVP-Vol. 377-1

# Аппроксимация диффузионных потоков на границах ячейки



# Аппроксимация конвективных членов уравнений

Чтобы аппроксимировать уравнения, вводится реконструкция расчетных переменных внутри расчетных ячеек.

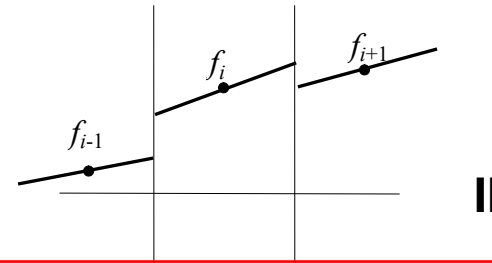
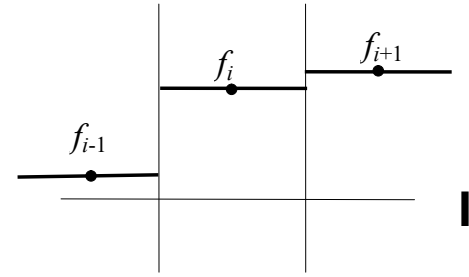


Переменные реконструируются в зависимости от типа уравнений и решения.

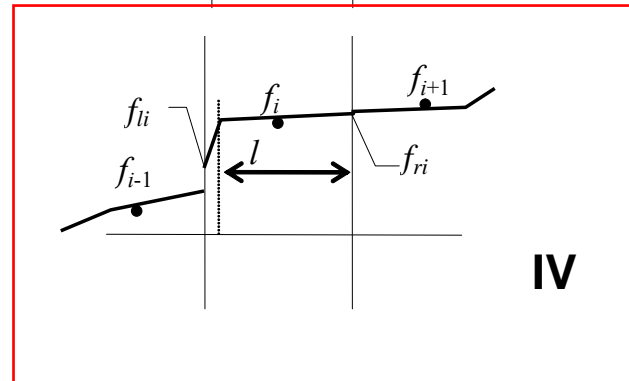
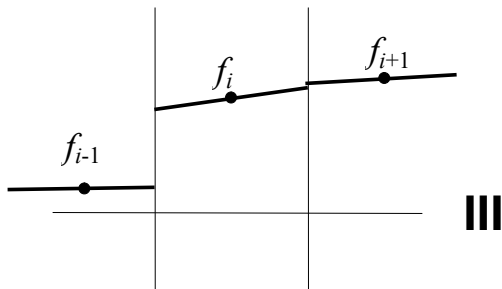
Интегрирование уравнений для реконструированных переменных по расчетным ячейкам дает конечно-объемную аппроксимацию этих уравнений



# Аппроксимация конвективных потоков на границах ячейки

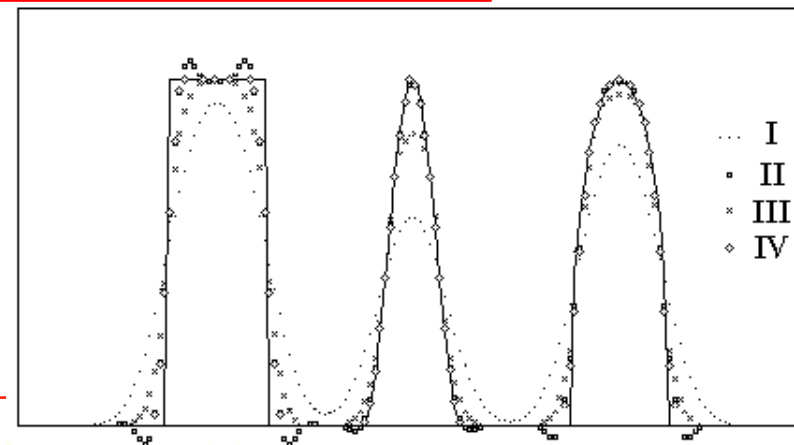


$$f_i^n = \frac{1}{\Omega_j} \int_{\Omega_j} f^n(\mathbf{r}) d\Omega$$

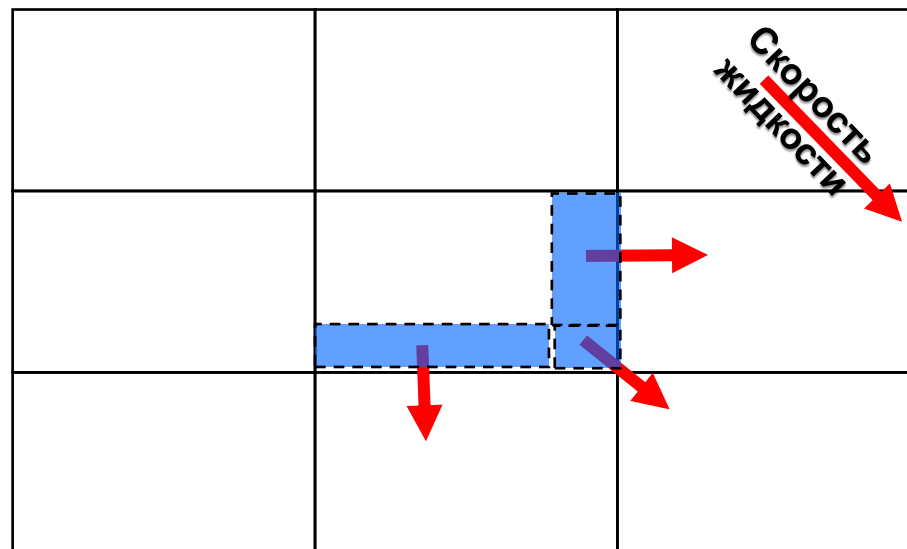


Линейная  
реконструкция с  
дополнительной  
точкой

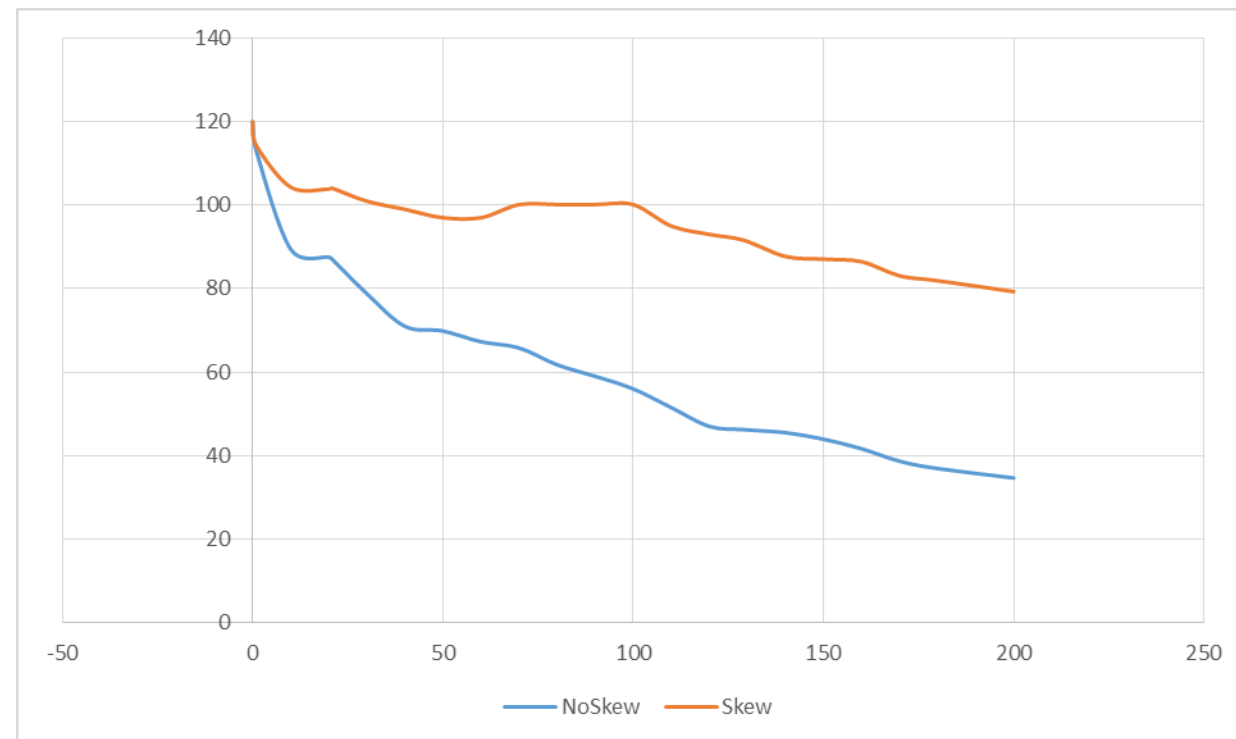
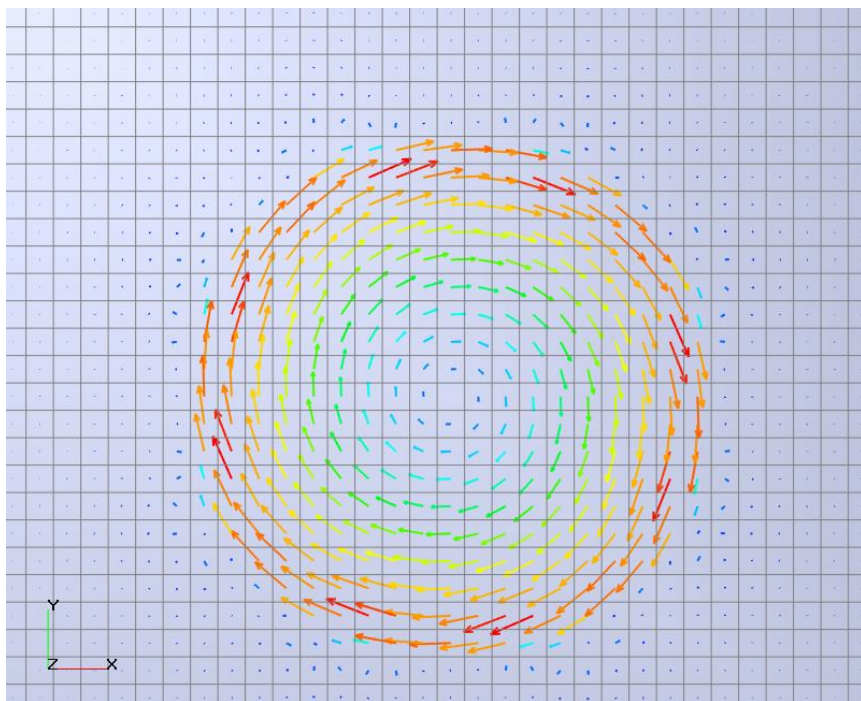
Расчет движения 3-х  
тестовых профилей I-IV  
(CFL=0.5, 120 шагов)



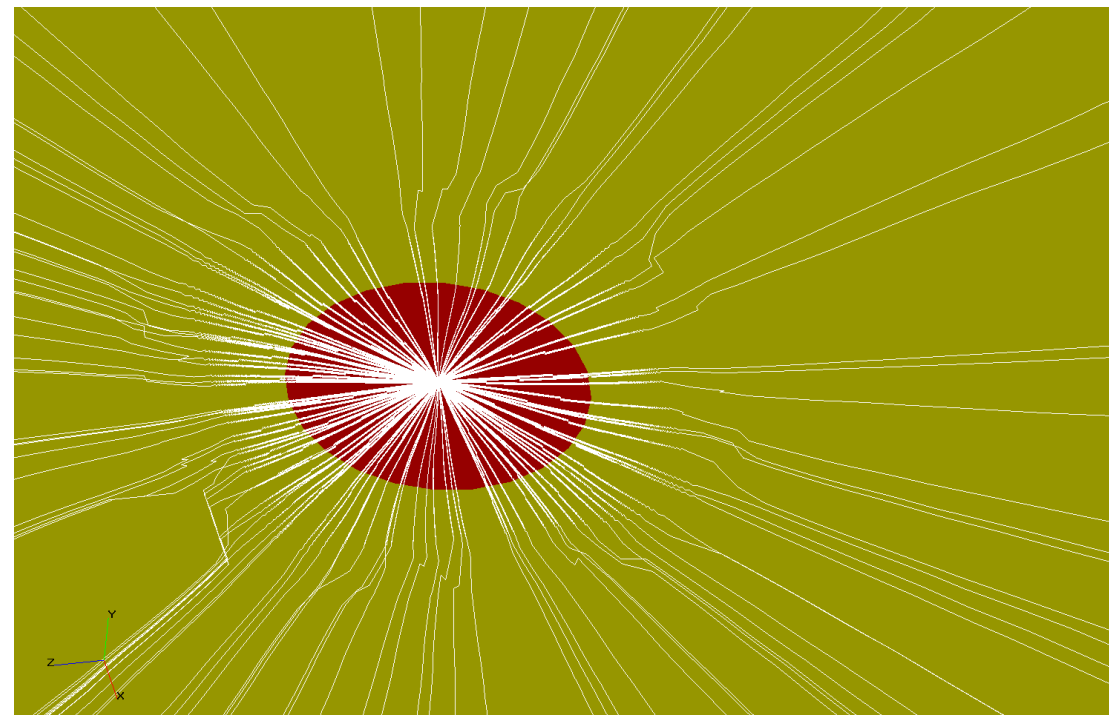
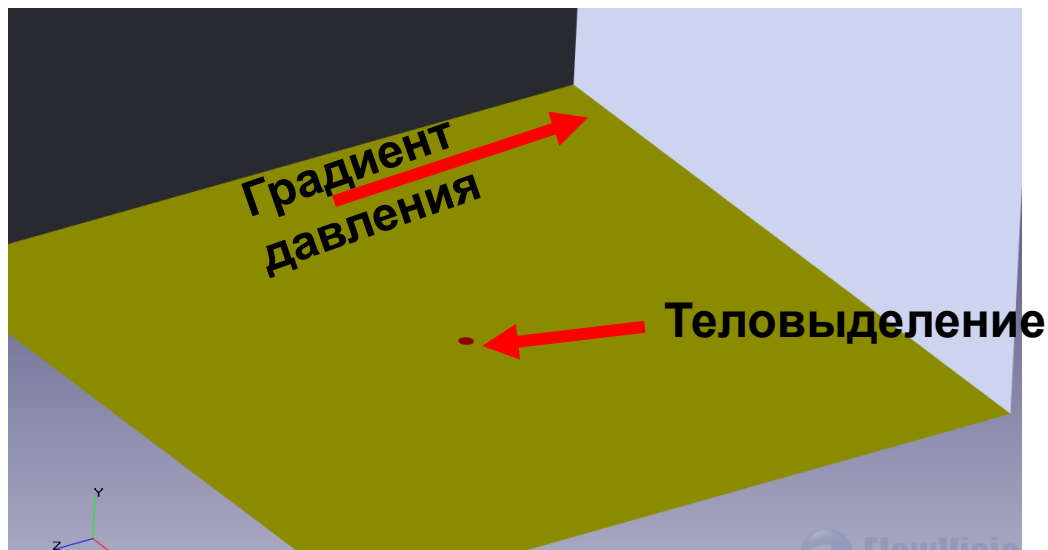
### Потоки в соседние ячейки для скошенной схемы



### Изменение максимальной завихренности от номера шага по времени

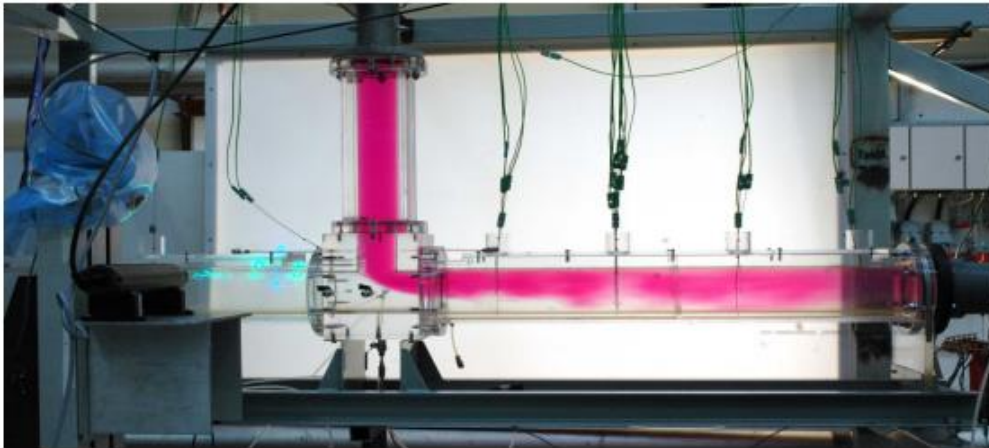


$$\frac{\partial \omega}{\partial t} + (v \cdot \nabla) \omega - (\omega \cdot \nabla) v + \omega(\nabla \cdot v) = \frac{1}{\rho^2} [\nabla \rho \times \nabla p]$$

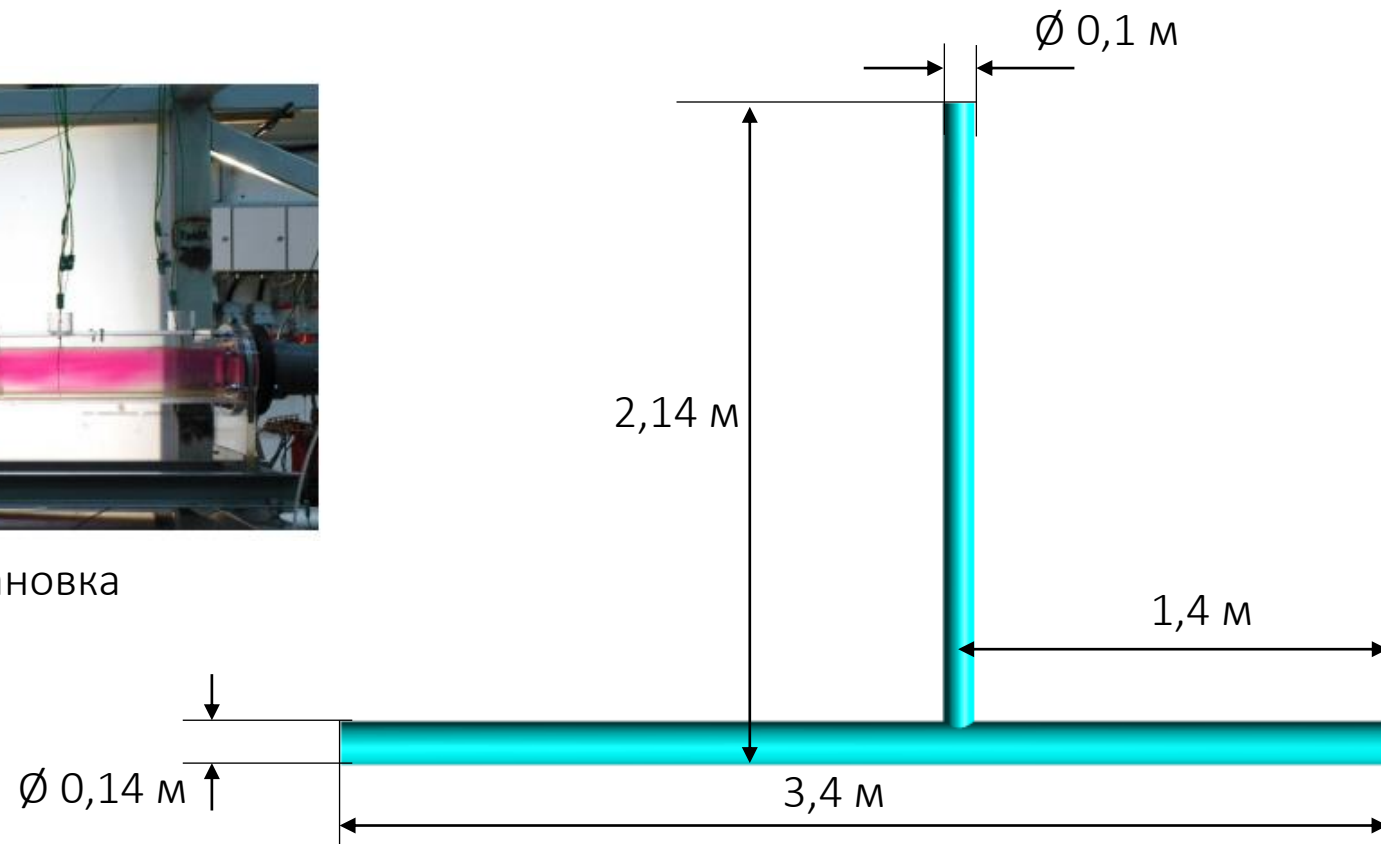


# Бенчмарк: перемешивание потоков в Т-образной трубе (Th. Frank , C. Lifante , M. Adlakha , H.-M. Prasser, F. Menter)

Моделируется задача смешивания разнотемпературных потоков воды в тройнике. В основе задачи лежит эксперимент, в литературе отмеченный как «Vattenfall T-Junction Test Facility».



