

**ФГУП «ЭНИЦ»**

*Электрогорский научно-исследовательский центр*

**MNTK-2007**

*5-я международная*

*научно-техническая конференция*

*«Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР»*

**Экспериментально-аналитическое  
исследование на стенде ПСБ-ВВЭР  
переходного режима с обесточиванием  
АЭС с РУ ВВЭР-1000**

*29 мая – 1 июня 2007 г.*

*г. Подольск, ФГУП ОКБ "ГИДРОПРЕСС"*

***И.А. Липатов, А.В. Капустин,  
С.М. Никонов, А.А. Ровнов, А.В. Басов, И.В. Елкин***

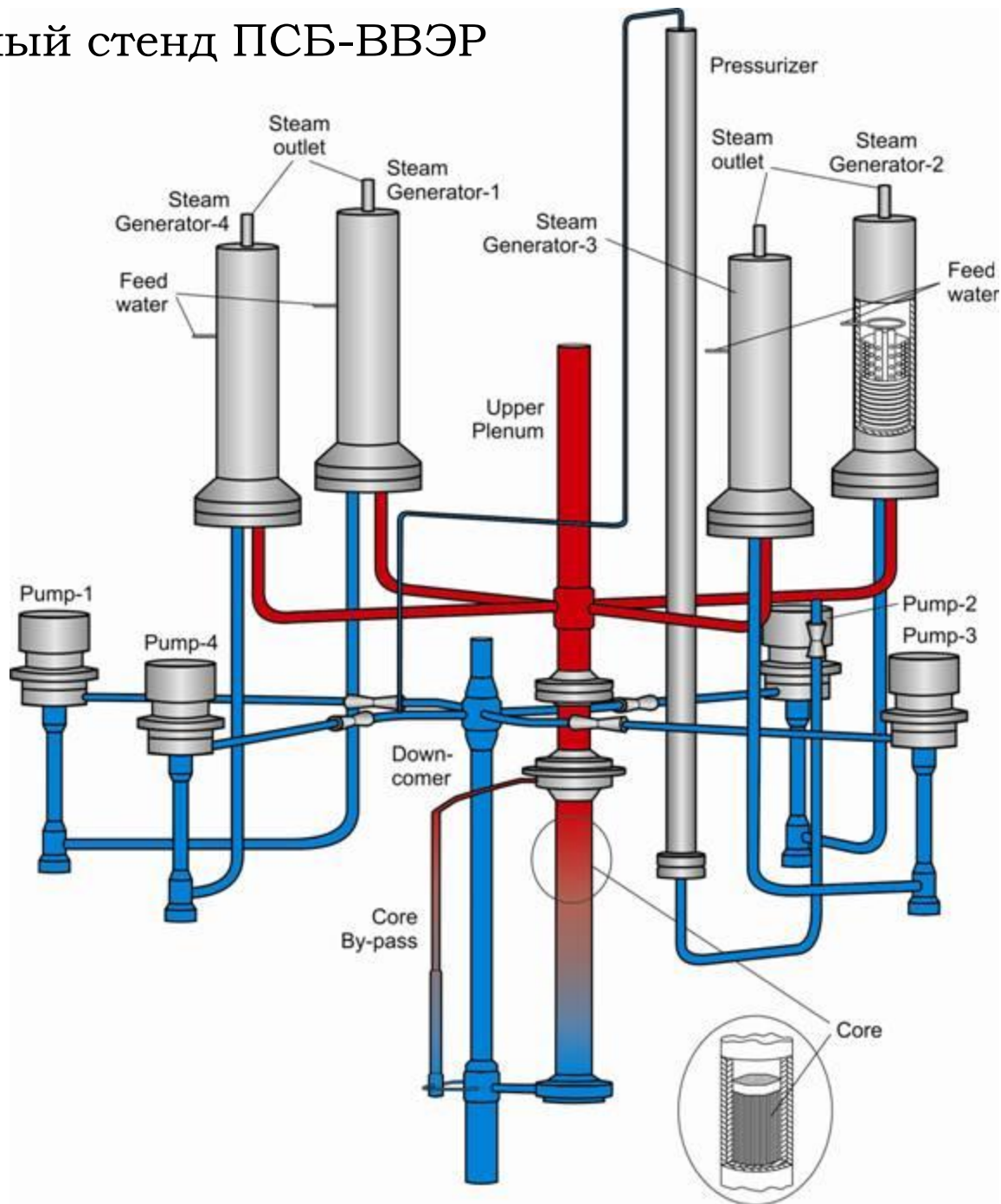
## Цели работы

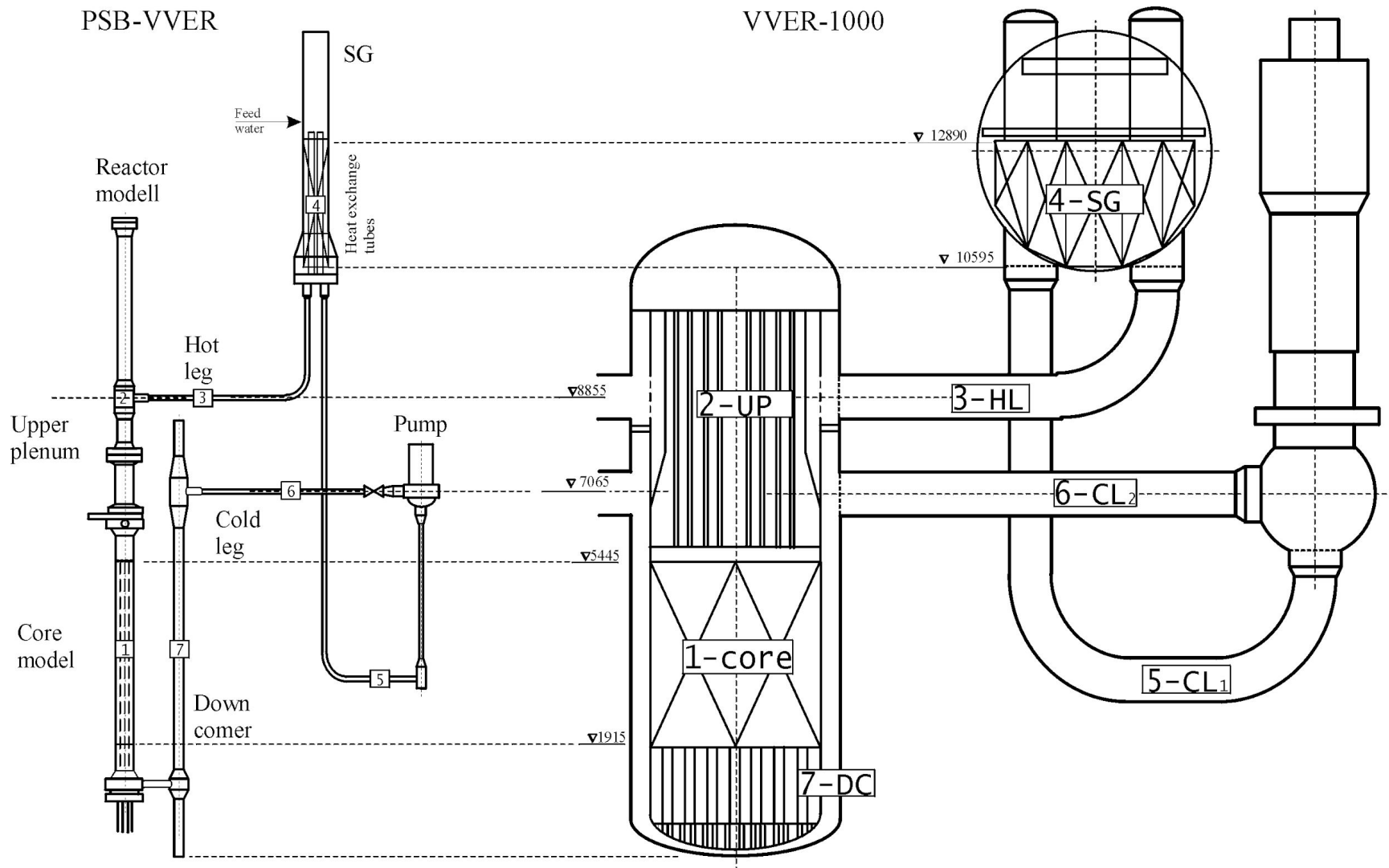
1. Исследование процесса ухудшения теплообмена при постепенном уменьшении массы теплоносителя второго контура парогенераторов РУ ВВЭР-1000
2. Моделирование этого процесса с помощью теплогидравлического кода RELAP5/MOD3.3

# Содержание

1. Интегральный теплофизический стенд ПСБ-ВВЭР
2. Эксперимент «Моделирование на стенде ПСБ-ВВЭР переходного режима с обесточиванием АЭС с ВВЭР»
3. Анализ эксперимента с помощью кода RELAP5/MOD3.3
  - Три способа нодализации парогенераторов
  - Влияние нодализационной схемы на теплообмен во втором контуре ПГ
4. Расчетный анализ аналогичного переходного режима в РУ ВВЭР. Изменение теплообмена при уменьшении уровня в ПГ.

# Интегральный стенд ПСБ-ВВЭР





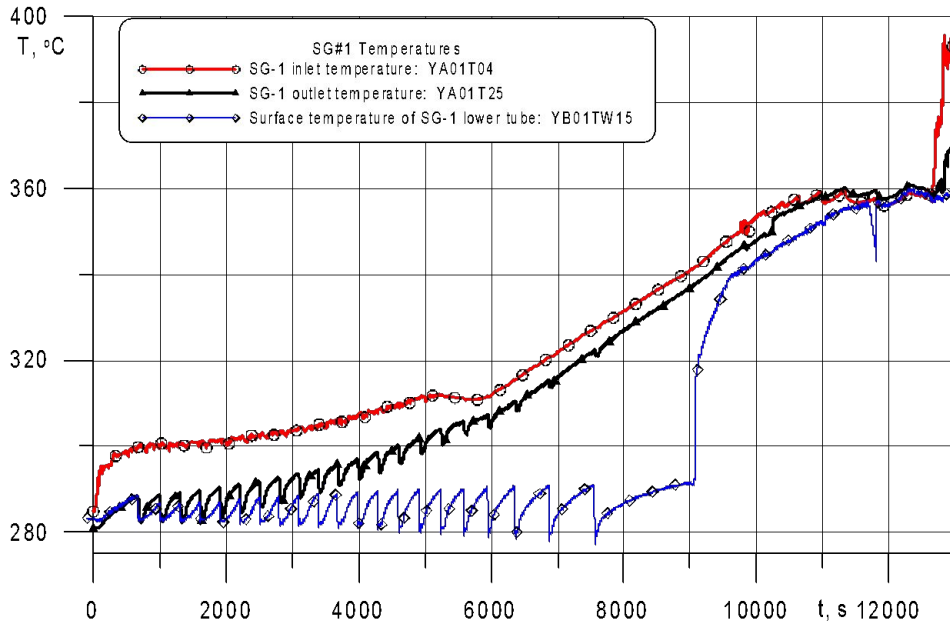
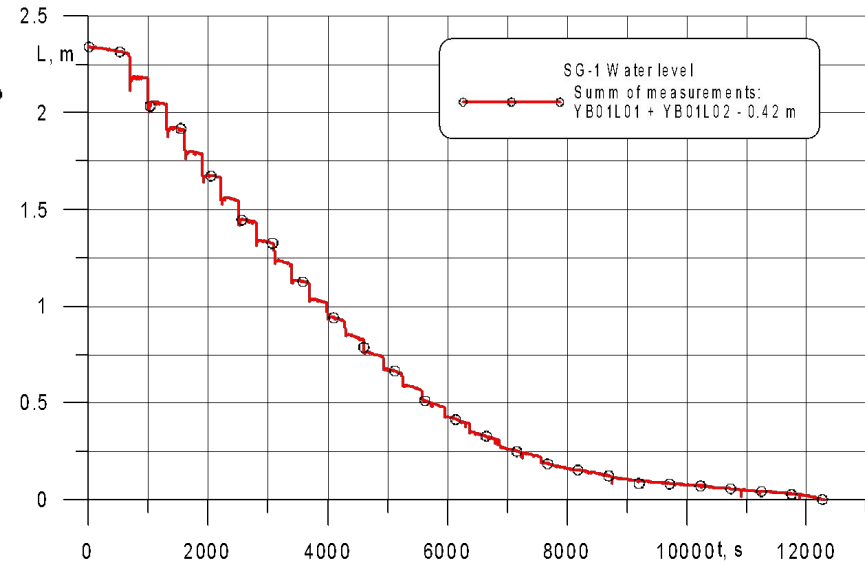
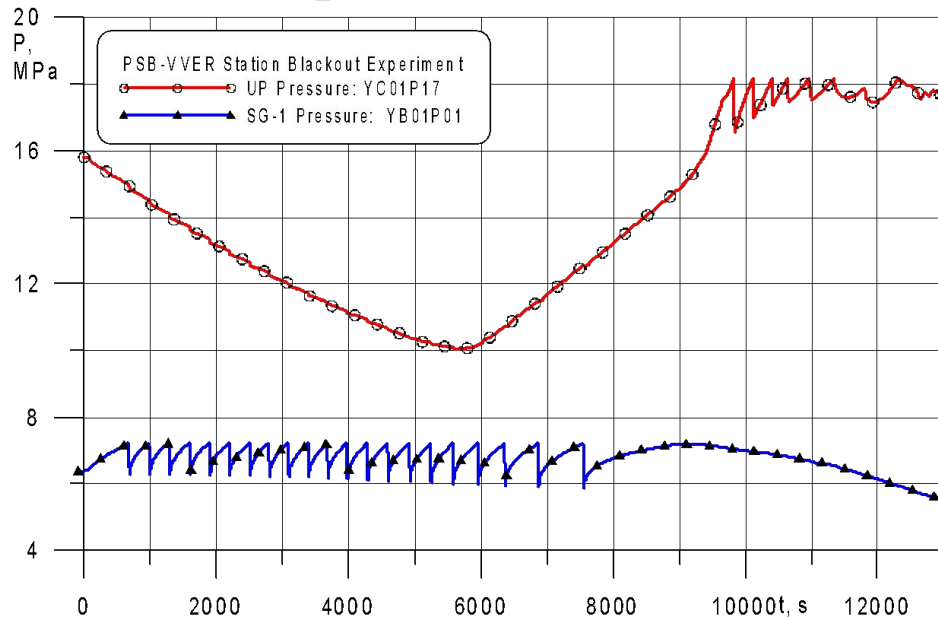
РУ ВВЭР-1000 и стенд ПСБ-ВВЭР

