



Международная конференция
XVII Забабахинские научные чтения
РФЯЦ – ВНИИТФ имени академика Е. И. Забабахина

«Моделирование процессов перемешивания газовой среды в присутствии пристеночной конденсации в задачах анализа водородной безопасности АЭС при тяжелой аварии»

Канаев А.А.

ИБРАЭ, 2025



Содержание

- **Роль конденсации в теплогидравлике защитной оболочки АЭС при тяжелой аварии**
- **Обзор экспериментальной программы исследования теплогидравлики ЗО ERCOSAM-SAMARA**
- **Численный анализ результатов эксперимента с конденсацией в крупномасштабной установке PANDA с целью валидации модели пристенной конденсации в присутствии неконденсируемых газов**



Поверхностная конденсация - явление высокого приоритета в теплогидравлике защитной оболочки АЭС

Давление

- Конденсация пара на стенках — один из основных механизмов удаления пара из атмосферы оболочки после аварии с потерей теплоносителя (LOCA)
- Это способствует снижению давления в оболочке, помогая удержать его в проектных пределах

Температура

- При конденсации происходит передача теплоты от пара к стенкам и конструкциям оболочки

Распределение водорода

- Распределение и стратификация водорода зависят от конденсации, потому что:
 - При конденсации удаляется пар, что изменяет локальный состав газов.
 - Изменения плотности и температуры газов влияют на естественную конвекцию, перемешивание и образование водородных карманов.

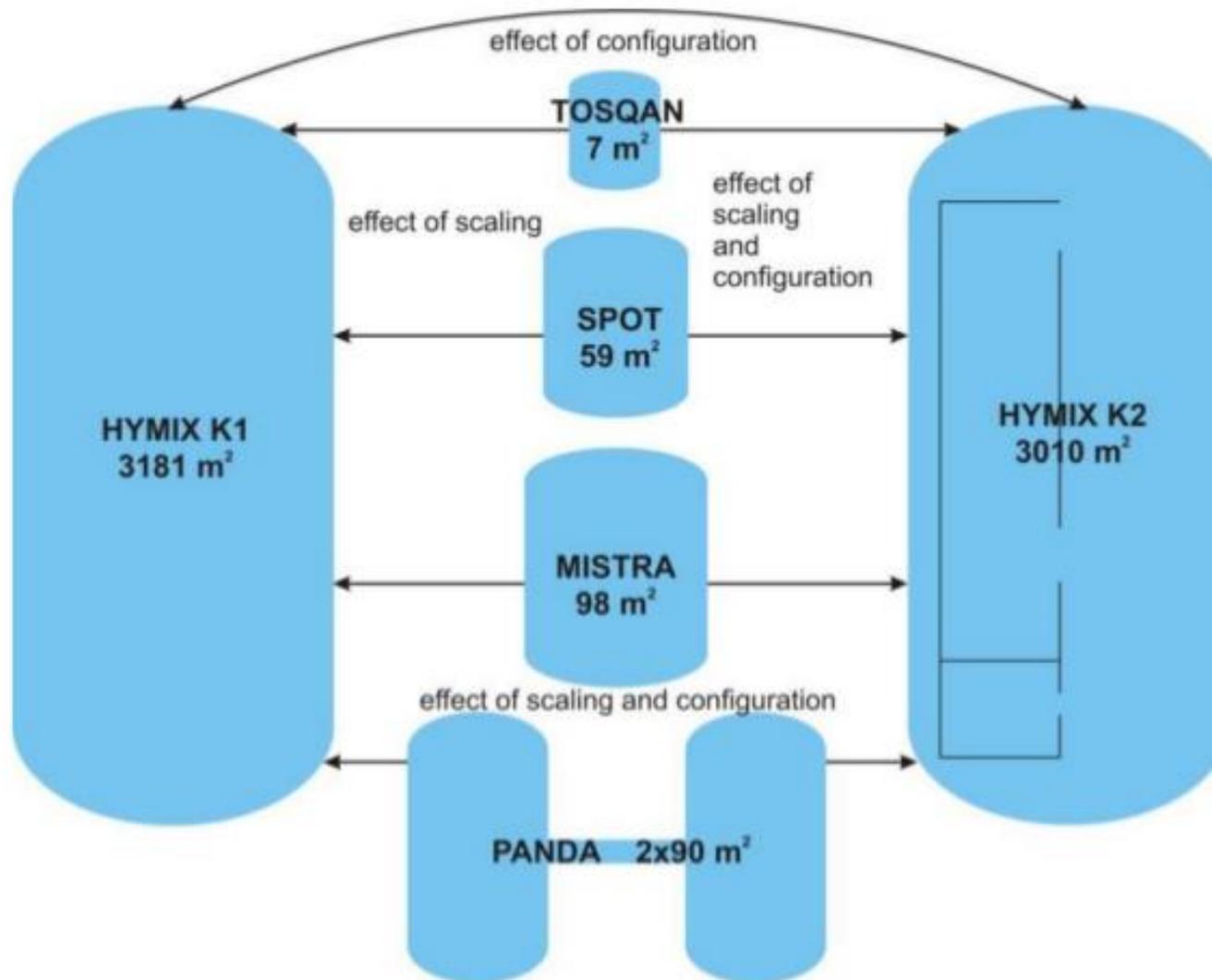


Таблица идентификации и ранжирования физических процессов (PIRT)* для 30 АЭС с ВВЭР в фазе разрушения активной зоны при тяжелой аварии

Process	Phenomena	Rank		
		Pressure	Temperature	Composition
Structure: <i>surface</i> (solid and film)	sensible heat transfer			
	spray/aerosol deposition or impingement	L	L-M	L-M
	free convection	L	L	L
	forced/mixed convection	L	L-M	L
	radiation (structure to atmosphere)	L	L-M	L
	radiation (structure to structure)	L	L-M	L
	liquid film resistance	L	L	L
	liquid film advection	L	L	L
	latent heat and mass transfer (condensation/evaporation)			
	free convection	H	H	H
	forced/mixed convection	L	L	L
	transport (film flow)			
	liquid film advection	L-M	L-M	L-M
interfacial shear (film/gas interaction)	L	L	L	

*SOAR on Containment Thermalhydraulics and Hydrogen Distribution (OECD\NEA), 1999

Изучение эффекта масштаба и геометрии в проекте ERCOSAM-SAMARA



Установка PANDA (PSI)

Расположение термомпар и капилляров в Сосуде 1 и Сосуде 2

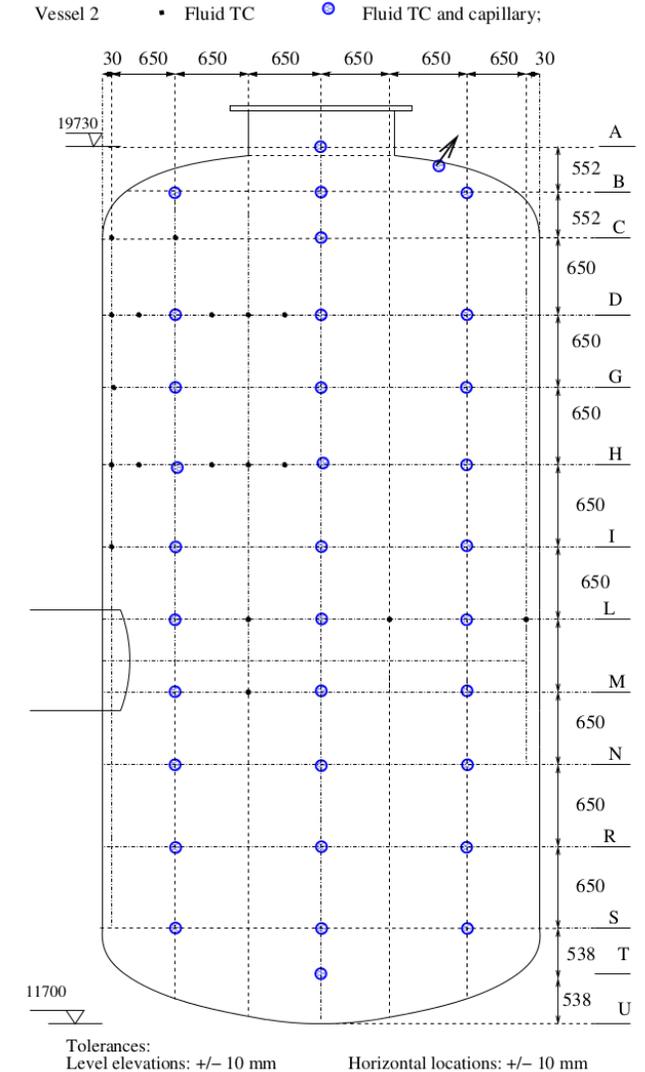
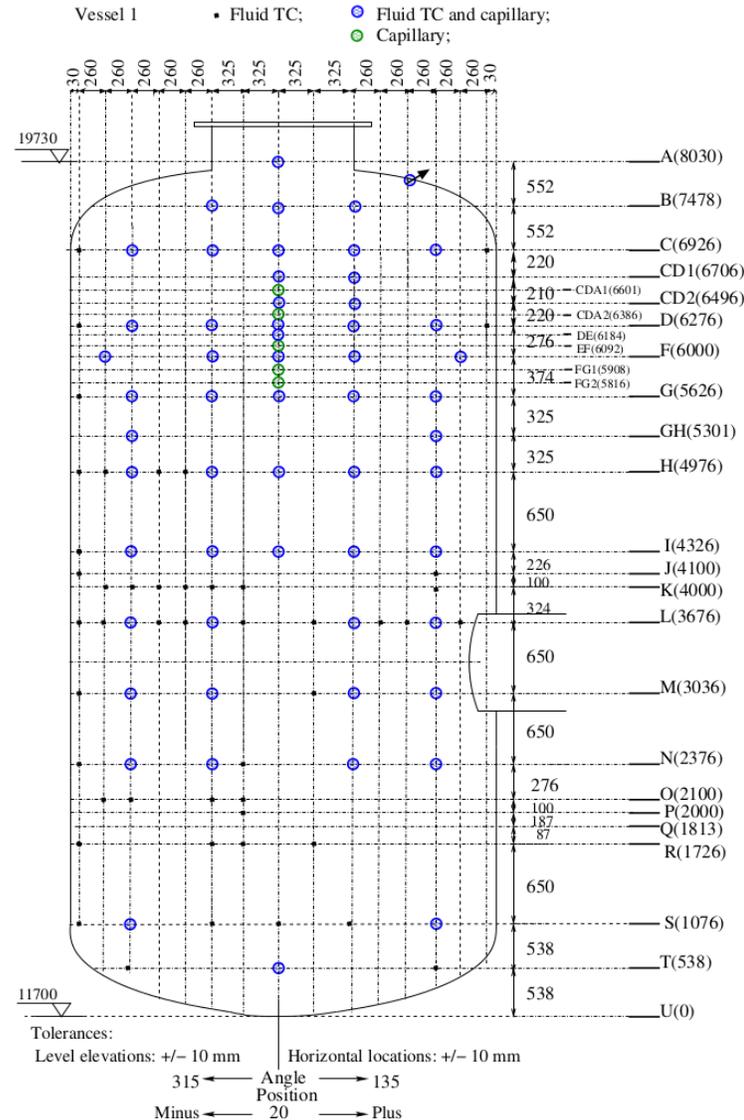
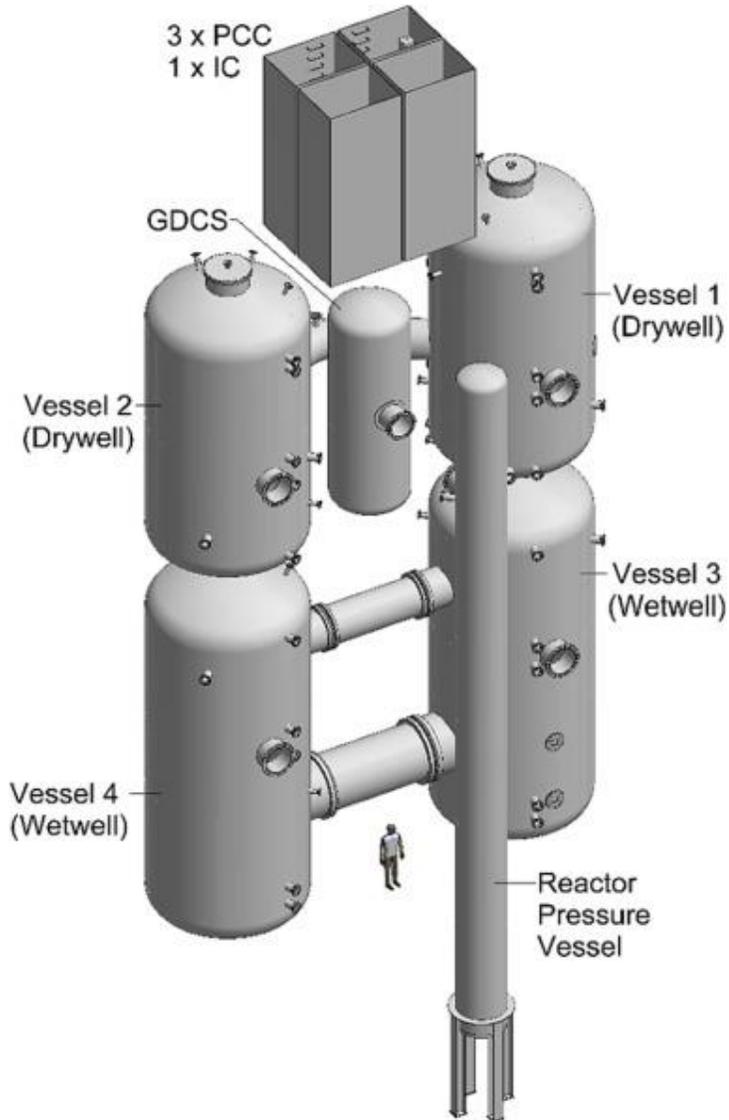
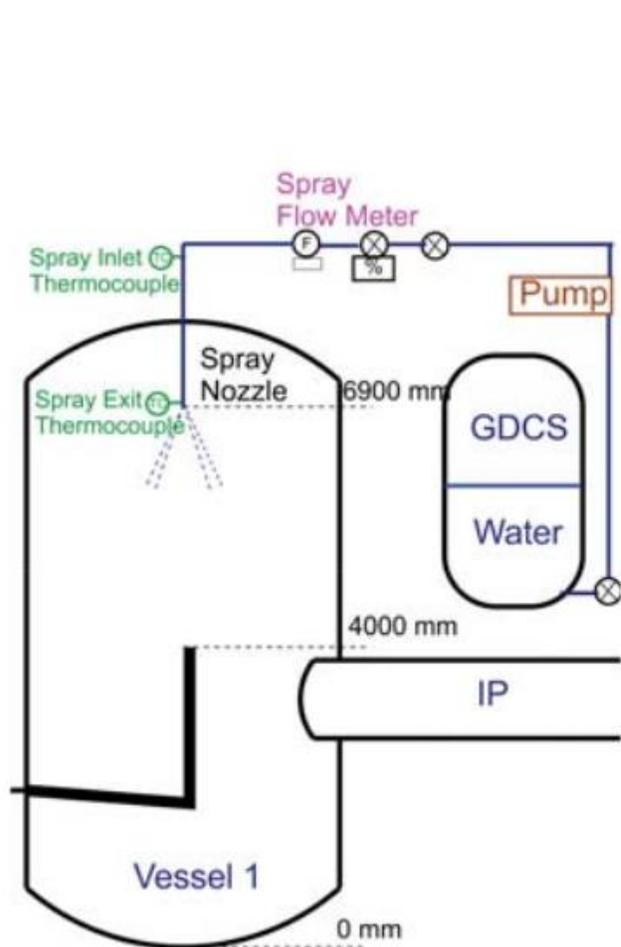
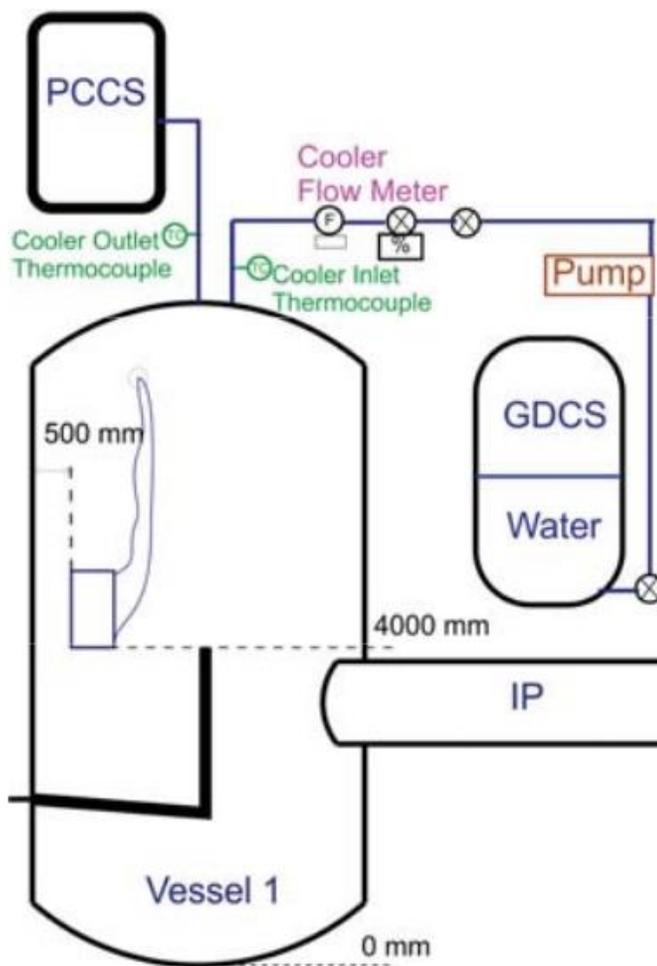