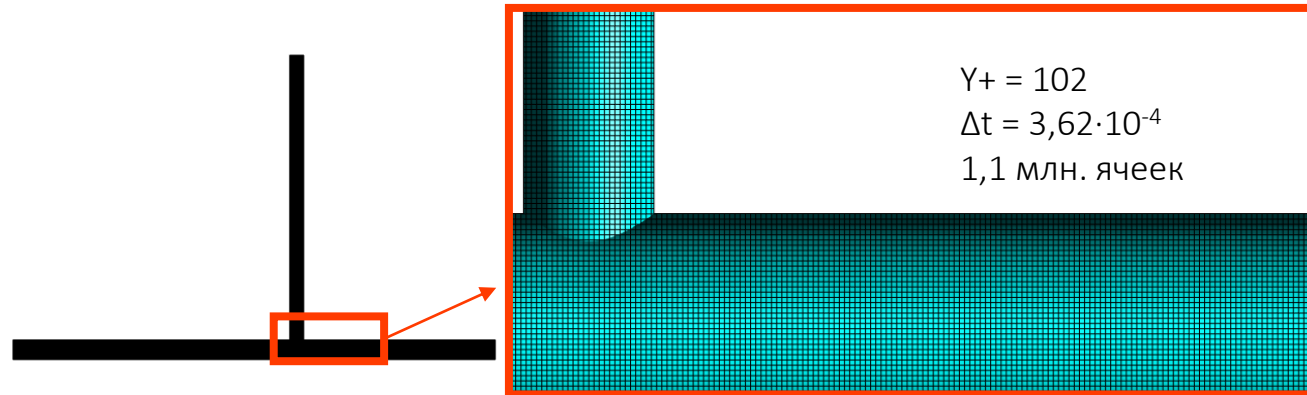
Экспериментальная установка



Геометрическая модель

# Расчетная сетка

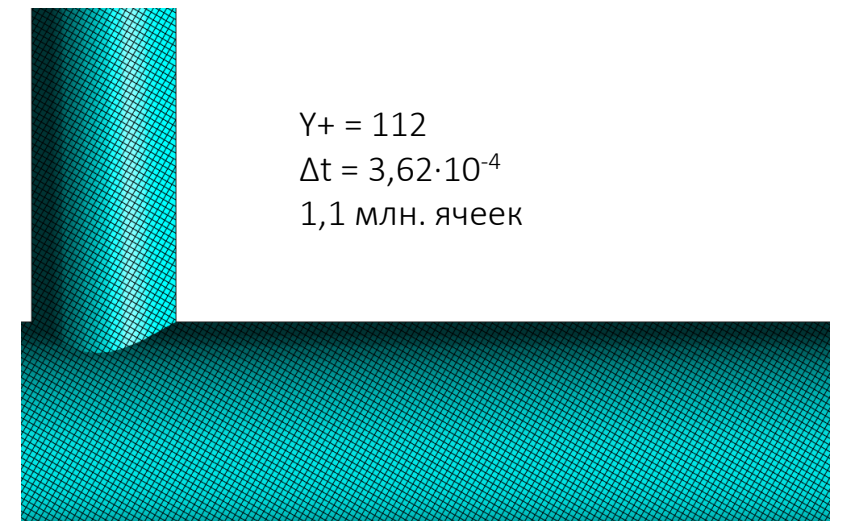
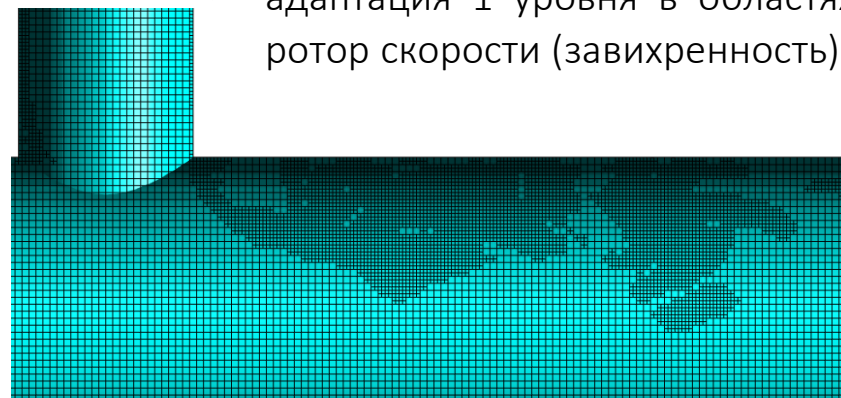
Mesh1 - равномерная сетка с размером ячейки  $h = 4$  мм



Mesh3 - равномерная сетка, диагональная по отношению к течению, с размером ячейки  $h = 4$  мм (дополнительно для этой сетки включена скошенная схема для вычисления конвективных потоков на гранях ячеек);

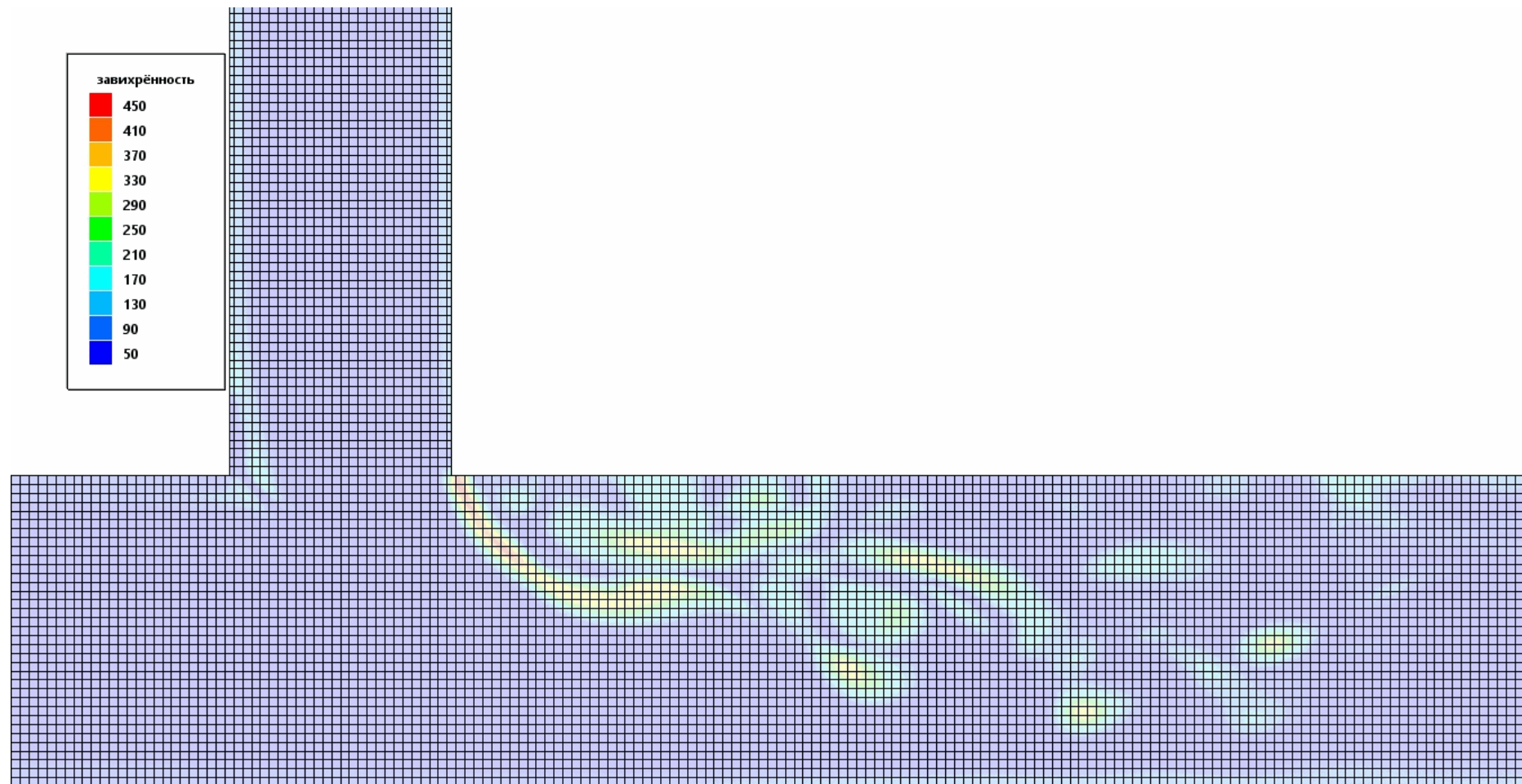
Mesh2 - равномерная сетка с размером ячейки  $h = 4$  мм с адаптацией по условию  $( ) h = 2$  мм – mesh2:

- адаптация 1 уровня в областях, где  $|\text{rot}\vec{V}| > 100$  – ротор скорости (завихренность)



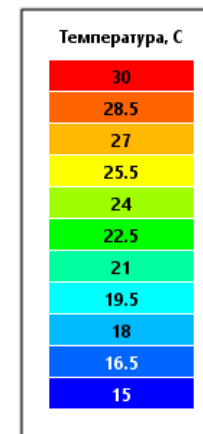
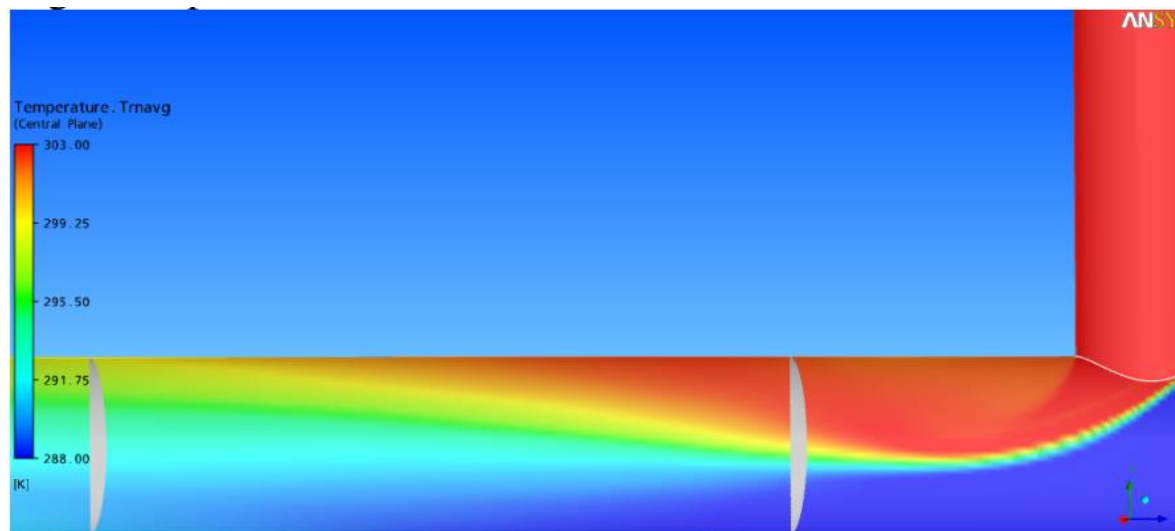


## Динамическая расчетная сетка (mesh2)

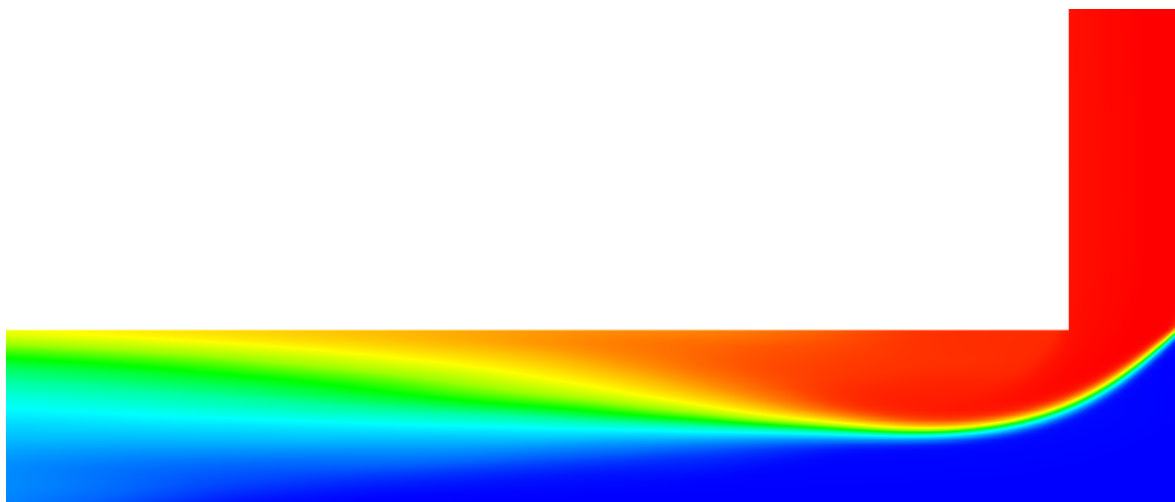


# Распределение осредненной по времени температуры (плоскость симметрии)

ANSYS

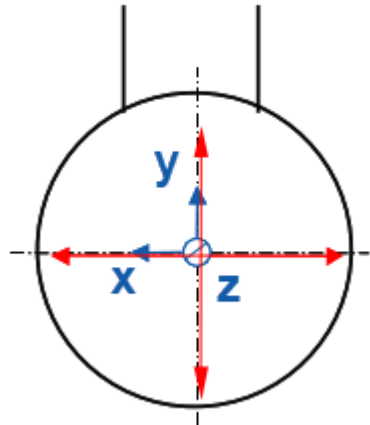


FlowVision





# Профиль осевой скорости ( $z = 2,6D$ )

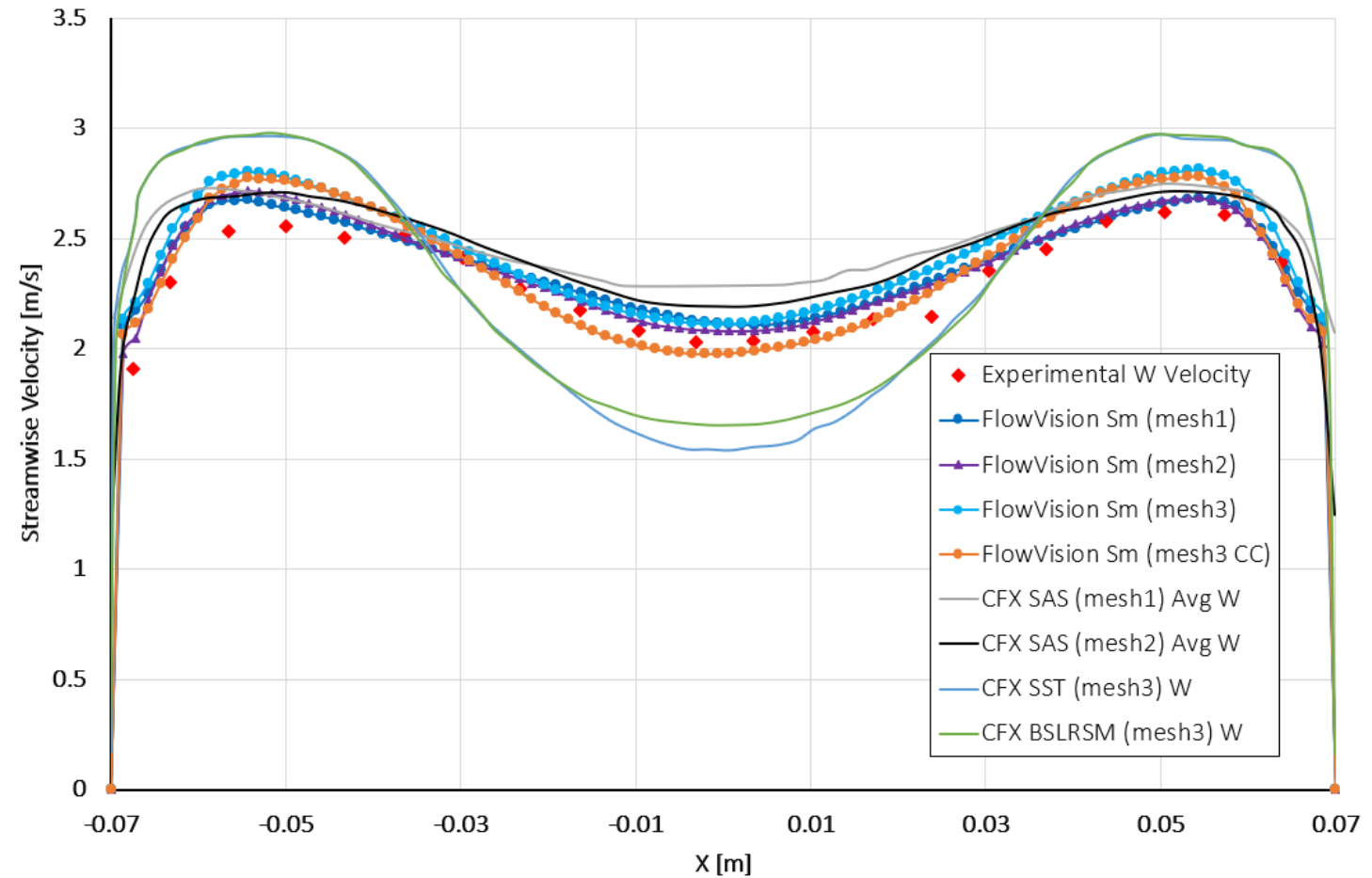


$\delta_{cp}(\text{mesh1}) = 3,5\%$   
 $\delta_{cp}(\text{mesh2}) = 3,2\%$   
 $\delta_{cp}(\text{mesh3}) = 5,9\%$   
 $\delta_{cp}(\text{mesh3 CC}) = 4,2\%$

$$\delta_{cp} = \frac{1}{N} \sum_N \frac{|V_{\text{эксп}} - V_{\text{FV}}|}{V_{\text{bulk}}} \cdot 100\%$$

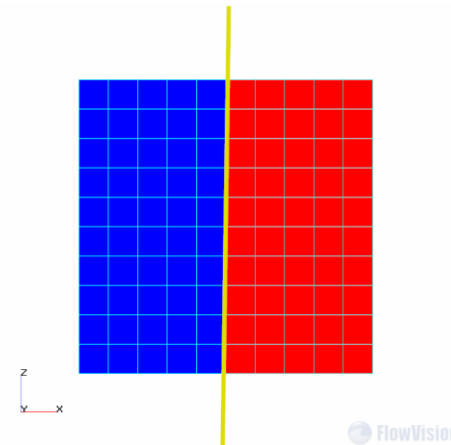
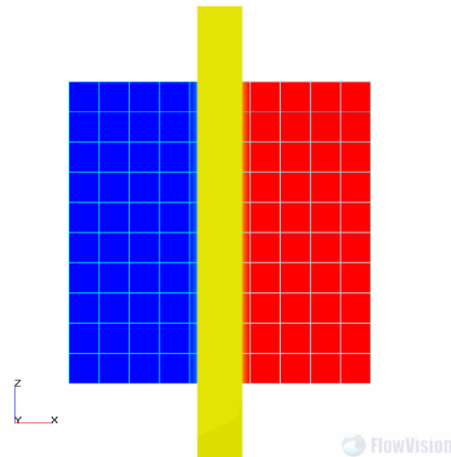
$$V_{\text{bulk}} = 2,34 \frac{\text{M}}{\text{C}}$$

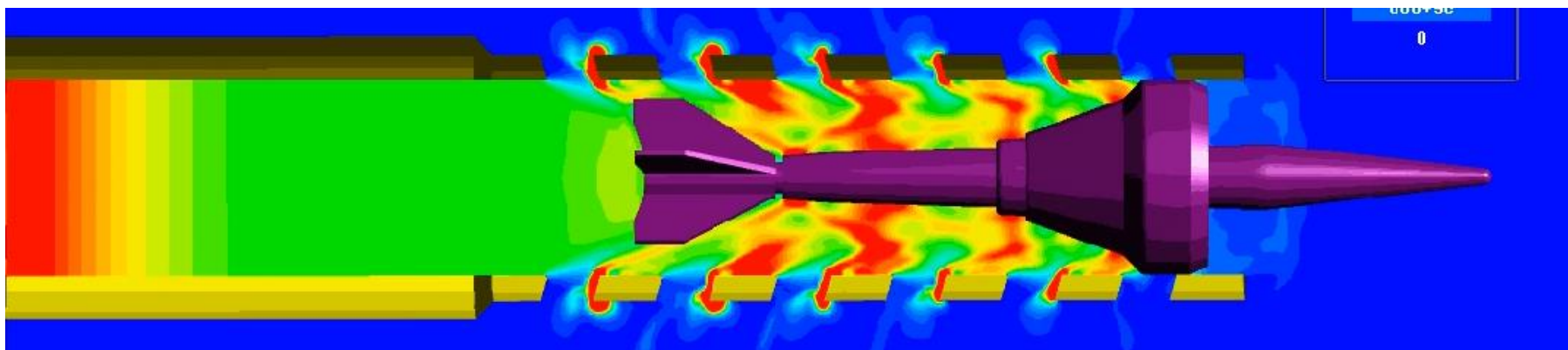
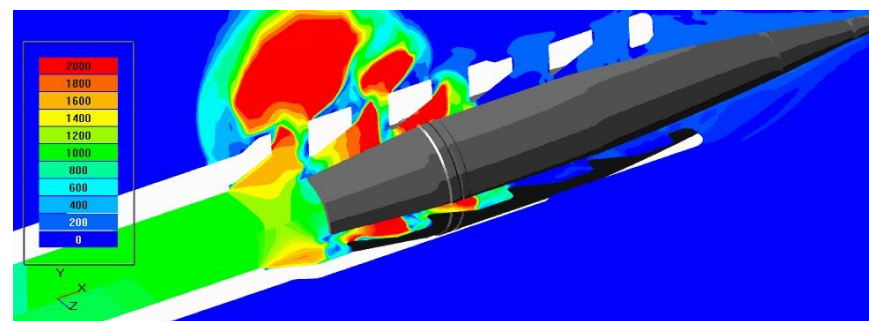
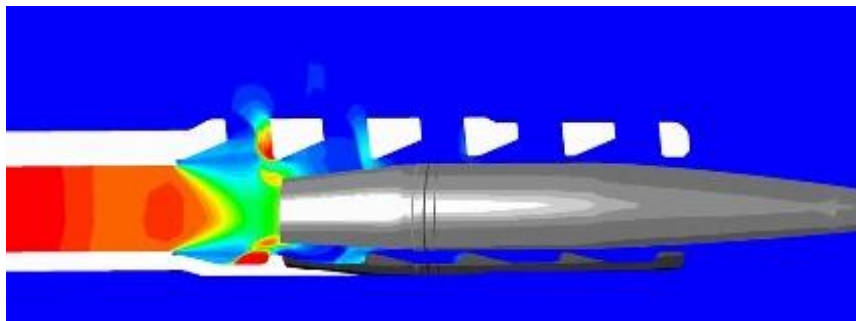
## Streamwise Velocity W



## Моделирование подвижных тел

- Эйлерав подход – сетка неподвижна
- Ячейки появляются, исчезают, меняют объем
- Ячейки заметаются телом, данные из под них передаются по направлению движения тела
- Передача данных из под тела происходит правильно даже в том случае, если тело тоньше ячейки!





