

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

*Исповедь ракетчика и
атомщика*

Междисциплинарная САЕ система FlowVision

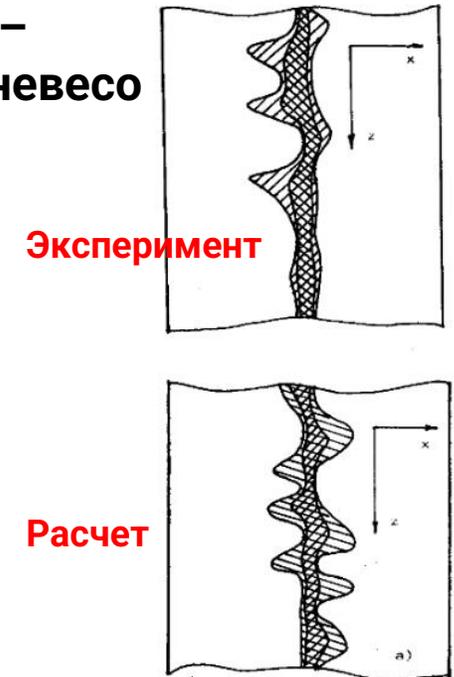
для решения научных и промышленных задач с
использованием высокопроизводительной
вычислительной техники



Аксенов Андрей Александрович к.ф.-м.н.
Жлуктов Сергей Васильевич к.ф.-м.н.
ОИВТ РАН

FlowVision – история

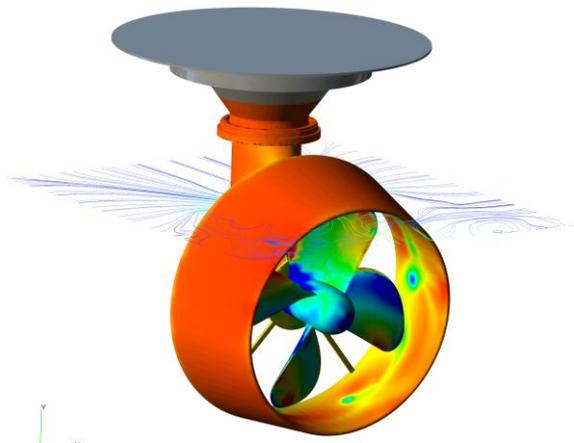
- Первые работы (для НПО Энергии, руководитель – космонавт А.А. Серебров) – исследование гидродинамики установок для производства белка в условиях невесомости¹⁾
- Начало разработки FlowVision 1.0 – ИАП РАН, 1991г.
- 1999 года – коммерциализация разработки в компании ТЕСИС.²⁾
- 2010 Создана совместная лаборатория ОИВТ РАН -МФТИ-ТЕСИС
- Ядро команды - научная школа академика О.М.Белоцерковского и академика Э.Е.Сона
- Основные разработчики - выпускники МФТИ (ФАКИ, ФУПМ, ФПФЭ) , МГУ (ВМК), МАИ, МГТУ им. Баумана



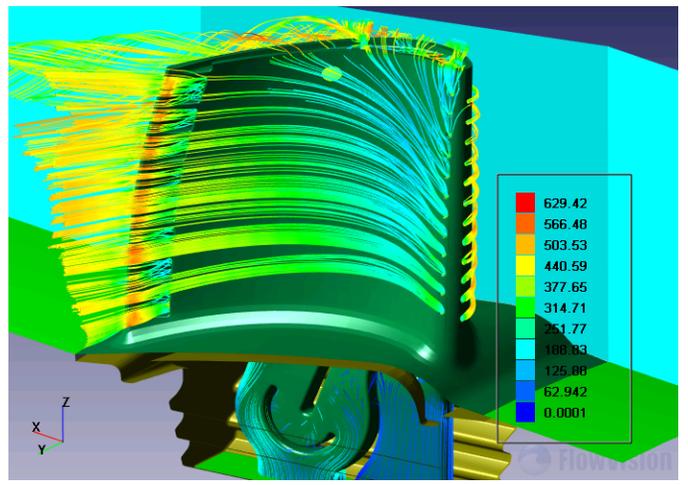
ЭГД неустойчивость струйки биопрепарата

- 1) 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.
- 2) 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

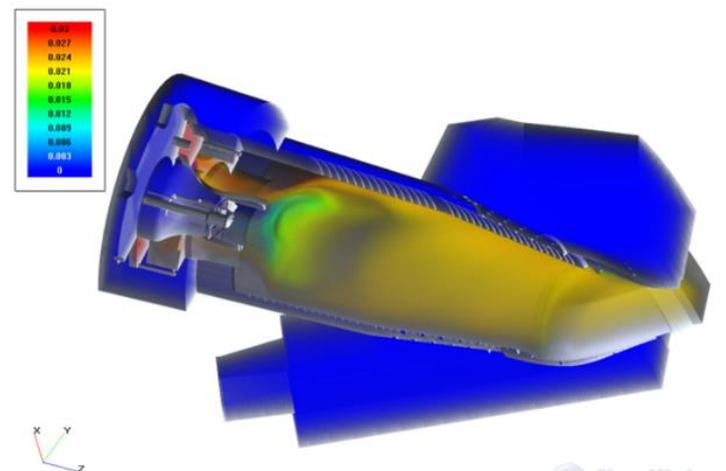
Примеры



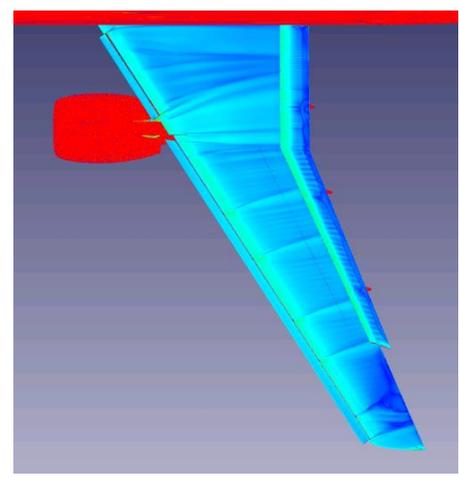
Судовой винт



Охлаждаемая лопатка турбины



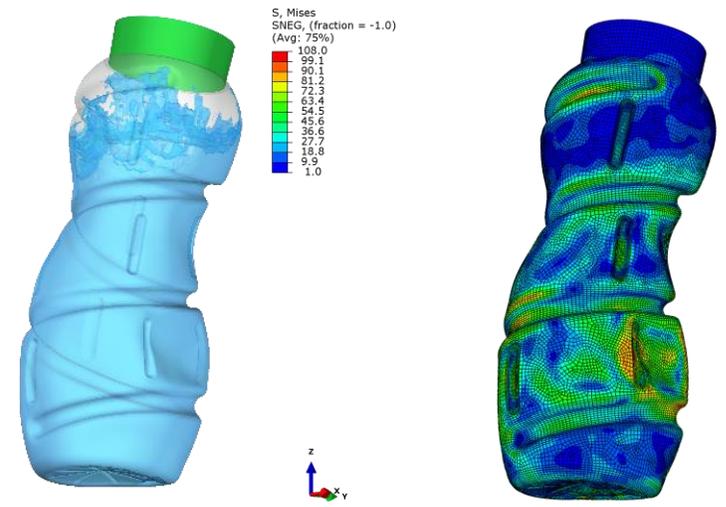
Камера сгорания



Обтекание крыла



Электродуговая сварка



Падение пластиковой бутылки с жидкостью внутри



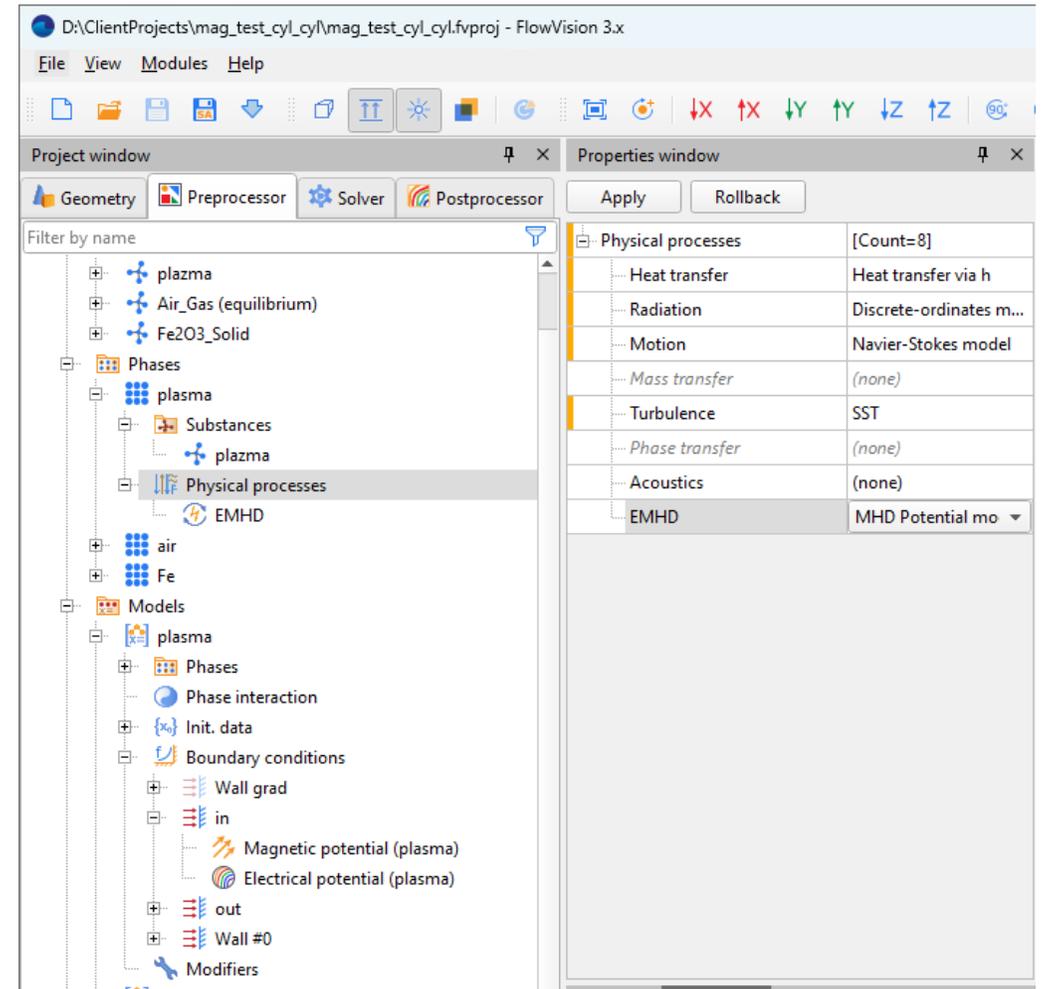
Решаемые уравнения

- FlowVision решает уравнения конвективно-диффузионного переноса в виде

$$\frac{dAf}{dt} + \nabla Uf = \nabla B \nabla f + D * f + F$$

здесь f – переменная, A, U, B, D, F – параметры, которые зависят от всех переменных $\{f_i\}$