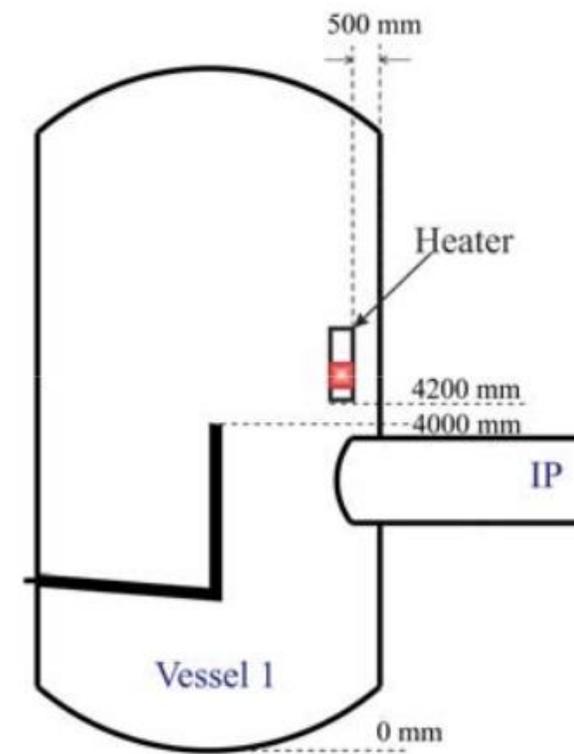
Схема установки PANDA в экспериментах ERCOSAM-SAMARA PE1-5



(a) - PE1 and PE2



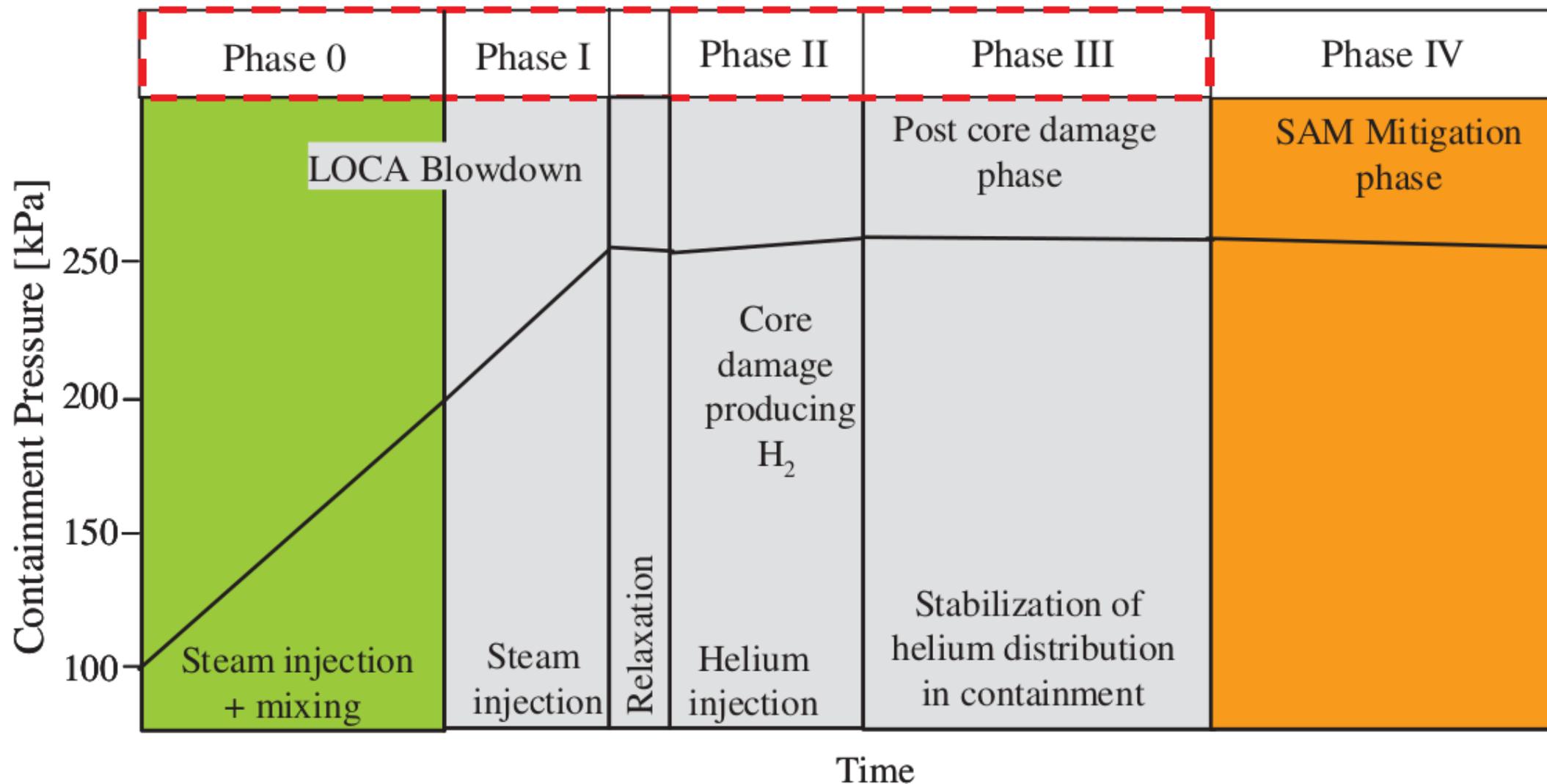
(b) – PE3 and PE5



(c) – PE4



Модифицированный сценарий экспериментов на установке PANDA



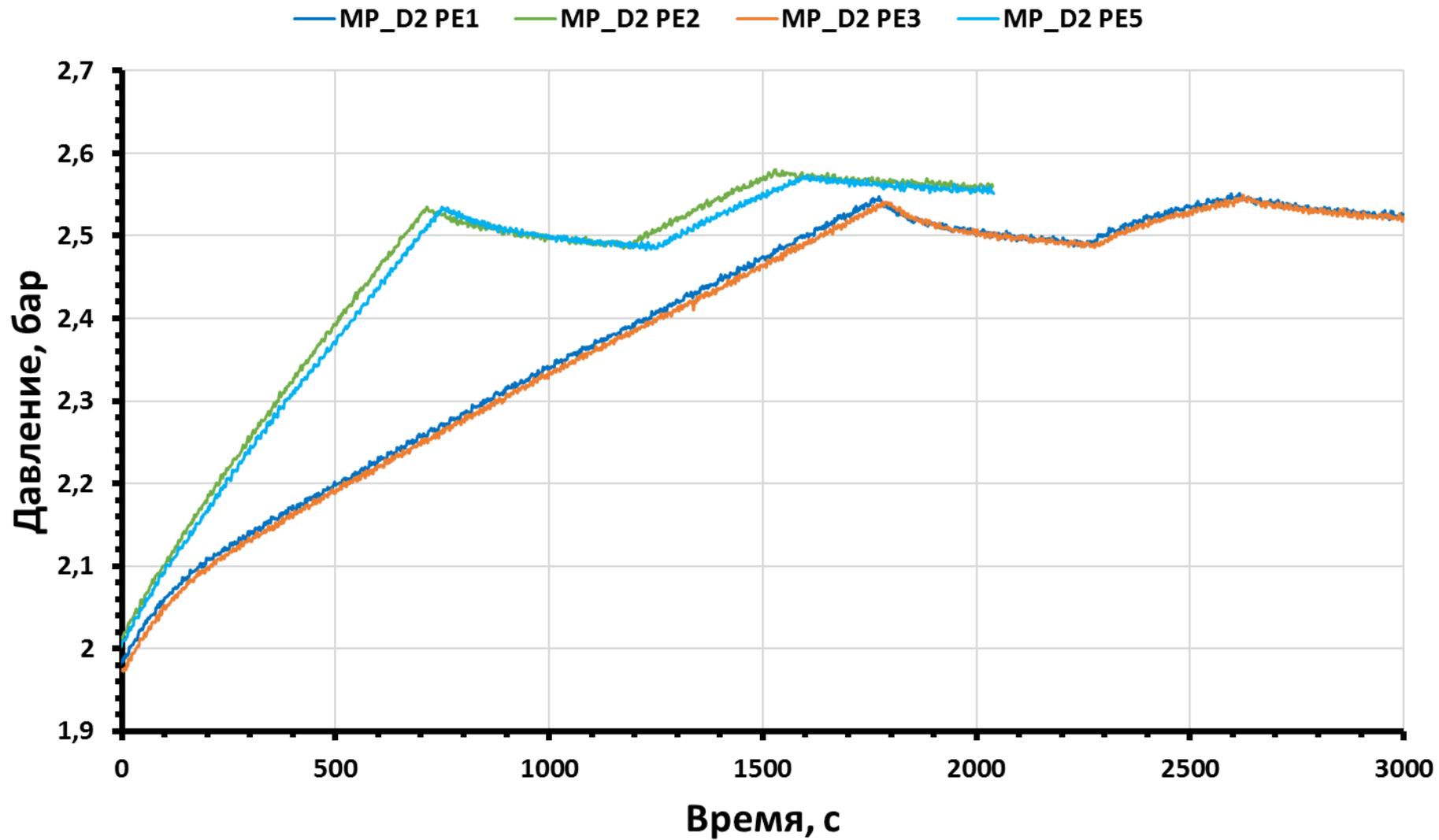


Начальные и граничные условия в экспериментах на установке PANDA

Test	PE1	PE2	PE3	PE4	PE5
Safety device	Full cone spray	Hollow cone spray	Cooler	Heater	Cooler
Wall condensation	Yes	No	Yes	Yes	No
Initial pressure [kPa]	198	201	198	194	201
Initial wall temperature [°C]	~103	~128	~103	~103	~128
Phase I					
Steam mass flow rate [g/s]	73.4 ±1.5	72.6 ±1.3	73.4 ±1.2	73.4 ±1.4	72.7 ±1.2
Steam injection time [s]	1774	714	1794	1882	751
Relaxation time [s]	486	476	486	478	503
Phase II					
Helium mass flow rate [g/s]	5.33 ±0.01	5.33 ±0.03	5.32 ±0.04	5.33 ±0.05	5.33 ±0.01
Helium injection time [s]	352	344	350	350	344
Phase III					
Relaxation time [s]	512	502	498	524	500
Phase IV					
Activation time [s]	2030	2062	7710	7200	7262
Water Flow rate [kg/s]	1.03 ±0.01	0.876 ±0.01	0.504 ±0.002	-	0.500 ±0.007
Water temperature [°C]	30.5 ±0.04	30.7 ±0.04	31.18 ±0.18	-	30.9 ±0.1
Power [kW]	-	-	-	1 to 10	-