*Начальные условия*

<b>Параметр</b>	<b>Измеренный</b>	<b>Расчетный</b>
<b><i>Первый контур</i></b>		
давление в ВКС, МПа	15.8	15.82
Мощность активной зоны, кВт	379	379
Мощность байпаса зоны, кВт	4.1	4.1
Температура на выходе ВКС, °С	284.6	284.1
Температура на входе в ОУ, °С	278.1	277.8
Уровень воды в КД, м	6.26*	6.26*
<b><i>Второй контур</i></b>		
Давление во втором контуре, МПа	6.39	6.39
Уровень в ПГ, м	2.3	2.3

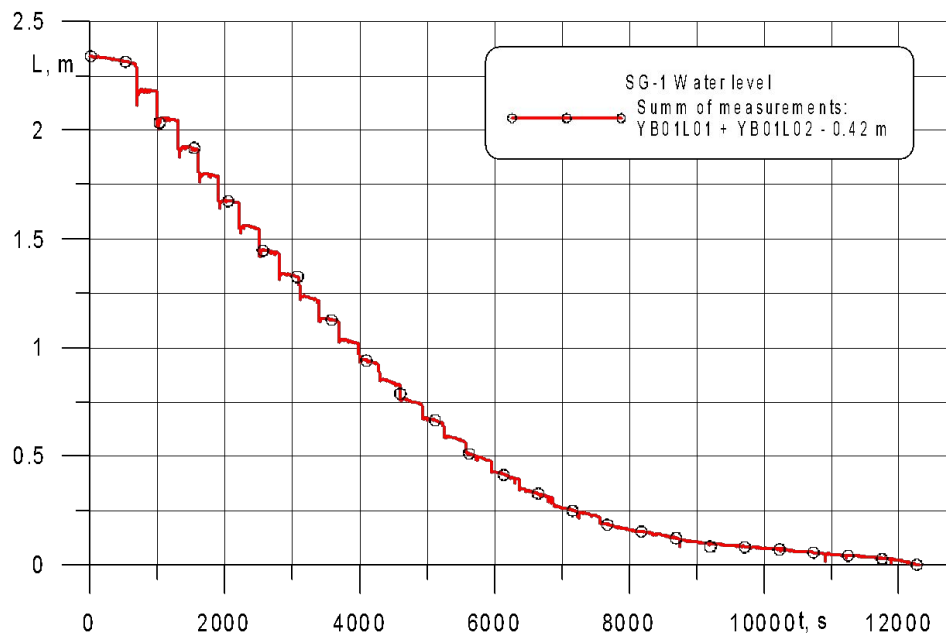
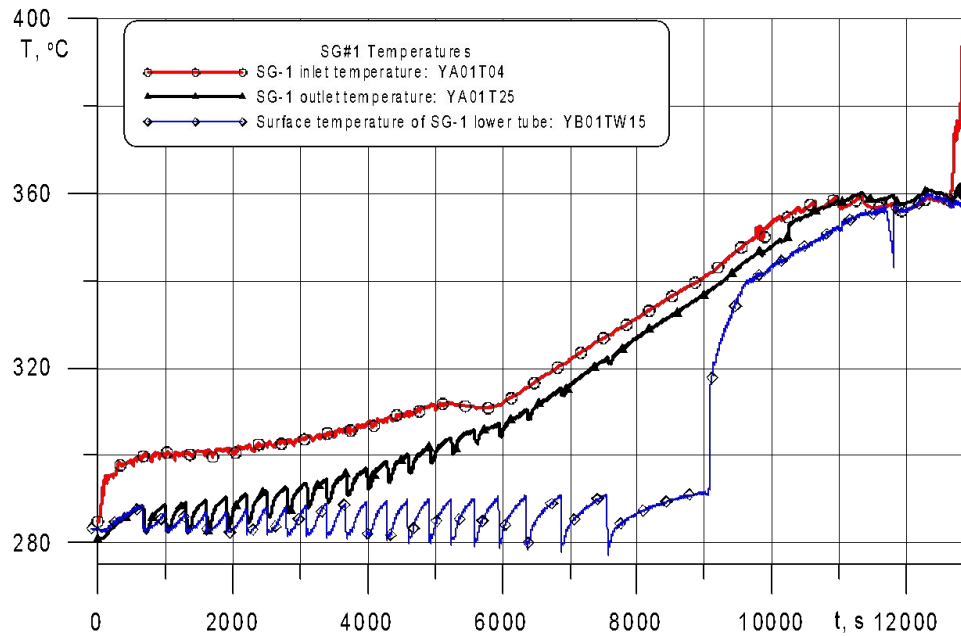
**Мощность 383 кВт    □    253 кВт = 2.53%**  
**130 кВт тепловые потери**

# Эксперимент на ПСБ-ВВЭР «Обесточивание станции»



- Обесточивание
- Потеря питательной воды
- Останов всех ГЦН
- Системы безопасности не моделируются
- Уменьшение давления в первом контуре
- Выкипание теплоносителя второго контура
- Разогрев и подъем давления в первом контуре
- Потеря теплоносителя через открытый ИПУ КД
- Разогрев активной зоны

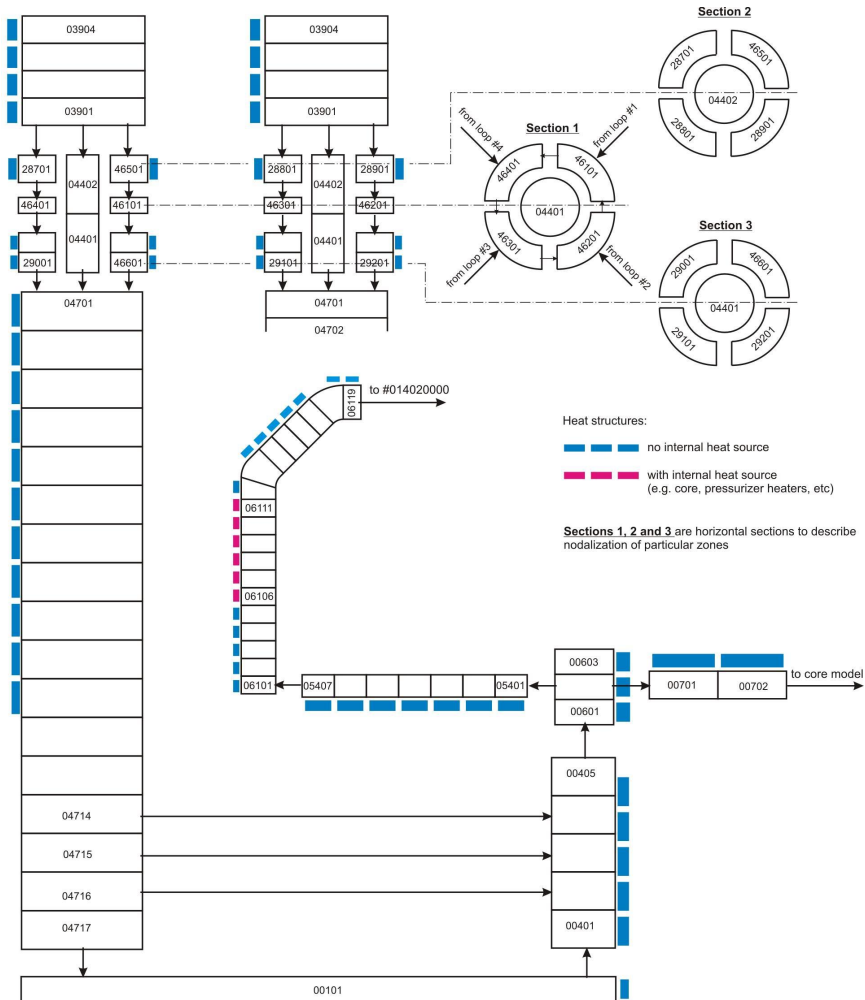
# Эксперимент на ПСБ-ВВЭР «Обесточивание станции»



