



Международная конференция «Математика в
созвездии наук» к юбилею ректора МГУ, академика
Виктора Антоновича Садовниченко

«Развитие подхода вихреразрешающего моделирования для задач водородной безопасности»

Канаев А.А., Готов В.Ю

ИБРАЭ, 2024

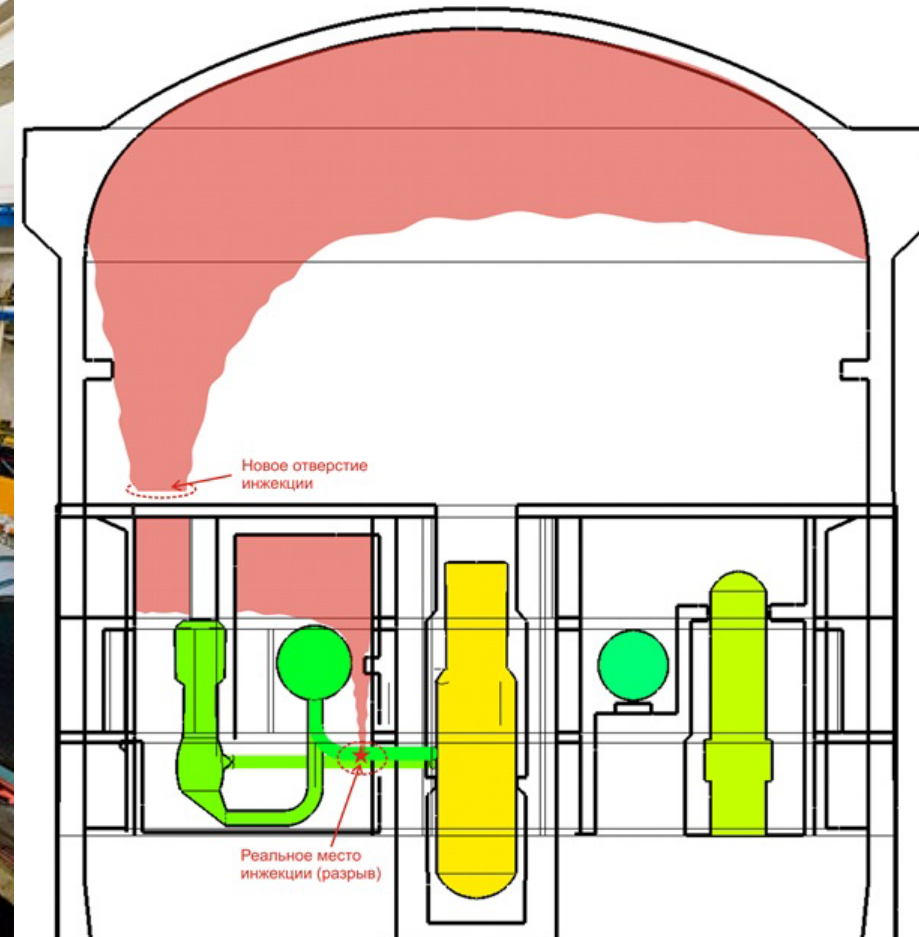
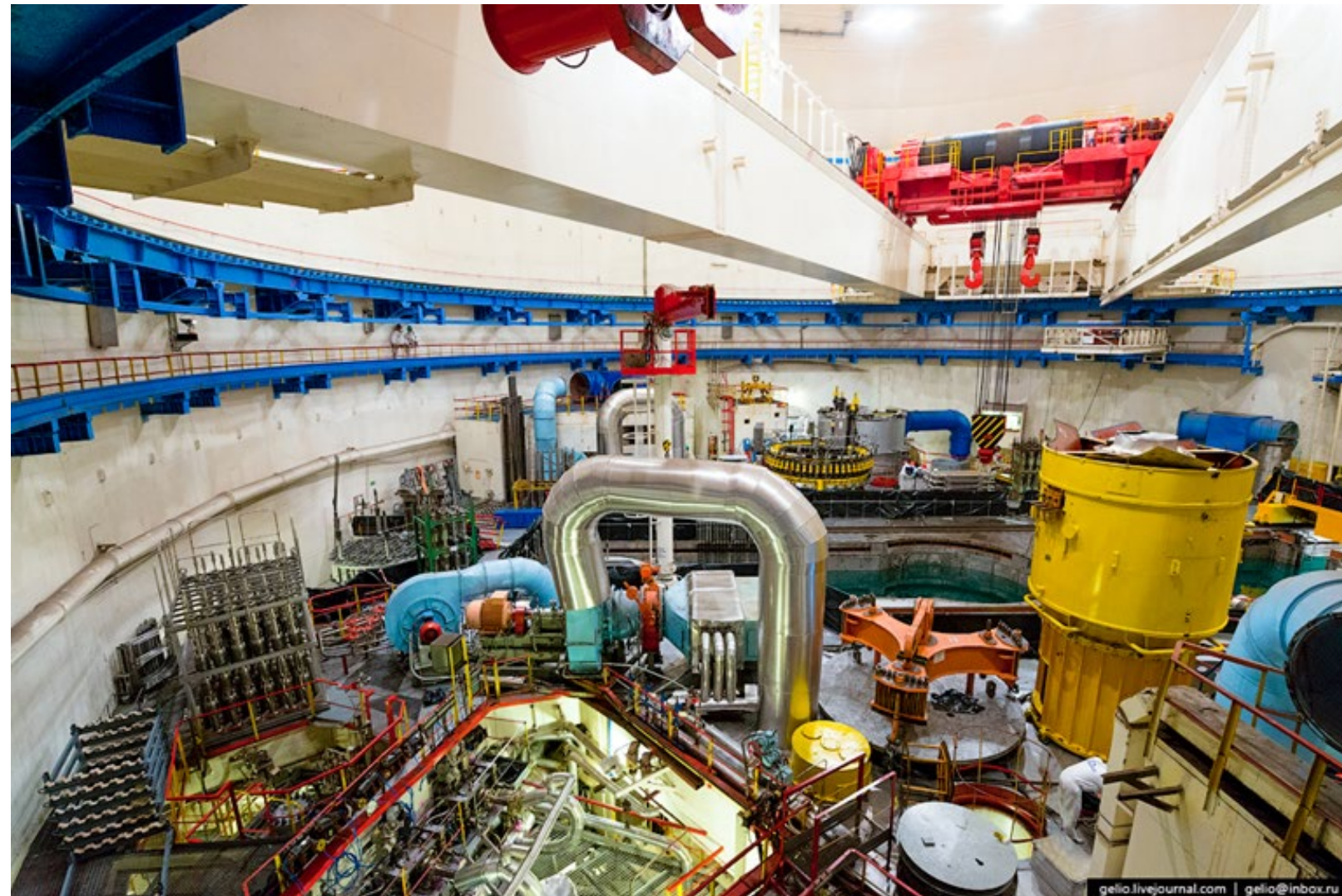


- **Проблематика водородной безопасности на энергетических установка (стратегии безопасности на АЭС)**
- **Предлагаемый подход к CFD-моделированию задач водородной безопасности и реализация параллельных вычислений**
- **Способы оптимизации моделирования (как на уровне алгоритмов, так и на уровне физических моделей)**
- **Сложности, возникающие при моделировании задач водородной безопасности**
- **Верификация подходов к моделированию задач водородной безопасности и разработанных моделей**



	Типовой PWR (3600 МВт (тепл))	ВВЭР-1000	Типовой BWR (3800 МВт (тепл))
Масса Zr, кг	26000	22630 (Zr1%Nb)	76000
Масса H₂, кг	1150	1000	3360

Масса циркония в а.з. РУ ВВЭР, PWR и BWR и оцененные массы водорода (оценка “сверху” из-за окисления циркониевых оболочек в активной зоне)



Центральный зал в защитной оболочке 2-го энергоблока Балаковской АЭС. Внутренний объем 65 000 м³

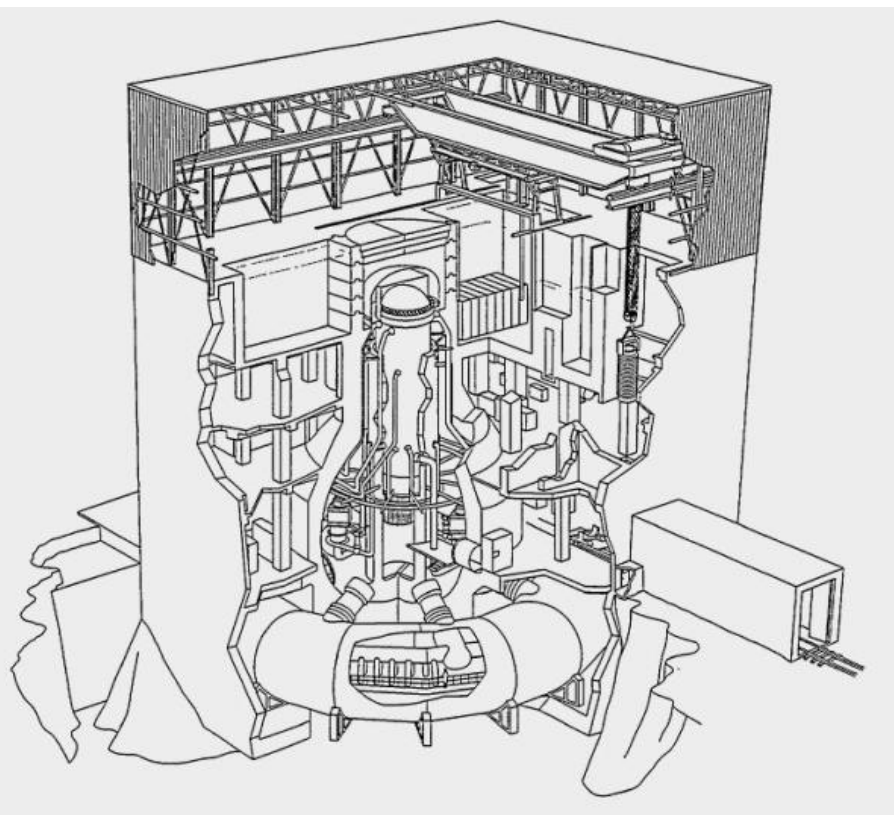
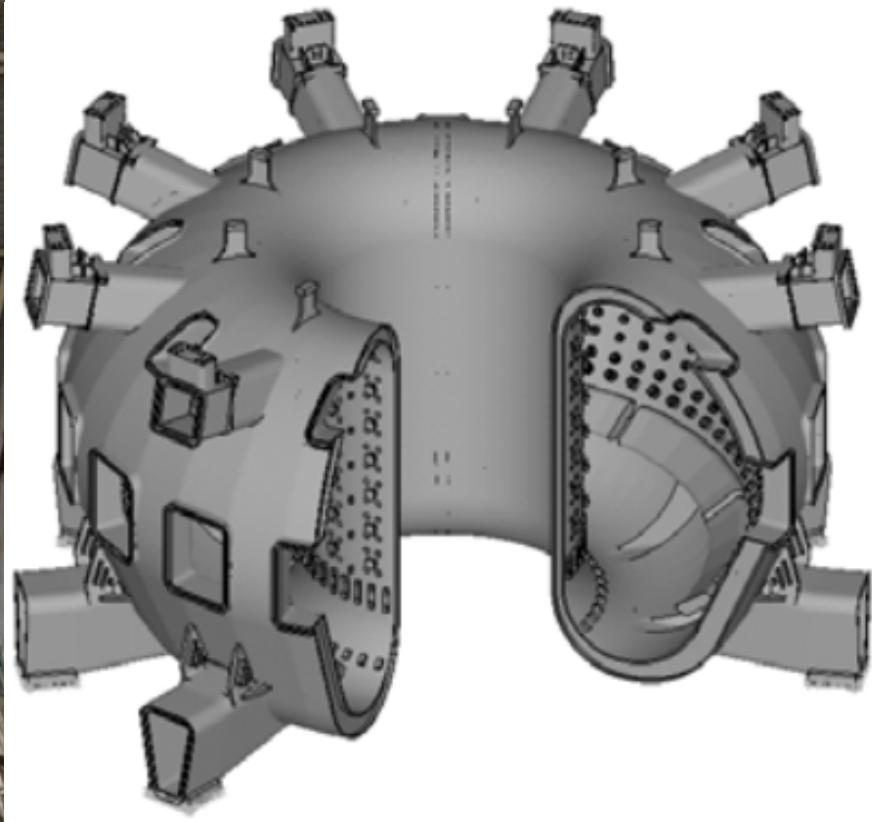
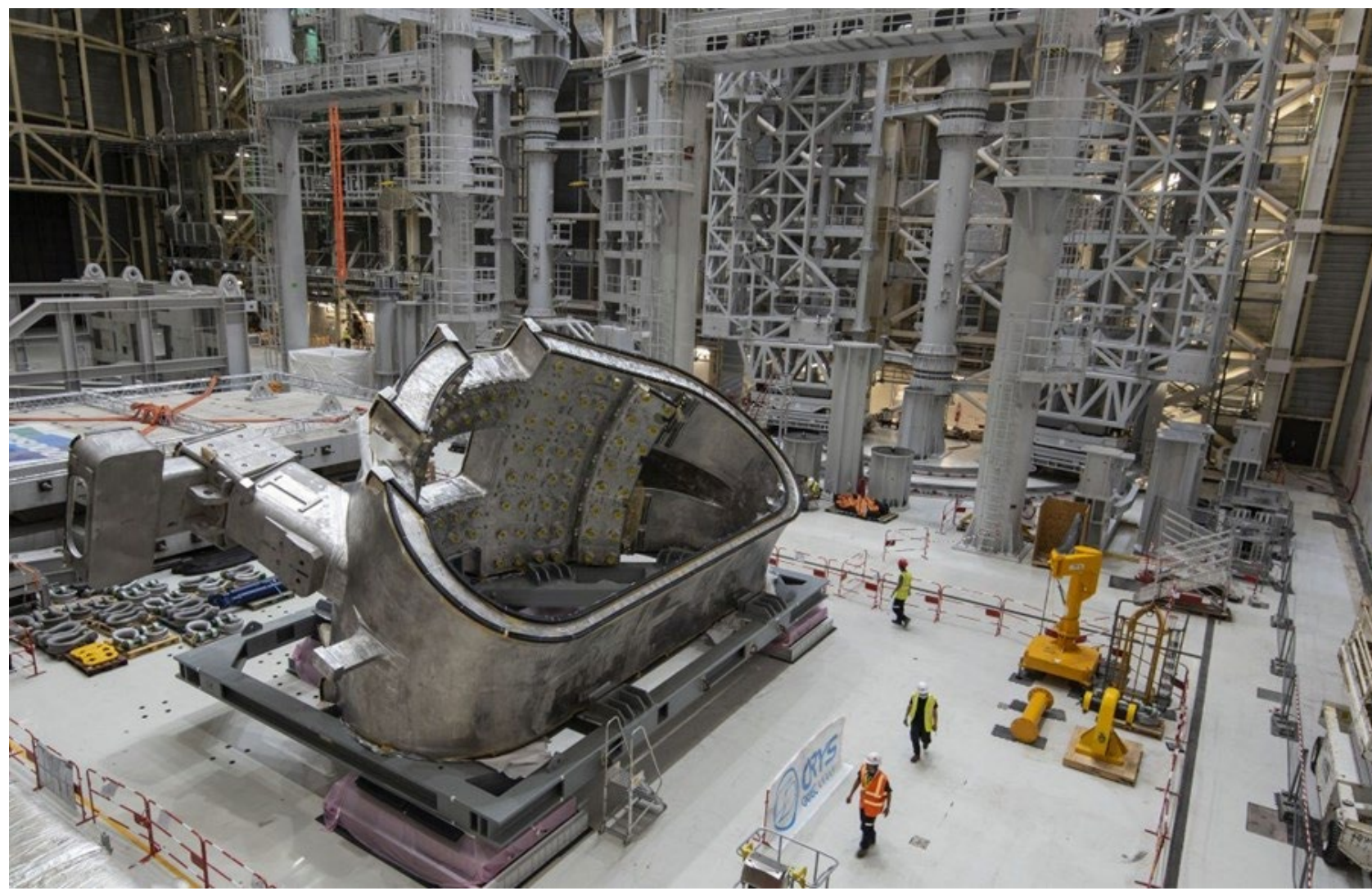


