



Международная конференция  
XVI Забабахинские научные чтения  
РФЯЦ – ВНИИТФ имени академика Е. И. Забахина

**«CFD-моделирование процессов создания и  
разрушения стратификации с использованием  
вихреразрешающего подхода к моделированию  
турбулентности»**

Канаев А.А., Готов В.Ю

ИБРАЭ, 2023



- Создание стратификации
- Создание стратификации в условиях естественной вентиляции
- Эрозия предварительно созданной стратификации



РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК  
Институт проблем безопасного развития атомной энергетики

**RUSSIAN ACADEMY OF SCIENCES**  
**Nuclear Safety Institute (IBRAE)**

# Создание стратификации



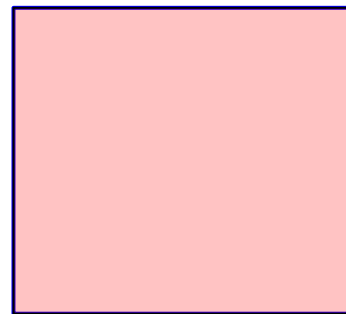
## Водородная безопасность на АЭС



Основные режимы течения в контейнменте при выбросе струи пара и водорода

## Безопасность гражданской ВЭ

Пространственно-однородное распределение водорода



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

Стратифицированное распределение водорода



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

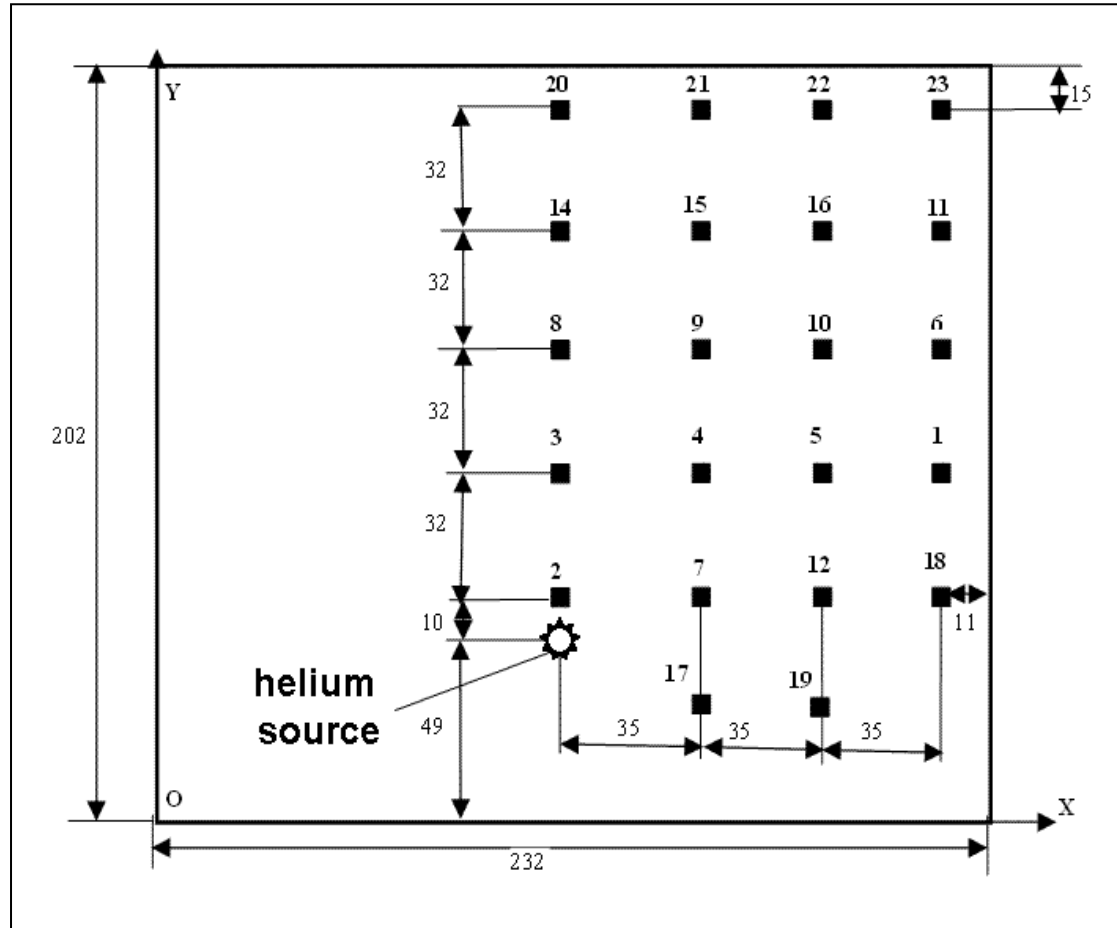
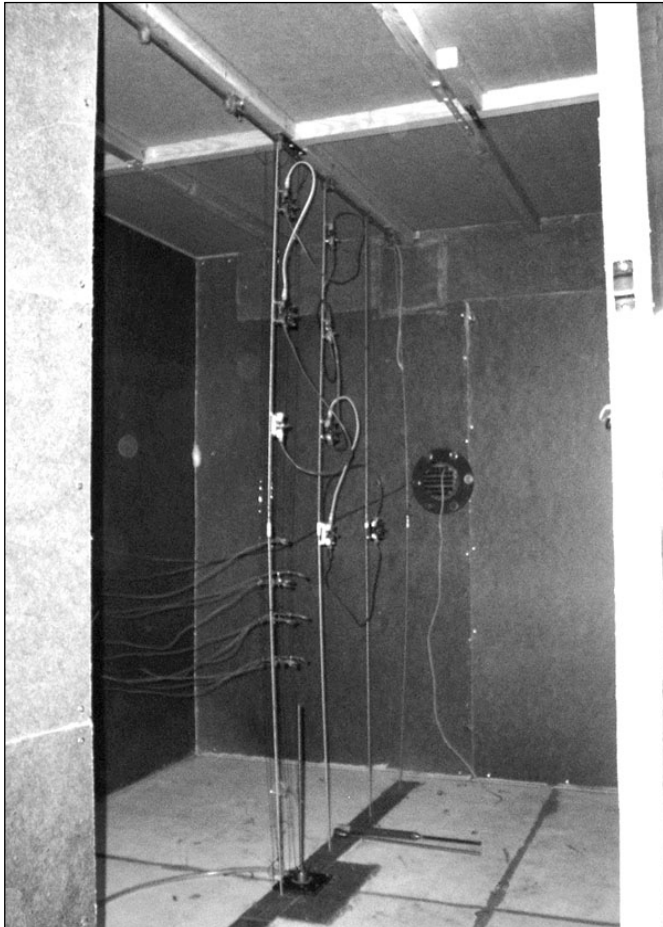


## Программы международных экспериментальных исследований в области обеспечения ВБ на АЭС

Программа	Годы проведения	Основные явления
OECD/NEA: SETH	2001-2006	1. Изучение механизмов, приводящих к стратификации водорода (струи и всплывающие струи, транспорт и стратификация)
OECD/NEA: SETH-2	2007-2010	1. Изучение механизмов разрушения стратификации (струи с отрицательной плавучестью, всплывающие струи, работа систем безопасности – форсунка, теплообменник-конденсатор, рекомбинатор (тепловой эффект))
EURATOM- ROSATOM: ERCOSAM- SAMARA	2010-2014	1. Формирование стратификации легкого газа в сценарии постулируемой ТА с потерей теплоносителя (LOCA) на LWR 2. Разрушение стратификации легкого газа при работе систем безопасности в отмасштабированных условиях
OECD/NEA: HYMERES	2013-2016	1. Разрушение стратификации струями в более реалистичных условиях (взаимодействие струй с препятствиями) 2. Влияние комбинированной работы систем безопасности на распределение легкого газа 3. Процессы перемешивания, связанные с работой систем безопасности
OECD/NEA: HYMERES-2	2017-2021	1. Расширение базы данных по разрушению стратификации струями, взаимодействующими с препятствиями 2. Анализ влияния излучения 3. Расширение базы данных по перемешиванию работой систем безопасности

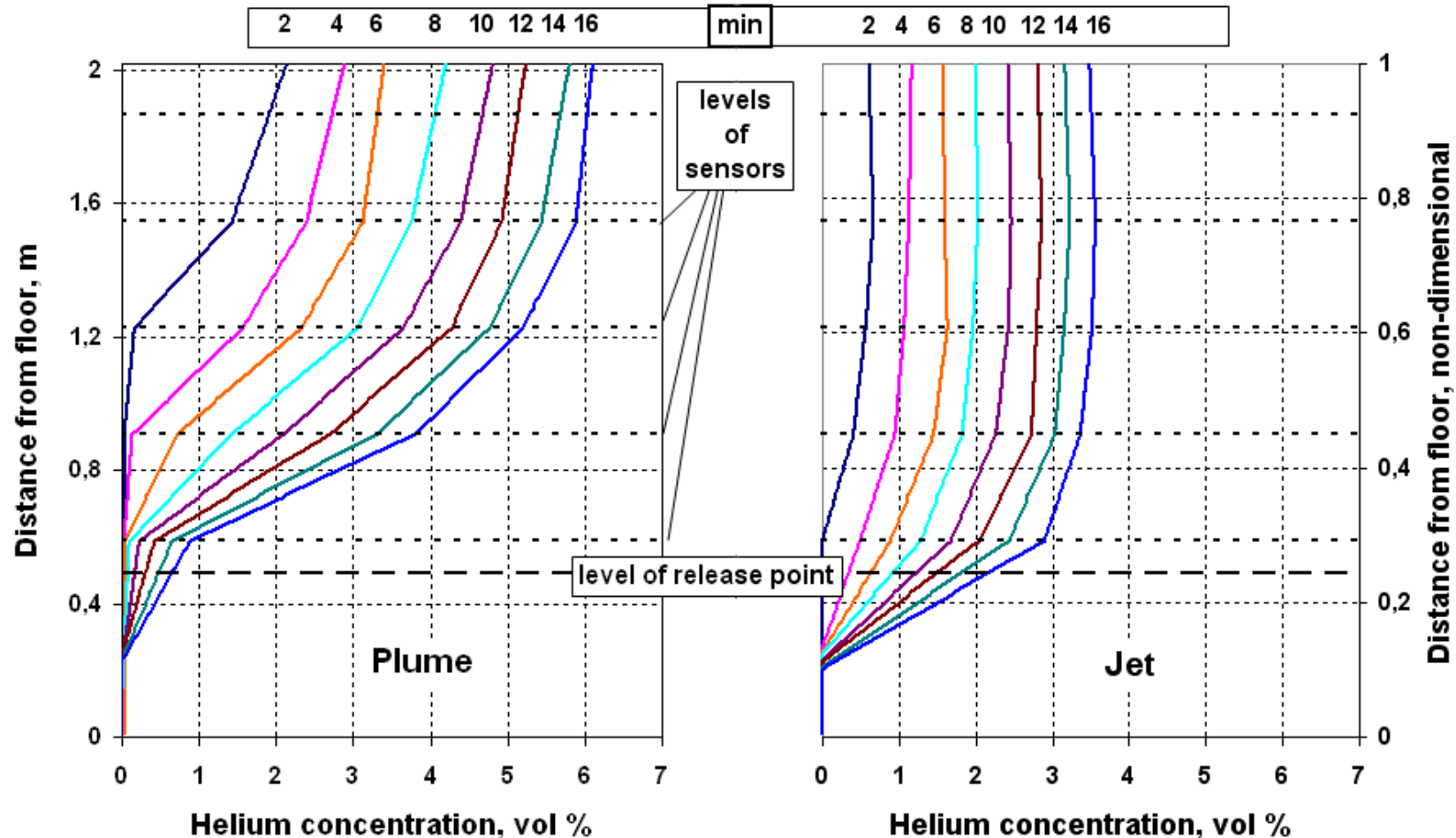


## Эксперимент по созданию стратификации «параллелепипед» (ККФХТ НИЦ КИ, Москва, 9 м<sup>3</sup>)



№	Диаметр истечения, мм	Расход гелия, л/с	Тип истечения
1	0,6	0,47	струя
2	1	0,47	струя
3	2	0,47	переход
4	4	0,47	шлейф
5	8	0,47	шлейф

## Эксперимент по созданию стратификации «параллелепипед» (ККФХТ НИЦ КИ, Москва, 9 м<sup>3</sup>)



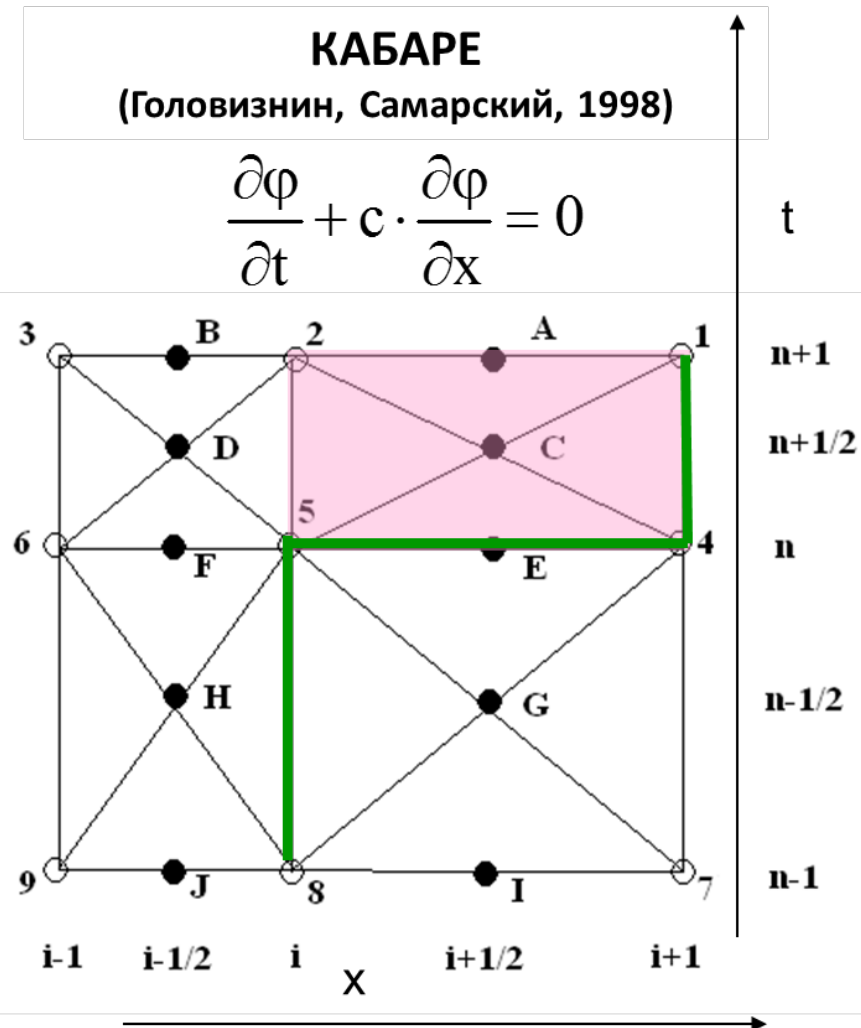
## ПрЭВМ САВАРЕТ-SC1

### ОСНОВНЫЕ СВОЙСТВА СХЕМЫ КАБАРЕ

- Явная аппроксимация уравнений
- Строгое выполнение законов сохранения (консервативность)
- Отсутствие настроечных параметров (неявное моделирование «подсеточных» масштабов турбулентности на «грубых» сетках)

### СПОСОБЫ ОПТИМИЗАЦИИ АЛГОРИТМА

- Реализованы приближения сжимаемой и слабосжимаемой гидродинамики для многокомпонентных газовых сред
- Параллельная реализация для многопроцессорных вычислений