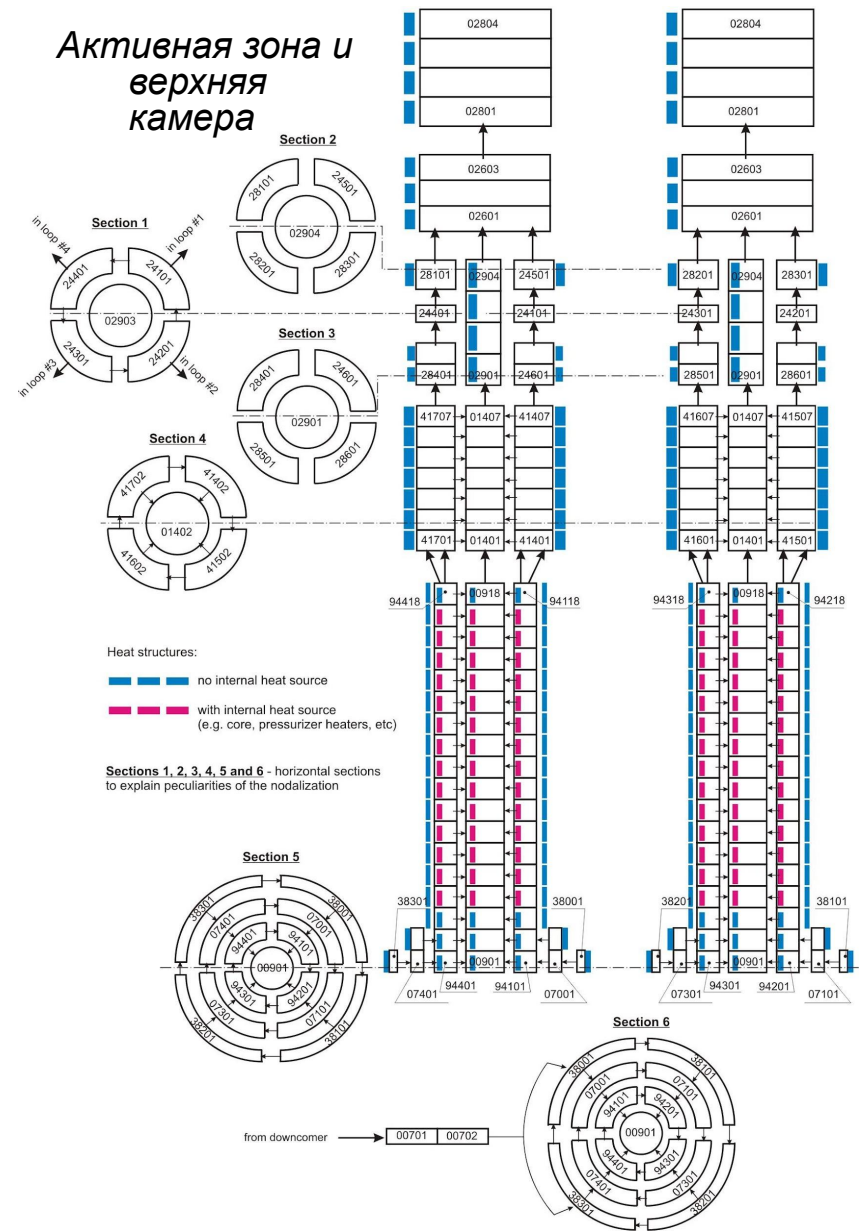


# Входная модель станда ПСБ-ВВЭР

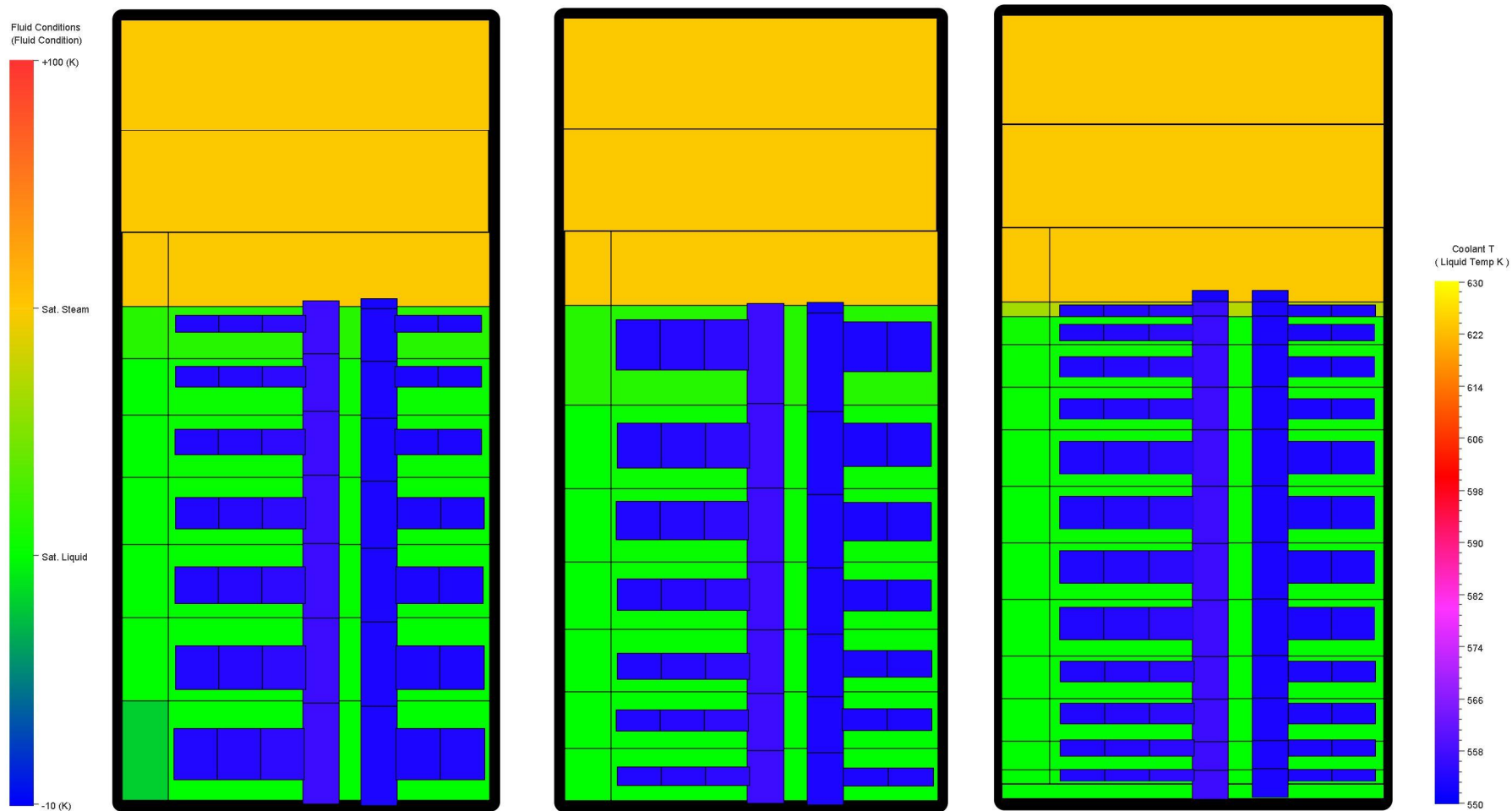
## Опускной участок



## Активная зона и верхняя камера



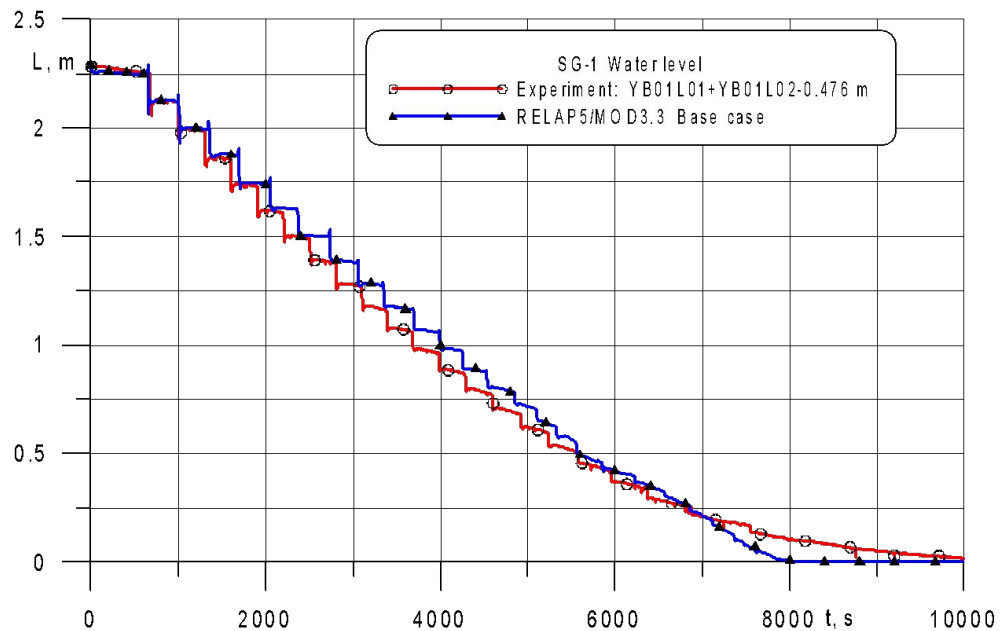
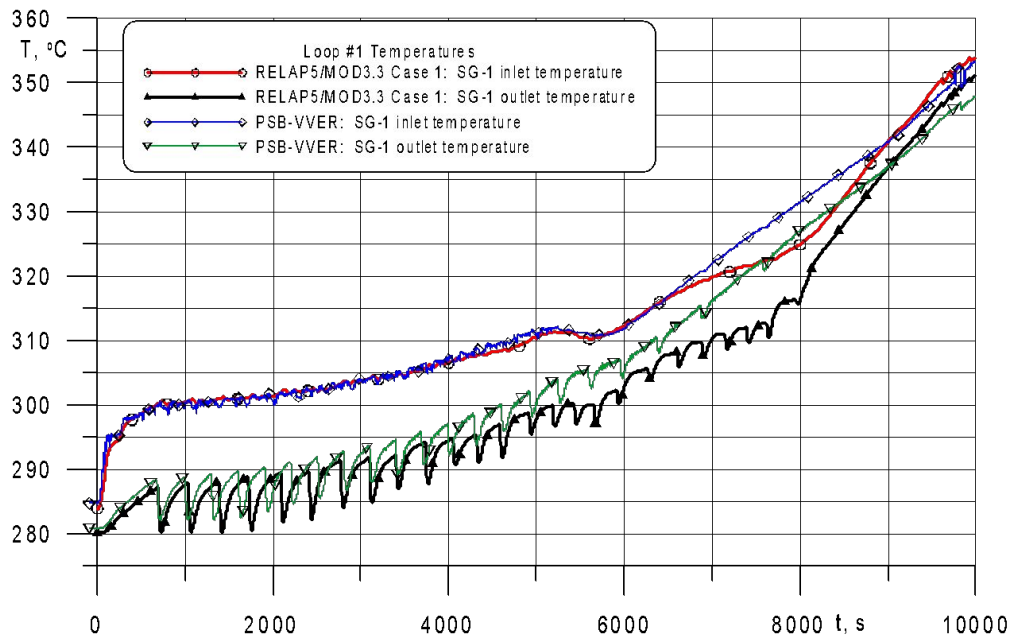
# Нодализация парогенераторов