Схема реакторного здания GE BWR Mark I



**Разрушения на атомной станции «Фукусима-1» на
16 марта 2011 года**



3d модель вакуумной камеры



Секция вакуумной камеры международного экспериментального термоядерного реактора типа ИТЭР. Полный внутренний объем **1400 м³**

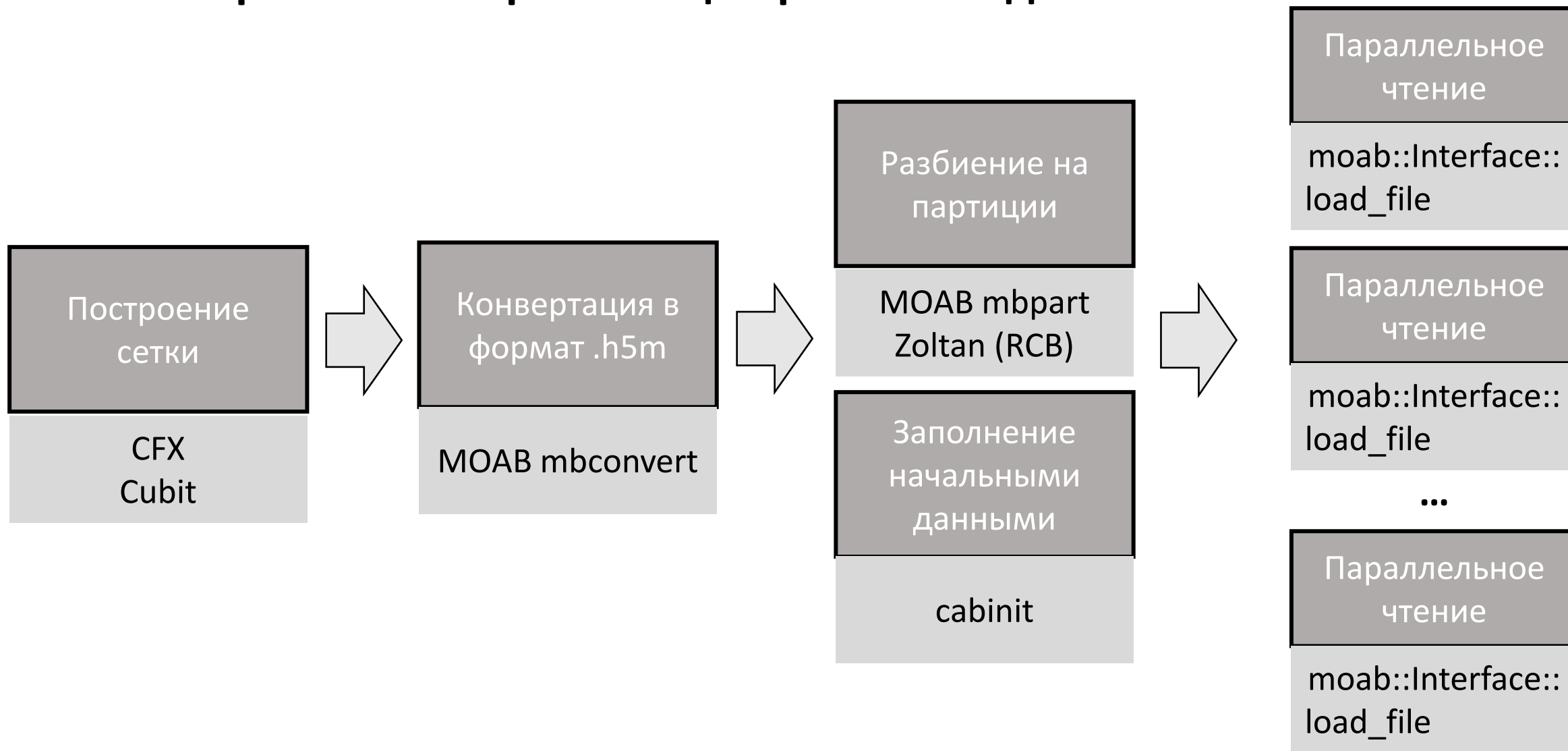


Решаемые задачи

- Задачи истечения и распространения горючих газов в пространстве
- Задачи крупномасштабного горения и детонации распределенных горючих смесей
- Численное решение уравнений Навье-Стокса для многокомпонентной газовой смеси (перенос, вязкость, теплопроводность, диффузия)
- Моделирование излучения (диффузионная модель, модель дискретных ординат)
- Модель крупномасштабного горения
- Модель детальной химической кинетики
- Модель детонации (одностадийная хим. кинетика)



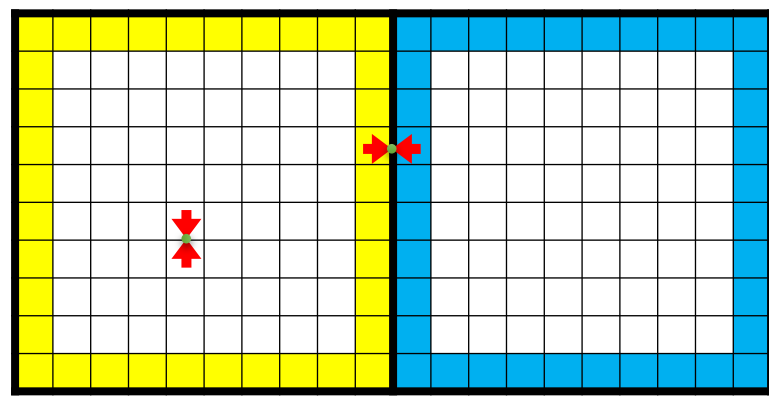
Параллельная реализация расчета кодом КАБАРЕ



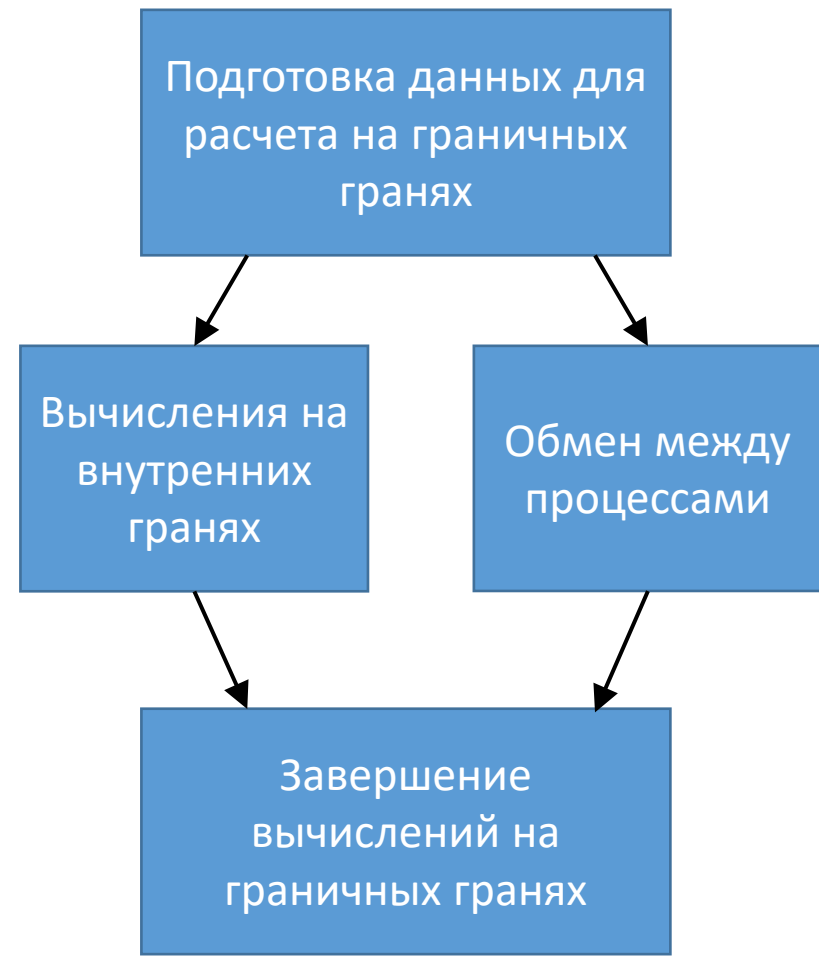
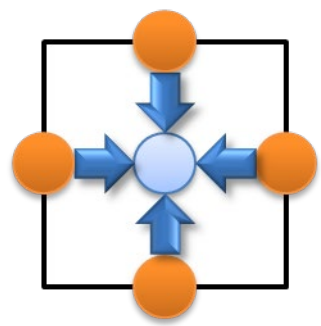


Асинхронные межпроцессорные обмены

Фаза-1:



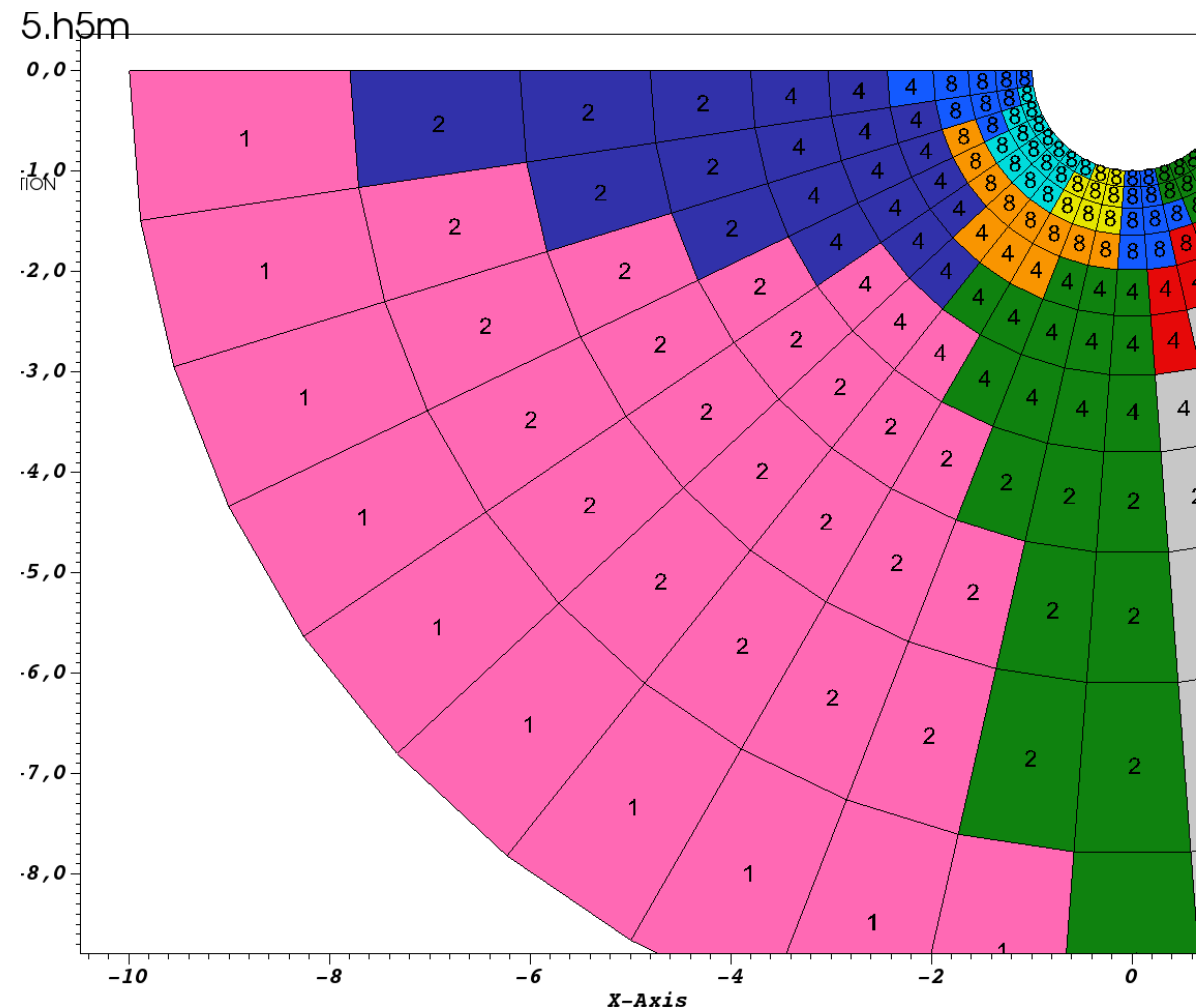
Фаза-2:





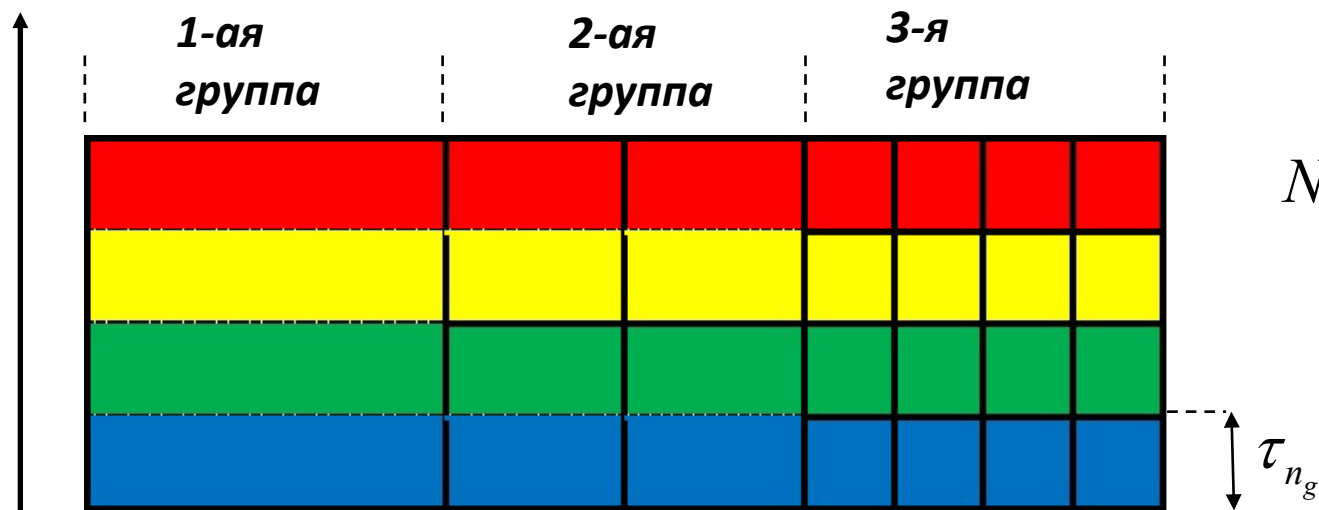
Асинхронное интегрирование по времени

$$\tau < CFL \frac{l}{|v| + c}$$



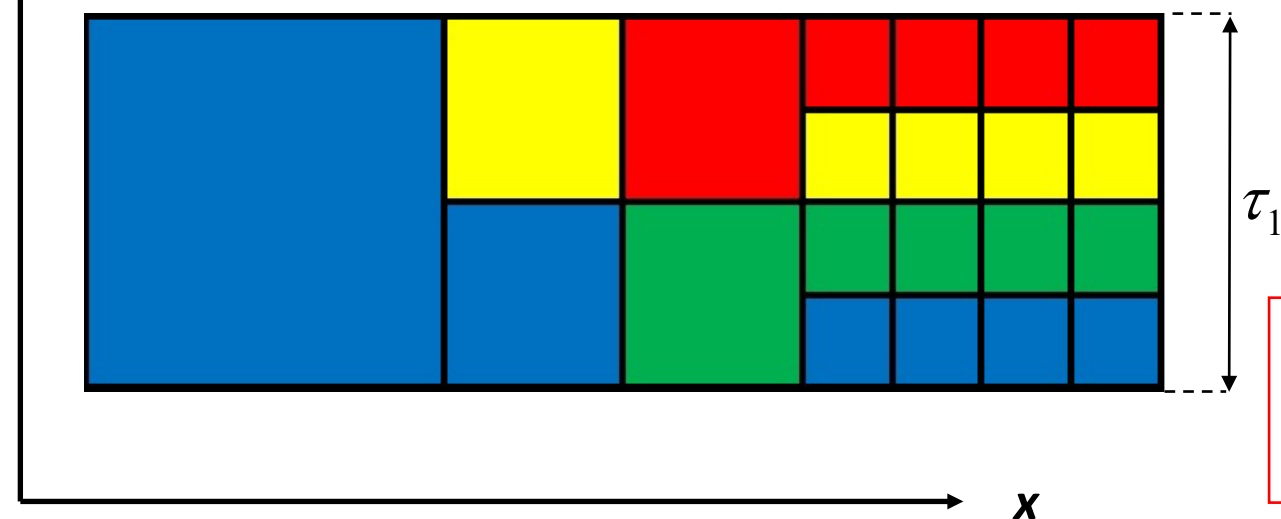
Вычислительная сложность (вес)

Синхронное интегрирование



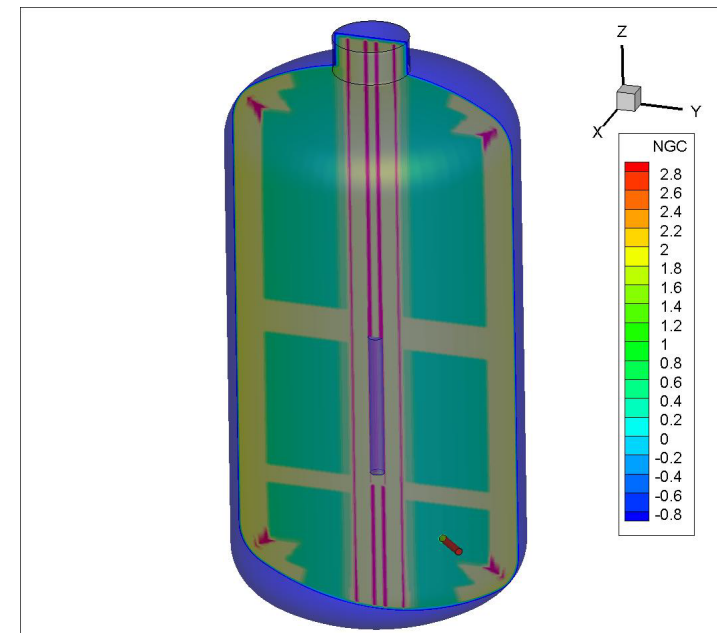
$$N_{Sync} = 2^{n_g - 1} n_c$$

Асинхронное интегрирование



$$N_{Async} = \sum_{i=1}^{n_g} 2^{i-1} n_{ci}$$

$$A = \frac{N_{Sync}}{N_{Async}} = \sum_{i=1}^{n_g} \left(2^{n_g - i} \cdot \frac{n_{ci}}{n_c} \right)$$



Elem[1] = 898057 / 2151630
(41.738449%)

Elem[2] = 1232828 / 2151630
(57.297398%)

Elem[3] = 20745 / 2151630
(0.964153%)

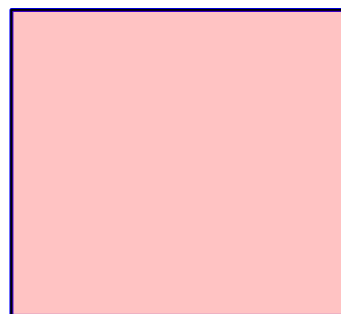
acceleration = **2.497037**

Сложности, возникающие при моделировании задач водородной безопасности



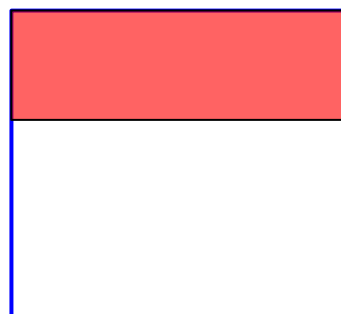
Основные режимы течения в контейнменте при выбросе струи пара и водорода

Пространственно-однородное распределение водорода

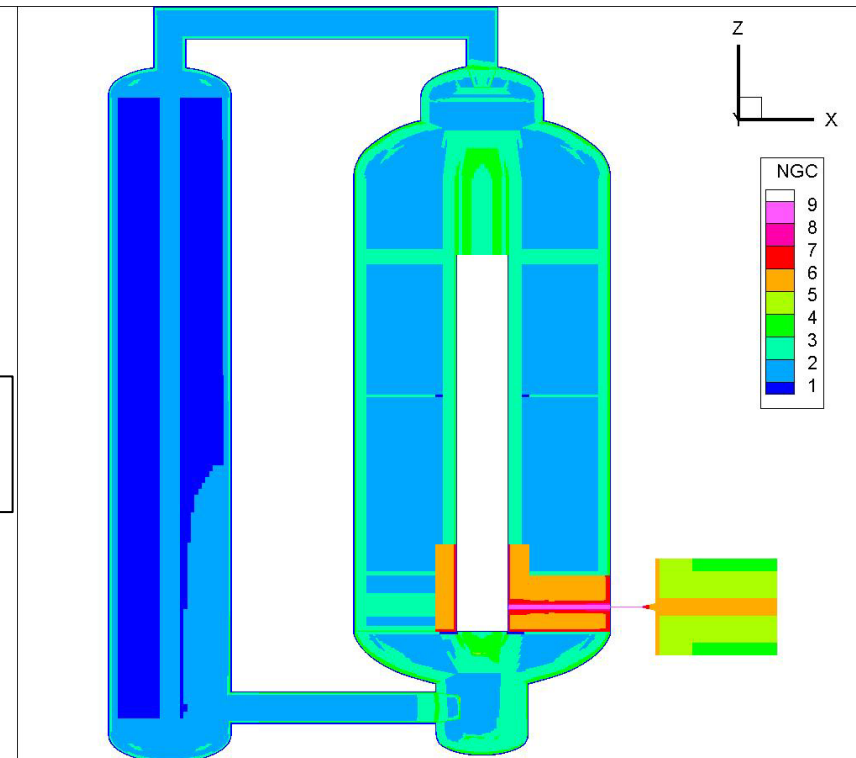
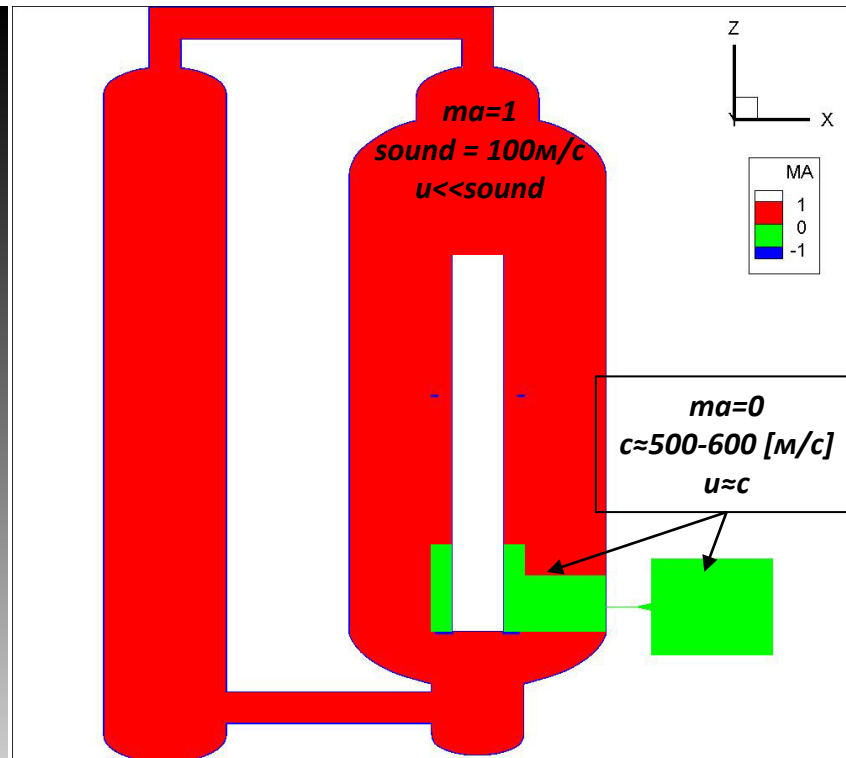
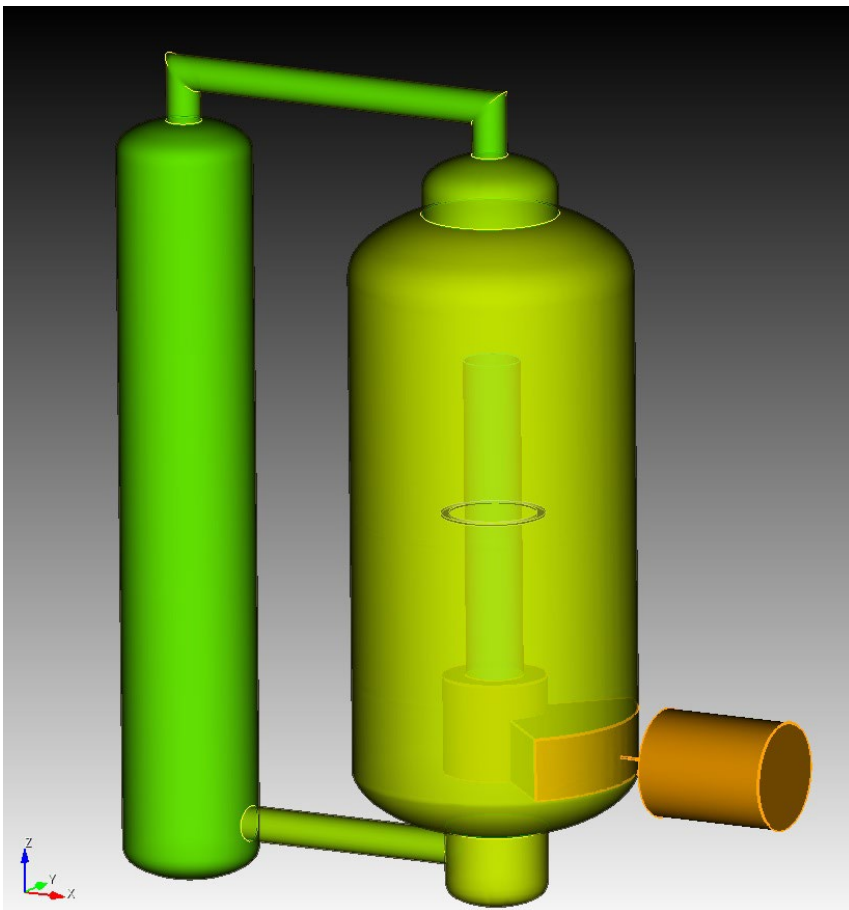


бедная смесь – возможно распространение только изобарических пламен (дефлаграции, шаровых)

Стратифицированное распределение водорода



околостехиометрическая смесь – возможно распространение барических пламен (детонационных, звуковых)



Elem[1] = 43177 / 1438906 (3.000682%)

Elem[2] = 521585 / 1438906 (36.248720%)

Elem[3] = 525080 / 1438906 (36.491612%)

Elem[4] = 206930 / 1438906 (14.381065%)

Elem[5] = 17034 / 1438906 (1.183816%)