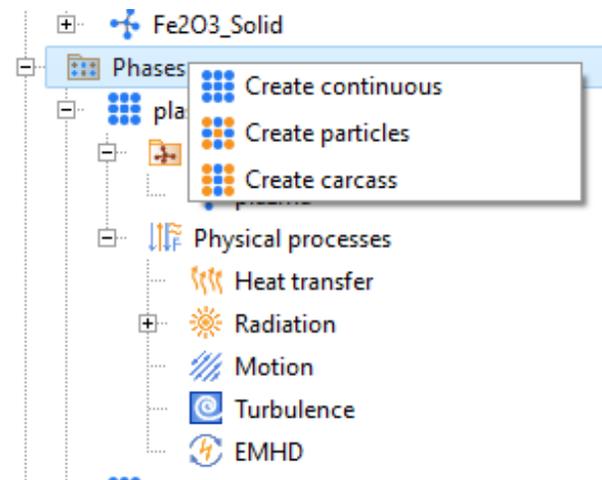
- Переменная f – либо скаляр, либо вектор
- Математическая модель составляется как набор различных уравнений.
- Решение уравнений либо неявным (по умолчанию), либо явным методом.



Решаемые уравнения («фаза»)

Фаза бывает

- Континуальная
- Дисперсная
- Каркас (пористая)
- Пленка



Physical processes	[Count=8]
Heat transfer	Heat transfer via h
Radiation	Discrete-ordinates m...
Motion	Navier-Stokes model
Mass transfer	(none)
Turbulence	SST
Phase transfer	(none)
Acoustics	(none)
EMHD	MHD Potential mo

- Для каждой фазы свой набор решаемых уравнений
- Дисперсная фаза – эйлеров подход для моделирования, спектр по диаметрам частиц
- Дисперсная фаза и каркас «погружены» в континуальную фазу
- Пленка – имеет закон движения и уравнение энергии

Математическая модель - набор взаимодействующих фаз

- Две континуальные фазы – решение несмешивающихся сред (вода-масло, вода-воздух)
- Добавим дисперсную – решим задачу о движении пузырьков, песка, капель, горение жидкого или твердого топлива (уголь)
- Добавим каркас – исследуем движение через пористую среду

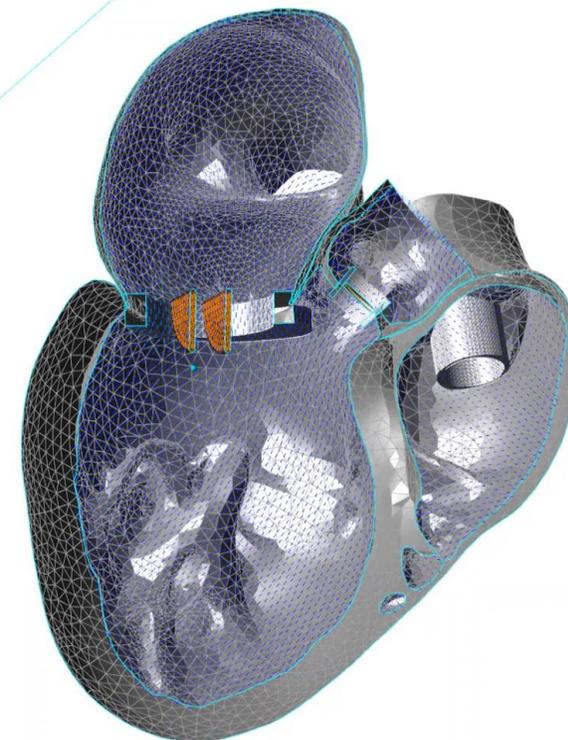
The screenshot displays the FlowVision software interface. The left sidebar shows a tree view of the model configuration under the 'Region' folder. The 'Models' section is expanded to show the 'Continuum-continuum' model. The right panel shows the configuration for this model, including a table of parameters and a 'User specified source' section.

Parameter	Value
Math. model	Continuum-continuum
Phase0	plasma
Phase1	Fe
SurfTension, auto	Yes
SurfTension, value	0
Blackness	1
Mass transfer	No

Below the table, there is a 'User specified source' section with a large empty text area. At the bottom of the interface, there is a 'Residuals' and 'User values' section with a graph showing values between 0.25 and 0.2505.

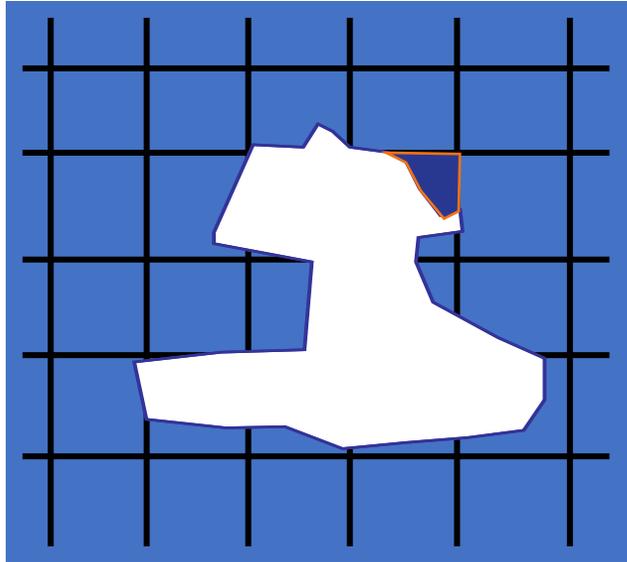
Методы FlowVision

- Конечно-объемный метод
- Динамическая локально-адаптивная расчетная сетка
- Разрешение пограничных слоев – криволинейная призматическая
- Распределенная и общая память одновременно
- 2-ой порядок аппроксимации уравнений
- Явные и неявные методы расчета
- Решатели СЛАУ – мультигрид и GMRES
- Скользящие сетки
- Подвижные тела (6DOF)
- Динамика деформируемых тел

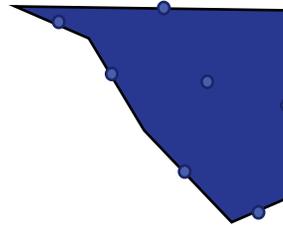


Сердце с механическими клапанами

Автоматический генератор сетки/Subgrid Geometry Resolution¹⁾



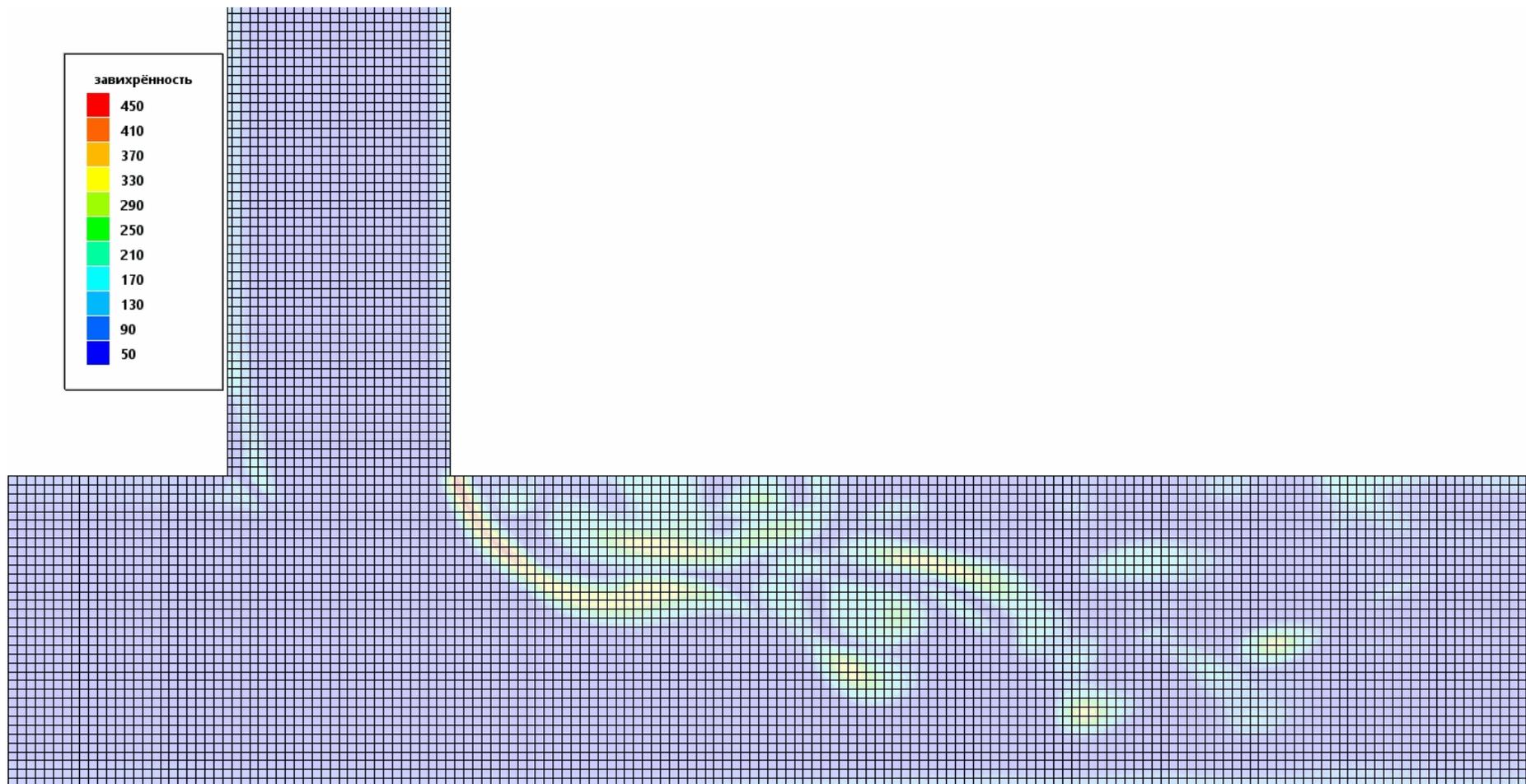
Конечно-объемная
аппроксимация исходных
уравнений