Динамика давления на Этапах 1-4 в экспериментах на установке PANDA



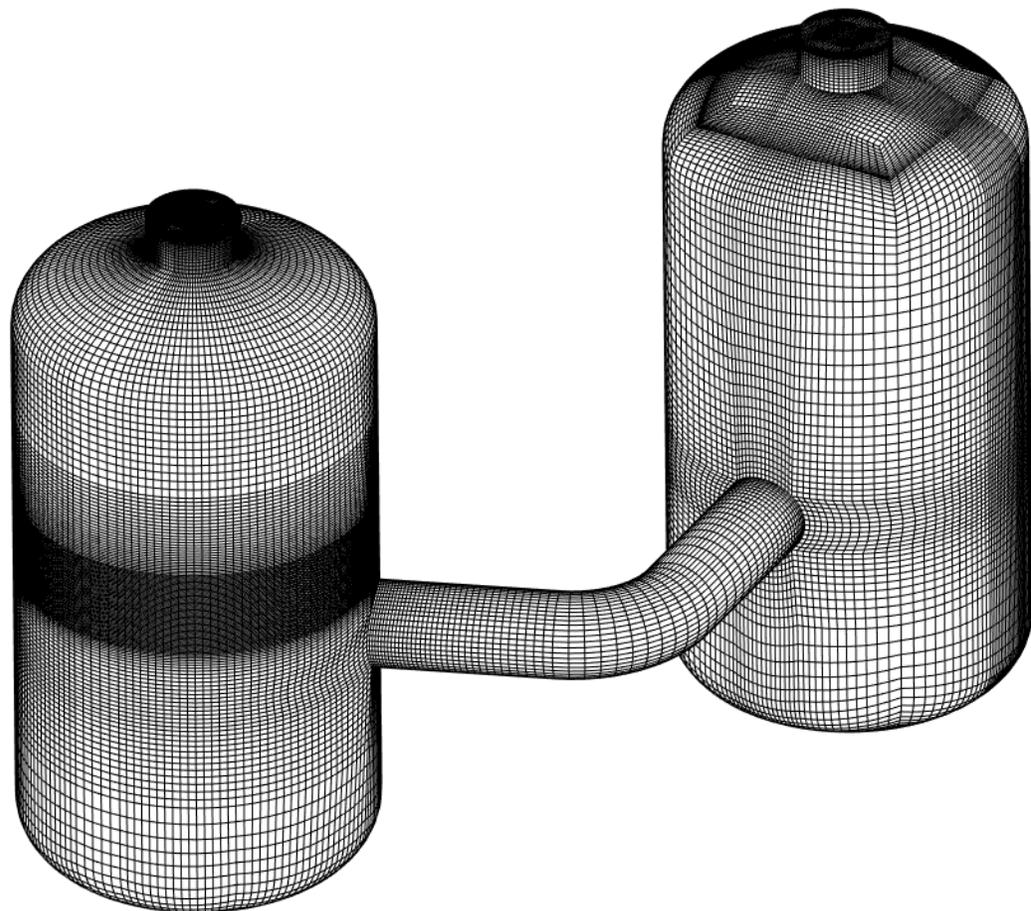


Расчетная модель

Решаемые уравнения	Нестационарные уравнения Навье-Стокса для многокомпонентной среды в приближении низких чисел Маха
Модель турбулентности	Неявный метод крупных вихрей (MILES/ILES)
Модель плавучести	Модель плавучести на основе вариации плотности
Модель конденсации	Модель диффузионного слоя в приближении «тонкой пленки» $j_{i,v} = \frac{M_v}{M} \rho D \frac{\partial \ln(x_{i,g})}{\partial y} \quad P_{v,wall} = P_{sat}(T_{wall}) \quad P_{v,cell} > P_{v,wall}$ $Q_{i,diff} = j_{i,v} \cdot \frac{h_v}{M_v} \quad Q_{i,cond} = j_{i,v} \cdot \frac{h_v - h_{water}}{M_v}$
Модель теплового излучения	Модель Росселанда лучистой теплопроводности, с коэффициентом черноты стенок $\epsilon_{wall}=0.8$, и осредненным по Росселанду коэффициентом поглощения водяного пара $k_v=120 \text{ атм}^{-1} \text{ м}^{-1}$
Уравнение состояния	Приближение идеального газа



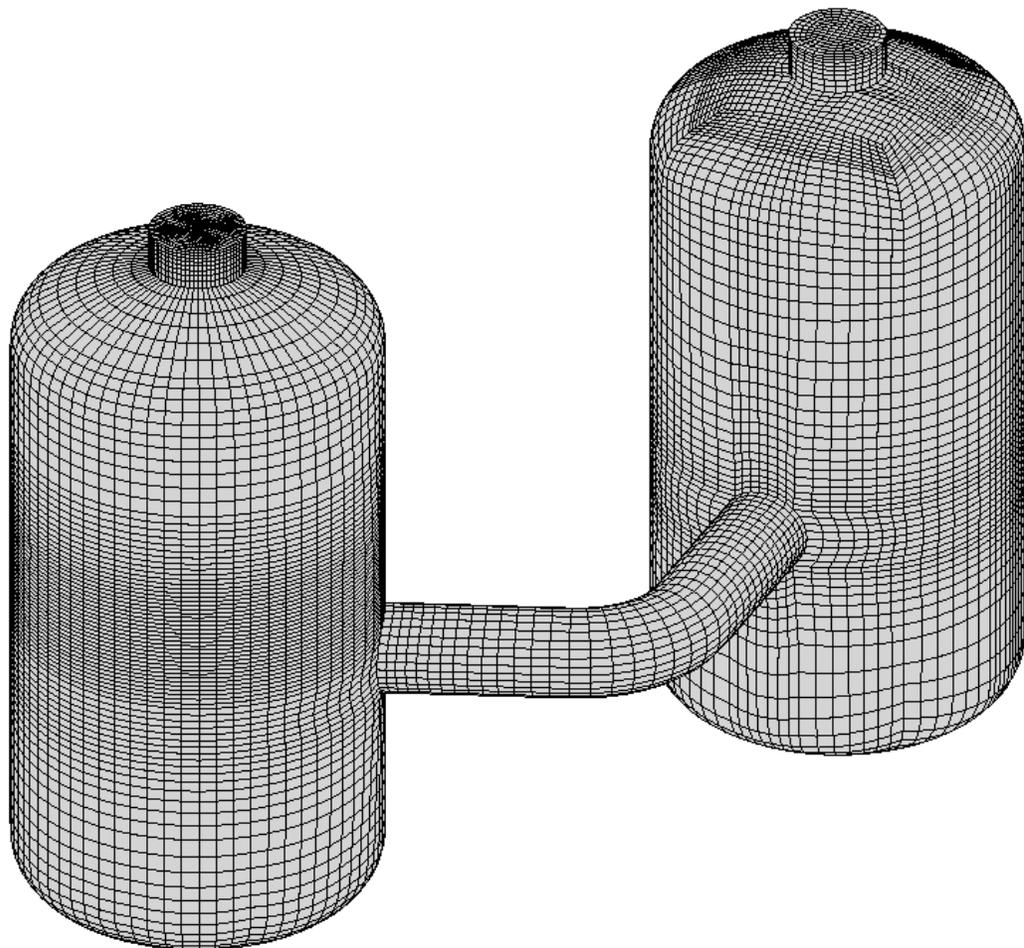
Подробная сеточная модель



Число ячеек в газовой среде	Число ячеек в стенках	Общее число ячеек	Толщина пристеночной ячейки, см
1773046	55900	1828946	1

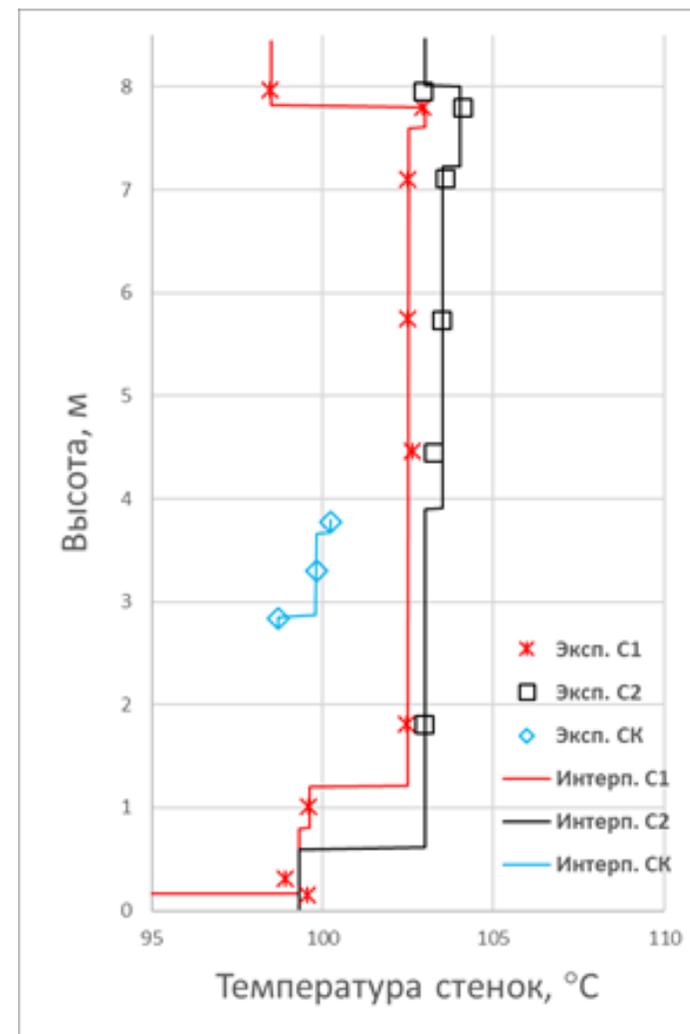
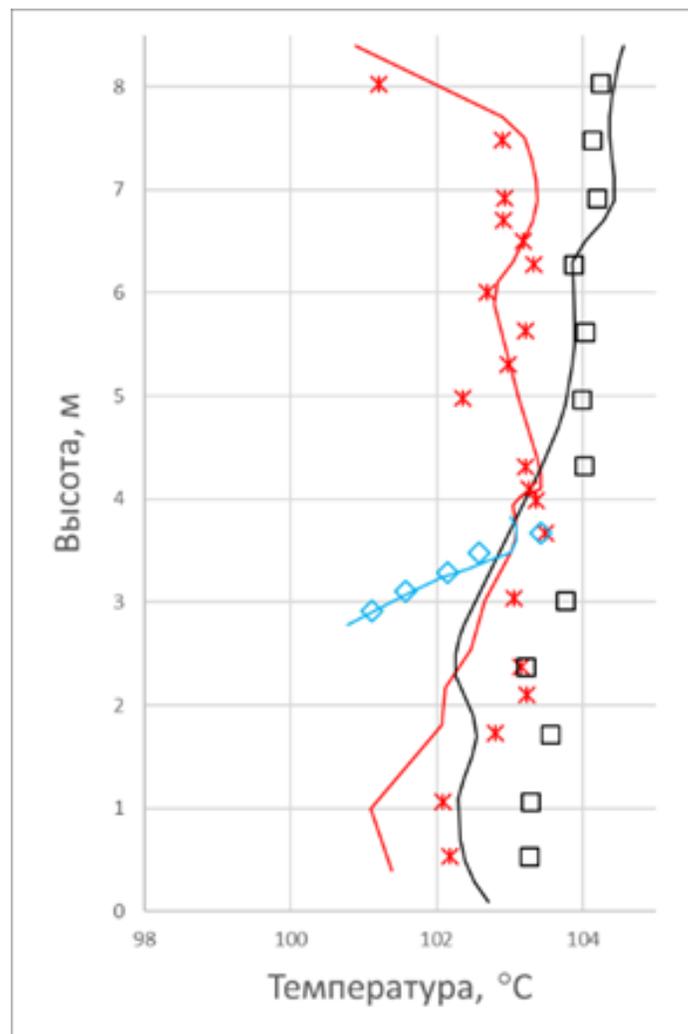
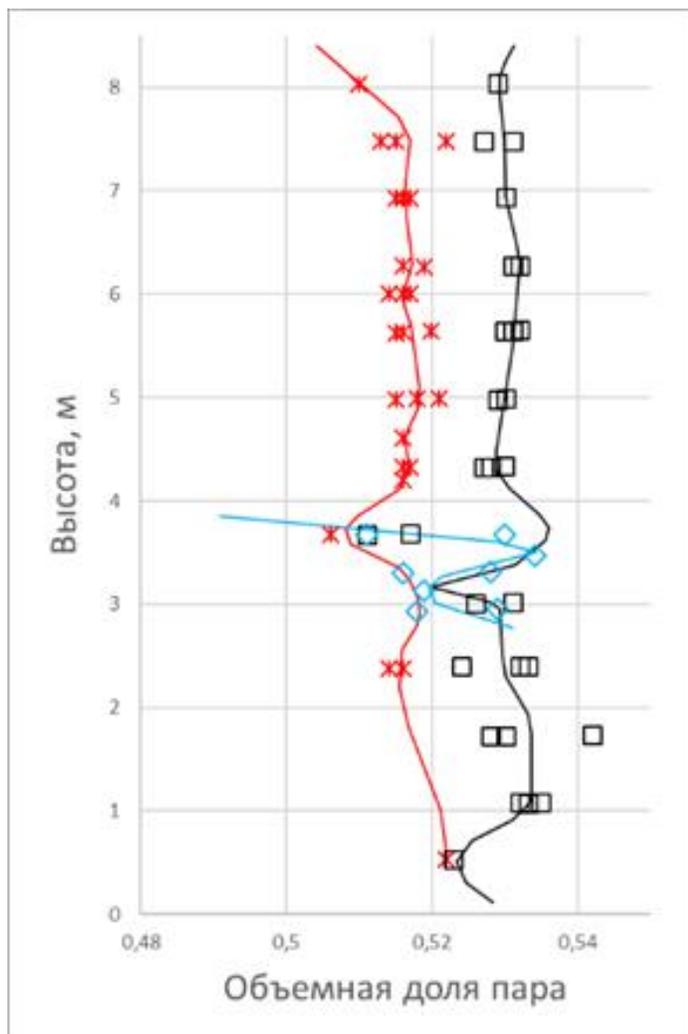