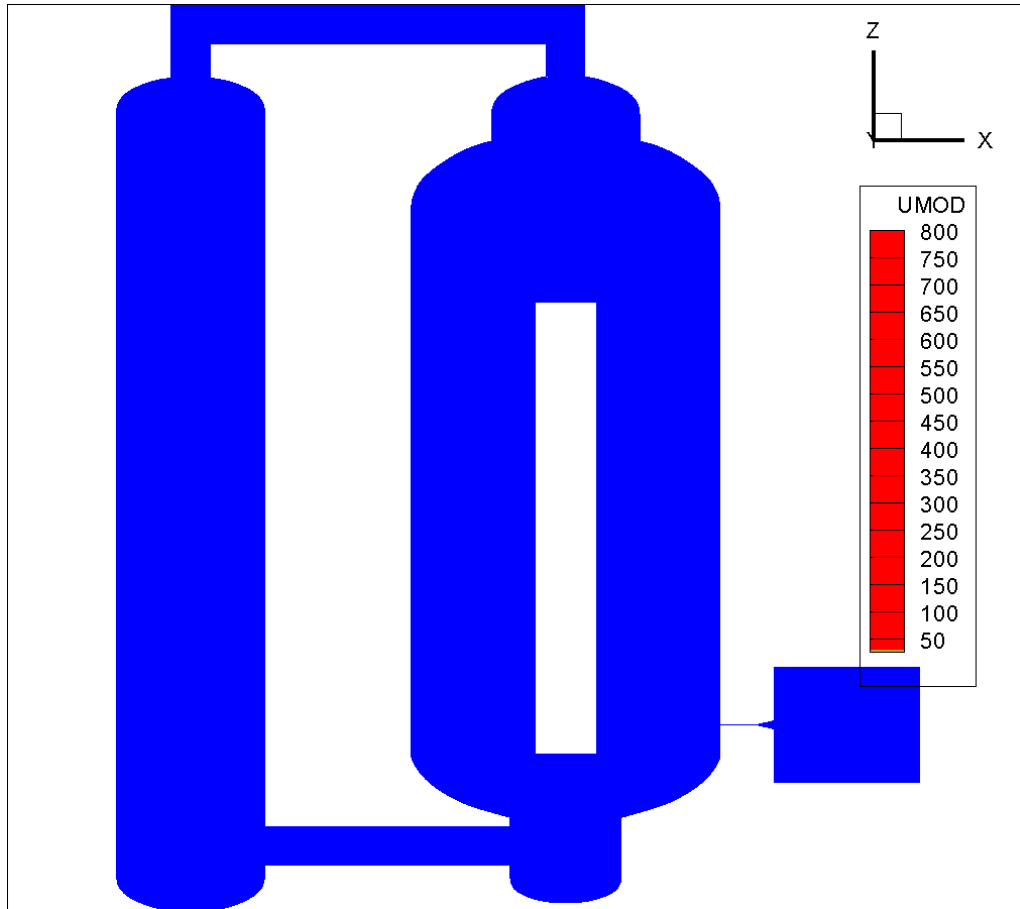
Elem[6] = 79361 / 1438906 (5.515371%)

Elem[7] = 37053 / 1438906 (2.575081%)

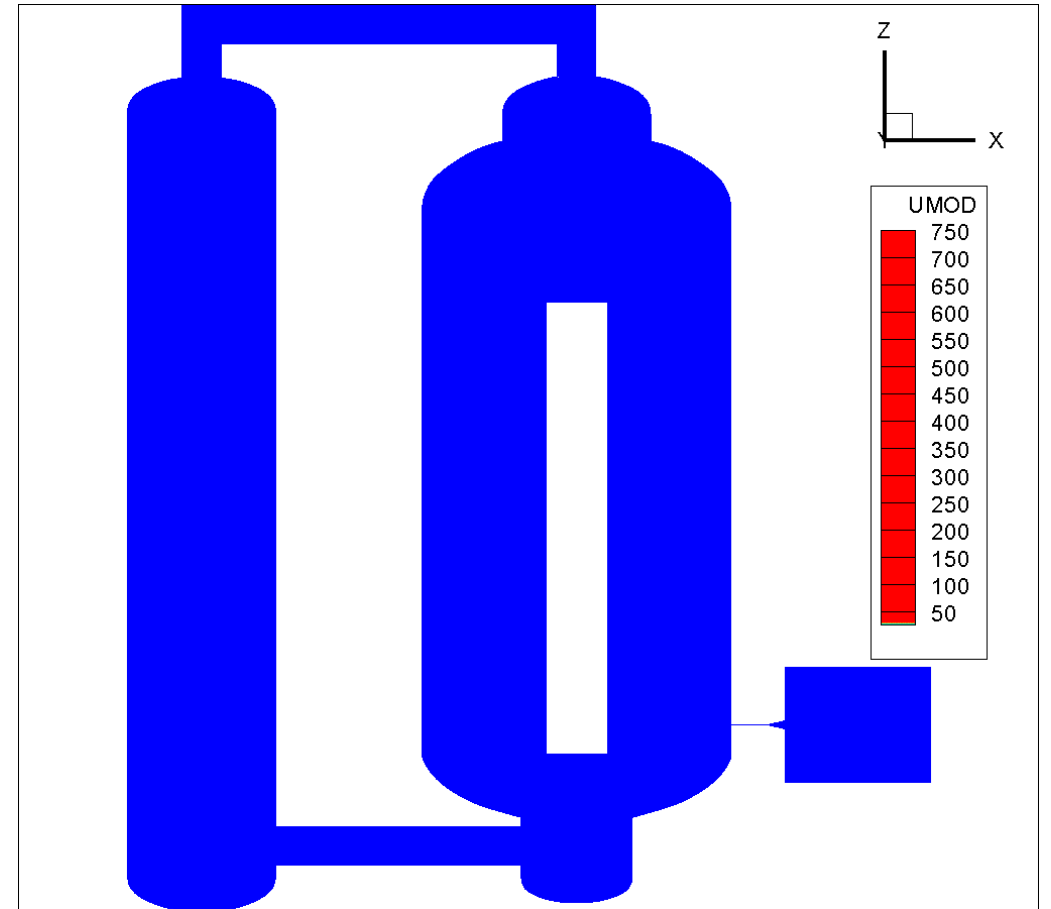
Elem[8] = 4146 / 1438906 (0.288136%)

Elem[9] = 4540 / 1438906 (0.315517%)

acceleration_theory = 31.433990



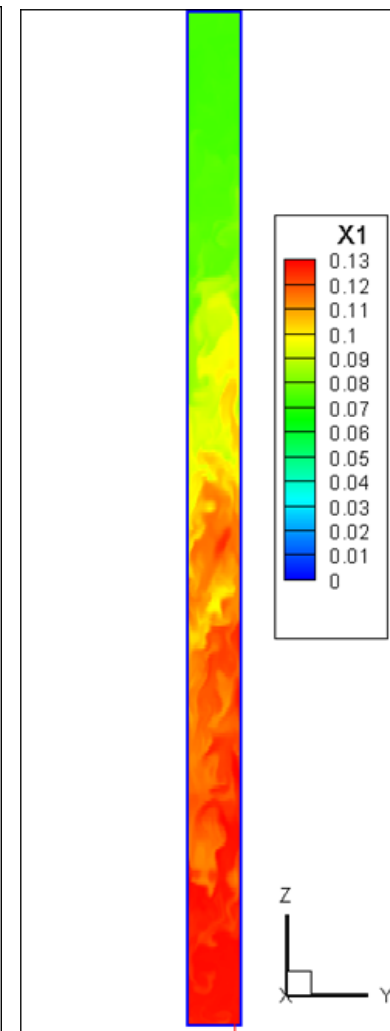
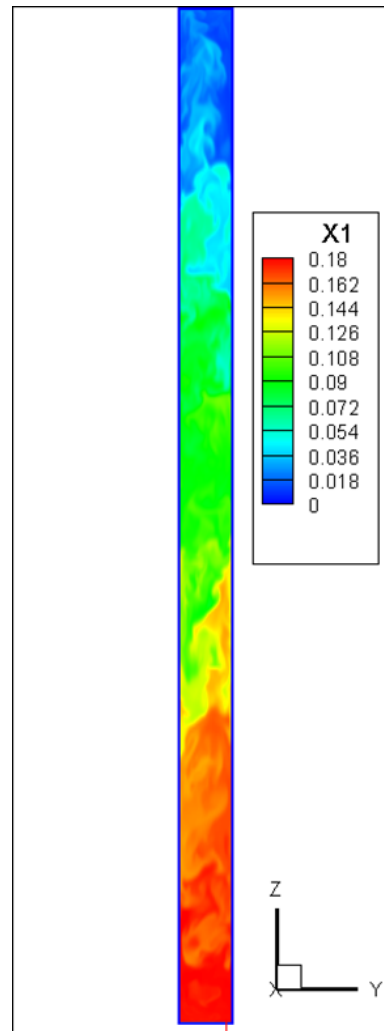
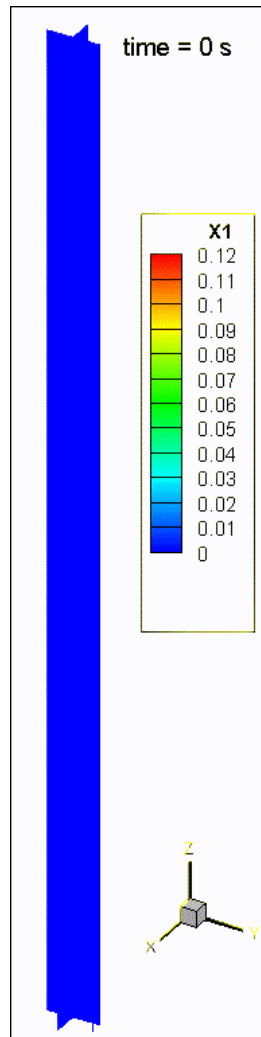
«Сжимаемая» модель
 $A \approx 0,1 [s/h]$



«Гибридная» модель
 $A \approx 0,31 [s/h]$
(В 3,1 раза быстрее)



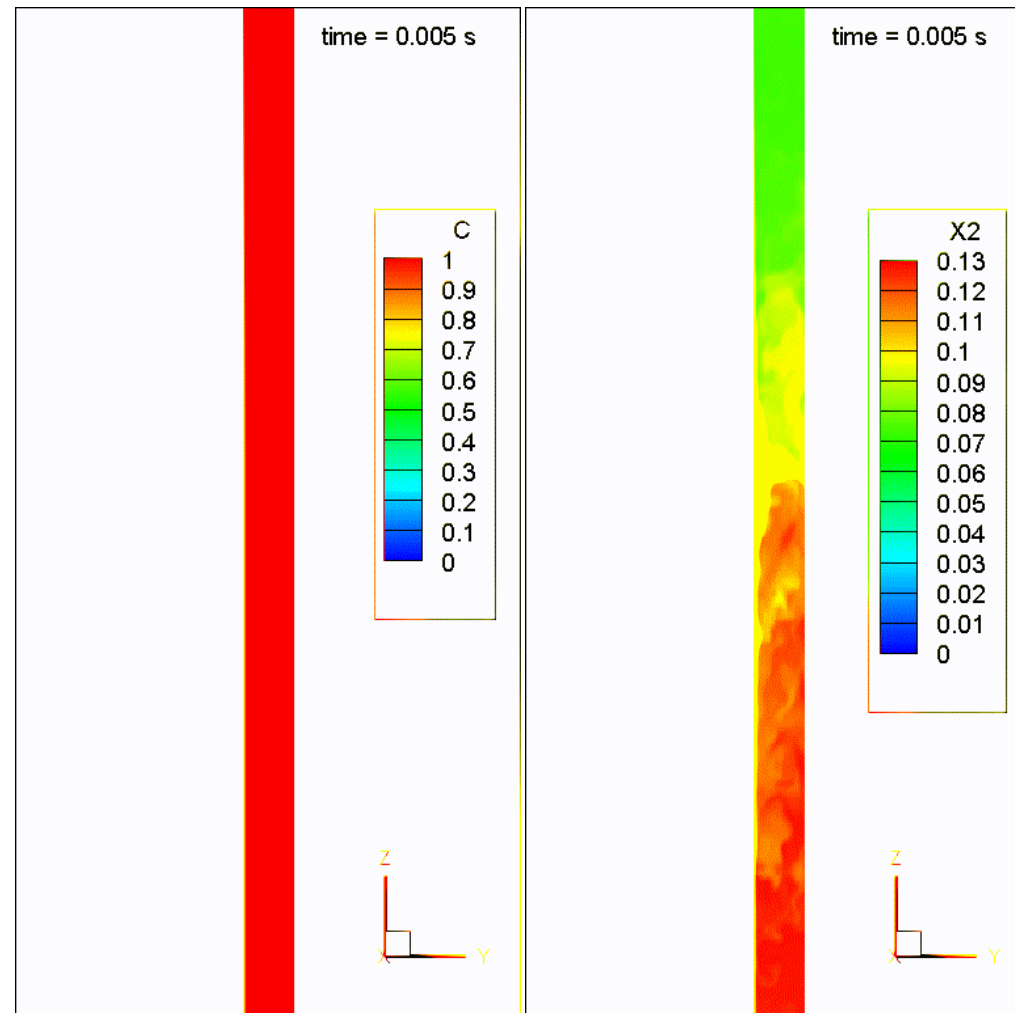
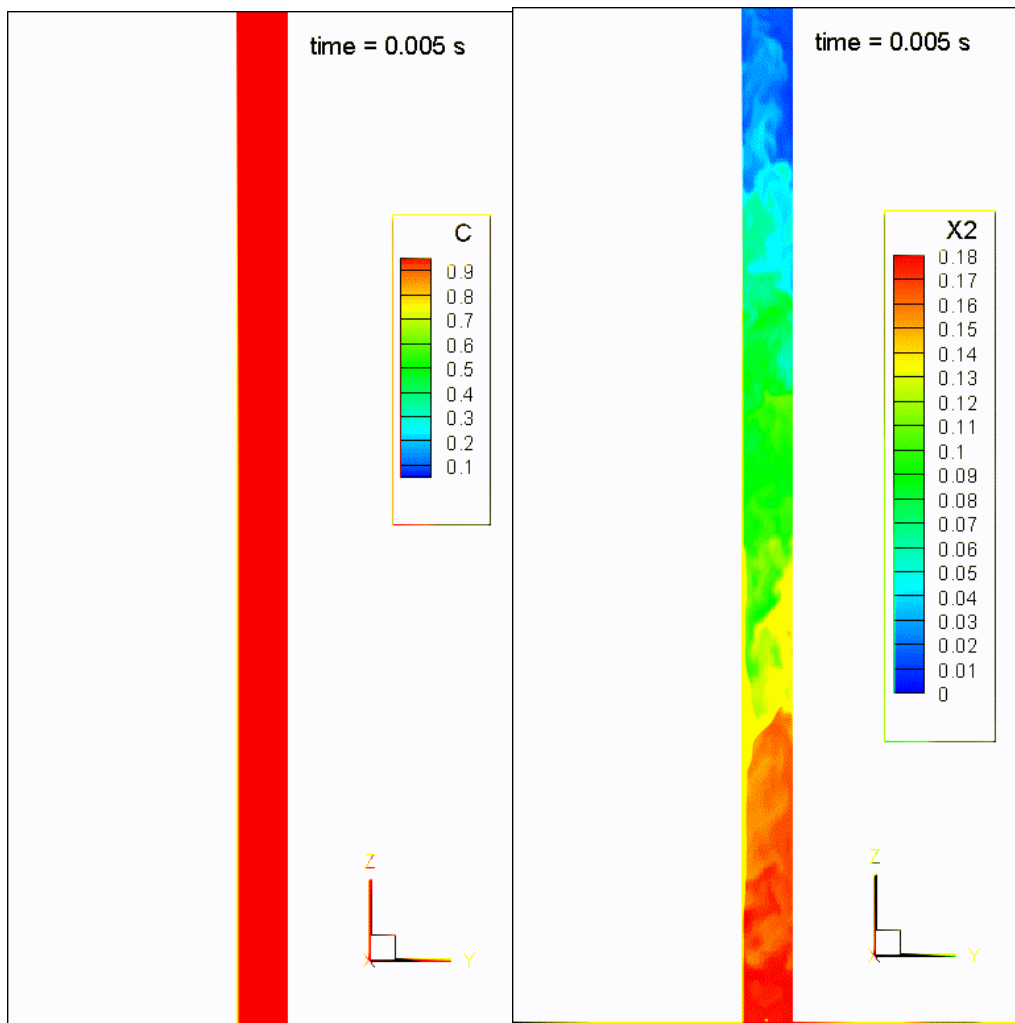
Двухэтапный расчет эксперимента с горением водородо-воздушной смеси