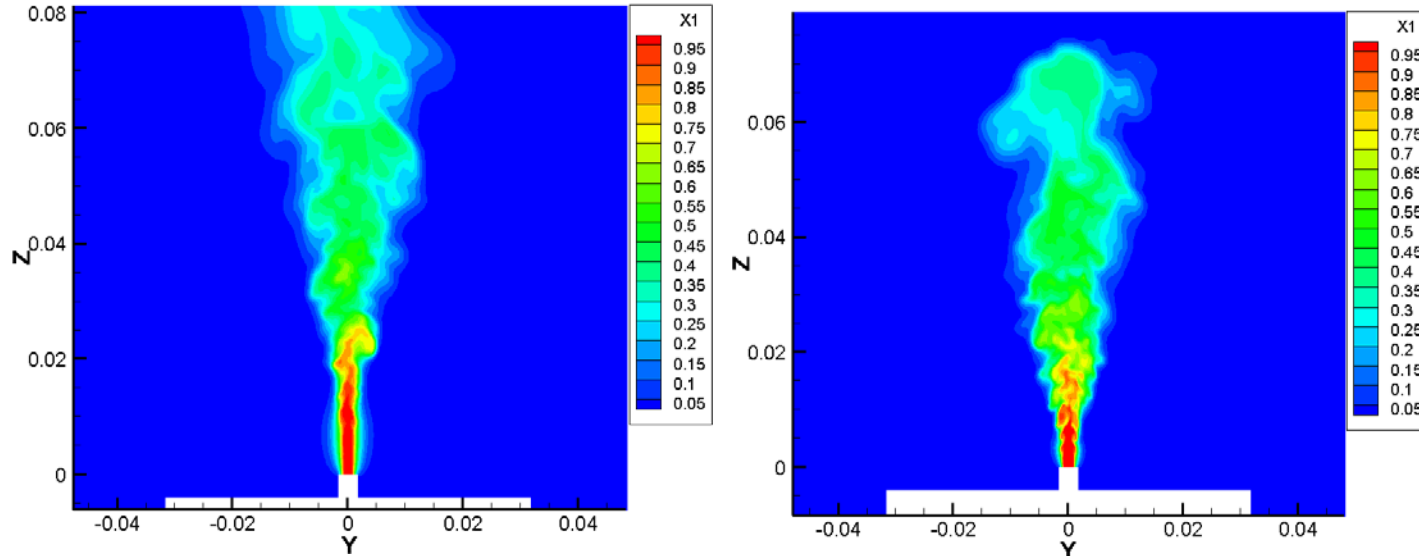




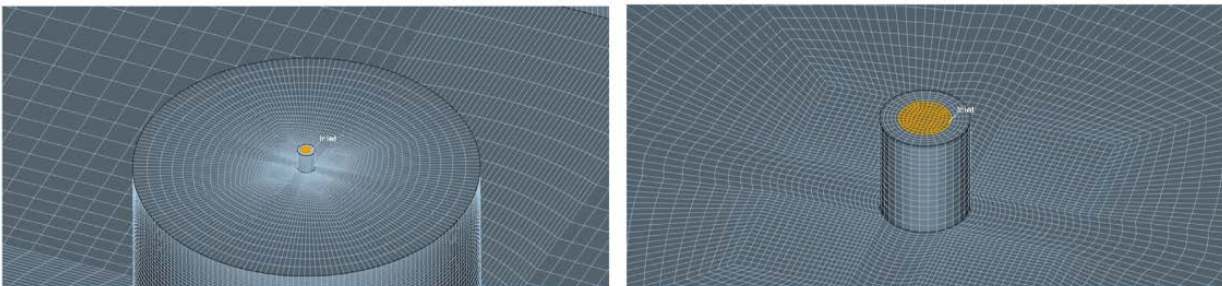
Диаметр патрубка = 1,91 мм

Скорость истечения водорода = 49,7 м/с

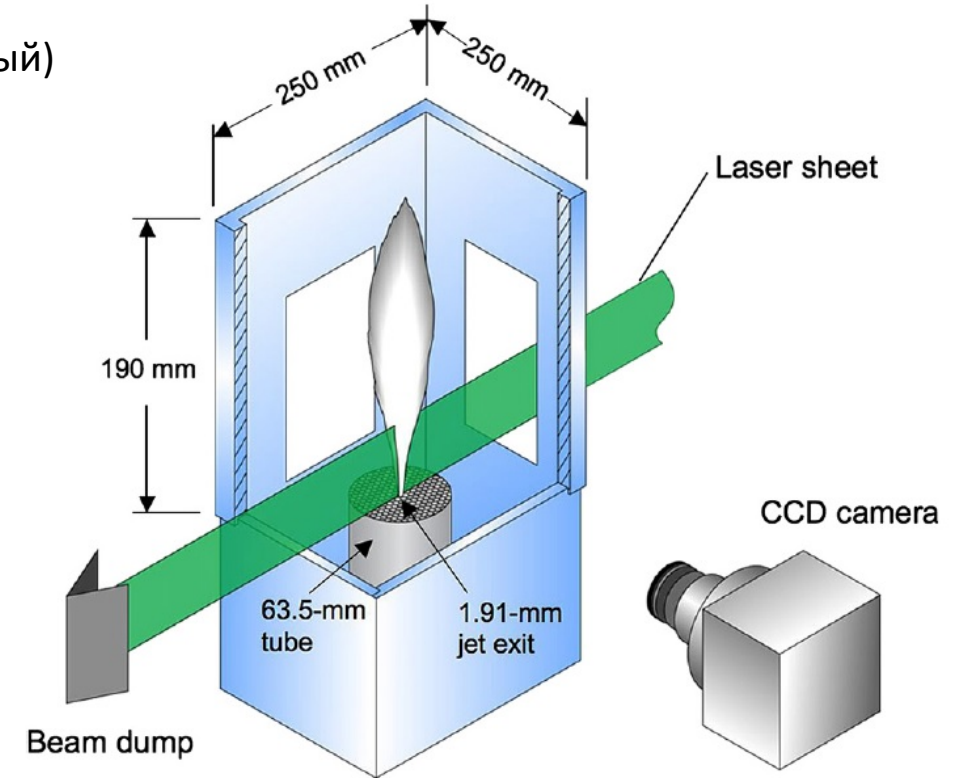
Число Рейнольдса = 885 (переходное состояние из ламинарного в турбулентный)



Мгновенные поля концентрации водорода для двух сеточных моделей: с числом ячеек на диаметр отверстия 6 (слева) и 12 (справа)

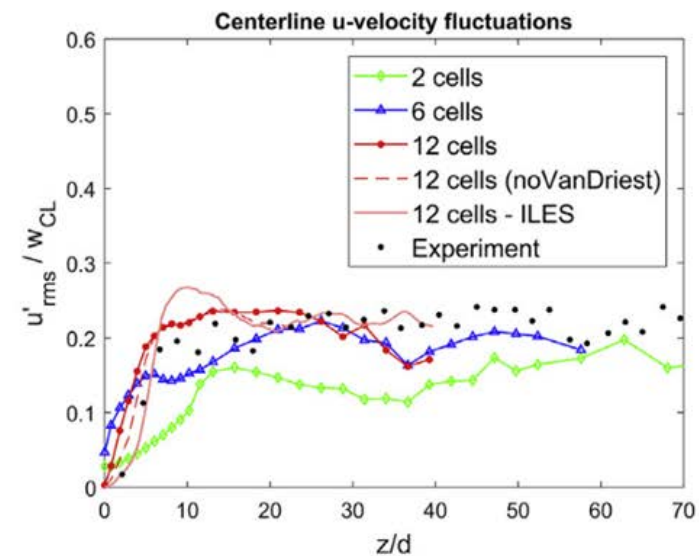
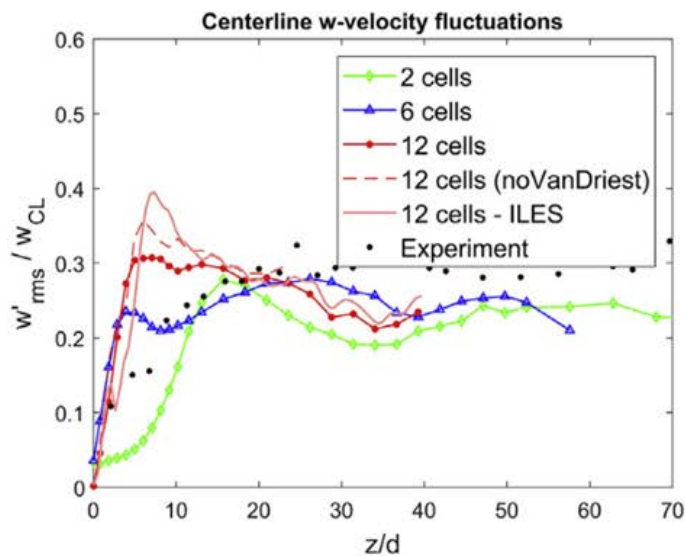
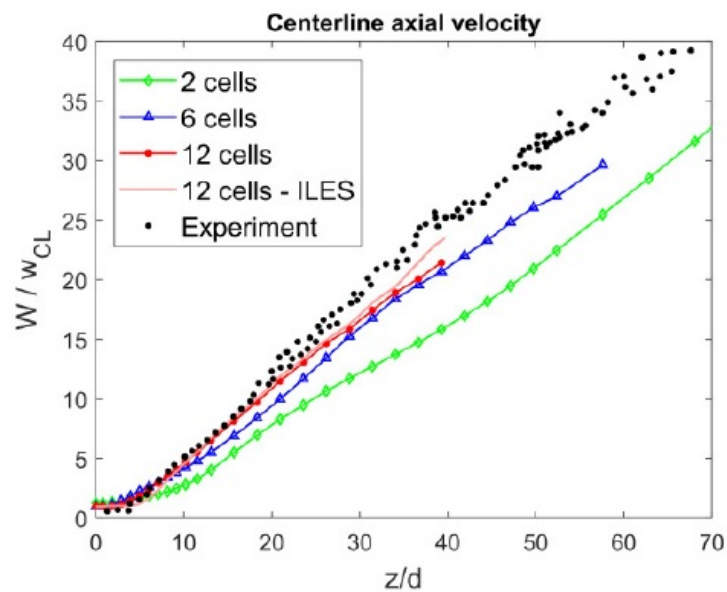
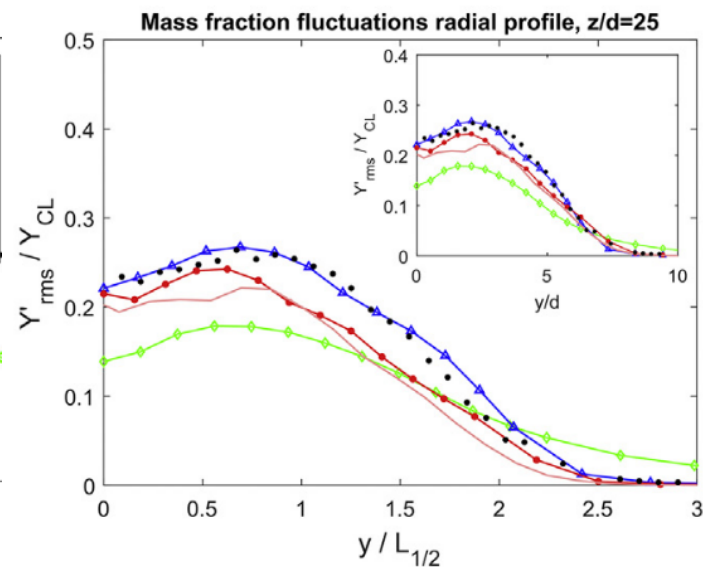
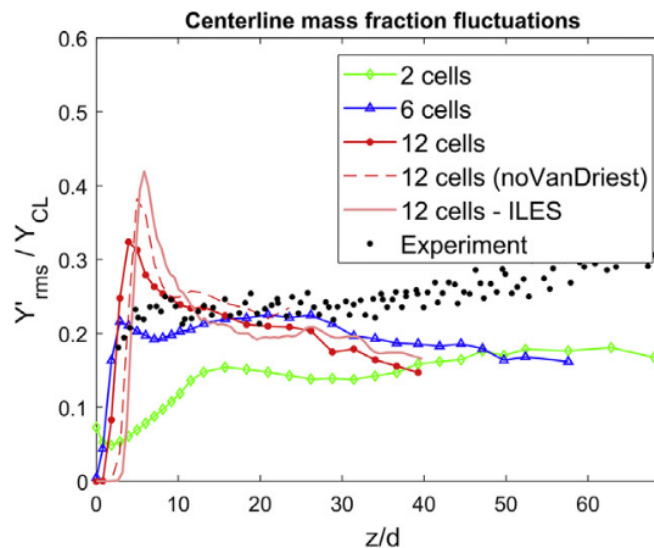
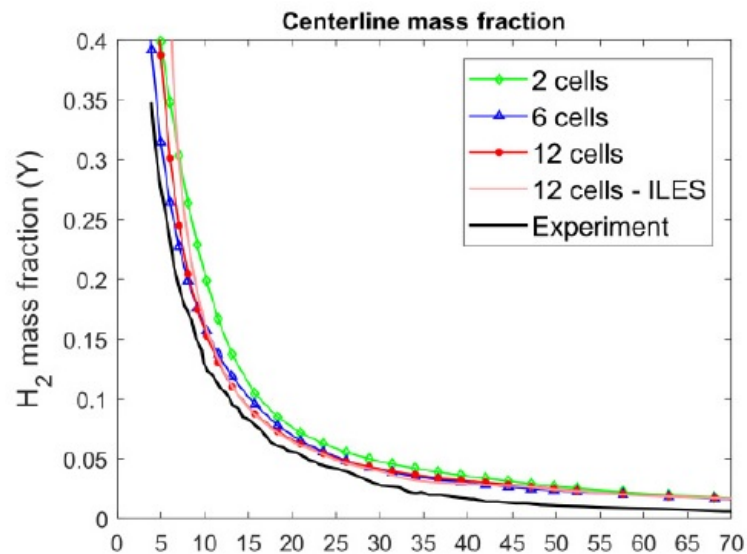


Сеточная модель с числом ячеек на диаметр отверстия 12 Минимальный размер ячейки ~0,15 мм



**Схема эксперимента со струйным истечением водорода\***

\*Schefer RW, Houf WG, Williams TC. Investigation of small scale unintended releases of hydrogen: buoyancy effects. Int J Hydrogen Energy 2008



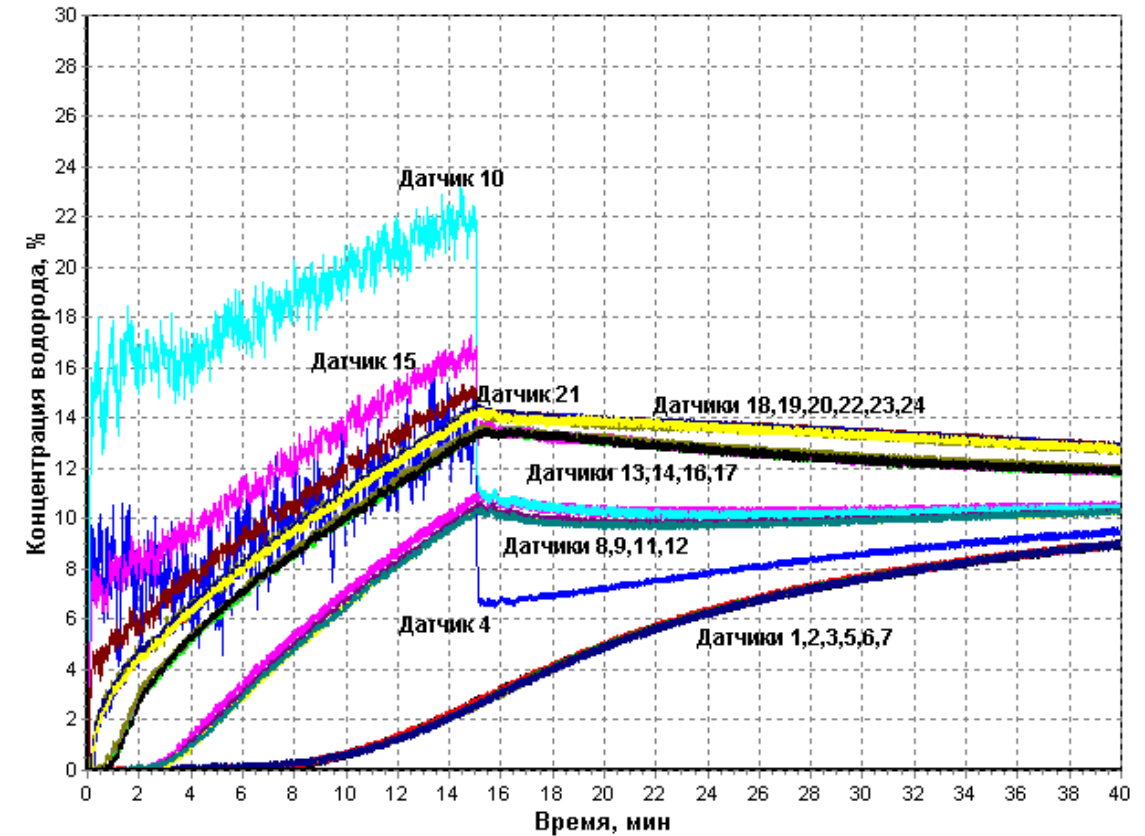
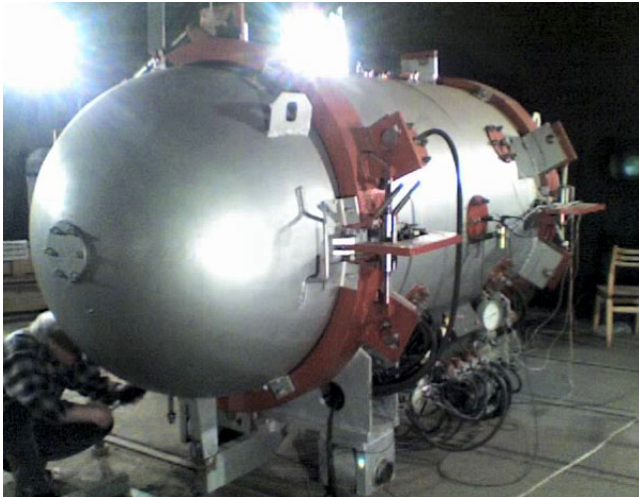


