

*Результаты расчетно- экспериментальных исследований процессов перемешивания легкого газа для задач управления авариями на АЭС в рамках проектов **ERCOSAM-SAMARA***

*М.А. Камнев, А.М. Хизбуллин, О.В. Тюриков,
Е.П. Потехин, М.А. Антоненков*

Девятая международная научно-техническая конференция МНТК-2014 ,
г. Москва, 21-23 мая 2014 г

Структура проекта ERCOSAM-SAMARA



РОСАТОМ

Госконтракт

Проект **SAMARA**:
ИБРАЭ РАН (Москва) –
координатор проекта
ГНЦ РФ-ФЭИ (Обнинск)
+ *ОАО «ОКБМ
Африкантов»
(Н.Новгород)*

По линии сотрудничества
Россия-ЕС



Теплогидравлика
современных
и будущих
легководяных
реакторов для задач
управления
тяжелыми авариями
- **проект ERCOSAM-
SAMARA**

Соглашение о
координации
действий



Соглашение

Проект **ERCOSAM**
PSI (Швейцария) –
координатор проекта,
IRSN (Франция), CEA
(Франция),
KIT (Германия), NRG
(Нидерланды), AECL
(Канада)
+ *FZJ (Германия), NRC
(США)*

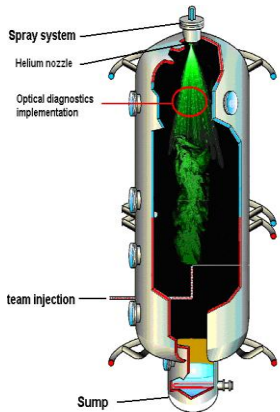
Цель:

Создание (расширение) базы данных высокого пространственного и временного разрешения для верификации контейментных, прежде всего, CFD кодов, в части распределения водорода по объему защитной оболочки.

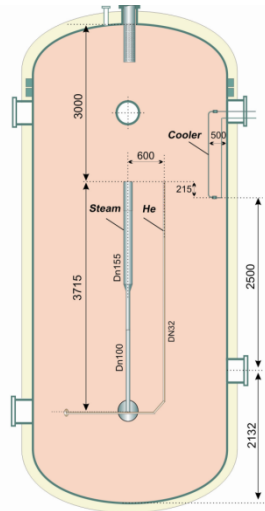
Задачи работы

- установить, реализуется ли стратификация гелия (используется вместо водорода в целях безопасности) в экспериментах со сценарием, воспроизводящим последовательность событий при тяжелой аварии с потерей теплоносителя (LOCA) на легководном реакторе, начиная с фазы истечения теплоносителя вплоть до окончания выхода водорода из корпуса реактора под защитную оболочку;
- установить, будет ли стратификация легкого газа разрушена работой технических средств для управления тяжелыми авариями: спринклерами, кулерами и пассивными автокаталитическими рекомбинаторами (ПАР).

- 5 установок разного масштаба (16 тестов)
 - единый сценарий тестов
 - связанные начальные и граничные условия
 - 3 системы безопасности (спринклер, ПАР, теплообменник)
- ⇓
- Влияние масштабного фактора
 - Эффект сложности геометрии



3 теста на
TOSQAN
(FR), 7м³



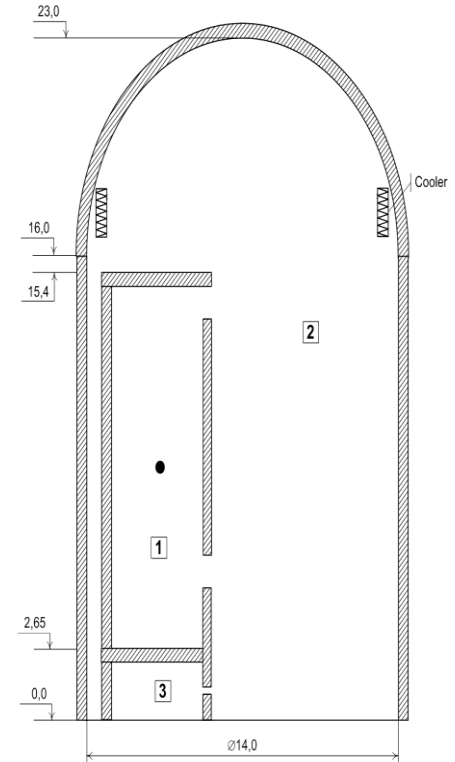
2 теста на
SPOT (RU),
■ 59м³



4 теста на
MISTRA (FR),
■ 100м³



5 тестов на
PANDA (CH),
■ 2x90 м³



2 численных
бенчмарка на
концептуальной
HYMIX (RU),
■ 3181м³

Аналитическая часть

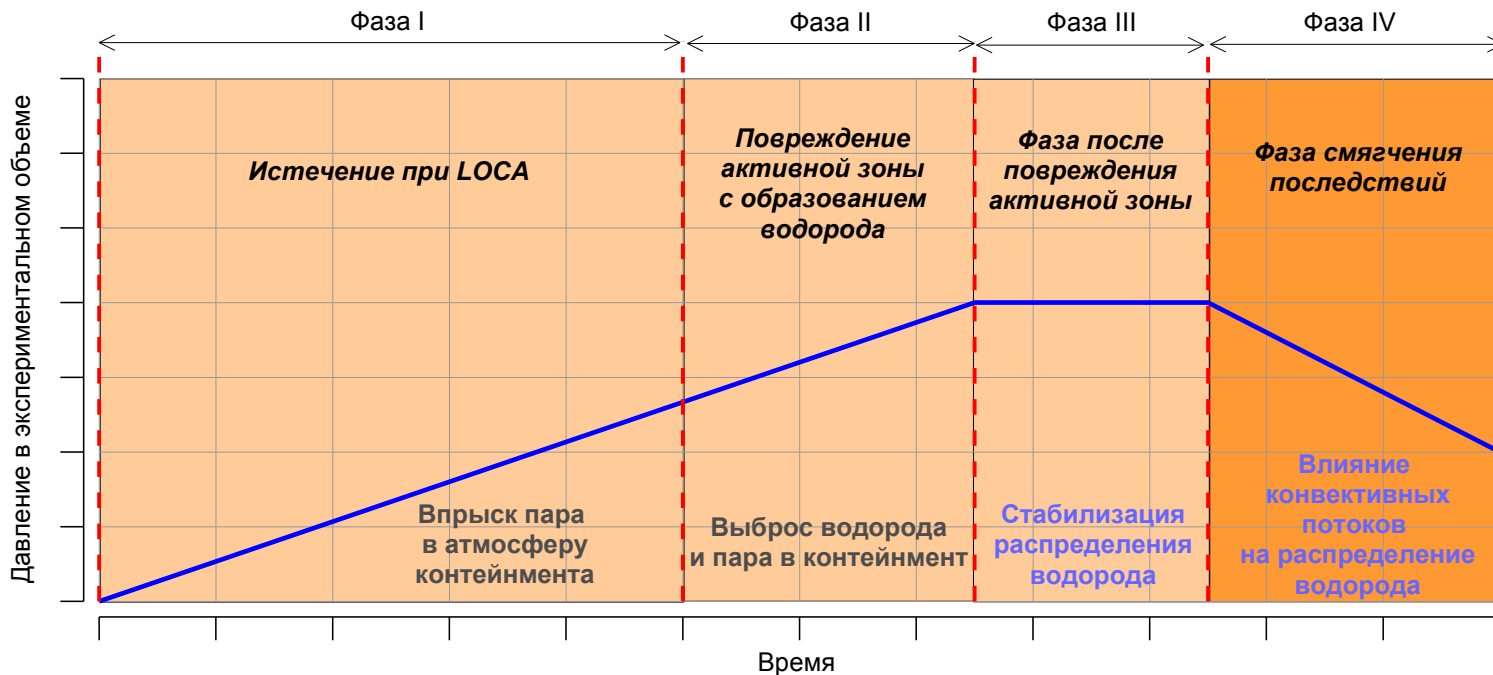
– численное моделирование фаз развития тяж. аварии для каждой экспериментальной установки и их верификацию по результатам экспериментальных работ

Организация			PSI	IRSN	CEA	NRG	KIT	AECL	JUELICH	ИБРАЭ РАН	ГНЦ РФ- ФЭИ	ОАО “ОКБМ Африкант ов”	
Эксперименты			Коды Устройства ¹	THIC/ JENT	ASTEC TONUS	TONUS	FLUENT-6 CFD	GASFLOW	GOTHIC	^a CFX-13 ^b COCOSYS	СОКРАТ (станц. расчет) OpenFOAM /FLUENT	КУПОЛ	КУПОЛ - МТ
TOSQAN	T1	Спринклер		PL, PO		PT, PO	PO	PO (Fluent)	-	PT, PO	PO	PO	
	T2	Спринклер	PT, PO	PL, PO		PT, PO	PO	PO (Fluent)	-	PO	PO		
	T3	Спринклер	PT, PO	PL, PO		PO	PO	PO (Fluent)	-	PO	PO		
MISTRA	M1	Спринклер				PO	PO		-	PO	PT, PO		
	M2	Кулер					PO		^a PT, ^a PO	PT, PO	PT, PO	PT, PO	
	M3	Рекомбинатор			PL, PO	PO	PO		^a PO	PT, PO	PO	PT, PO	
	M4	2 рекомбинатора			PL, PO		PO		^a PT, ^a PO	PO	PO	PO	
PANDA	P1	Спринклер	PL, PT, PO	PO		PT, PO	PL, PO	PL, PT, PO	-	PT, PO	PT, PO		
	P2	Спринклер	PL, PT, PO	PO		PO	PO	PL, PT, PO	-	PO	PT, PO		
	P3	Кулер	PL, PT, PO			PO	PO	PL, PT, PO	^b PT, ^b PO	PT, PO	PT, PO	PO	
	P4	Рекомбинатор	PL, PT, PO	PO		PT, PO	PO		^b PT, ^b PO, ^a PO	PT, PO	PO	PO	
	P5	Кулер	PL, PT, PO				PL, PO	PL, PT, PO	^b PT, ^b PO	PO	PT, PO	PT, PO	
HYMIX	K1	Спринклер ²		PT/PO					-	PT	PT, PO		
	K2	Кулер ³	PT				PT, PO	PT ⁶	^b PT, ^b PO	PT	PT, PO		
SPOT	S1	Кулер ⁴	PO				PT, PO	PO, PT	^b PT, ^b PO	PT, PO	PO	PL, PT, PO	
	S2	Кулер ⁵					PT, PO	PO, PT	^b PT, ^b PO	PT, PO	PO	PL, PT, PO	

PL: планирование эксперимента, PT: претестовый анализ, PO: посттестовый анализ

¹Техническое средство смягчения последствий аварии, которое будет использоваться на последней фазе экспериментов

Сценарий экспериментов



В соответствии с референтным сценарием аварии в ходе экспериментов проекта ERCOSAM-SAMARA должны быть получены следующие условия:

- мольная доля пара 60% над уровнем инъекции к концу фазы инъекции пара при распределении пара по высоте, приближенному к однородному;
- давление в сосуде к концу фазы инъекции гелия $P = 2.5$ бар (абс.);
- мольная доля гелия 10% над уровнем инъекции к концу фазы подачи гелия.