Заполнение



Двухэтапный расчет эксперимента с горением водородо-воздушной смеси



Горение



Зависимость последствий горения от степени стратификации

Однородная смесь 10 % об. водорода в воздухе:

Максимальная скорость фронта пламени **4,84 м/с**

Давление достигает величины $\sim 4,33$ бар, что соответствует давлению полного сгорания однородной смеси 10 % об. Водорода

Температура в установке повышается вплоть до полного сгорания горючей смеси, при этом максимальная температура достигает **~ 1400 °С**

Сильная стратификация:

Максимальная скорость фронта пламени **26,9 м/с**

Давление достигает величины $\sim 4,33$ бар, что соответствует давлению полного сгорания однородной смеси 10 % об. Водорода

Температура в установке повышается вплоть до полного сгорания горючей смеси, при этом максимальная температура достигает **~ 2230 °С**

Слабая стратификация:

Максимальная скорость фронта пламени **7,76 м/с**

Давление достигает величины $\sim 4,33$ бар, что соответствует давлению полного сгорания однородной смеси 10 % об. Водорода

Температура в установке повышается вплоть до полного сгорания горючей смеси, при этом максимальная температура достигает **~ 1750 °С**

Размеры помещения: 2,9 м × 0,74 м × 1,22 м

Размер отверстия истечения и вентиляционных окон: 0,3048 м × 0,1524 м

Расход водорода = $9,43833 \times 10^{-4}$ м³/с

Скорость истечения водорода = 0,02032 м/с

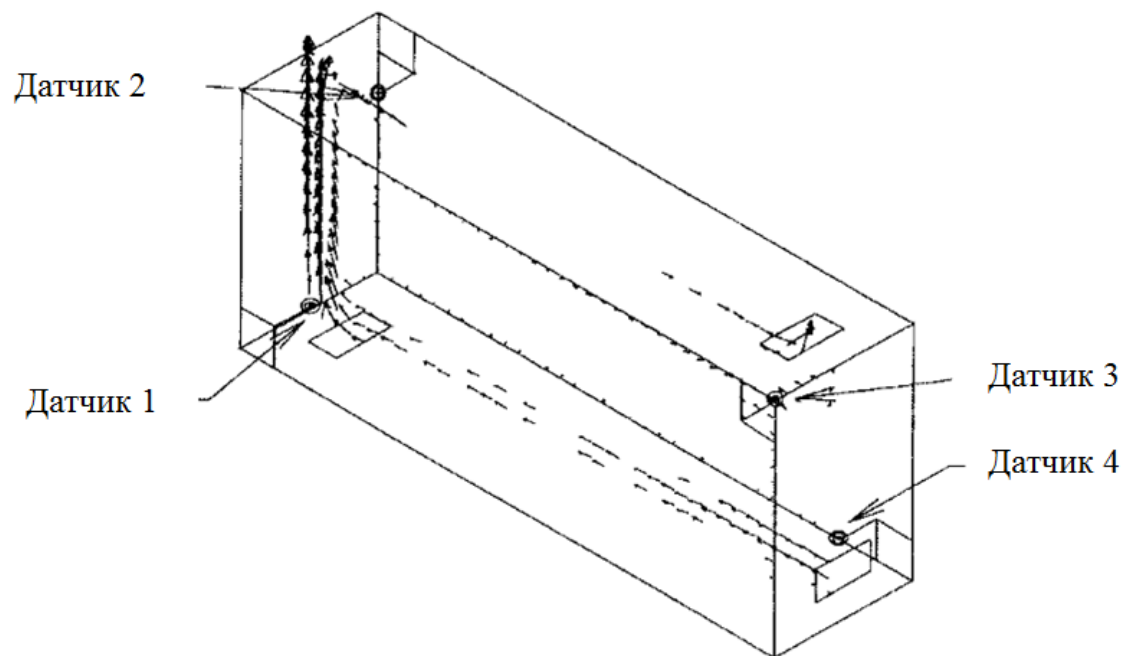
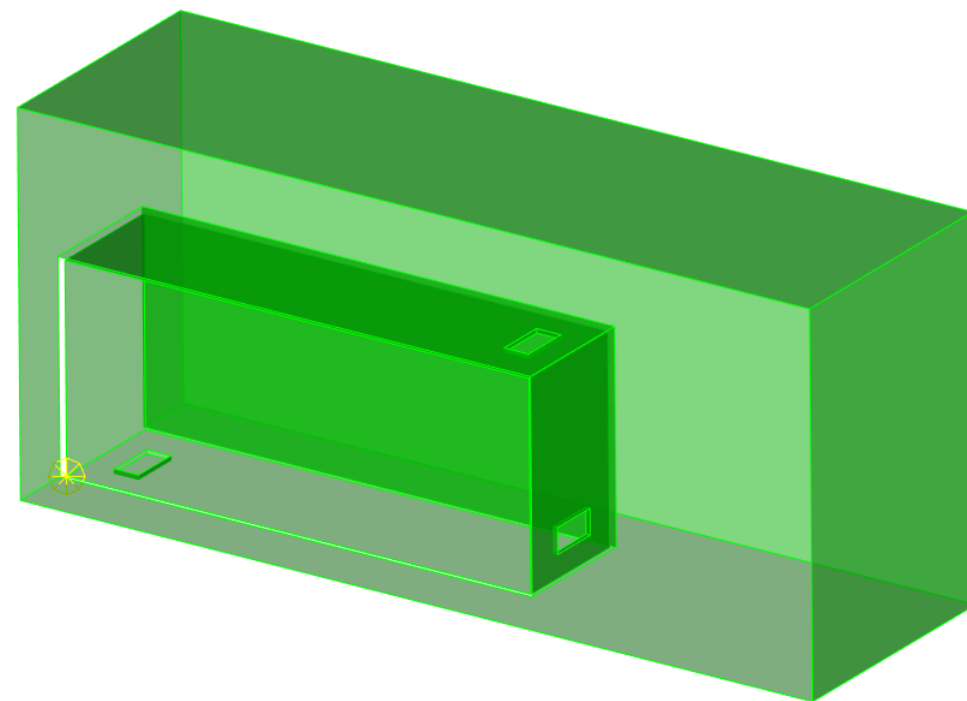
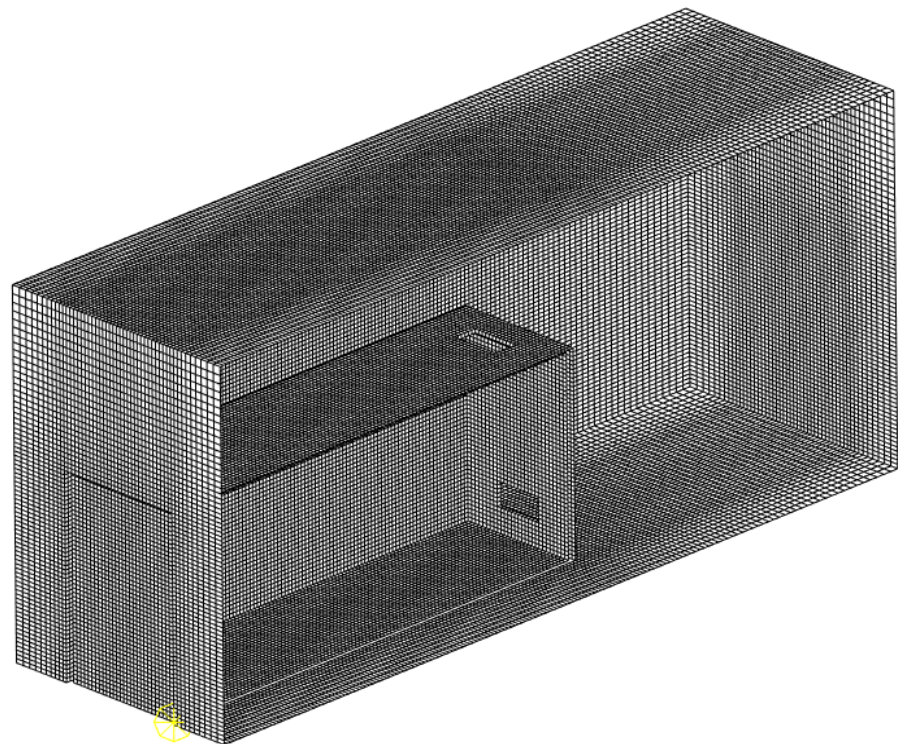


Схема расположения датчиков



Расчетная область эксперимента



Сеточная модель coarse с шагом 25.4 мм

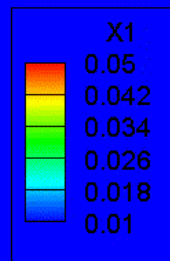


Сеточная модель fine с шагом 12.7 мм



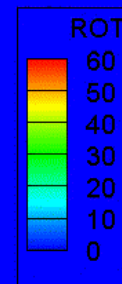
coarse X_{H2}

time = 5.00 s



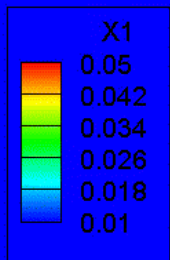
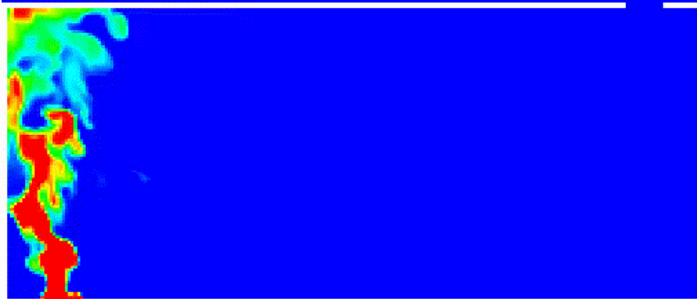
coarse ROT

time = 5.00 s



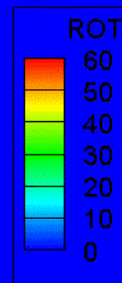
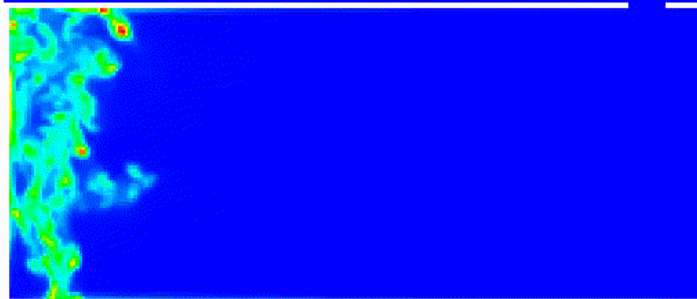
fine X_{H2}