## Эксперимент по созданию стратификации водорода «горизонтальный цилиндр» (КИ совместно с ЦНИИМаш, Роскосмос) 4 м<sup>3</sup>

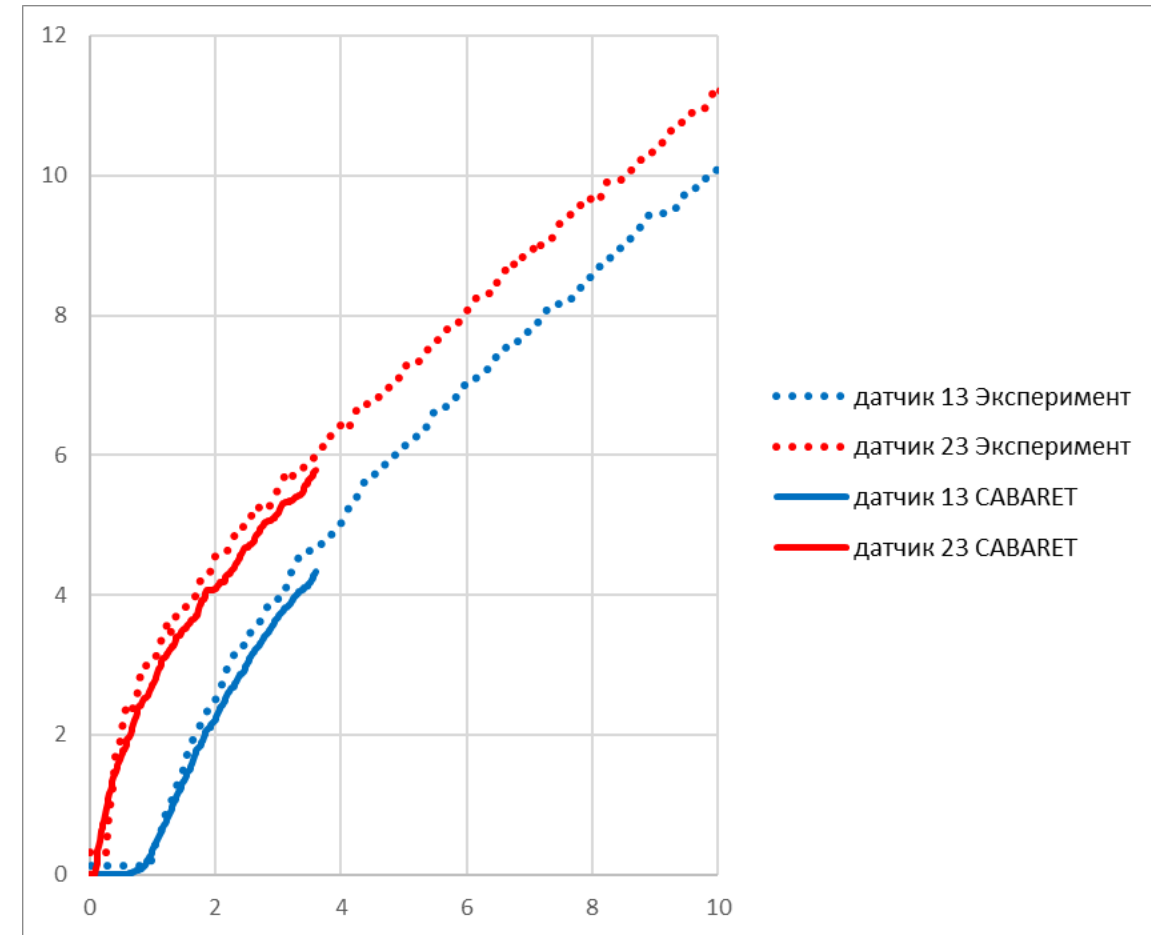
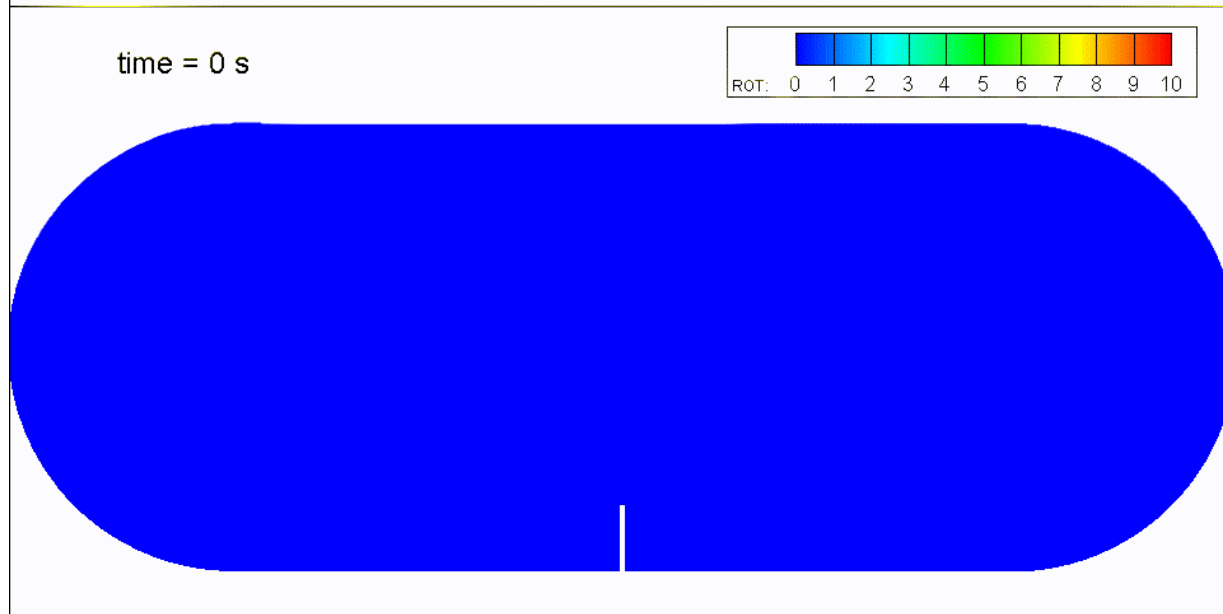
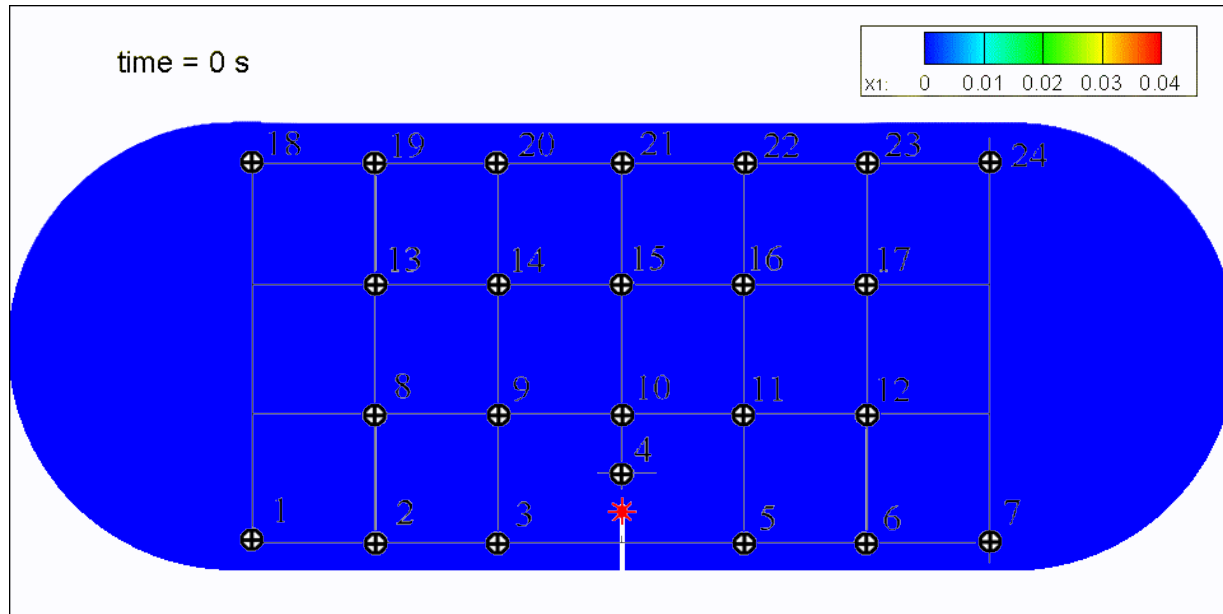
Диаметр отверстия истечения = 14 мм

Расход водорода = 0,52 л/с

Матрица из 24-х датчиков концентрации







### Сравнение рассчитанной динамики концентраций на датчиках 13 и 23 с экспериментом

Число ячеек на диаметр патрубка = 8

Минимальный размер ячейки ~1,75 мм

Общее число ячеек = 2М702К



# Создание стратификации в условиях естественной вентиляции

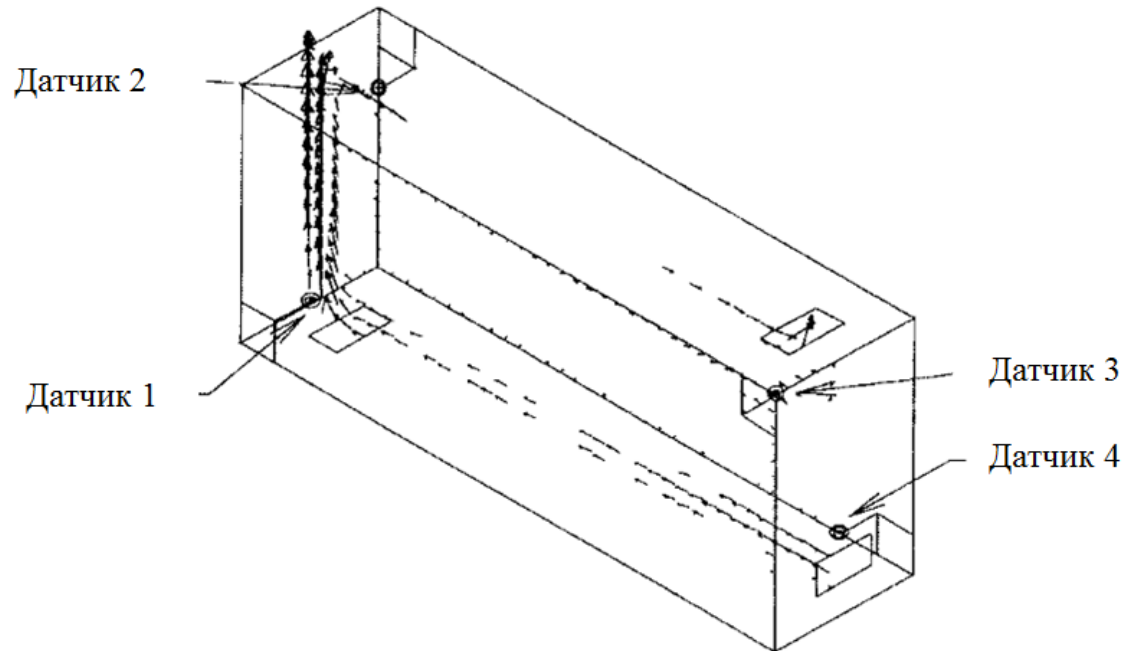


Размеры помещения: 2,9 м × 0,74 м × 1,22 м

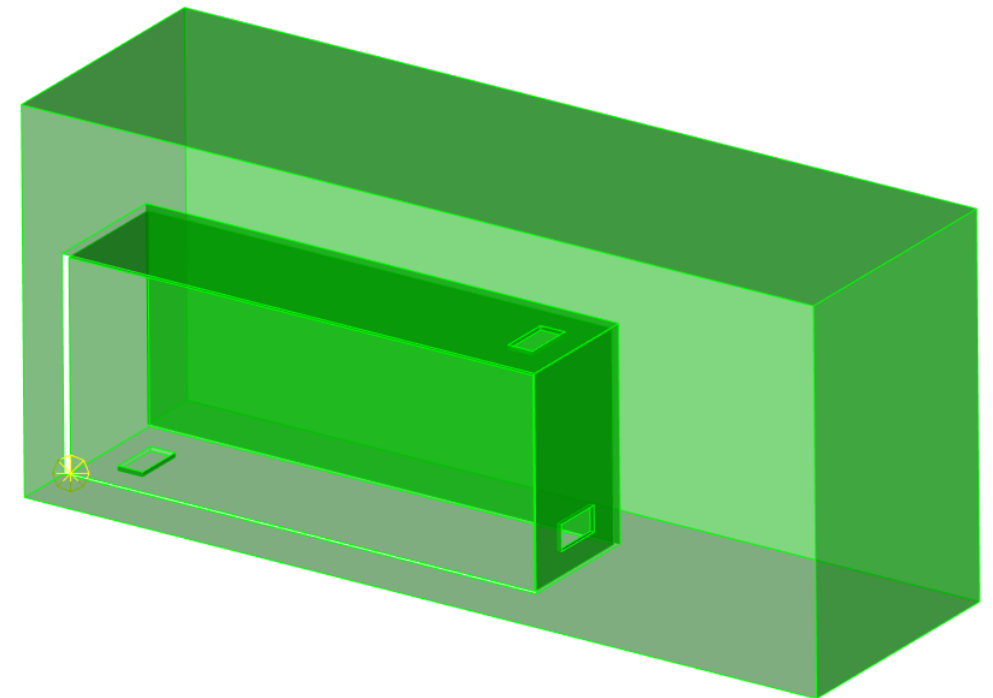
Размер отверстия истечения и вентиляционных окон: 0,3048 м × 0,1524 м

Расход водорода =  $9,43833 \times 10^{-4}$  м<sup>3</sup>/с

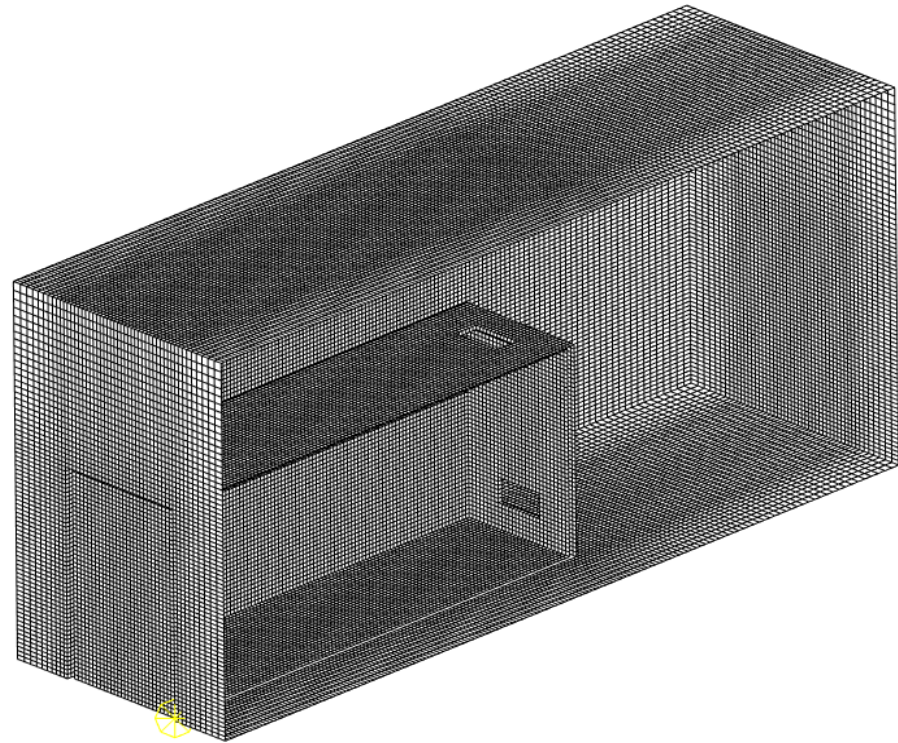
Скорость истечения водорода = 0,02032 м/с