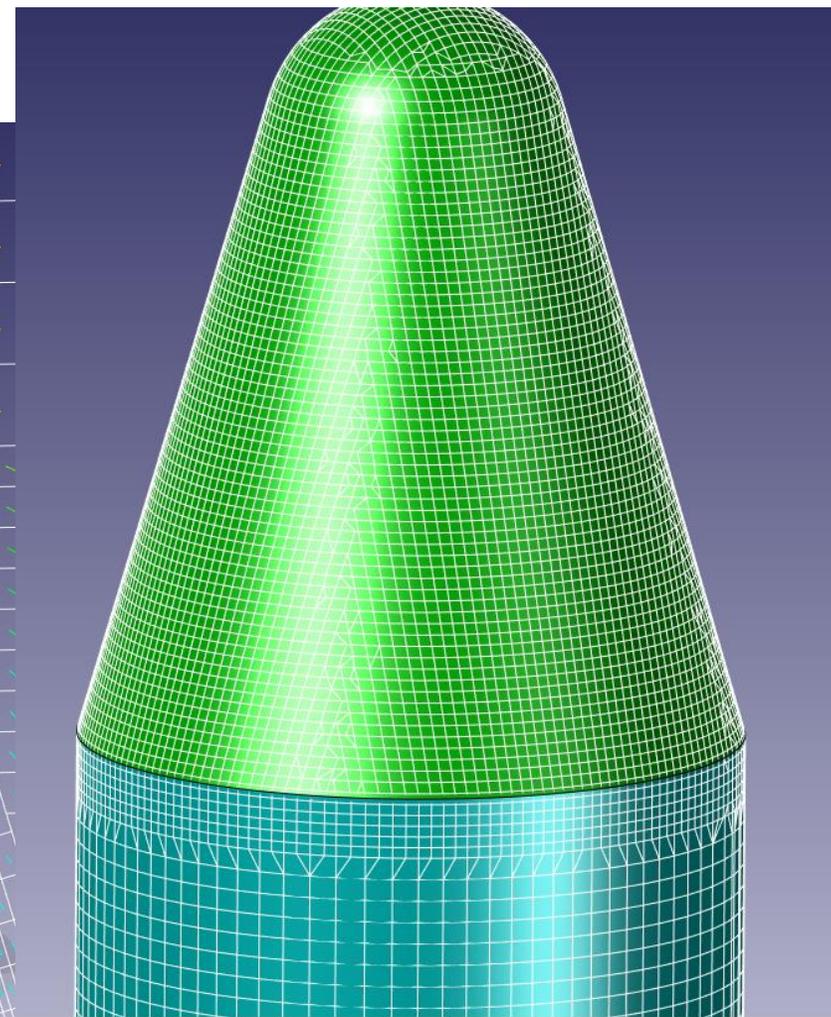
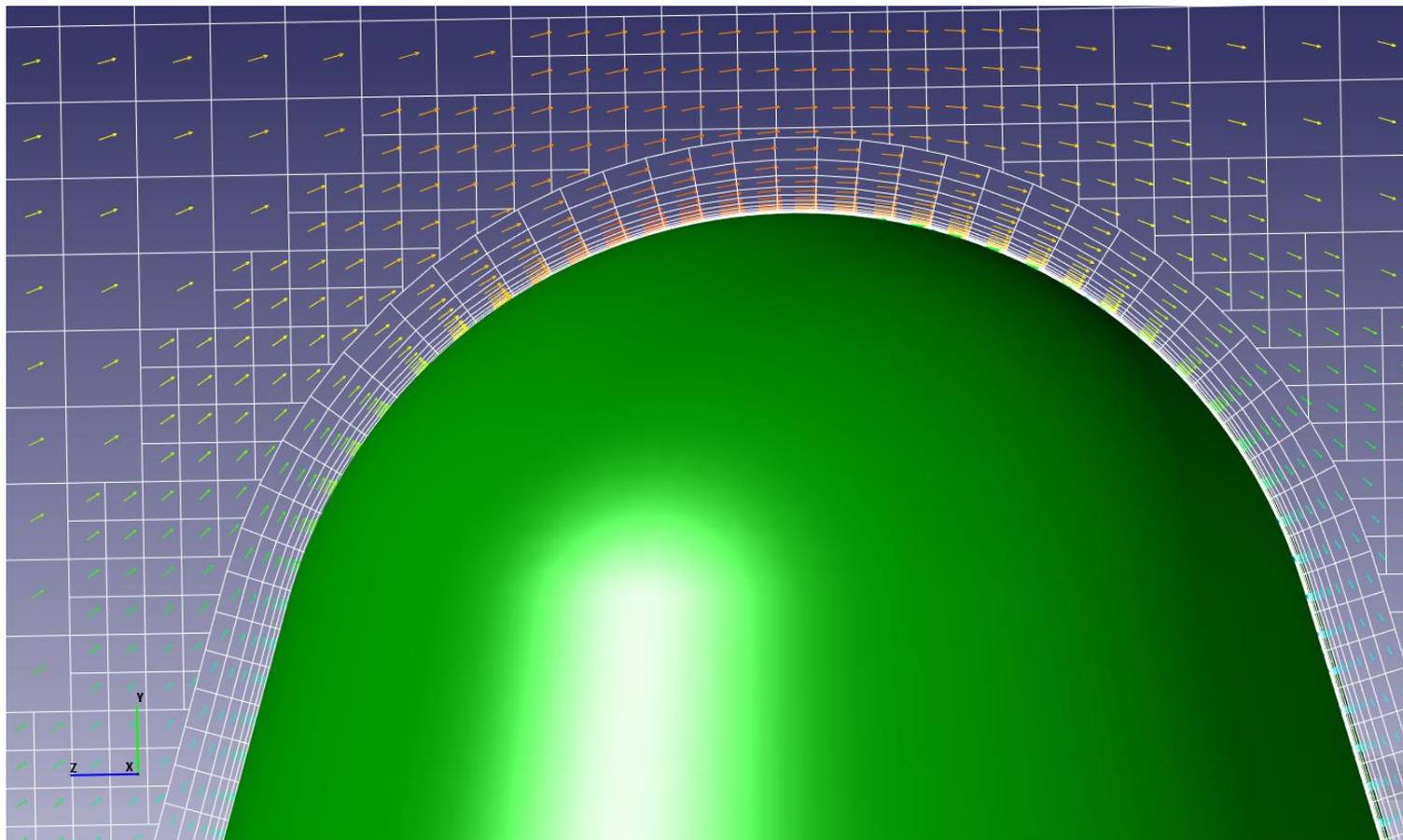
- Прямоугольная неоднородная расчетная сетка
- Поверхность импортируется в виде сеточных форматов (STL, WRL)
- Ячейка – произвольный многогранник
- **Булево вычитание объема из начальной сетки**

¹⁾ 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

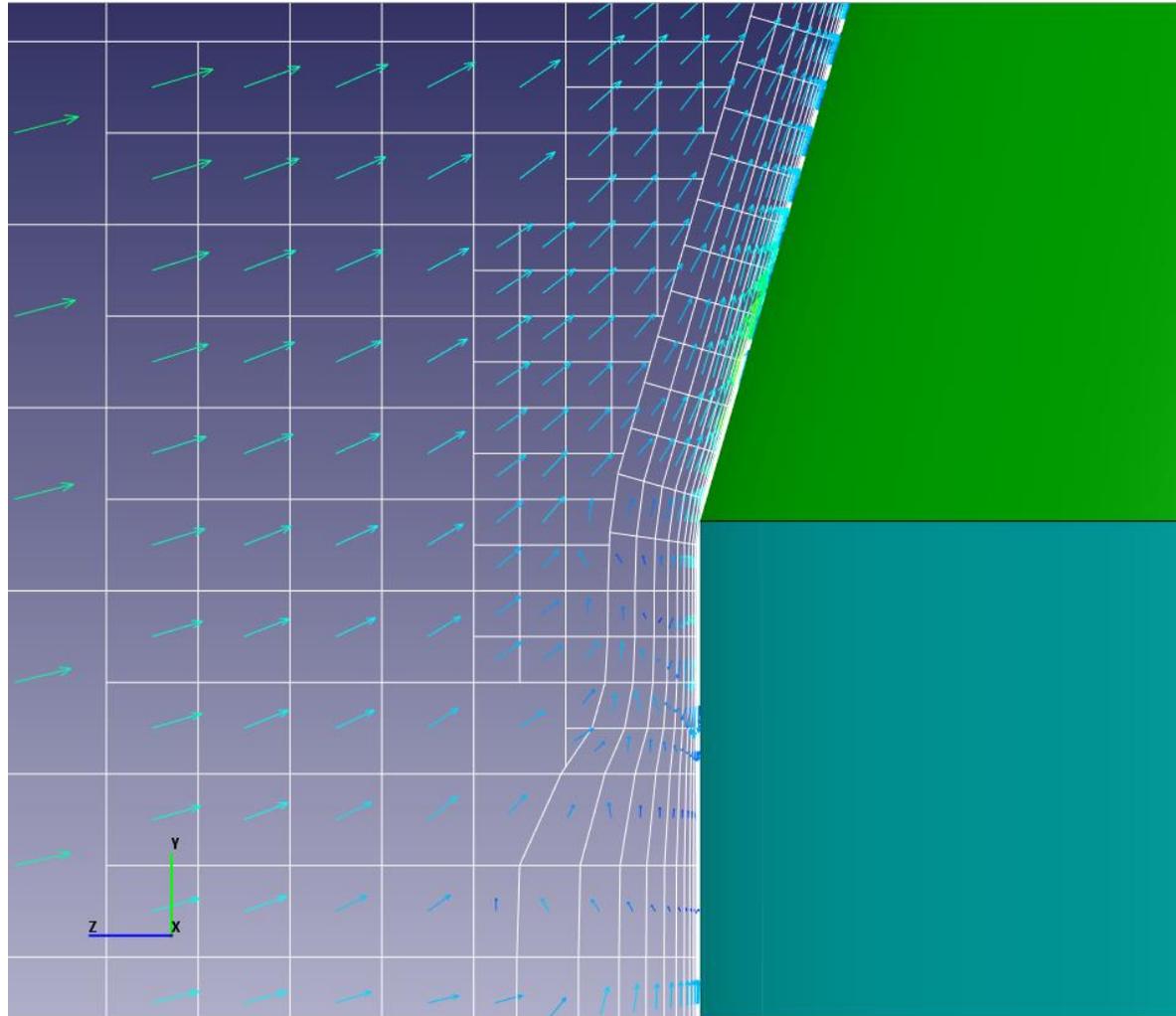
Динамически адаптируемая расчетная сетка по условиям



