

FlowVision

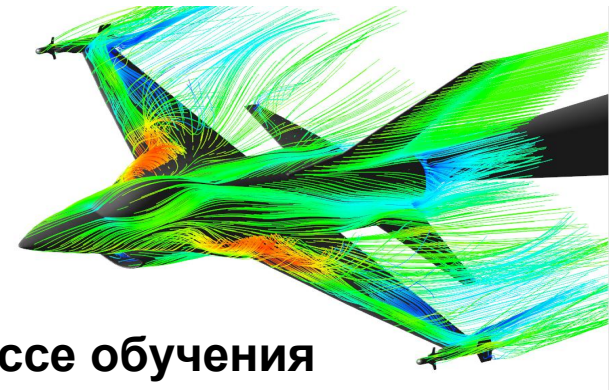
Аксенов А.А

Технический директор ТЕСИС

к.ф.-м.н.

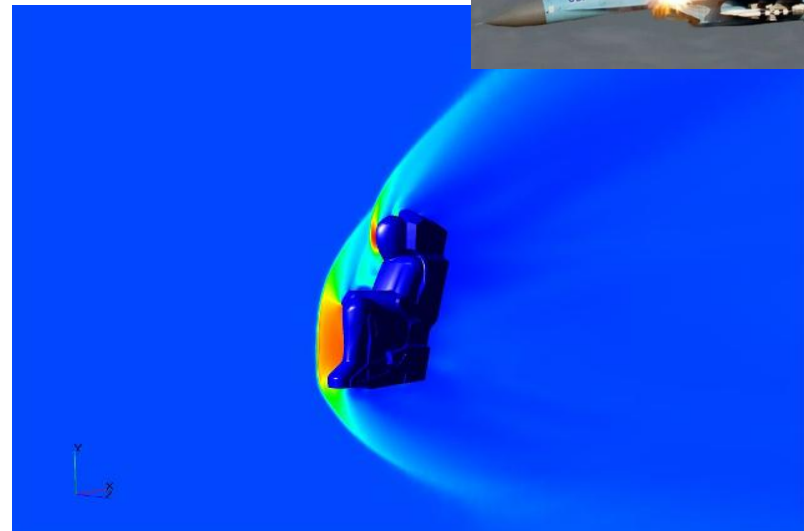
Общие цели и задачи FlowVision

- Код общего назначения для *решения сложных междисциплинарных задач* промышленной аэрогидродинамики с учетом сложной физики
- Предназначен как *инструмент автоматизации инженерных расчетов (CAE)* инженеров-конструкторов предприятий на всех стадиях ЖЦ изделия
 - Разработка концепции продукта
 - Проектирование
 - Изготовление
 - Наладка, техподдержка
 - Утилизация
- Предназначен для использования в процессе обучения студентов



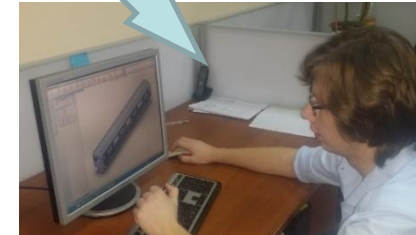
FlowVision – сделано в России

- Разрабатывается в компании ТЕСИС (г.Москва)
- Ядро команды - научная школа академика О.М.Белоцерковского
- Начало разработки FlowVision – 1991г.
- Основные разработчики - выпускники МФТИ, МГУ, МАИ, МГТУ им. Баумана



.Концепция FlowVision

- Минимизация ручного труда инженера-расчетчика.
- Реализация истинной CAE системы – системы автоматизации инженерных расчетов. Сам FlowVision уже не нужно дальше автоматизировать.
- **FlowVision – вижу течение: что вижу, то понимаю.**
- Численное моделирование на FlowVision:
 - **от качественных до количественных результатов**
 - от быстрых до тяжелых расчетов
 - от простых до сложных сопряженных задач
 - **от использования персонального компьютера до суперкомпьютера**
 - от неспециалистов до профессионалов в области ВГД.
- Сильная обратная связь Пользователь<->Разработчик FlowVision



Интеграция Междисциплинарные задачи

Взаимодействие жидкости (газа) и конструкций

- ABAQUS (Dassault), ЛЭГАЗ-ДК (Саров), NASTRAN (MSC), ФИДЕСИС
- 1 и 2-стороннее связывание, решения сильных задач FSI.

Акустика

- LMS Virtual.Lab:

Биологическая защита атомных реакторов

- TORT (нейтронная физика):

Поиск наилучших конструкторских решений (оптимизация)

- IOSO (оптимизатор и интегратор)

Визуализация

- EnSight (CEI)



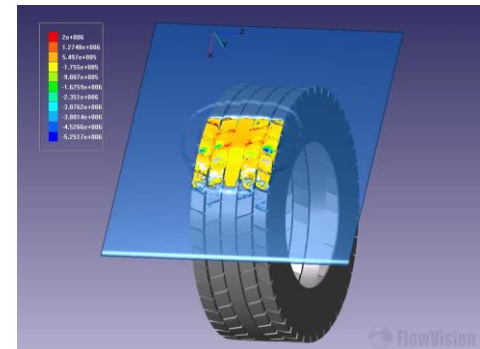
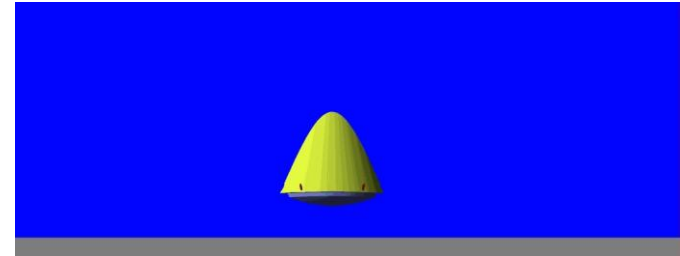
Интеграция Партнеры

- НИЦ Курчатовский институт
- ОИВТ РАН
- ЦАГИ (Жуковский + Москва)
- ОКБМ
- РФЯЦ-ВНИЭФ
- Dassault
- Сигма Технологии
- Аскон
- Топ Системы



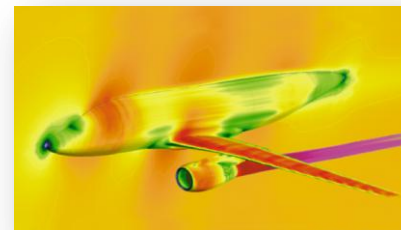
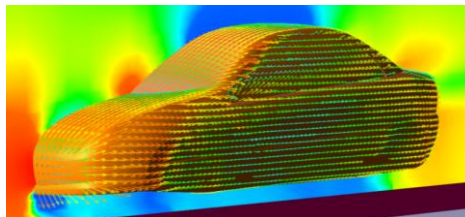
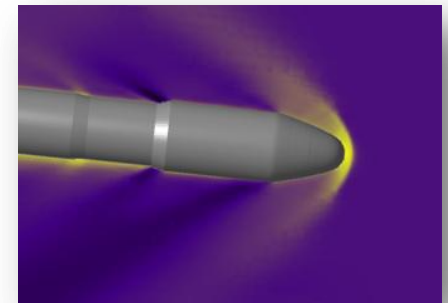
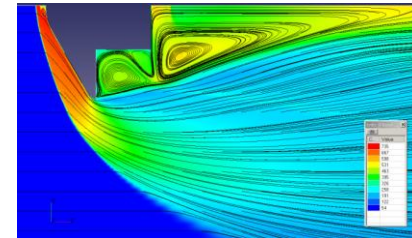
Базис FlowVision

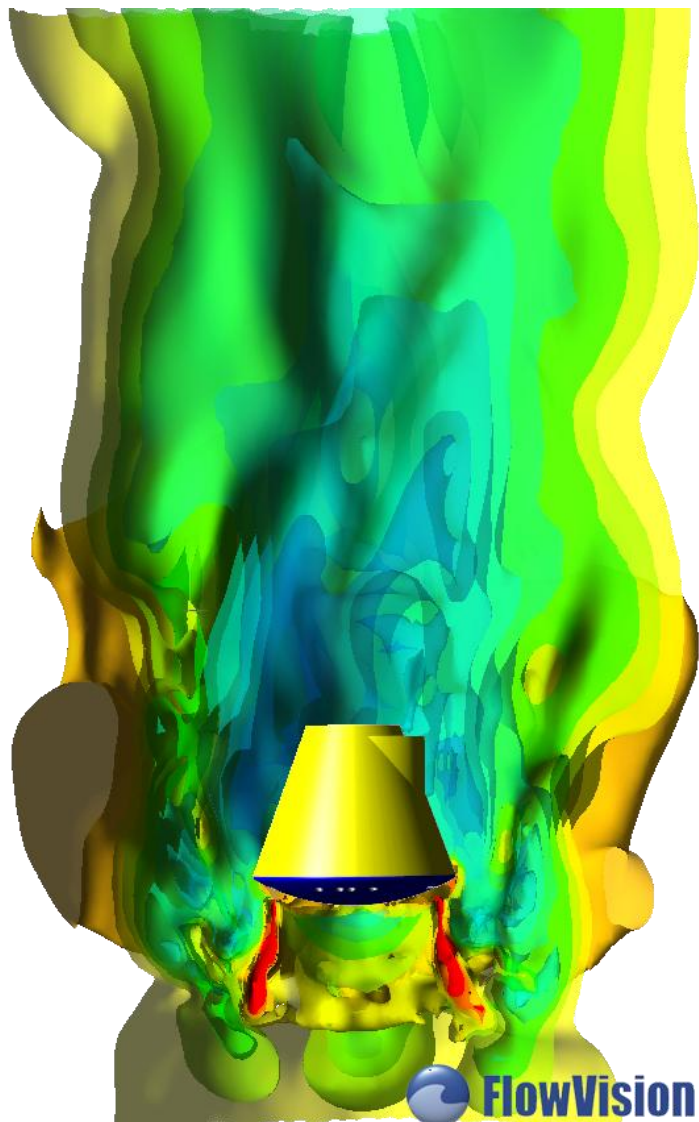
- Полностью автоматическая генерация расчетной сетки с локальной динамической адаптацией
Расчетная сетка есть решение!
- Разрешение пограничных слоев - без ограничения на сложность поверхности
- Моделирование взаимодействия жидкости/газа с подвижными и гибкими конструкциями
- Моделирование движения многофазной жидкости с контактными границами
- Широкий спектр физических моделей (турбулентность, массоперенос, химия, горение, дисперсные фазы)
- Проведение расчетов на современных суперкомпьютерах с гетерогенным параллелизмом ($> 10^4$ ядер, $> 1e8$ ячеек)



Классы моделируемых течений

- Течения при любых числах Маха – от несжимаемого течения ($M=0$) до гиперзвука
- Сопряженный теплообмен
- Многофазность
 - Контактная граница (свободная поверхность) между двумя объемными фазами
 - Моделирование дисперсной фазы
 - Пористость
- Горение
- Химреакции
- Радиационный теплообмен
- Электродинамика, джоулево тепловыделение