**Схема расположения датчиков**



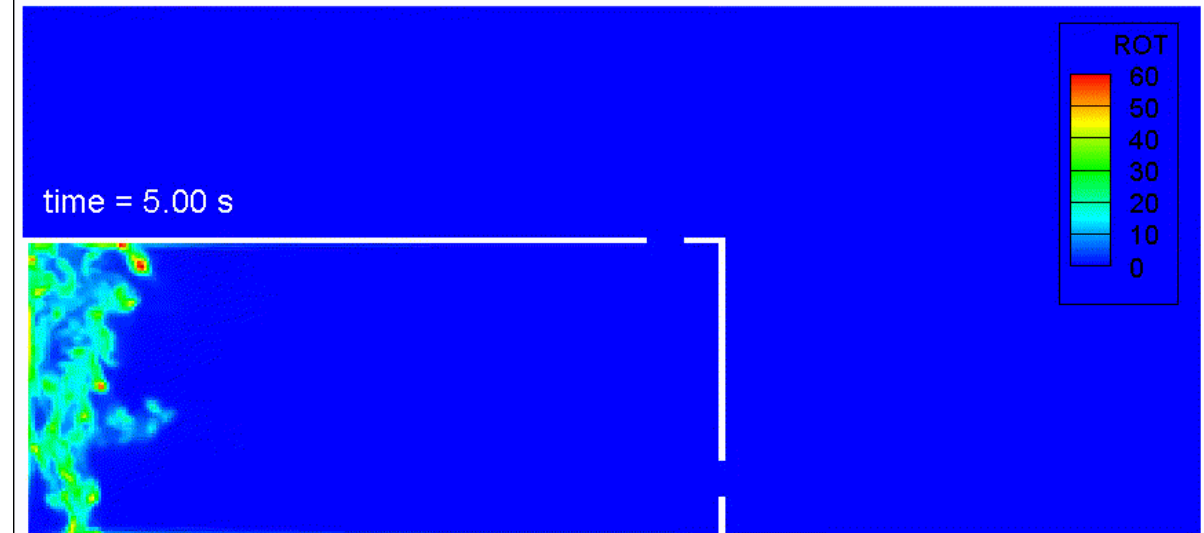
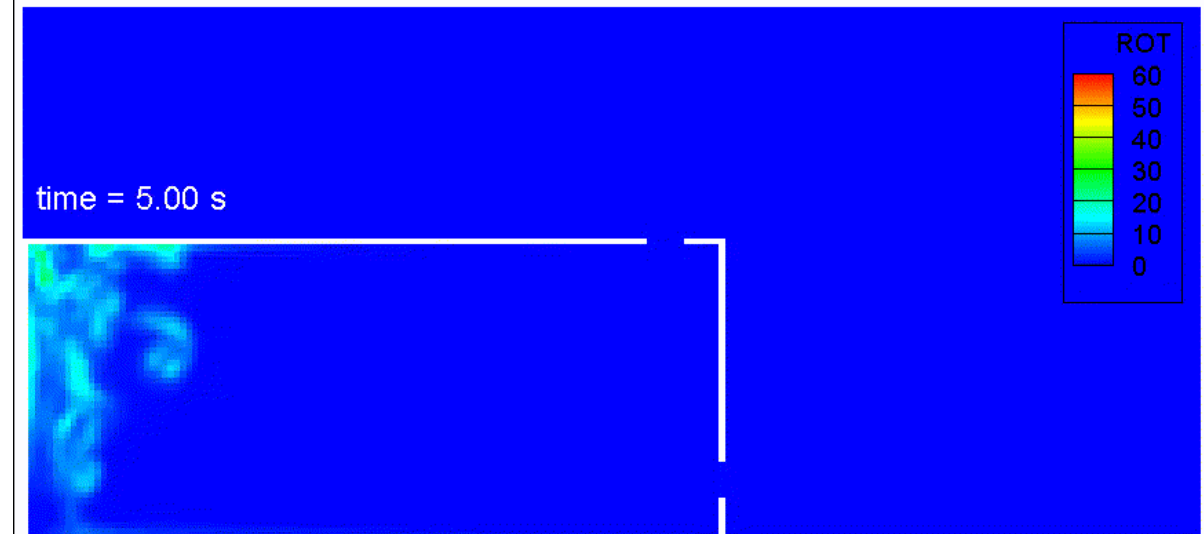
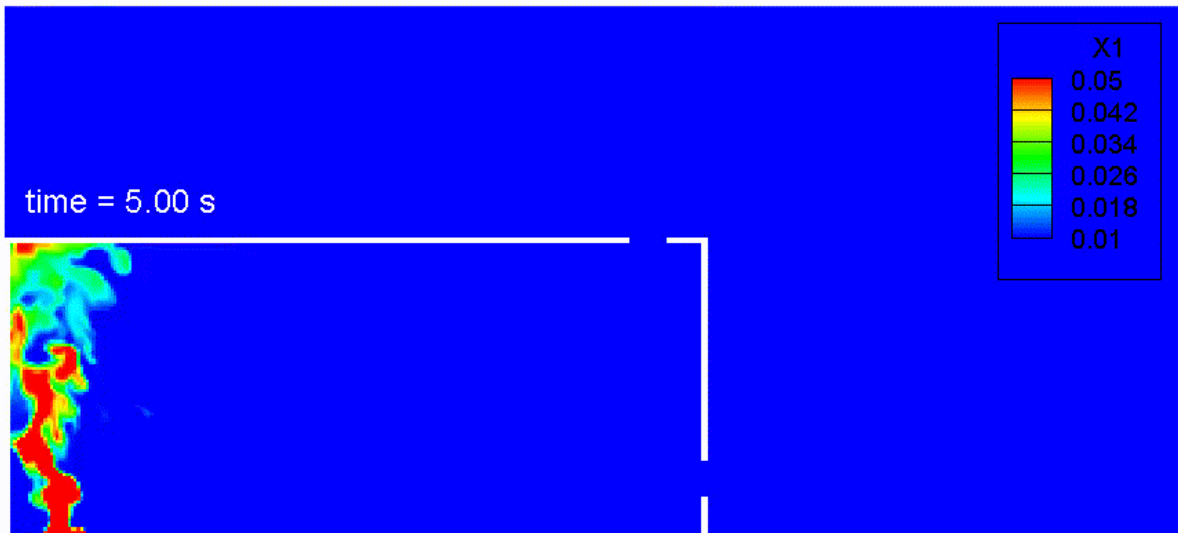
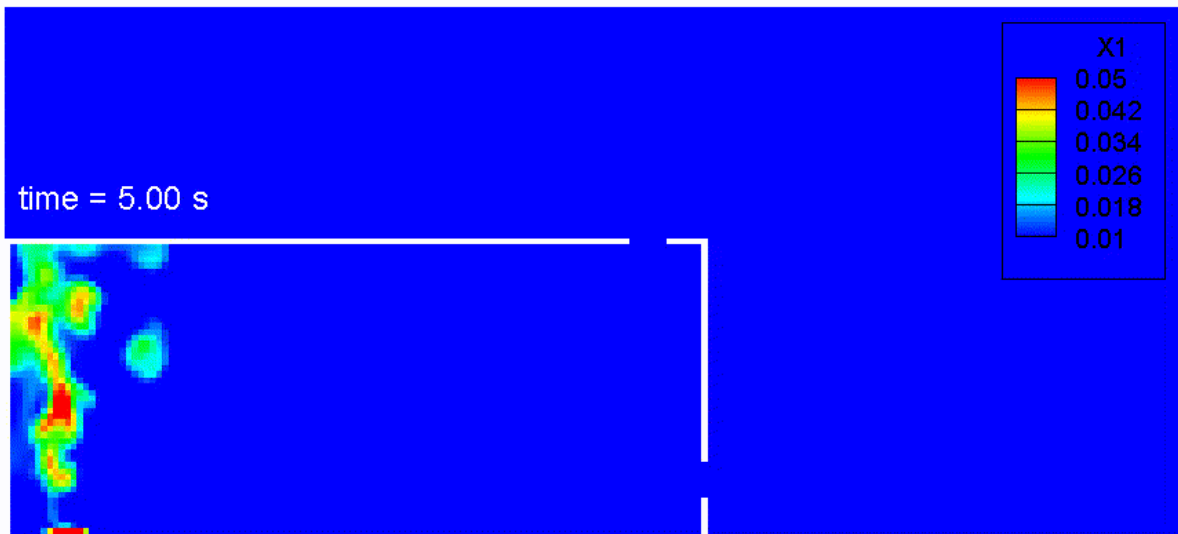
**Расчетная область эксперимента**



Сеточная модель с шагом 25.4 мм



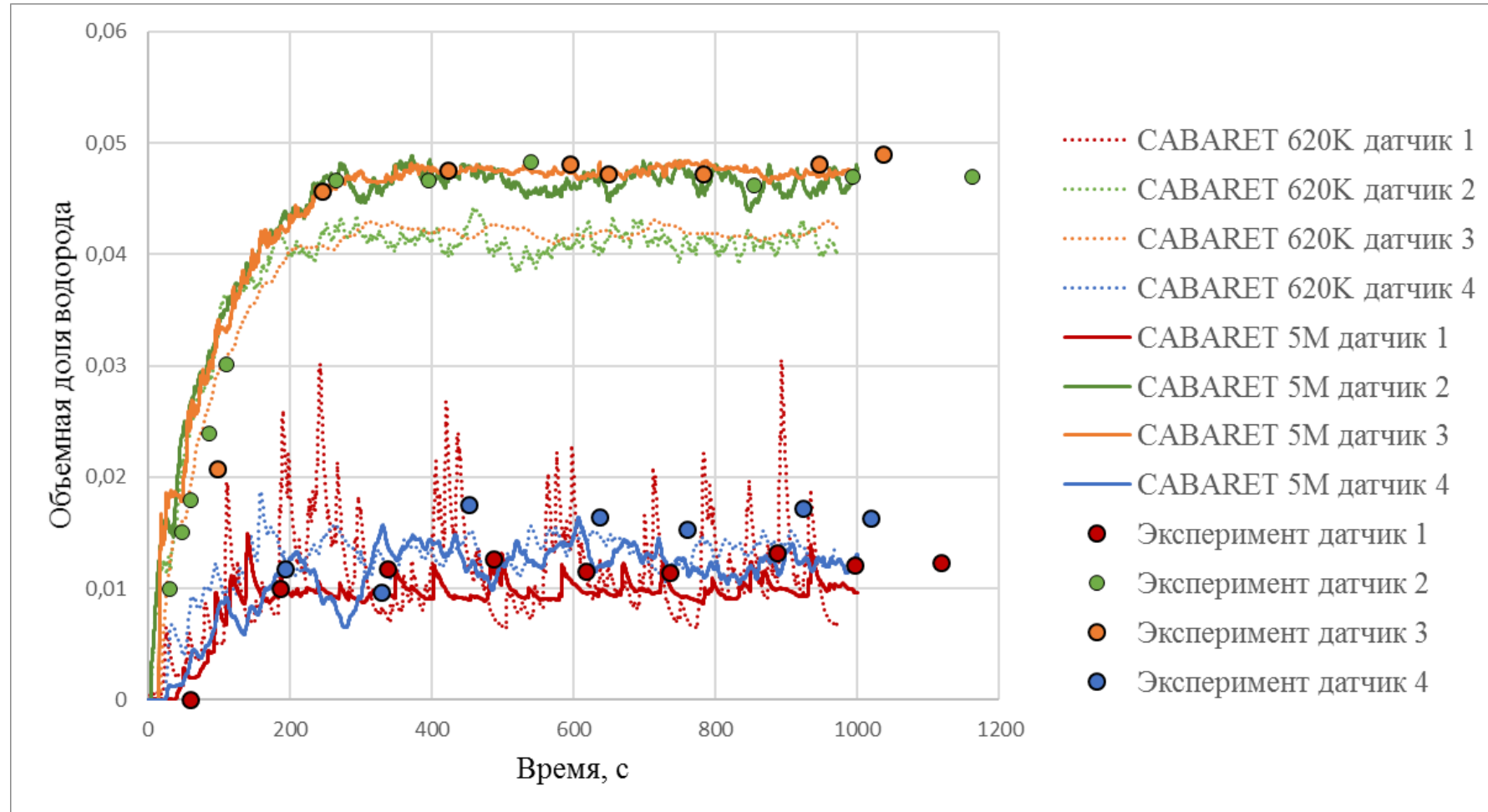
Сеточная модель с шагом 12.7 мм

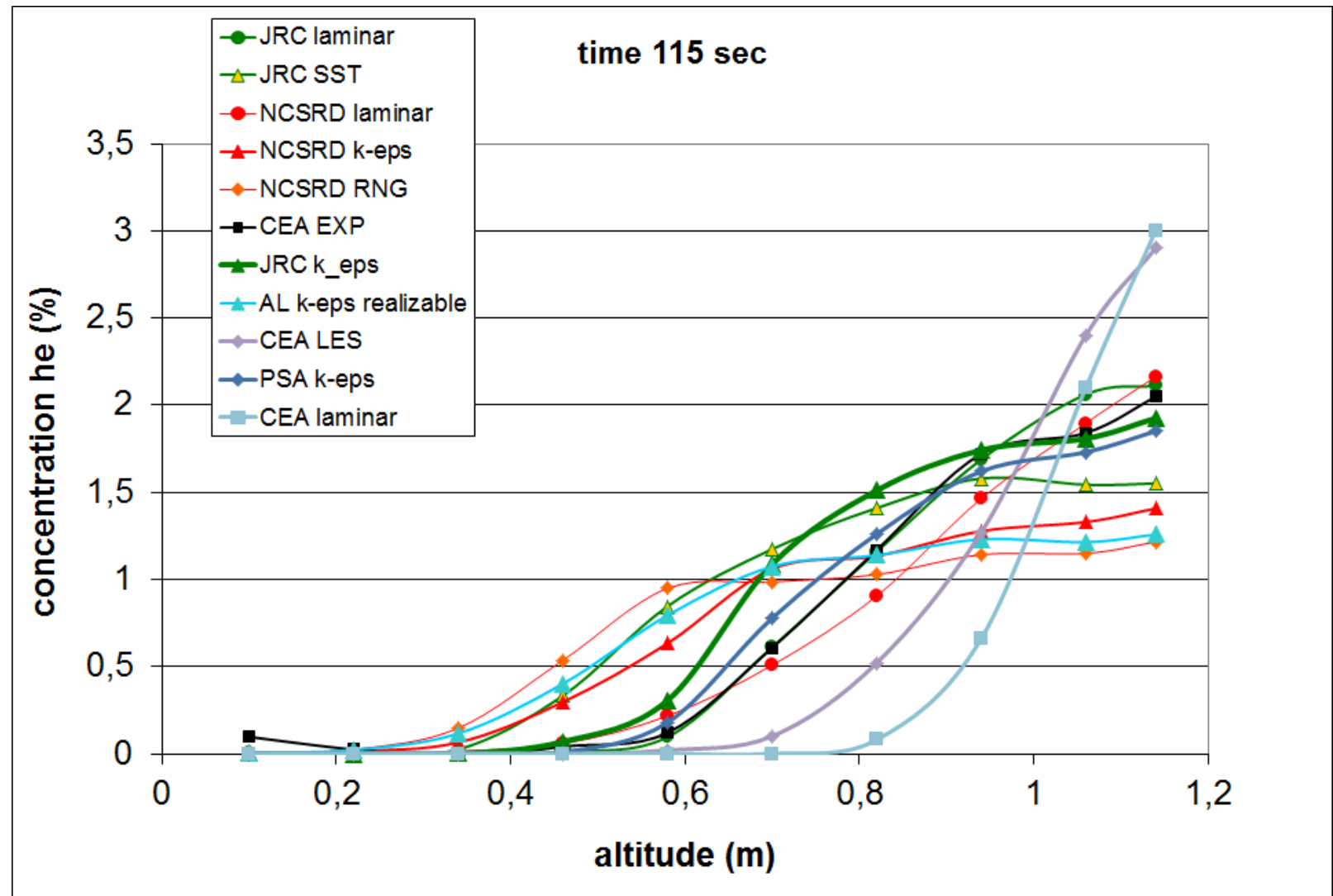
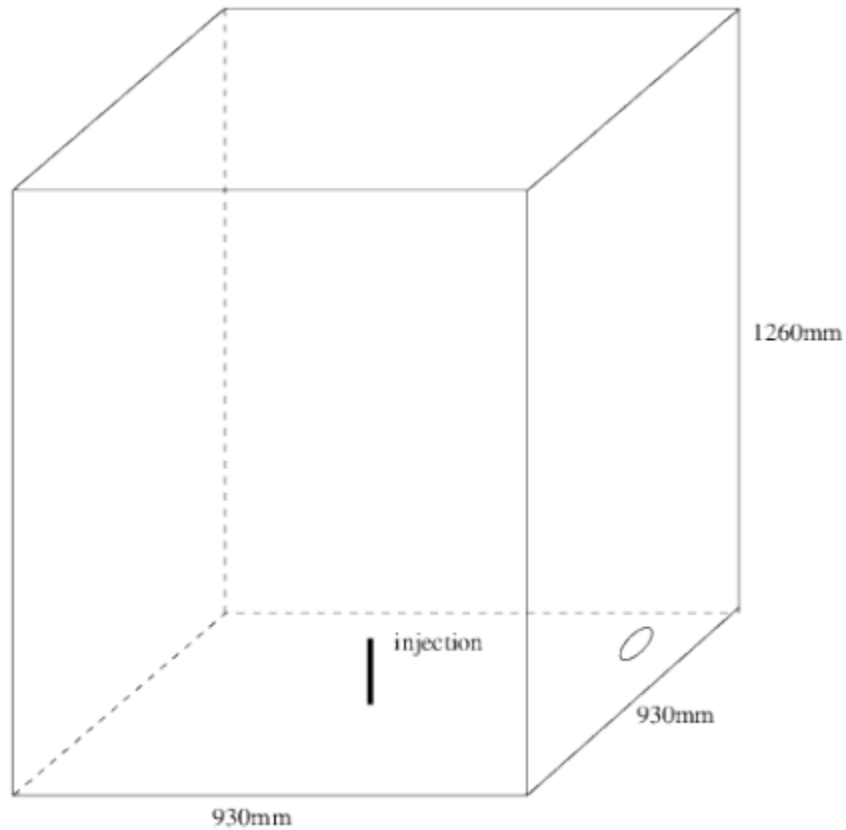