time = 5.00 s

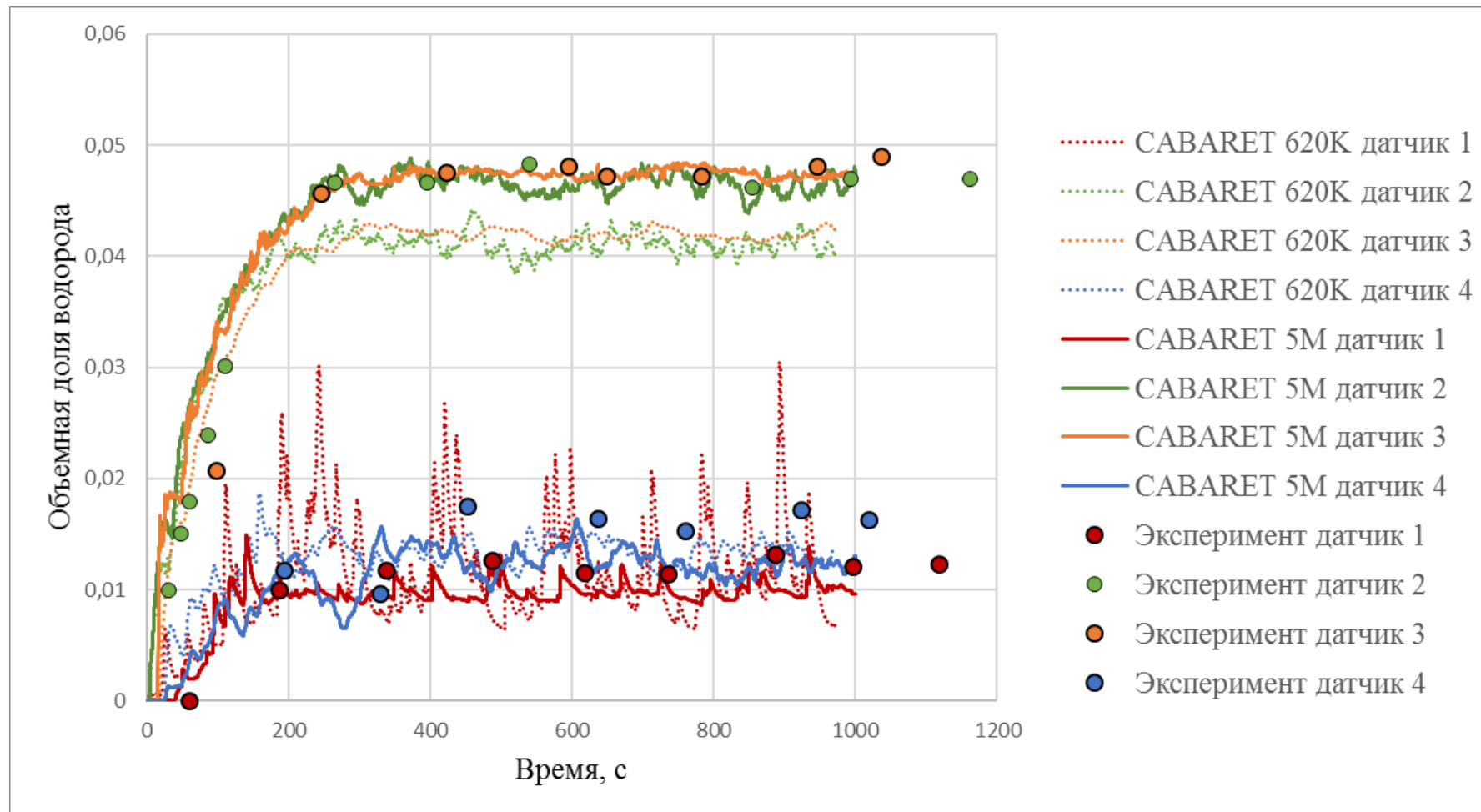


fine ROT

time = 5.00 s

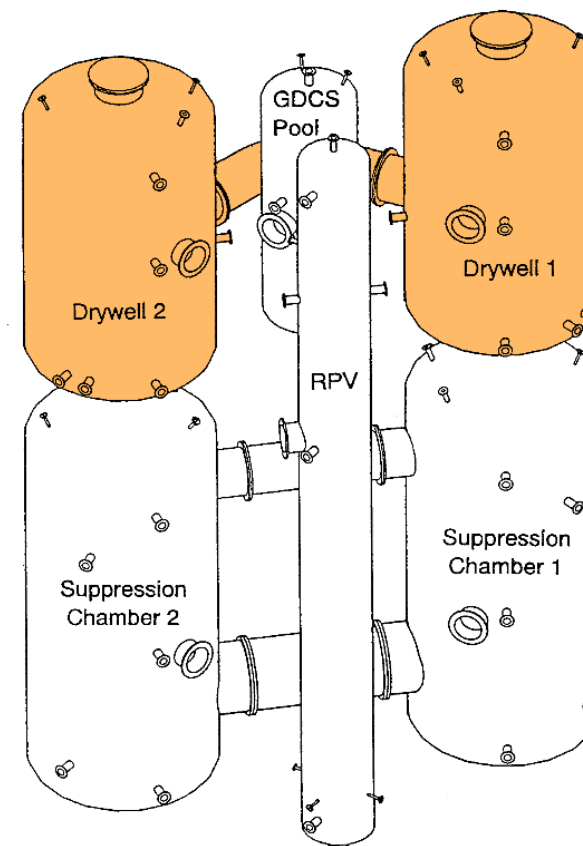


Сравнение результатов расчетов для двух сеток с экспериментальными данными

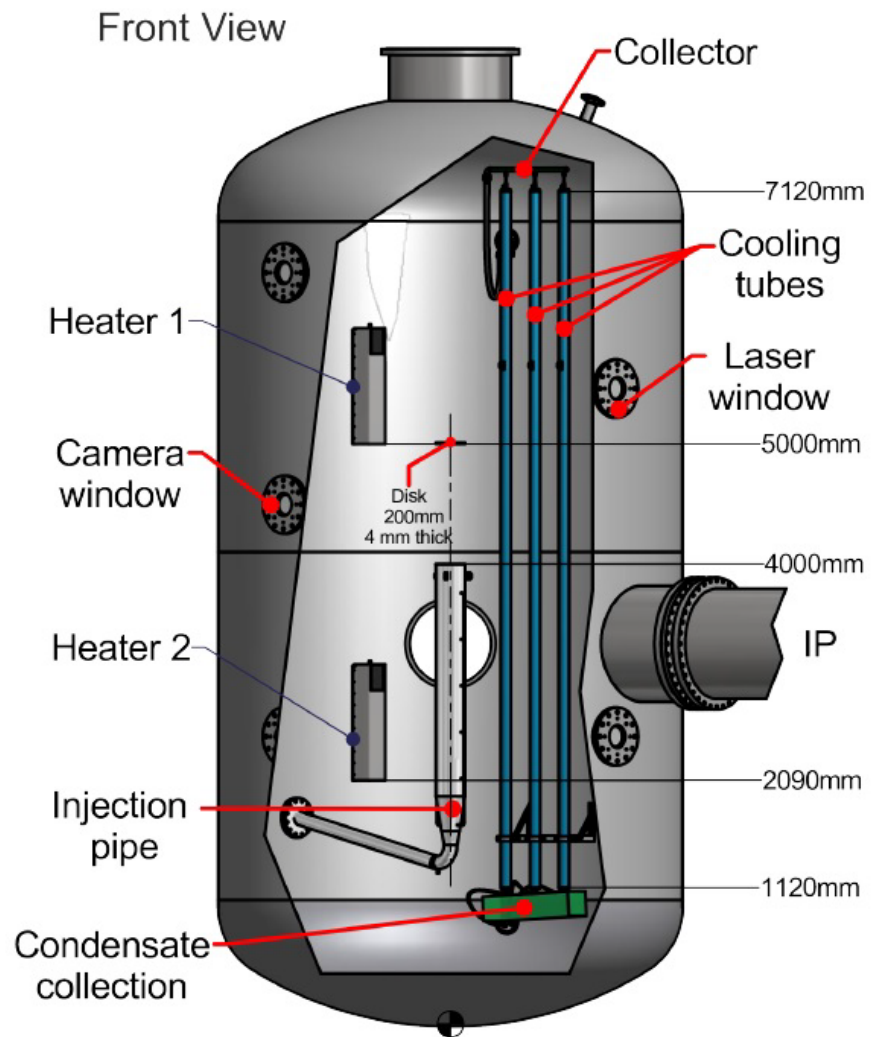


Крупномасштабная многоблочная экспериментальная установка PANDA

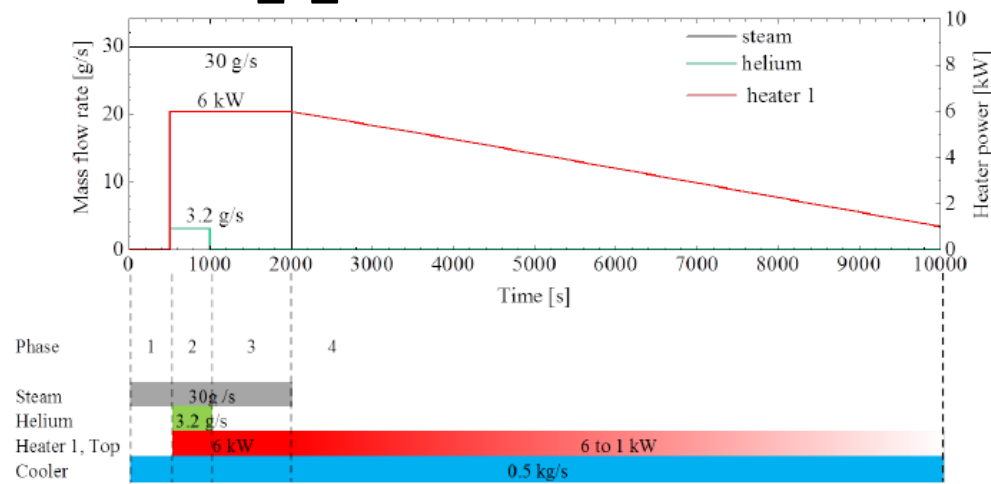
Программа	Годы проведения
OECD/NEA: SETH	2001-2006
OECD/NEA: SETH-2	2007-2010
EURATOM- ROSATOM: ERCOSAM- SAMARA	2010-2014
OECD/NEA: HYMERES	2013-2016
OECD/NEA: HYMERES-2	2017-2021



Экспериментальная установка PANDA (PSI, Швейцария)
Объем 2-х сосудов 183,3 м³



HP2_1_2



HP2_2_2

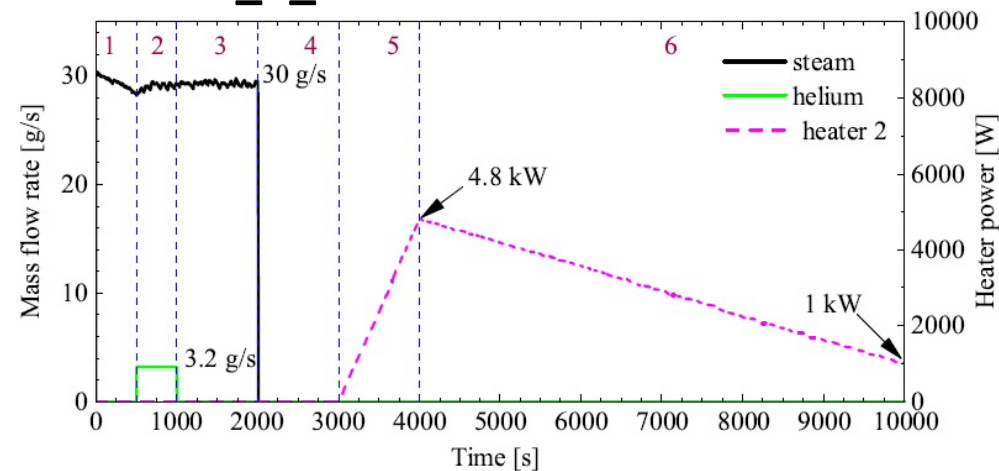
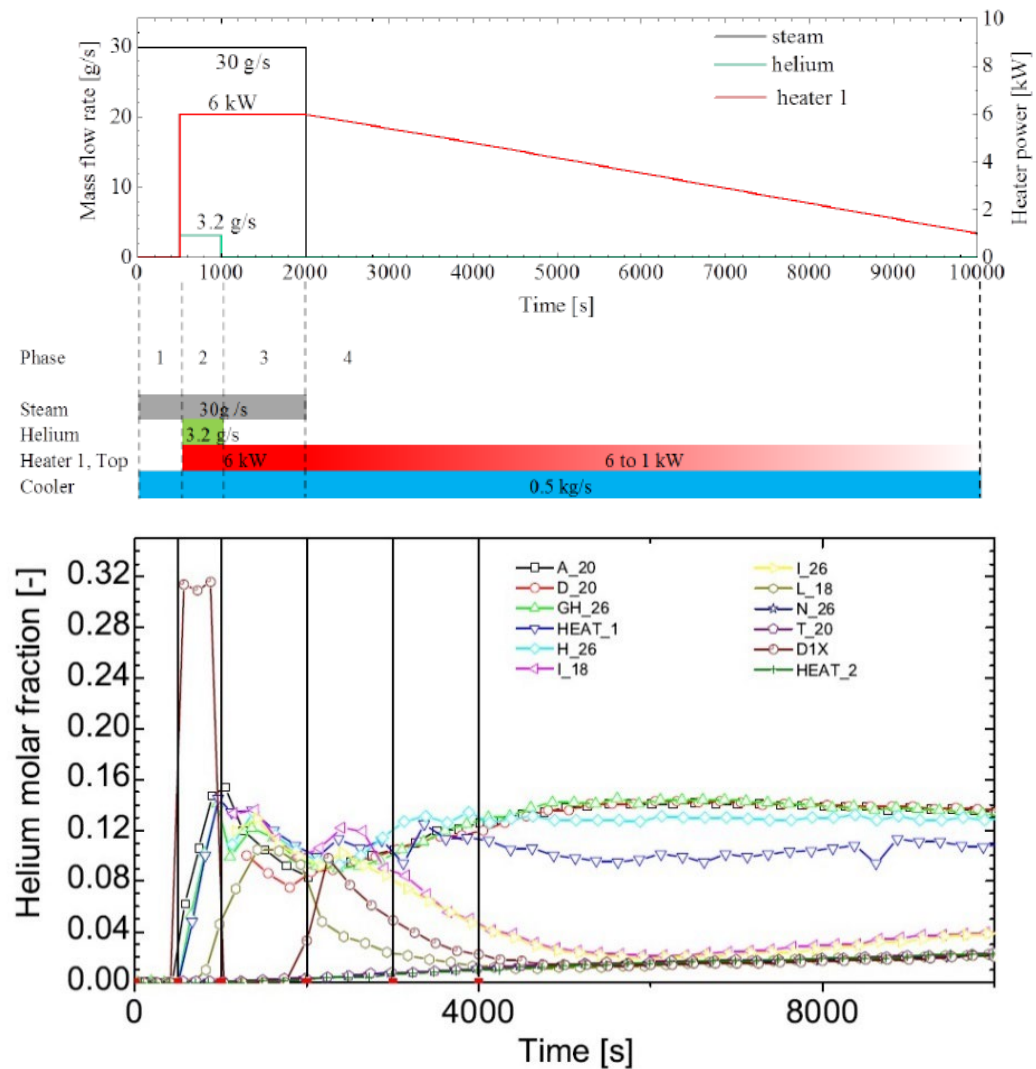
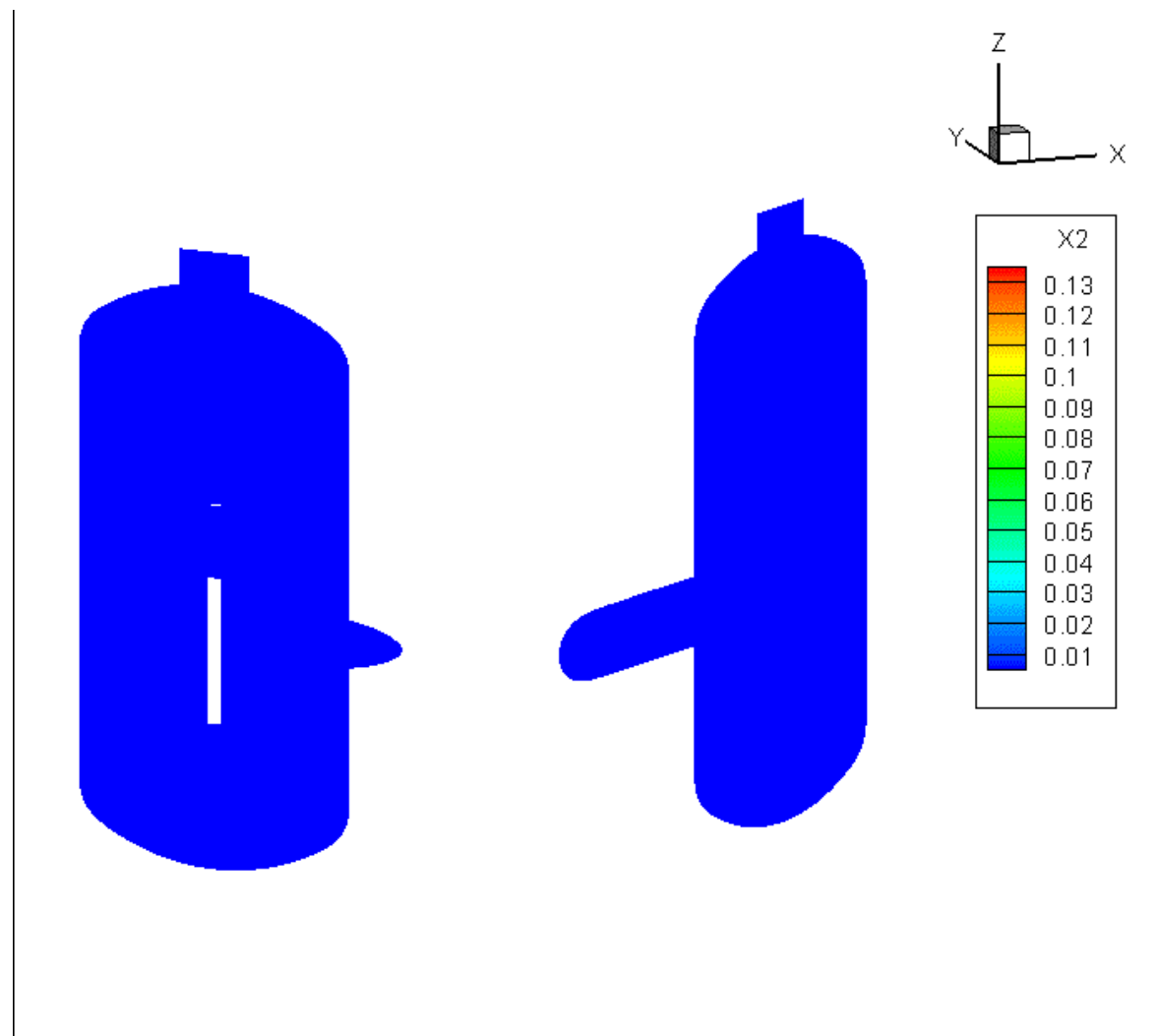