## Вторая фаза: метод VOF

---

- Был предложен сотрудниками Лос-Аламосовской лаборатории (Hirt C.W., Nicholls B.D., Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries// J. Comput. Phys. 1981, 39, 201.)
- $f$  – объемная доля фазы (Volume of Fluid – VoF) в ячейке.
- Решение уравнения переноса для VoF:

$$\frac{\partial f}{\partial t} + V \nabla f = 0$$

- Помечаем «газовые» ( $f=0$ ) и «жидкостные» ячейки ( $f=1$ ).
- В ячейках где  $0 < f < 1$  проходит граница раздела – в оригинальном методе VOF значения экстраполируются и используются как ГУ для «жидкостных» ячеек.

## Проблемы метода VOF

### Разрешение тонких структур

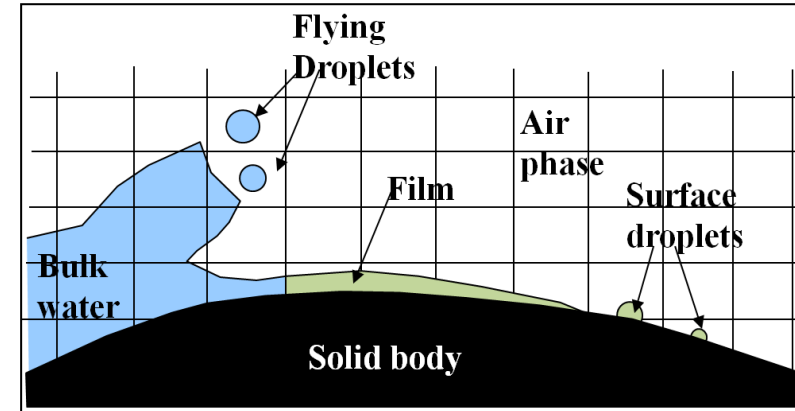
- Невозможно разрешить методом VOF капли, пузырьки газа, пленки, которые имеют размер меньше расчетной ячейки.

### Консервативность

- Хотя формально метод VOF считается консервативным, на самом деле он таковым не является. В результате расчета функция  $f$  из-за погрешностей расчетной схемы (схемная диффузия, дисперсия),  $f$  принимает нефизичные значения больше 1 или меньше 0, которые ограничиваются фильтром. При этом нарушается консервативность.

### Размазывание фронта

- Схемная диффузия приводит к «расплыванию» резкого фронта между двумя жидкостями на несколько расчетных ячеек. Применение схем с отрицательной схемной диффузией, или коррекция VOF приводят к нефизичным решениям.



# Маркировка ячеек

- При  $VoF < 0.01$  ячейка – газовая (GAS)
- При  $VoF > 0.99$  ячейка – жидкостная (FLUID)
- При  $0.01 < VoF < 0.99$  ячейка – поверхностная (SURF)

0	0	0	0	0	0
1	0	0	0.7	0.5	0
1	0.5	0	0	0	0
1	0.7	0.1	0	0	0.01
1	1	1	0.1	0	0.03
1	0.5	1	0.5	0.3	0.3
1	1	1	1	0.7	0.5

Белые ячейки – FLUID,  
 зеленые – GAS, синие – SURF

0	0	0	0	0	0
1	0	0	0.7	0.5	0
1	0.5	0	0	0	0
1	0.7	0.1	0	0	0.01
1	1	1	0.1	0	0.03
1	0.5	1	0.5	0.3	0.3
1	1	1	1	0.7	0.5

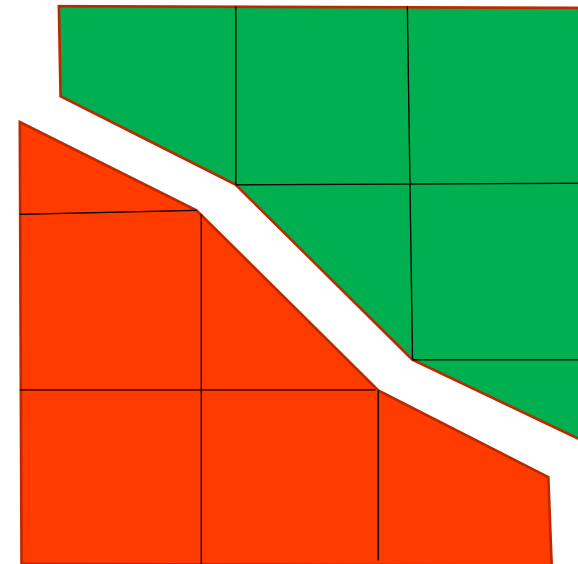
Красные ячейки – BUBBLE,  
 Желтые – DROPLET

## Реконструкция границы раздела и генерация сетки

- Определяются весовые коэффициенты площади сторон ячейки с учетом значений VOF у нее и у ее «соседей»
- Определяется нормаль свободной поверхности из теоремы Гаусса (проекция вектор-площади на любую плоскость равна нулю)
- Определяется центр свободной поверхности.



Реконструкция



Генерация сетки

# Граничные условия на свободной поверхности

Естественные ГУ на границе

- непрерывность поля давления
- кинематическое ГУ)
- равенство сил трения

$$P_1|_{\Gamma_+} = P_2|_{\Gamma_-}$$

$$U_1|_{\Gamma_+} = U_2|_{\Gamma_-}$$

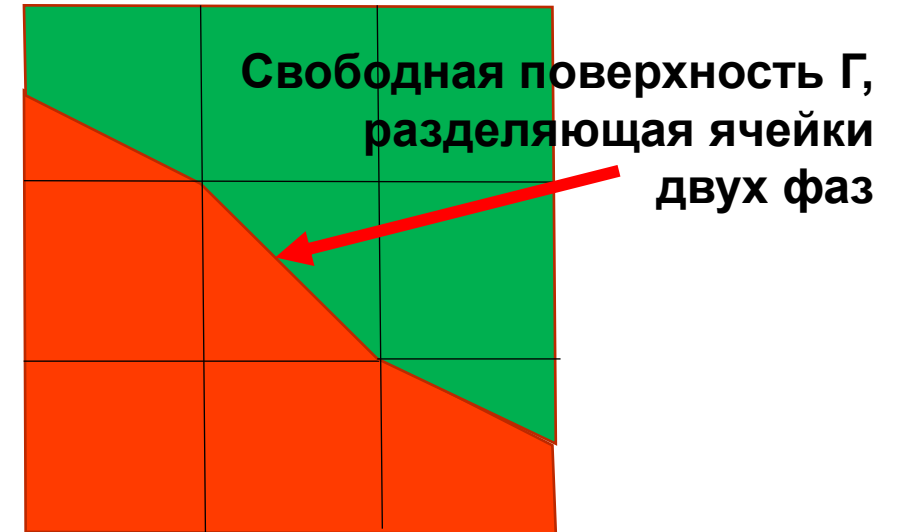
$$F_1|_{\Gamma_+} = -F_2|_{\Gamma_-}$$

Дополнительное ГУ

На границе из-за схемы расщепления

$$\frac{1}{\rho_1} \frac{dP_1}{dn} \Big|_{\Gamma_+} = \frac{1}{\rho_2} \frac{dP_2}{dn} \Big|_{\Gamma_-}$$

$$\frac{U_1 - \tilde{U}_1}{\tau} - \frac{1}{\rho_1} \frac{dP_1^{n+1}}{dn} \Big|_{\Gamma_+} + \frac{1}{\rho_1} \frac{dP_1^n}{dn} \Big|_{\Gamma_+} = \frac{U_2 - \tilde{U}_2}{\tau} - \frac{1}{\rho_2} \frac{dP_2^{n+1}}{dn} \Big|_{\Gamma_-} + \frac{1}{\rho_2} \frac{dP_2^n}{dn} \Big|_{\Gamma_-}$$

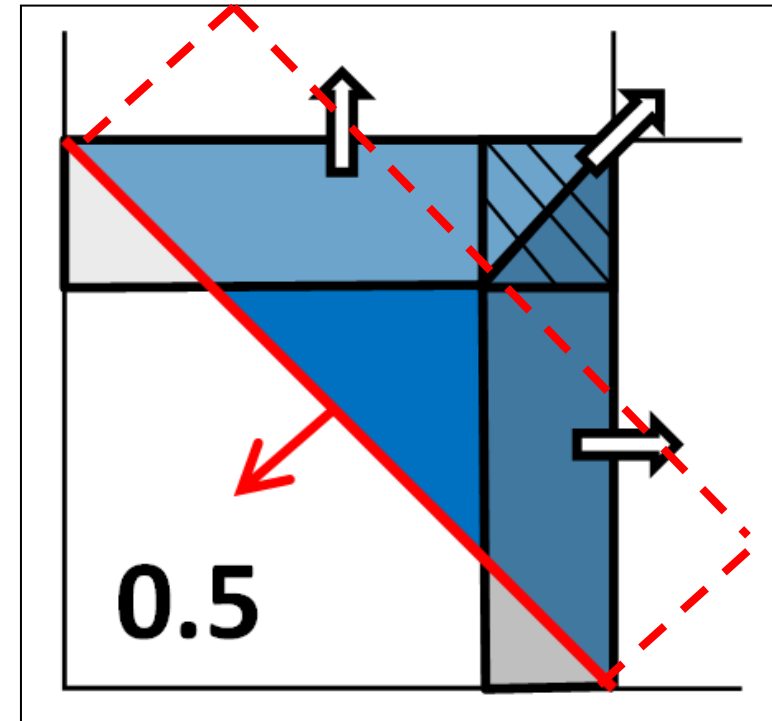




## Расчет переноса VOF – скошенная схема

- Учитываются не только потоки к «соседям» по сторонам ячейки, но также и к «соседям» по ребрам.
- Поток VOF определяется из реконструкции поверхности внутри ячейки.

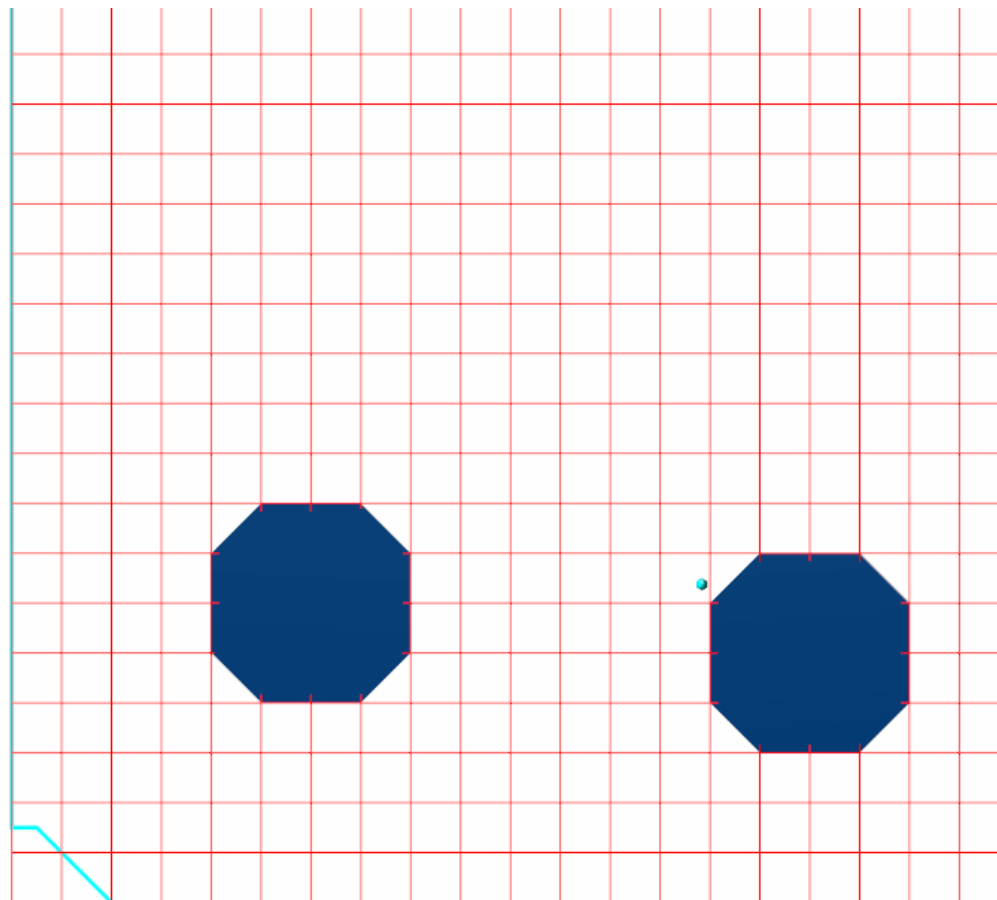
### Расчет втекающих и вытекающих потоков в ячейке



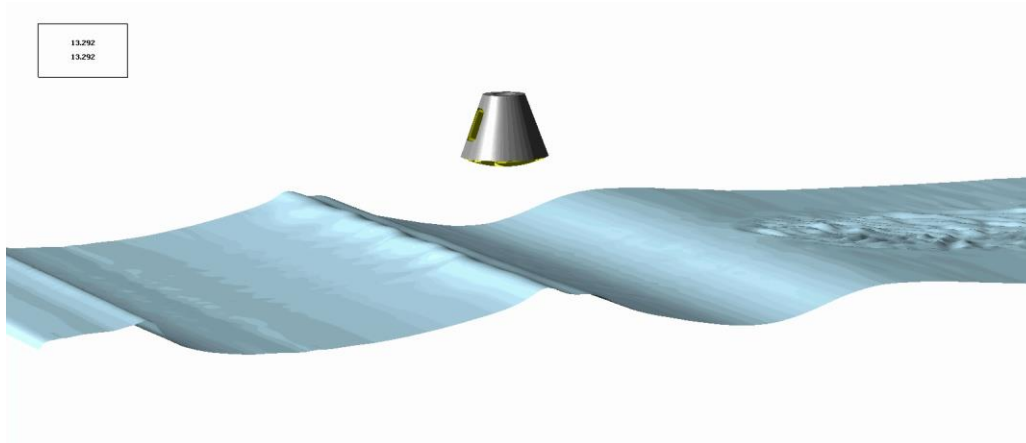
*Раздача потоков из ячейки в скошенной схеме*

«Скошенная» схема для переноса VOF

**Движение двух капель жидкости вдоль линий сетки и под углом  $45^\circ$**

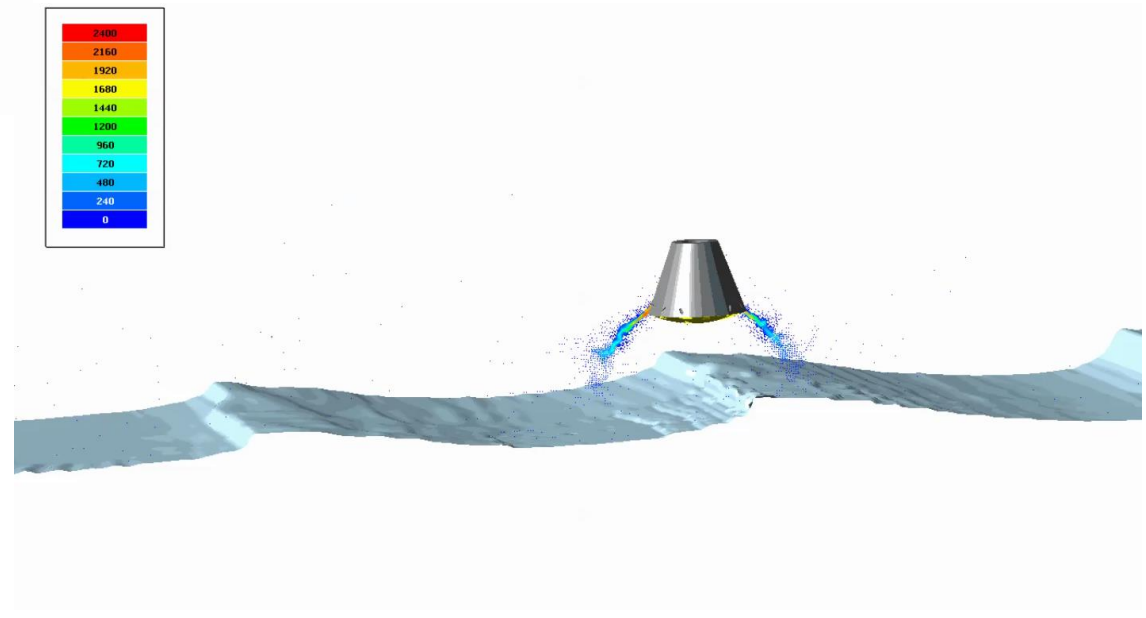


# Посадка возвращаемого аппарата в условиях волнения



неработающие двигатели торможения

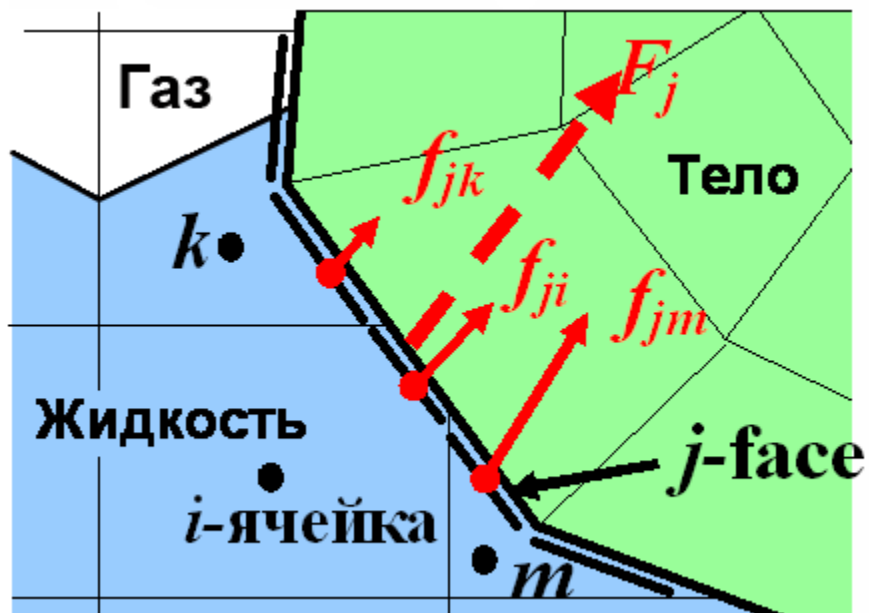
работающие двигатели торможения



# FSI-Взаимодействие жидкости и конструкции: непосредственное сопряжение и через CFD-поверхность

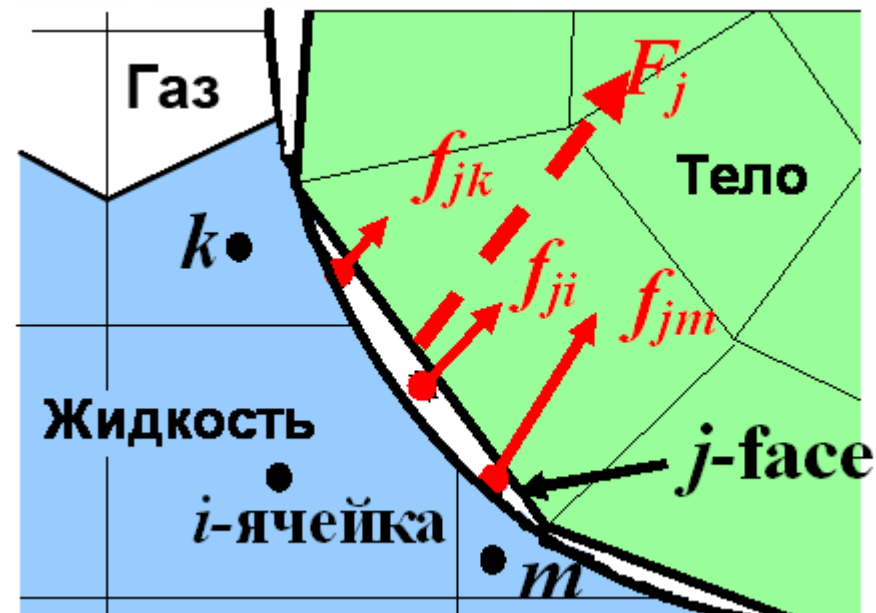
## Непосредственно

- Поверхность конечных элементов и есть CFD поверхность
- Не используются дополнительные интерполяторы