## Сравнение результатов расчетов для двух сеток с экспериментальными данными



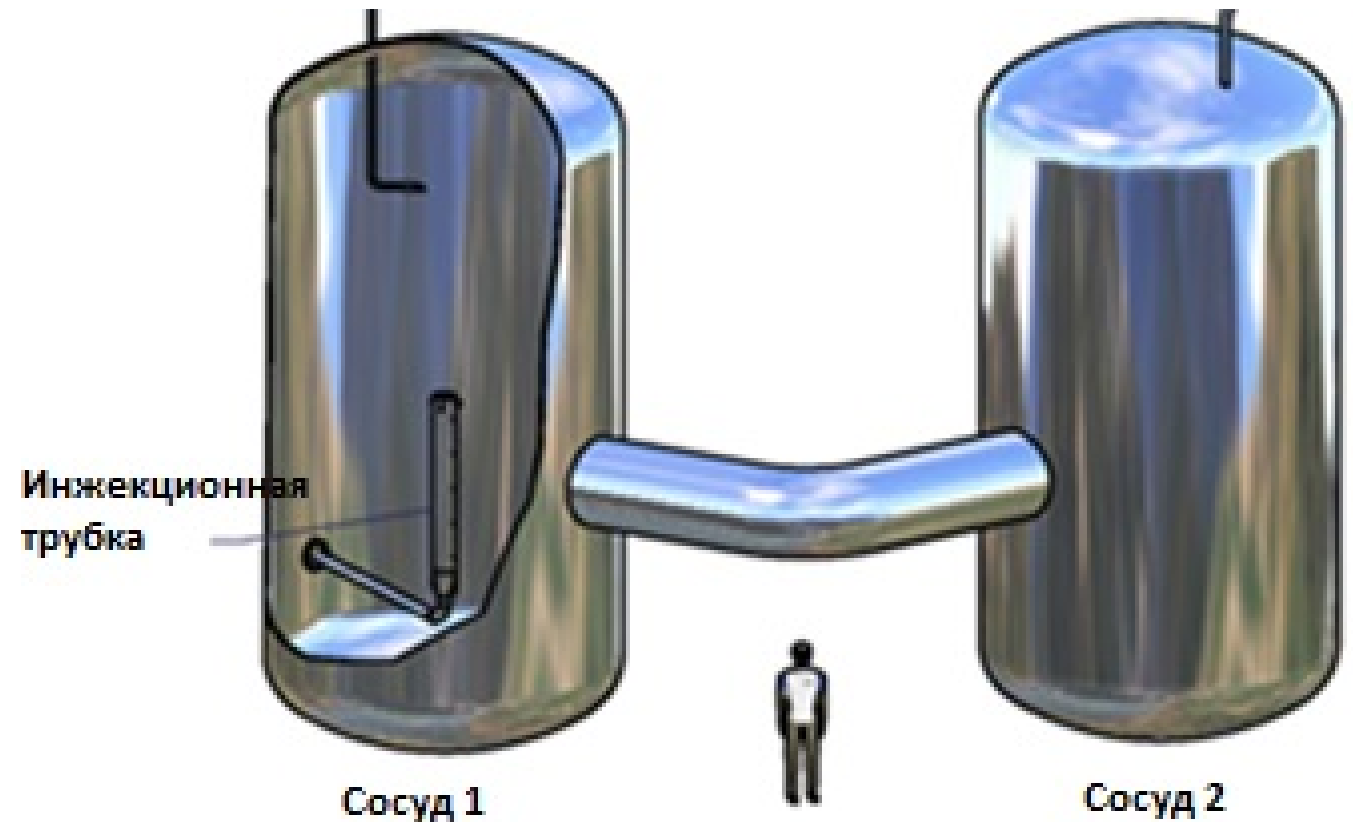




# Эрозия предварительно созданной стратификации



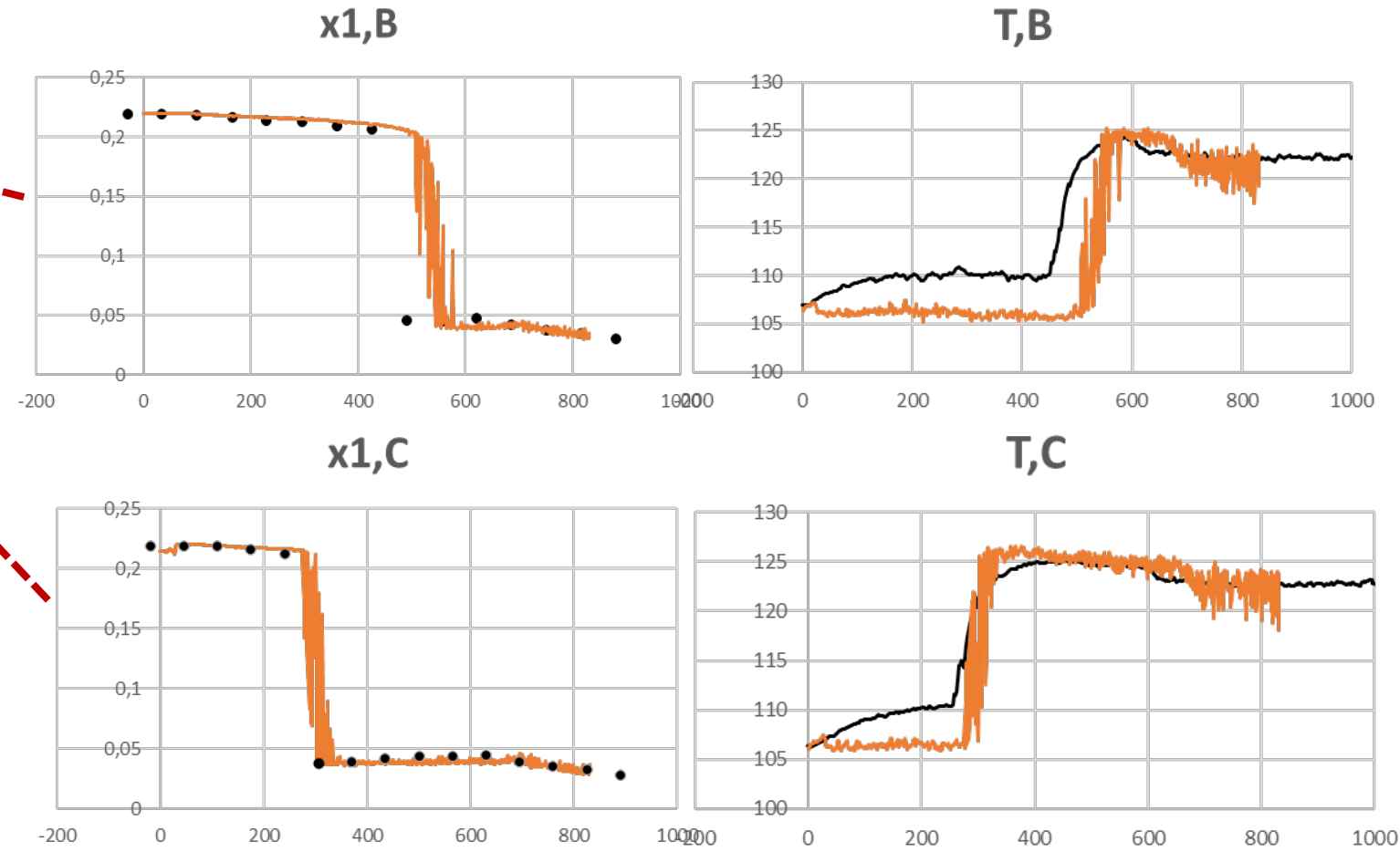
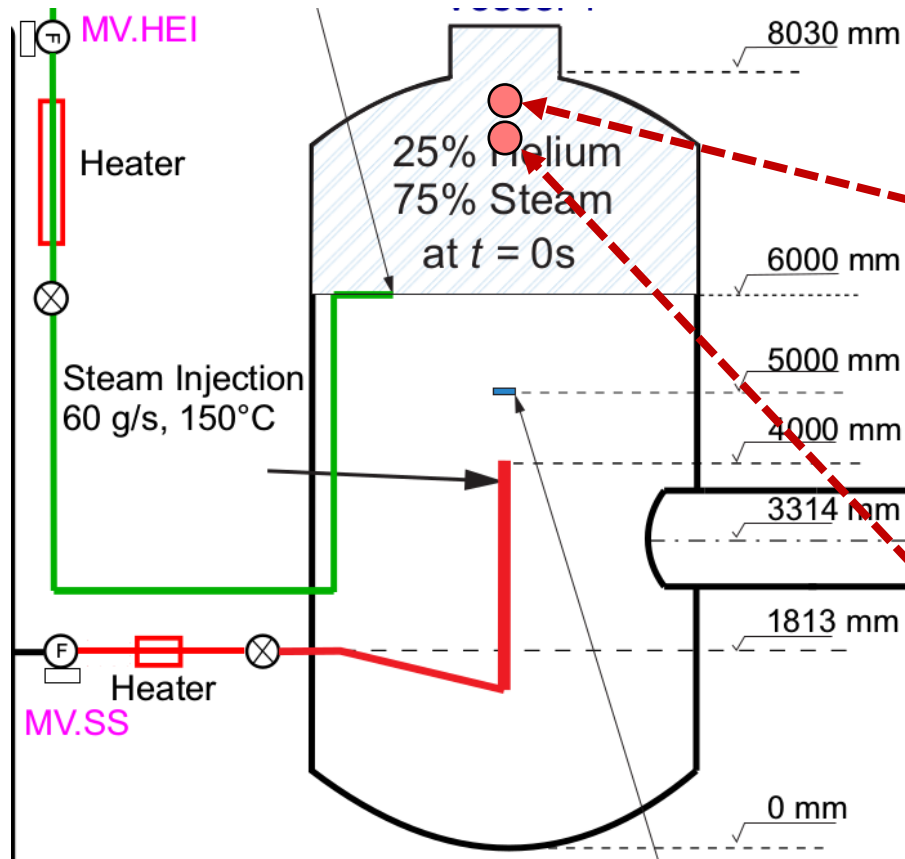
## Экспериментальная установка PANDA (PSI, Швейцария)



Объем 2-х сосудов 183,3 м<sup>3</sup>



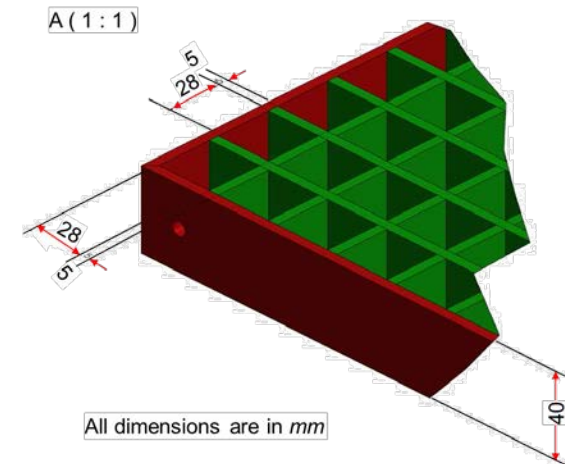
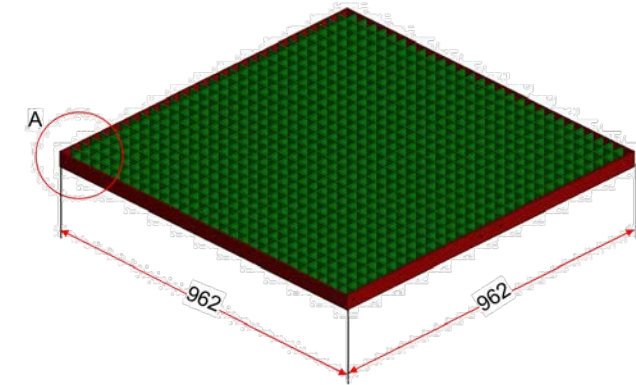
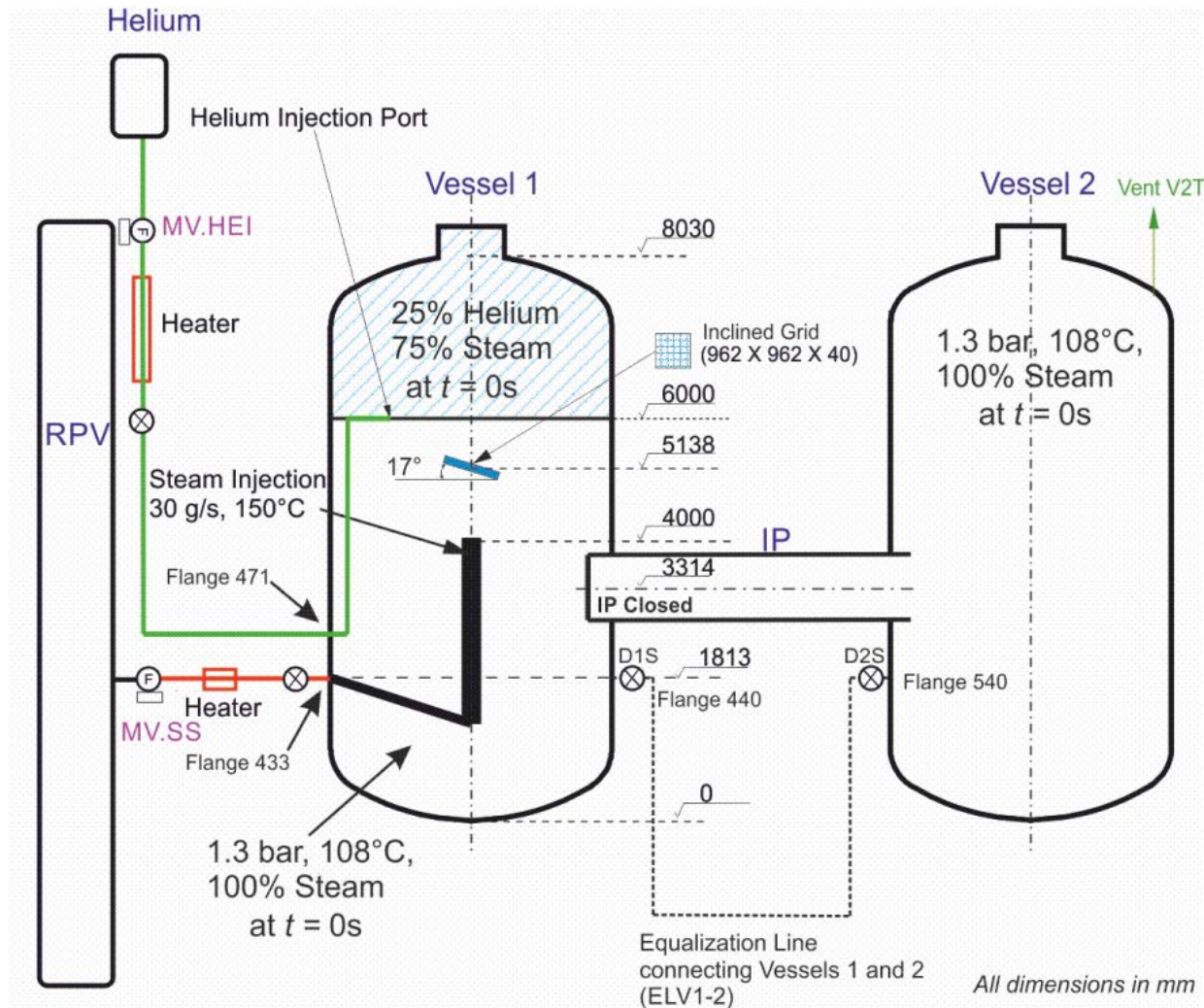
## Бенчмарк-тест первого этапа программы HYMERES (HP1\_6\_2)