Figure 3.4: Steam and helium mass flow rates and heater power

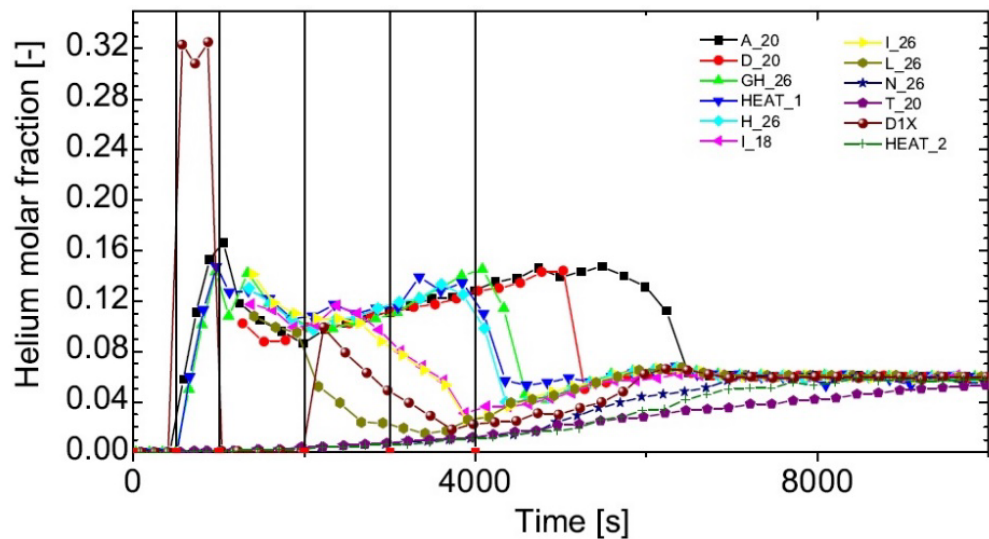
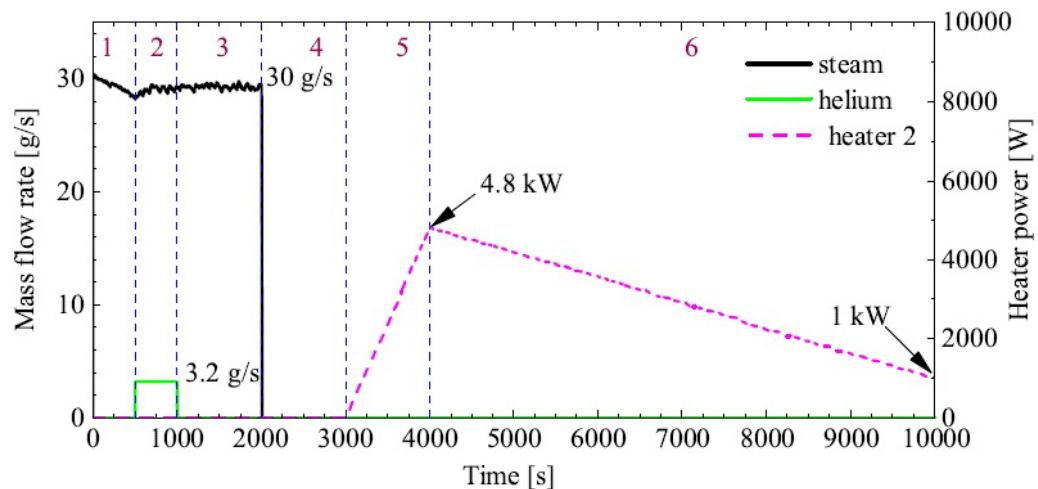
Результаты НР2_1_2



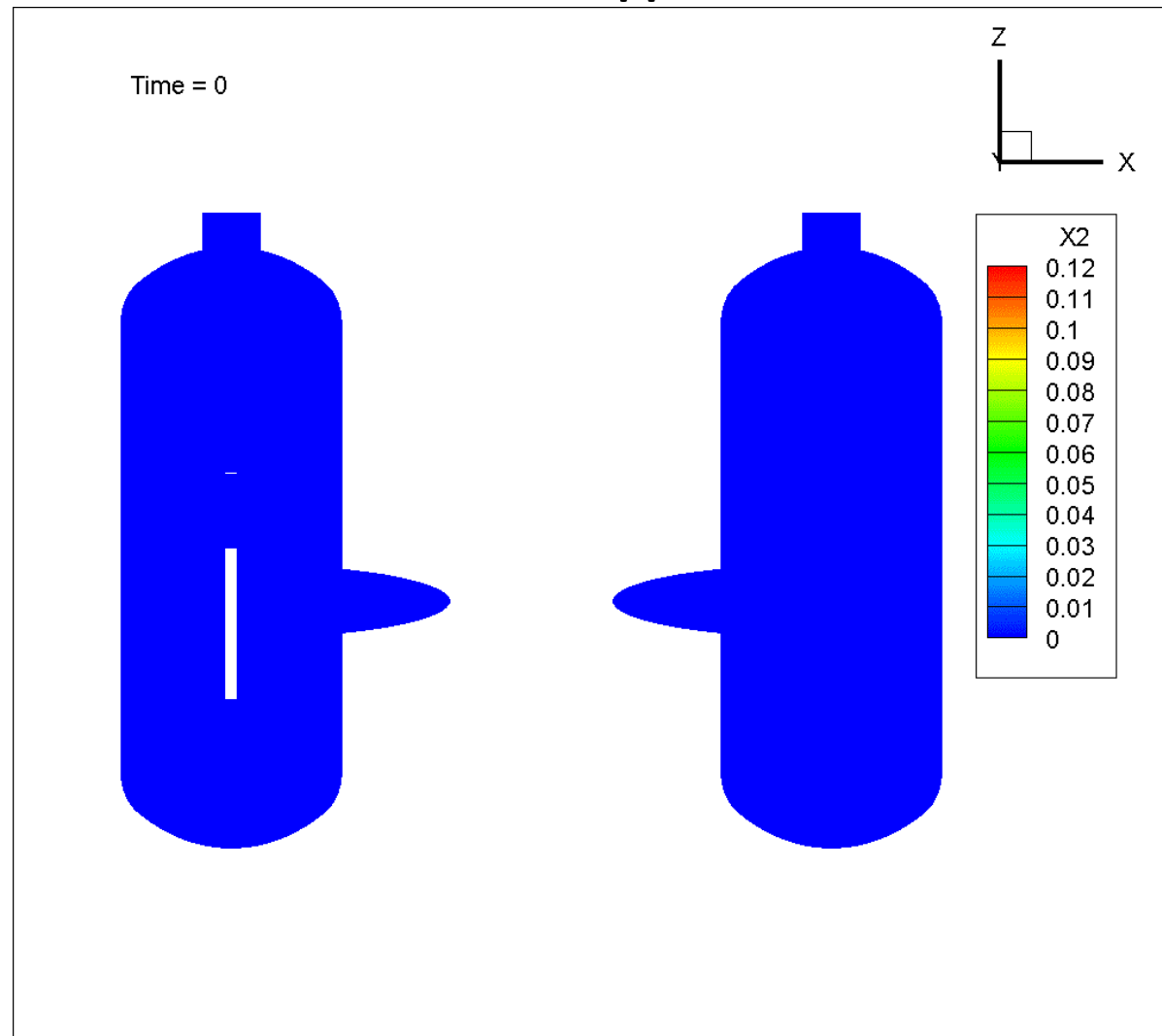
Мольная доля гелия



Результаты НР2_2_2



Мольная доля гелия



Верификация кода CABARET-SC1 на задаче о горении водорода в установке THAI

Объем расчетной области – 60. м.куб.

Высота – 9.34 м, диаметр – 3.2 м

Расчетная сетка – 682.7 тыс. яч.

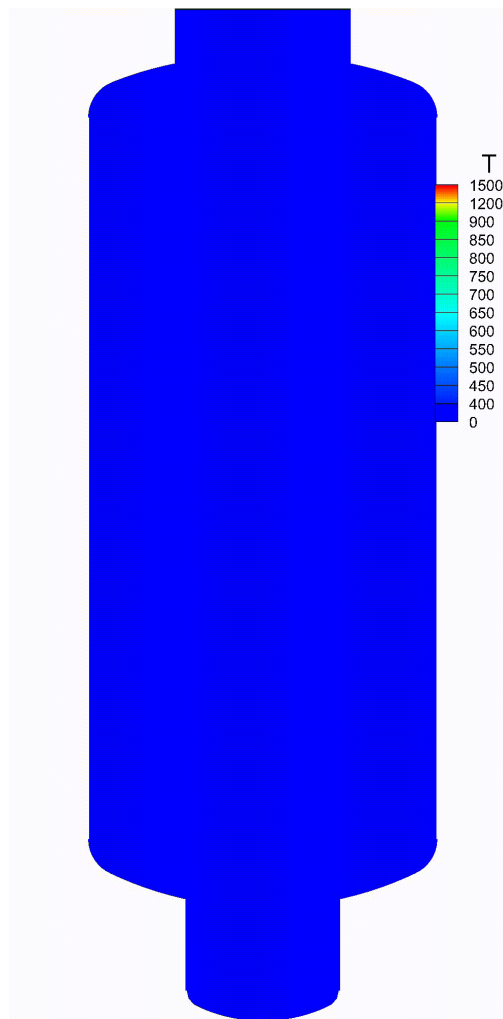
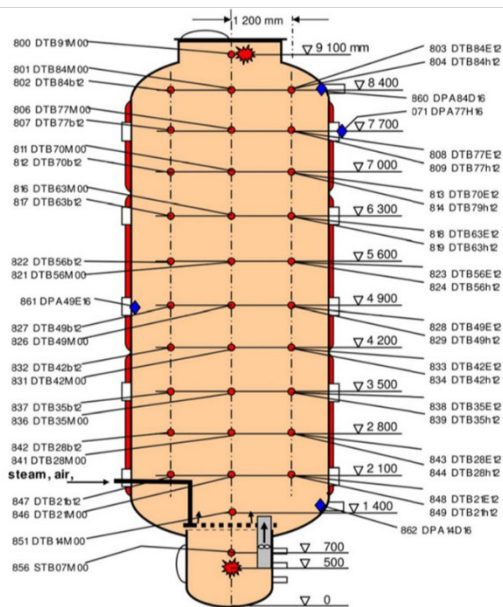
Размер ячеек – 1-2 см.