Погранслои – призматическая сетка



Сетка погранслоя при неравномерной адаптации основной сетки

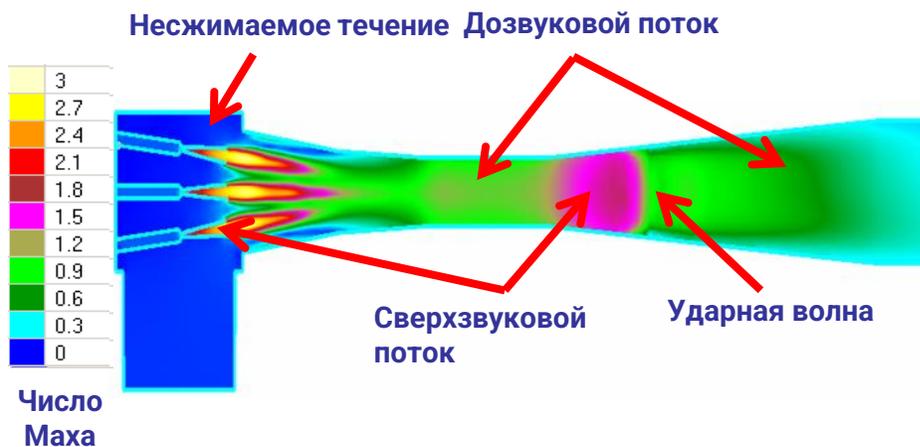


Все-Маховый решатель уравнений Навье-Стокса

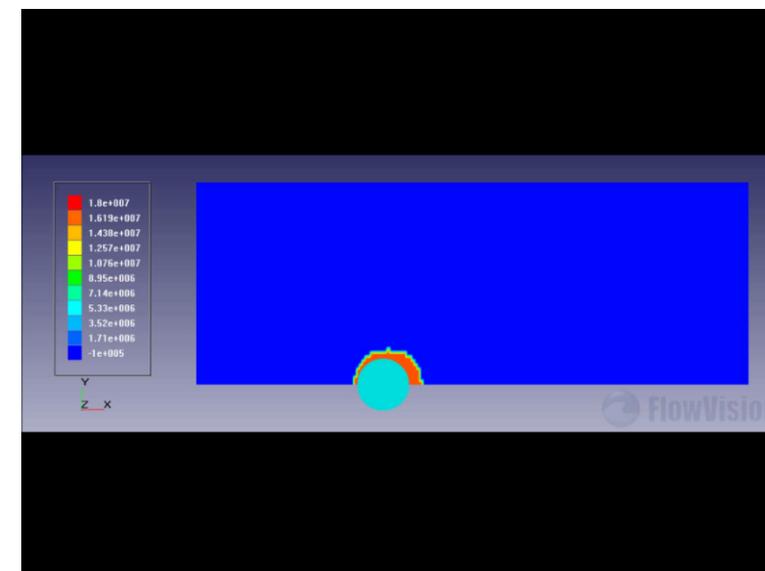
- В расчетной области может быть несжимаемой и сверх- гиперзвуковой течение одновременно.
- Неявный метод решения – CFL>1



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



Течение в паровоздушном эжекторе



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

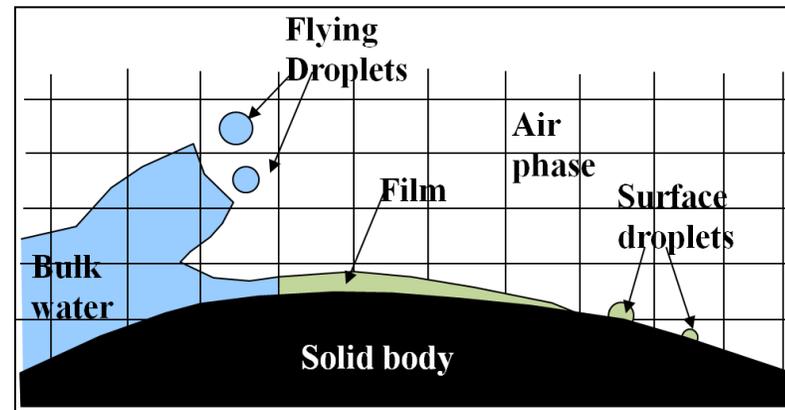
- Невозможно разрешить методом VOF капли, пузырьки газа, пленки, которые имеют размер меньше расчетной ячейки.

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

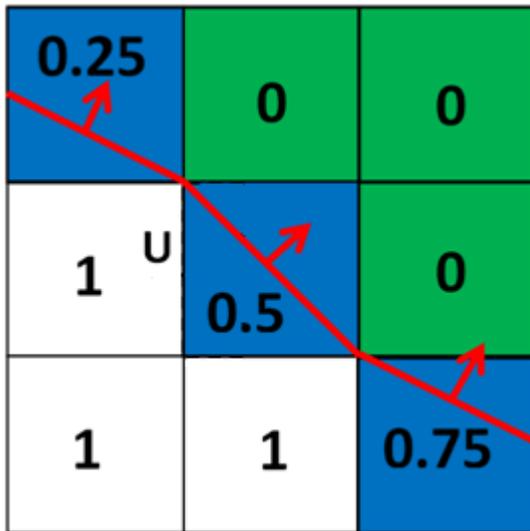
Белые ячейки – FLUID,
 зеленые – GAS, синие – SURF

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

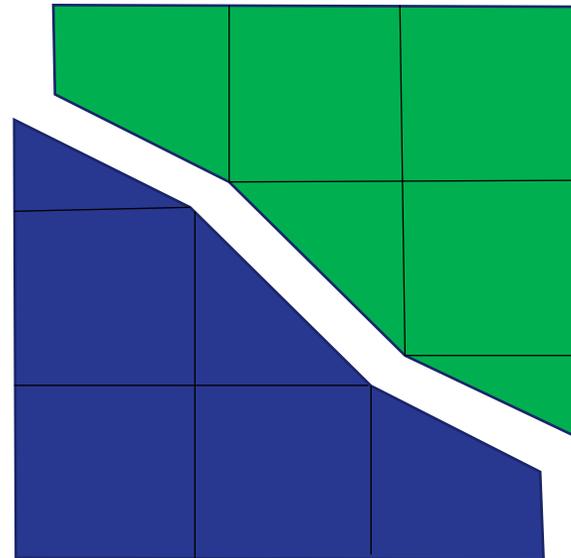
Красные ячейки – BUBBLE,
 Желтые – DROPLET

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

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

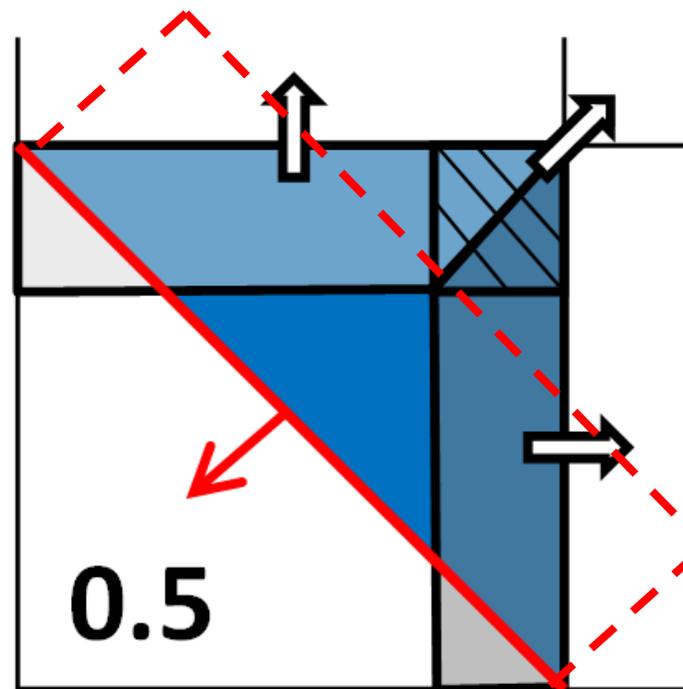
$$\frac{U_1 - \tilde{U}_1}{\tau} - \frac{1}{\rho_1} \frac{dP_1^{n+1}}{dn} \Big|_{\Gamma_+} + \frac{1}{\rho_1} \frac{dP_1^n}{dn} \Big|_{\Gamma_+} = \frac{U_2 - \tilde{U}_2}{\tau} - \frac{1}{\rho_2} \frac{dP_2^{n+1}}{dn} \Big|_{\Gamma_-} + \frac{1}{\rho_2} \frac{dP_2^n}{dn} \Big|_{\Gamma_-}$$



Расчет переноса VOF – скошенная схема

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

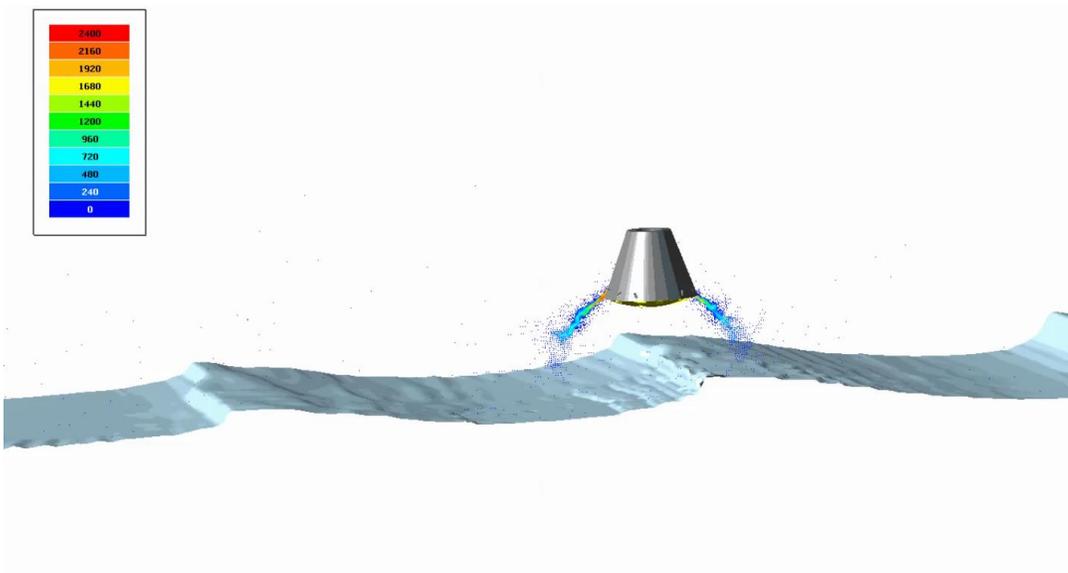
Расчет втекающих и вытекающих потоков в ячейке



Раздача потоков из ячейки в скошенной схеме

Посадка на воду – сравни два расчета

Made by FlowVision
2017 г – Федерация/Орел



И что выглядит более физично?!