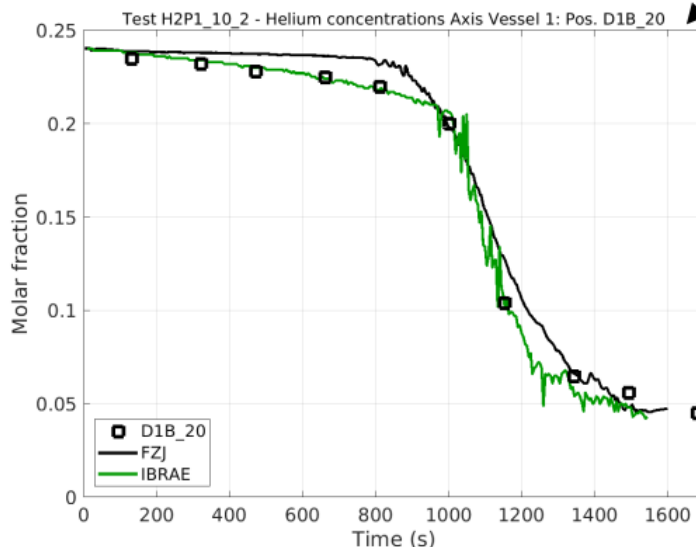
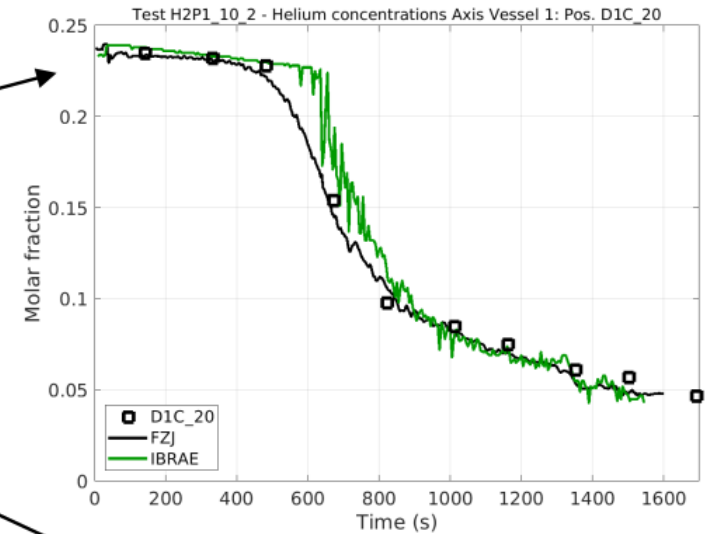
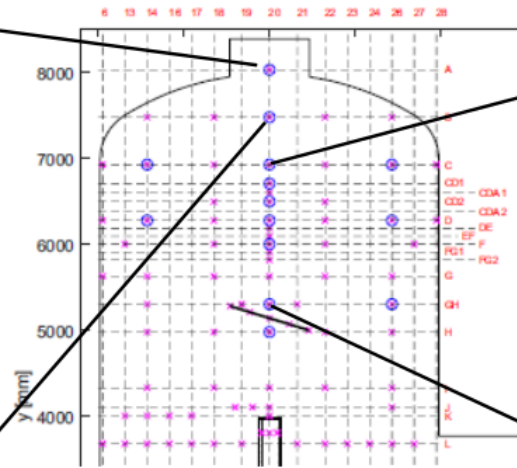
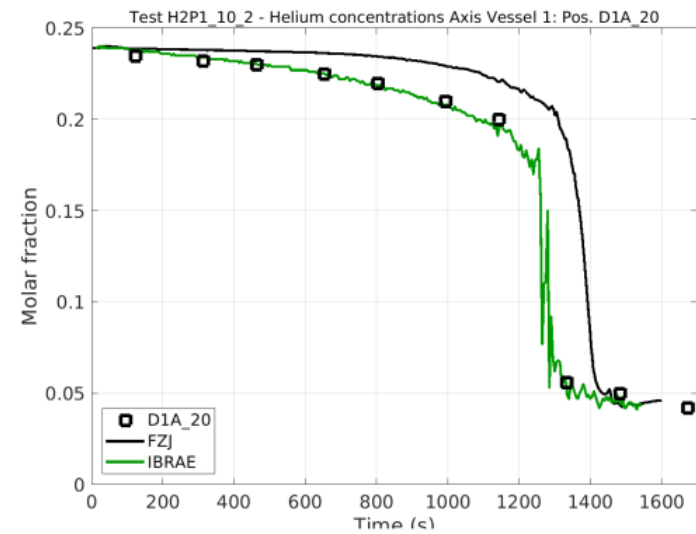
• Эксперимент — Расчет



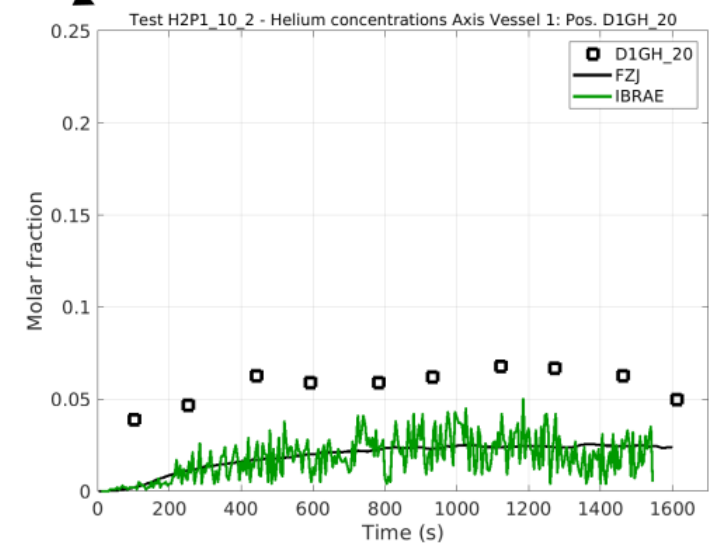
## Бенчмарк-тест второго этапа программы HYMERES (H2P1\_10)

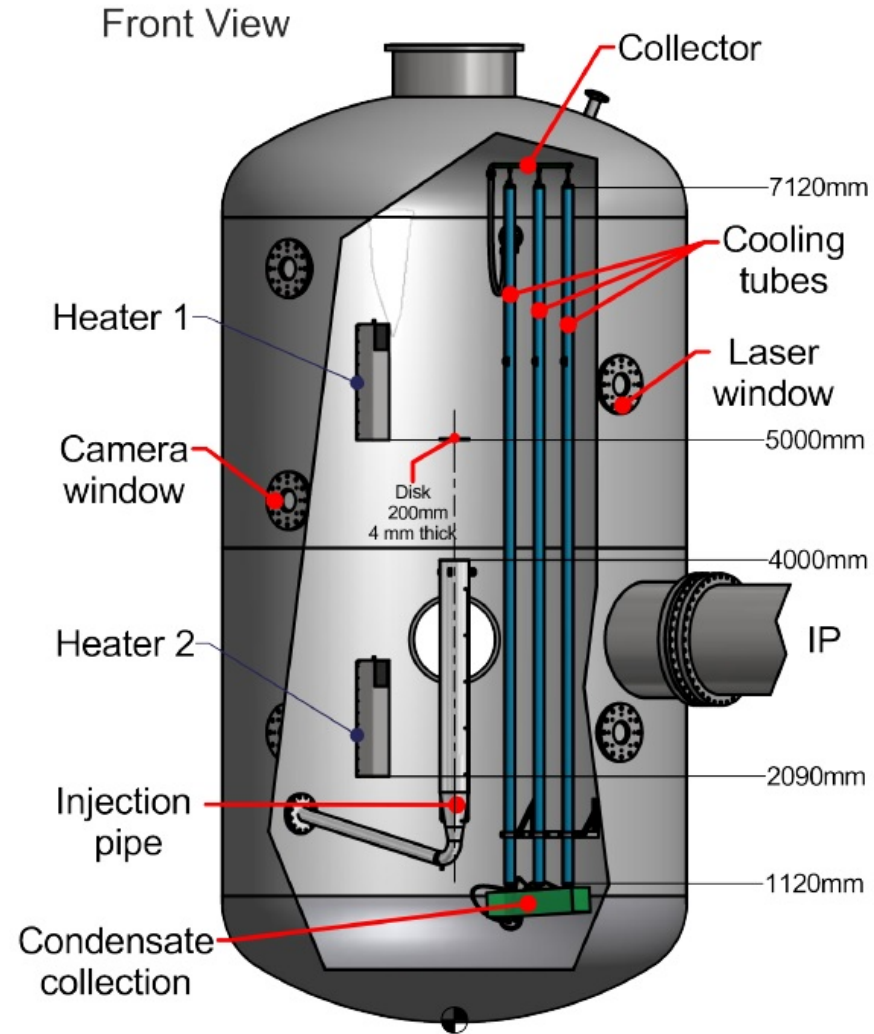


## Бенчмарк-тест второго этапа программы HYMERES (H2P1\_10)

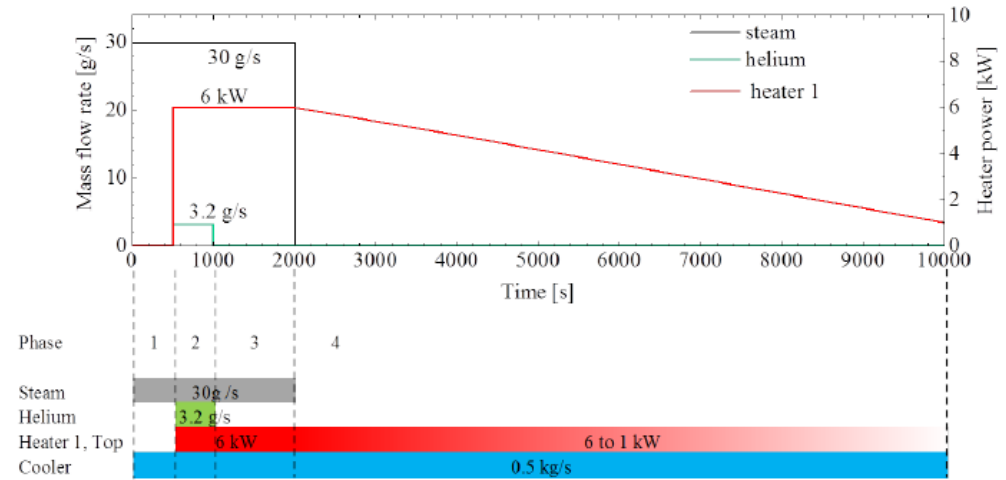


- Both calculations are quite accurately reproducing the erosion process, with the unique exception of the location above the grid.
- No initial decrease and slower erosion at the highest elevations for FZJ, not observed in the open medium simulation (effect of radiation model?)
- IBRAE results (level C) better than with grid resolved model





### HP2\_1\_2



### HP2\_2\_2

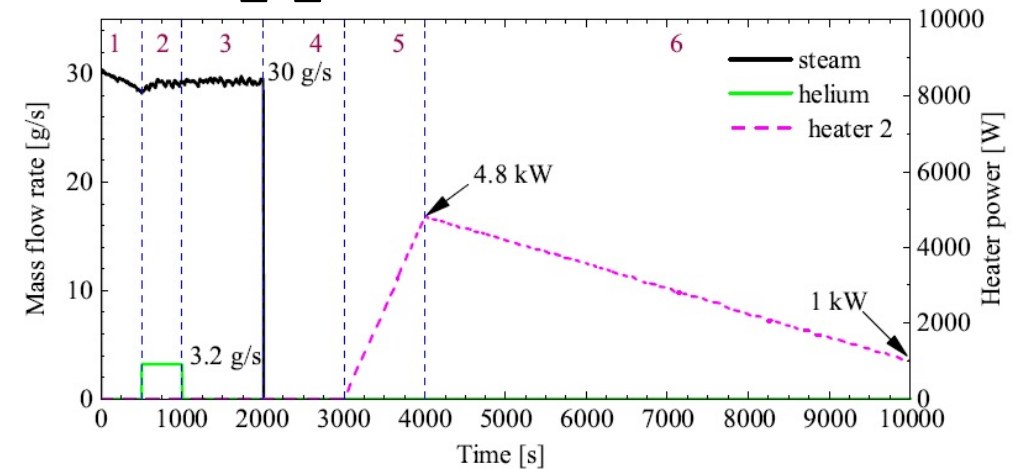
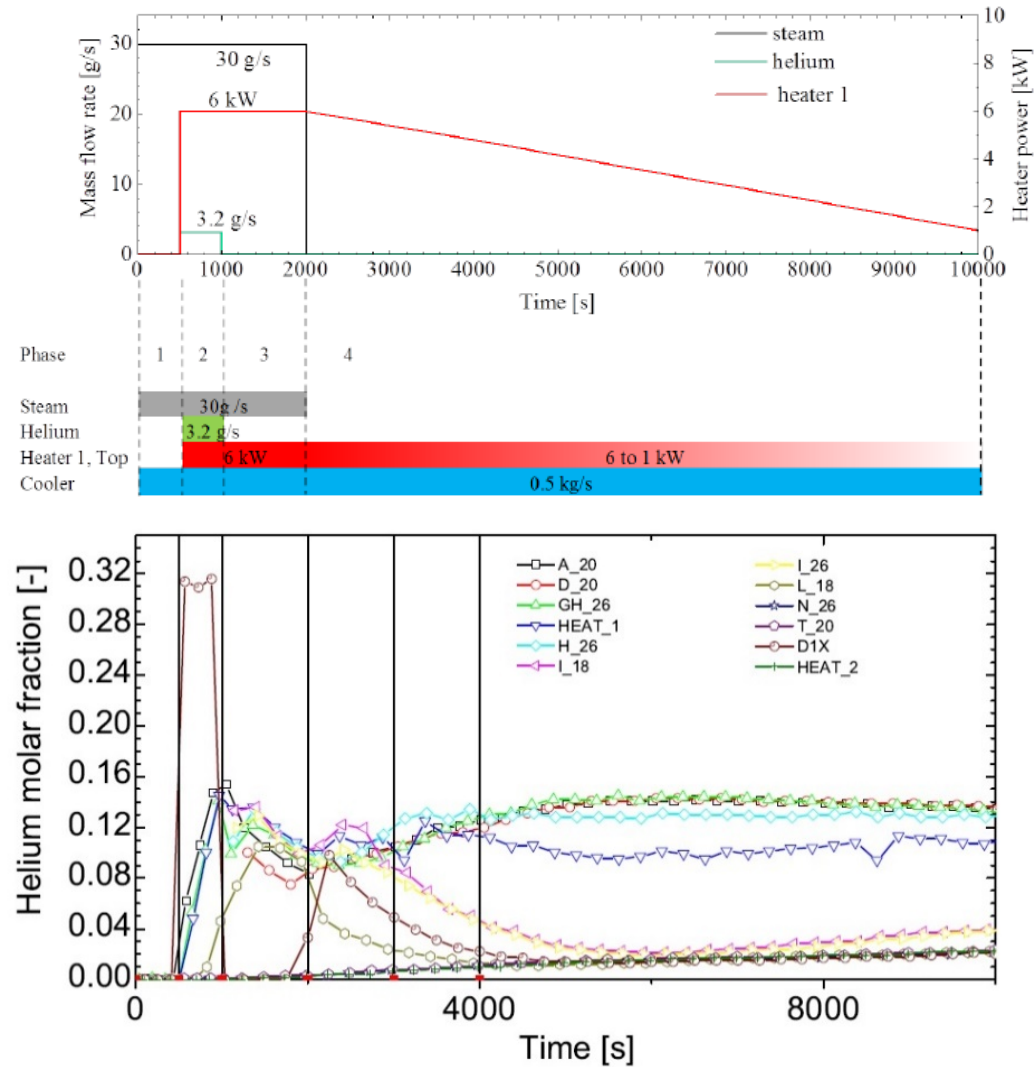