**Что новенького за
2015?**

Новый метод расщепления all-Mach, где лошадь стоит впереди телеги

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

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

Температура

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



Сравнение новой схемы «передний привод» с неявной схемой расщепления

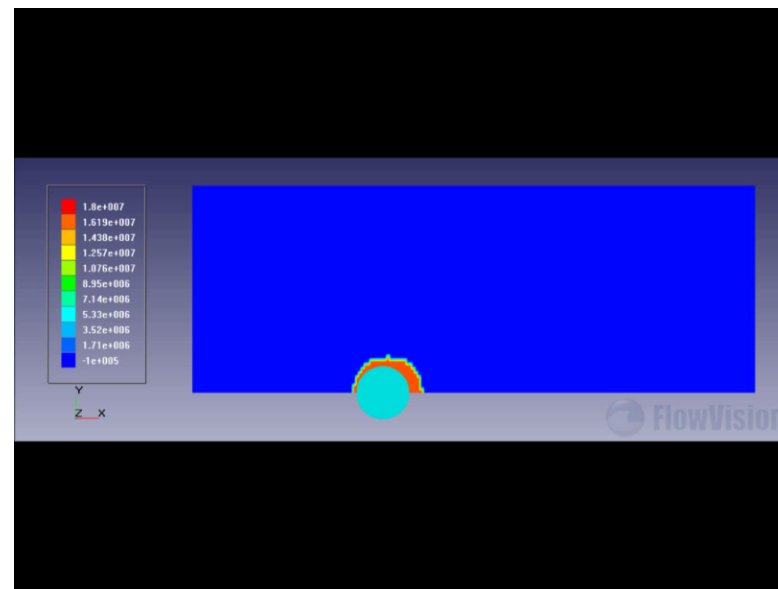
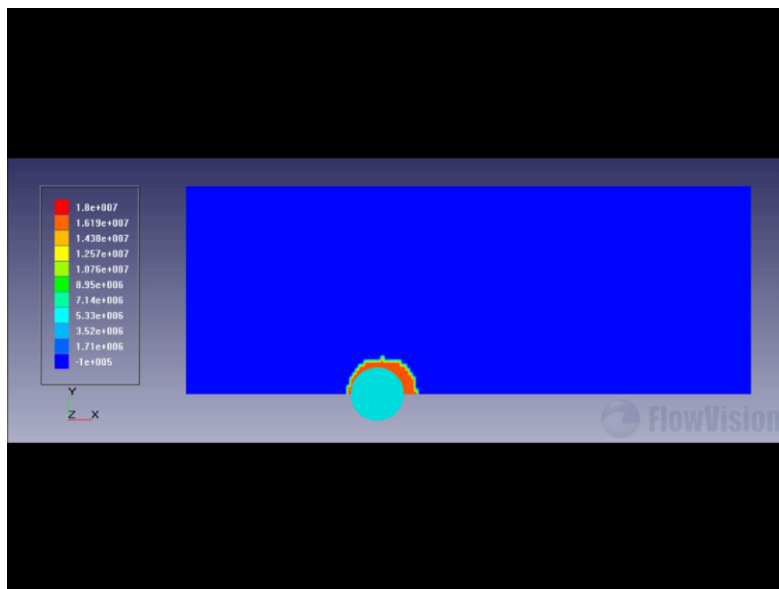
Гиперзвуковое обтекание цилиндра при $M=15$

Шаг по времени: КОНВЕКТИВНЫЙ CFL =10. Сетка: 200x50.

Схемы расщепления

классическая неявная

«передний привод»

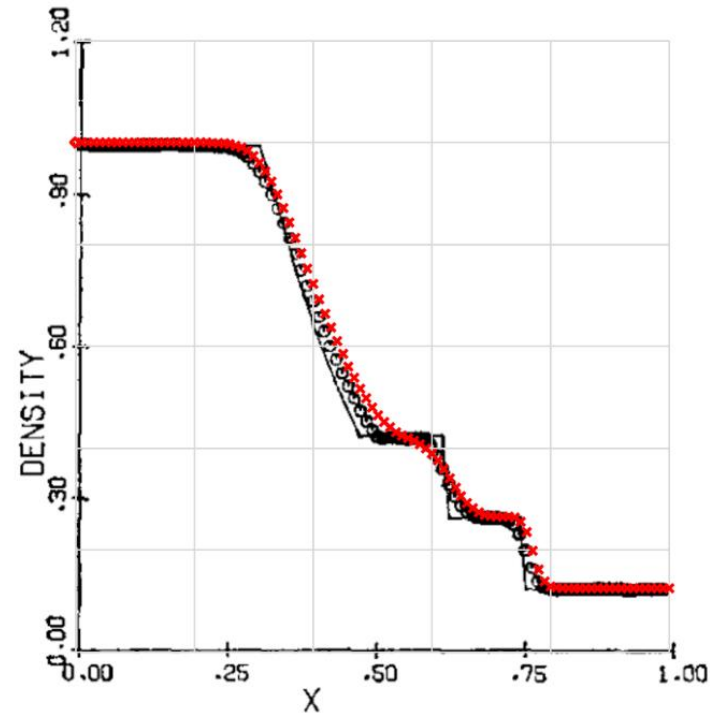
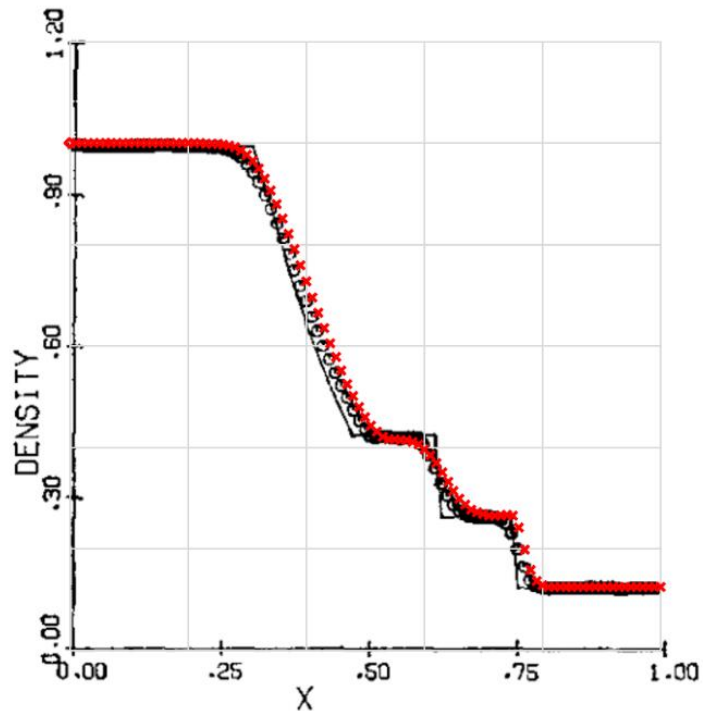


Задача Сода

Расчет конвективных членов:

схема 2-го порядка точности

upwind



Точное решение

o

Схема Годунова (из статьи Сода)

x

FlowVision



Проблемы метода VOF

Разрешение тонких структур

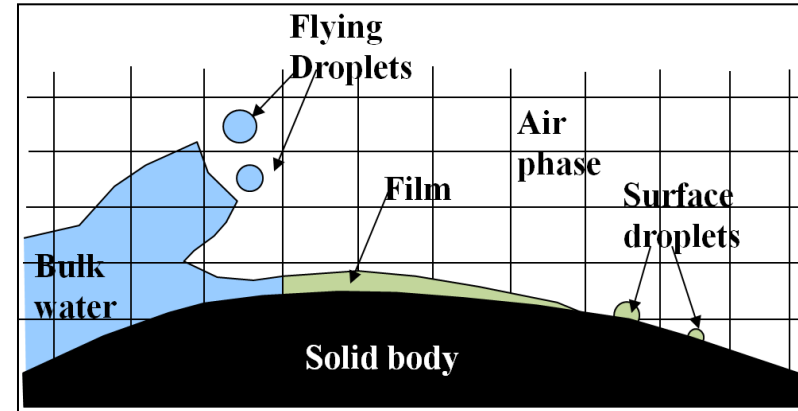
- Невозможно разрешить методом VOF капли, пузырьки газа, пленки, которые имеют размер меньше расчетной ячейки.

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.

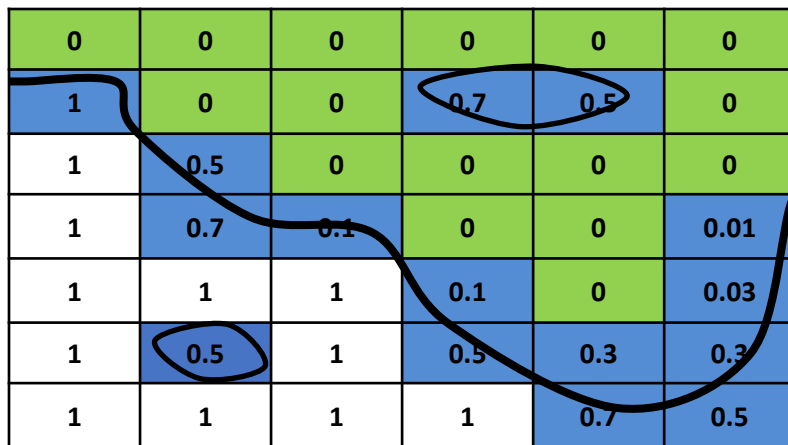
Размазывание фронта

- 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.