Made by LS-DYNA
2018 г - Аполло

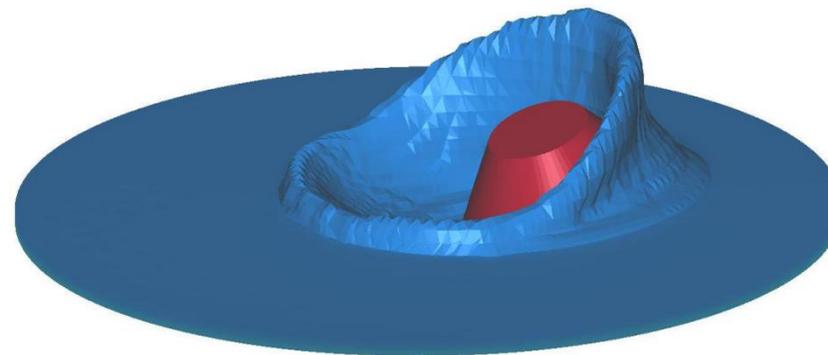


Figure 13: Iso surface plot of an impact with horizontal velocity

<https://ntrs.nasa.gov/search.jsp?R=20070018036> 2018-12-07T21:16:59+00:00Z

Simulating Space Capsule Water Landing with Explicit Finite Element Method

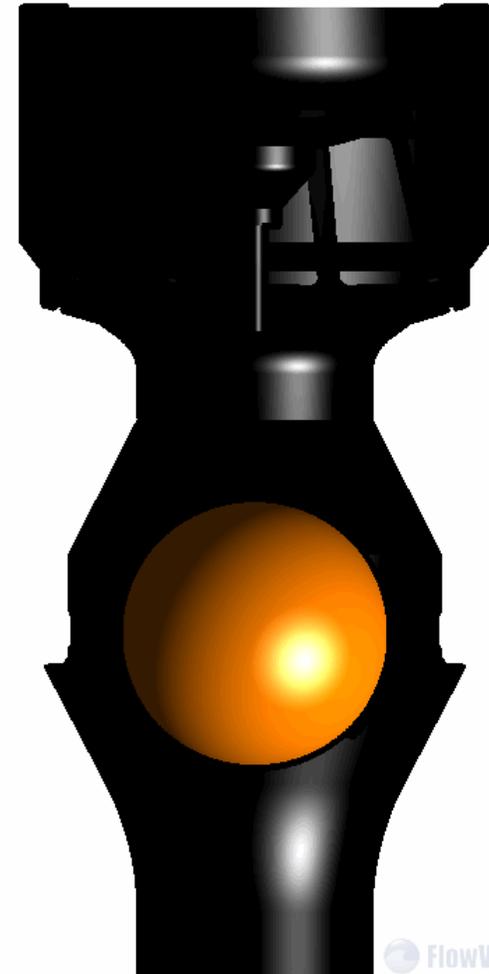
John T. Wang¹ and Karen H. Lyle²
NASA Langley Research Center, Hampton, VA, 23681

A study of using an explicit nonlinear dynamic finite element code for simulating the water landing of a space capsule was performed. The finite element model contains hexahedral shell elements for the space capsule and Eulerian solid elements for the water.

Ключевые преимущества

- Автоматическое построение расчетной сетки без деформации ячеек и для сложных моделей;
- Динамически адаптируемая сетка с пристенной призматической гекса-доминантной сеткой
- Единый решатель для всех режимов течения;
- Подвижные тела;
- Модель зазора;
- Суперкомпьютерные вычисления с гибридной технологией Threads + MPI;
- Возможность подключения своих собственных программ через протоколы связи и программный интерфейс = вычислительная инженерная платформа.

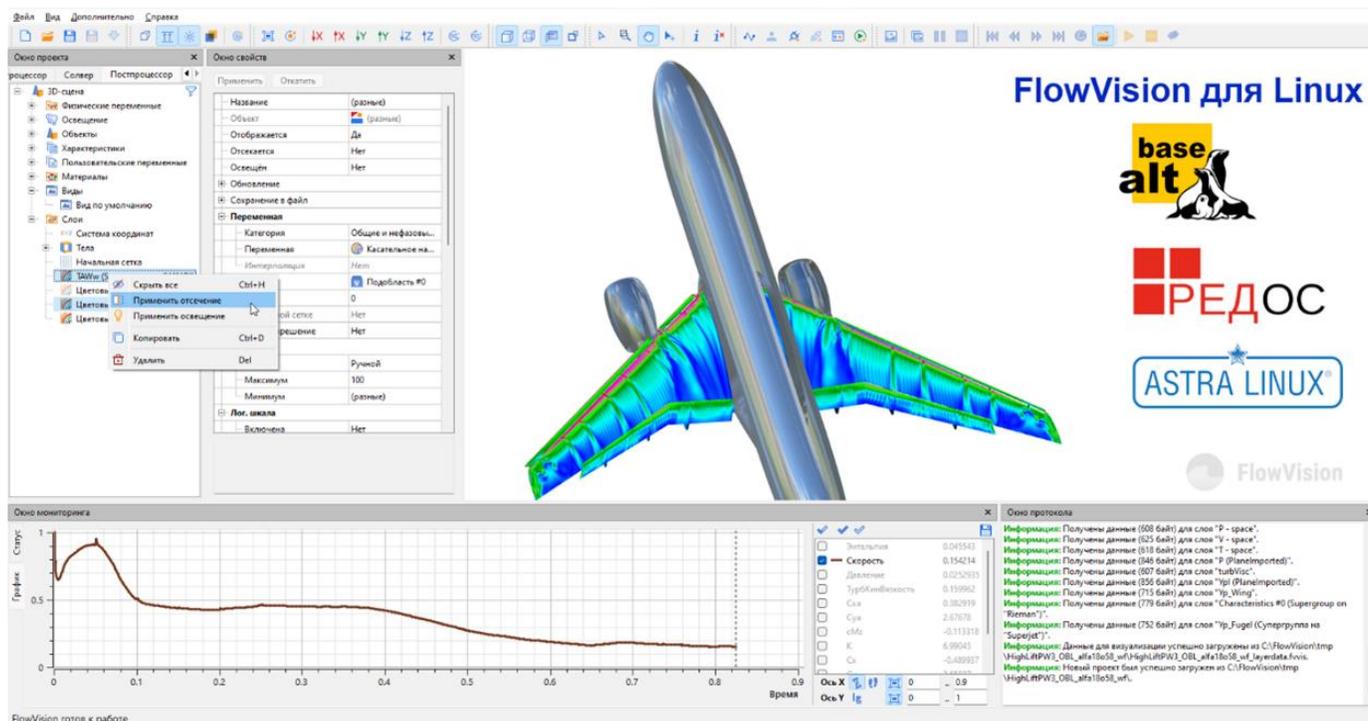
Исследование гидродинамики обратного клапана реактора БН



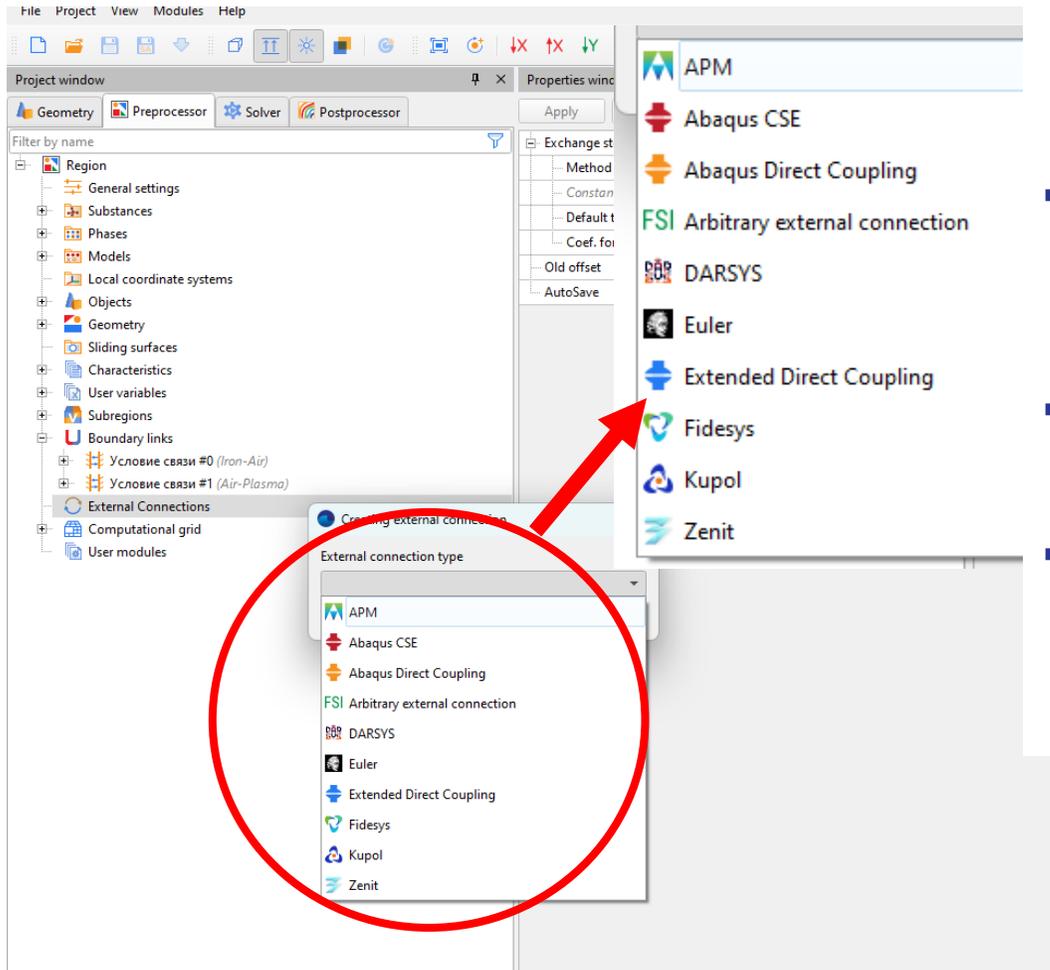
Готовность к современным условиям

Совместимость:

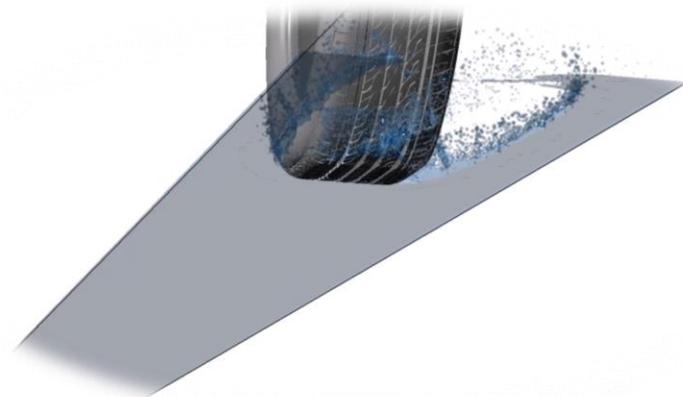
- отечественные ОС на базе Linux
- Процессоры Эльбрус и «импортозамещающие» Loongson



Экосистема FlowVision



- Интеграция с системами организации расчетов
 - Лоцман (PLM-система, Аскон)
 - CML-Bench (платформа разработки и применения цифровых двойников)
- Решение задач сильного взаимодействия жидкости и конструкций
 - Передача данных поверхность – поверхность
 - 1-way, 2-way сопряжение
 - Zenit, Фидесис, АПМ, Abaqus, Nastran
- Сопряжение с кодами MBD (Multi-Body Dynamics)
 - Euler
 - Обмен пространственным положением недеформируемых подвижных тел
 - Обмен силами, моментами сил
- Сопряжение с кодами моделирования больших систем
 - SimInTech
 - Купол (Росатом)
- Сопряжение с оптимизаторами
 - ИОСО
 - DT Seven



Клиент-серверная архитектура

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



Управление расчетным проектом

Передача графических метаданных



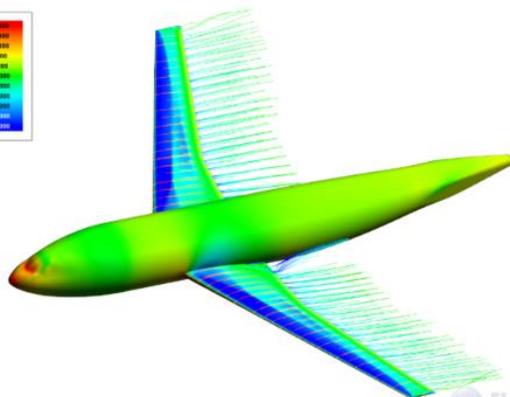
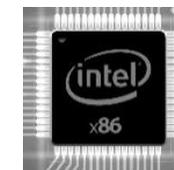
- Визуализирует там же
- Причем смотреть результаты можно с коллегами, начальниками и заказчиками на разных компьютерах

Параллельные вычисления и кроссплатформенность

- Единый алгебраический решатель – неявный/явный
- Многоуровневый режим параллельных вычислений с общей и распределенной памятью
- Распределенная архитектура «клиент-сервер»
- Поддержка платформ Windows, Linux, Эльбрус, Intelx86
- Поддержка распределенных вычислений при визуализации
- Автоматическая динамическая балансировка



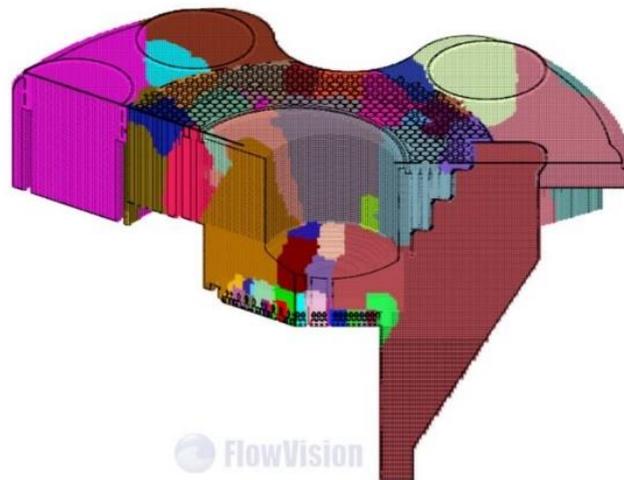
эльбрус



FlowVision

Моделирование внешнего обтекания ЛА

Размерность задачи: **576 млн. ячеек**
Количество неизвестных: **4032 млн.**

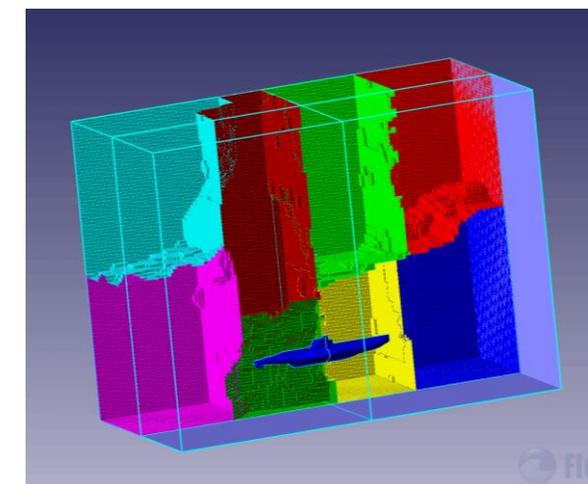


FlowVision

Моделирование массо- и теплообмена жидкотеплоносителя ЯЭУ

Размерность задачи: **58 млн. ячеек**
Количество неизвестных: **464 млн.**

Автоматическая декомпозиция области:
Различные цвета соответствуют частям задачи, рассчитываемых на разных процессорах



Flow

Динамическая балансировка



Супер Компьютерные Дни 2025г

- FlowVision работает на следующих архитектурах процессоров:
 - Эльбрус 4 и 8
 - Intel x86
- FlowVision теперь работает и на процессоре Loongson



Ударим по Америке
Китаем:

FlowVision на Loongson

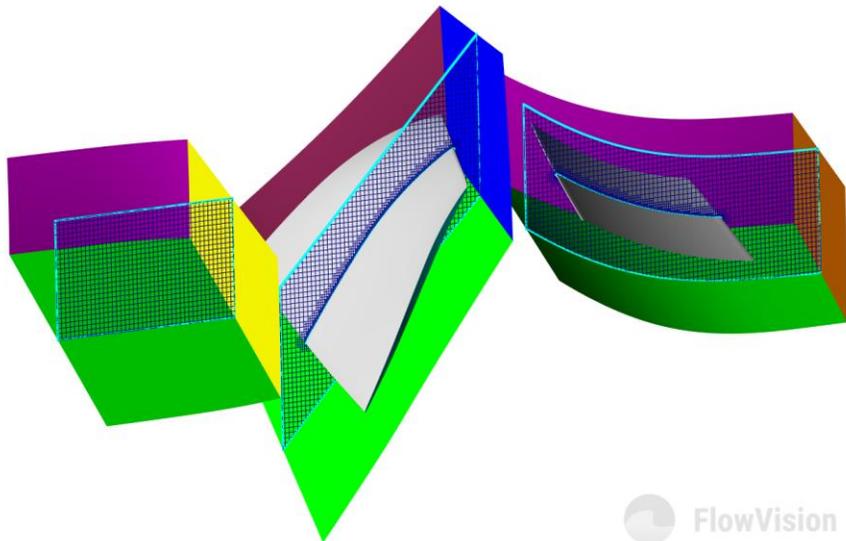
Тестируемые конфигурации вычислительных кластеров

Тестовая конфигурация	Loongson-3D5000	Loongson-3C5000	Intel Xeon E5-2680v3
Дата выпуска CPU	2021	2021	Q3 2014
Тех. процесс	12нм	12нм	22нм
Ядер на процессор	32	16	12
Кол-во процессоров	4	4	4
Тип памяти	DDR4	DDR4	DDR4
Количество каналов памяти:	8	4	4

Тестовые расчетные задачи во FlowVision

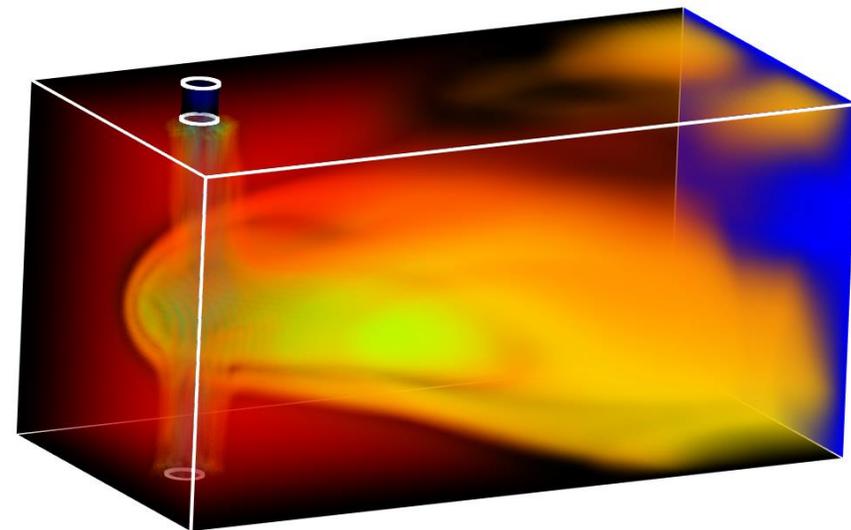
Сектор турбины

- 800 000 расчетных ячеек
- Неравномерная расчетная сетка
- Трехмерная секторная постановка



Смеситель потоков воздуха и азота

- 3 400 000 расчетных ячеек
- Равномерная расчетная сетка
- Трехмерная постановка