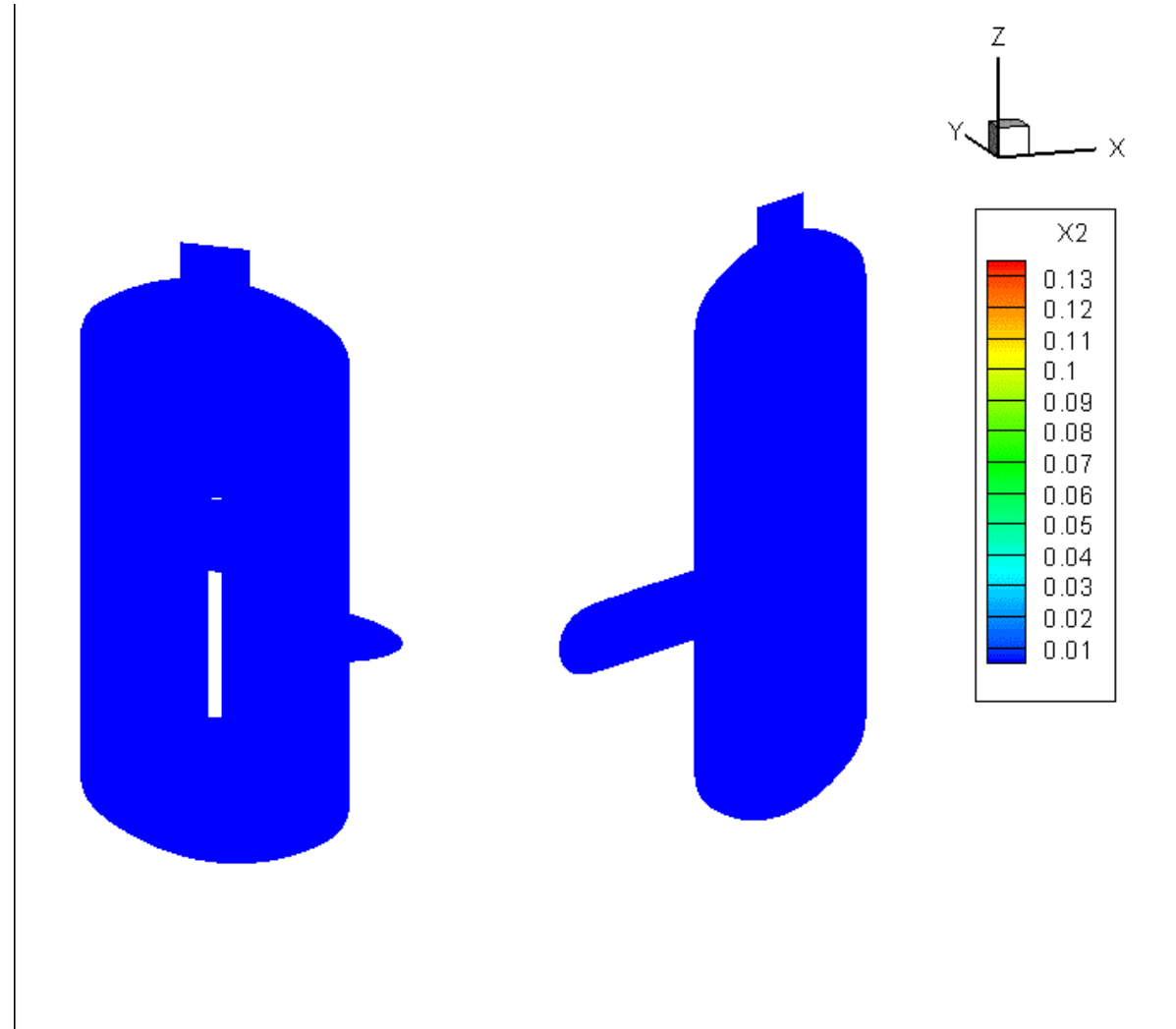
Figure 3.4: Steam and helium mass flow rates and heater power



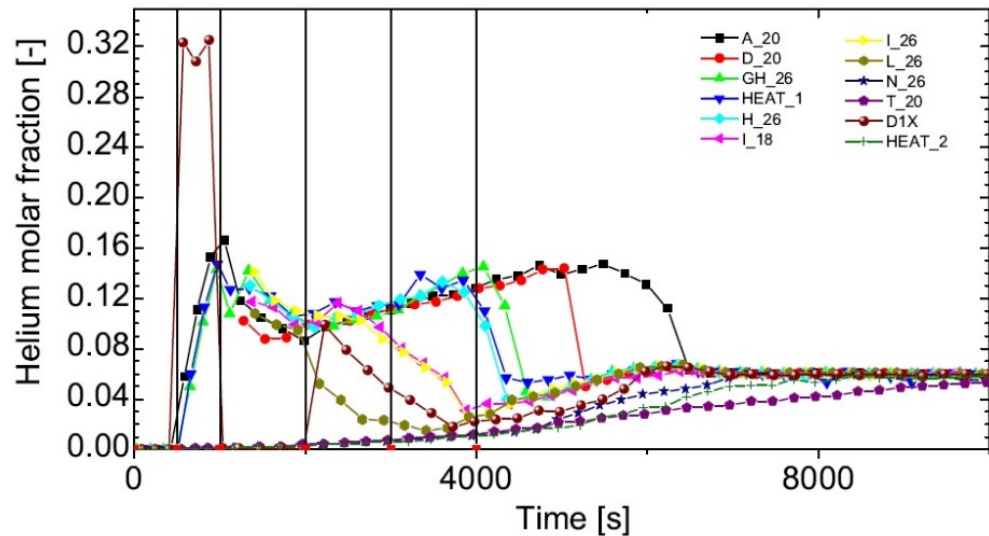
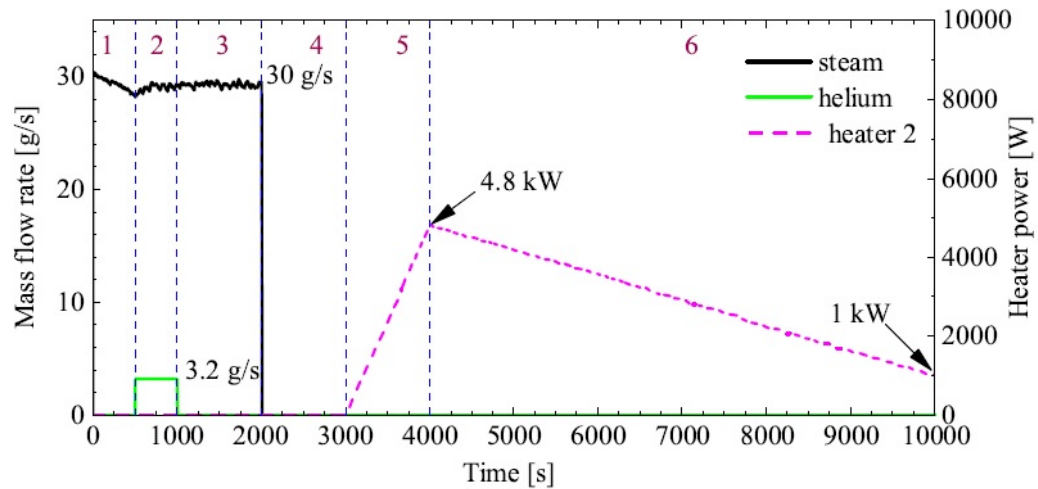
## Результаты НР2\_1\_2



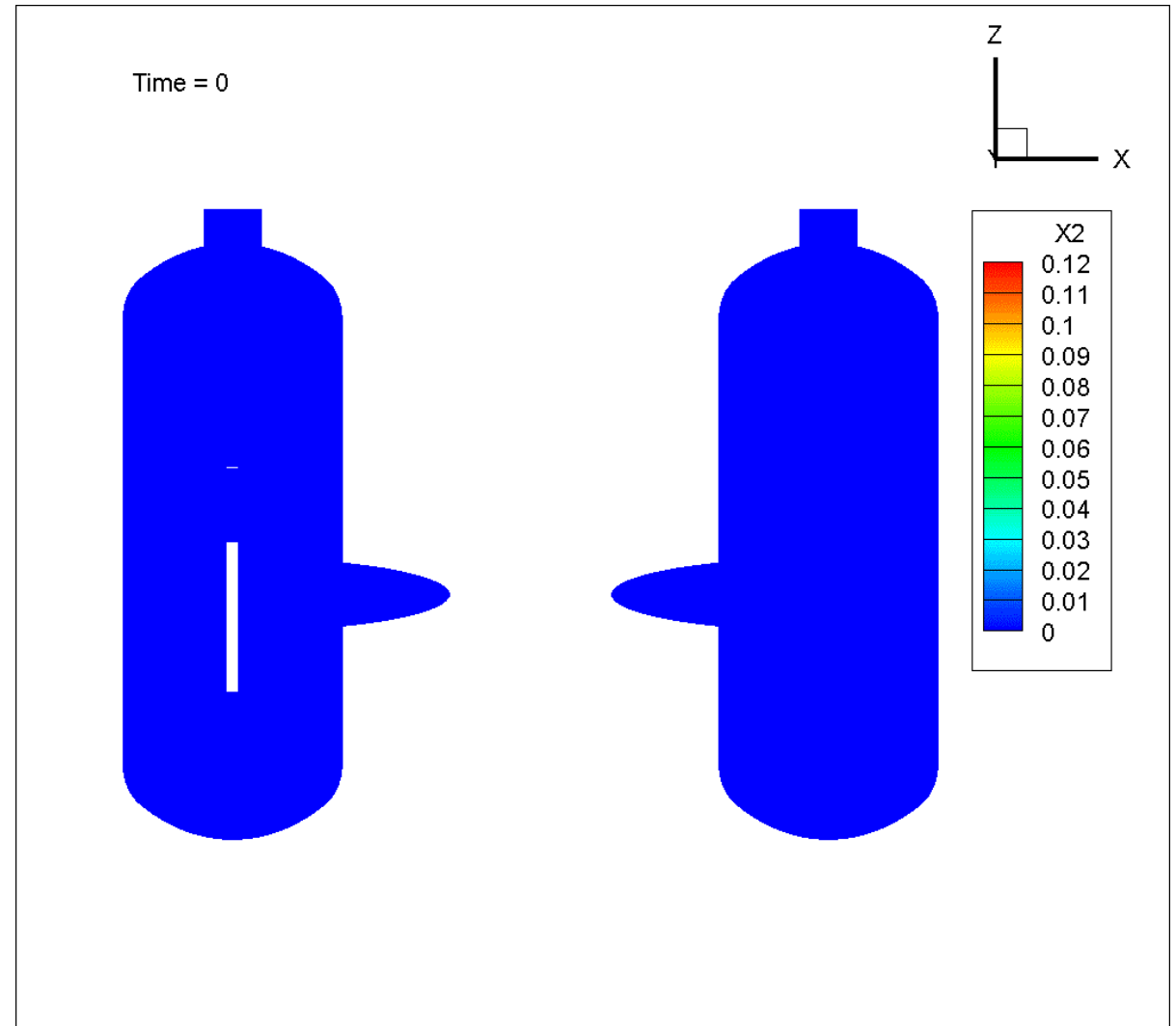
## Мольная доля гелия



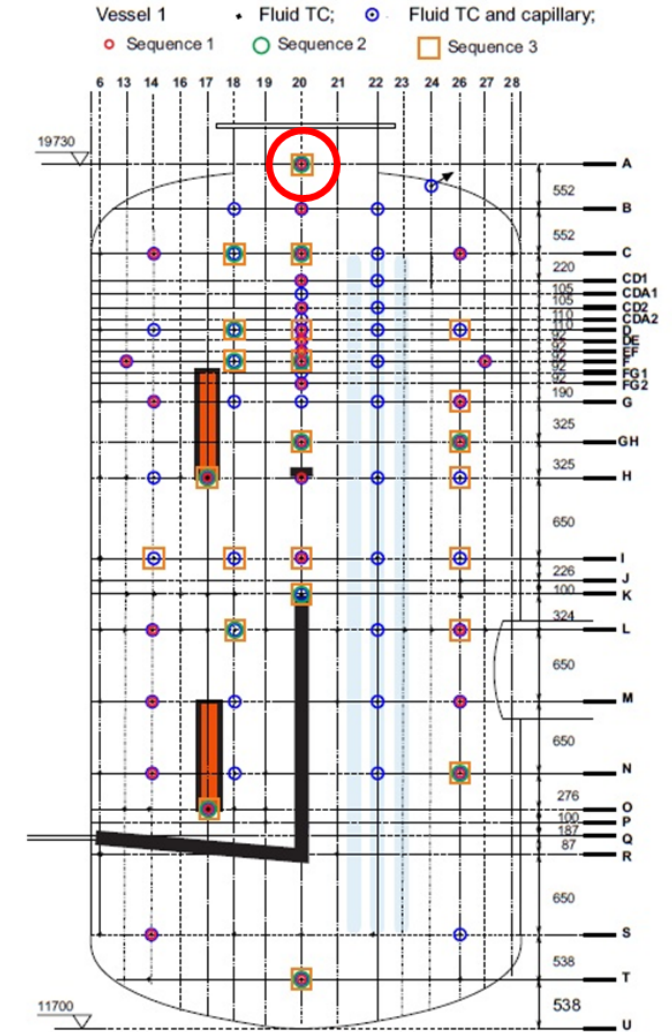
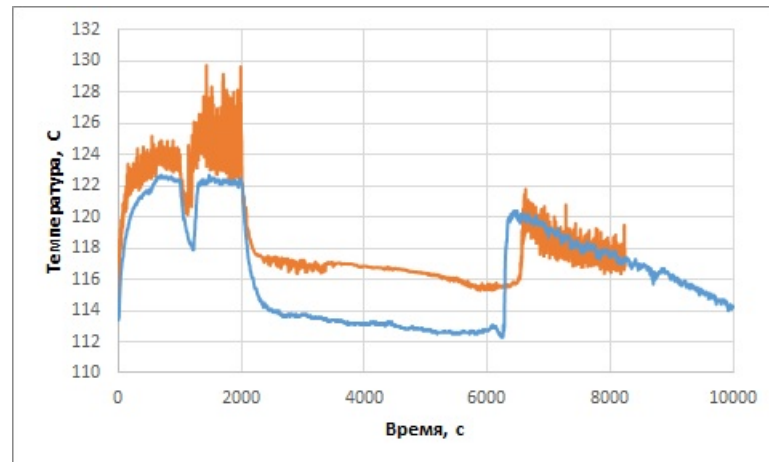
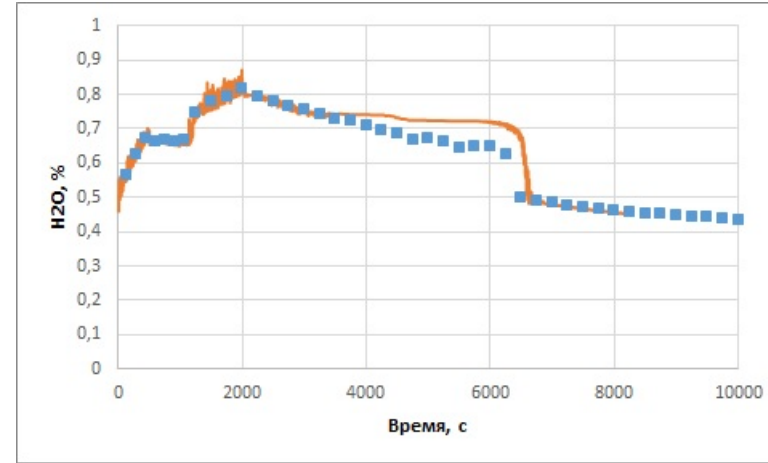
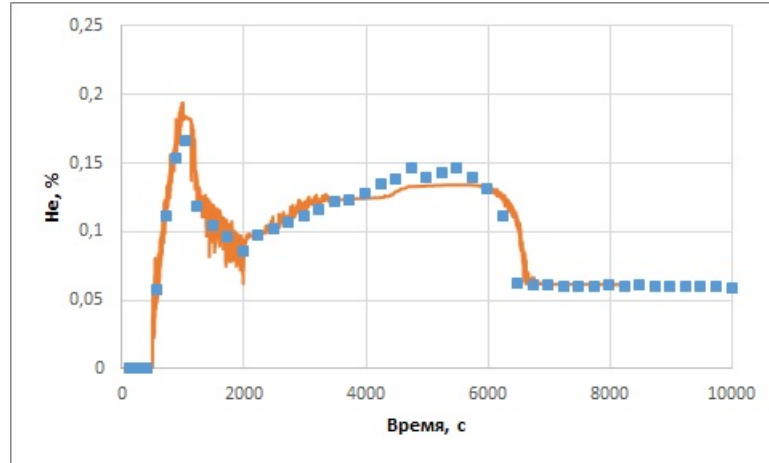
## Результаты НР2\_2\_2