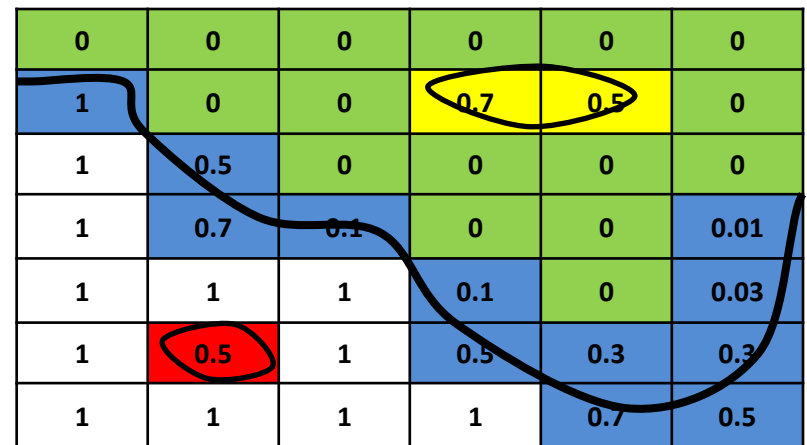


Маркировка ячеек

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



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



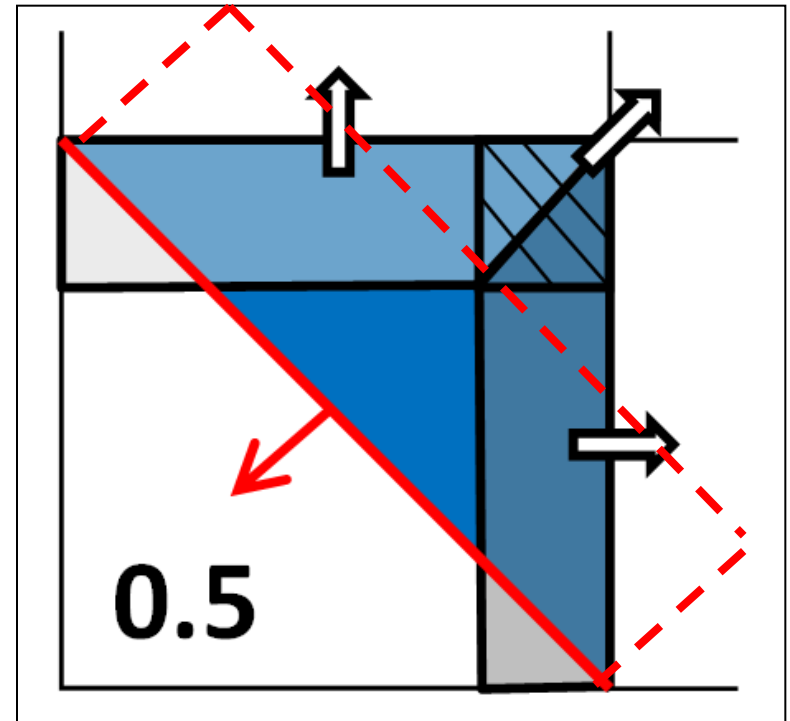
Красные ячейки – BUBBLE,
Желтые – DROPLET



Расчет переноса VOF – скошенная схема

Расчет втекающих и вытекающих потоков в ячейке

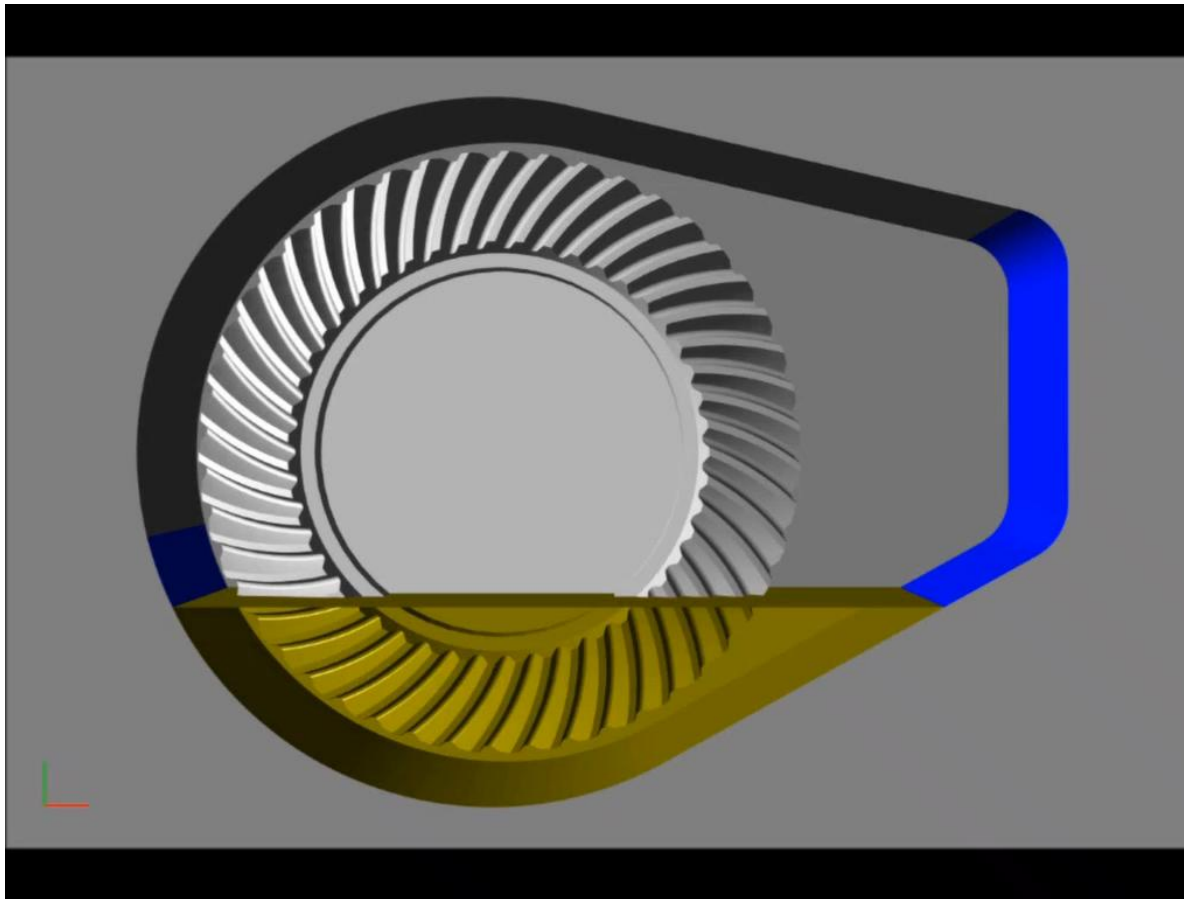
- Учитываются не только потоки к «соседям» по сторонам ячейки, но также и к «соседям» по ребрам.
- Поток VOF определяется из реконструкции поверхности внутри ячейки.



*Раздача потоков из ячейки в
скошенной схеме*

Перемешивание масла

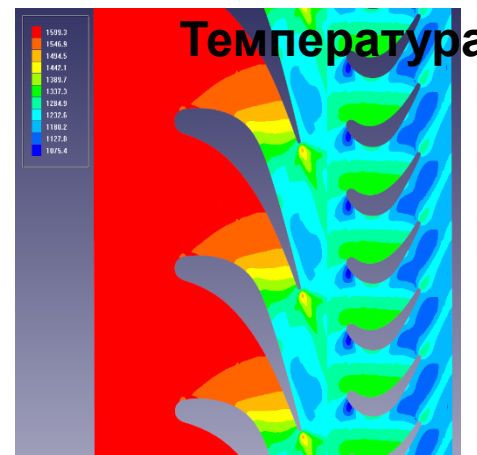
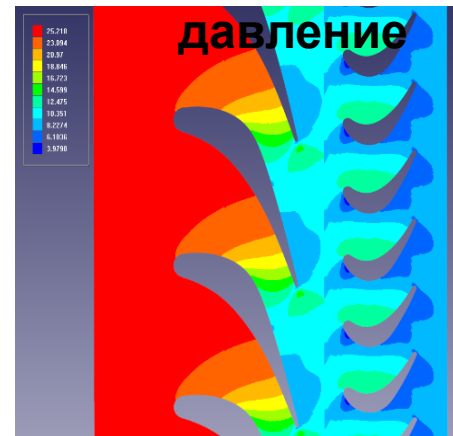
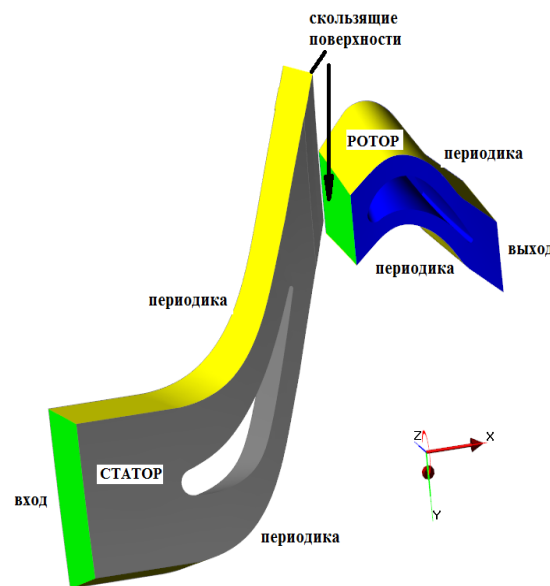
- Расчет движения воздуха и масла в замкнутой области
- Движение шестерни



Скользящая сетка

- Взаимодействие ротор-статор
- Freezing rotor
- Секторная постановка задачи

турбина высокого давления
(ТВД АЛ-31Ф для Су-27)



Неньютоновская жидкость. Закон изменения вязкости

модель Бёрд-Карро :

$$\mu_{NN} = e^{-\alpha(T-T_{ref})} \left[\mu_{NN,min} + (\mu_{NN,max} - \mu_{NN,min}) (1 + \lambda^2 S)^{\frac{n-1}{2}} \right]$$

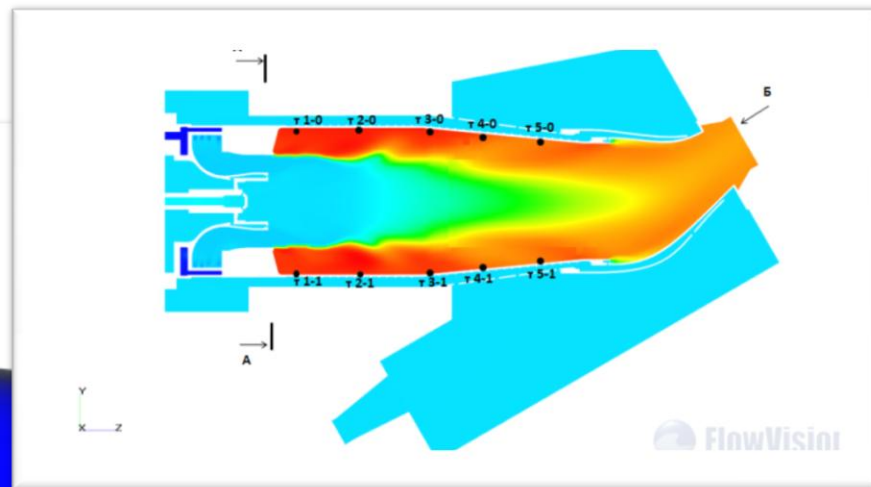
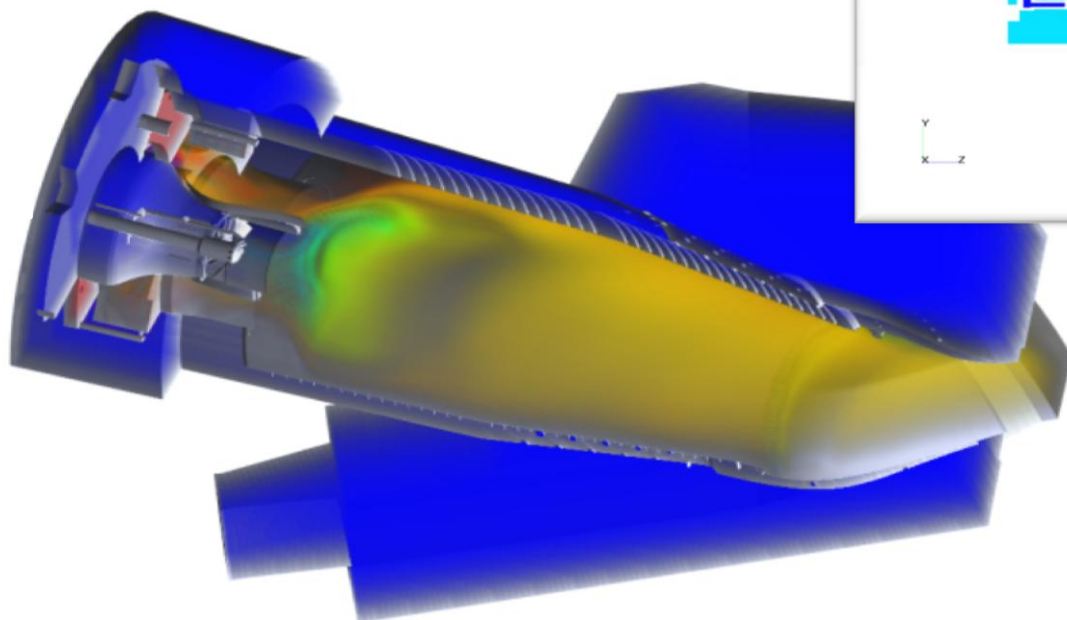
$$S = 2 \sum_{i,j} S_{ij} S_{ij} = \sum_{i,j} \left(\frac{\partial V_i}{\partial x_j} + \frac{\partial V_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial V_j}{\partial x_i}$$