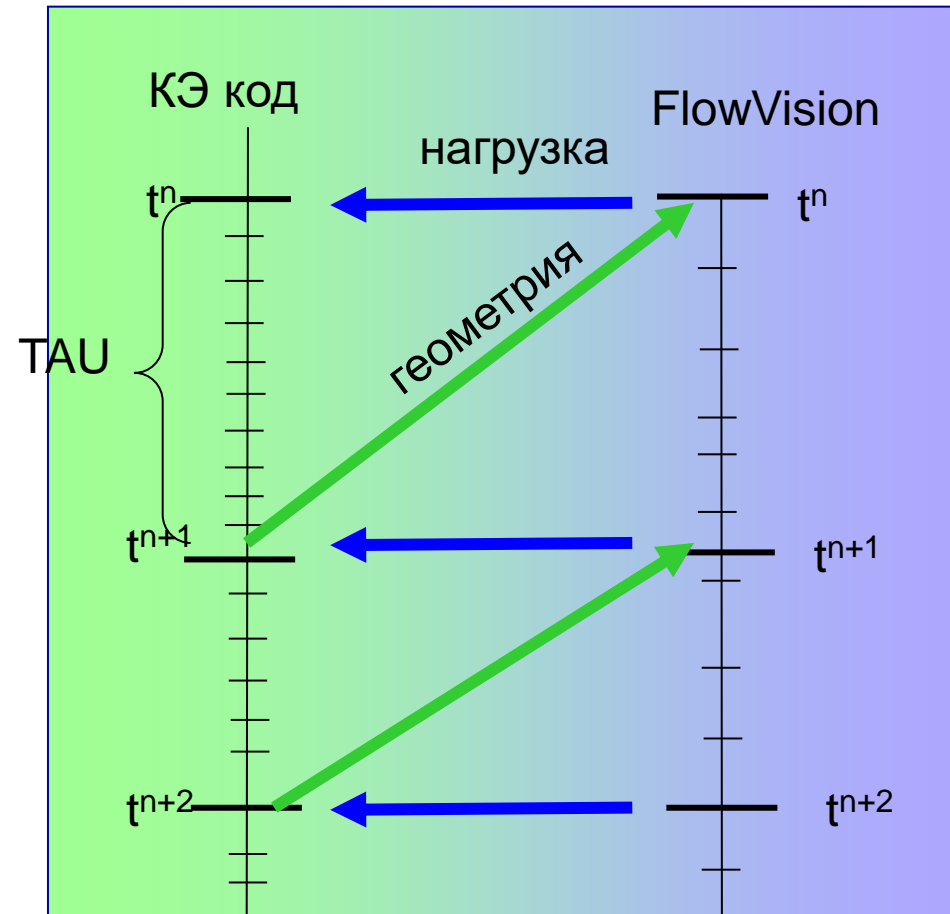
## CFD-поверхность

- Поверхность конечных элементов не совпадает с CFD поверхностью
- Используется интерполятор для аппроксимации данных с CFD на FE поверхность и обратно



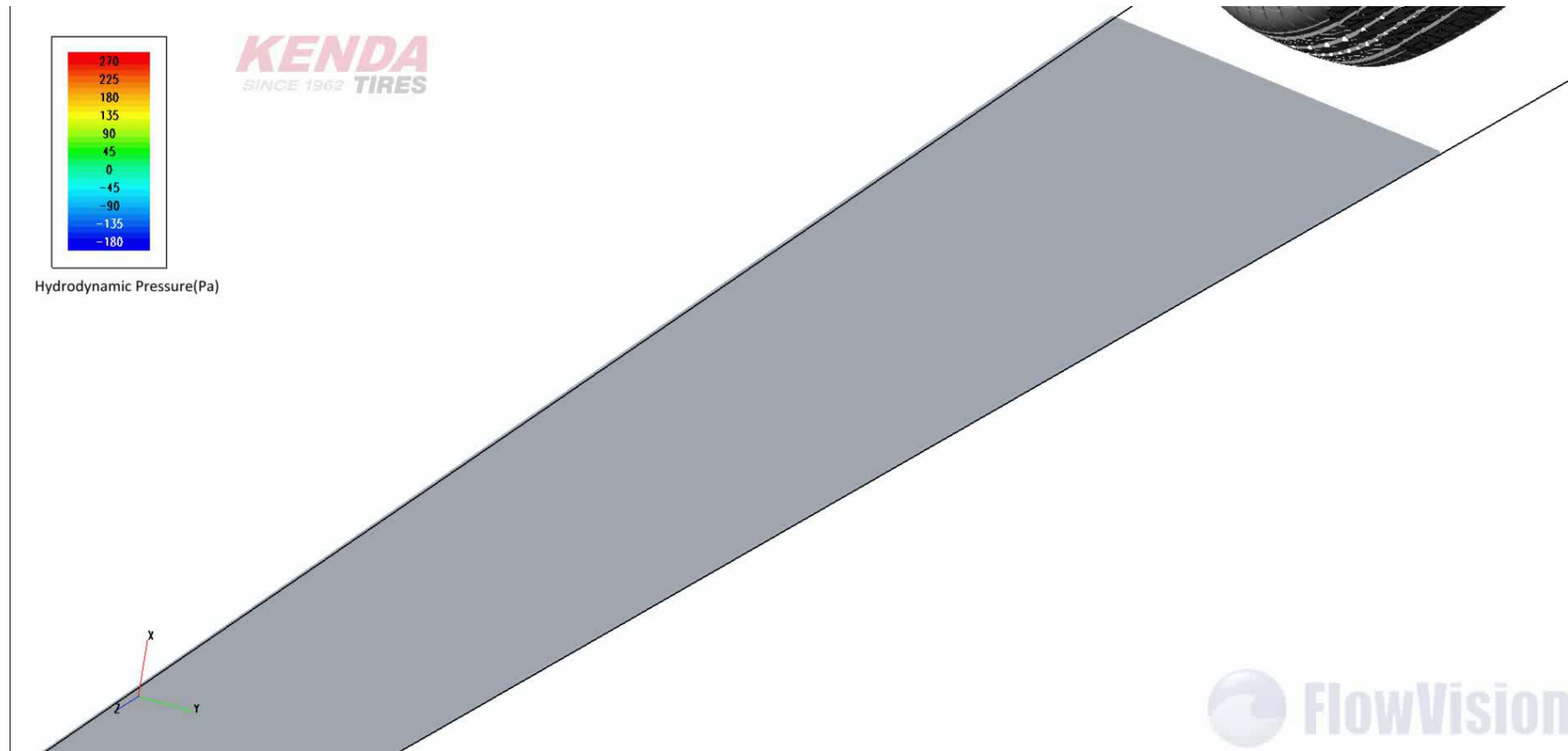
## Взаимодействие жидкости и конструкции: прямое сопряжение с КЭ

- FlowVision и КЭ код периодически обмениваются расчетными данными после определенного временного шага TAU
- Информация прямо передается из одной программы в другую через сокетное соединение
- КЭ код и FlowVision могут быть установлены на разные платформы
- Вы можете подключить свое приложение через наш протокол MBS!!!

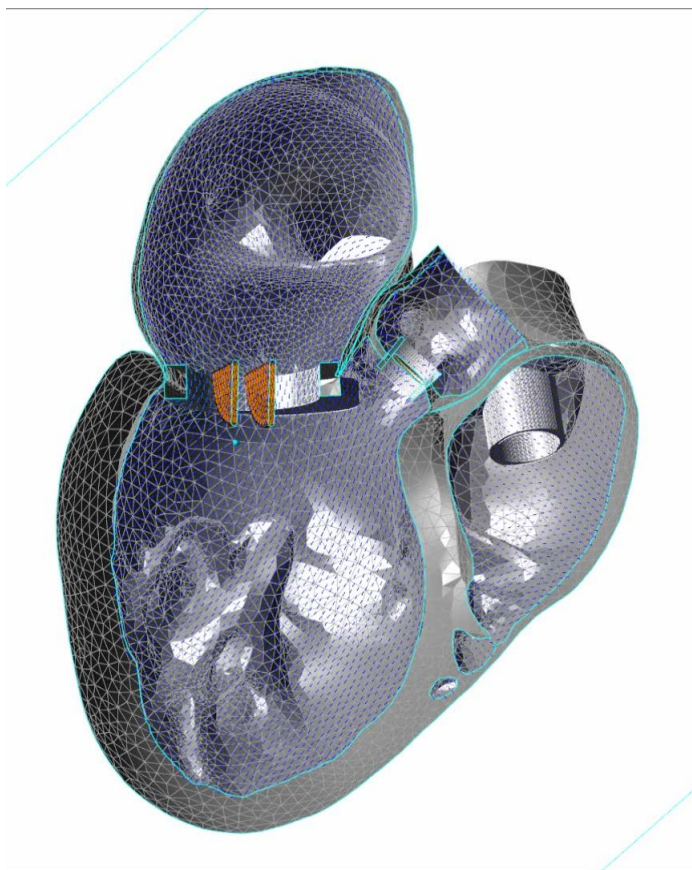


FlowVision используют компании Goodyear, Kenda, Giti, Pirelli и другие

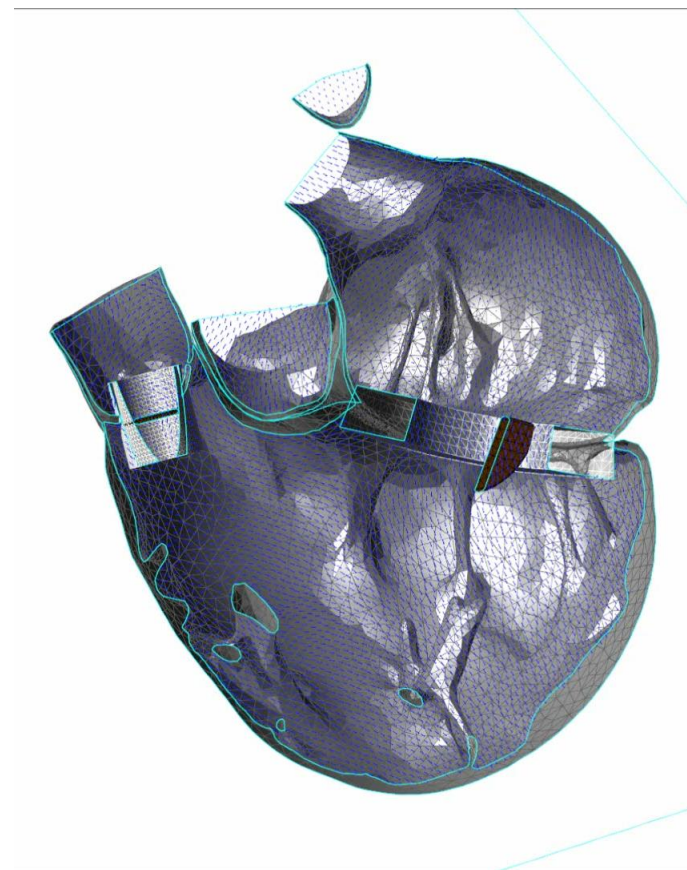
## Моделирование аквапланирования



## Сердце с механическими клапанами



Левый  
желудочек

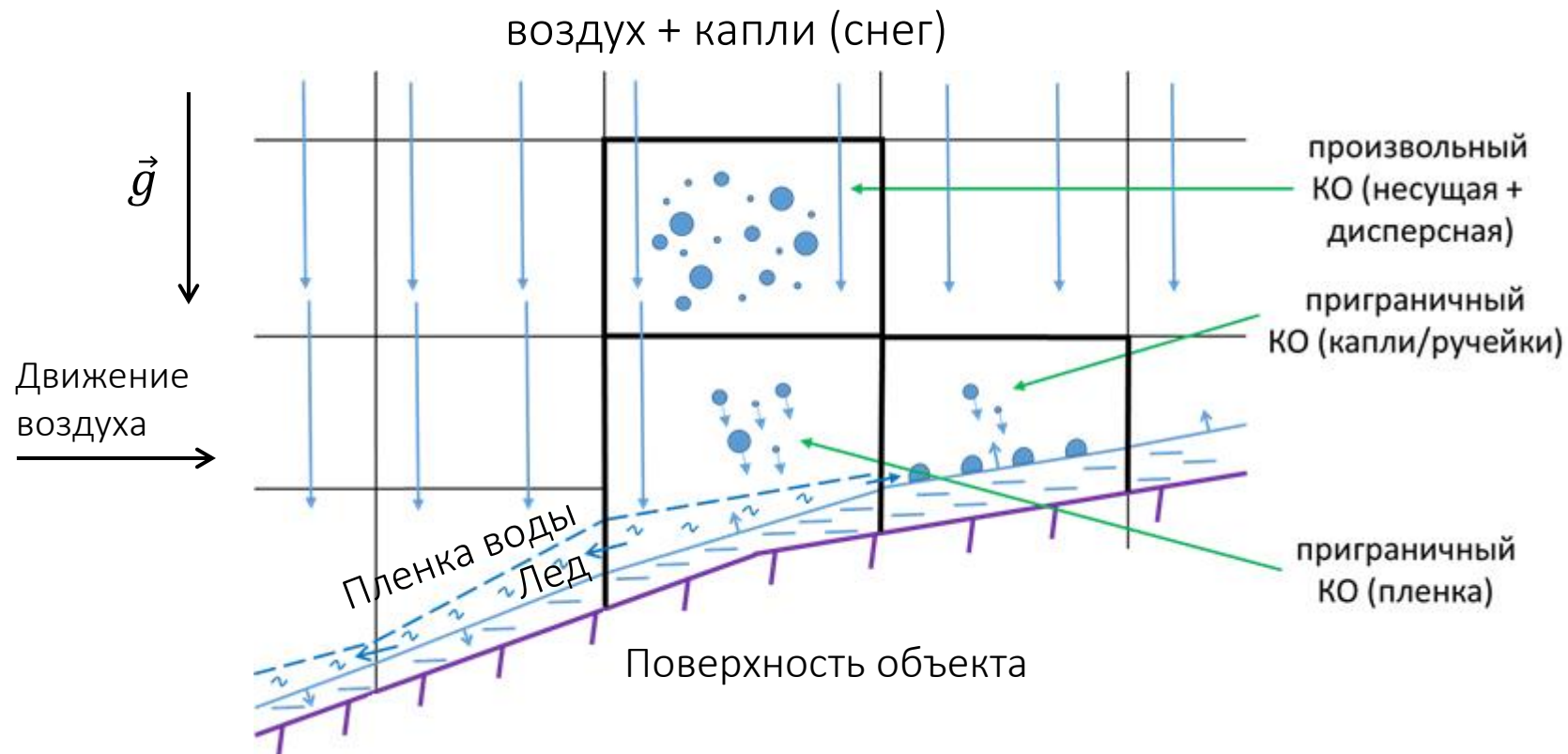


Правый  
желудочек

# Другие задачи



# Физическая модель обледенения



## Особенности модели обледенения FlowVision

---

- Три фазы
  1. воздух с каплями
  2. лед
  3. структура самолета
- Учет различия характерных времен процессов
  - Набегающий поток (дождь, снег) : секунды
  - Рост льда / течение пленки : минуты
- Сухой/влажный режим: определяется локальной термодинамической обстановкой
- Рост льда: **метод VOF**

## Фаза воздух

- Закон сохранения массы

$$\phi_c = 1 - \phi_d, \quad \frac{\partial(\phi_c \rho_c)}{\partial t} + \nabla \cdot (\phi_c \rho_c \mathbf{V}_c) = 0$$

Учет вытеснения каплями

- Закон сохранения импульса

$$\frac{\partial(\phi_c \rho_c \mathbf{V}_c)}{\partial t} + \nabla \cdot (\phi_c \rho_c \mathbf{V}_c \otimes \mathbf{V}_c) = -\phi_c \nabla p + \nabla \cdot (\phi_c \hat{\boldsymbol{\tau}}) - Q_V$$

$$\hat{\boldsymbol{\tau}} = (\mu + \mu_t) \left( 2\hat{S} - \frac{2}{3} (\nabla \cdot \mathbf{V}_c) \hat{\mathbf{I}} \right), \quad S_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial V_{c,i}}{\partial x_j} + \frac{\partial V_{c,j}}{\partial x_i} \right)$$

Обмен импульсом с каплями

- Закон сохранения энергии

$$\frac{\partial(\phi_c \rho_c h_c)}{\partial t} + \nabla \cdot (\phi_c \rho_c \mathbf{V}_c h_c) = -\nabla \cdot (\phi_c J_q^{eff}) + \frac{d}{dt} (\phi_c p) + \phi_c (\hat{\boldsymbol{\tau}} : \hat{S} + \rho \varepsilon) - Q_T$$

$$J_q^{eff} = - \left( \frac{\lambda}{C_p} + \frac{\mu_t}{Pr_t} \right) \nabla h_c + h_c \left( \frac{\lambda}{C_p} (1 - Le) + \frac{\mu_t}{Pr_t} (1 - Le_t) \right) \quad h_c(T) = h_{c,0}(298.15) + \int_{298.15}^T C_{p,c}(T) dT$$

Теплообмен с каплями

- Турбулентность

**Модели RANS – k-ε, SA, SST + пристеночные функции**

## Дисперсная фаза – капли воды

- Закон сохранения массы

$$\frac{\partial n_d}{\partial t} + \nabla \cdot \left( \mathbf{V}_d n_d - \frac{v_{t,d}}{Sc_{t,d}} \nabla n_d \right) = 0, \quad n_d - \text{спектр размеров капель}$$

- Закон сохранения импульса

$$\frac{\partial (n_d \mathbf{V}_d)}{\partial t} + \nabla \cdot \left( \left( \mathbf{V}_d n_d - \frac{v_{t,d}}{Sc_{t,d}} \nabla n_d \right) \otimes \mathbf{V}_d \right) = -n_d \frac{1}{\rho_d} \nabla p + \frac{1}{M_d} Q_V$$

$$Q_V = n_d \rho_c \frac{1}{2} C_D \pi d^2 |\mathbf{V}_c - \mathbf{V}_d| (\mathbf{V}_c - \mathbf{V}_d), \quad C_D = \frac{21.12}{Re_d} + 6.3 Re_d^{-0.5} + 0.25$$

Обмен импульсом с воздухом

- Закон сохранения энергии

$$\frac{\partial (n_d T_d)}{\partial t} + \nabla \cdot \left( \mathbf{V}_d n_d T_d - \frac{v_{t,d}}{Sc_{t,d}} \nabla (n_d T_d) \right) = \frac{1}{C_{P,d}(T_d) M_d} Q_T$$

$$Q_T = n_d \pi d^2 Nu_d \frac{\lambda_c}{d} (T_c - T_d); \quad Nu_d = 2 + 0.55 Re_d^{1/2} Pr_c^{1/3}$$

Теплообмен с воздухом

## Фаза лед

*\*Messinger B.L. Equilibrium temperature of an unheated icing surface as a function of airspeed // J. of the Aeron. Sciences, 1953, vol. 20, No. 1, pp. 29-42*