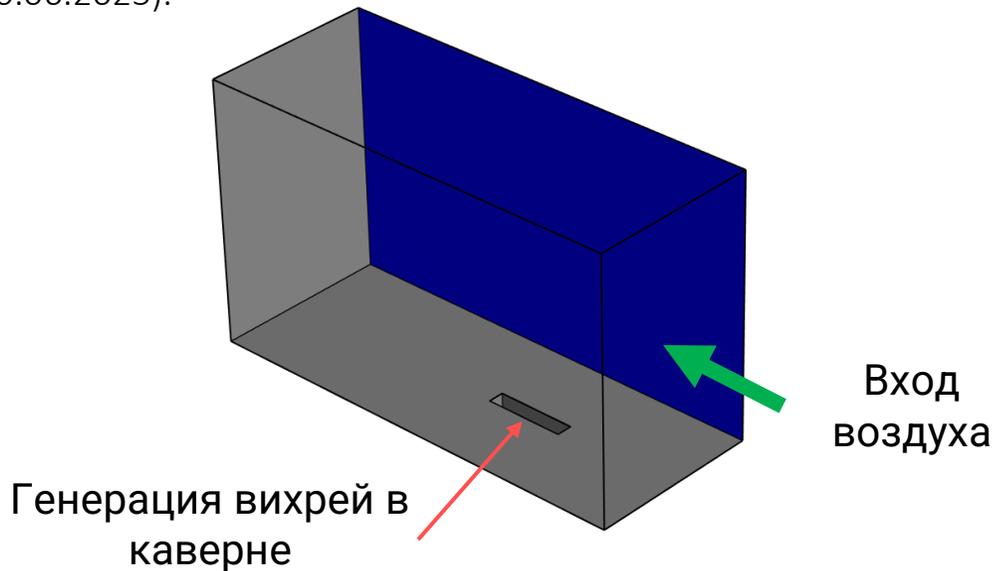
Результаты сравнения (среднее время расчета одной итерации)

Конфигурация	Сектор турбины (0,8 млн ячеек)	Смеситель (2,4 млн ячеек)
Loongson-3D5000 (режим 8x16)	8.4 сек	16.1 сек
Loongson-3C5000 (режим 4x16)	13.2 сек	29.0 сек
Intel Xeon E5-2680v3 (режим 4x12)	6.1 сек	14.8 сек

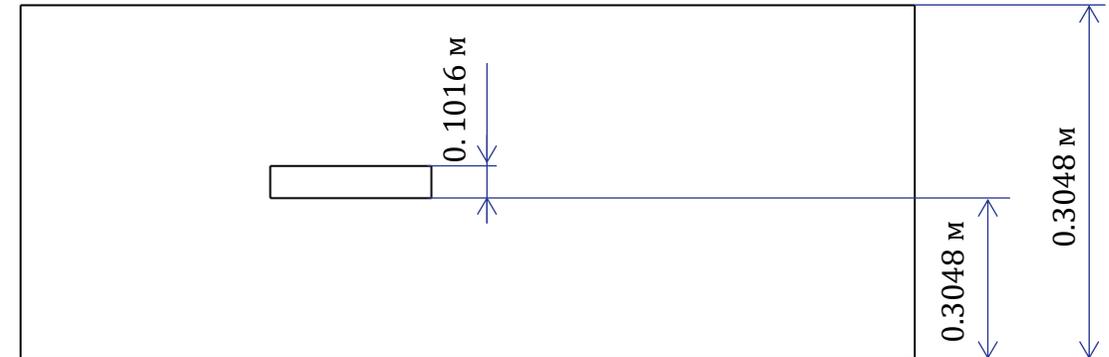
Исследование масштабируемости – тест M219

Для исследования масштабируемости и производительности рассмотрен широко известный в литературе аэродинамический тест M219 Cavity case. Поток воздуха движется со скоростью $V = 279.96$ м/с вдоль твердой стенки с прямоугольной впадиной при температуре 266.53 К и давлении 62100 Па.

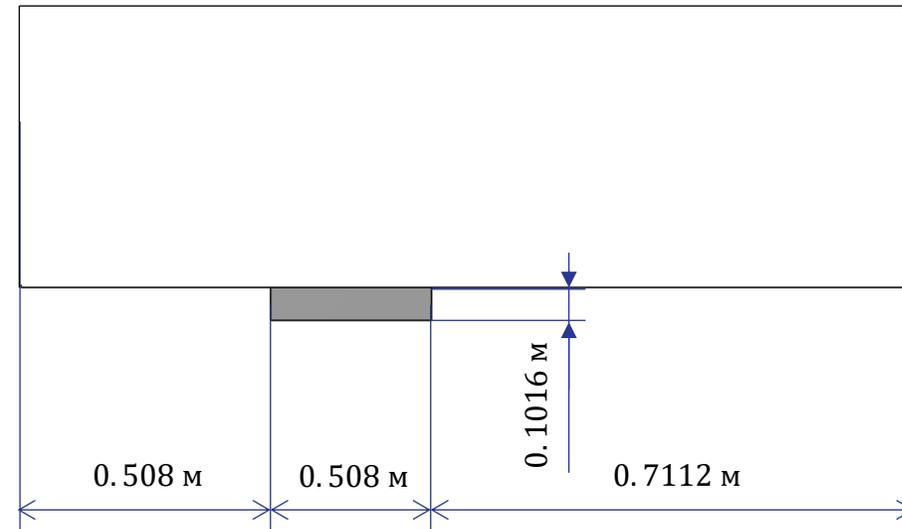
Для расчетов используется версия FlowVision 3.15.02 (от 30.06.2025).



Вид сверху

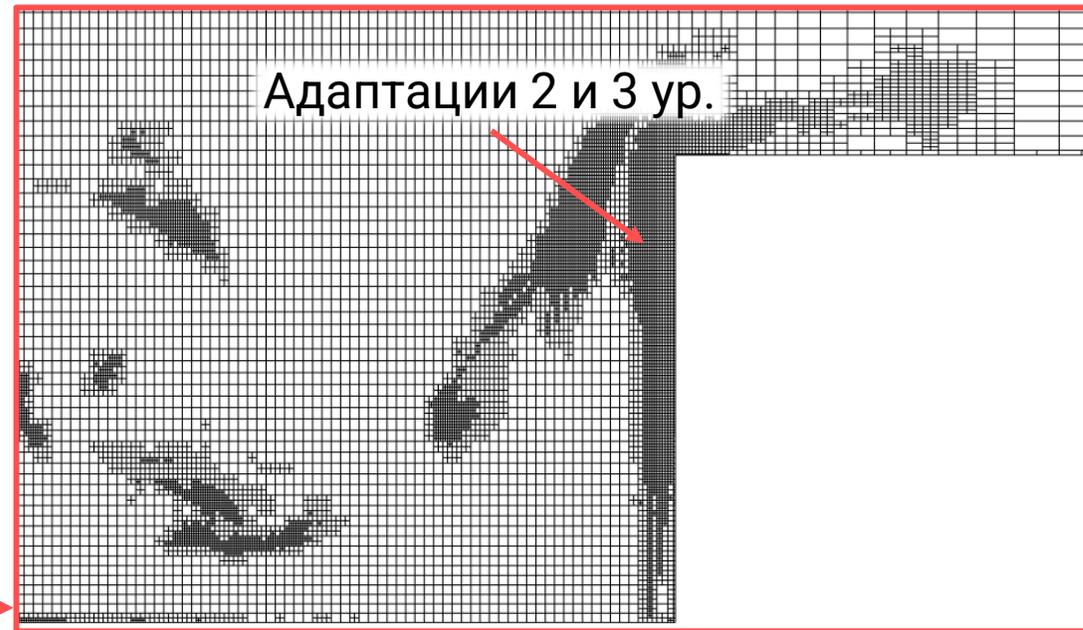
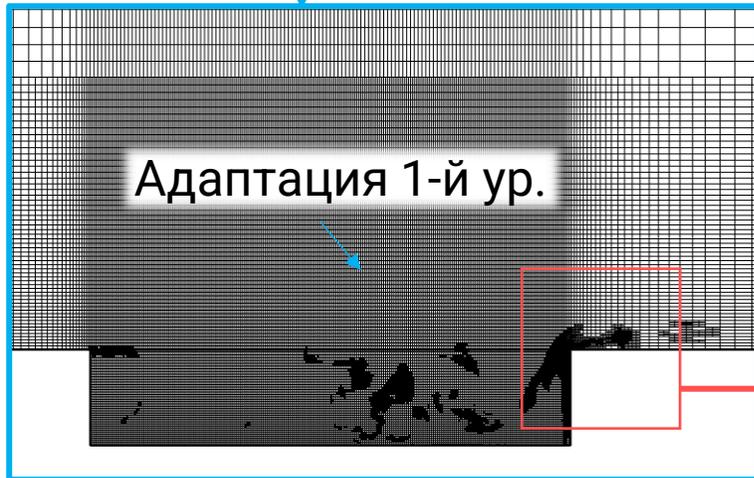
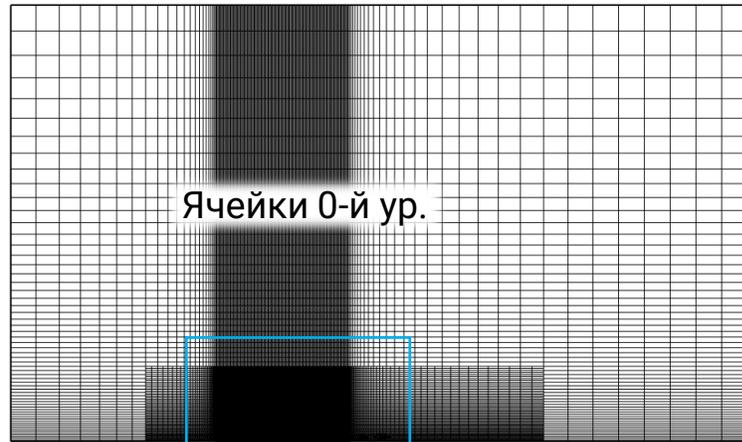


Вид сбоку



M. J. C. Henshaw, "M219 Cavity Case: Verification and Validation Data for Computational Unsteady Aerodynamics," Tech. Rep. RTO-TR-26, AC/323(AVT)TP/19, QinetiQ, UK, 453–472 (2002).