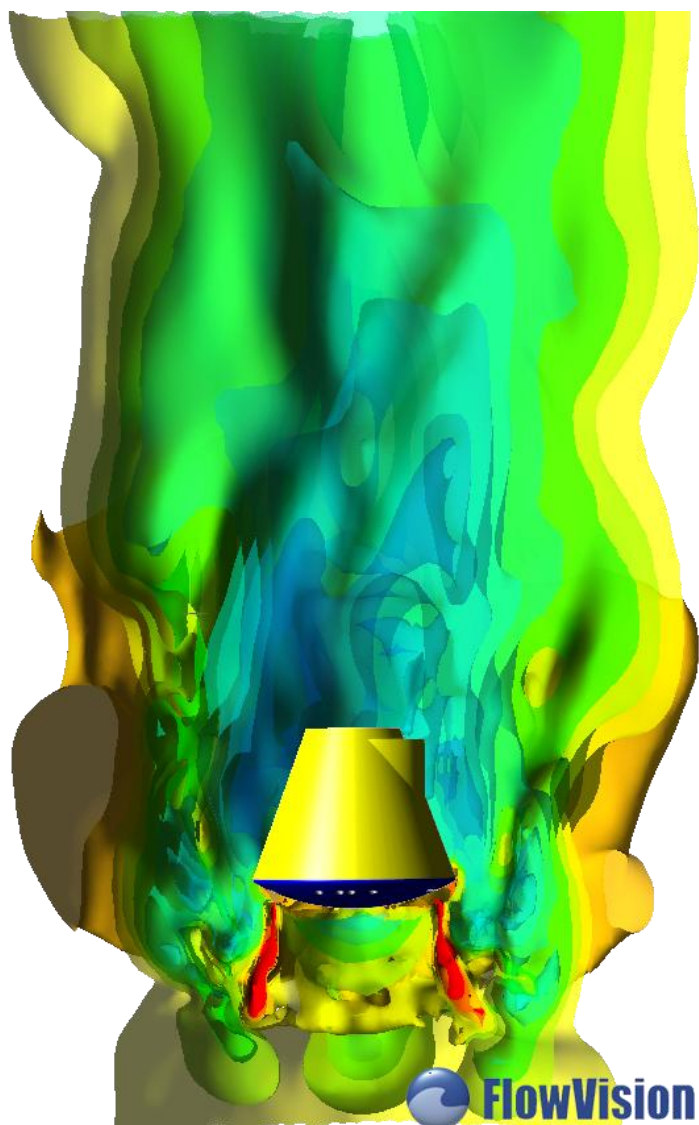
$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial V_i}{\partial x_j} + \frac{\partial V_j}{\partial x_i} \right)$$



Объемная визуализация

Рабочий процесс в камере сгорания газотурбинной установки

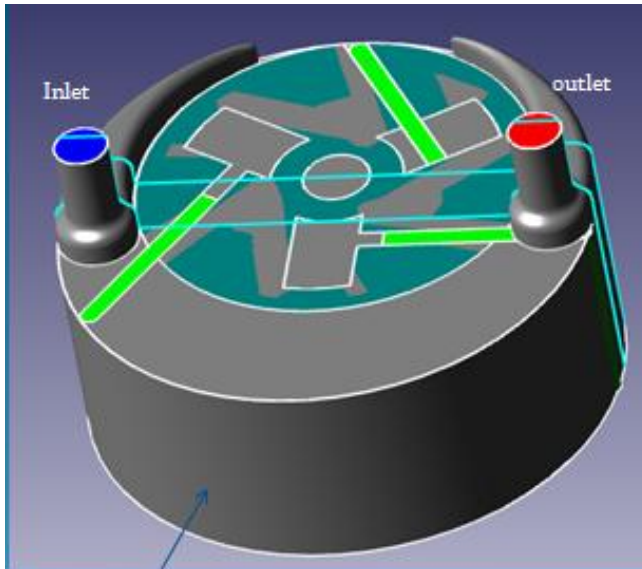




**Какие задачи
решали в 2015 или
куда идем?**

Rotating machines: Metering Pump

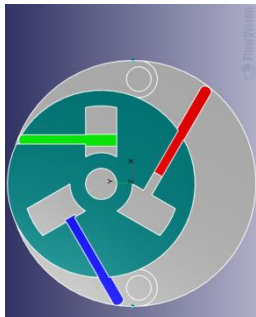
Geometry of metering pump



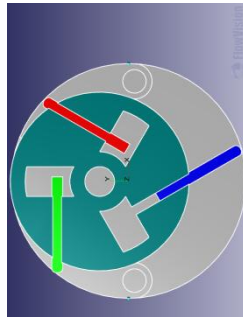
Dynamics of pressure and velocity vector fields

(movie)

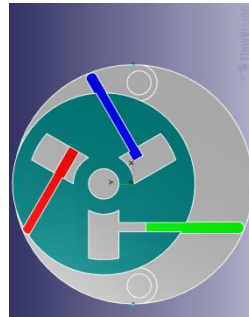
0° (360°)



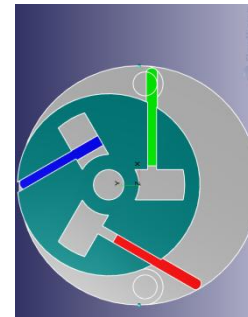
90°



180°



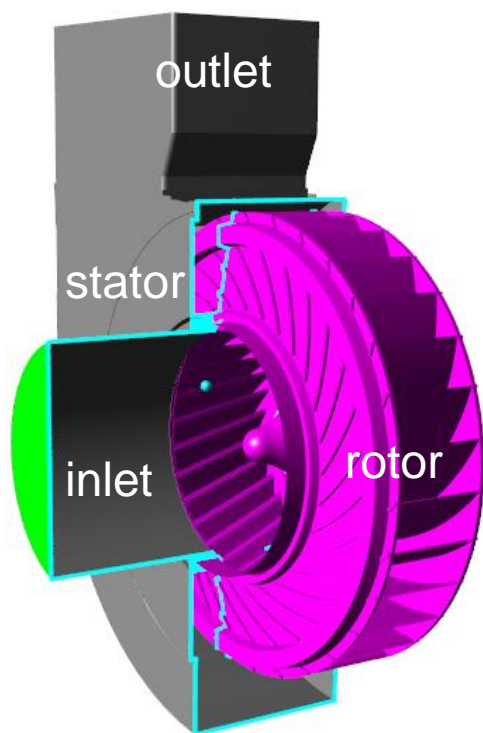
270°



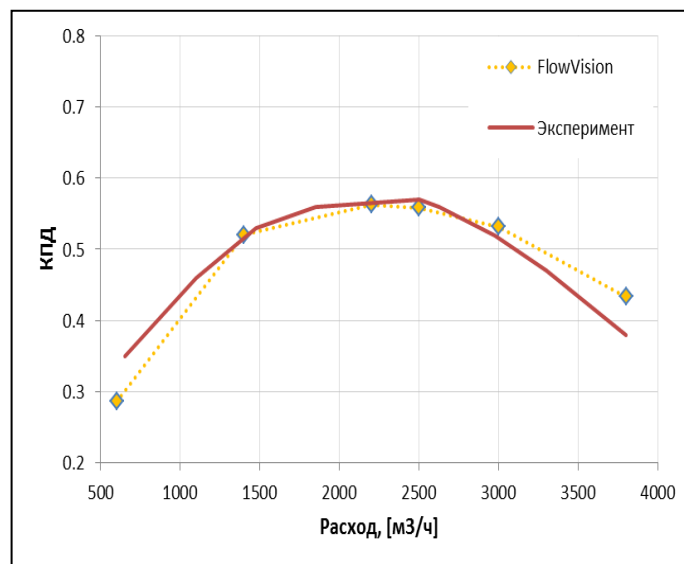
Principle of operation: rotation of telescope blades



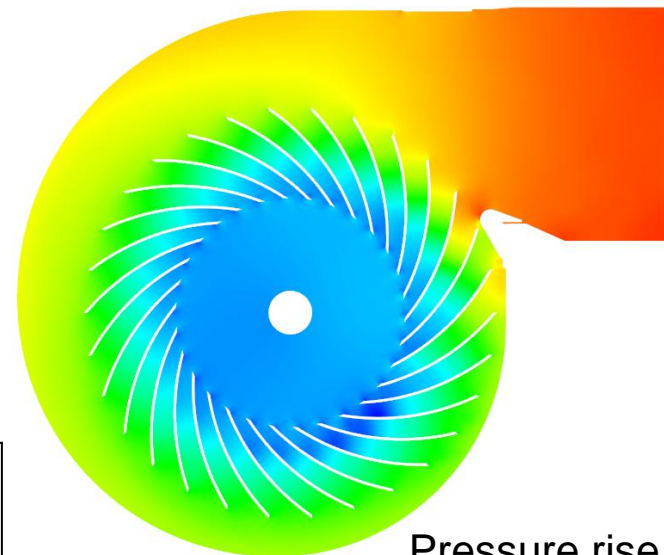
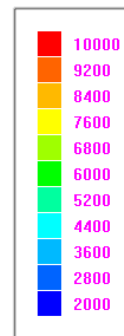
Turbomachinery, Pumps: Ventilating Blower