- Закон сохранения массы

$$\frac{\partial F}{\partial t} = \dot{m}_{ice}$$

- Закон сохранения энергии

$$\rho_I \frac{\partial h_I}{\partial t} = \nabla \left( \frac{\lambda_I}{C_{p,I}} \nabla h_I \right)$$

- Тепловой баланс на поверхности льда (\*)

$$\begin{aligned} & (h_d - h_f) \dot{m}_d + (\lambda_{gas} + \lambda_{gas,t}) \frac{T_{c,gas} - T_{f,0}}{y_{c,gas}} - \dot{m}_{evap(subl)} \Delta h_{evap} \\ & = \lambda_{ice} \frac{T_{f,0} - T_{c,ice}}{y_{c,ice}} - \dot{m}_{ice} \Delta h_{fusion} \end{aligned}$$

## Фаза пленка воды

- Закон сохранения массы

$$\dot{m}_{film} = \dot{m}_d - \dot{m}_{ice} - \dot{m}_{evap}$$

$$\dot{m}_d = \rho_d \mathbf{V}_d^n S_{base} - \text{выпадение воды из воздуха}$$

- Скорость движения пленки (\*\*)

$$\vec{V}_f = \frac{h_f}{2\mu_f} \vec{\tau}_w + \frac{h_f^2}{3\nu_f} \left( \vec{g}^\tau - g^n \cdot \vec{\nabla} h_f + \boxed{\beta} \frac{\sigma}{\rho_f h_f \Delta_\perp^{cl}} \cdot \vec{n}^{cl} \right)$$

$\beta$  - коэффициент модели линии контакта

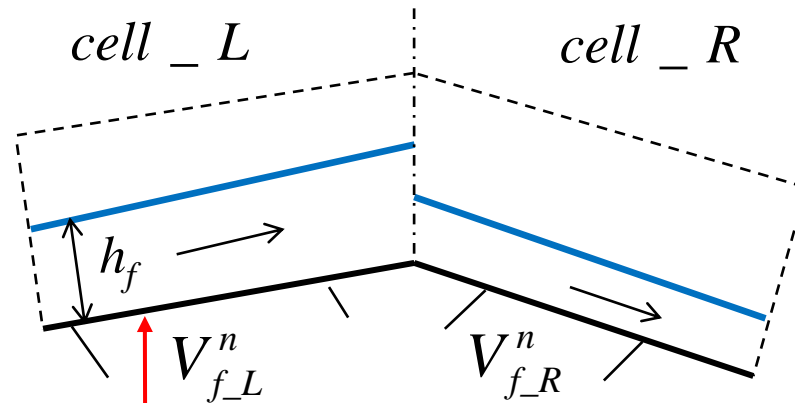
- Уравнение движения пленки

$$\frac{f^{n+1} - f^n}{\Delta\tau_f} + \sum_{sides} F_{side} = \frac{S_{base}}{\Omega_{cell} \rho_d} \dot{m}_{film}$$

\*Bourgault Y., Beaugendre H., Habashi W.G. Development of a Shallow-Water Icing Model in FENSAP-ICE // Journal Of Aircraft, 2000, vol. 37, No. 4, pp.640-646

\*\*Gosset A. Prediction of rivulet transition in anti-icing applications // 2017 DOI: 10.13009/EUCASS2017-482

## Моделирование течения пленки



Твердая поверхность либо  
поверхность льда,  
реконструированная методом VOF

Потоки по сторонам ячейки (UPWIND):

$$F_{side} = \begin{cases} (V_{f-L}^n \cdot h_{f-L} \cdot L_{side}) / \Omega_{cell}, & V_{f-L}^n > 0 \\ (V_{f-R}^n \cdot h_{f-R} \cdot L_{side}) / \Omega_{cell}, & V_{f-R}^n > 0 \end{cases}$$

## Взаимодействие фаз - Испарение пленки / сублимация льда

$$\dot{m}_{evap(subl)} = St_{vap} \rho_c |V_c| \frac{(Y_{vap,w} - Y_{vap,c})}{(1 - Y_{vap,w})}, \text{ где}$$

$$St = \left( \frac{C_f}{2} \right) / \left( Sc_t + \sqrt{\frac{C_f}{2}} \frac{Sc^{0,8}}{1,92} \left[ \frac{u_\tau \cdot a_h \cdot h_s}{v_{gas,c}} \right]^{0,45} \right)$$

$$Y_{vap,w} = \frac{\rho_{vap,w}}{\rho_w} = \frac{p_{vap,sat}(T_w)}{p} \frac{m_{vap}}{m_w} - \text{массовая доля пара}$$

Учет шероховатости (\*):  $\mu \rightarrow \mu_{eff} = \mu + a_h \cdot h_s \cdot \rho u_\tau h_s$

$h_s$  - эквивалентная песочная шероховатость по эмпирической модели (\*\*)

$a_h = F(y_{max}^+, T_{total}, \mathbf{V}^\infty, MVD, LWC)$  - функция, подобранная эмпирически

\*Tran P., Brahim M.T., Tezok F., Paraschivolu I.  
Numerical simulation of ice accretion on multiple  
element configurations // AIAA Meeting, 1996,  
AIAA Paper 96-0869

\*\*Shin J., Bond T.H. Experimental and  
Computational Ice Shapes and Resulting Drag  
Increase for a NACA 0012 Airfoil // NASA Tech.  
Mem. 105743, 1992



## Взаимодействие фаз пленка-капли - срыв пленки

*\* Алипченков В.М., Зайчик Л.И., Зейгарник Ю.А., Соловьев С.Л., Стоник О.Г. Развитие трехжидкостной модели двухфазного потока для дисперсно-кольцевого режима течения в каналах. Осаждение и унос капель // ТВТ, 2002, Т. 40, № 5, .с 772-778*

- По радиусу кривизны  $\frac{h_f}{R} > C$ ,  $\dot{m}_{f\_out} = \frac{(h_f - RC) \cdot h_f}{\Delta \tau_f}$

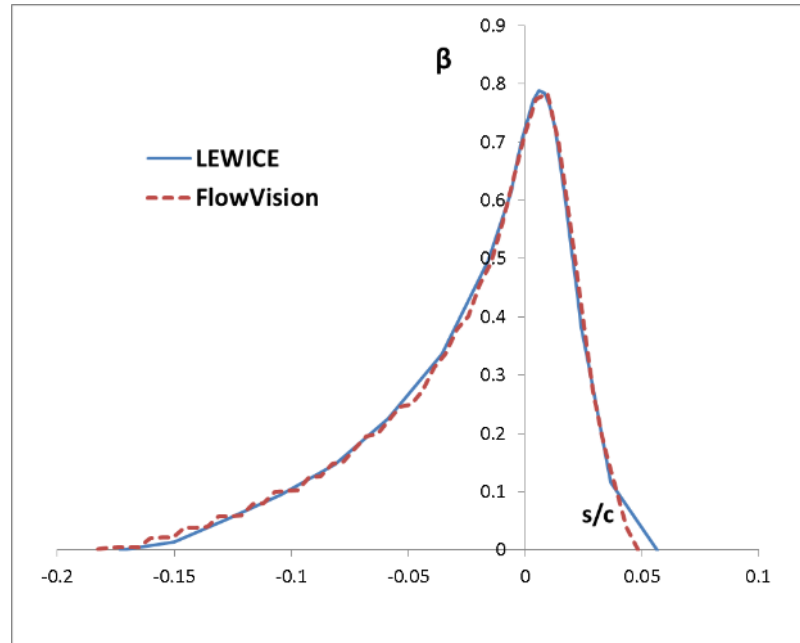
$R$  – радиус кривизны поверхности

- По числу Вебера (\*)  $We_f > We_f^{cr}$ ,  $We_f = \frac{\rho_g V_g^2 h_f}{\sigma_f}$   
 $We_f^{cr} = \left[ 7 \cdot 10^{-6} + 4 \cdot 10^{-4} (Re_f - 160)^{-0.8} \right] Re_f$   
 $\dot{m}_{f\_sh} = 0.23 \cdot \sqrt{\rho_f \rho_g V_g^2} \cdot (We_f - We_f^*)$

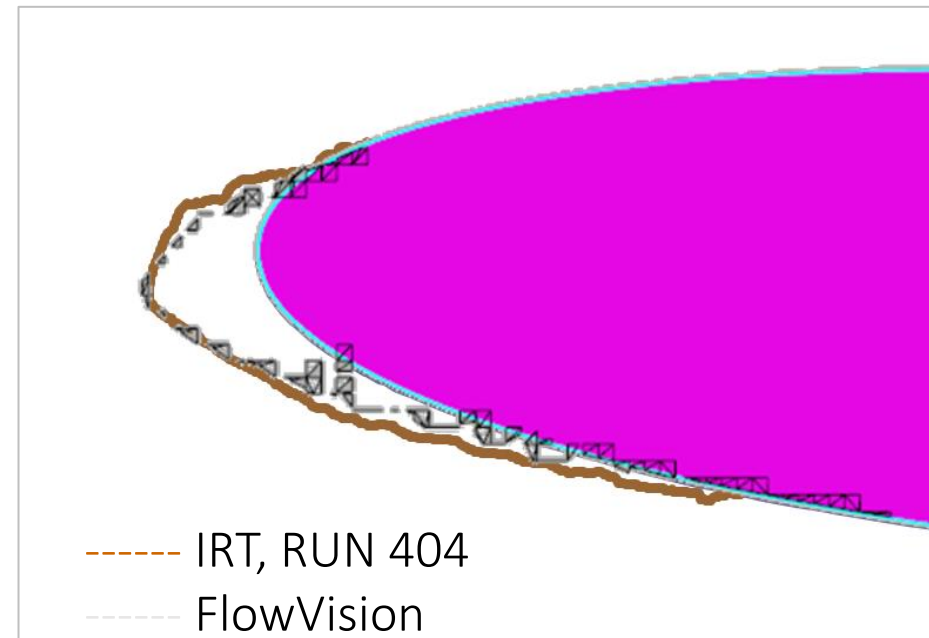
- Реализованы учет источников массы, импульса и энтальпии в уравнениях переноса дисперсной фазы

# НАСА0012: Валидация

*\*Wright W.B., Rutkowski A. Validation Results for LEWICE 2.0 and CD-ROM, January 1999*

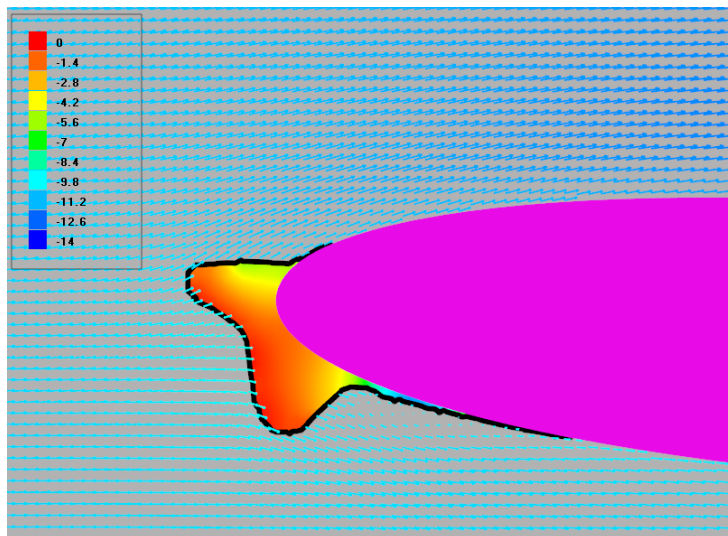


Локальный коэффициент захвата в зависимости от дуговой координаты

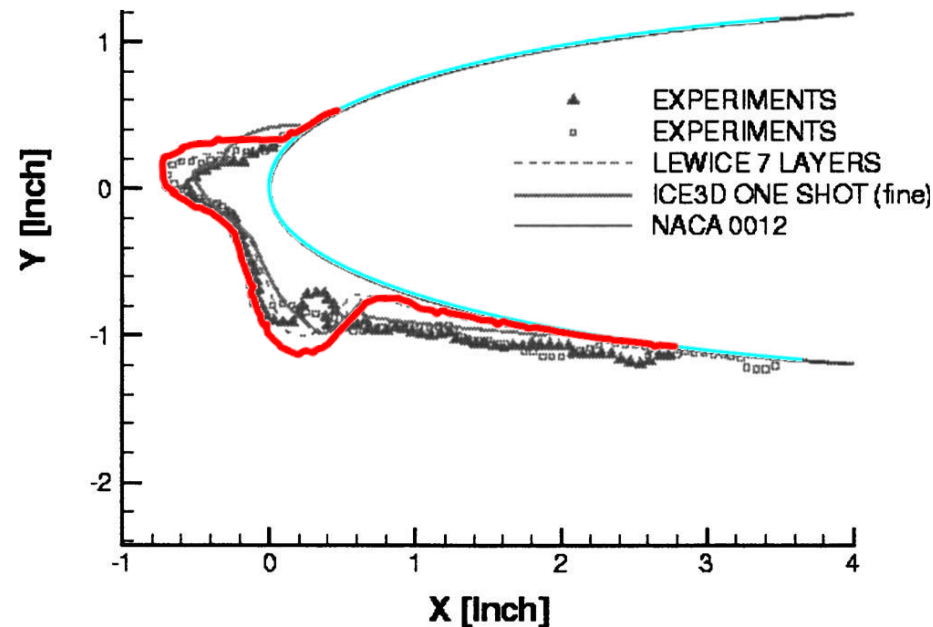


ЛЭД, эксперимент \*NASA Glenn Icing Research Tunnel

# NACA0012, RUN 403, ~500 с: температура, ЛЕД

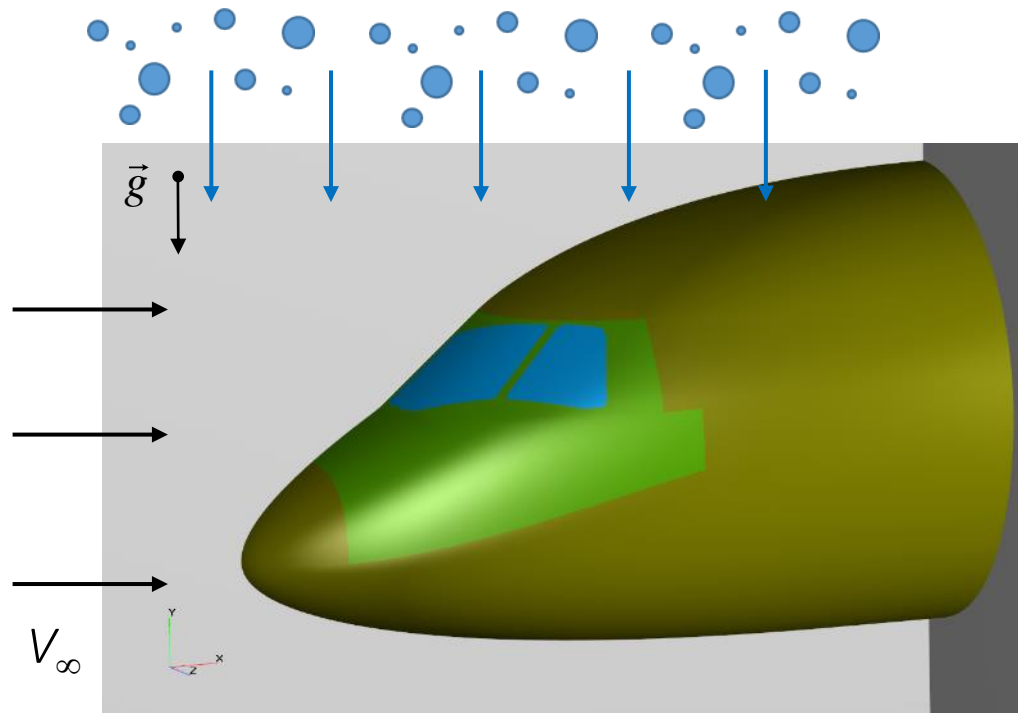


Скорость капель (раскрашена температурой) + температура льда



Форма льда

## Снег падает на теплое стекло, тает и замерзает ниже на корпусе



Метеоусловия:

- $T_{атм} = 268.15$  [K]
- $P_{атм} = 101$  [кПа]
- Штиль  $V_{\infty} = 0$  [м/с]

Осадки:

- **7.7 / 15.4 / 38.5** [мм/час]

Условия на поверхности:

- Поверхность с подводом тепла
- «Холодная» поверхность

# Носовая часть фюзеляжа, снег: Результаты

Осадки 7.7 [мм/час]

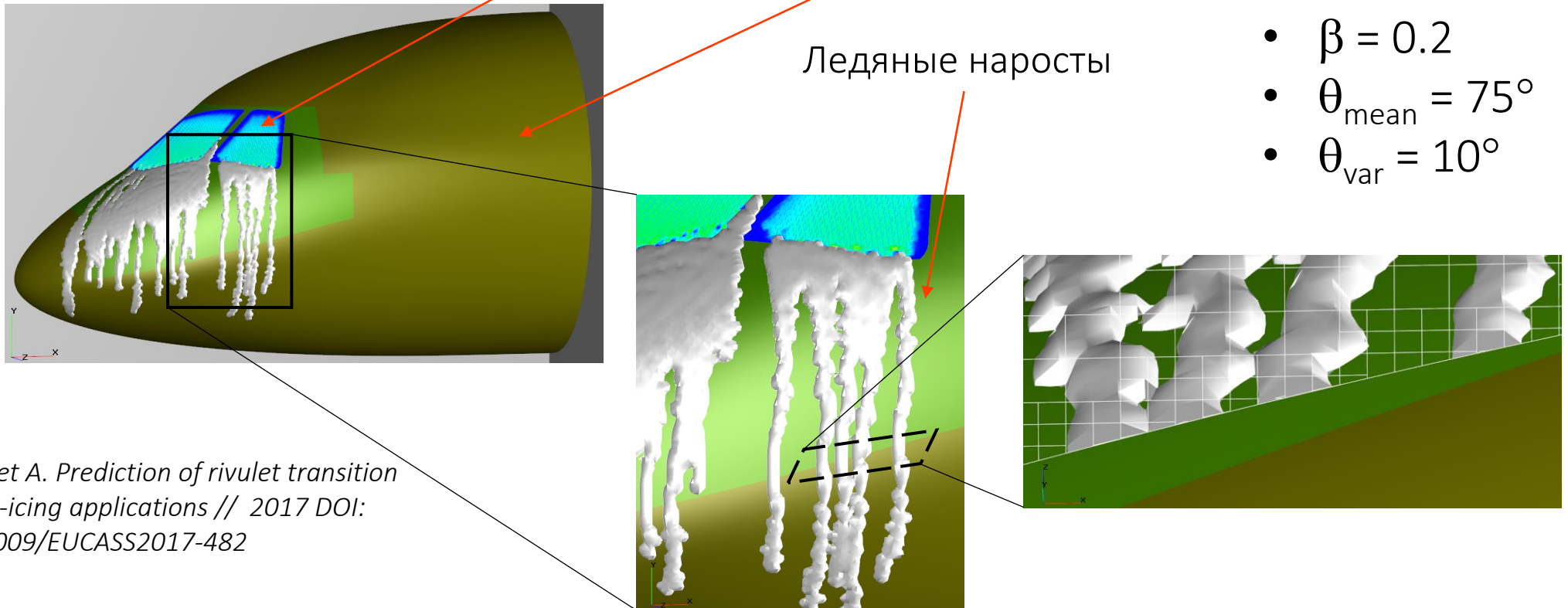
Обогреваемая поверхность

«Холодная» поверхность

Ледяные наросты

Модель линии  
контакта FV

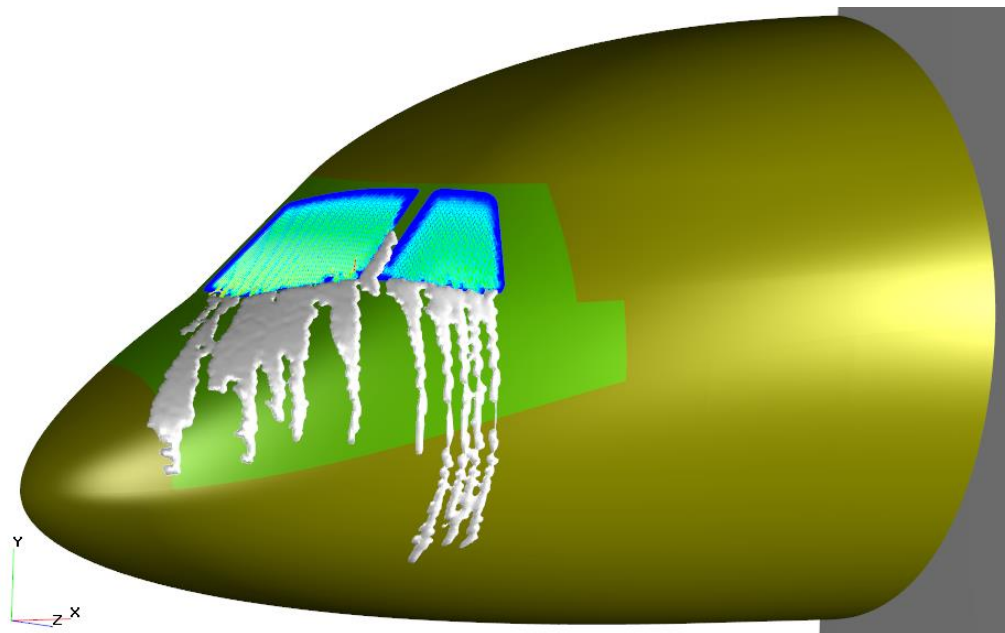
- $\beta = 0.2$
- $\theta_{\text{mean}} = 75^\circ$
- $\theta_{\text{var}} = 10^\circ$