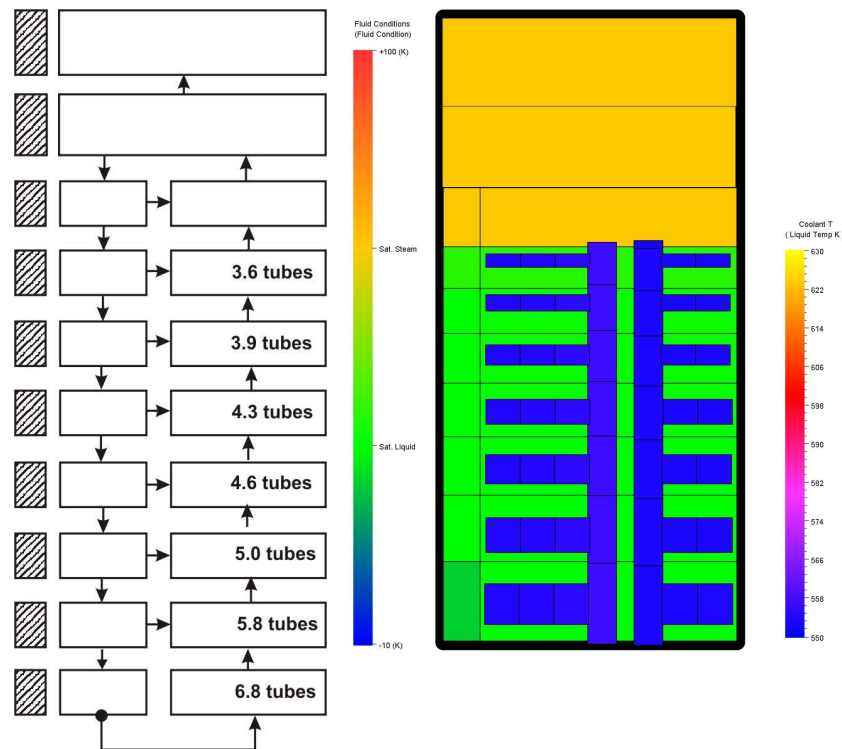
**Схема 1**  
**7 слоев трубок**

**Схема 2**  
**7 слоев трубок**

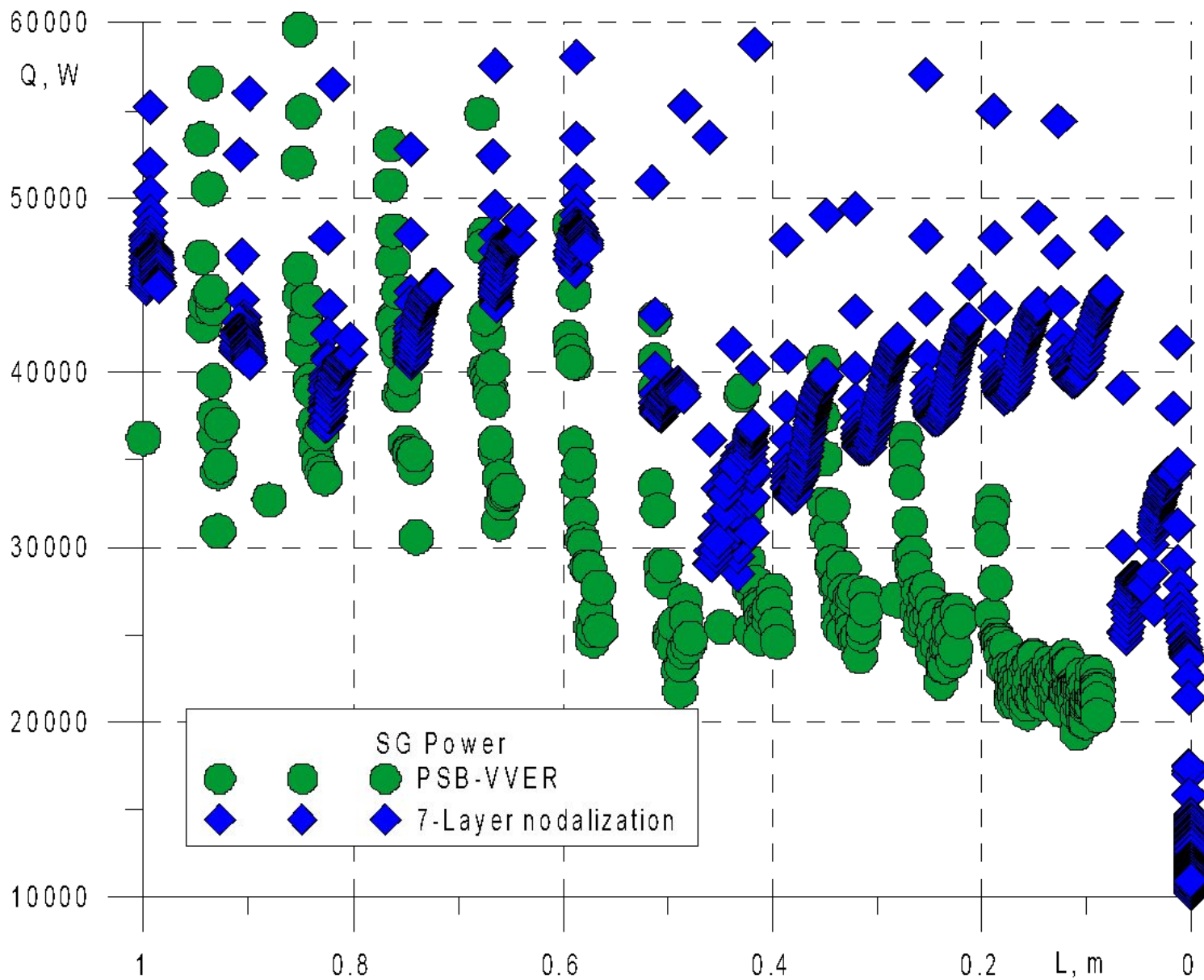
**Схема 3**  
**12 слоев трубок**

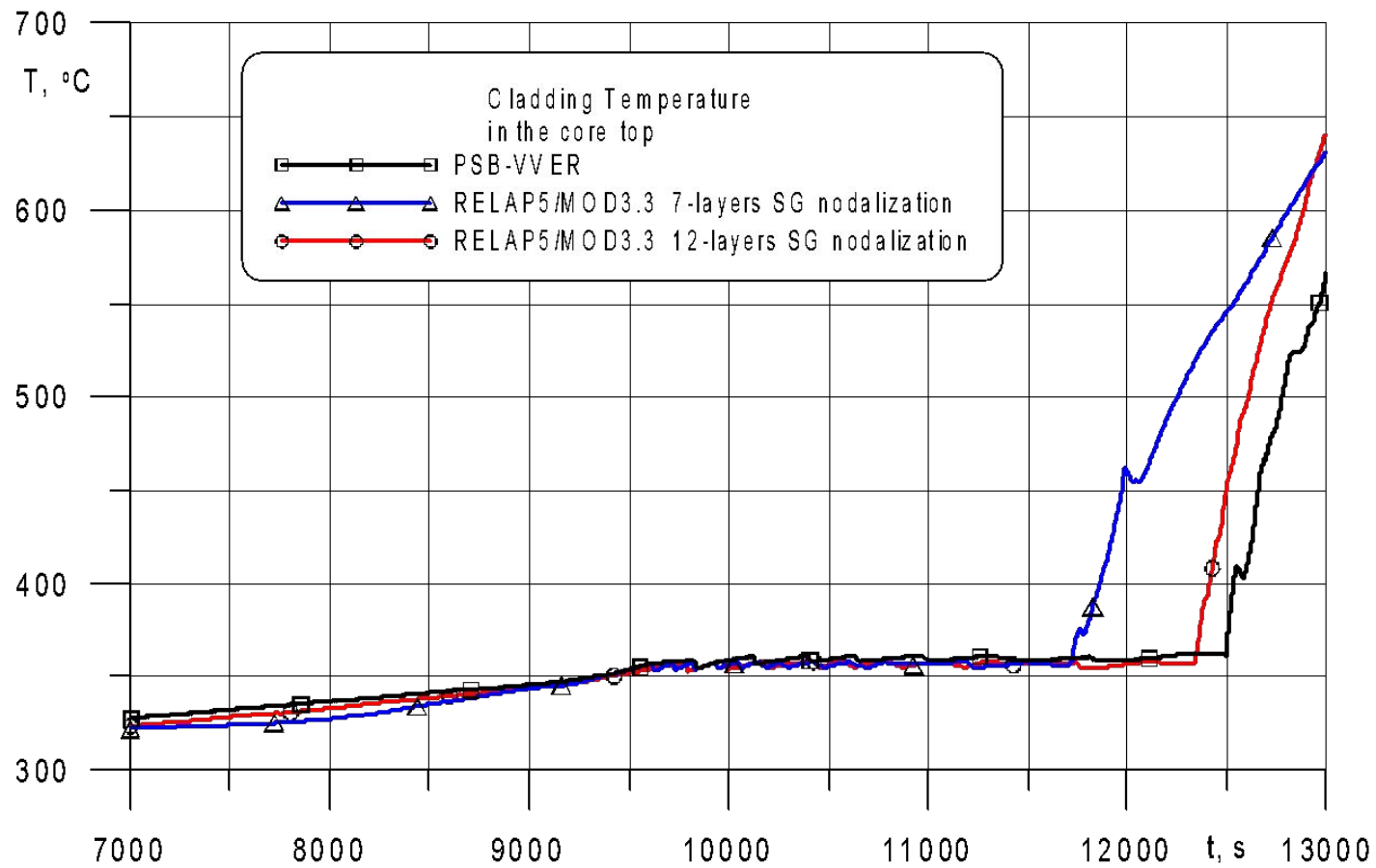


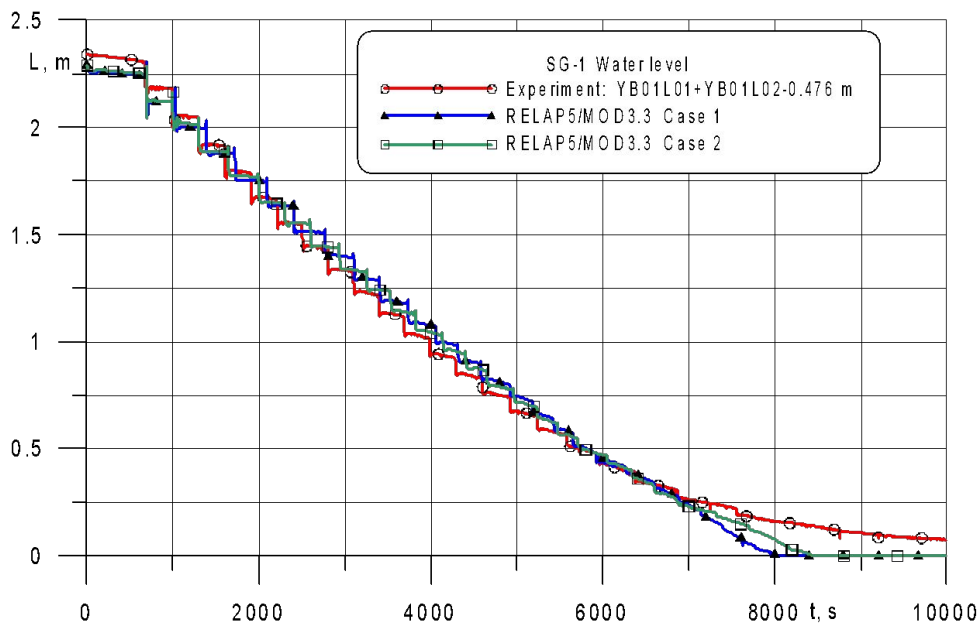
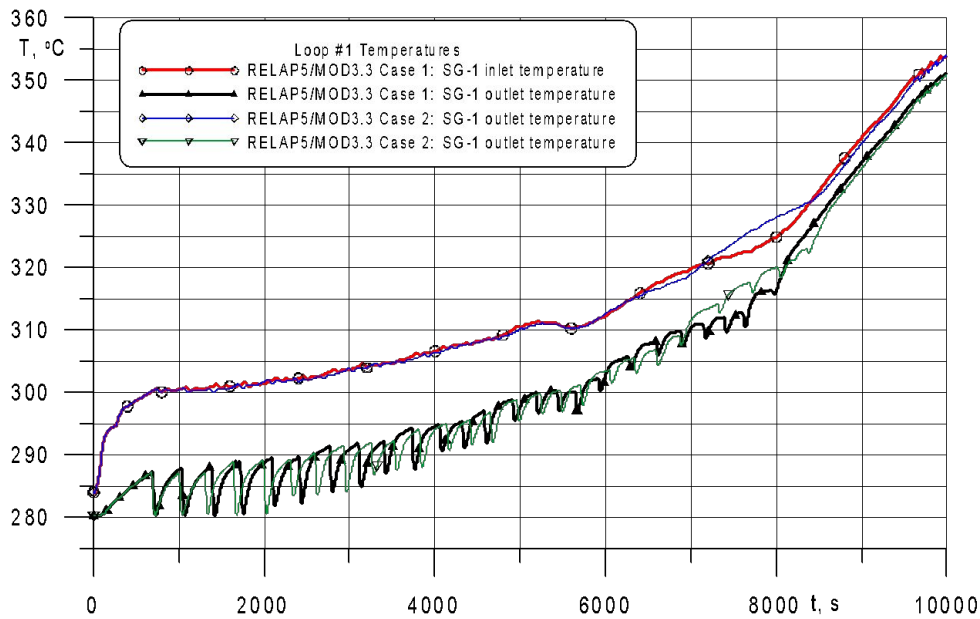
## Схема 1 7 слоев трубок