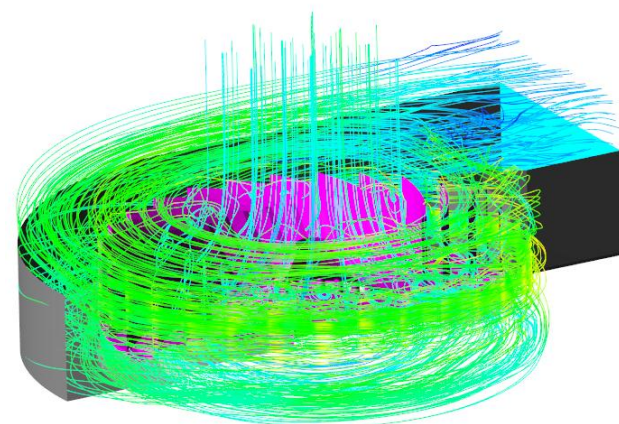
Blower design



Blower performance against mass flow rate



Pressure rise

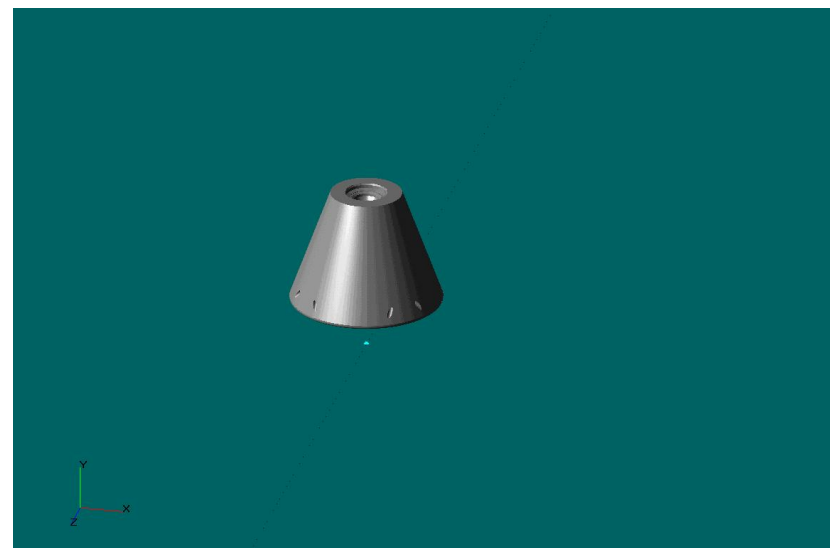
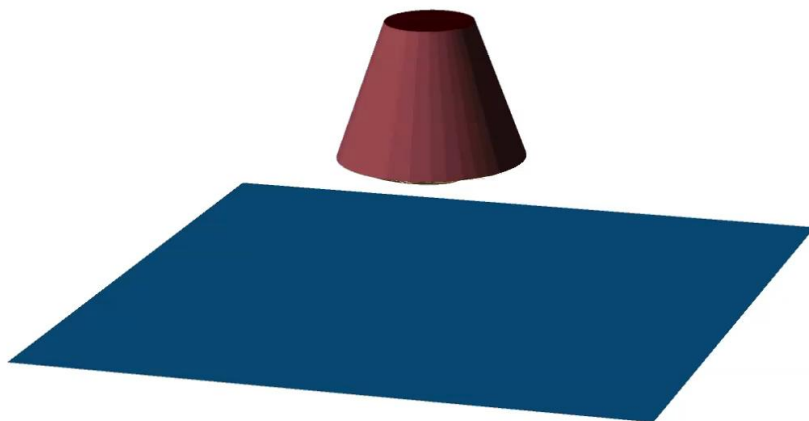


Streamline pattern



Посадка космического корабля на воду с включенной ДУ (с разрешения РКК Энергия)

- Моделирование сверхзвуковой струи из сопел ДУ
- Волнообразование
- Несжимаемое течение воды



Проект HEXAFLY (ЦАГИ-ЦИАМ-МФТИ)

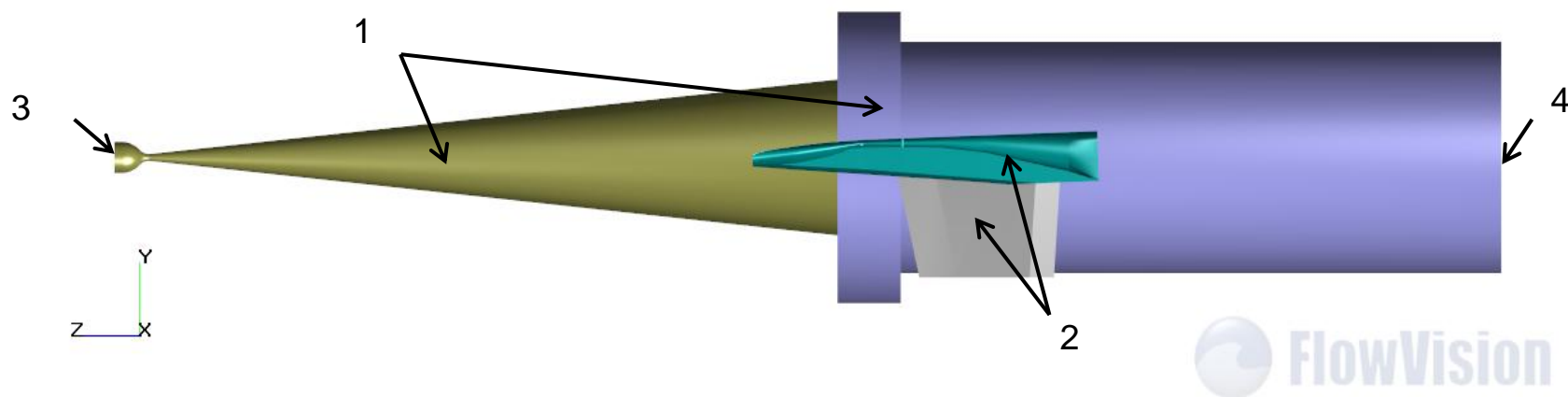
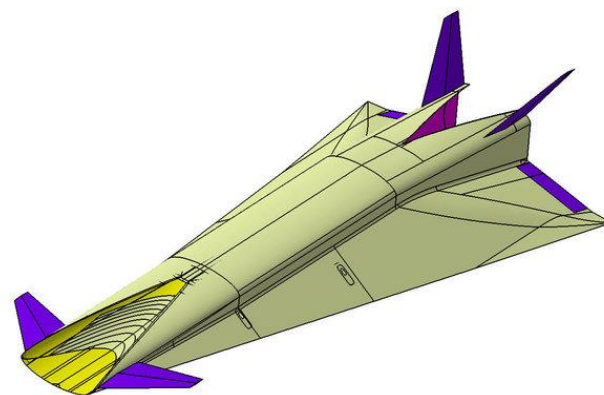
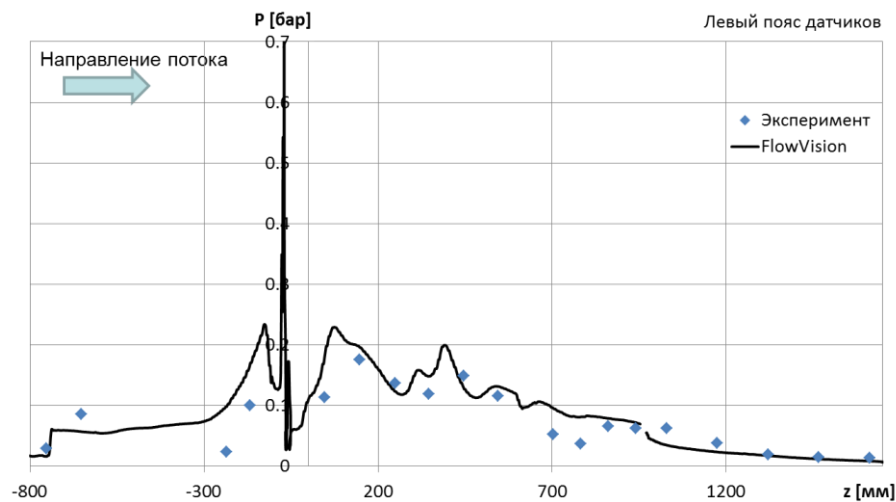
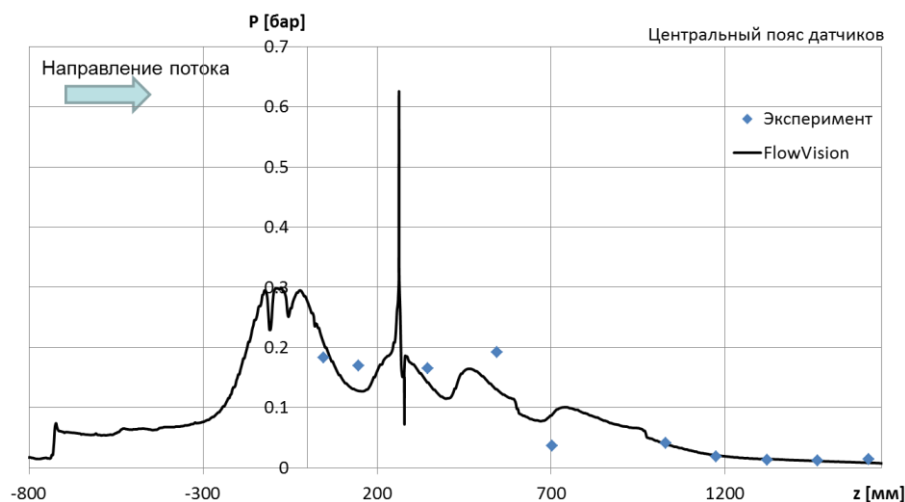
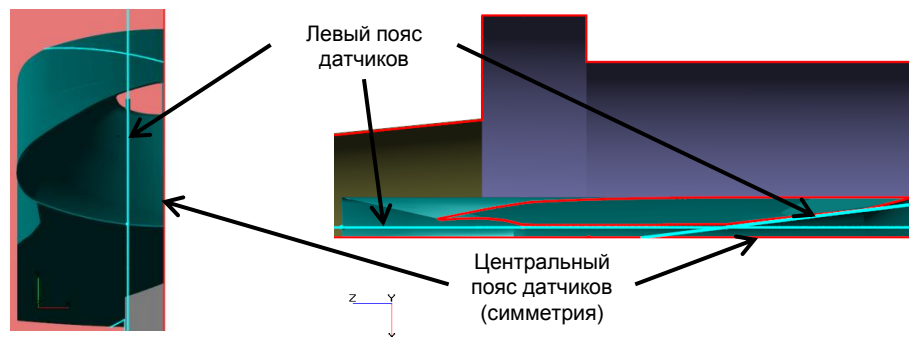


Схема экспериментальной установки ЦИАМ

- 1 - гиперзвуковая аэродинамическая труба
- 2 Пилон и модель аппарата HEXAFLY
- 3 Камера сгорания аэродинамической трубы
- 4 Выход в атмосферу