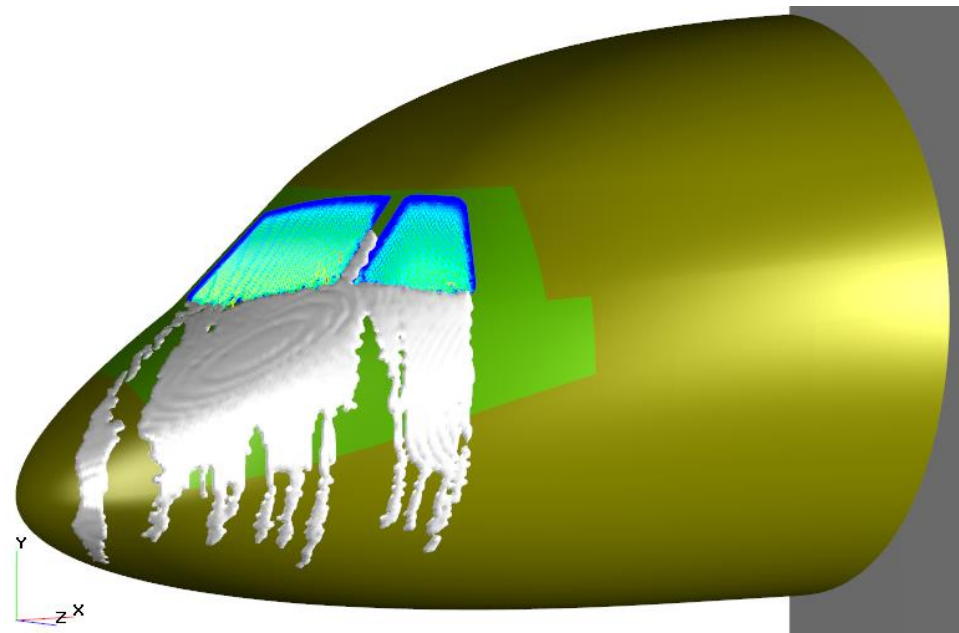
\*Gosset A. Prediction of rivulet transition  
in anti-icing applications // 2017 DOI:  
10.13009/EUCASS2017-482

## Носовая часть фюзеляжа, снег: Результаты

Осадки 15.4 [мм/час]

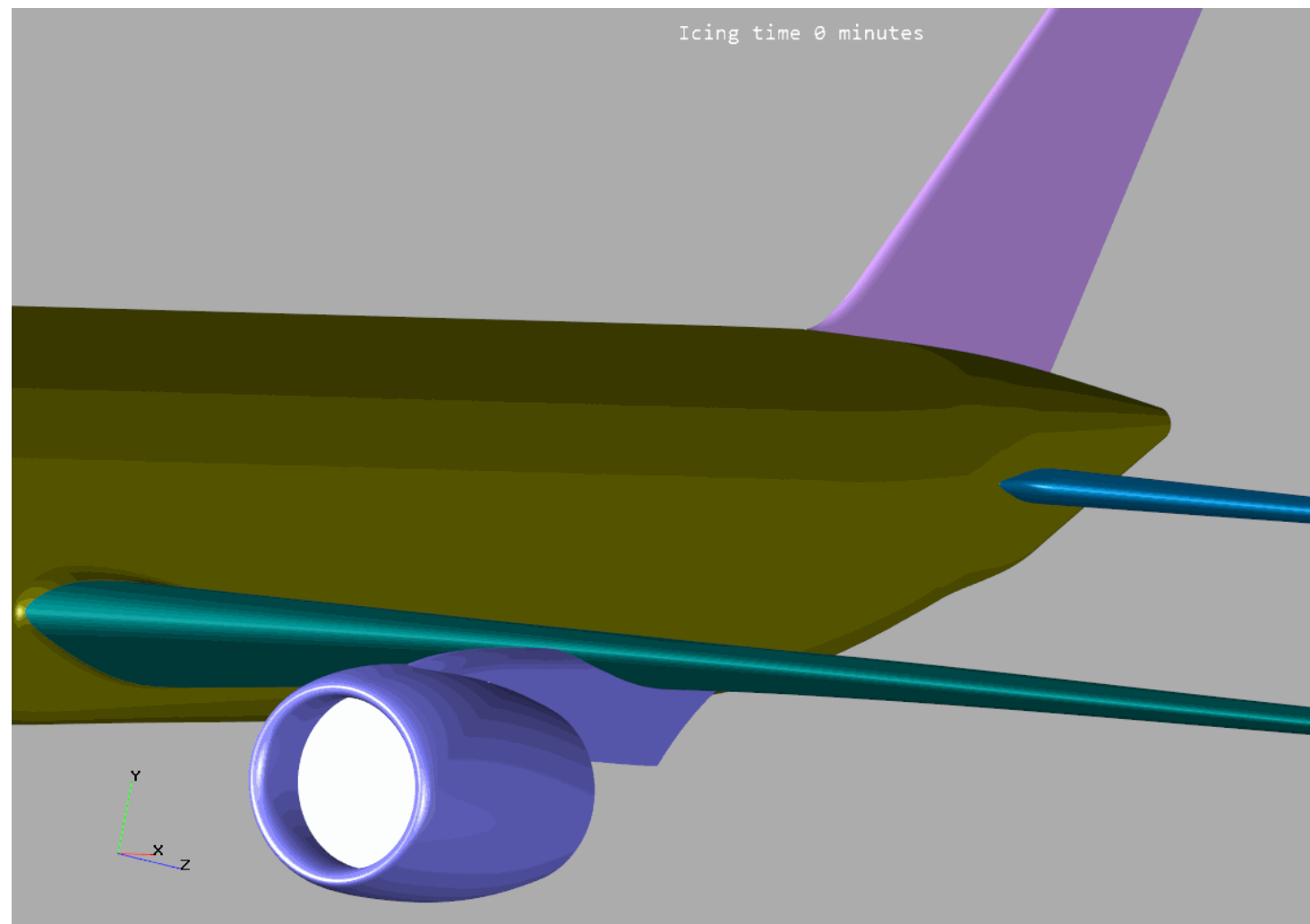


Осадки 38.5 [мм/час]



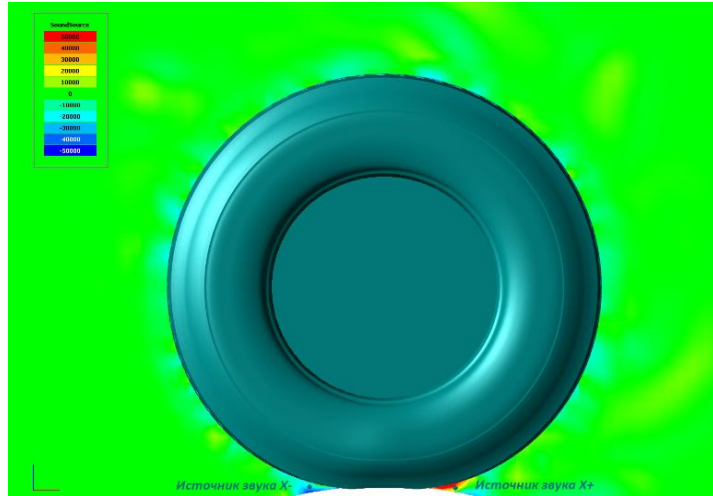
## Расчет обледенения самолета

FlowVision применяется для сертификационных расчетов обледенения самолетом SSJ, ШФДМС



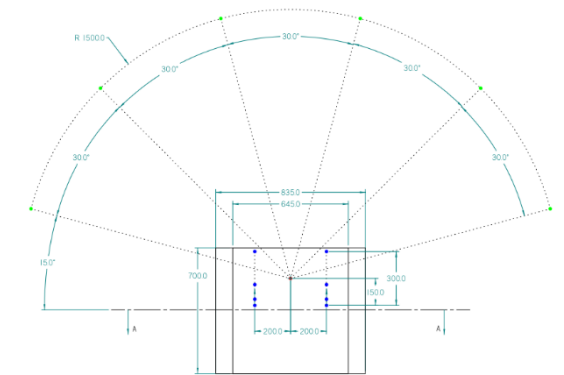
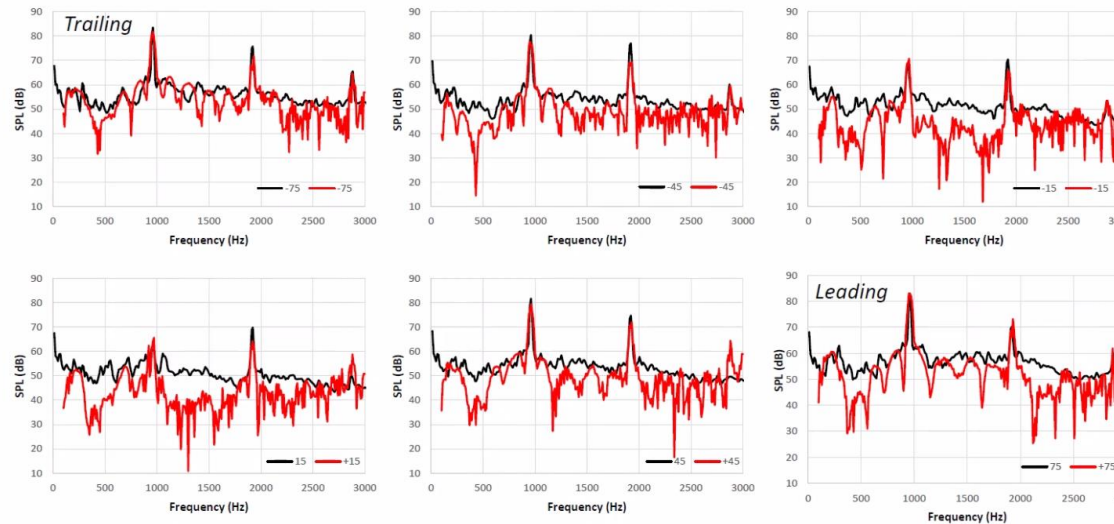


# Акустика шины с учетом деформации обтекаемой поверхности



Расположение акустических источников

Общее число сенсоров: 120



Расположение акустических приёмников

Хорошее согласование результатов расчетов с экспериментом



# Акустика пропеллера

Мгновенное распределение давления в следе

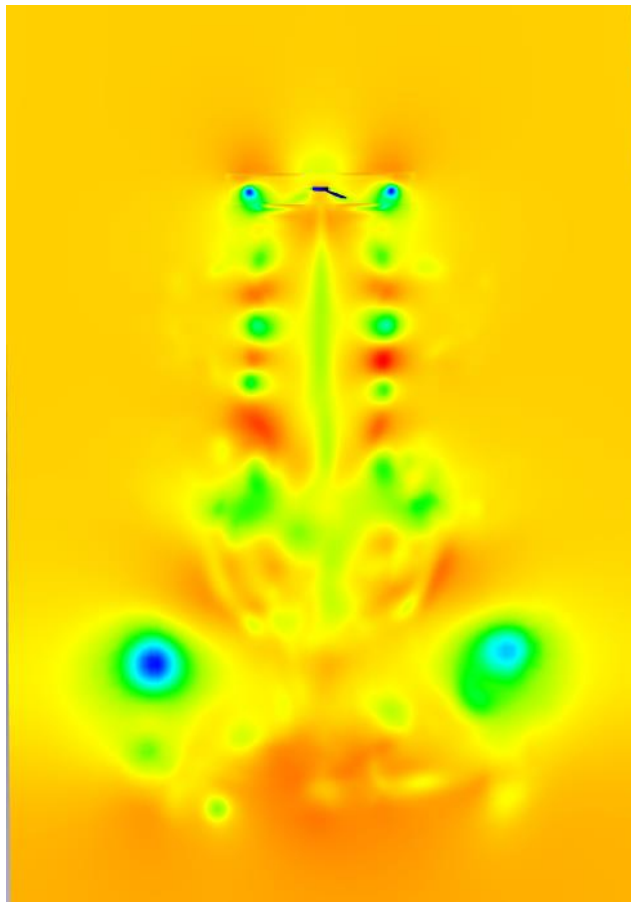
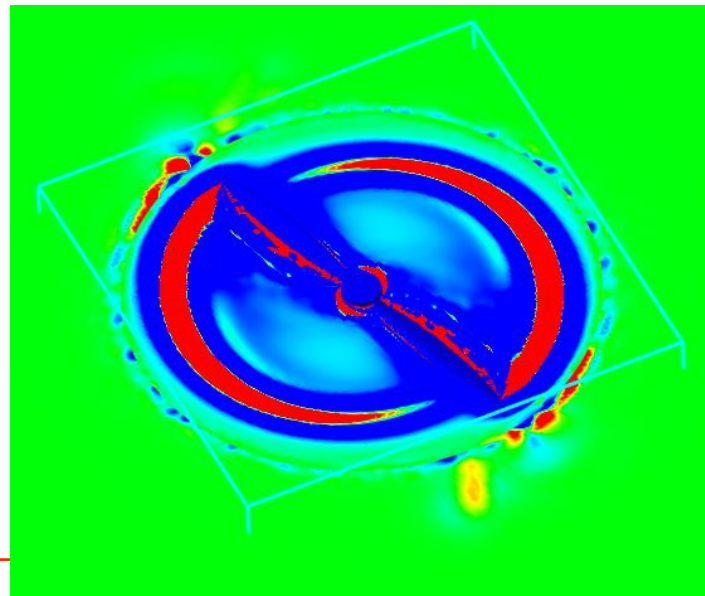
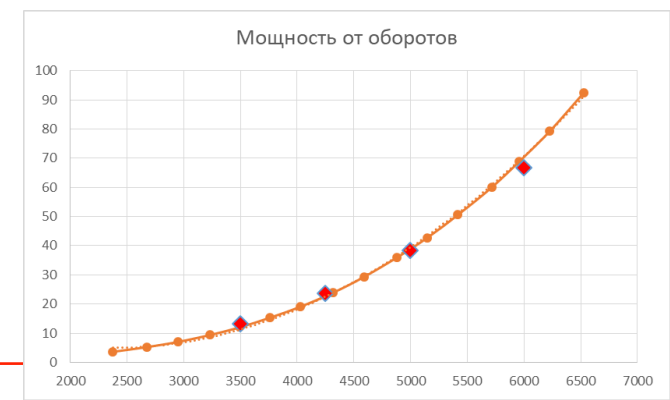
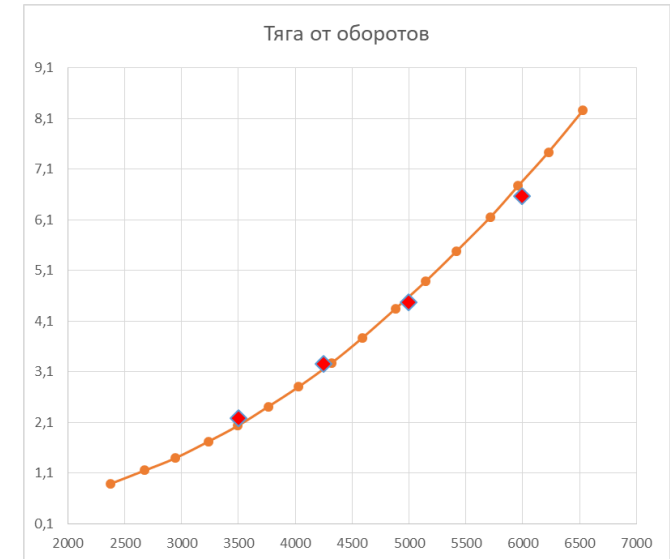


Figure 1: APC Slow Flyer 10x4.7 rotor (top and side view)

Мгновенное распределение функции гидродинамического источника в плоскости вращения

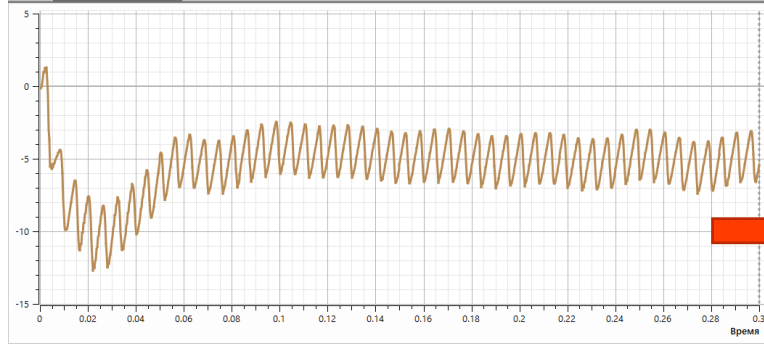
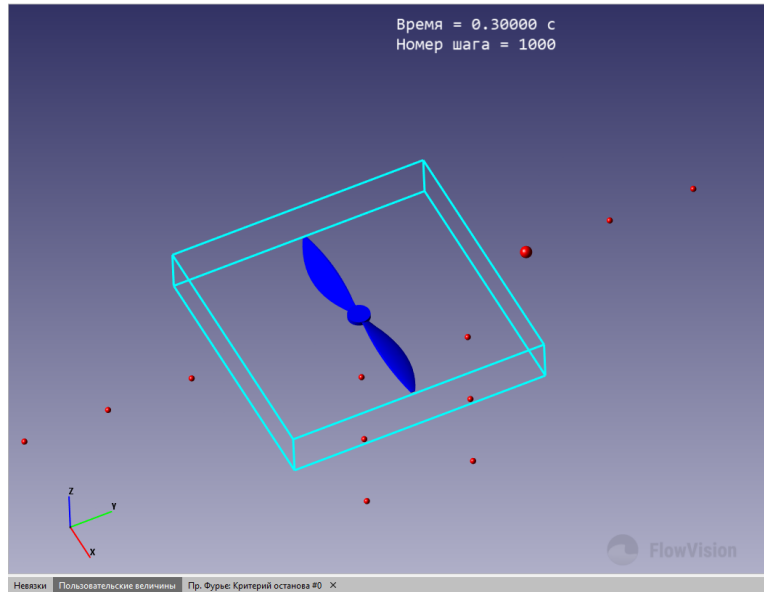


Согласование интегральных характеристик с опорными данными



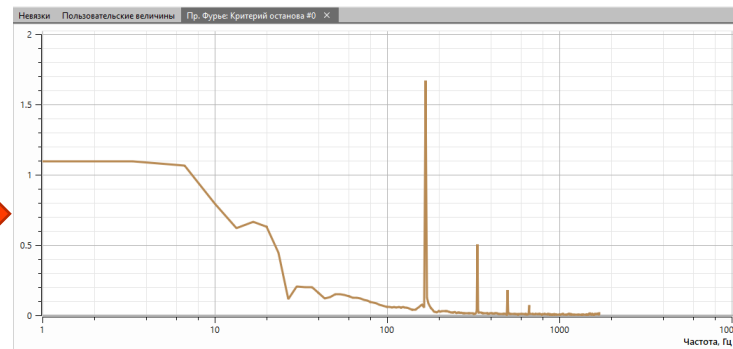
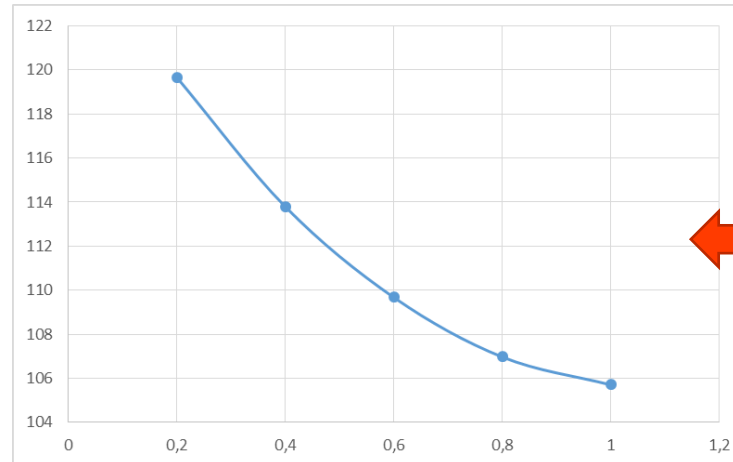
# Обработка результатов расчета акустики пропеллера