Расчетная сетка (для сравнения с данными *)

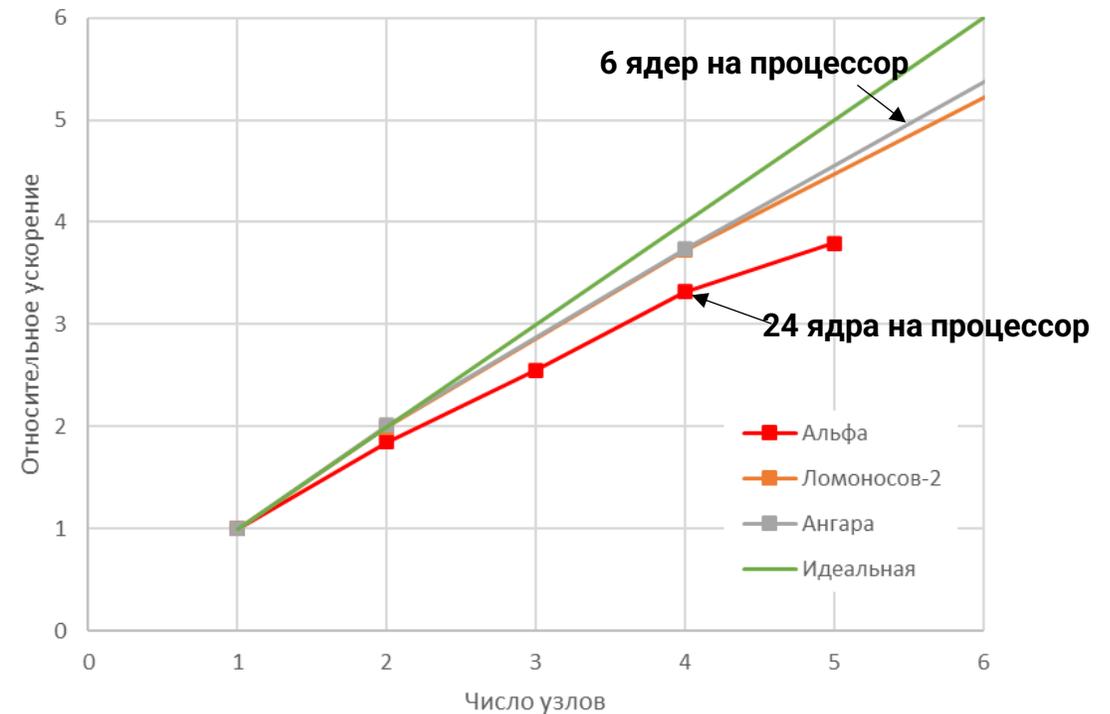
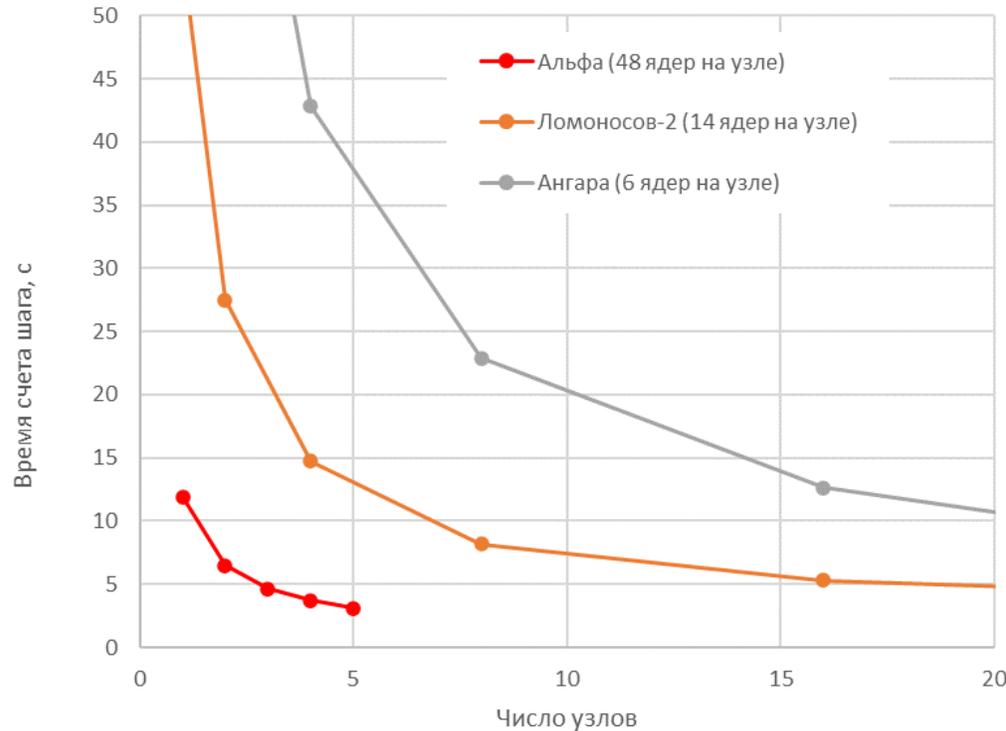


- Используется неравномерная начальная сетка 176x81x66 с локальным сгущением ячеек в области каверны. Характерный размер ячеек в каверне 4 мм.
- На шаге №100 проведена адаптация по решению к градиенту скорости до 3 уровня, далее сетка не перестраивается.
- Итоговый размер сетки: 5.44 млн.ячеек

*) Акимов В.С., Силаев Д.П., Симонов А.С., Семенов А.С. Исследование масштабируемости FlowVision на кластере с интерконнектом Ангара //Вычислительные методы и программирование: новые вычислительные технологии. 2017. Т. 18. № 4. С. 406-415

Результаты расчетов сетка - 5.44 млн. Ячеек *)

Показан лучший режим на «Альфа» 8 MPI на процессор x 3 потока

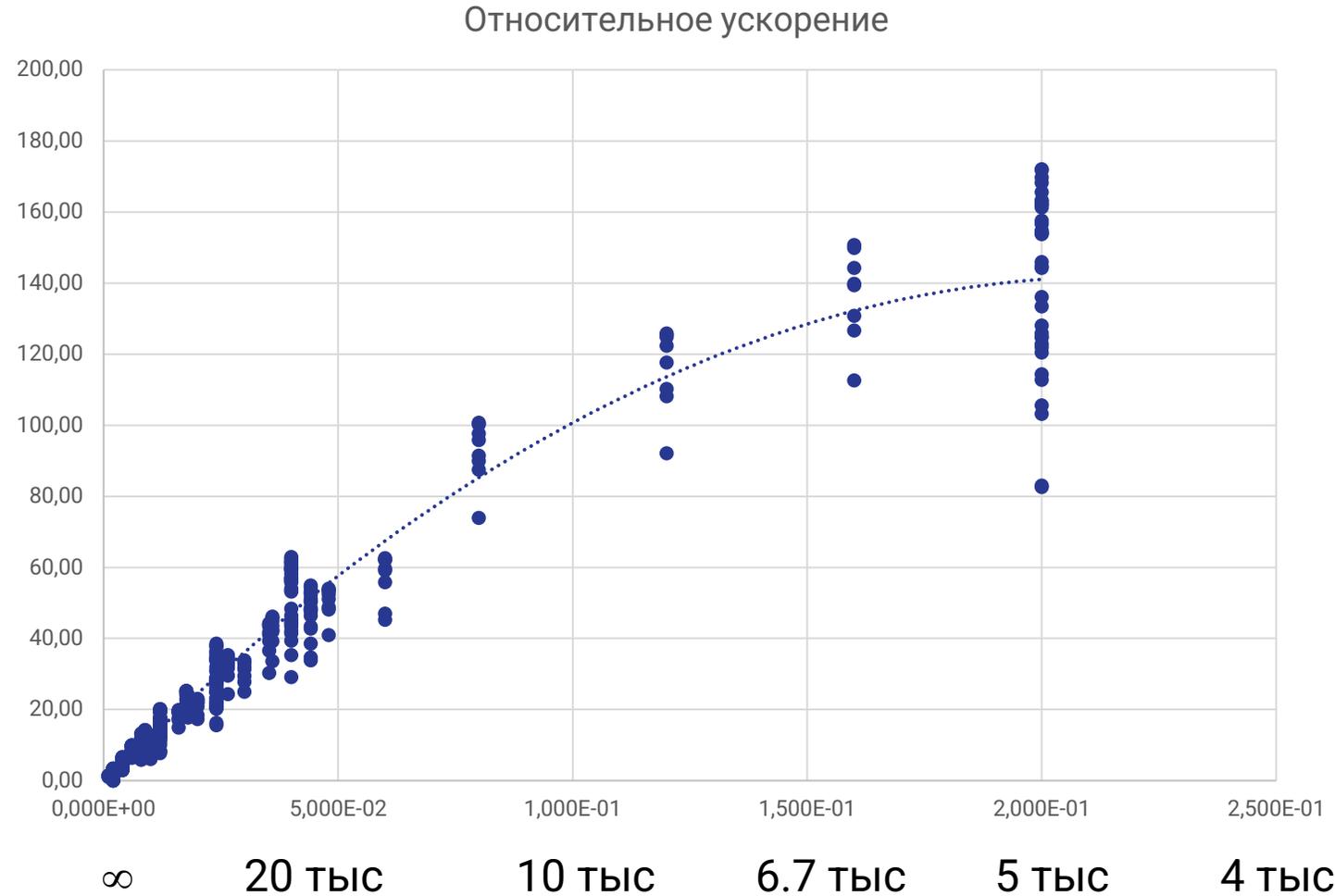


Современный кластер (Альфа) быстрее Ангара и Ломоносов, поэтому масштабируемость хуже

*) Акимов В.С., Силаев Д.П., Симонов А.С., Семенов А.С. Исследование масштабируемости FlowVision на кластере с интерконнектом Ангара //Вычислительные методы и программирование: новые вычислительные технологии. 2017. Т. 18. № 4. С. 406-415

Ускорение относительно кол-ва ячеек на ядро

- Здесь показаны результаты расчетов от 5 млн ячеек до 25 млн
- Количество MPI и нитей – разное-



1/(кол-во ячеек на ядро)

Вызовы как выводы

- Вытеснить StarCCM+ и ANSYS/Fluent/CFX с российского рынка за счет точности, скорости и удобства моделирования
- FlowVision как междисциплинарный код. CFD, прочность, электромагнитодинамика+ЭМГД, фазовые переходы, дисперсные среды – и все в одном «флаконе»
- Интеграция с российскими кодами, включая отраслевые
- **Сделать FlowVision как инструмент передачи знаний и умений от науки в промышленность**
- Сделать FlowVision наглядным пособием по физике и технике для студентов, а может и школьников.