Нижний слой:  
6.8 трубки = 20 % общей  
теплопередающей поверхности

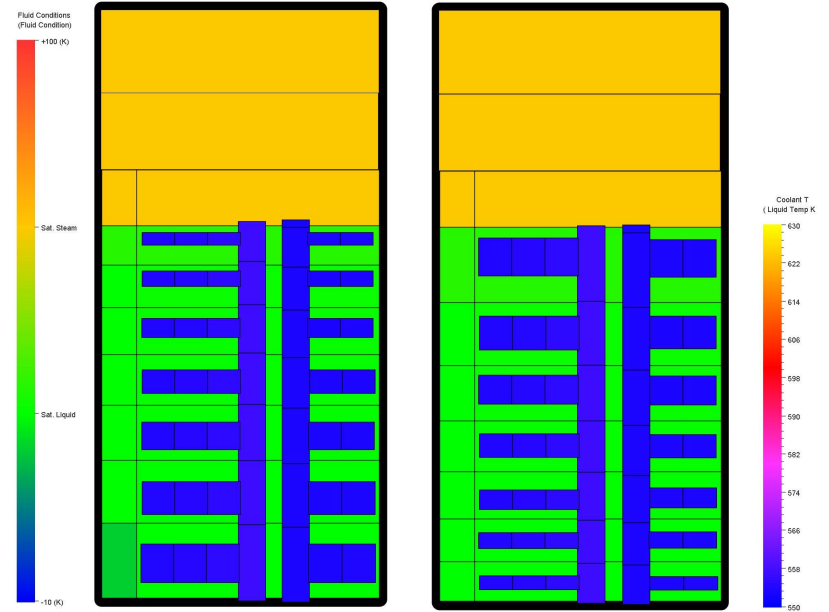






**Схема 1**  
**7 слоев трубок**

**Схема 2**  
**7 слоев трубок**

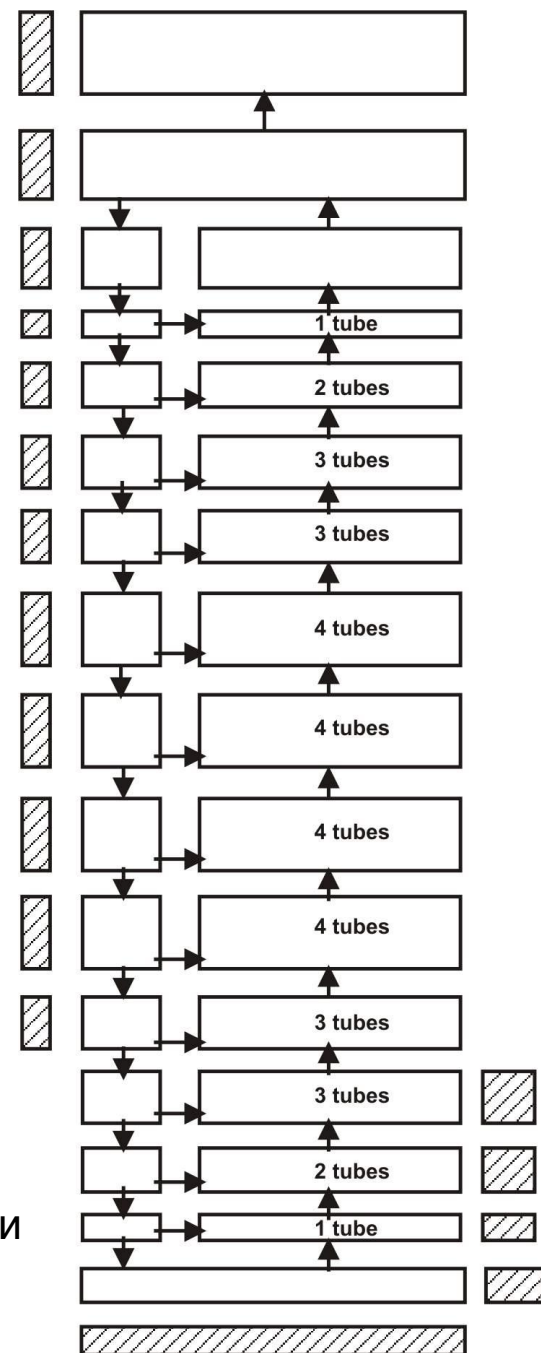


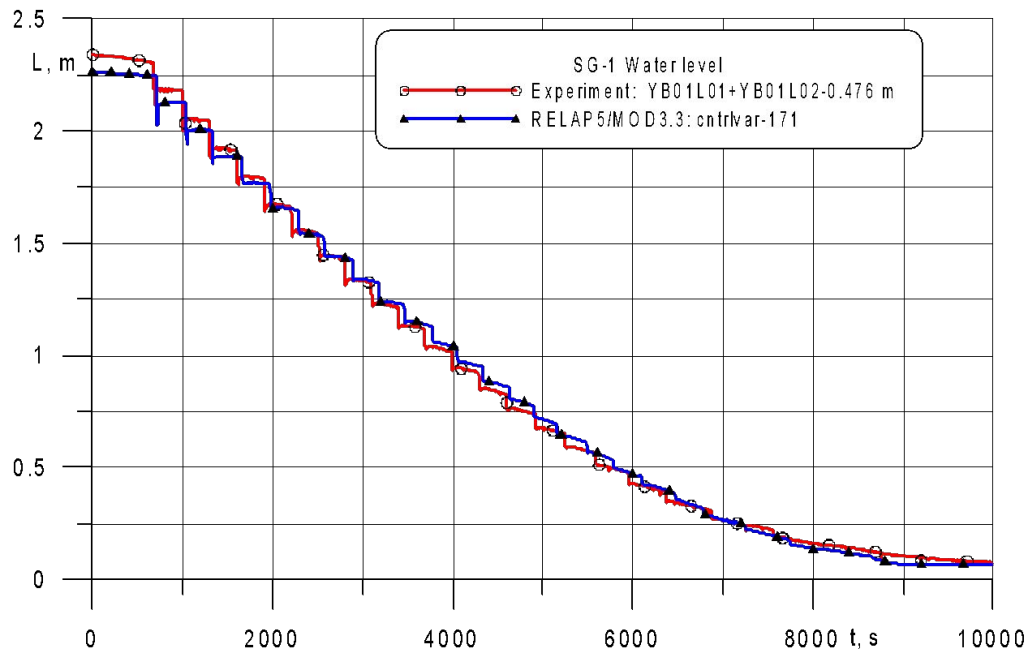
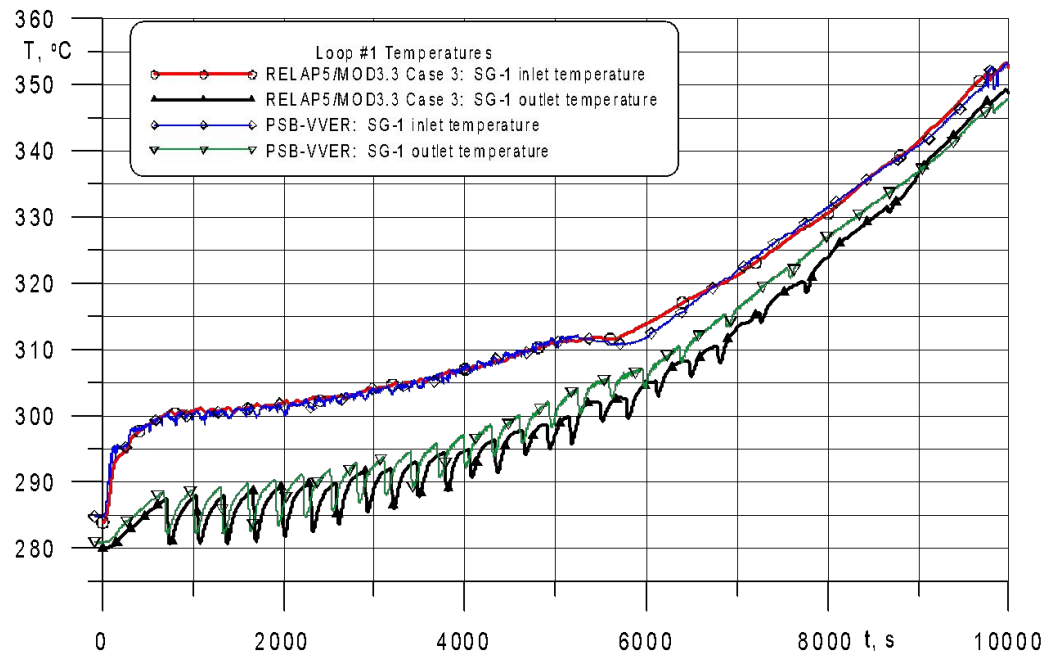
Нижний слой:  
3.6 трубки = 10.6 % общей  
теплопередающей поверхности

### Схема 3 12 слоев трубок

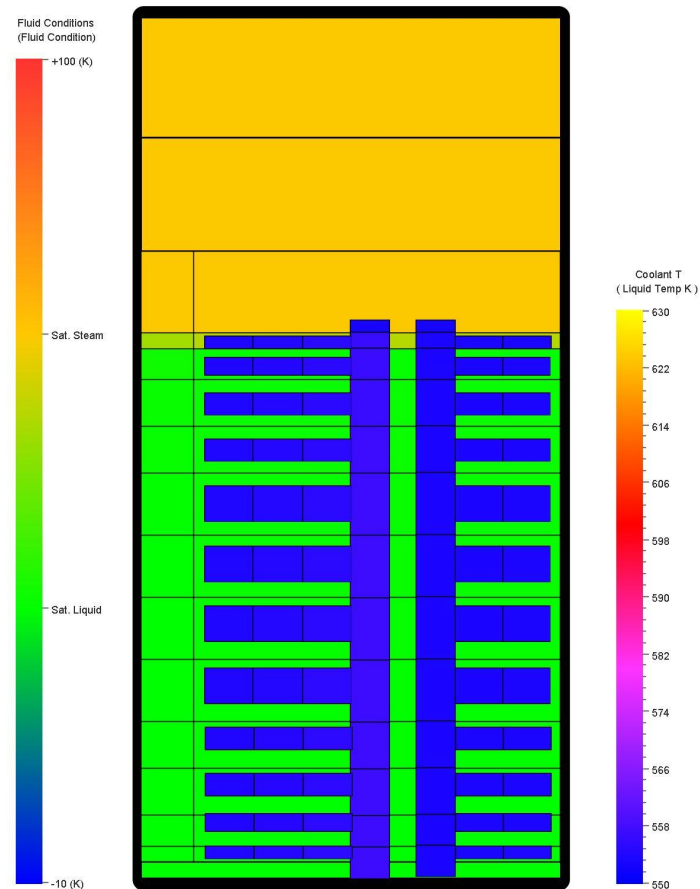
1. Трубный пучок представлен 12 слоями
2. Верхняя и нижняя ячейки в модели трубного пучка соответствуют одной теплообменной трубке
3. Дополнительная ячейка добавлена, чтобы учесть небольшую область (70 мм) между дном и трубным пучком