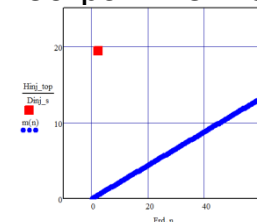
Критерии стратификации

	Расход пара, г/с	Расходе гелия, г/с	Объем, м3
GC	8000	61	20000
СПОТ 30	24	0,18*	59



Критерий Йорка определяет условия стратификации при распространении струи меньшей плотности в неограниченном пространстве.

$$\frac{H_{инж}}{D_{инж}} > 0.22 Fr^{1/2}$$



Критерий Ханта характеризует условия стратификации струи легкого газа с учетом ограничивающего объема, т.е. стенок емкости

$$\left(\frac{L_{струи}}{H_{инж}} \right)_{крит} = \frac{1}{G} \left[\frac{1}{3 \cdot \alpha^{1/2}} \left(\frac{2 \cdot H_{инж}}{D_{30}} \right)^{-1} - 1 \right]$$

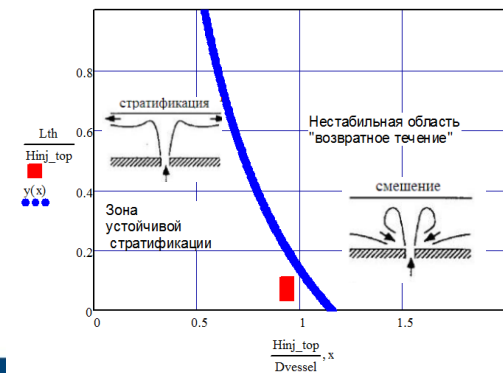
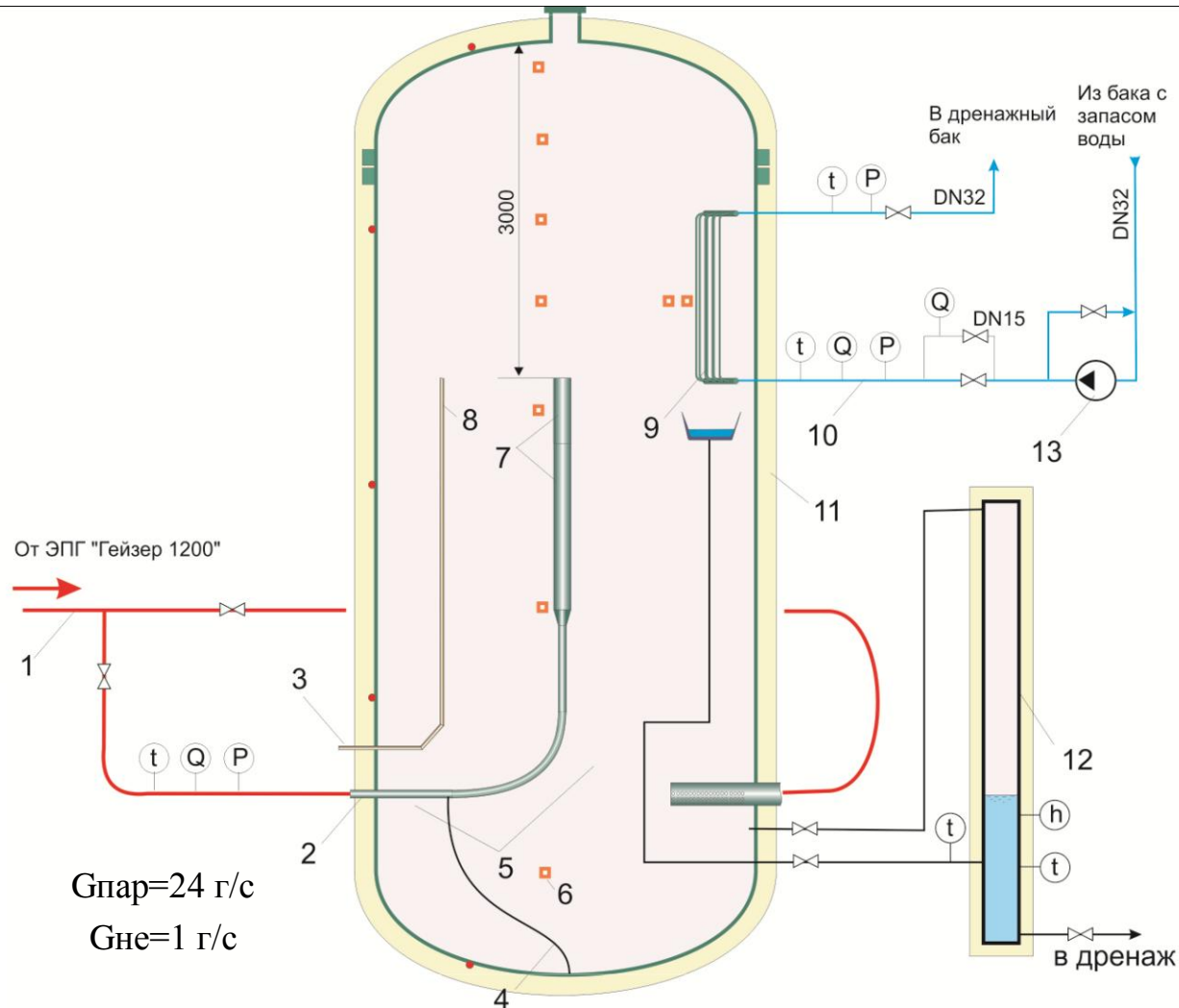


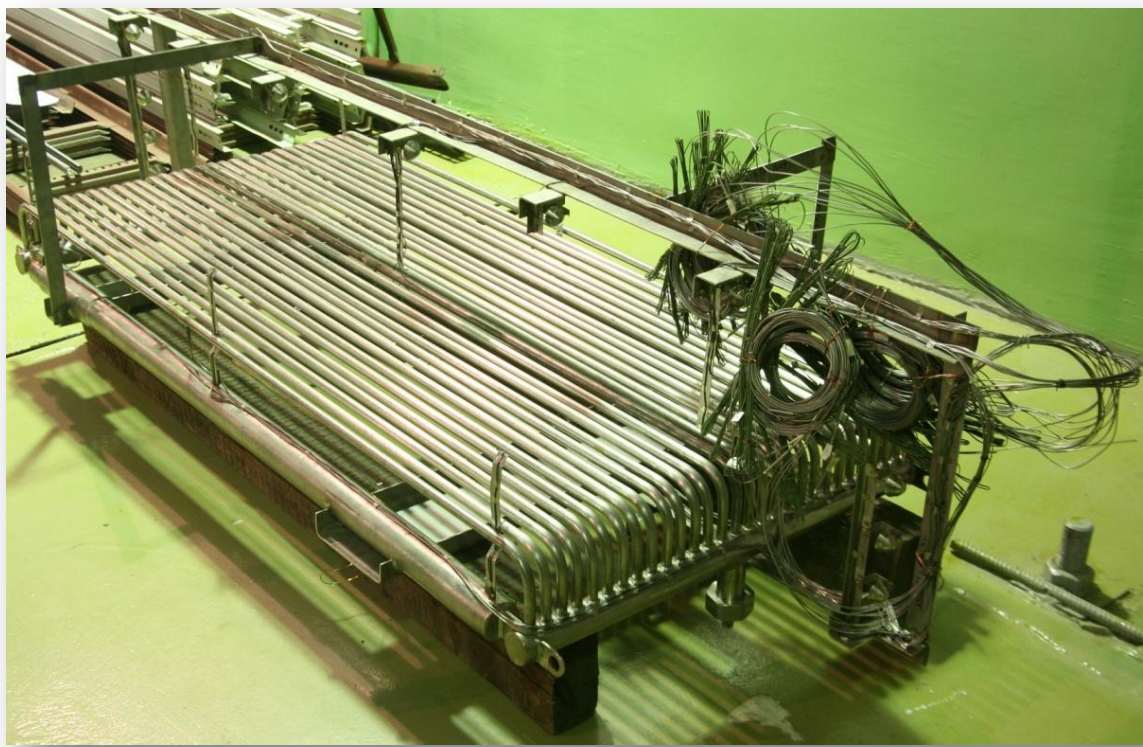
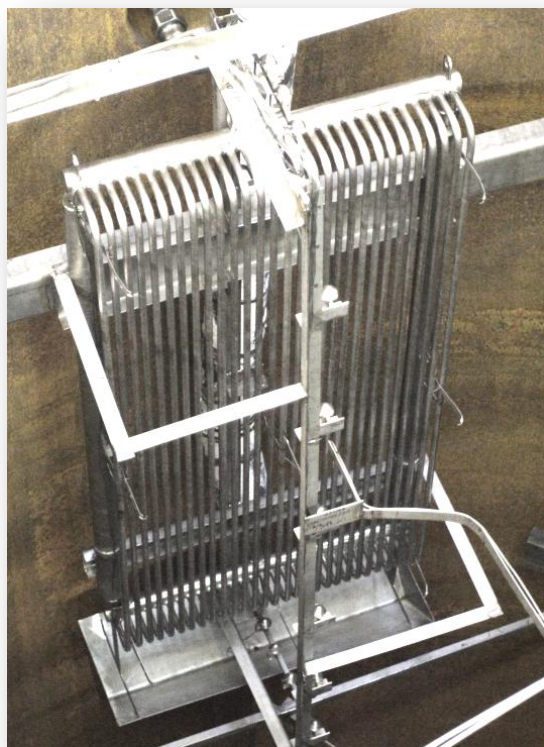
Схема модернизированного стенда СПОТ 30