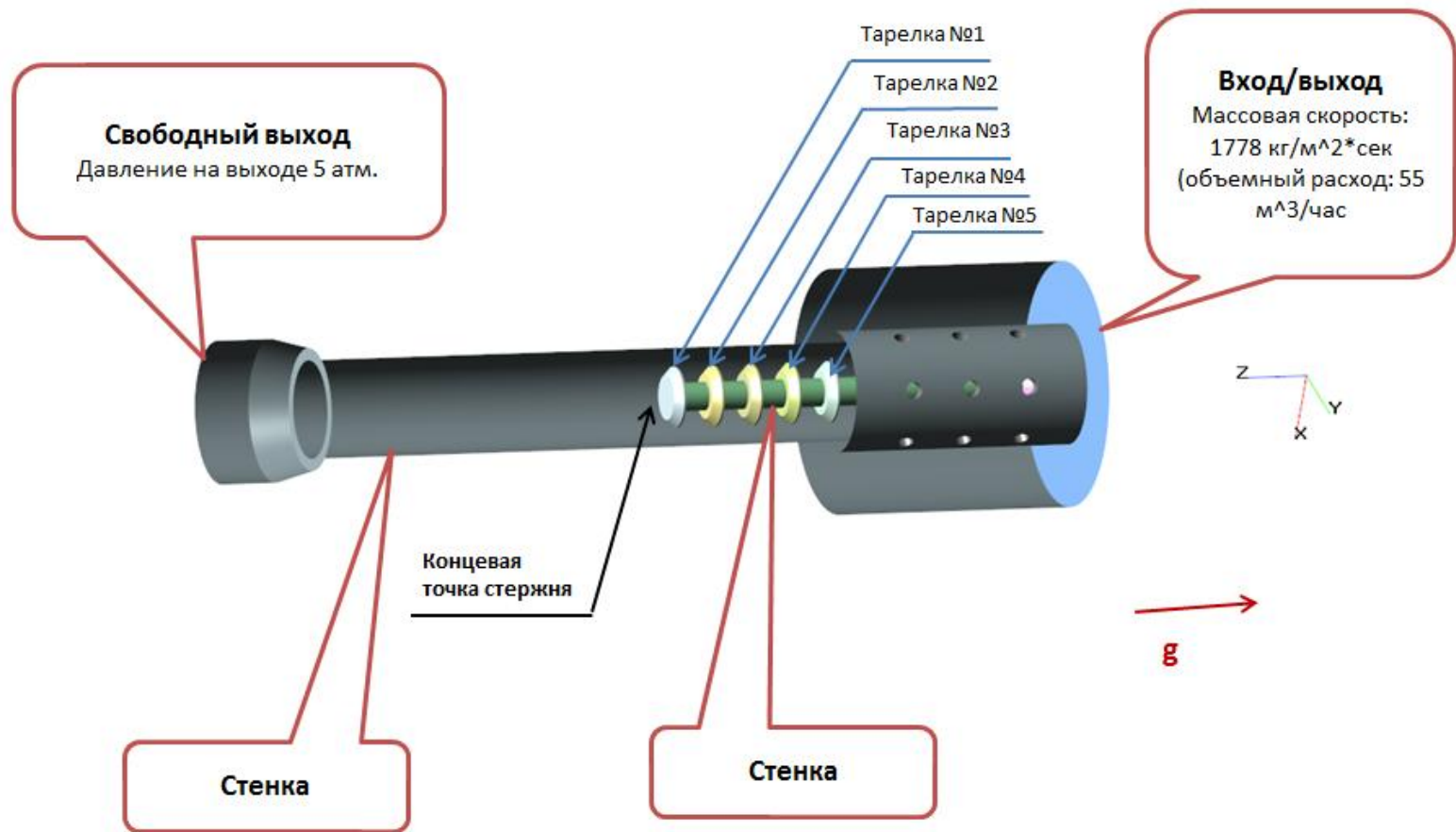
Проект НЕХАFLY (ЦАГИ-ЦИАМ-МФТИ)



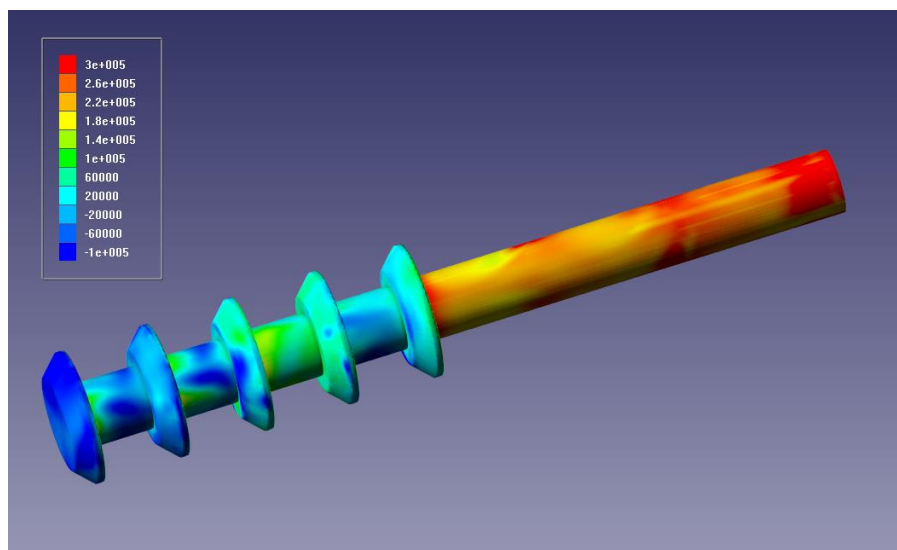
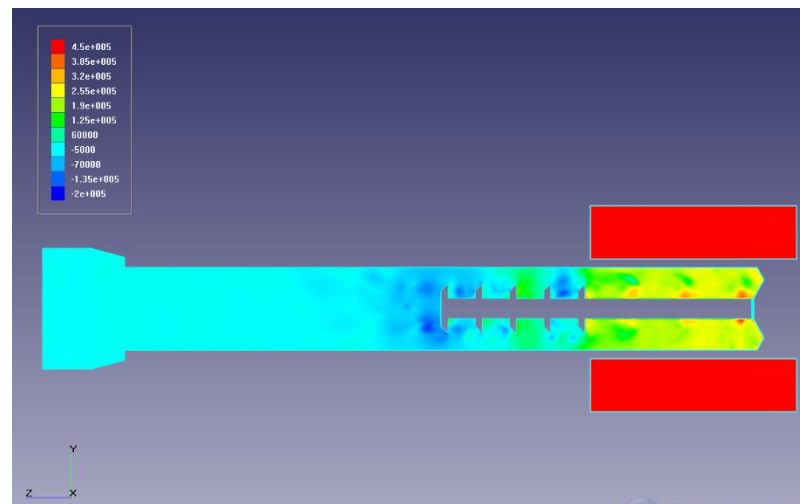
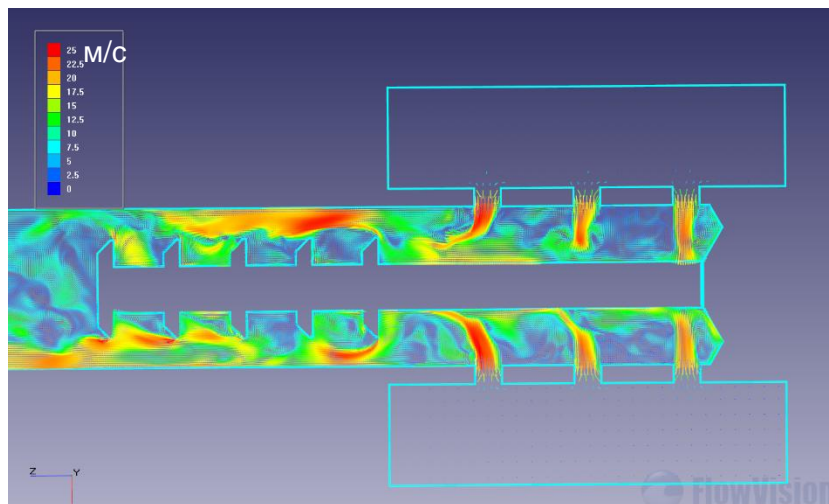
**Давление по поверхности аппарата вдоль
центрального и бокового пояса датчиков**