Грубая сеточная модель



Число ячеек в газовой среде	Число ячеек в стенках	Общее число ячеек	Толщина пристеночной ячейки, см
226166	15586	241752	5

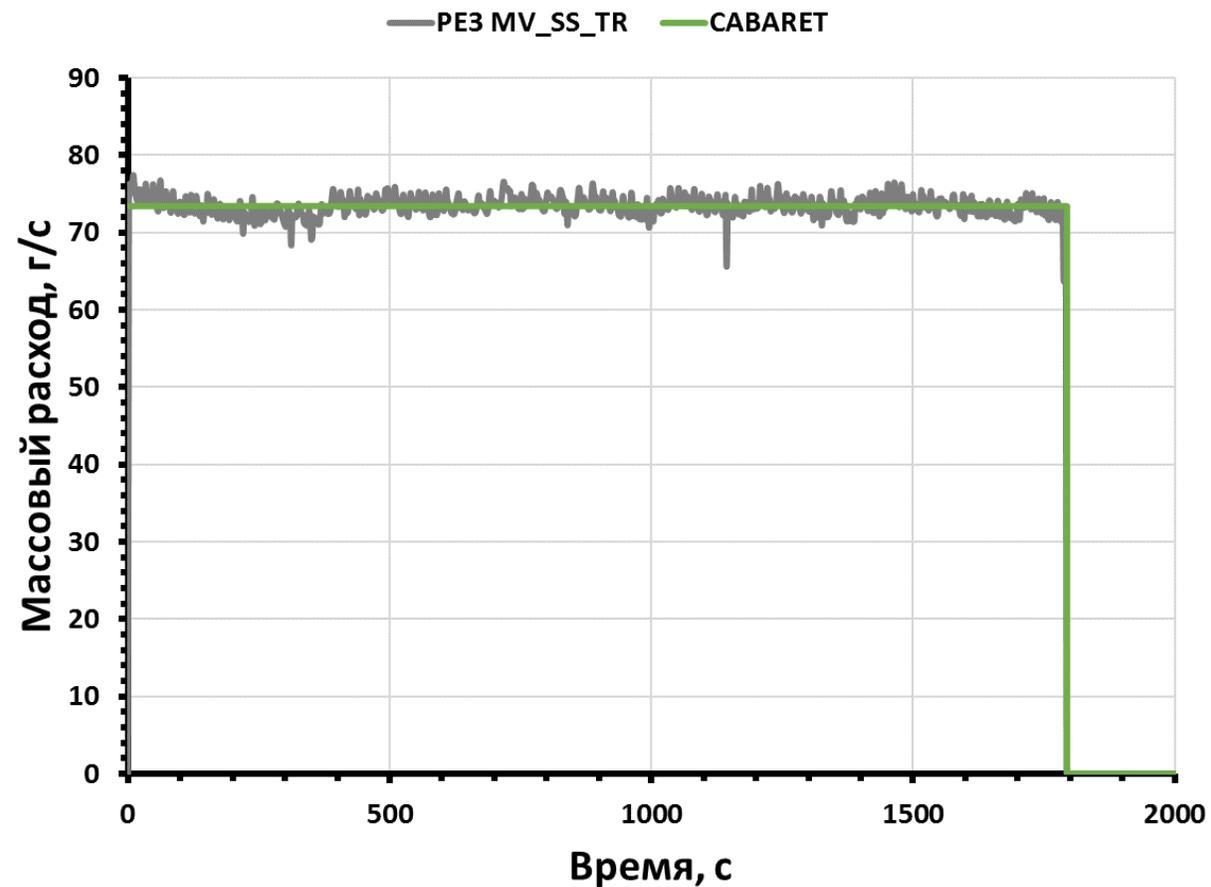
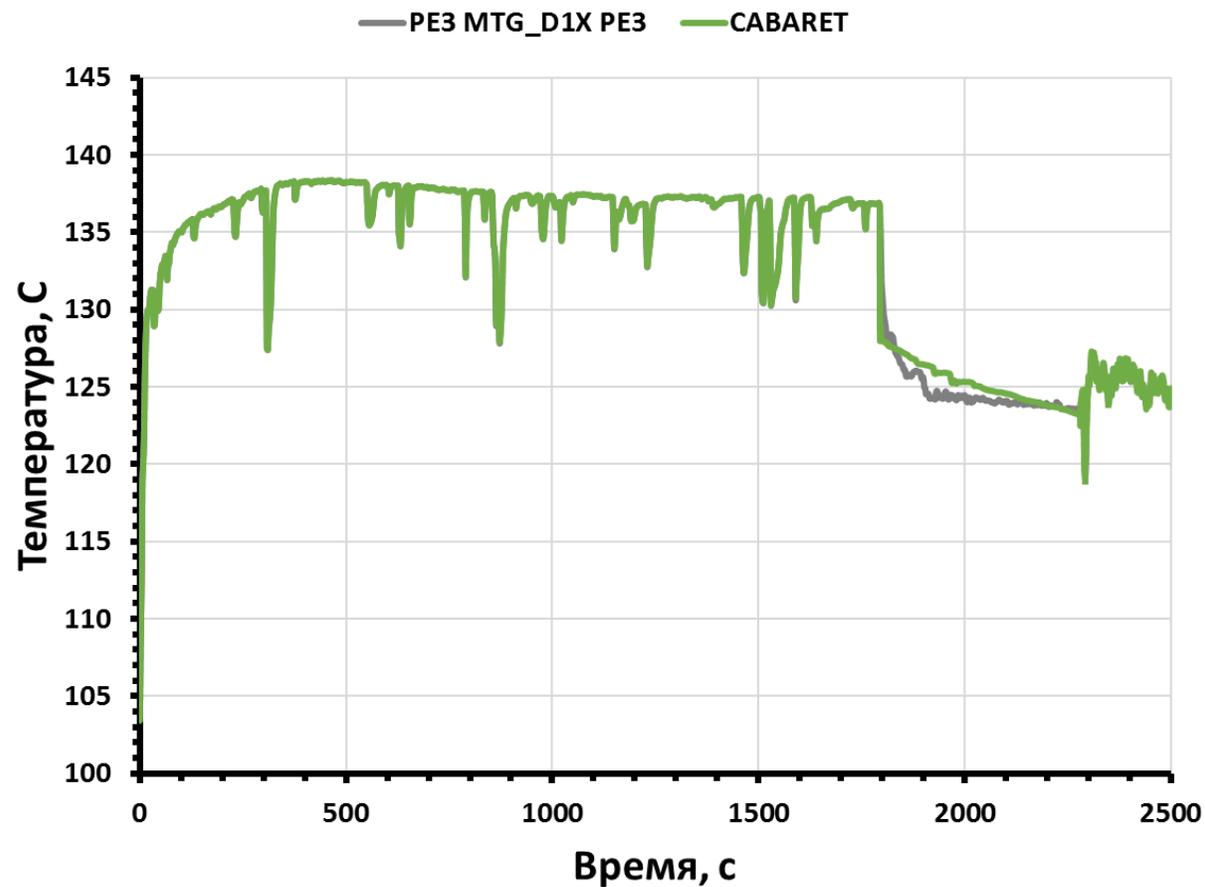
«Реалистичные»* начальные условия



*M. Andreani, M. Sharabi. Post-test calculations for the ERCOSAM tests. ERCOSAM / WP2