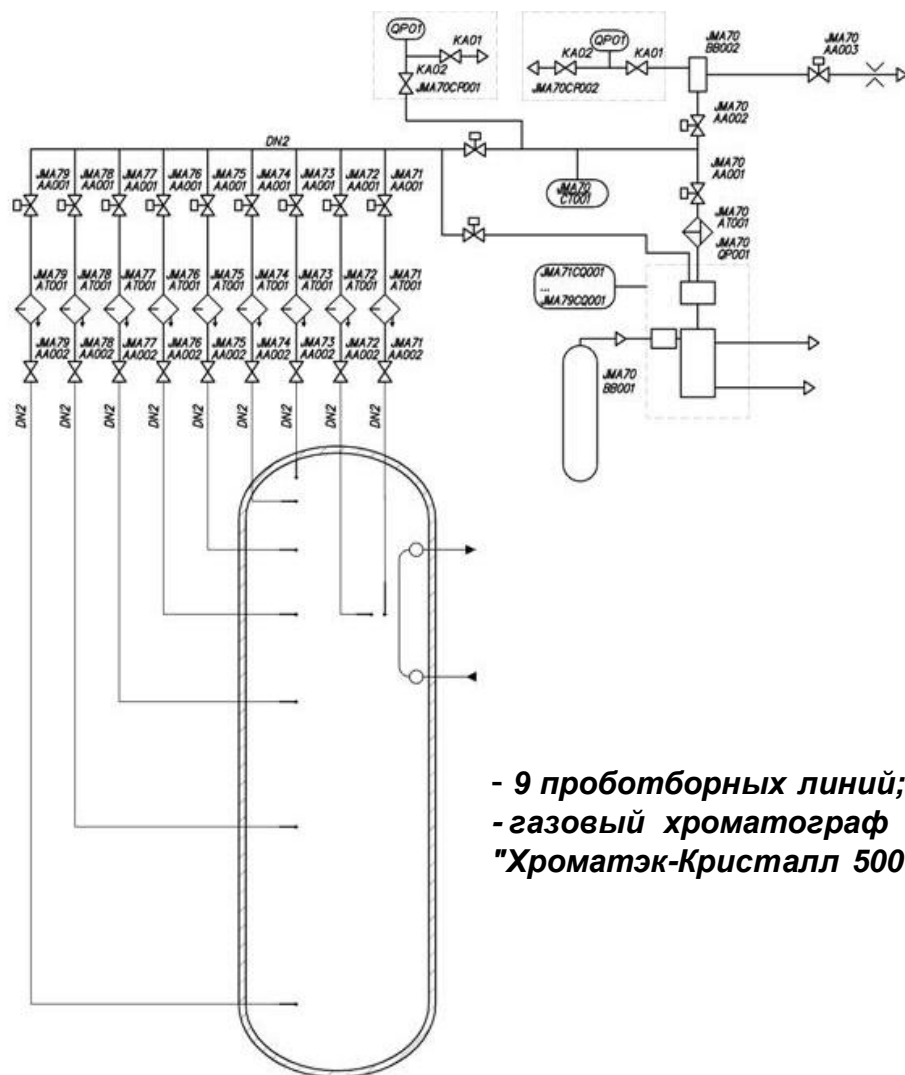
1 – греющий контур; 2 – трубопровод подачи пара; 3 – трубопровод подачи гелия; 4 – трубопровод дренажа; 5 – стойки с термопреобразователями; 6 – точки отбора проб; 7,8 – съемные вставки; 9 – теплообменник; 10 – контур охлаждения; 11 – модель защитной оболочки; 12 – сосуд для сбора конденсата; 13 – электронасос



Теплообменник



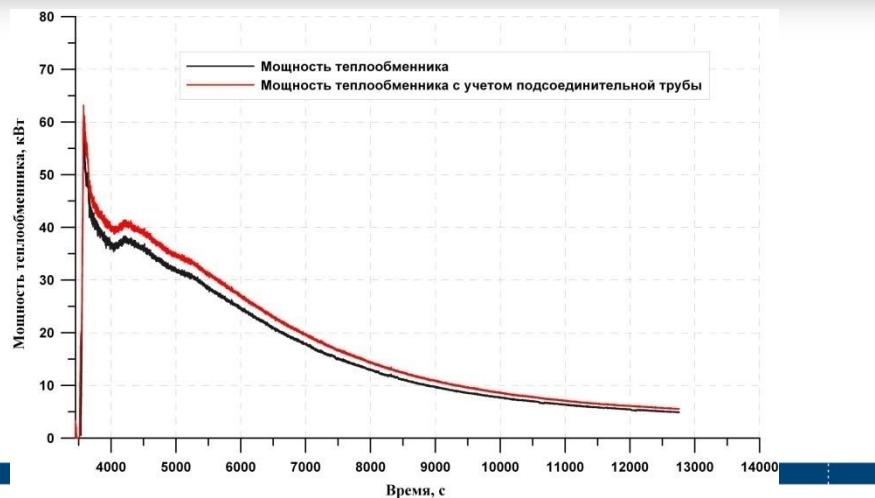
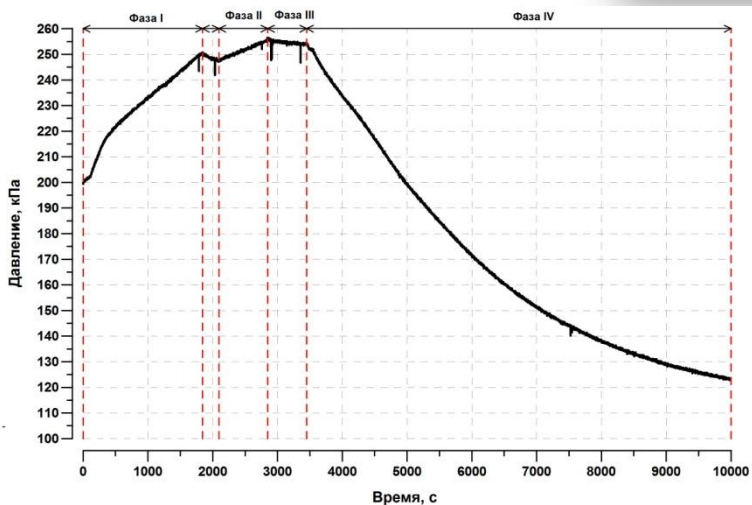
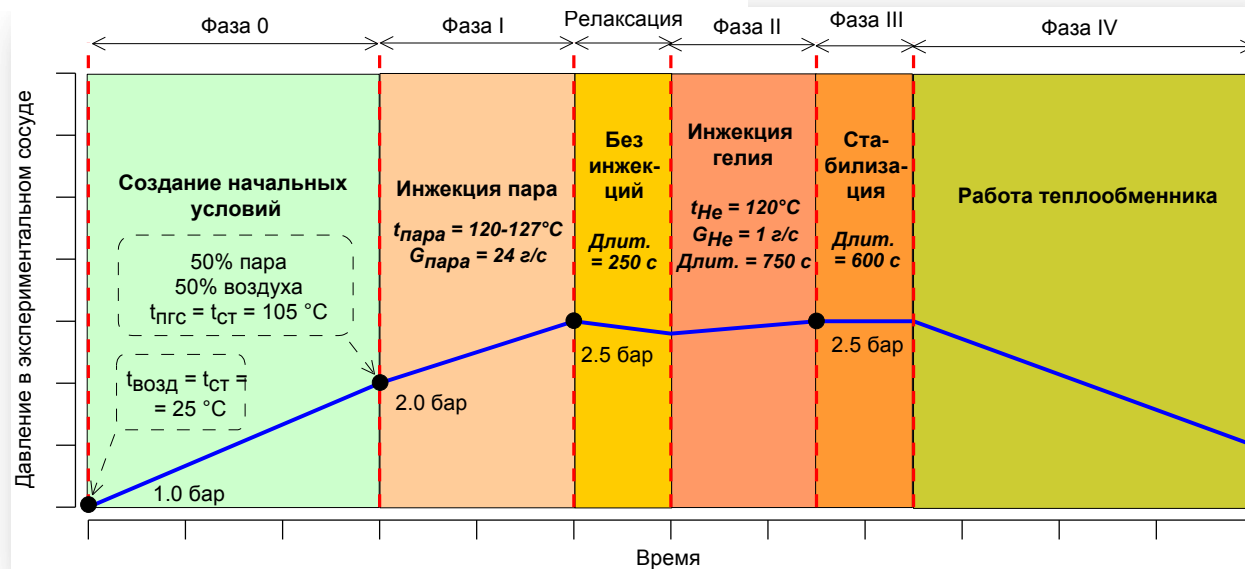
Мощность теплообменника определялась исходя из максимальной мощности воздушных теплообменников системы отвода тепла АЭС CANDU 6 (объем контейнента 50000 м³), которая составляет: 0.74 кВт/м³. Мощность теплообменника СПОТ с учетом объема модели 30 – 59м³ составляет 44 кВт.



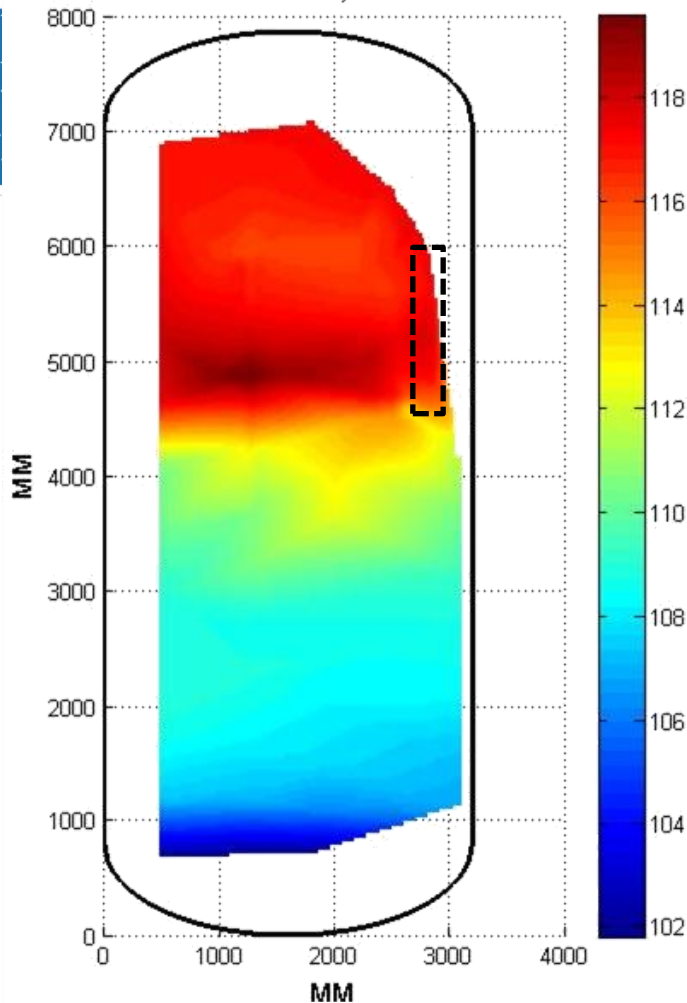
- 9 проботборных линий;
- газовый хроматограф "Хроматэк-Кристалл 5000"