1 трубка = 2.94 % общей теплопередающей поверхности

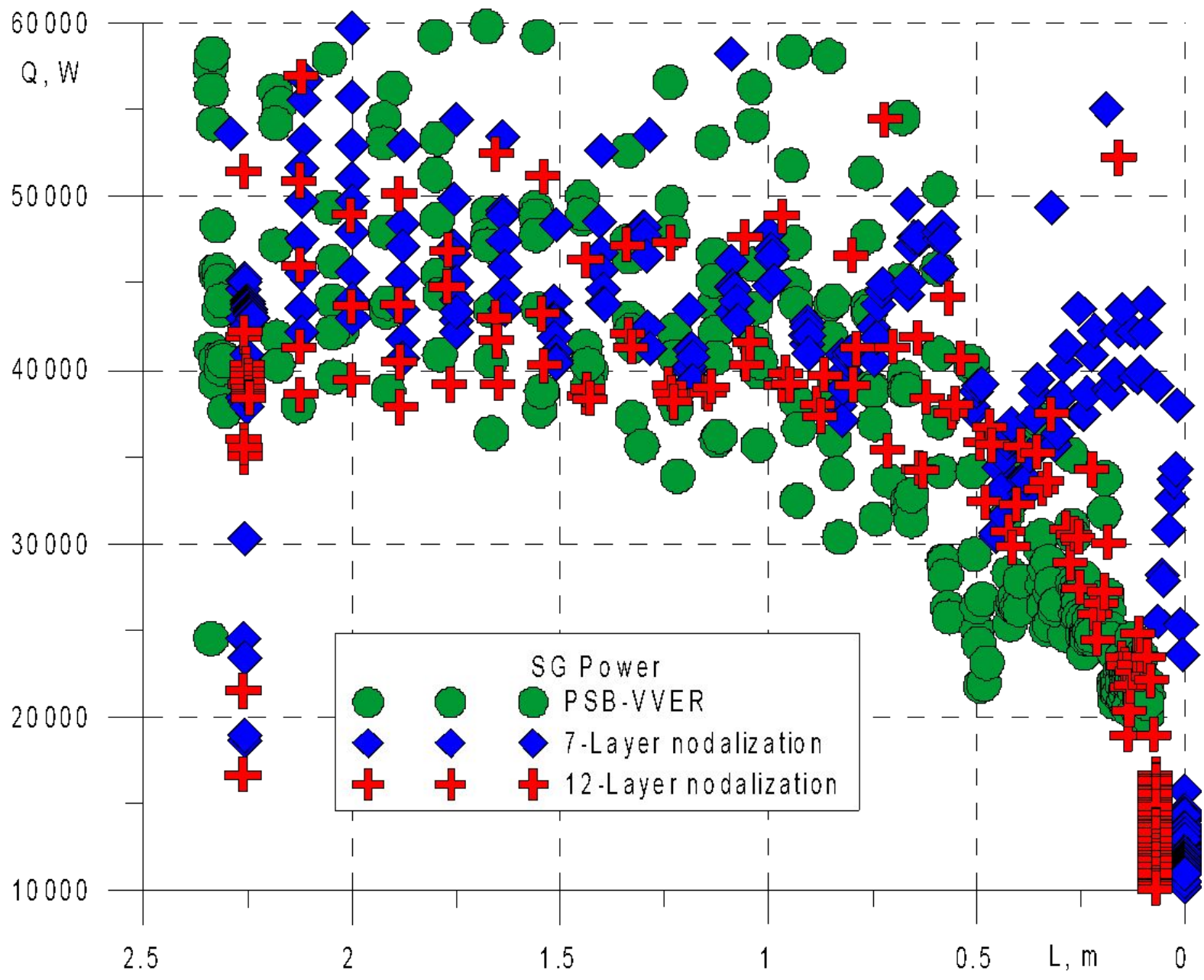


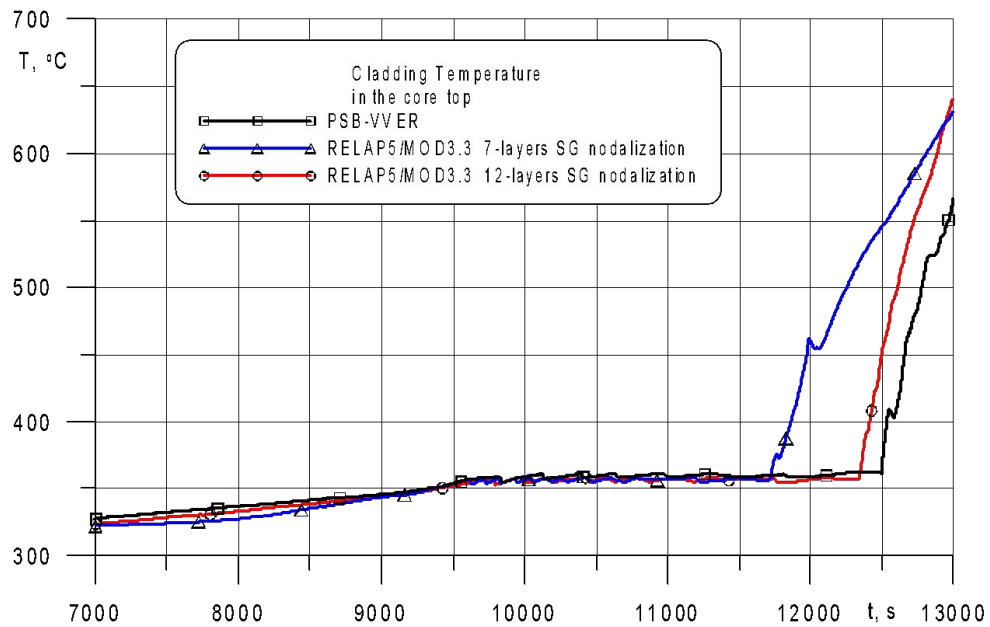
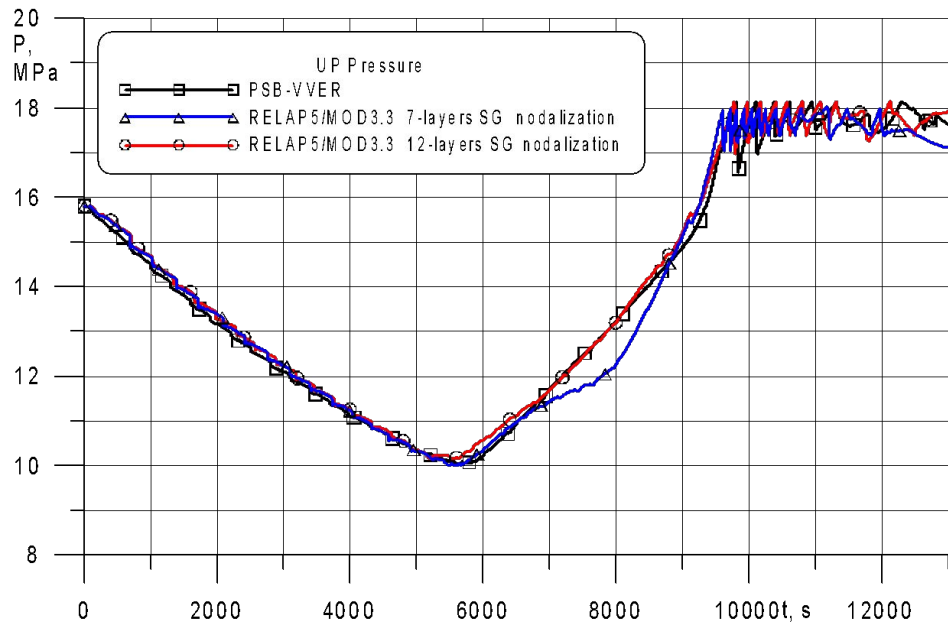


### Схема 3 12 слоев турбок

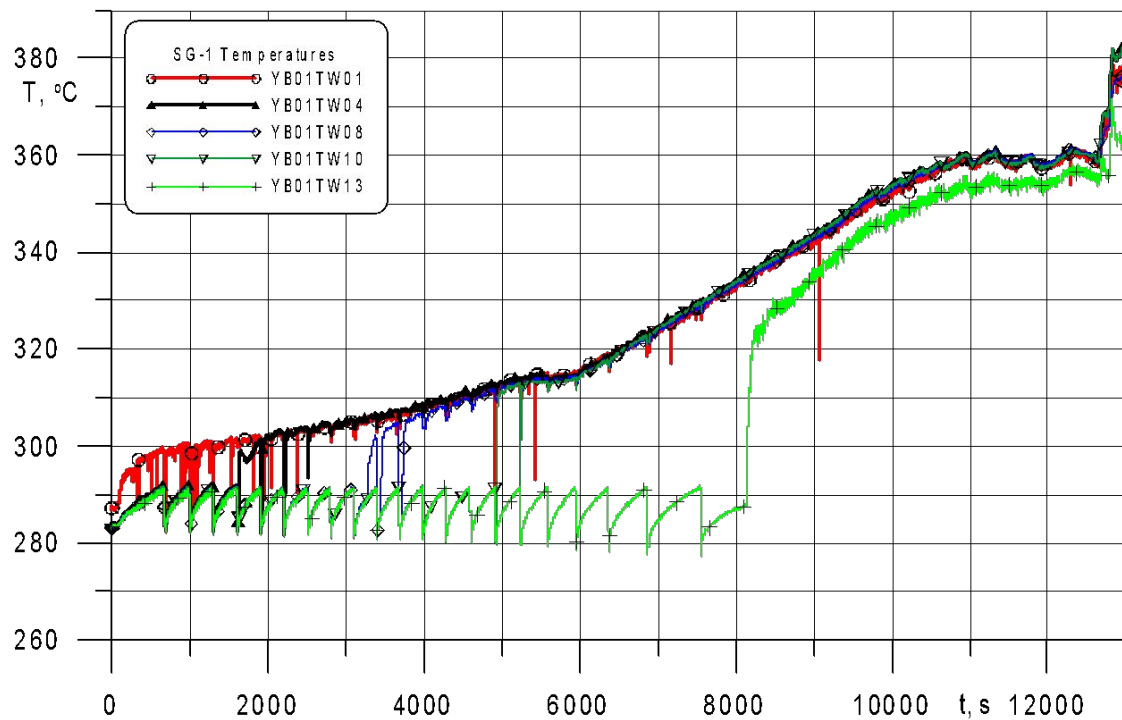
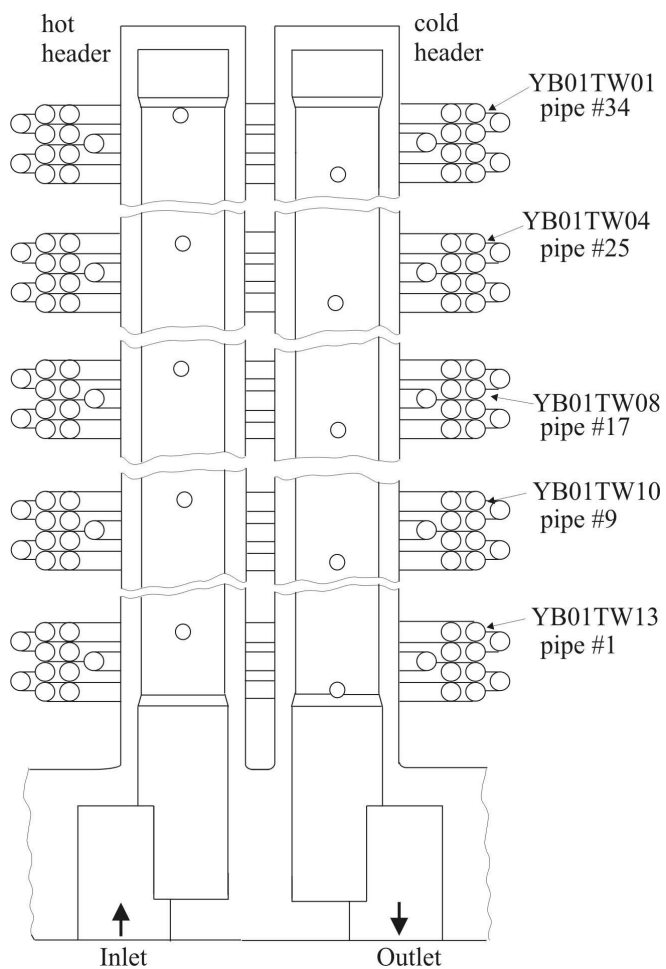