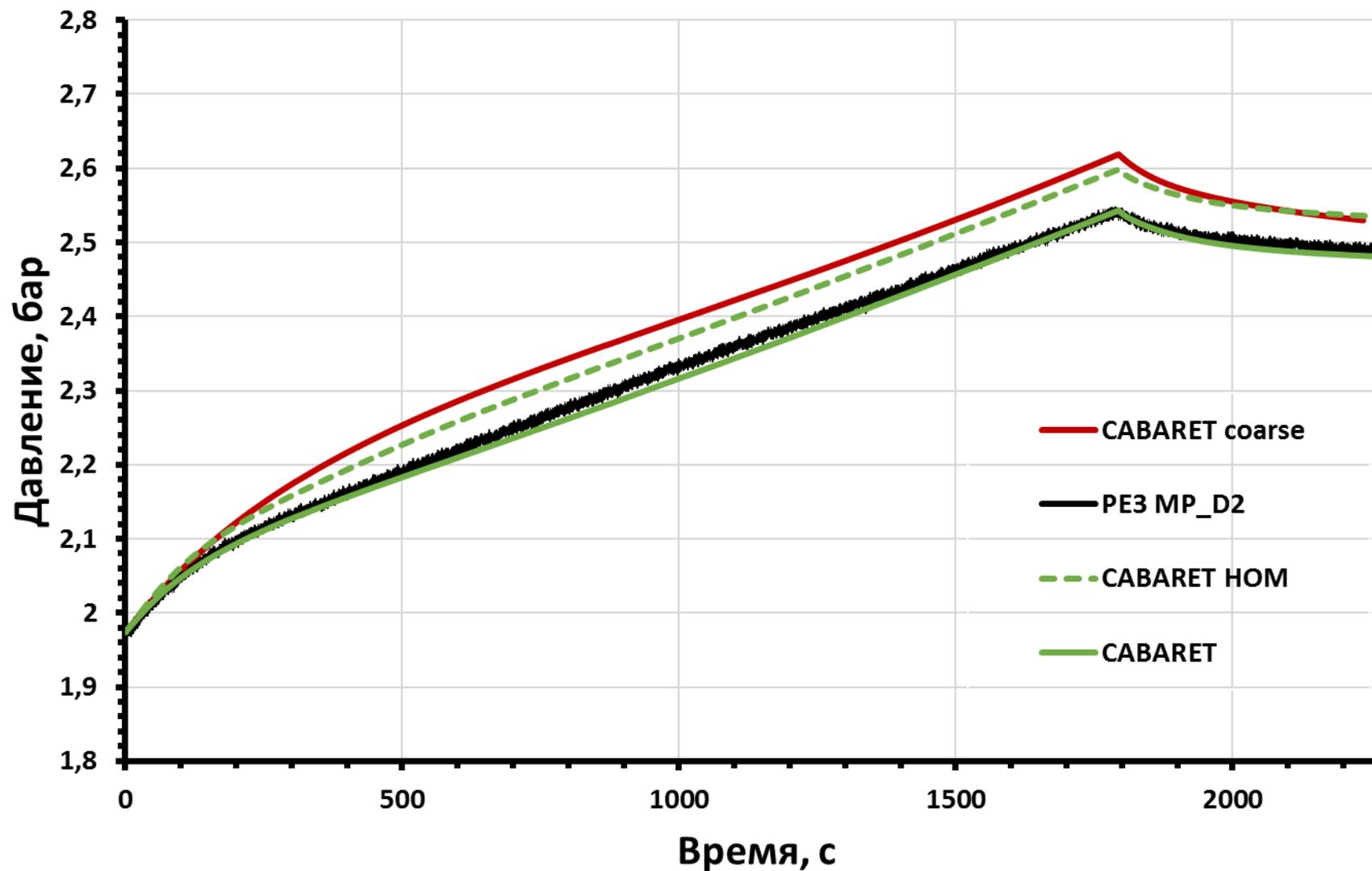


Граничные условия подачи пара в ходе Этапа 1



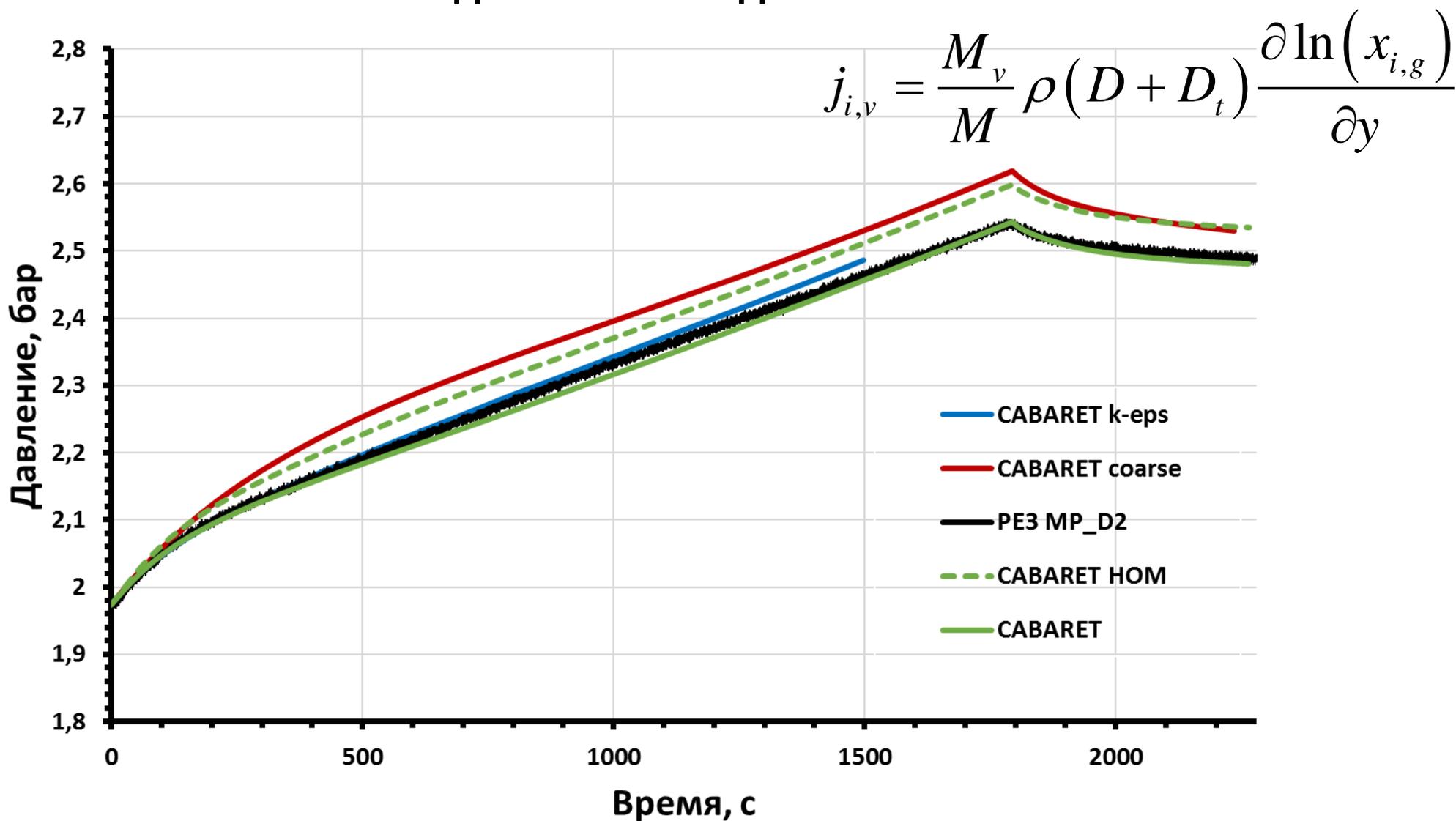


Изменение давления в ходе Этапов 1 и 2

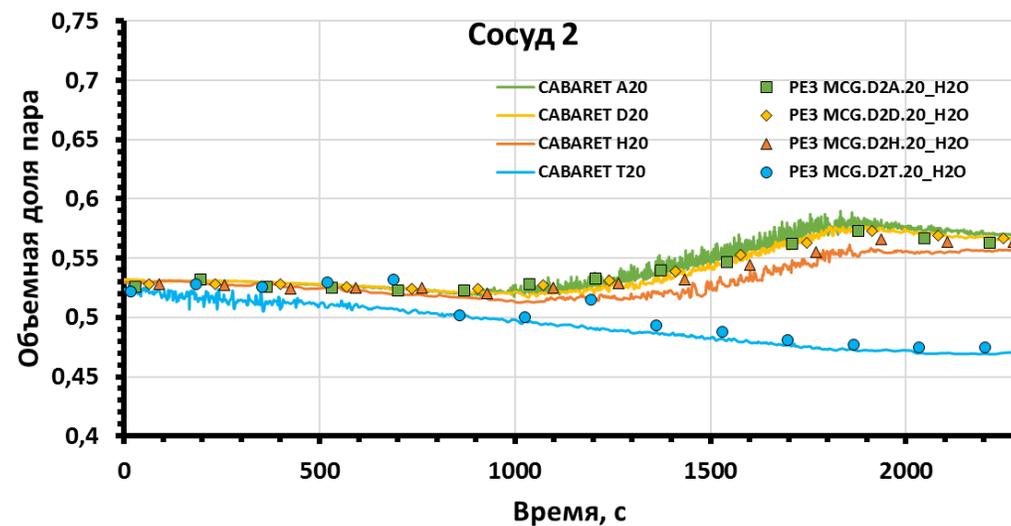
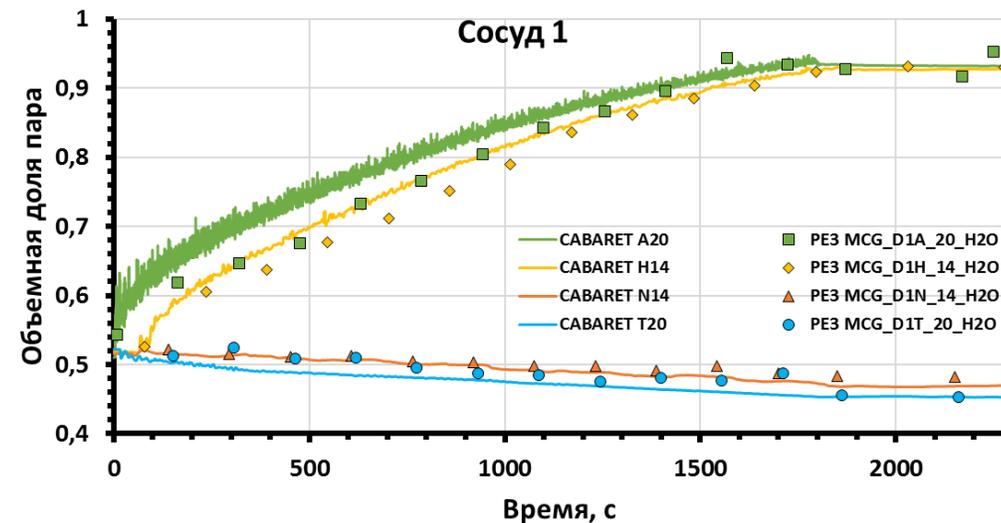
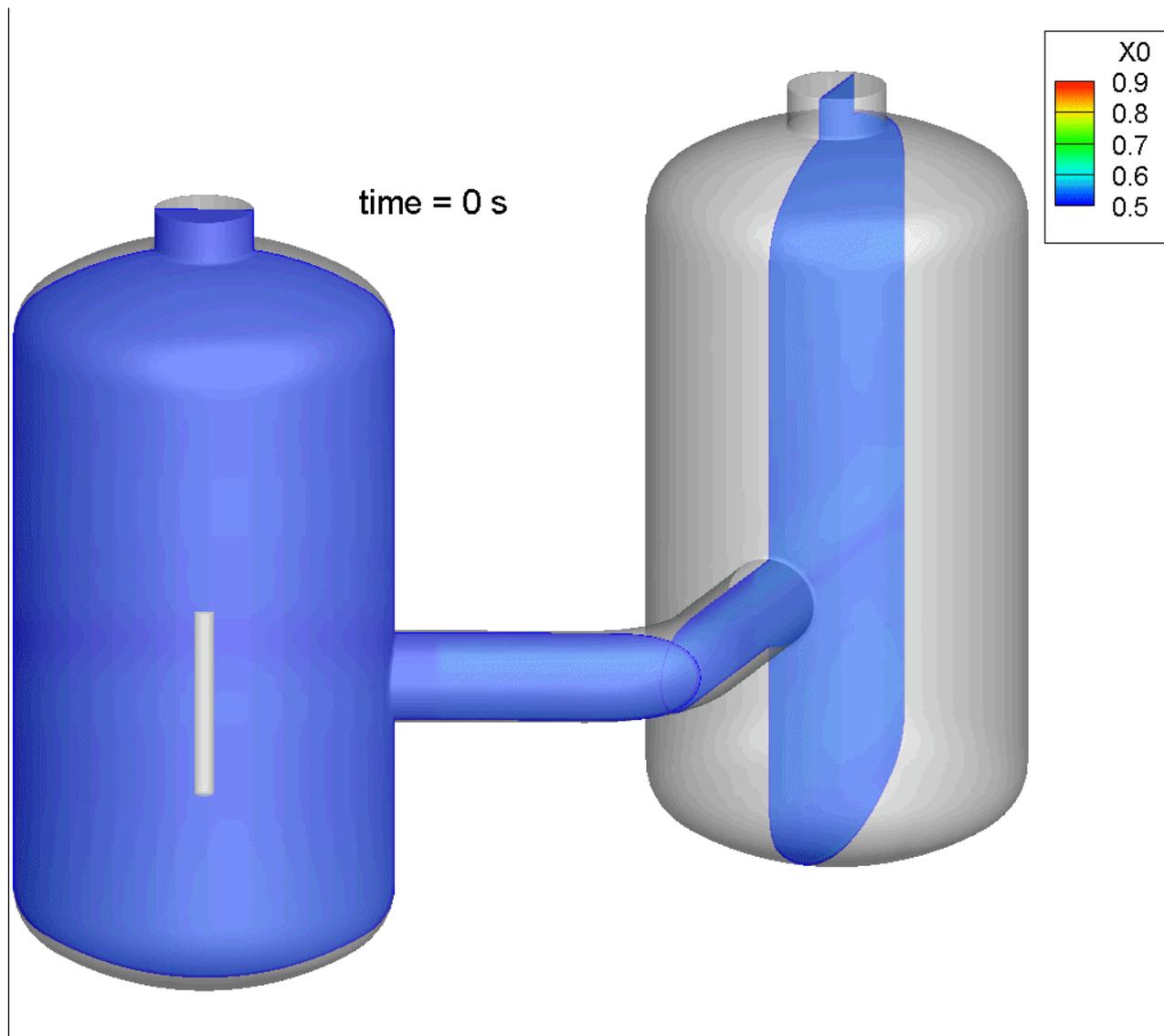




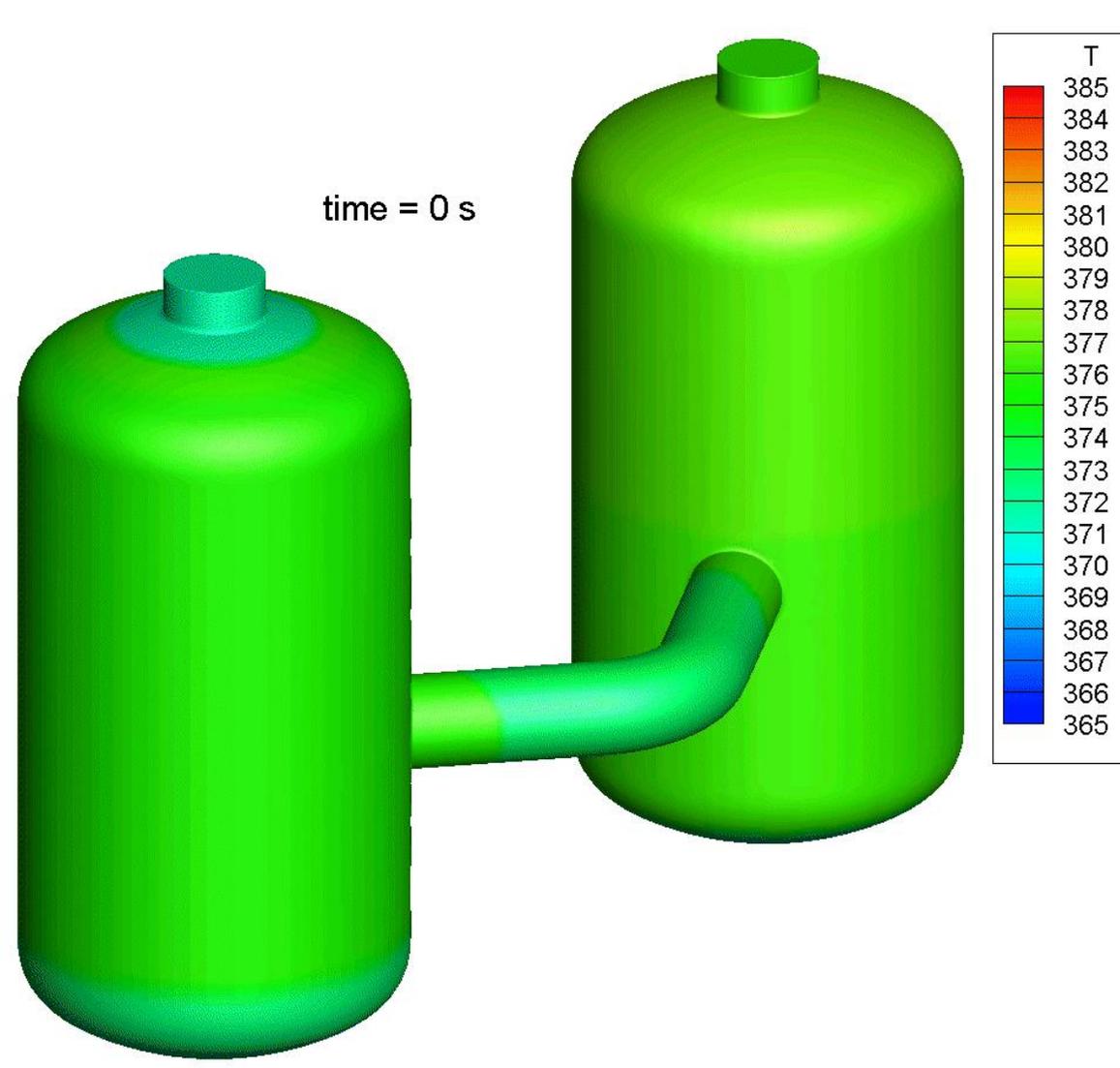
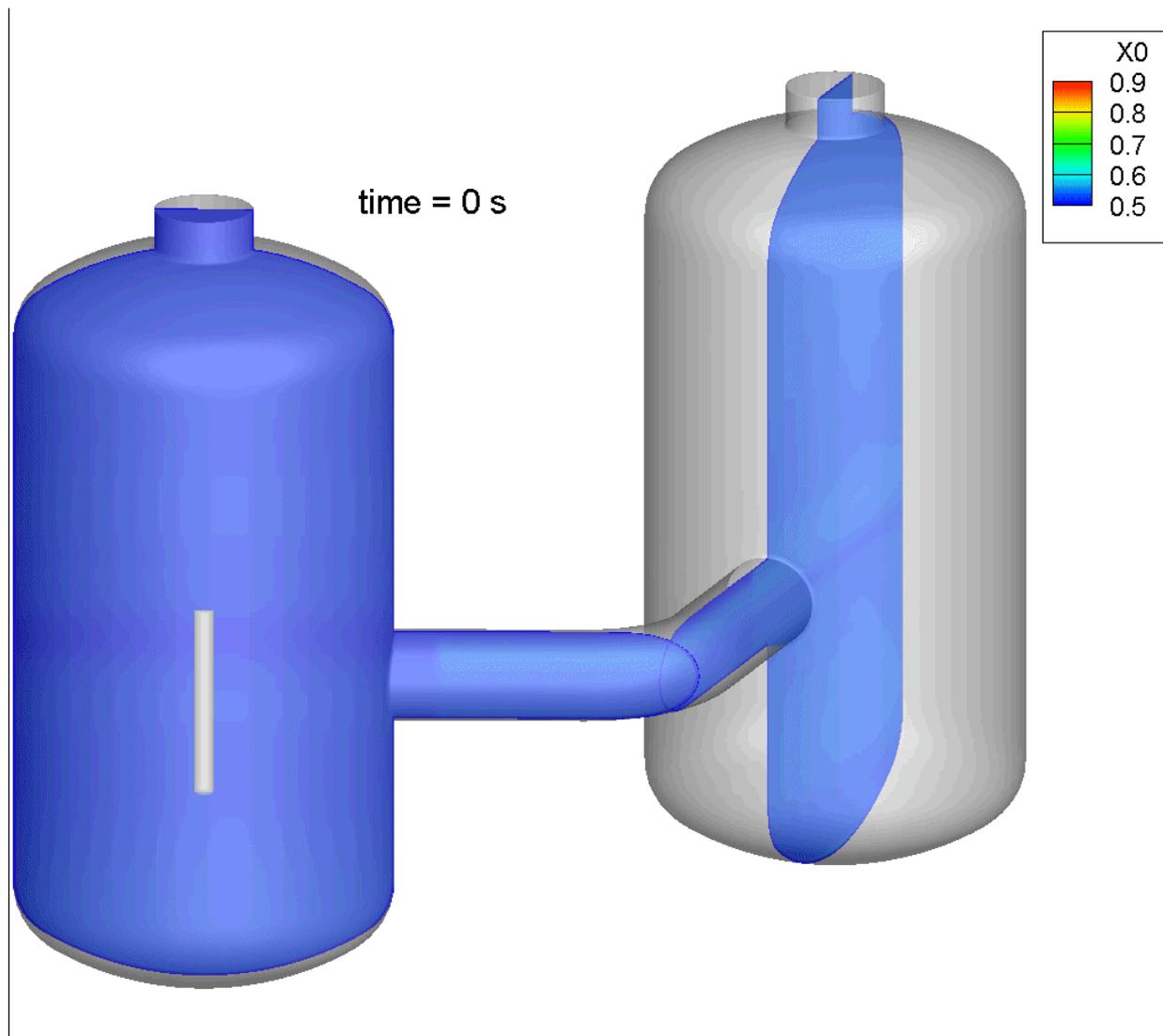
Изменение давления в ходе Этапов 1 и 2