Сценарий эксперимента S1

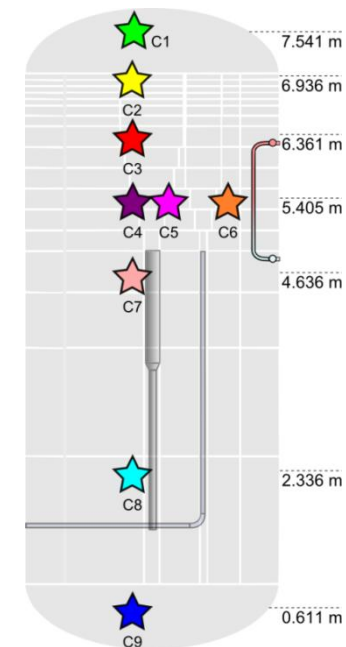
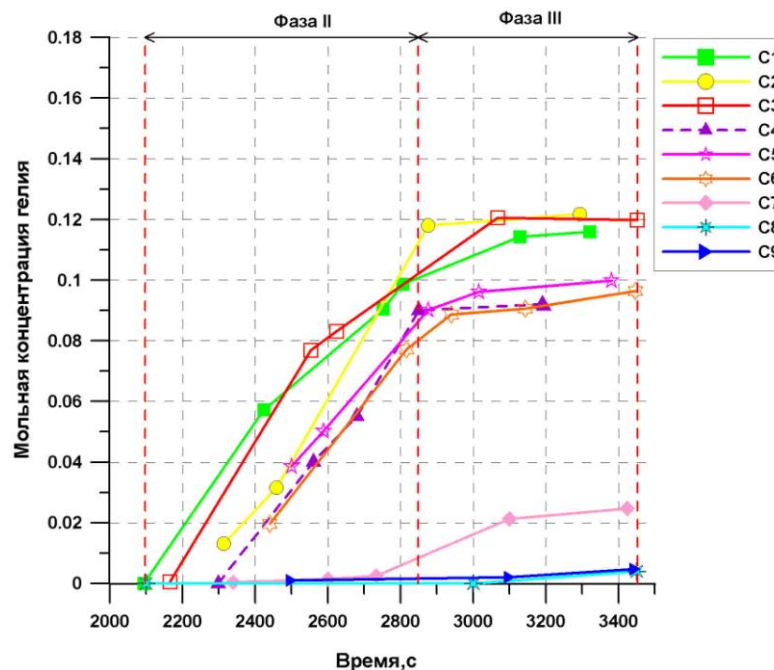
- Фаза 0 – подготовительная фаза;
- Фаза I – имитация LOCA;
- Фаза II – инжекция гелия;
- Фаза IV – работа теплообменника



line t27-t43, t=2750 c



Распределение температур перед включением теплообменника

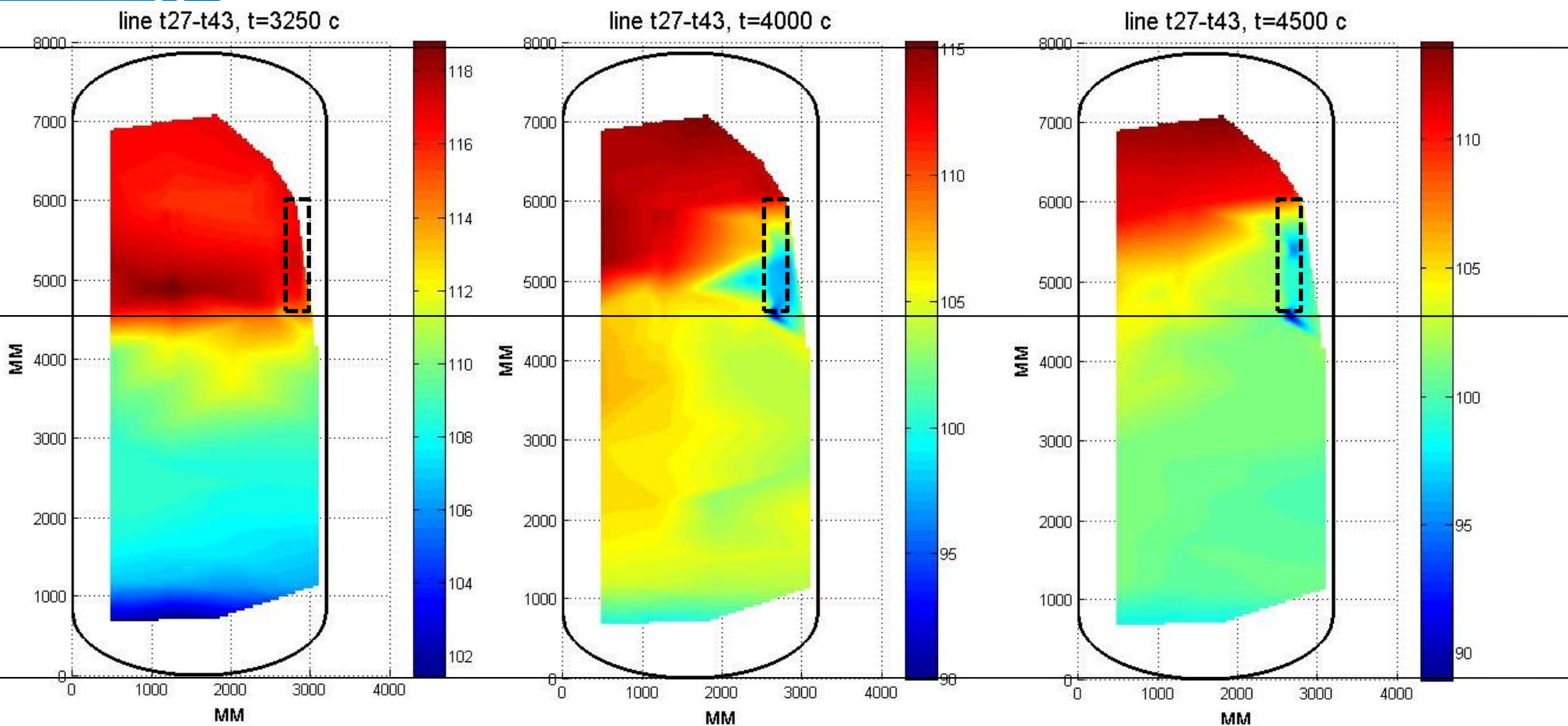


Перед включением теплообменника выше точки инъекции формируется стратифицированный слой:

10% - гелия ; 70% - пара; 20% - воздуха

Ниже точки инъекции ПГС состоит из

50% - воздуха и 50% - пара.

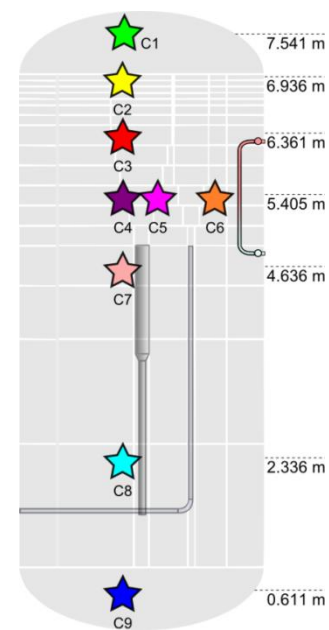
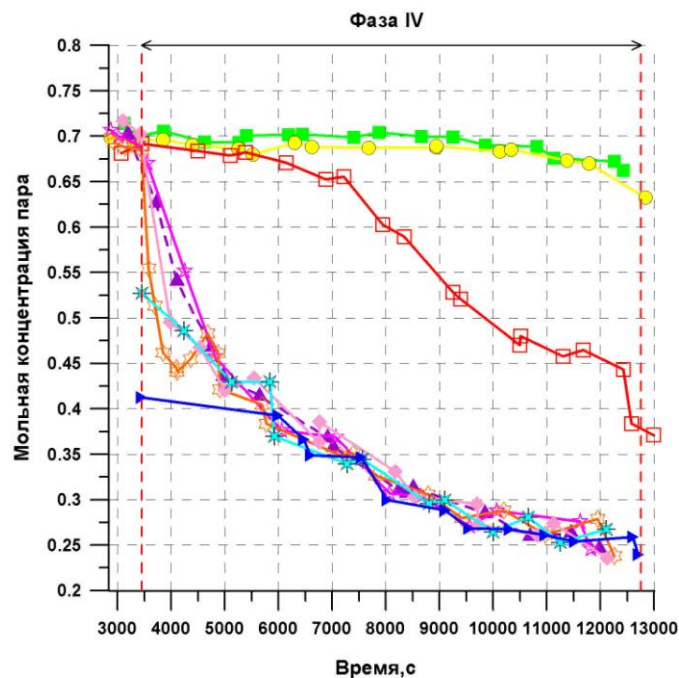
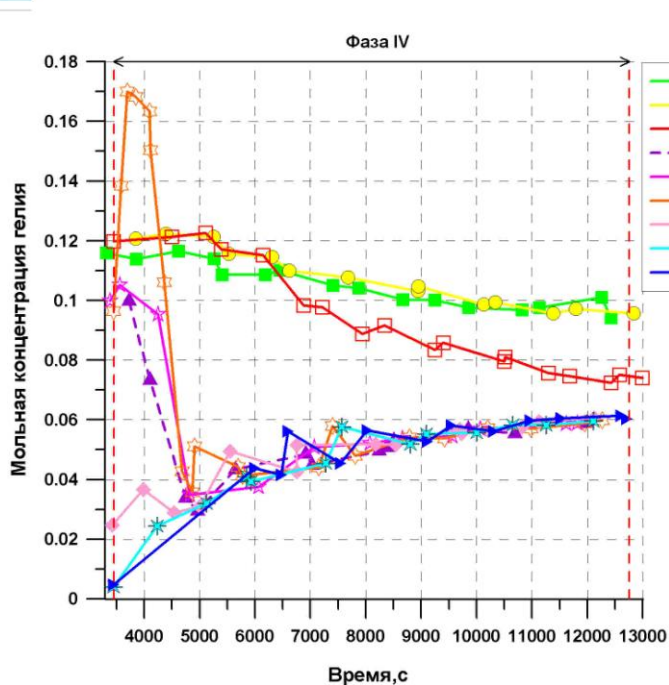


Стратификация ПГС перед включением теплообменника

“Холодная” область ПГС возле т/о

- Ниже и напротив т/о наблюдается равномерное перемешивание атмосферы; выше т/о стратифиц. слой сохраняется

Изменение мольной концентрации гелия и пара при работе теплообменника (тест S1)



В Фазе IV выше теплообменника стратифицированный слой сохраняется

Изменение мольной концентрации гелия и пара при работе теплообменника (тест S2)