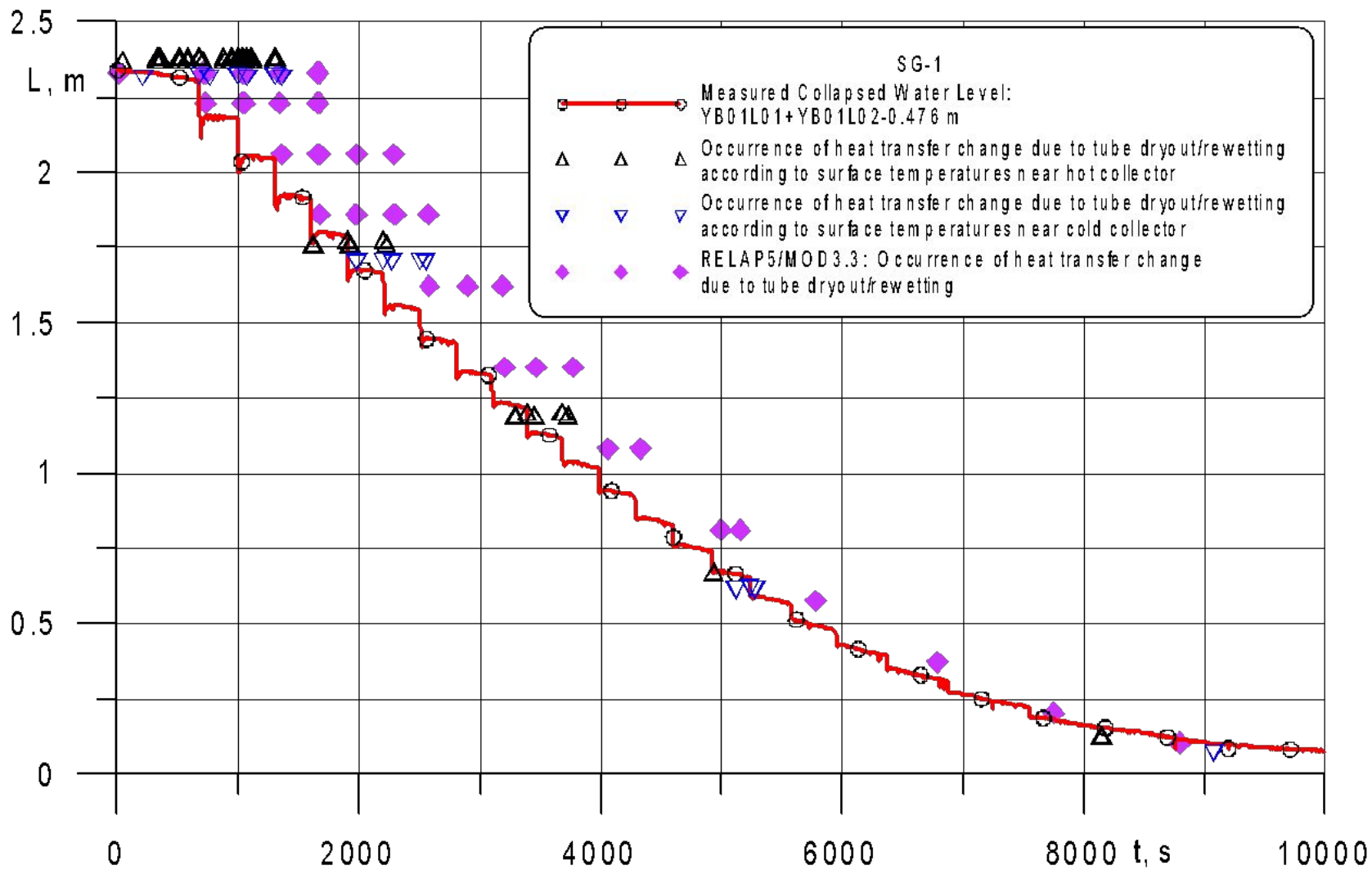




# Уровень смеси и унос в ПГ



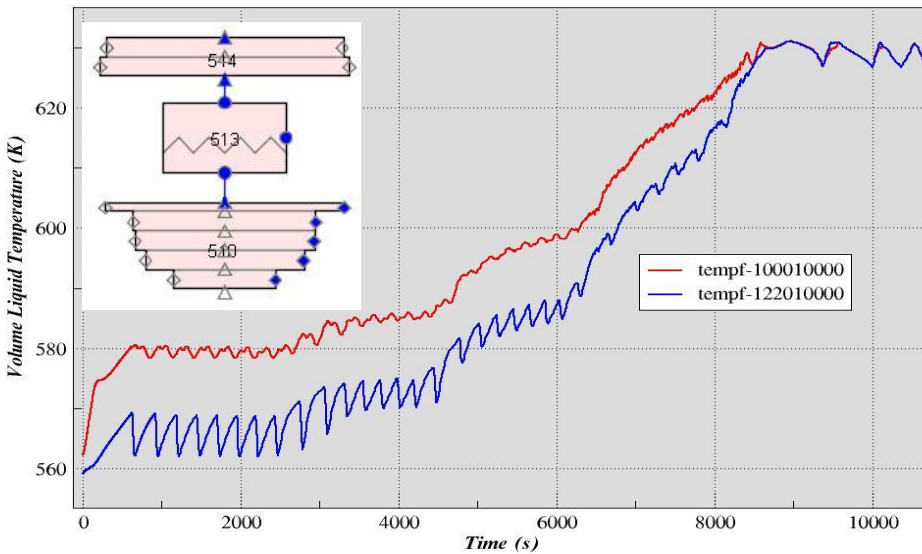
# Уровень смеси и унос в ПГ



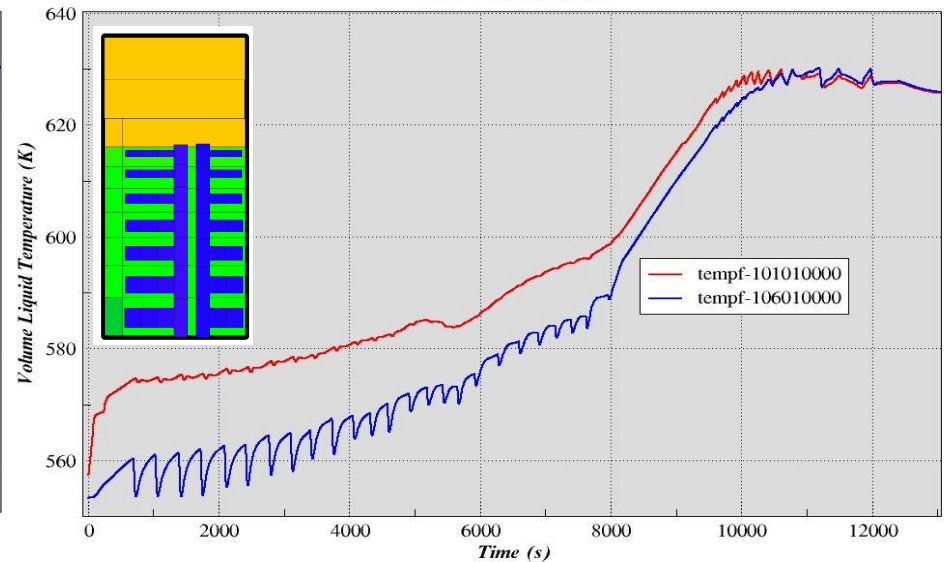
# Выводы по посттест-расчету эксперимента на стенде ПСБ-ВВЭР

- Чтобы адекватно смоделировать выкипание парогенераторов при малой мощности реактора необходимо, чтобы расчетная модель подробно описывала геометрию нижней части ПГ
- В расчете эксперимента на ПСБ-ВВЭР «Переходный режим с обесточиванием станции» нижний слой соответствовал 3% от площади теплопередающей поверхности.

RELAP5/MOD3.3 Analysis of VVER blackout transient



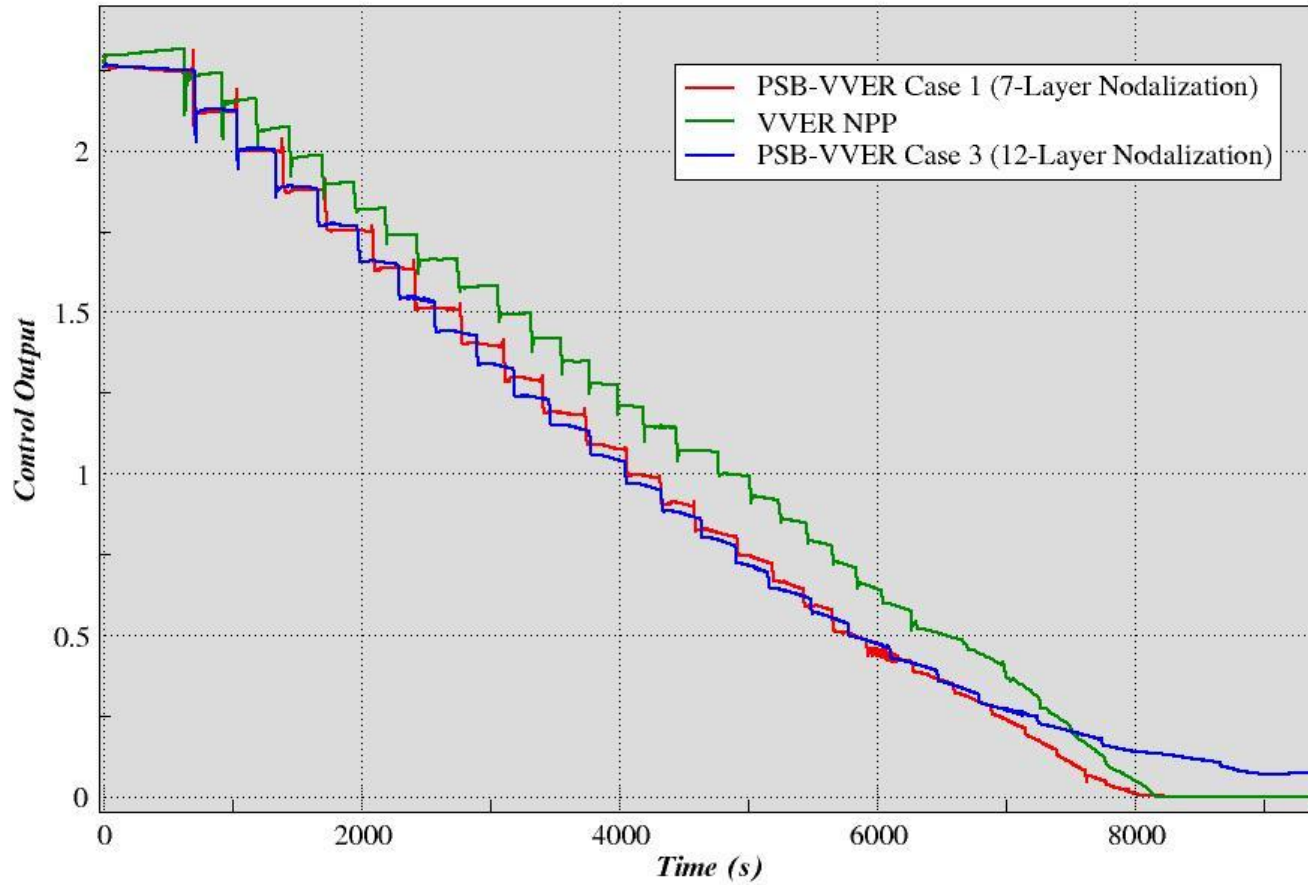
RELAP5/MOD3.3 Analysis of PSB-VVER Station Blackout Test  
Case 1 Nodalization



Анализ с помощью кода RELAP5 процесса ухудшения теплообмена в следствие уменьшения массы теплоносителя второго контура

Расчет для РУ ВВЭР и для стенда ПСБ-ВВЭР (с использованием нодализации ПГ по Схеме 1)

### SG Collapsed Water Level



## Annex

### Quantitative evaluation of accuracy



# Quantitative evaluation of accuracy

$$\Delta F(t) = F_{calc}(t) - F_{exp}(t) \quad \text{The simplest evaluation of the bias}$$

$$G(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} g(t) \cdot e^{-i \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot t} dt \quad \text{Evaluating the bias with Fourier Transforms}$$

$$G(\omega) = A(\omega) \cdot e^{i \cdot \varphi(\omega)} \quad \text{Frequency component}$$

$$G(f) = \int_0^T g(t) \cdot e^{-i \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot t} dt \quad \text{The transformation operator for a transient with duration of } T \text{ seconds}$$