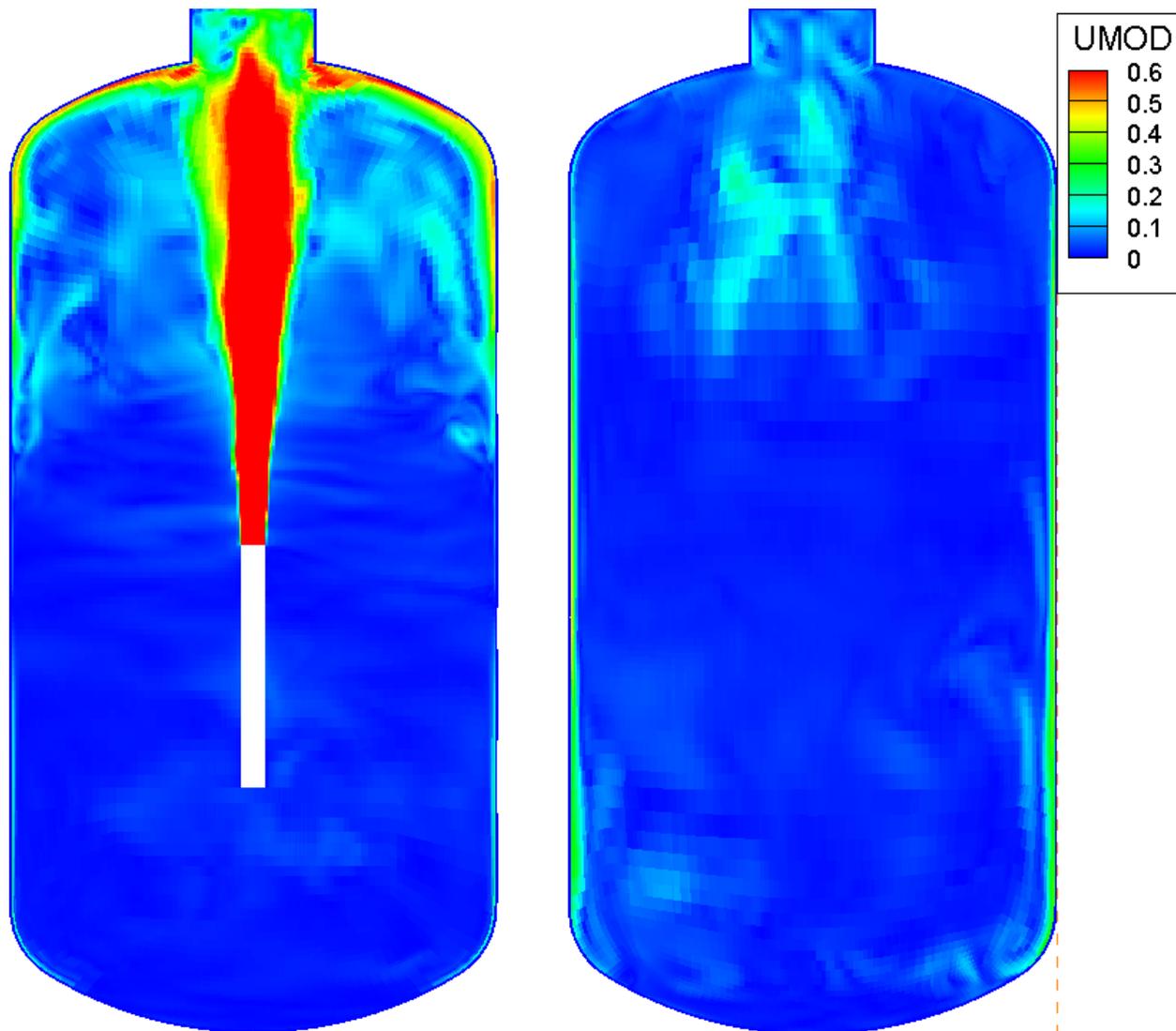
Распределение пара в ходе Этапов 1 и 2



Изменение температуры стенок установки PANDA в ходе Этапов 1 и 2



Оценка режима пристенного течения в момент времени 900 с



- Разность температур: 5 К
- Высота: 4 м
- Средняя температура: 395 К
- Газовая смесь: пар (80%), воздух (20%)

$$Gr = \frac{\beta \cdot g \cdot \Delta T \cdot L^3}{\nu^2} \approx 3 \cdot 10^{10}$$

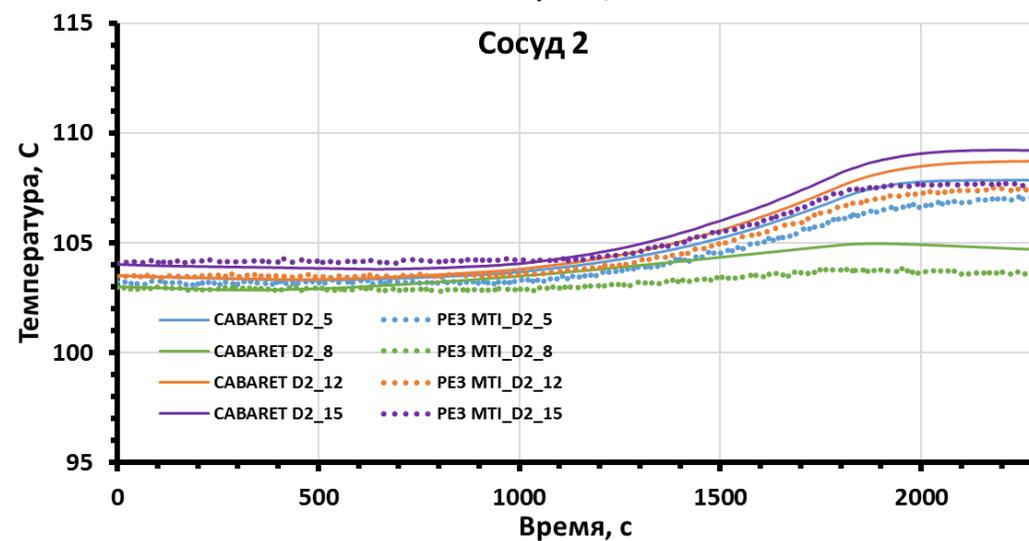
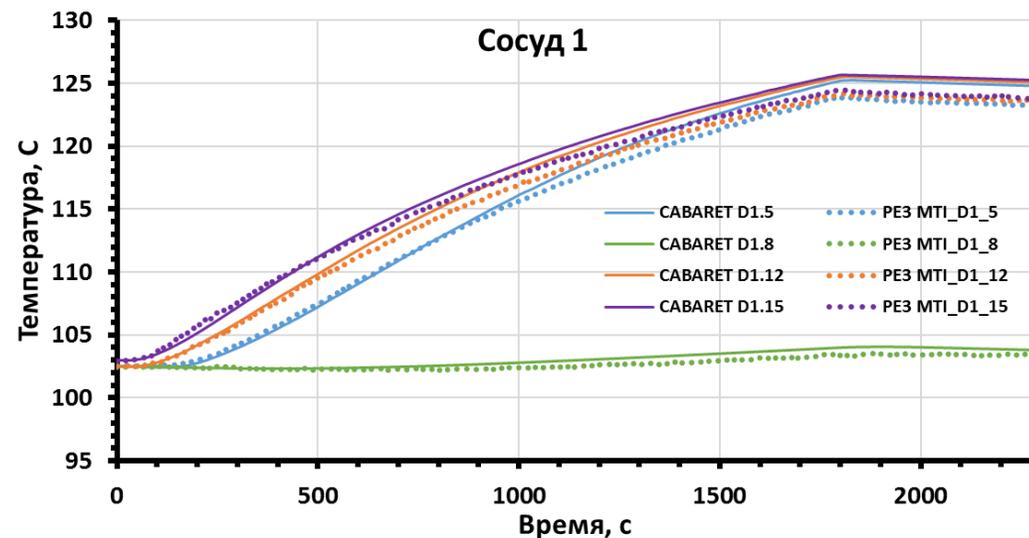
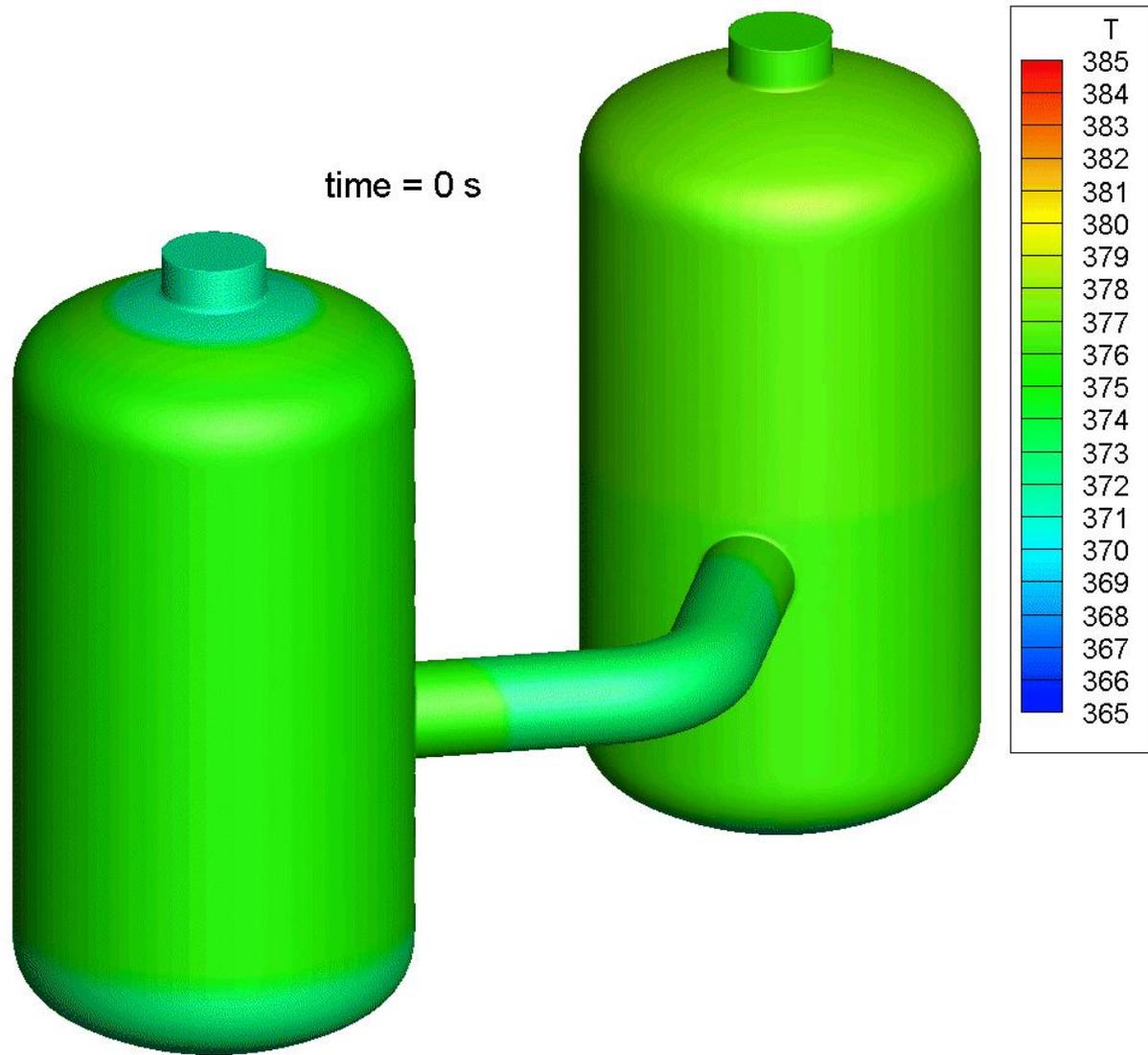
$$Pr \approx 0,7$$