## Мольная доля гелия

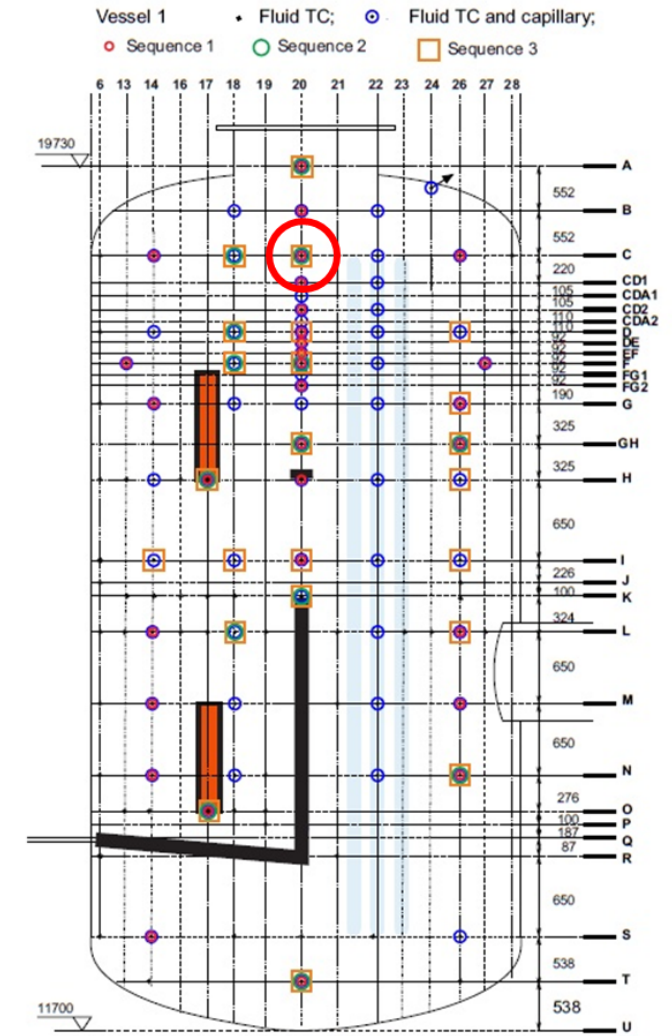
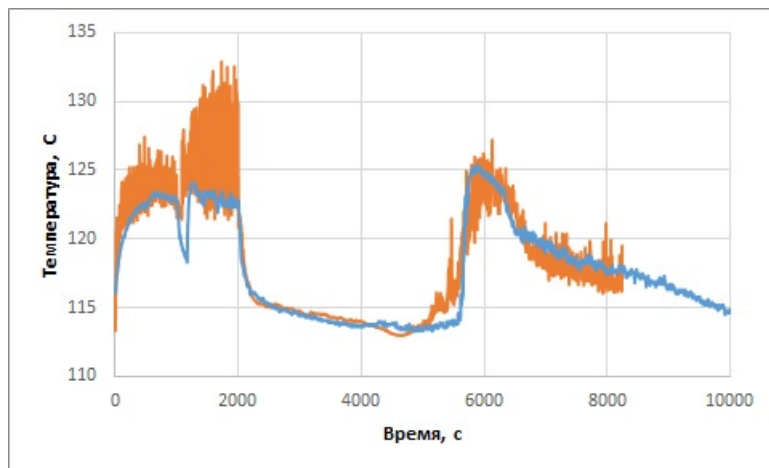
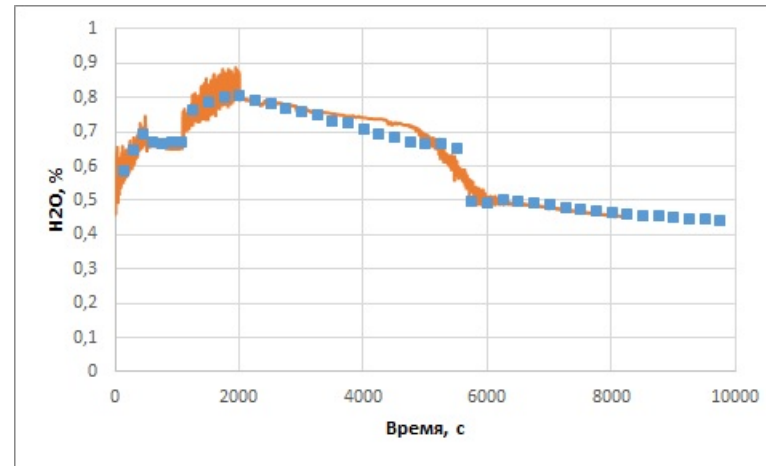
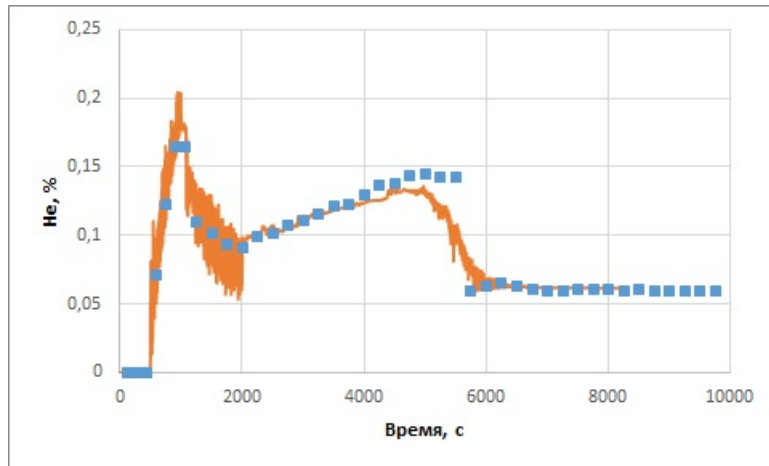


## Результаты НР2\_2\_2



(a) Vessel 1

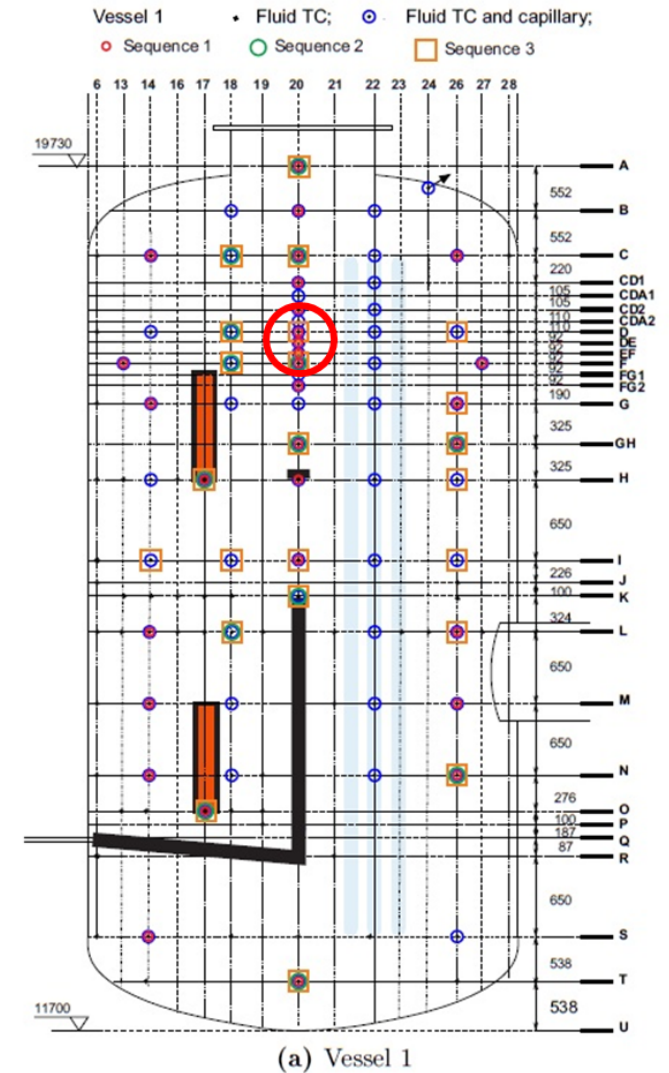
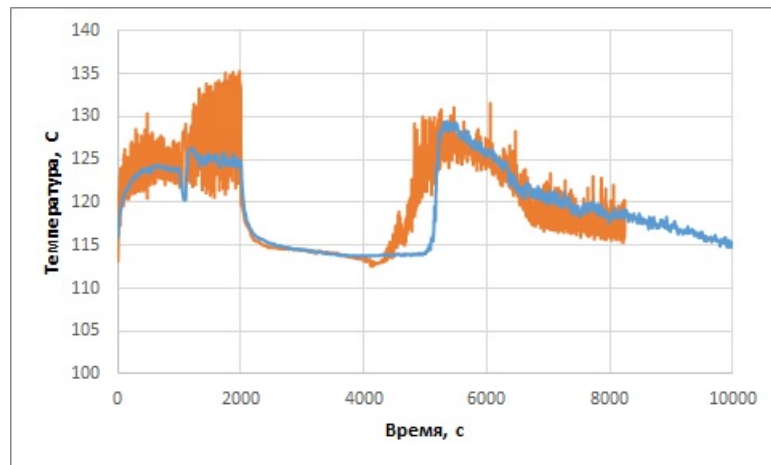
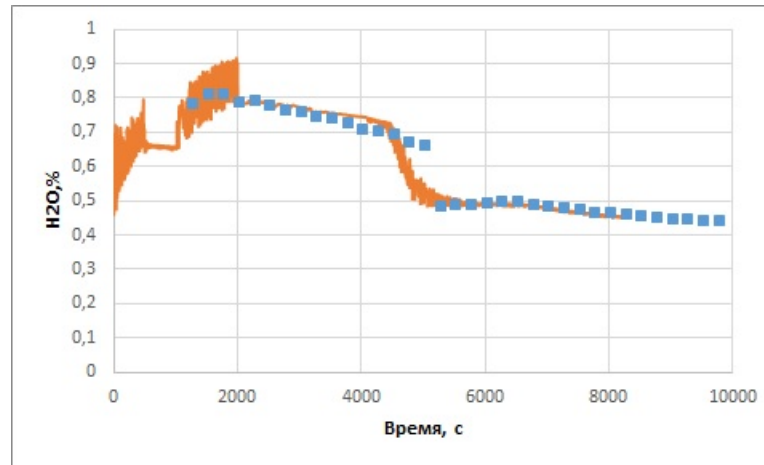
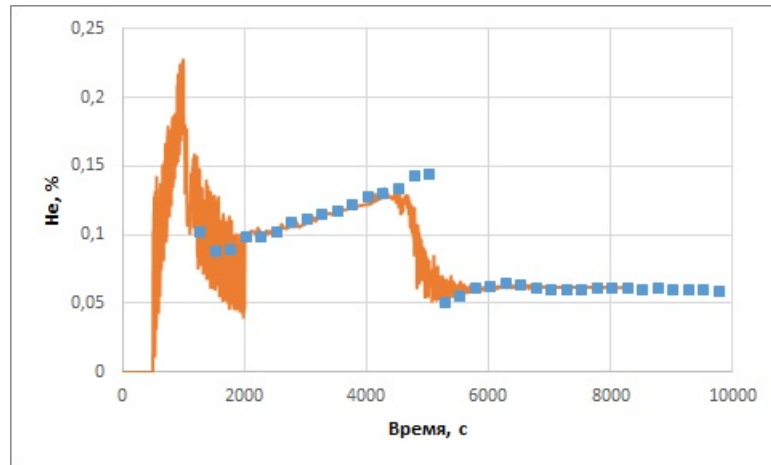
## Результаты НР2\_2\_2



(a) Vessel 1

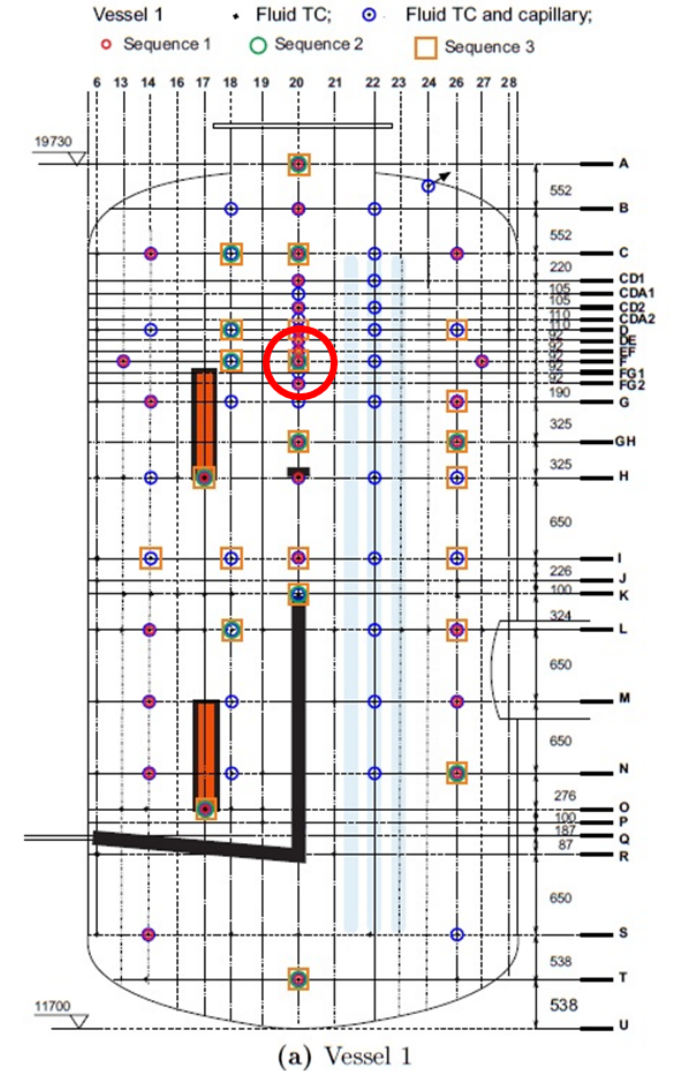
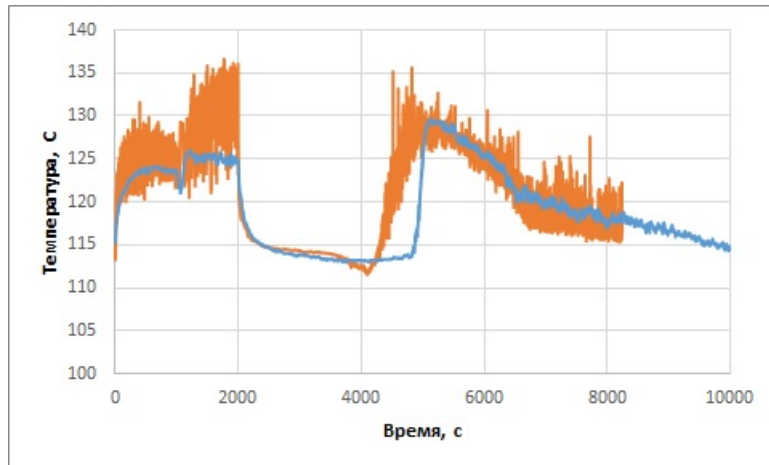
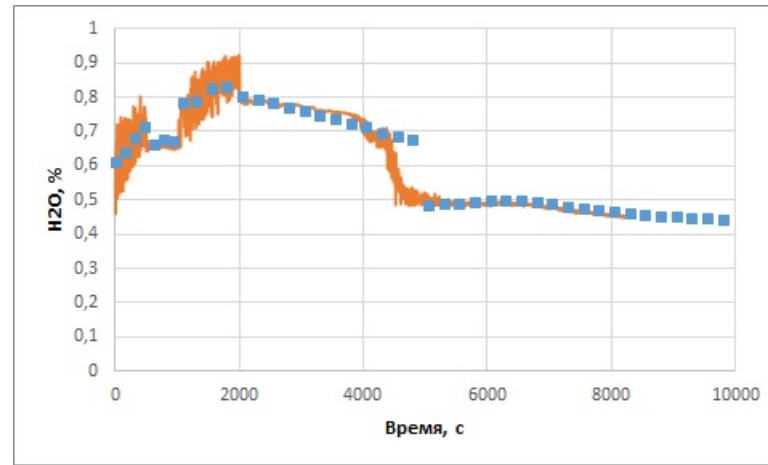
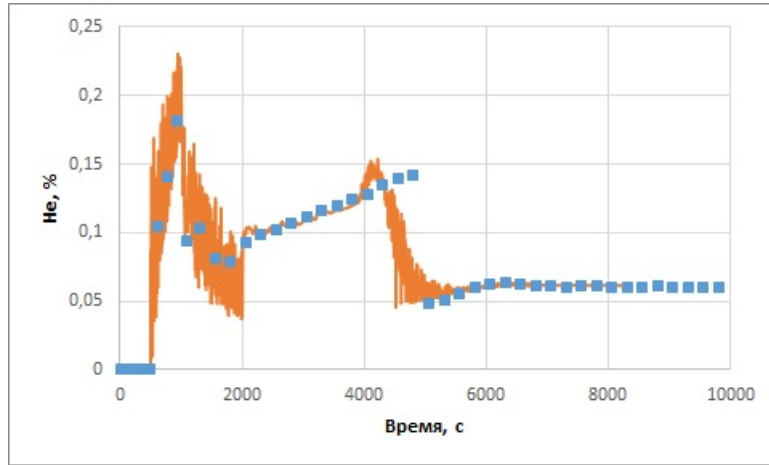


## Результаты НР2\_2\_2





## Результаты НР2\_2\_2





РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК  
Институт проблем безопасного развития атомной энергетики

**RUSSIAN ACADEMY OF SCIENCES**  
**Nuclear Safety Institute (IBRAE)**

Спасибо за внимание!