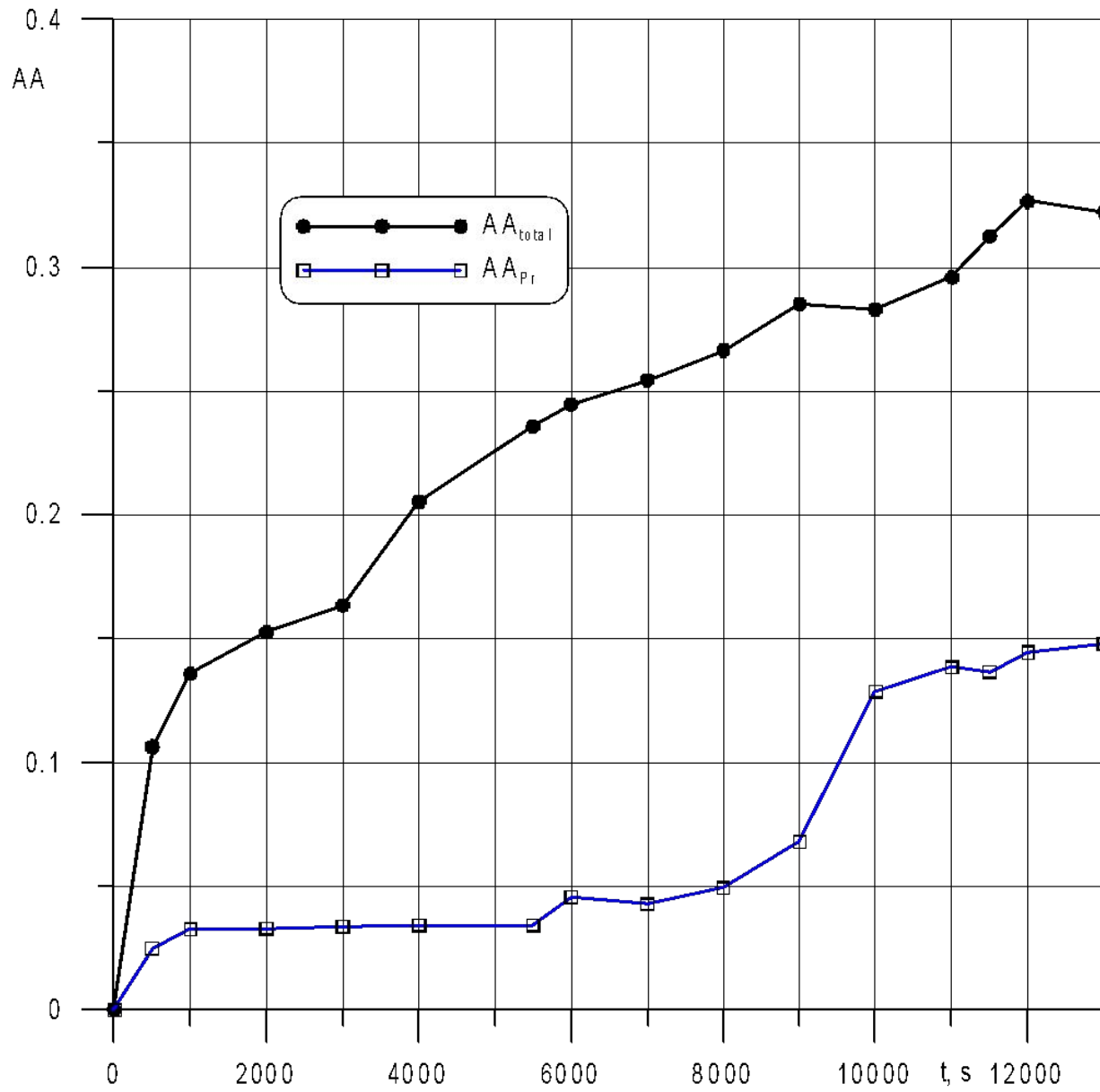
$$g(t) = \int_{-\infty}^{\infty} G(f) \cdot e^{i \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot t} df \quad \text{Reconstruction of the original (inverse transform)}$$

$$AA = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} |G_{exp}(f) - G_{calc}(f)| df}{\int_{-\infty}^{\infty} G_{exp}(f) df} \quad AA = \frac{\sum_{k=1}^N |G_{exp}(f_k) - G_{calc}(f_k)|}{\sum_{k=1}^N |G_{exp}(f_k)|} \quad \text{Average amplitude}$$

$$WF = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} |G_{exp}(f) - G_{calc}(f)| \cdot f df}{\int_{-\infty}^{\infty} G_{exp}(f) df} \quad WF = \frac{\sum_{k=1}^N |G_{exp}(f_k) - G_{calc}(f_k)| \cdot f_k}{\sum_{k=1}^N |G_{exp}(f_k) - G_{calc}(f_k)|} \quad \text{Weighted frequency}$$

$$(AA)_{tot} = \sum_{n=1}^{N_{var}} (AA)_n (w_f)_n \quad \text{Total average amplitude}$$

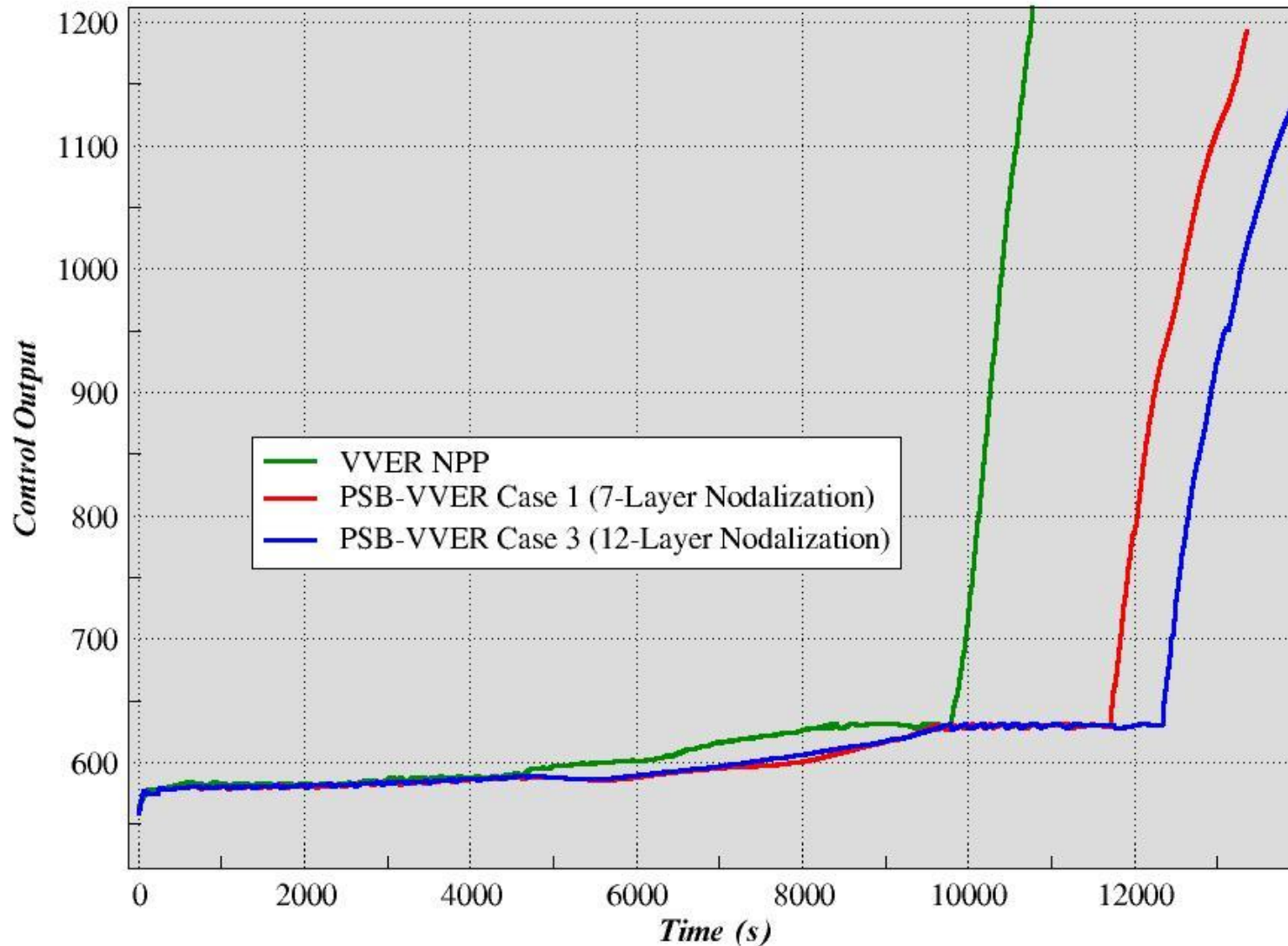
$$(WF)_{tot} = \sum_{n=1}^{N_{var}} (WF)_n (w_f)_n \quad \text{Total weighted frequency}$$

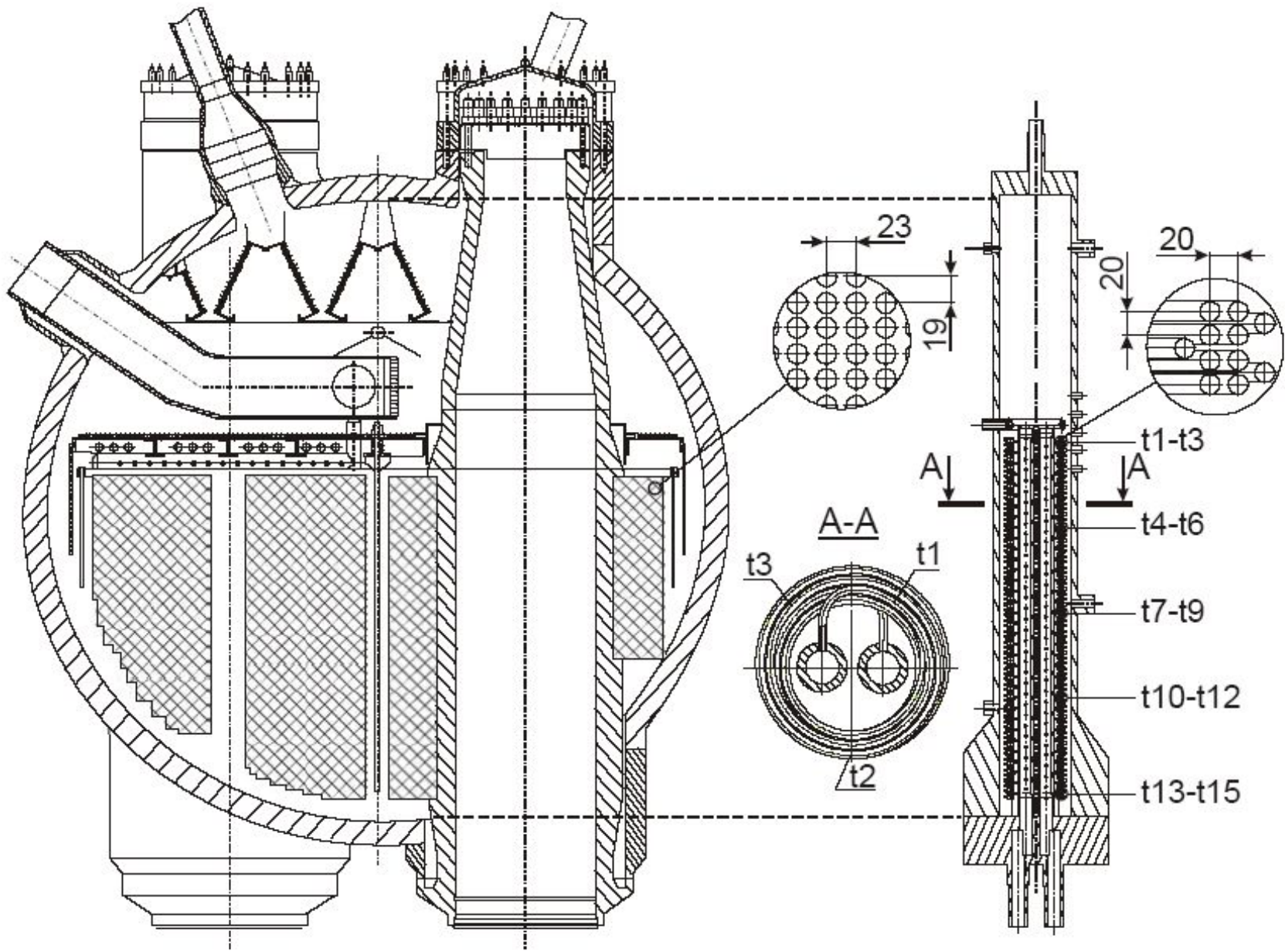


The results of the quantitative evaluation using FFT

# RELAP5 analysis of heat transfer degradation due to loss of secondary side inventory

*Maximum Cladding Temperature*





Парогенератор ПГВ-1000М и парогенератор стенда ПСБ-ВВЭР

# Критерии моделирования парогенератора

*Значения относительных коэффициентов подобия для парогенератора ПСБ-ВВЭР*

Параметр	Парогенератор р	ПГВ-1000М	Относительный коэффициент
Количество теплообменных трубок	ПСБ-ВВЭР 34	11000	1/323
Длина теплообменных трубок, м	10.66	11.1	0.96
Pitch of the tube bundle, mm (vertical/horizontal)	20/20	19/23	
Heat transfer surface (secondary side), m <sup>2</sup>	18.23	6115	1/335
Tube bundle flow area, m <sup>2</sup>	0.0045	1.46	1/324
Total height of SG vessel, m	3.94	4.0	0.98
Nominal water level (from bottom), m	2.25	2.25	1.0
Elevation of the highest heat exchange tubes, m	2.36	2.19	1.08
Volume of water in the SG secondary side, m <sup>3</sup>	0.258	66	1/256
Volume of steam in the SG secondary side, m <sup>3</sup>	0.219	58.6	1/268
SG secondary side full volume, m <sup>3</sup>	0.477	124.6	1/261
Volume of coolant inside the tubes in the primary side, m <sup>3</sup>	0.048	16.2	1/337