$$Ra = Gr \cdot Pr = \frac{\beta \cdot g \cdot \Delta T \cdot L^3}{\nu \cdot \alpha} \approx 2 \cdot 10^{10}$$

$$Ri = \frac{\beta \cdot g \cdot \Delta T \cdot L}{U^2} \approx 2$$

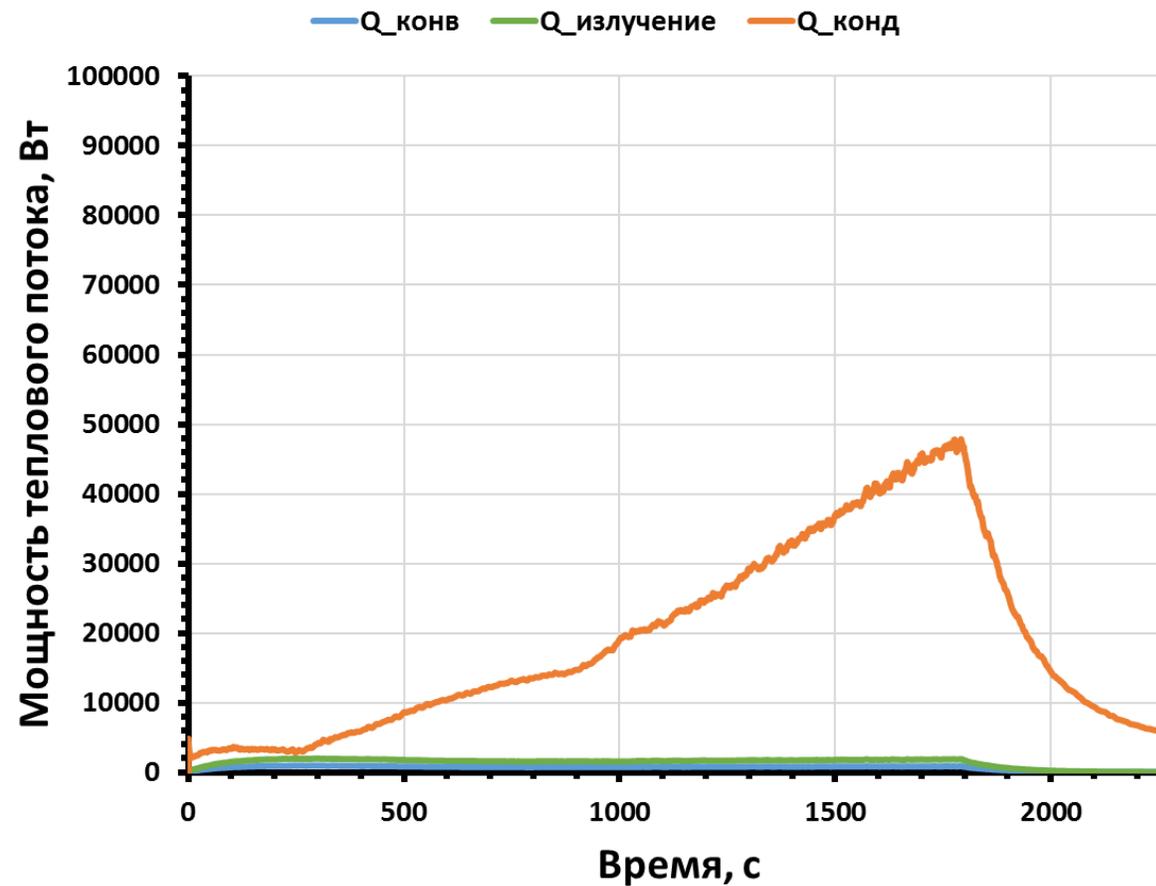
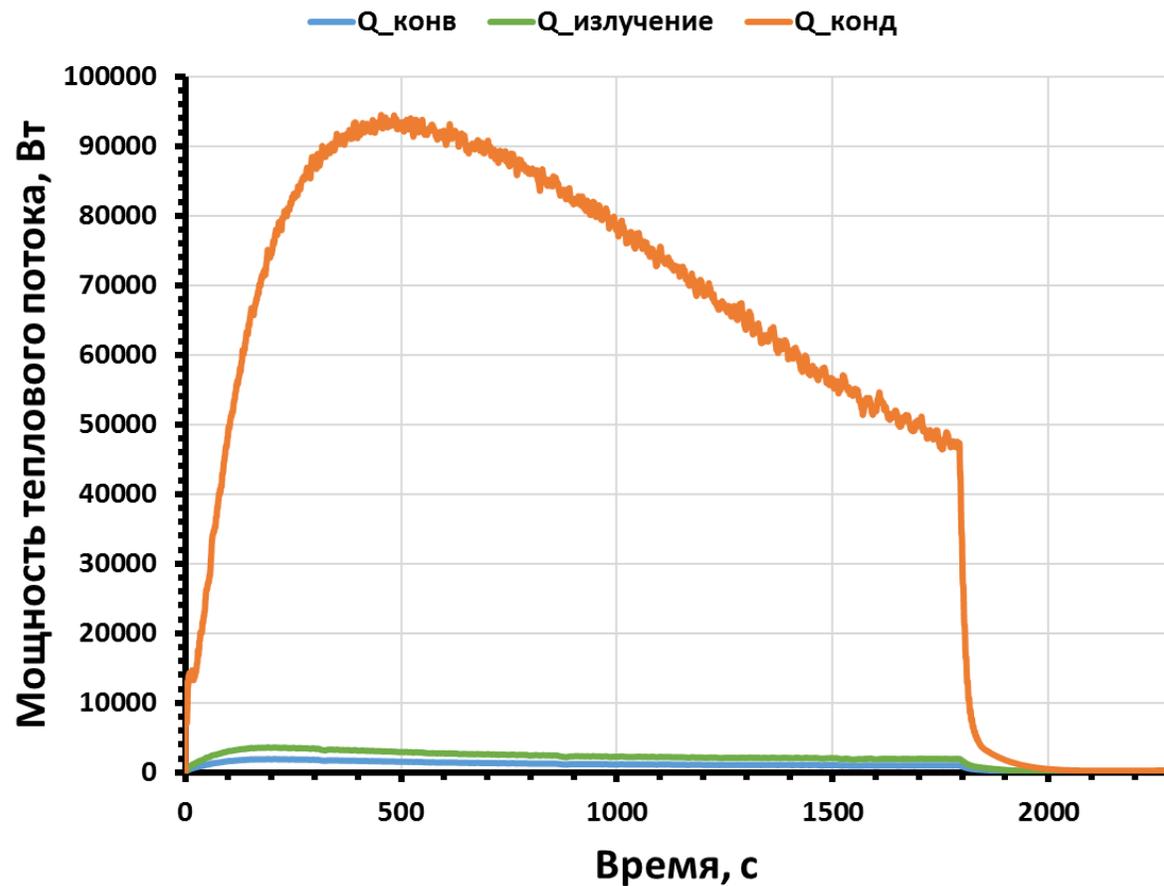
Турбулентный режим естественной конвекции