Теплообменник вводится в работу совместно с инъекцией гелия

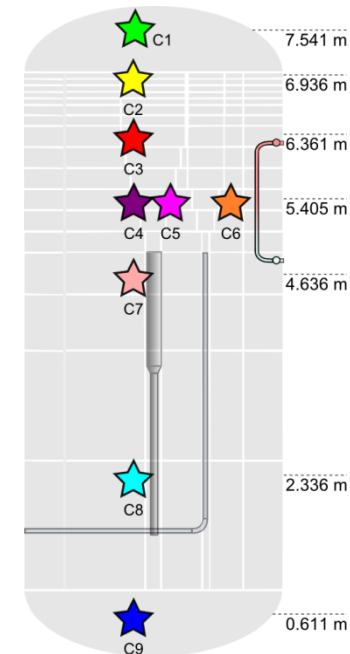
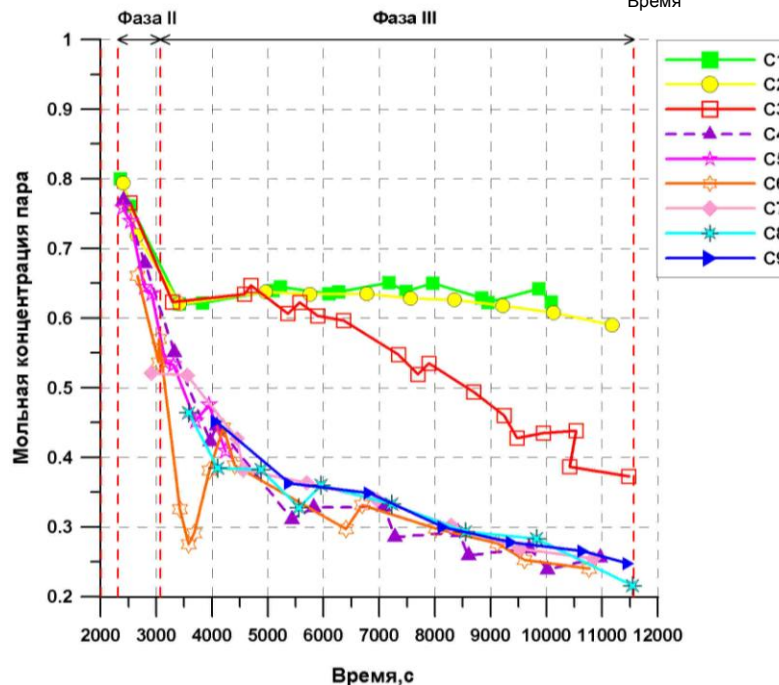
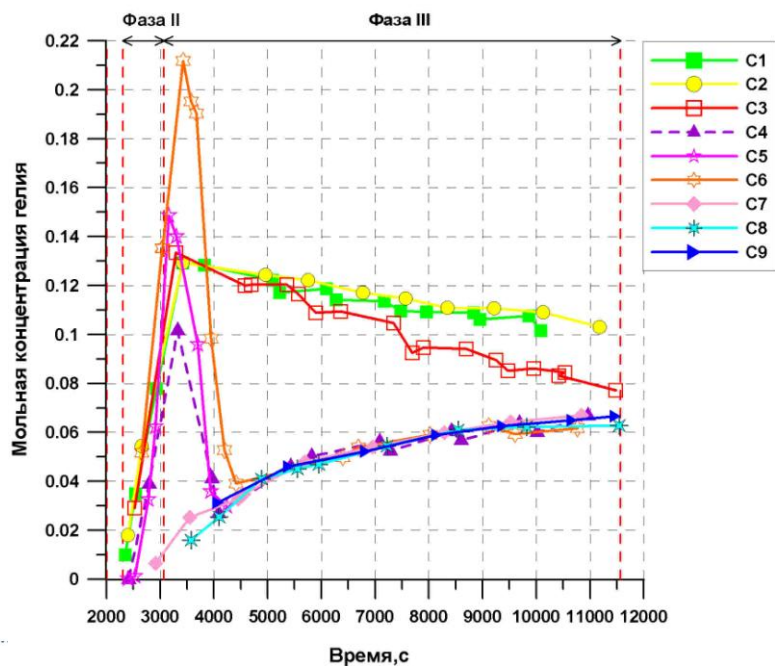
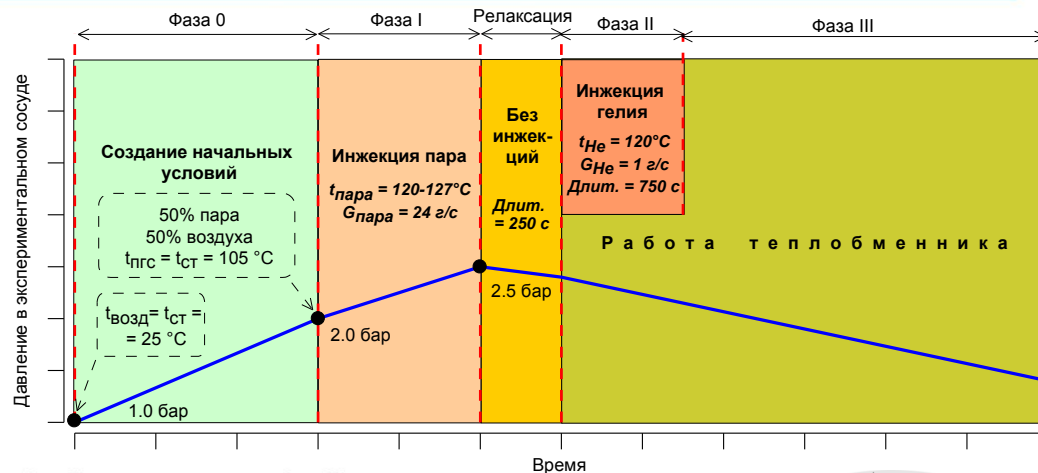


Схема стенда PANDA и расчетная модель

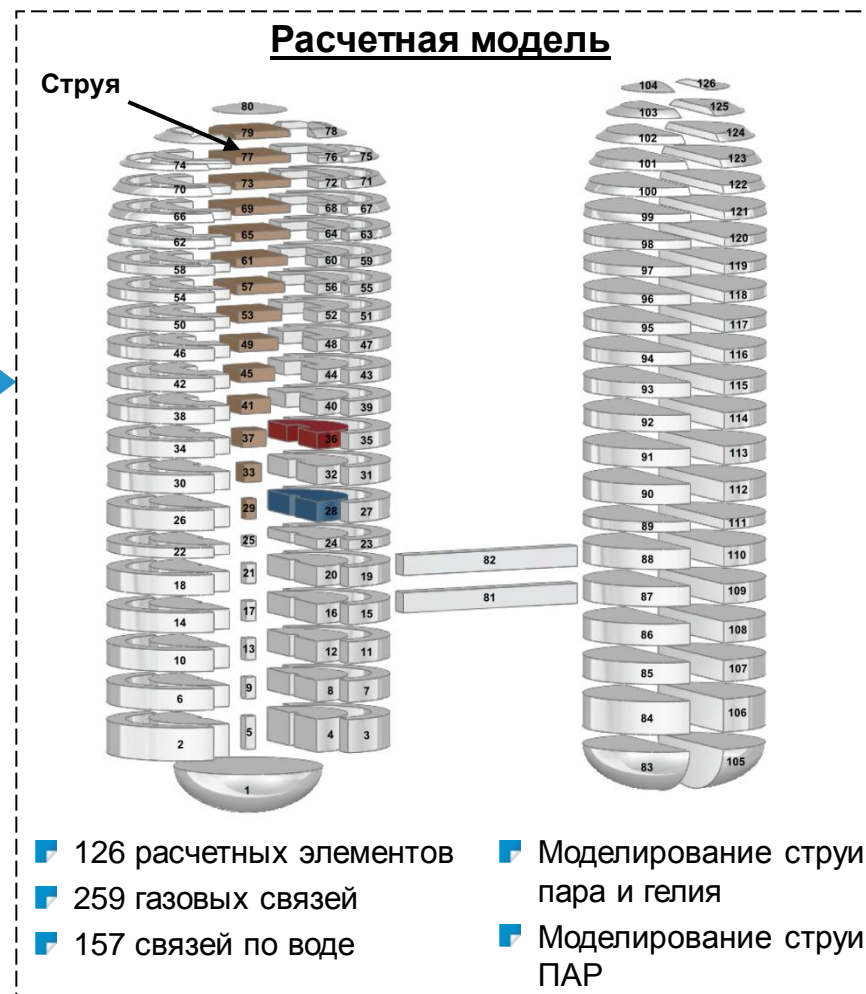


Схема стенда MISTRA и расчетная модель

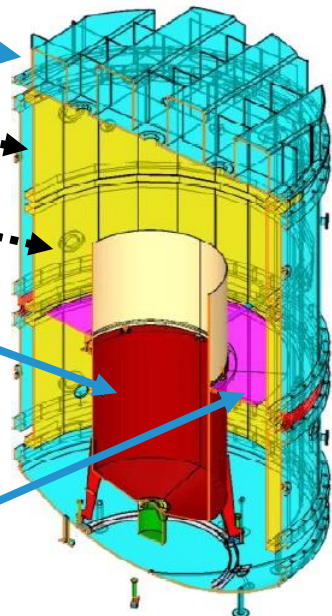
Основной
контеймент

Зазоры

Терморегулируемые
стенки

Внутреннее
помещение

Кольцевая
перегородка



Стенд MISTRA

- Свободный объем ~ 98 м³
- Высота контеймента ~ 7.5 м, диаметр ~ 4.3 м

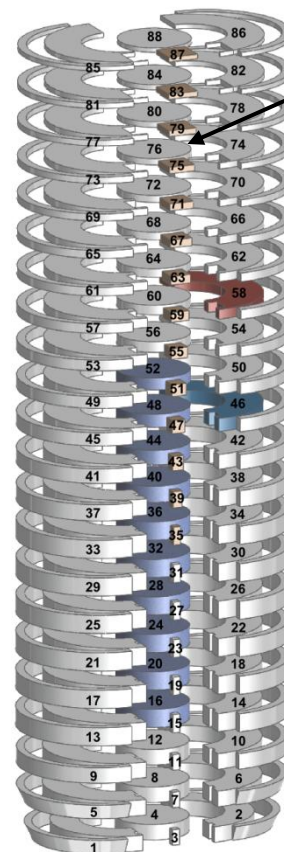
Рекомбинатор (ПАР)

- Высота ~ 1 м, проходное сечение ~ 0.035 м²
- $N_{эл}^{max} = 6$ кВт

Теплообменник (ТО)

- Охлаждаемая стенка
- Площадь поверхности ~ 22 м²

Расчетная модель



Струя

- 95 расчетных элементов
- 132 газовых связи
- 87 связей по воде
- Моделирование струи пара и гелия
- Моделирование струи ПАР