Расстановка сенсоров



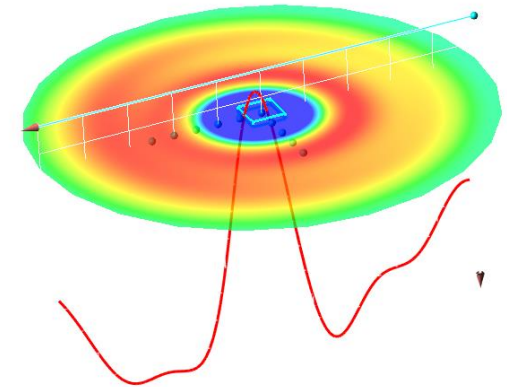
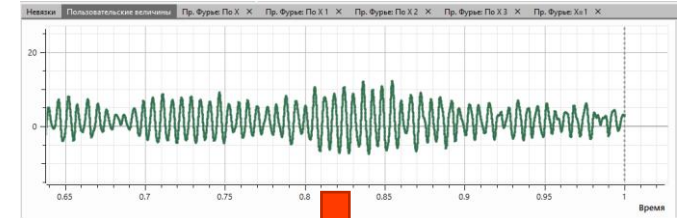
Колебания давления в точке

Зависимость звукового давления (Дб) в плоскости вращения винта от расстояния от источника (м) на первом тоне



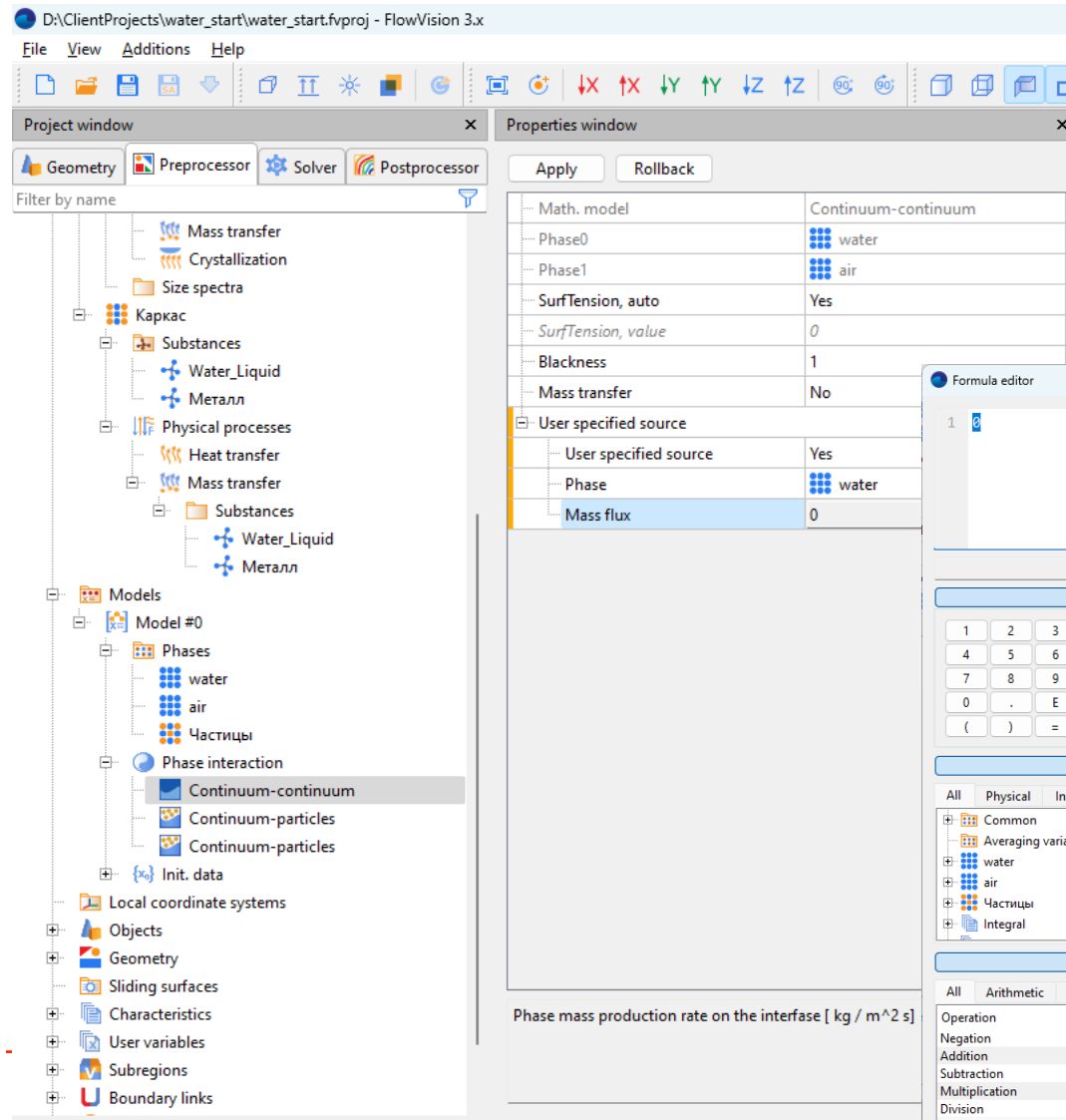
Преобразования Фурье

Колебания звукового давления



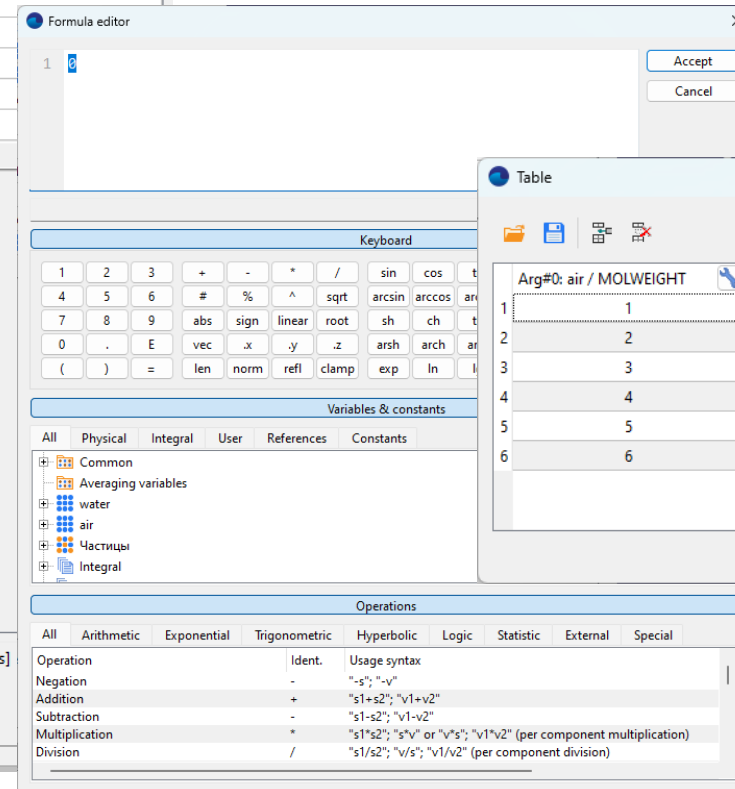
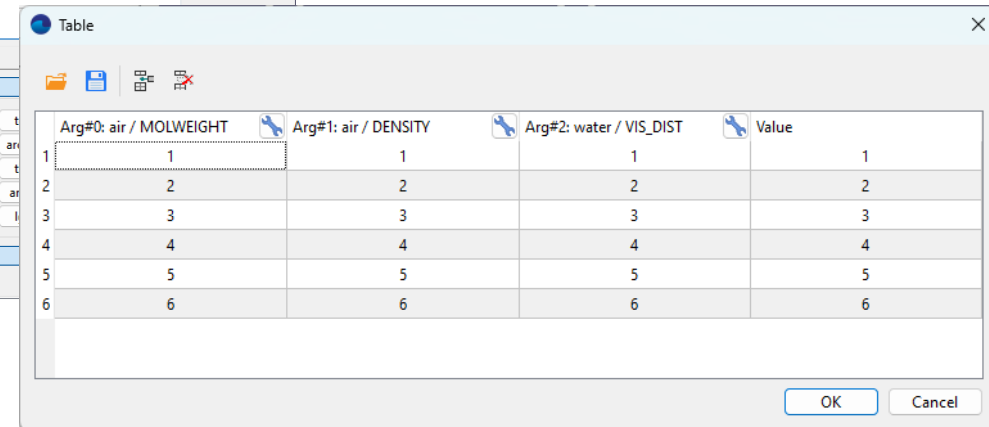
Мгновенная картина распределения давления звука

# Создание собственных моделей



Почти все параметры, которые можно задать в GUI FlowVision

- Числа
- Уравнения
- Таблицы
- Подключаемая dll

Arg#0: air / MOLWEIGHT	Arg#1: air / DENSITY	Arg#2: water / VIS_DIST	Value
1	1	1	1
2	2	2	2
3	3	3	3
4	4	4	4
5	5	5	5
6	6	6	6

# Пример создания пользовательской математической модели. Моделирование теплового факела в атмосфере на высотах до 10 км

Плотность воздуха – функция от высоты (задается в свойствах вещества):

$$\rho_0(Y) = \frac{P_0(Y)}{RT_0(Y)},$$

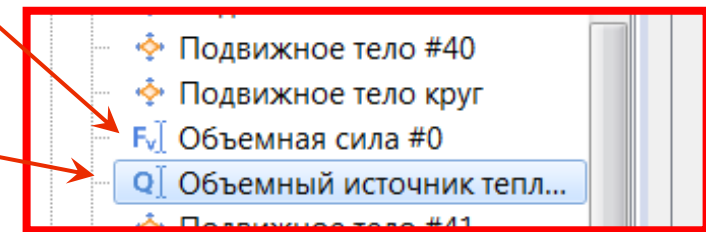
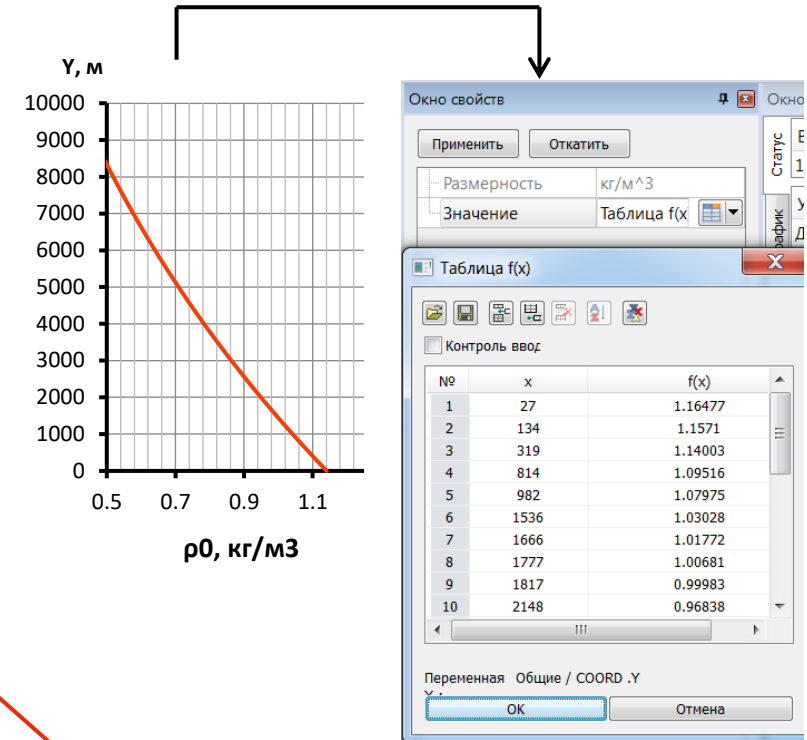
Уравнение Навье-Стокса модифицируется заданием дополнительной силы плавучести:

$$Fv = -\rho_0(Y) \frac{T'}{T_0(Y)} g,$$

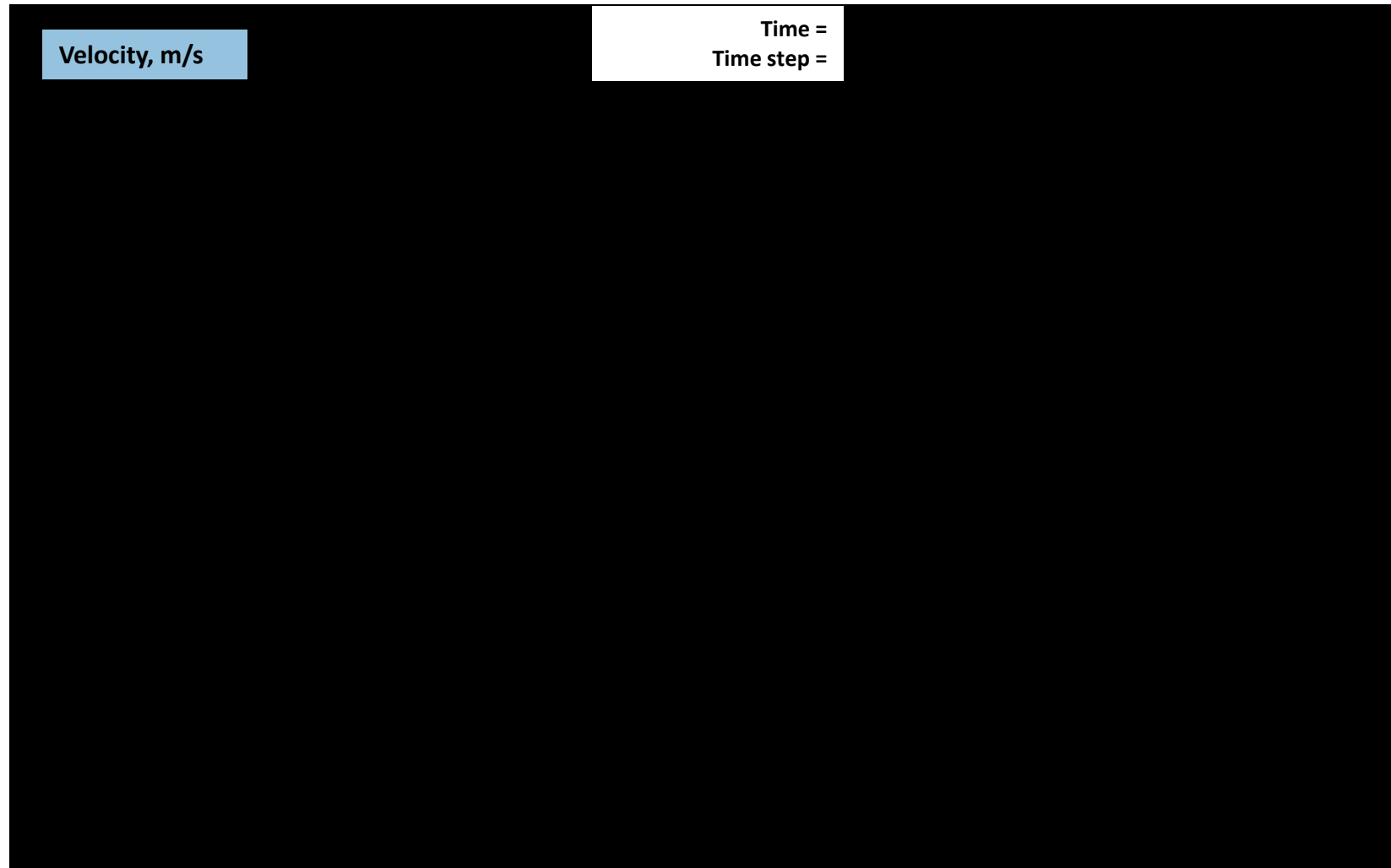
Уравнение энергии решается для термодинамической энтальпии:

$$\frac{\partial \rho_0 h'}{\partial t} + \nabla \rho_0 h' V = \rho_0 V_y \left( c_p \frac{\partial T_0}{\partial y} \left( \frac{T'}{T_0} - 1 \right) - g \right) + \nabla (\lambda_t \nabla (T' + T_0))$$

Работа против сил тяжести учитывается дополнительным членом через интерфейс



# Струя от двигателя в атмосфере. Небольшой ветер



Altitude reference to:  
installation / sea level

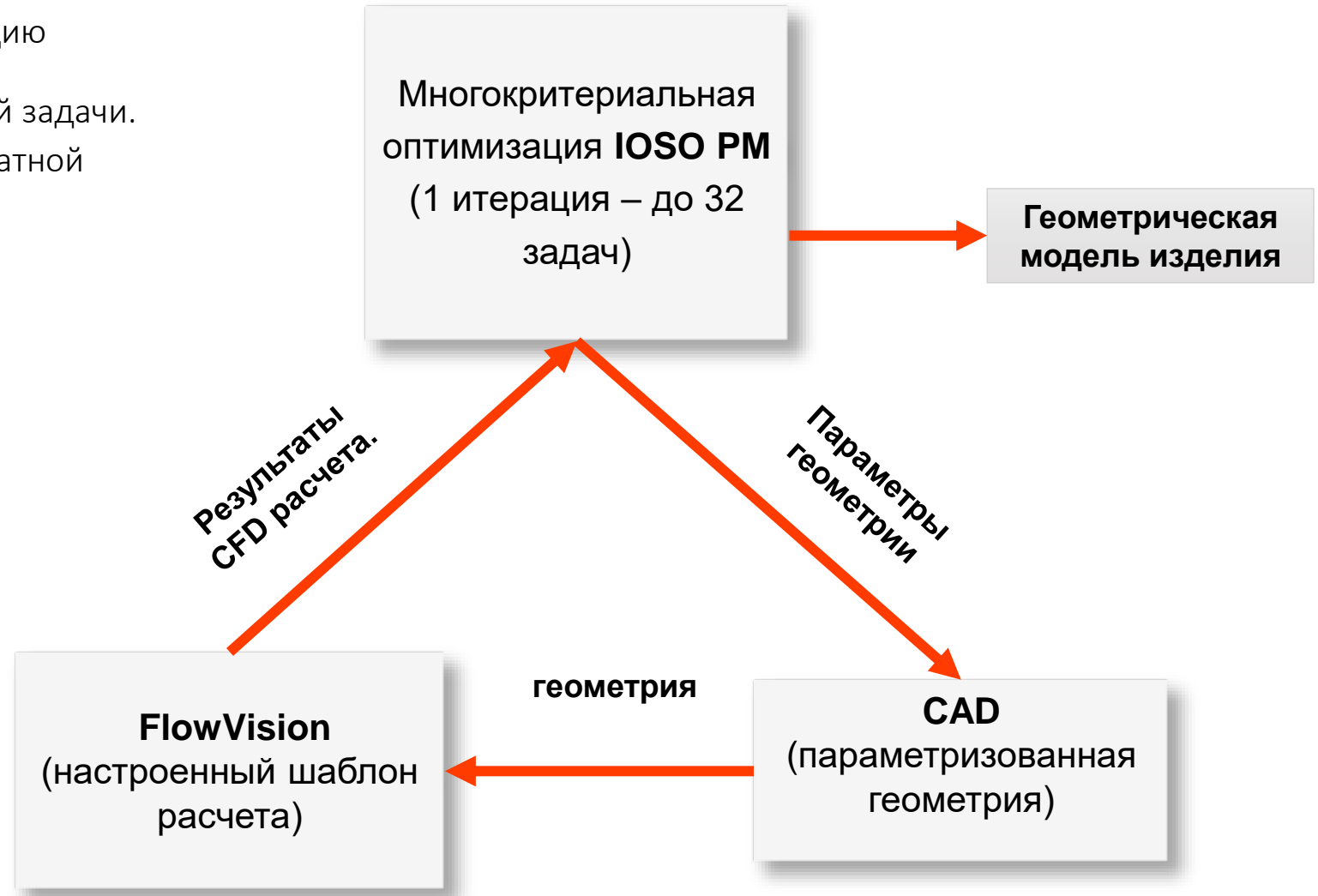
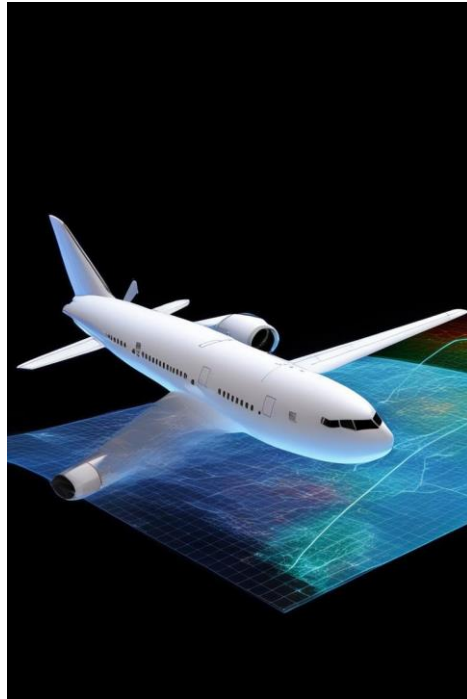
1500/2500 m

1000/2000 m

500/1500 m

## Движемся к САПР

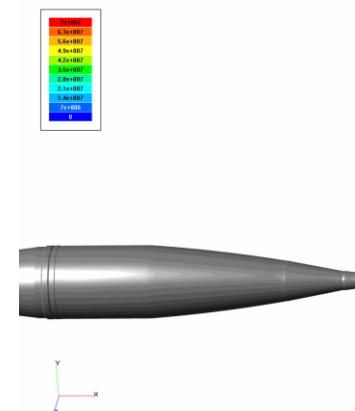
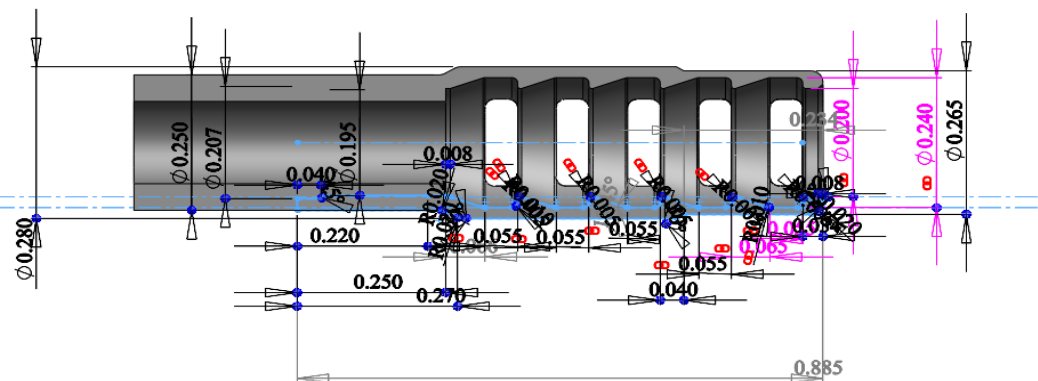
- Задача САПР – определить конструкцию изделия по ТЗ
- САПР по сути – это решение обратной задачи.
- Универсальный способ решения обратной задачи – оптимизация.