Концентрация водорода - 9.9%

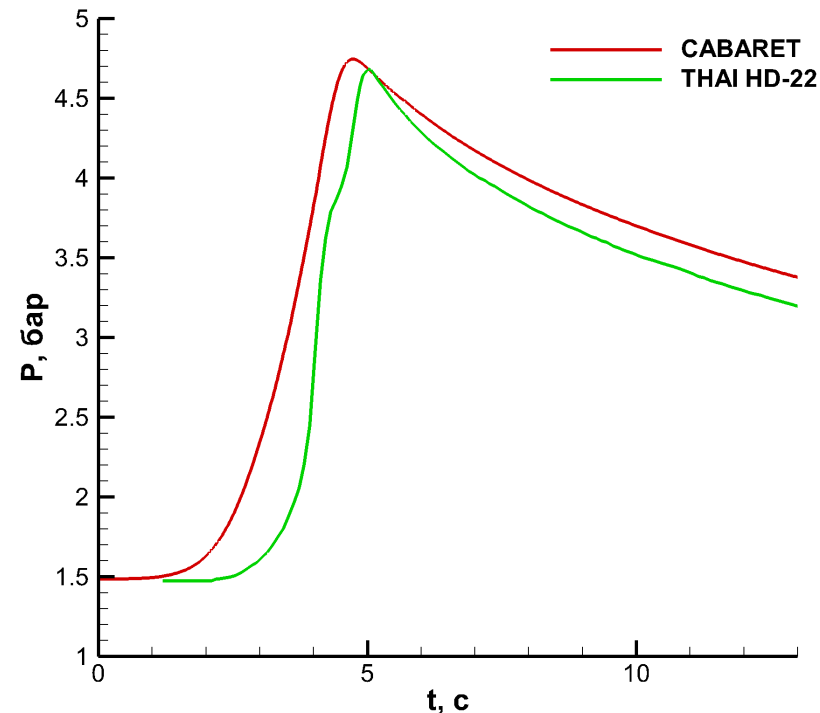
Концентрация пара - 25.3%

Масса водорода – 5.834 кг

$T = 365\text{K}$, $P = 1.487\text{атм}$



Эволюция поля температуры в расчёте по ПрЭВМ CABARET-SC1



Сравнение показаний датчиков давления для эксперимента и расчёта по CABARET-SC1

Верификация кода CABARET-SC1 на задаче о горении водорода в установке ENACCEF

Объем расчетной области – 0.79 м.куб.

Высота – 5 м, диаметр трубы– 0.154 м

Расчетная сетка – 0.9, 7, 30 млн. яч.

Размер ячеек – 8, 4, 2мм.

Концентрация водорода - 13%

Масса водорода – 8.5 г

$T = 296\text{K}$, $P = 1\text{атм}$. $BR=0.63$, 9 колец

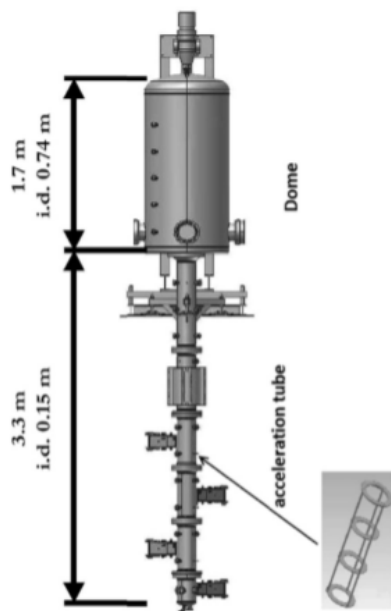
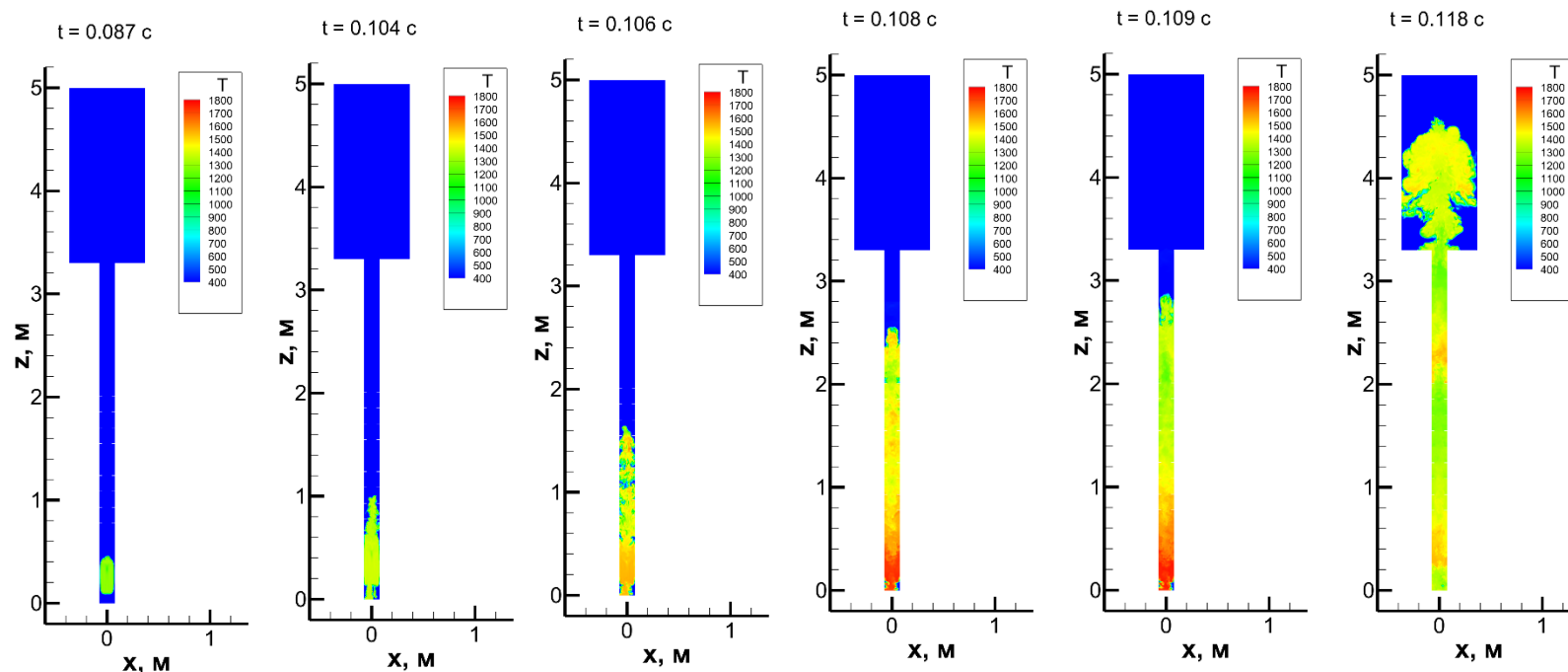
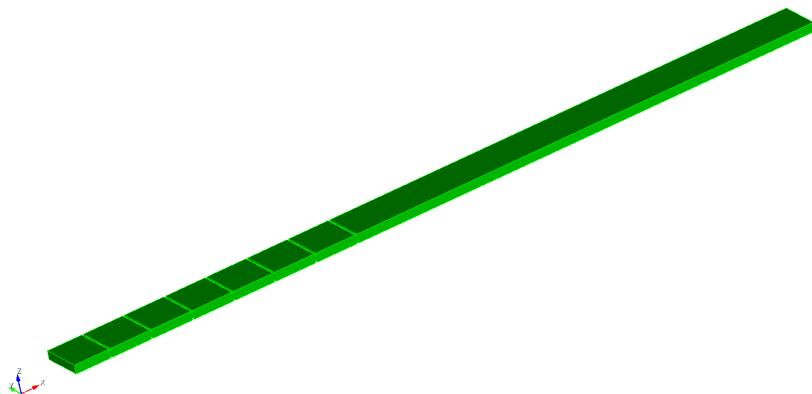


Fig. 1 – General view of the ENACCEF facility.



Поле температуры на различных моменты времени
в расчёте по ПрЭВМ CABARET-SC1

Моделирование быстрого горения в стратифицированной среде, TUM



Геометрическая модель установки с препятствиями

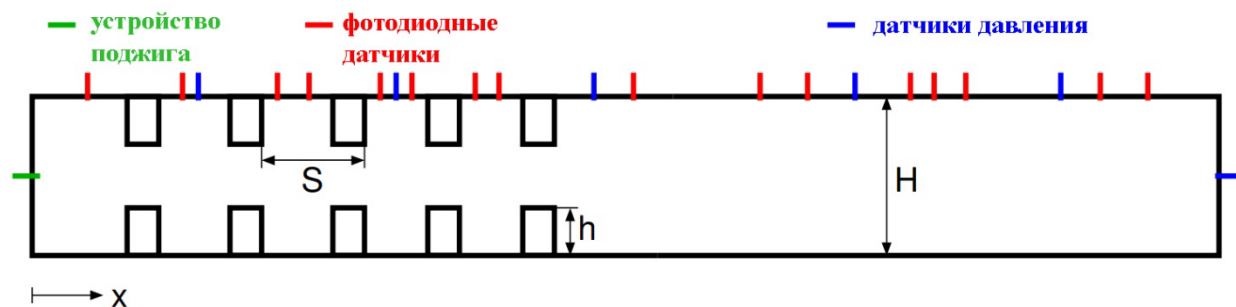


Схема расположения препятствий, устройства поджига, фотодиодных датчиков и датчиков давления

Объем расчетной области – 0.1 м.куб.

Длина – 5.4м

Сечение – 0.3x0.06 м

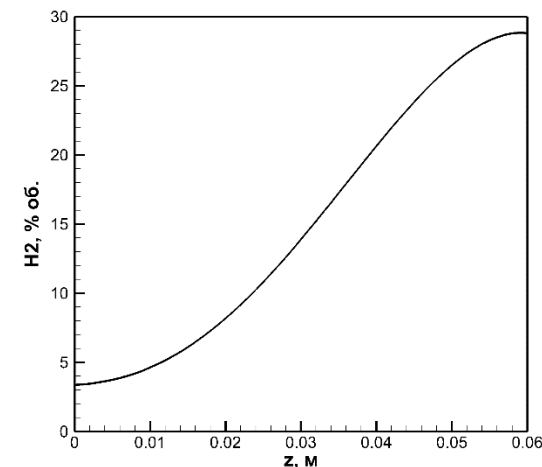
Препятствия – 7 пар, BR=0.3

Высота – 9.242 метра.

Расчетная сетка – 492.2 тыс. ячеек

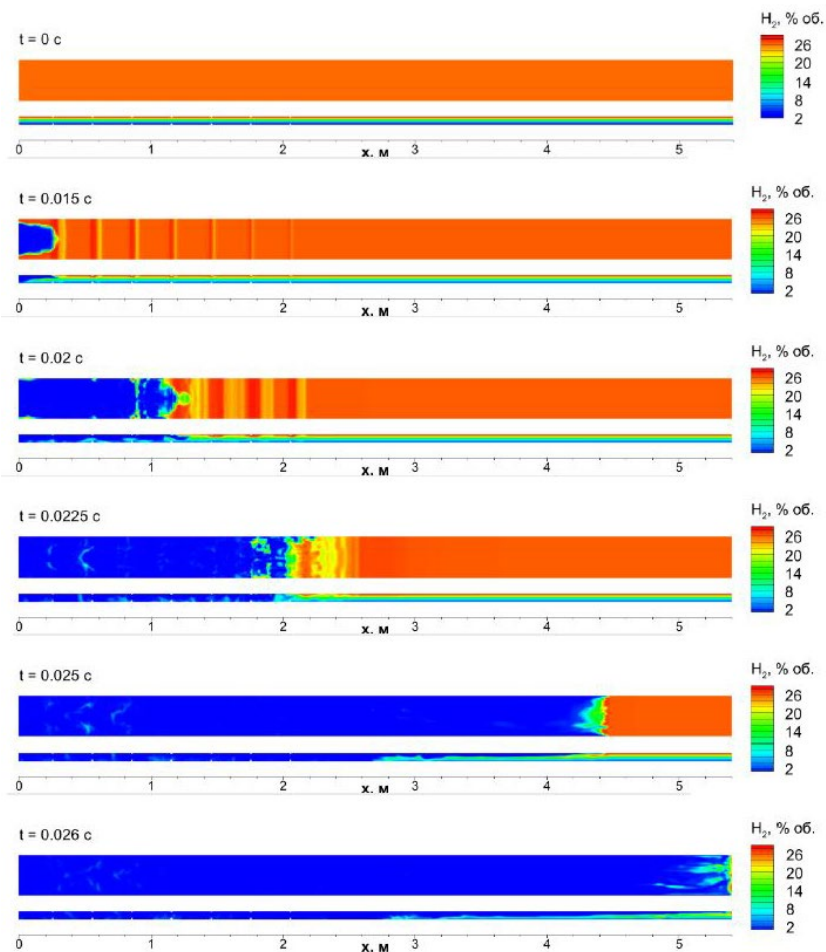
Размер ячейки – 6мм.

Концентрация водорода – от 3.5 до 29%

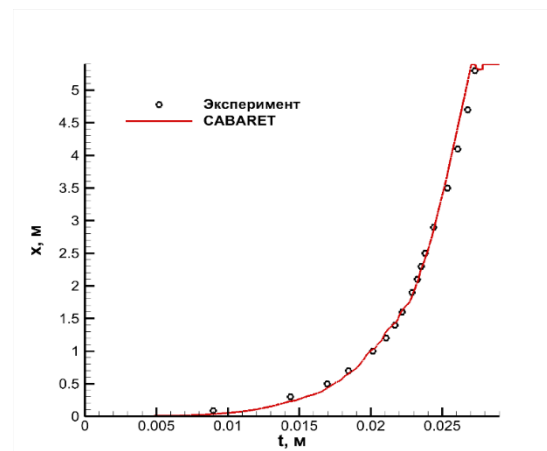


Зависимость начальной концентрации водорода от высоты установки

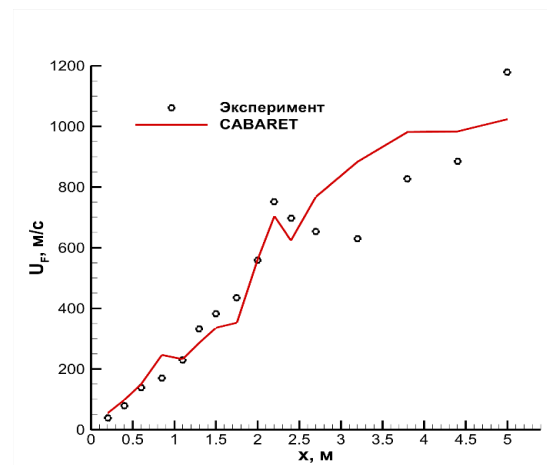
Моделирование быстрого горения в стратифицированной среде, TUM



Эволюция поля концентрации водорода в расчете



Динамика положения фронта пламени в расчете и эксперименте



Динамика скорости фронта пламени вдоль длины установки в расчете и эксперименте



Для моделирования продолжительных по времени сценариев аварий на АЭС и ТЯУ типа ИТЭР с распространением водорода в объемах реальных помещений энергетических установок за время, сравнимое с временем расчетов экспериментов на установке PANDA, с сохранением сеточного разрешения требуется от **320000** процессоров CPU.



РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
Институт проблем безопасного развития атомной энергетики

RUSSIAN ACADEMY OF SCIENCES
Nuclear Safety Institute (IBRAE)

Спасибо за внимание!