Схема стенда TOSQAN и расчетная модель

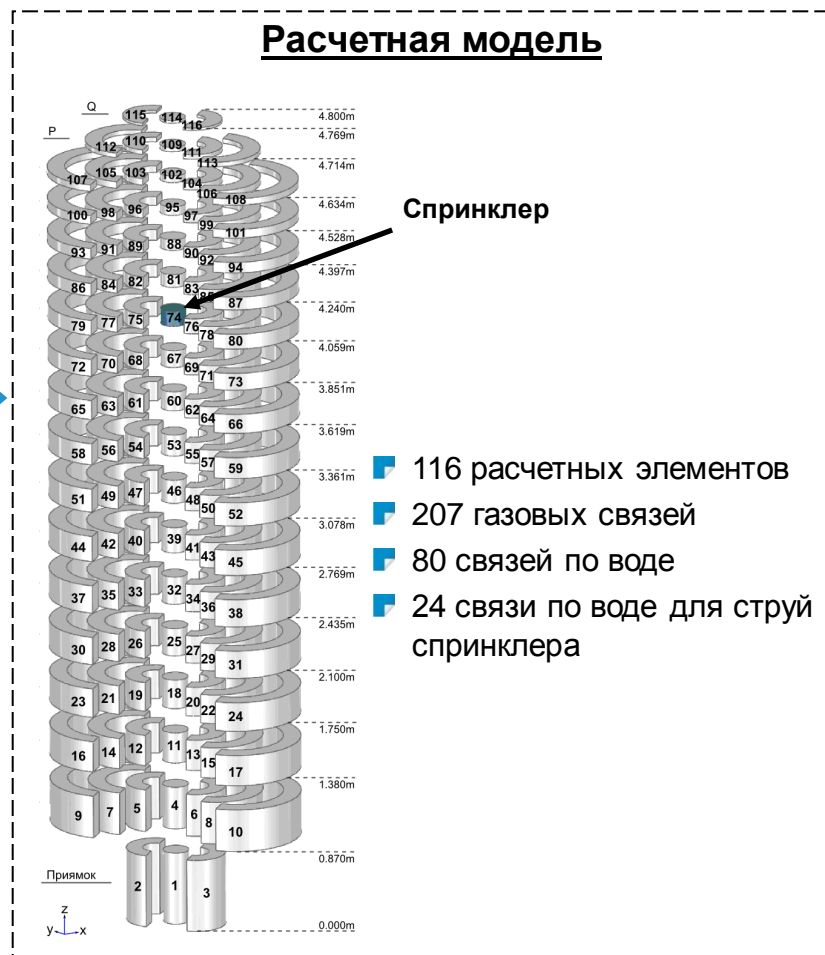
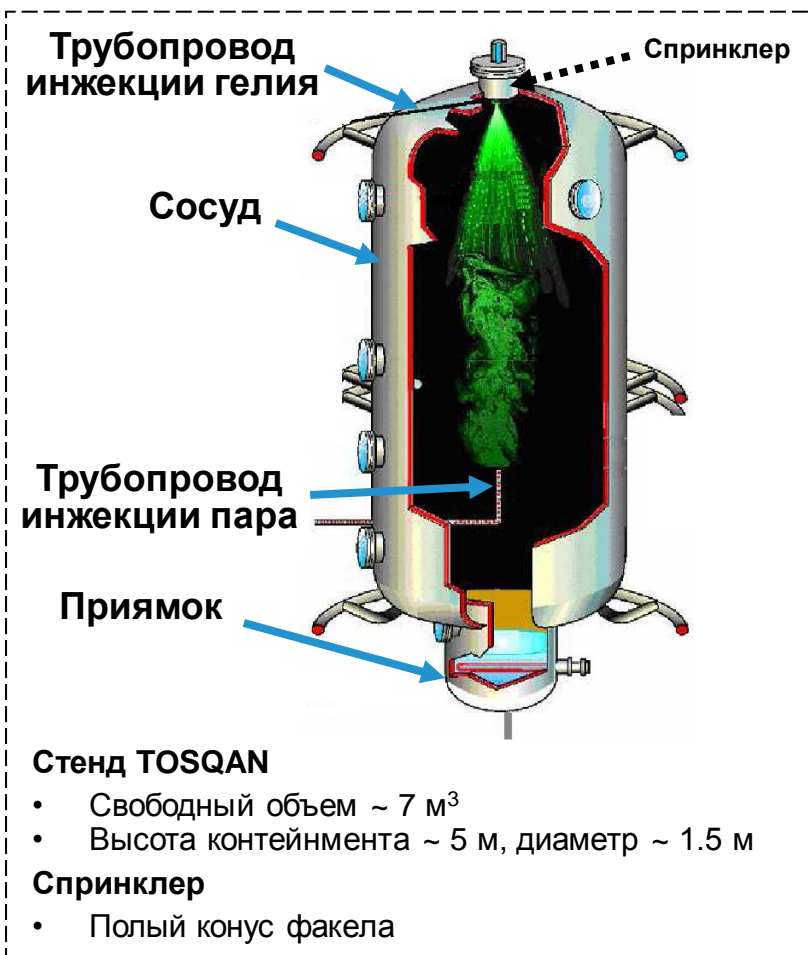
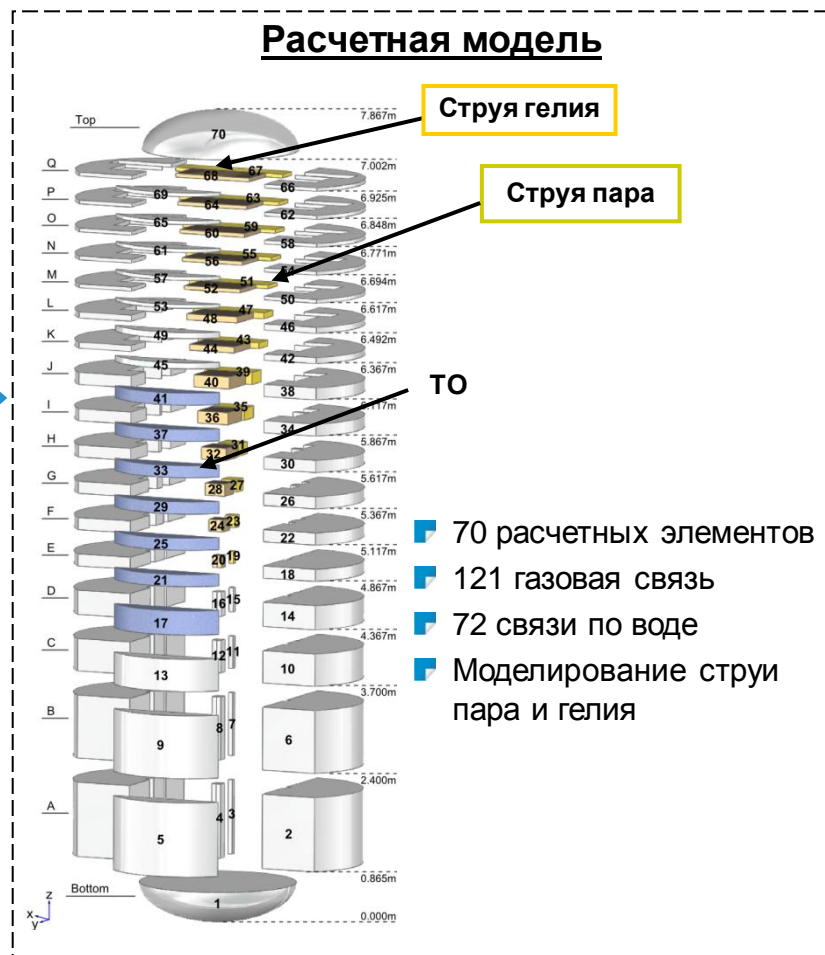
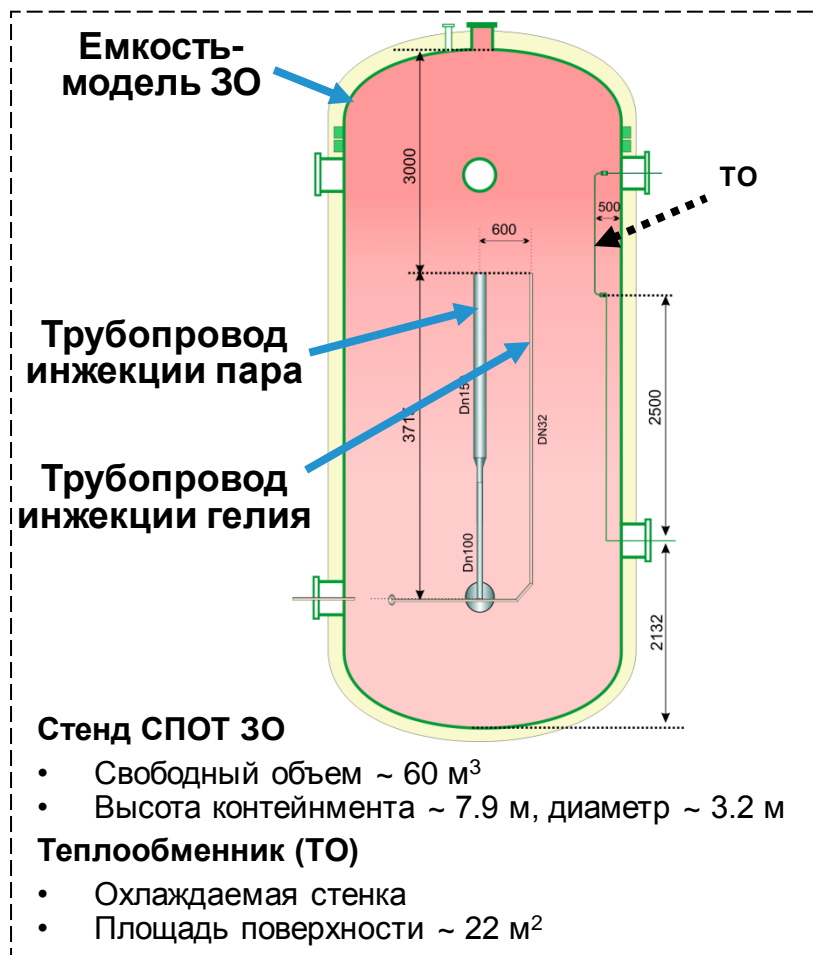
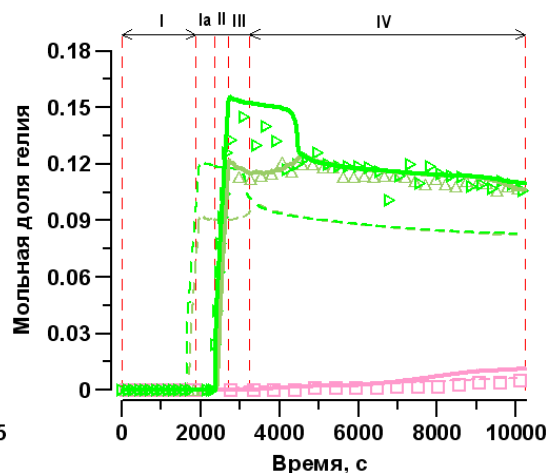
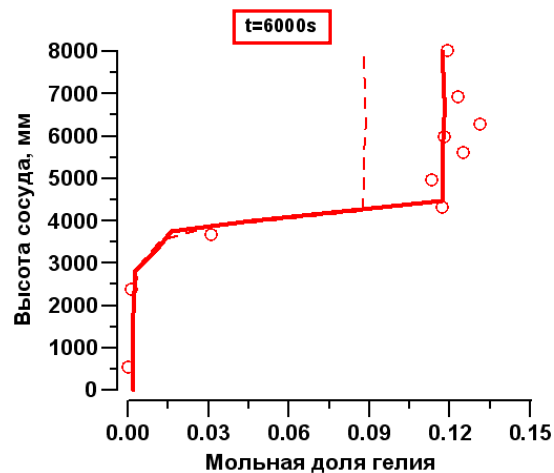
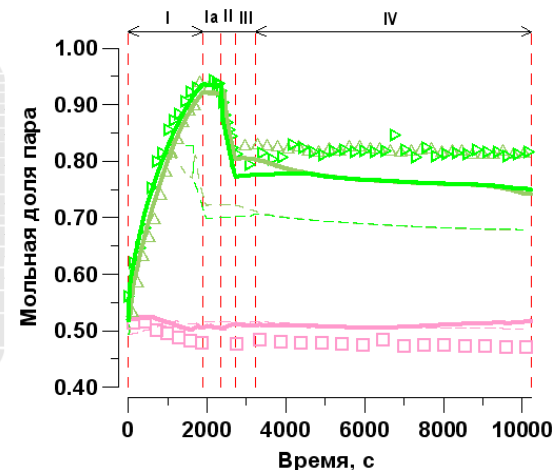
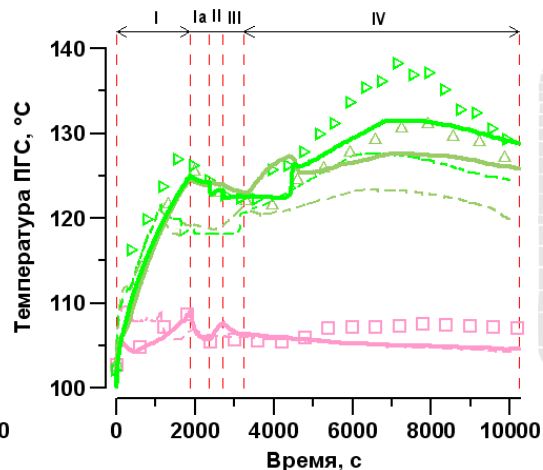
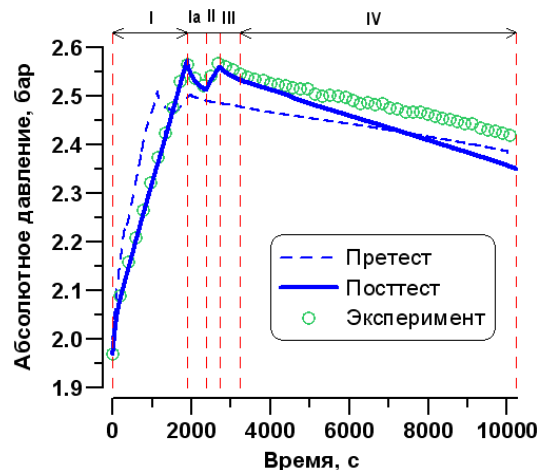