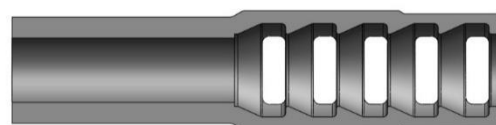
# Автоматическое проектирование дульного тормоза



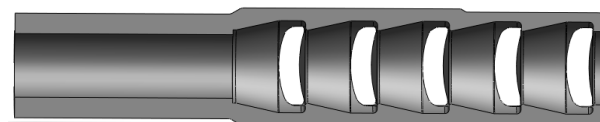
- Параметризация ДТ - 7 параметров
- Нужно найти максимум тянущего импульса силы



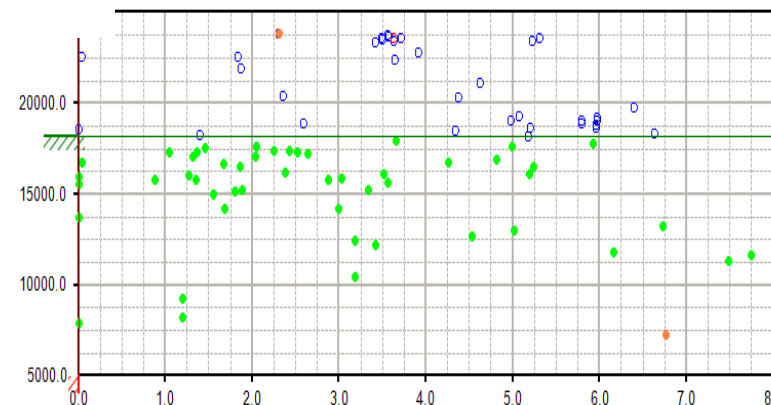
Исходная геометрия



Оптимальная геометрия



**Оптимизация позволила увеличить импульс силы на 24% по сравнению с исходной конструкцией!!!**



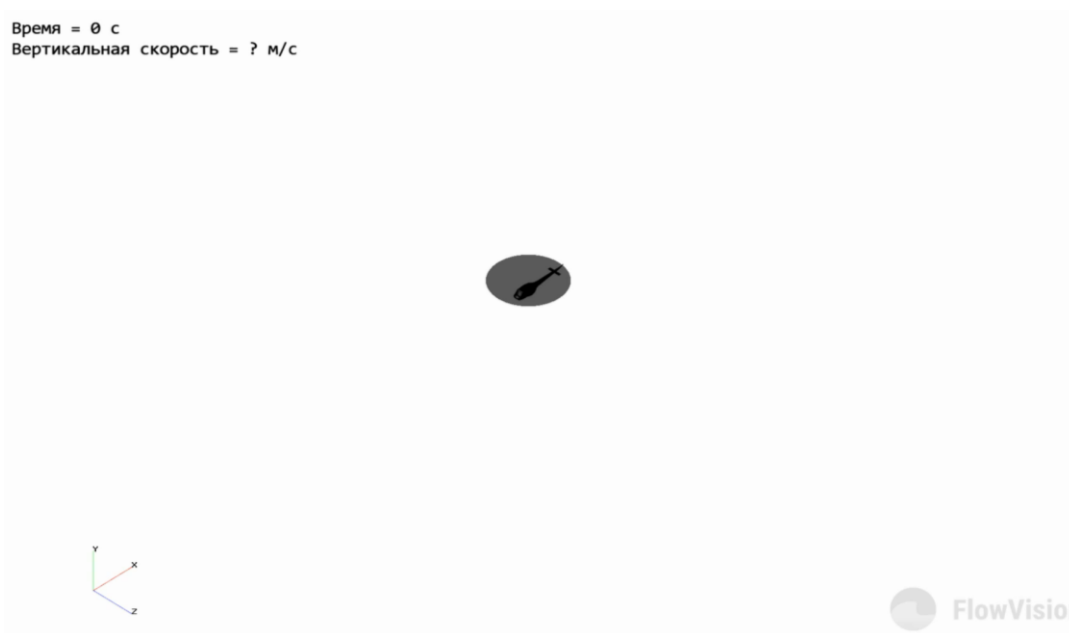
Зависимость тянущего импульса силы от одного из параметров

## Посадка вертолета в пустыне

---



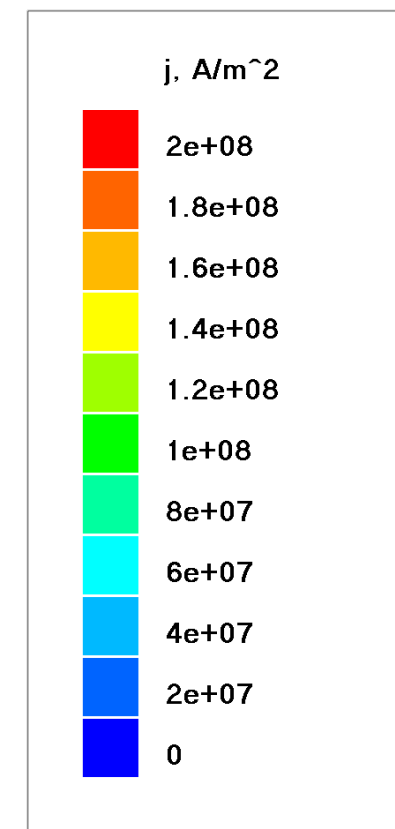
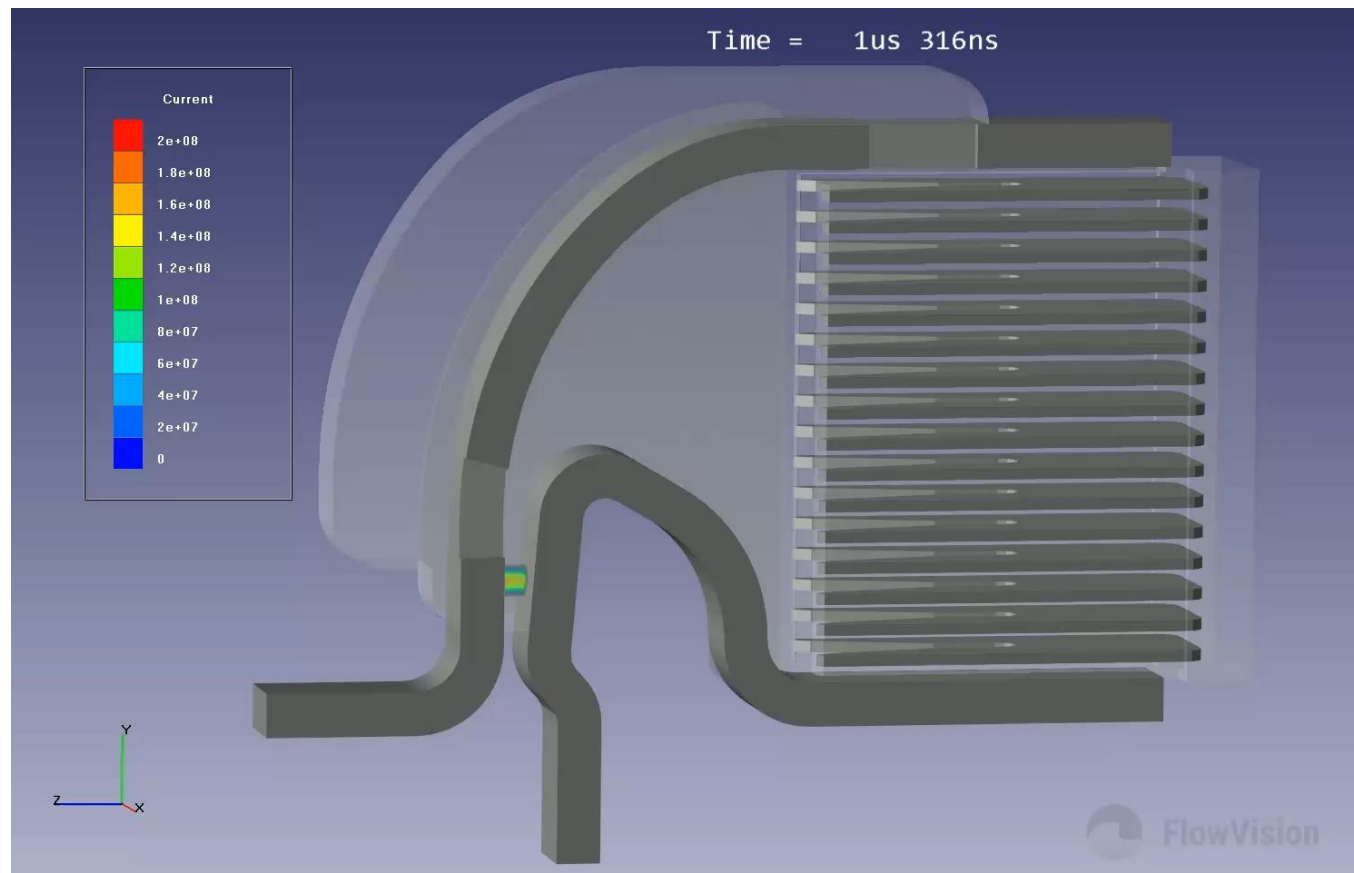
Время = 0 с  
Вертикальная скорость = ? м/с





Плотность тока  $j$ , [A/m<sup>2</sup>]

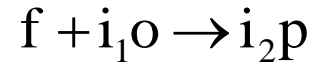
Плотность тока



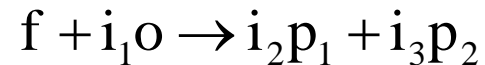
# Горение газа

- Зельдович
- Аррениус
- Магнуссен
- Аррениус - Магнуссен
- EDC

Одна брутто-реакция:



или



Аррениус:

$$W_f = W_{kin} = A T_{abs}^n e^{-B/T_{abs}} \rho^2 Y_f^{n-f} Y_o^{n-o}$$

Магнуссен:

$$W_f = W_{turb} = C \left( \frac{\mu \varepsilon}{\rho k^2} \right)^{0.25} \rho \frac{\varepsilon}{k} \min \left( Y_f, \frac{Y_o}{i_1} \right)$$

Аррениус - Магнуссен:

$$\frac{1}{W_f} = \frac{1-\gamma}{W_{kin}} + \frac{\gamma}{W_{turb}}$$

Мат. модель	Горение
Коэффициент шага по вре...	1
Шмидт	1
Явная схема	Нет
Абляция	(нет)
Модель горения	Аррениус
i_1	16.92
i_2	17.92
i_3	0
T воспламенения	50
Альфа мин.	0.2
Альфа макс.	2.5
Новые пределы горения	Нет
A	10000000000
n	0
B	18400
n_f	1
n_o	1
C	23.6
Горючее	Природный газ_Газовая (равнов...
Окислитель	Воздух_Газовая
Продукт-1	Природный газ+Воздух, продукт...
Продукт-2	(нет)

- Зельдович
- Аррениус
- Магнуссен
- Аррениус-Магнуссен
- EDC

# Горение газа

## EDC = Eddy Dissipation Concept:

Magnussen, B. F. (2005) "The Eddy Dissipation Concept. A bridge between science and technology" // Invited paper at ECCOMAS Thematic Conference on Computational Combustion, Lisbon, June 21-24, 2005, 25 p.

Модель предполагает, что химические реакции протекают в узких ламинарных зонах ("тонких структурах") между турбулентными вихрями. Концентрации горючего и окислителя в этих зонах, частично заполняющих расчётную ячейку, отличаются от своих средних (по объёму ячейки) значений. Они определяются из условия равенства скоростей турбулентной диффузии и ламинарного горения и, в свою очередь, определяют температуру и плотность "тонких структур" в ячейке.

$$\frac{\partial(\rho Y_f)}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\rho Y_f \mathbf{V}) + \vec{\nabla} \cdot \mathbf{J}_{f,eff} = -W_f$$

$$W_f = \frac{\rho}{m_f} \frac{2.43 \left(\frac{\varepsilon}{\nu}\right)^{0.5}}{1 - \gamma^0} (Y_f - Y_f^0) = \frac{\rho}{\rho^0} W_{kin}(Y_f^0, Y_o^0)$$

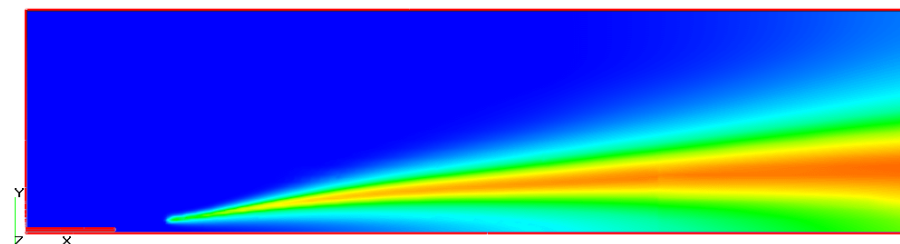
$$\gamma^0 = \left[ 2.13 \left(\frac{\nu \varepsilon}{k^2}\right)^{0.25} \right]^2 = \text{массовая доля "тонких структур" в расчётной ячейке}$$

# Горение газа

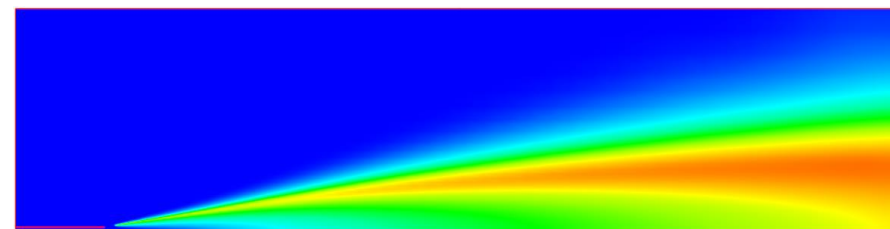
## Тестовая задача “Струя природного газа”



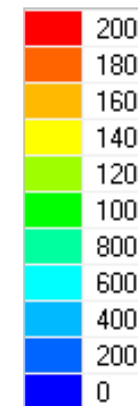
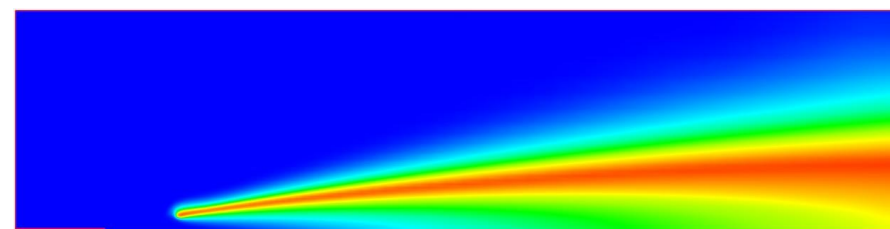
FV2  
AM



FV3  
AM



FV3  
EDC



Распределение температуры, °C

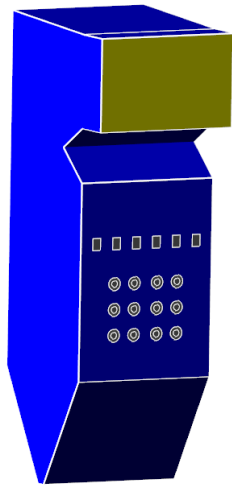
Эксперимент: 23.07.2007 г. ТЭЦ ОАО «Мосэнерго».  
В трубку подается газ, струя поджигается и пламя стабилизируется на струе. Расстояние факела от торца трубки  $H=8...10d$

# Горение, в том числе угольных частиц

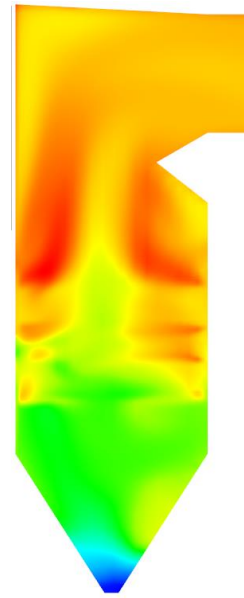


Общий вид горелки

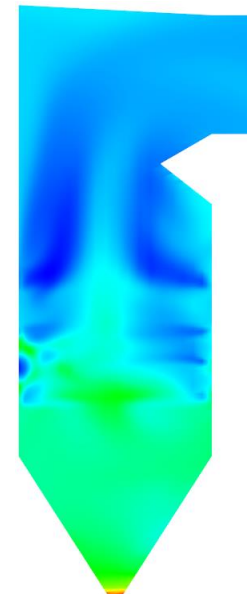
- Определение полноты сгорания горючего
- Определение уровня вредных окислов
- Подавление резонансных явлений в камере
- Горючее – дисперсный уголь



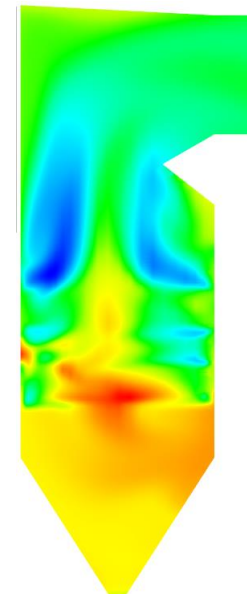
Общий вид котла



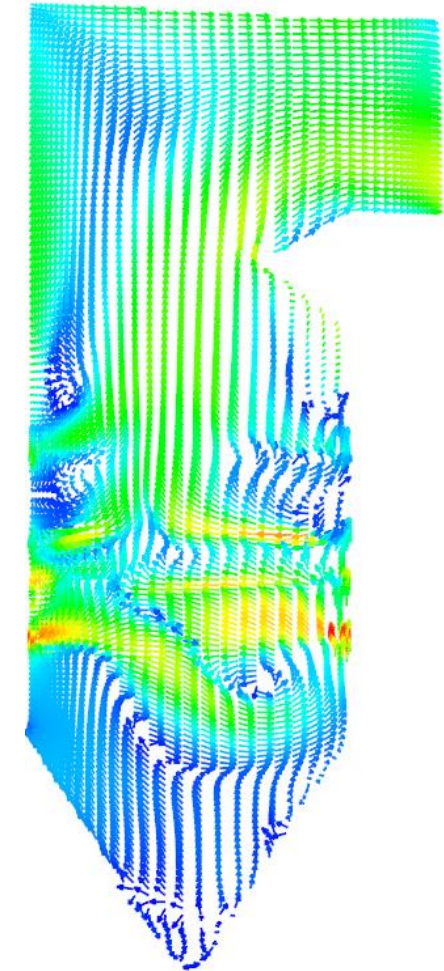
Температура  
газа



Концентрация  
частиц



Массовая  
доля пара



Распределение  
скорости угля

Спасибо за внимание

[info@tesis.com.ru](mailto:info@tesis.com.ru) [andrey@tesis.com.ru](mailto:andrey@tesis.com.ru)

Мы любим моделировать Природу.