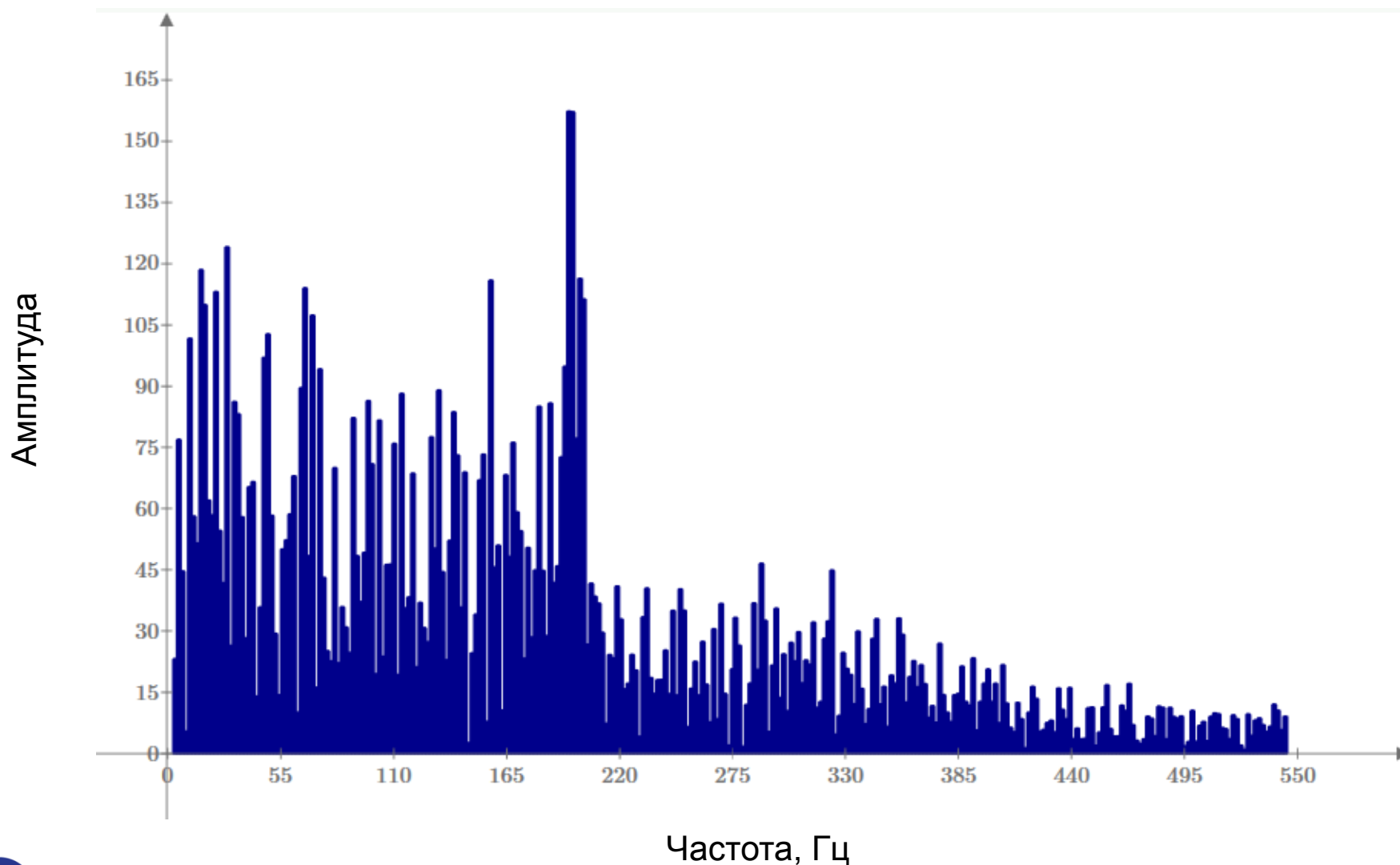
Дроссель



Поле векторов скоростей и давление

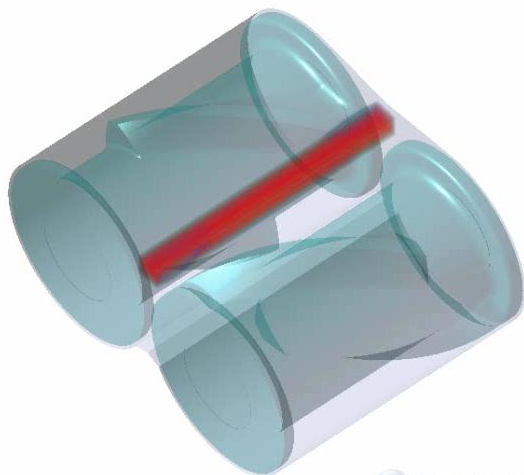
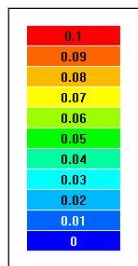


Амплитудный спектр для Γ_y



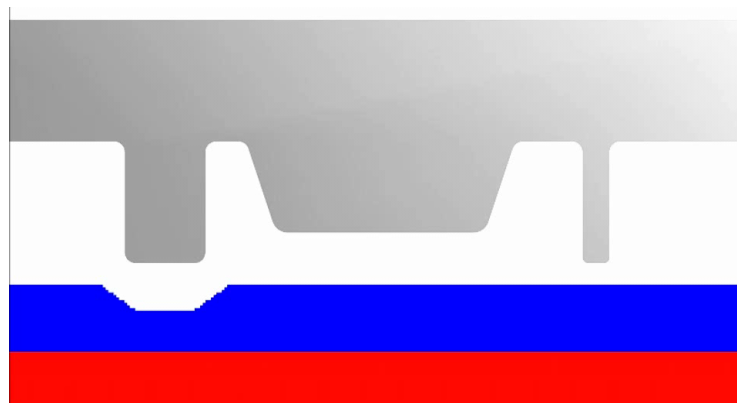
Приготовление шины из резины

Моделирование миксера

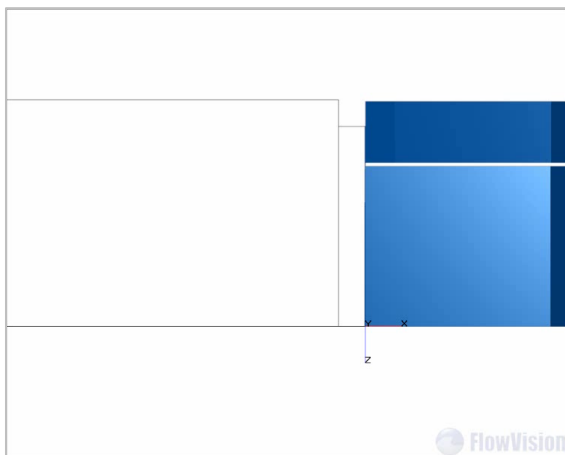


FlowVision

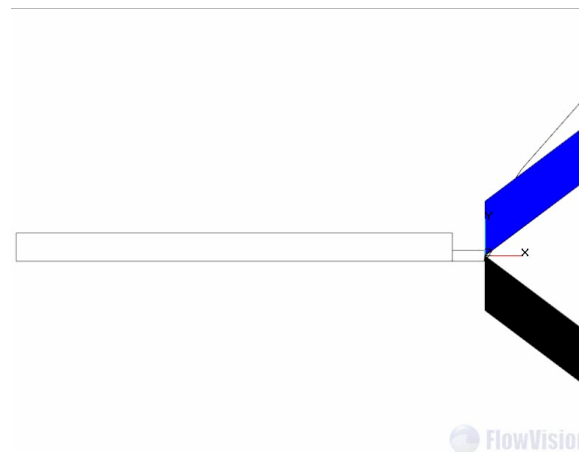
Формование резины



Моделирование экструдера

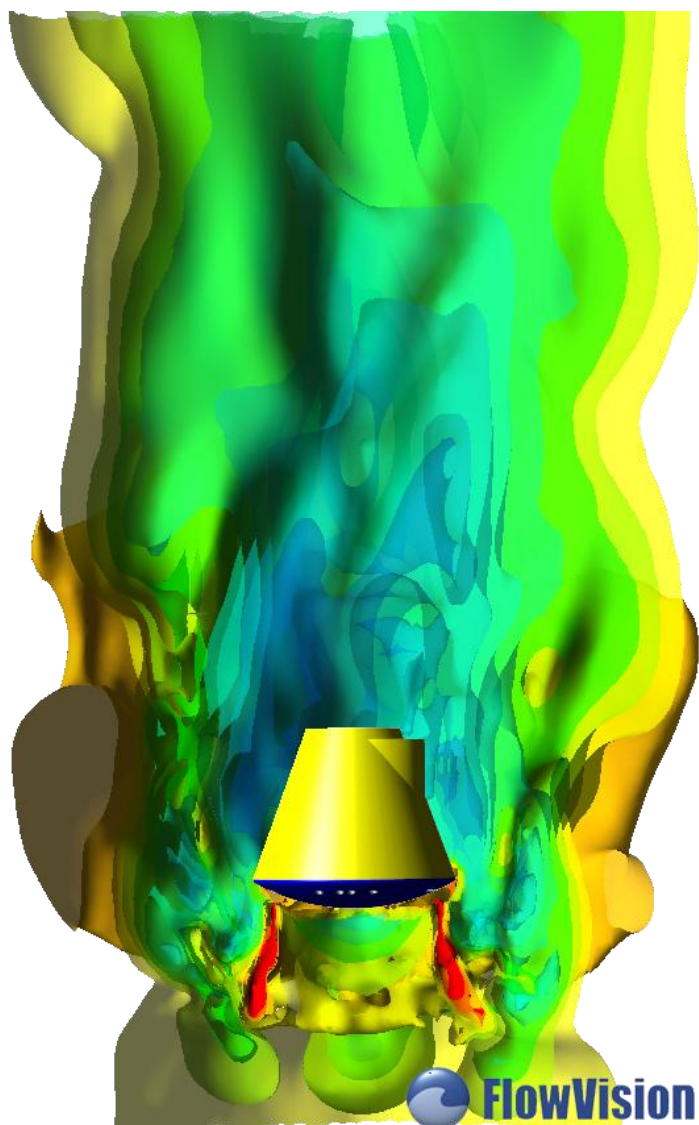


FlowVision



FlowVision

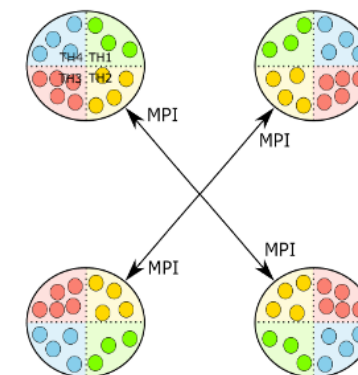
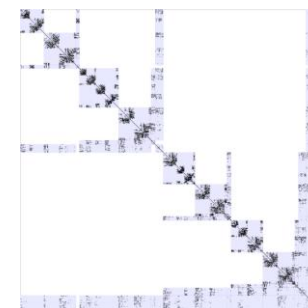
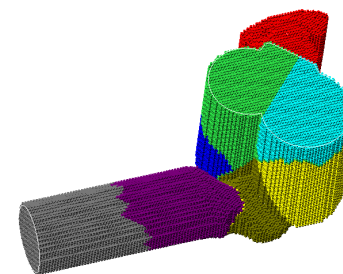


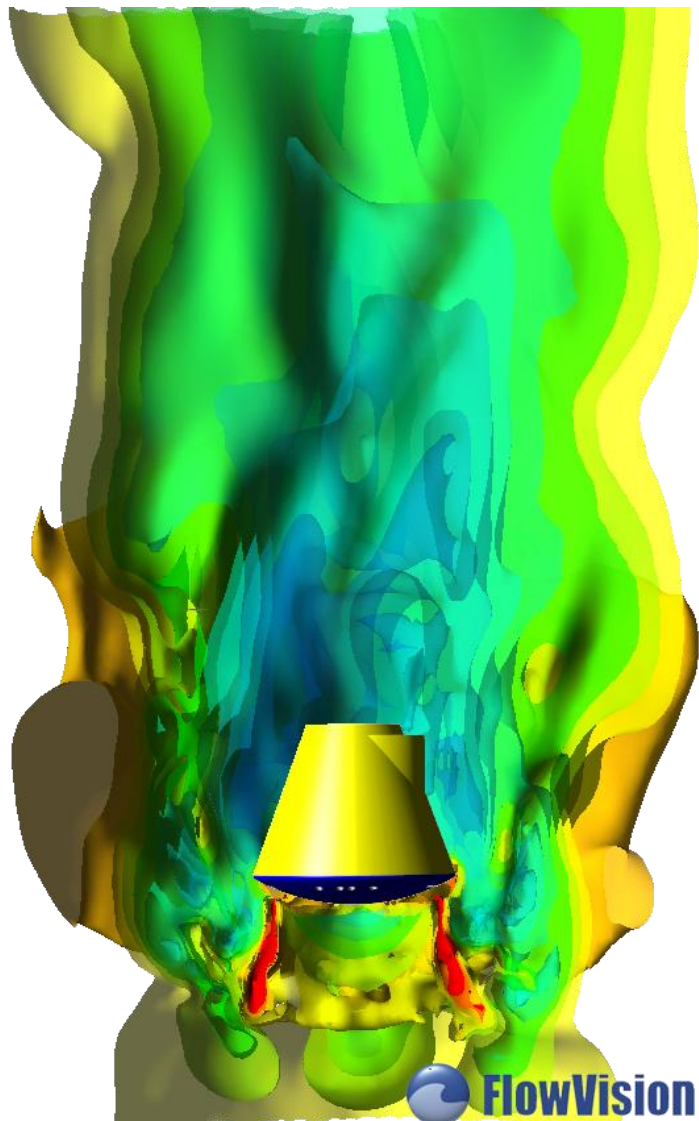


**Маркет, то есть
рынок**

Решатель СЛАУ FlowVision

- Постановка задачи
$$Ax = b,$$
- A - разреженная квадратная матрица большой размерности,
- b - вектор правой части, x - искомый вектор решения.
- Архитектура вычислителя: MPI + нити
- Формат входных данных: ParCSR
- Требования:
 - Эффективность
 - Масштабируемость
 - Минимальные затраты памяти и вычислений
- Алгоритмы:
 - Предобусловленные алгоритмы типа подпространства Крылова, предобусловливание ICN2/ILU2
 - AMG
- Классы задач:
 - Вычислительная гидродинамика
 - Прочность
 - Электродинамика
 - ...