Схема стенда СПОТ 30 и расчетная модель



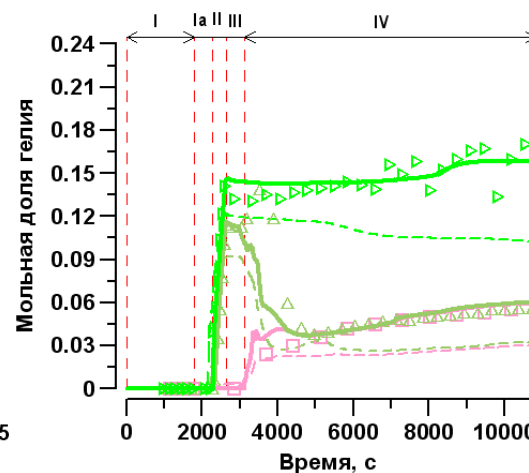
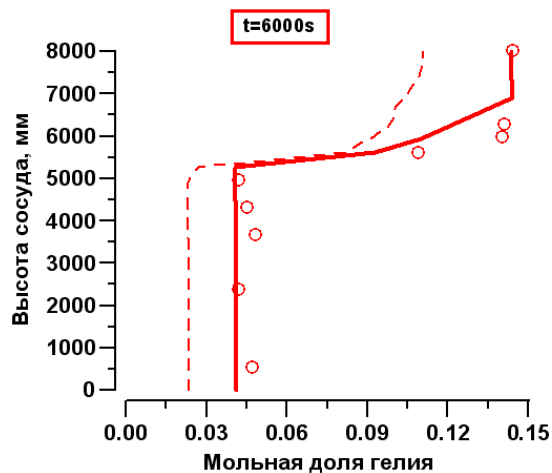
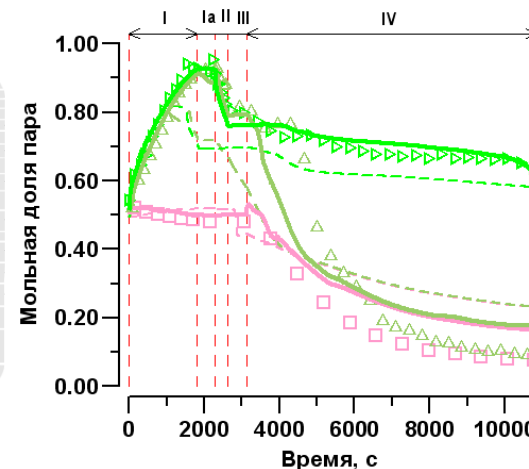
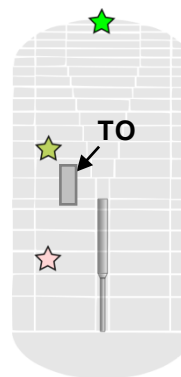
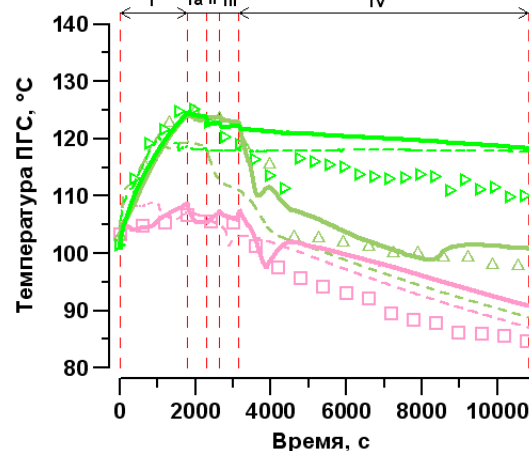
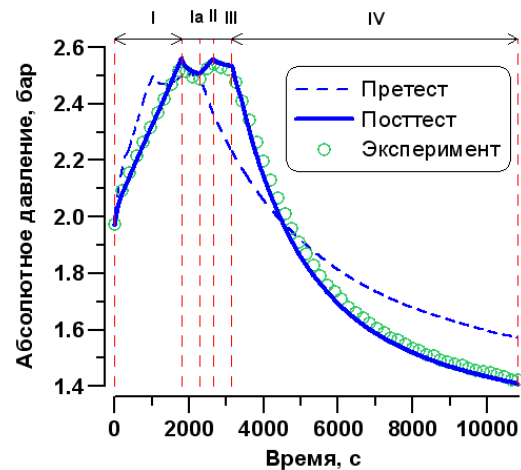
Результаты моделирования работы ПАР на стенде PANDA



Максимальные отклонения расчетных и экспериментальных параметров:

- $\delta P = 2 \% (\pm 3,5...7 \%)$
- $\delta T = 8 \% (\pm 7...20 \%)$
- $\delta n(\text{He}) = 5 \% (16 \%)$
- $\delta n(\text{пар}) = 10 \% (16 \%)$

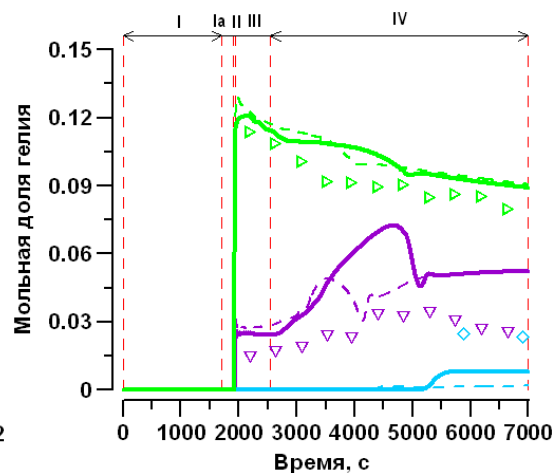
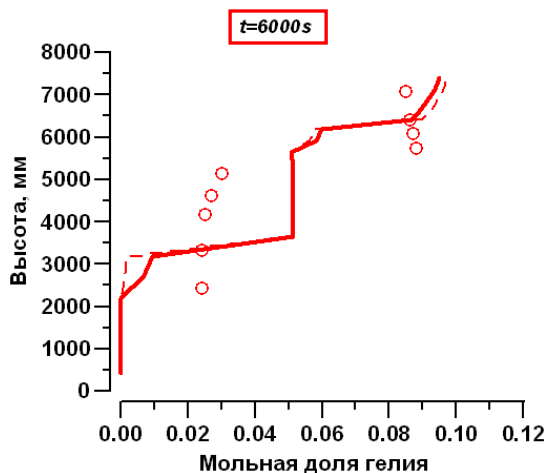
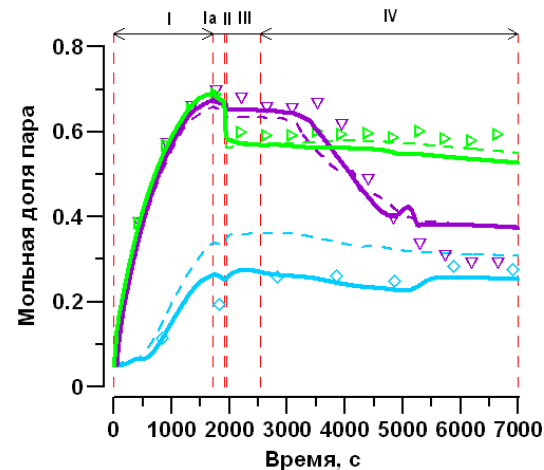
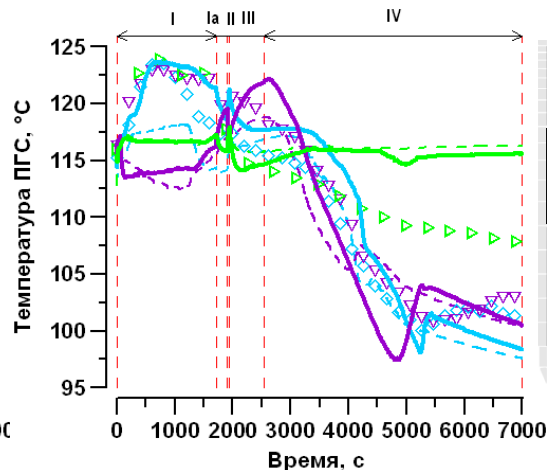
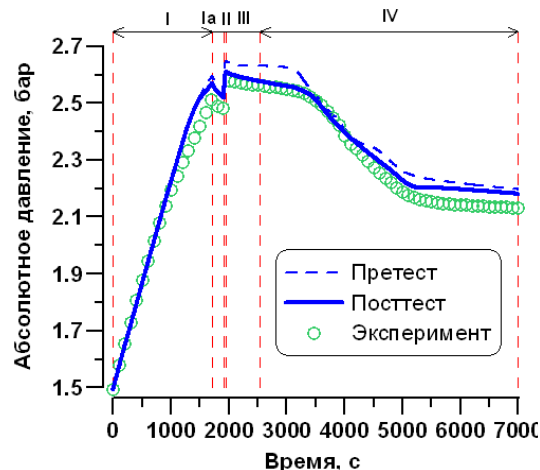
Результаты моделирования работы ТО на стенде PANDA



Максимальные отклонения расчетных и экспериментальных параметров:

- $\delta P = 4 \% (\pm 3,5...7 \%)$
- $\delta T = 11 \% (\pm 20 \%)$
- $\delta n(\text{He}) = 8 \% (16 \%)$
- $\delta n(\text{пар}) = 10 \% (16 \%)$

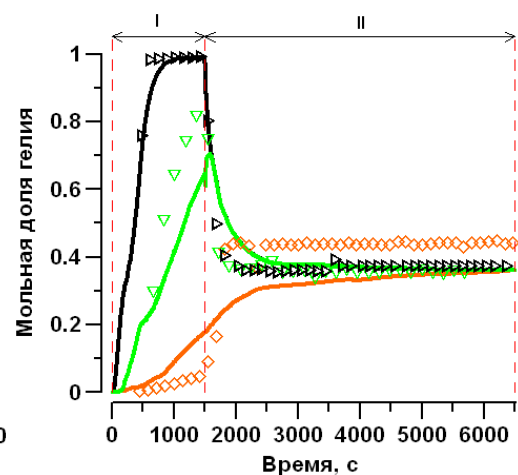
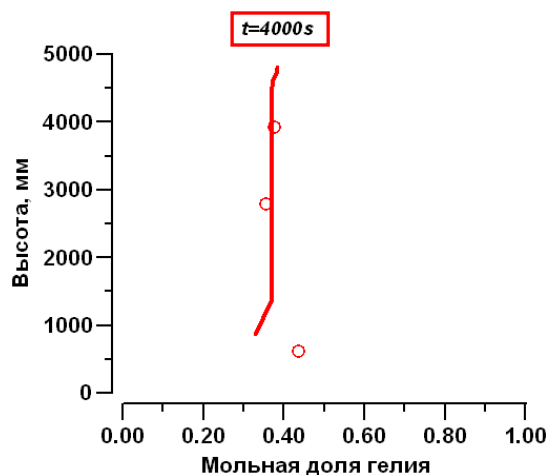
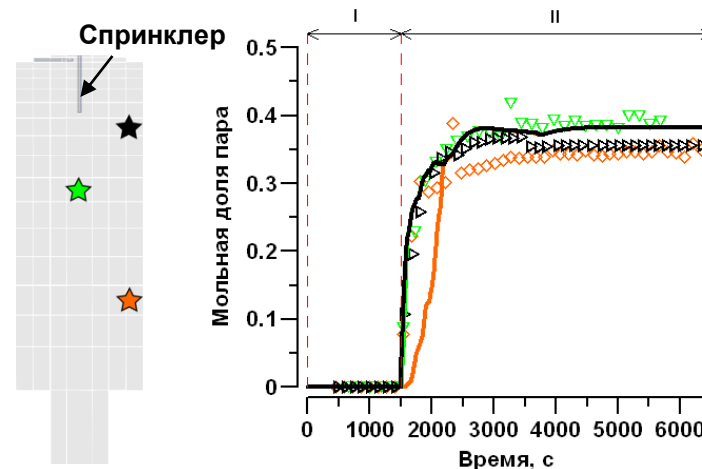
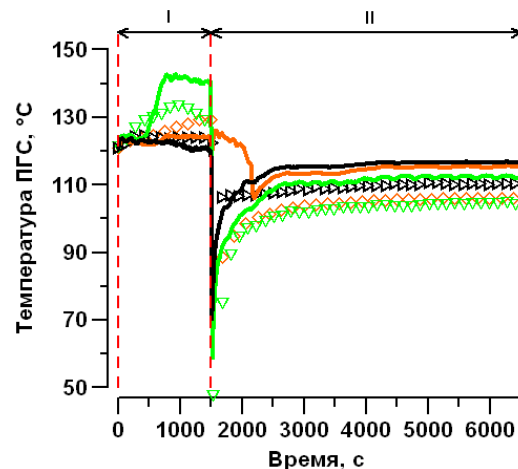
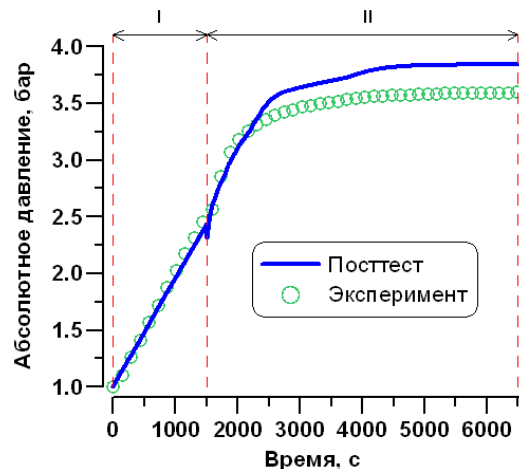
Результаты моделирования работы ТО на стенде MISTRA



Максимальные отклонения расчетных и экспериментальных параметров:

- $\delta P = 5 \% (\pm 7...14 \%)$
- $\delta T = 15 \% (\pm 20 \%)$
- $\delta n(\text{He}) = 3 \% (16 \%)$
- $\delta n(\text{пар}) = 15 \% (16 \%)$

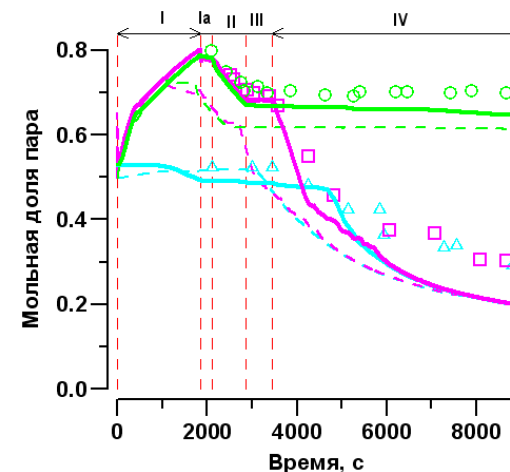
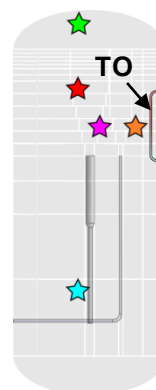
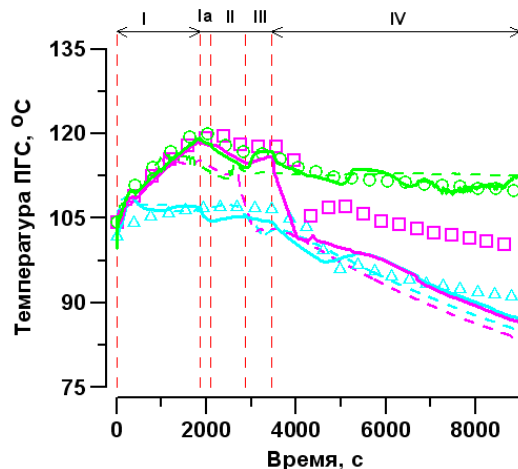
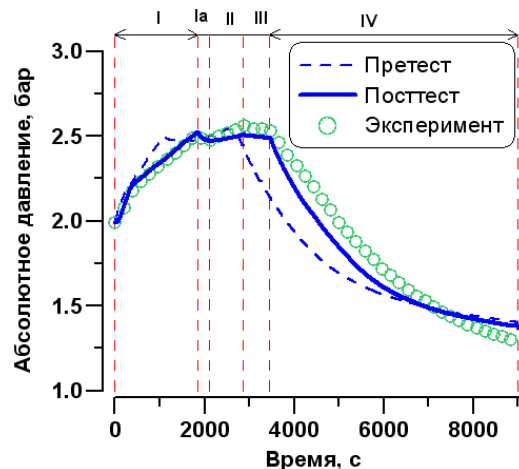
Результаты моделирования спринклера на стенде TOSQAN



Максимальные отклонения расчетных и экспериментальных параметров:

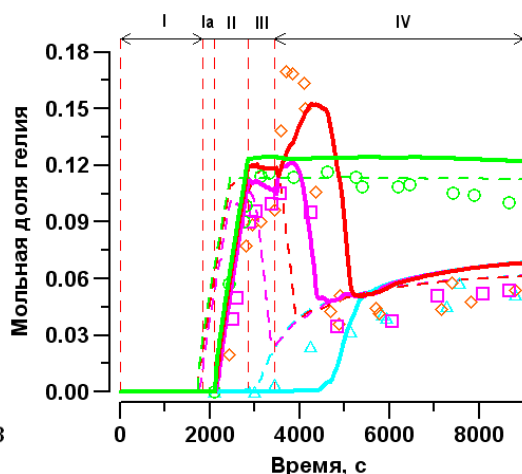
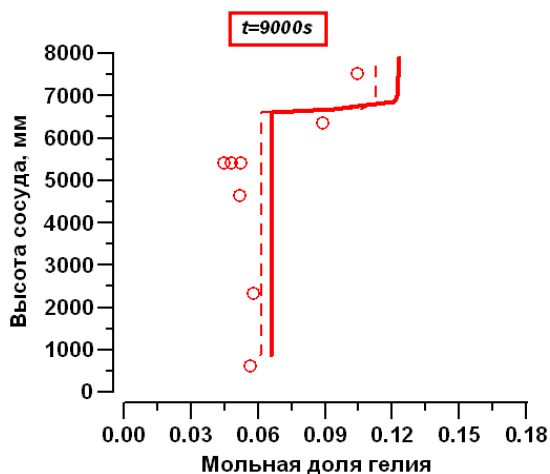
- $\delta P = 14 \% (\pm 7...14 \%)$
- $\delta T = 9 \% (\pm 20 \%)$
- $\delta n(\text{He}) = 15 \% (16 \%)$
- $\delta n(\text{пар}) = 25 \% (16 \%)$

Результаты моделирования работы ТО на стенде СПОТ



Максимальные отклонения расчетных и экспериментальных параметров:

- $\delta P = 9 \% (\pm 7 \dots 14 \%)$
- $\delta T = 16 \% (\pm 20 \%)$
- $\delta n(\text{He}) = 4 \% (16 \%)$
- $\delta n(\text{пар}) = 10 \% (16 \%)$





Выводы

1. В рамках международного проекта ERCOSAM-SAMARA выполнены экспериментальные исследования стратификации легкого газа и влияния на стратификацию работы теплообменника системы отвода тепла из защитной оболочки на полномасштабном стенде СПОТ 30.
2. По результатам экспериментальных исследований получена стратификация легкого газа по высоте модели 30. Работа теплообменника не обеспечивает полную гомогенизацию атмосферы, выше теплообменника стратифицированный слой легкого газа сохраняется.
3. Выполнено численное моделирование экспериментов на установках СПОТ, PANDA, MISTRA, TOSQAN с использованием расчетного кода КУПОЛ-МТ. Результаты численного анализа подтверждаются экспериментальными данными. Работа теплообменника и рекомбинатора не приводит к полному перемешиванию атмосферы в модели 30, спринклер обеспечивает разрушение стратифицированного слоя.
4. Полученные в рамках проекта экспериментальные данные являются ценным верификационным материалом для LP и CFD кодов.
5. Планируется проведение дальнейших исследований, направленных на исключение образования высоких концентраций водорода в объеме 30, с изучением совместной работы рекомбинаторов и теплообменников .