Изменение температуры стенок установки PANDA в ходе Этапов 1 и 2



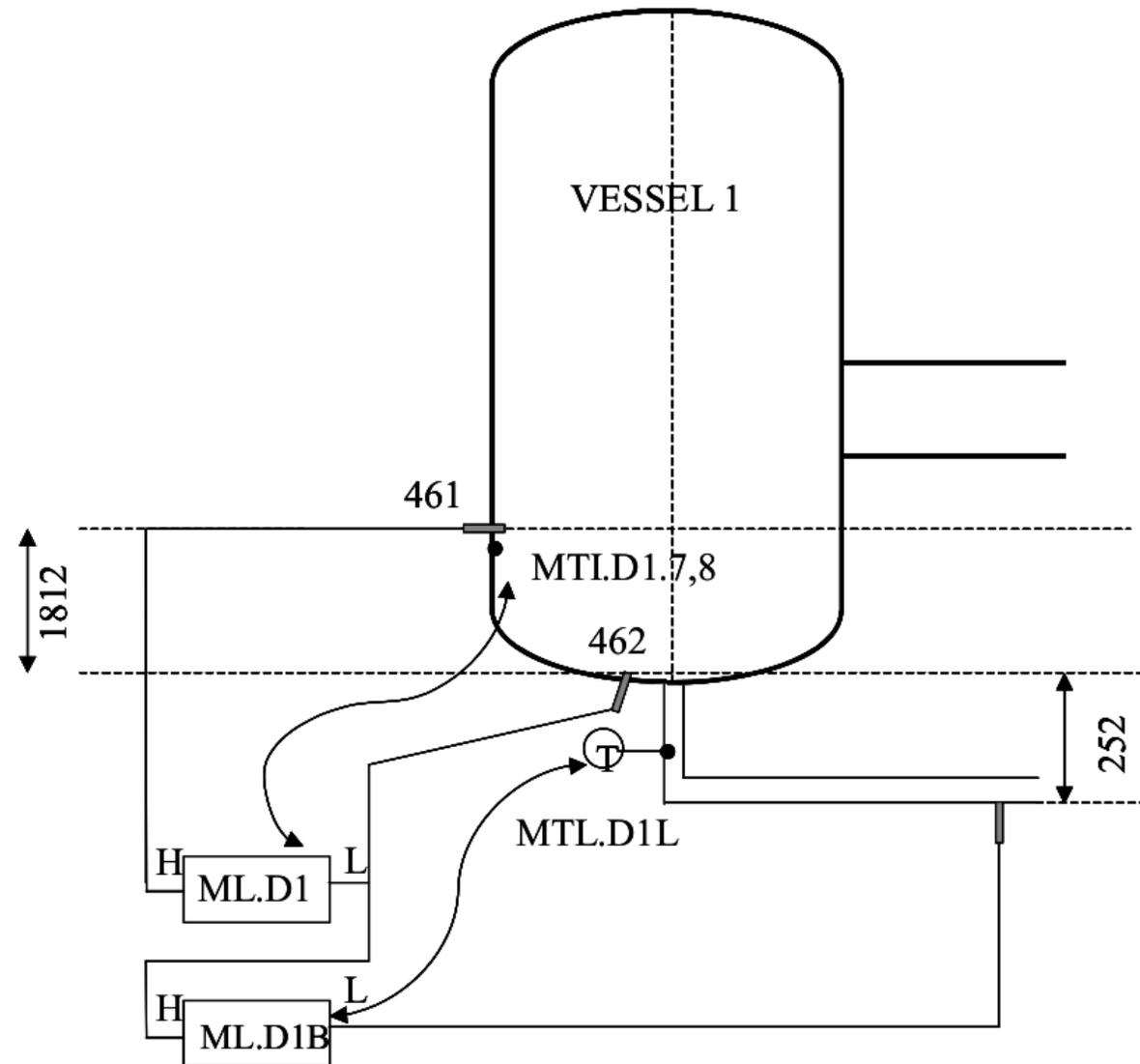


Тепловые потоки на стенки Сосуда 1 и Сосуда 2 установки PANDA



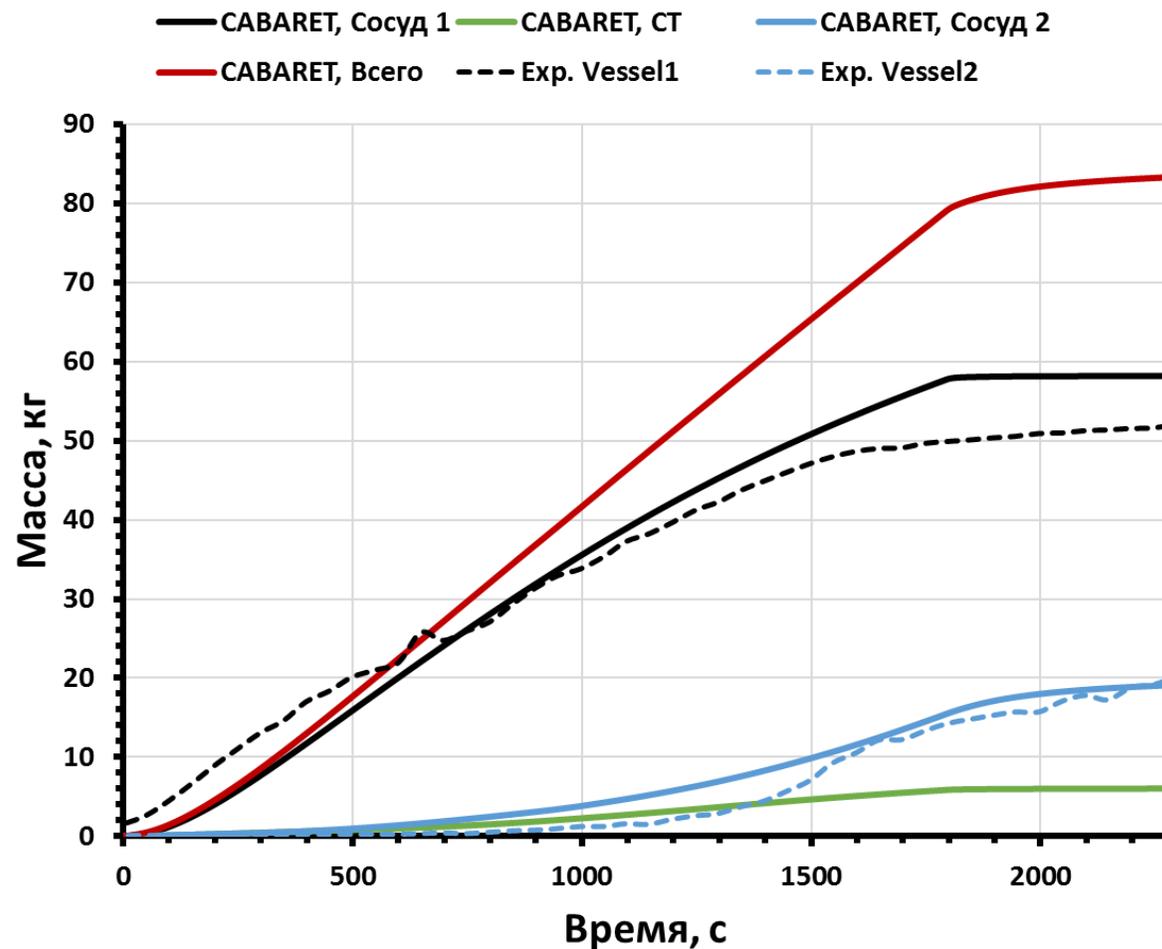
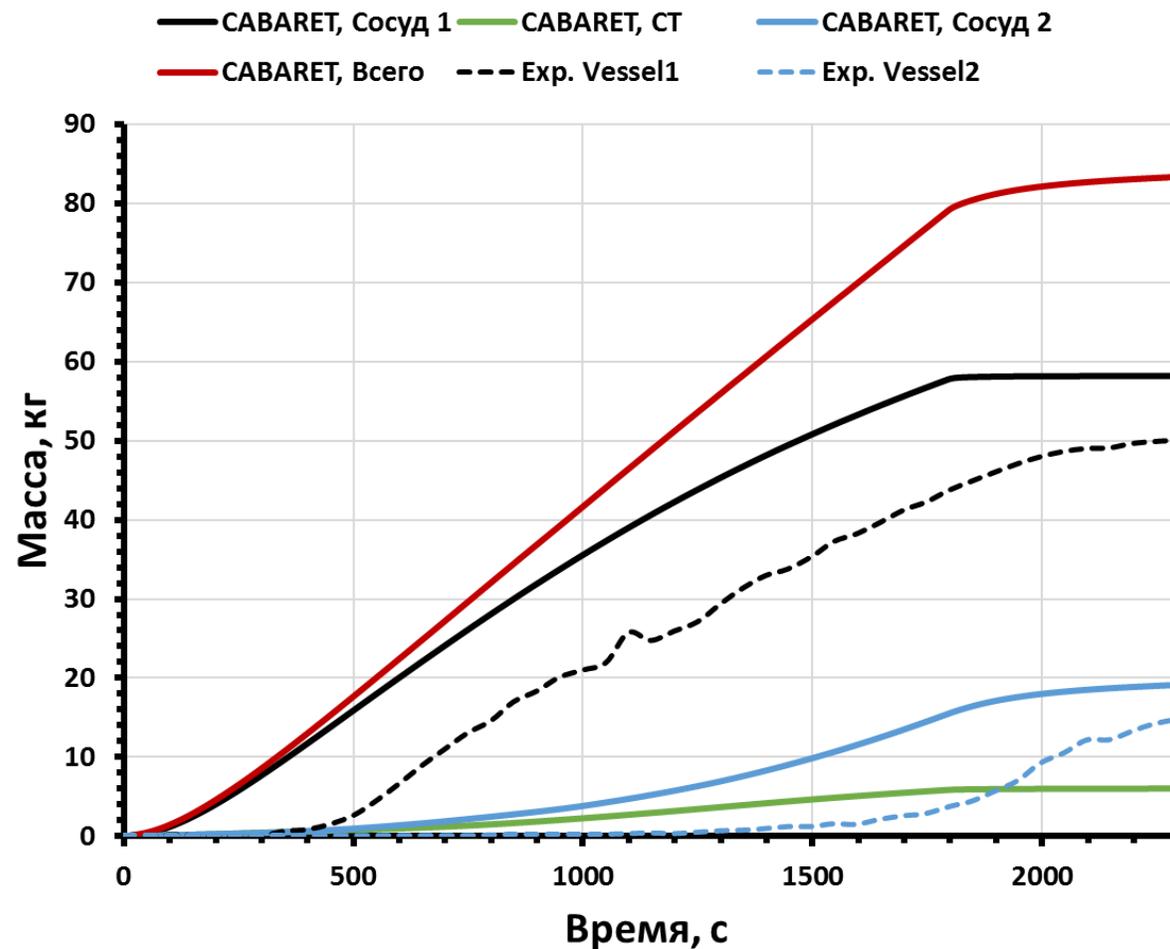


Измерение массы конденсата в установке PANDA

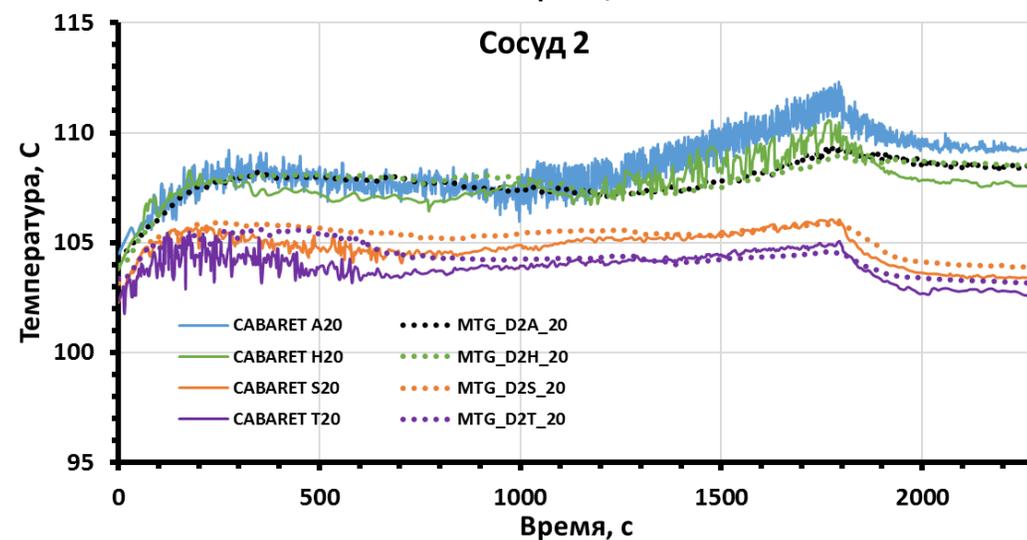
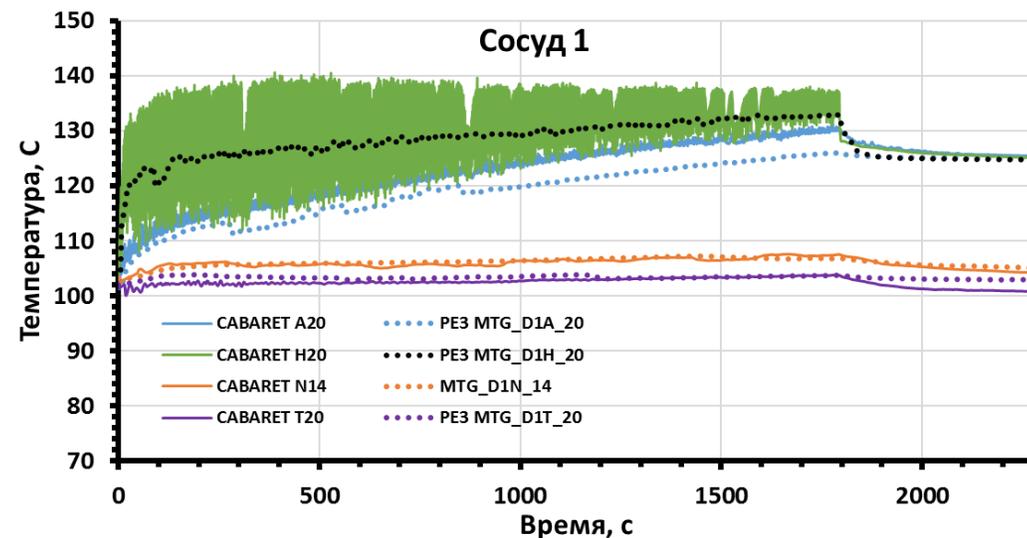
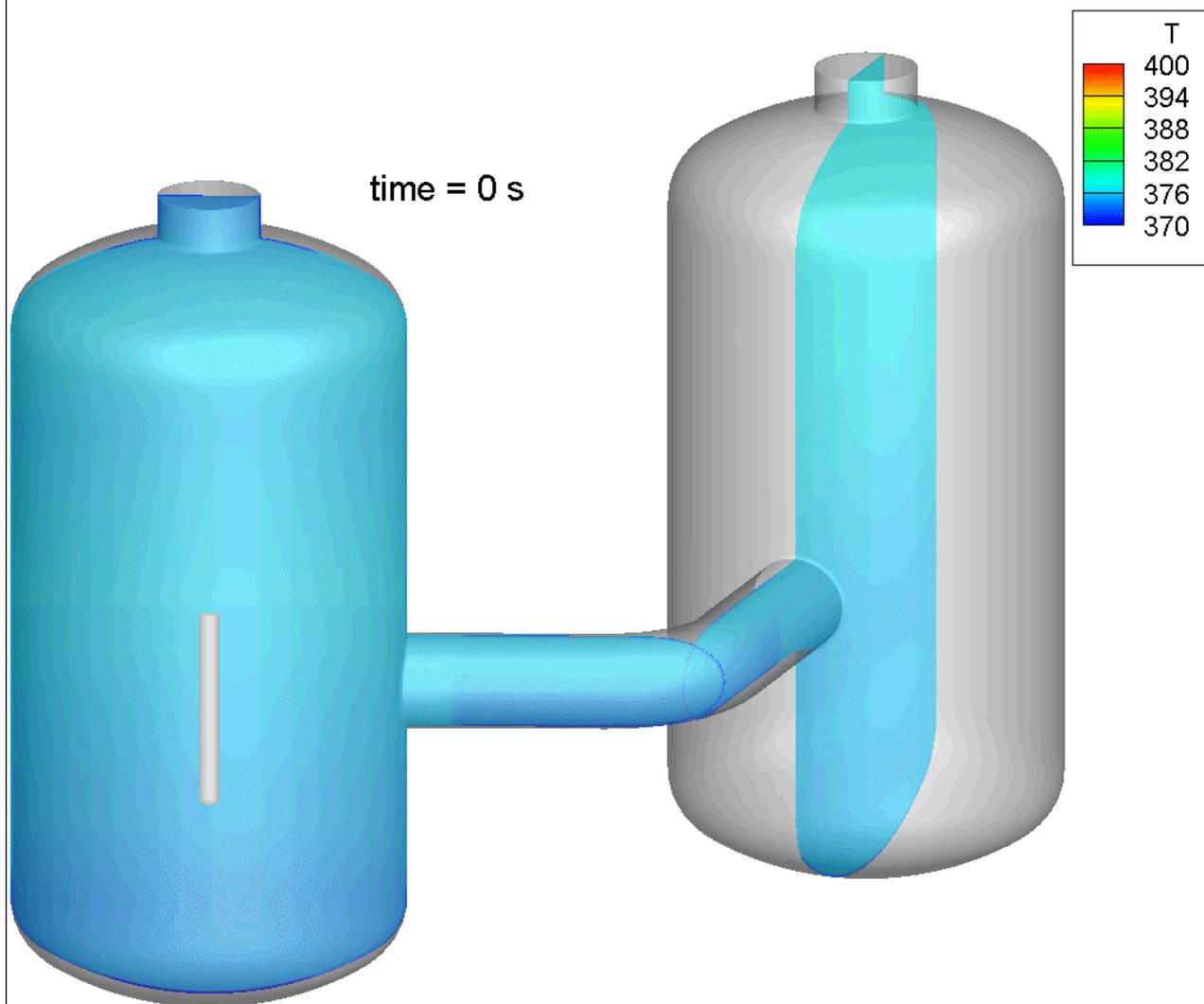




Изменение массы конденсата в ходе Этапов 1 и 2



Изменение температуры среды внутри установки PANDA в ходе Этапов 1 и 2





Выводы

- Численно подтверждена прототипность эксперимента условиям, реализующимся на АЭС в ходе ТА с потерей теплоносителя
- Установлена чувствительность результатов расчета к начальному распределению концентрации и температуры
- Валидация модели пристенной конденсации может быть проведена на основе сравнения рассчитанной и измеренной динамики давления в установке, а также рассчитанной и измеренной температуры стенок установки



РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
Институт проблем безопасного развития атомной энергетики

RUSSIAN ACADEMY OF SCIENCES
Nuclear Safety Institute (IBRAE)

Спасибо за внимание!