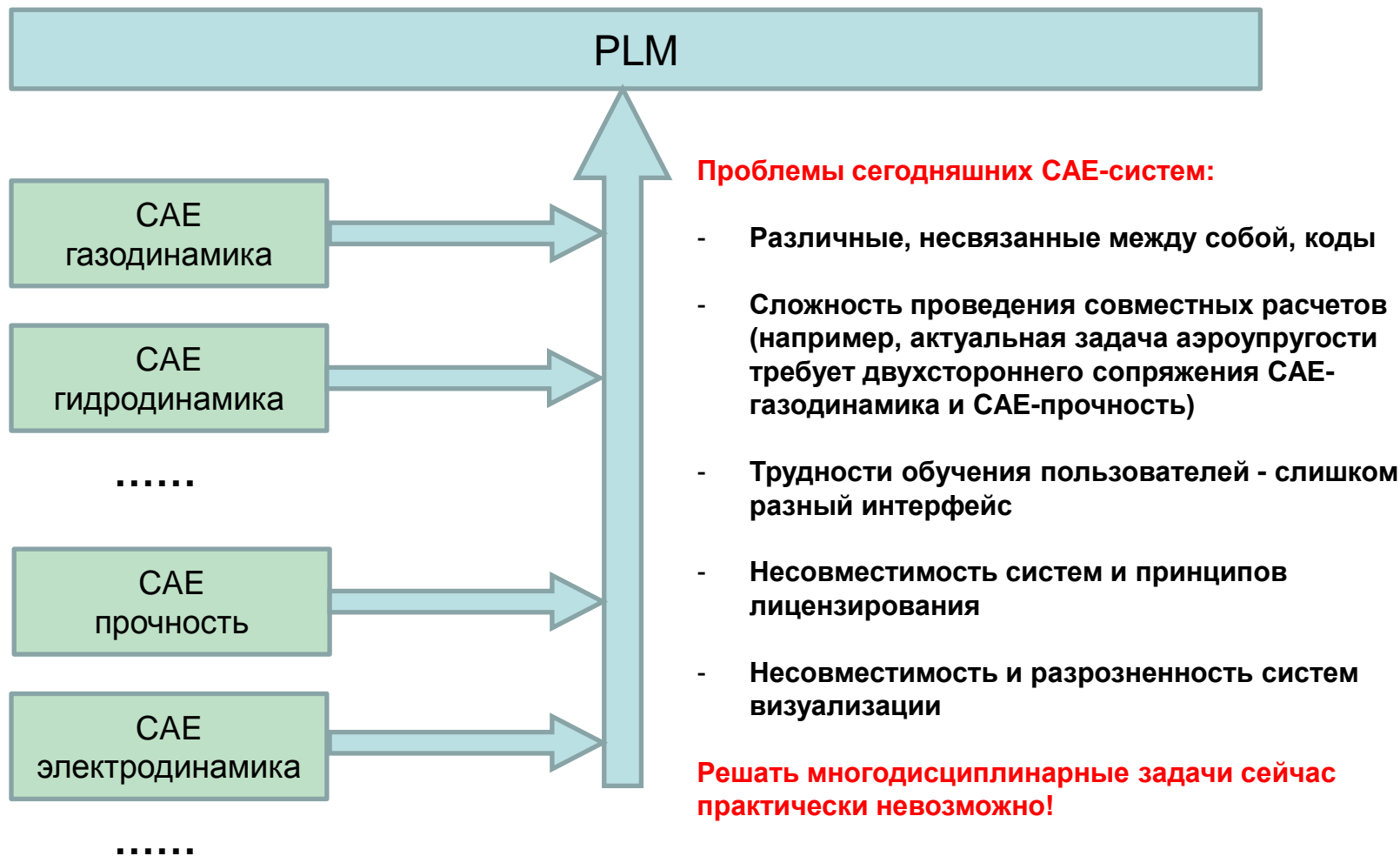


Хотелки

CAE-система – уровень сегодняшнего дня

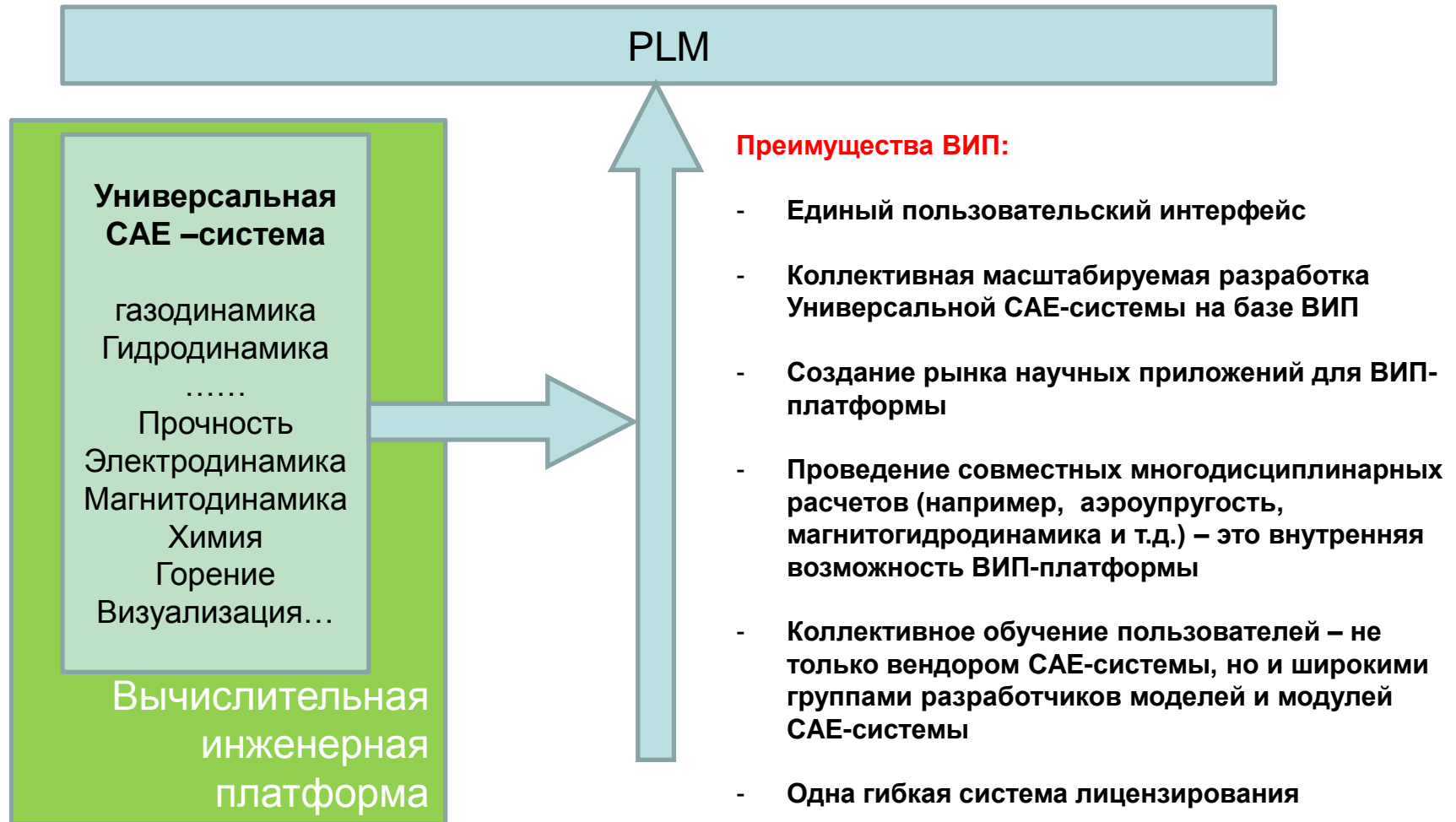
CAE – система автоматизации инженерных расчетов

PLM – система управления жизненным циклом изделия



CAE-система – завтрашний уровень

Вычислительная инженерная платформа (ВИП) – платформа для коллективного создания и лицензирования универсальной CAE – системы



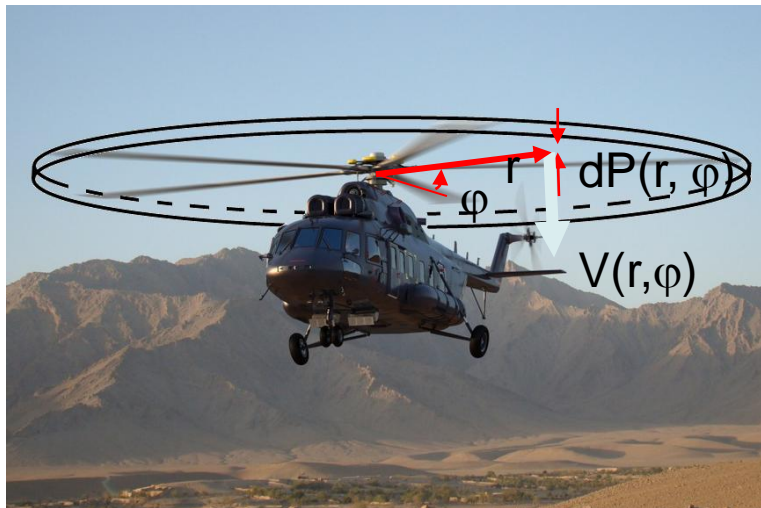
Вычислительная инженерная платформа

Вычислительная инженерная платформа:

- Открытый программный интерфейс (API) для подключения различных компонент CAE-системы
- Расчеты с использованием суперкомпьютерных ресурсов
- Разработчик создает не модули, а методы управления соответствующим процессором ВИП через его API.



Активный диск: быстрое моделирование вентиляторов, пропеллеров, гребных винтов



1. Совместно с ЦАГИ
2. Связь между скоростью на диске $V(r, \varphi)$ и перепадом давления $dP(r, \varphi)$ на противоположных сторонах диска.
3. Позволяет исключить детальное моделирование лопастей
4. Размер и форма активного диска совпадает с фигурой, заметаемой лопастями



Спасибо за внимание!

FlowVision - это:

- Полностью автоматическая генерация расчетной сетки с локальной динамической адаптацией,
- Разрешение пограничных слоев - без ограничения на сложность поверхности,
- Моделирование взаимодействия жидкости/газа с подвижными и гибкими конструкциями,
- Моделирование движение жидкости и газа в системах с ультратонкими зазорами,
- Проведение расчетов и визуализация результатов на современных суперкомпьютерах с гетерогенным параллелизмом (> 10 000 ядер)

