

Применение разработанной для ПС ATHLET модели  
реакторной установки ВВЭР-1200 Белорусской АЭС  
для анализа безопасности при авариях с потерей  
теплоносителя при большой течи

**Шапоров В.А., Шапорова Е.А.**

Объединенный институт энергетических и ядерных исследований –  
“Сосны” НАН Беларуси

## Введение:

- в соответствии с установившейся практикой и рекомендациями международной организации по атомной энергетике детерминистический анализ безопасности (ДАБ) проводится с привлечением специализированных компьютерных кодов по нейтронной физике, теплогидравлике, прочности и радиационным явлениям
- для полномасштабного моделирования динамики энергоблоков АЭС применяются специально созданные комплексы программ
- один из классов таких программ составляют термогидравлические коды

## Введение:

### ПС ATHLET (Analysis of the THERmal-hydraulics of LEaks and Transients)

- Данный программный продукт является термогидродинамическим системным реалистическим кодом, с помощью которого можно моделировать термогидродинамические процессы в контурах легководных реакторов в широком диапазоне режимов работы, включая проектные и запроектные аварии без плавления топлива.
- Код ATHLET входит в состав ПС ATHLET/BIPR-VVER, так же имеющего аттестационный паспорт, выданный НИЦ «Курчатовский институт» 24.10.2018 (годен до 24.10.2028), в котором сказано, что данное ПС предназначен для согласованного нейтронно-физического и теплогидравлического расчета переходных и аварийных процессов в реакторных установках с ВВЭР.

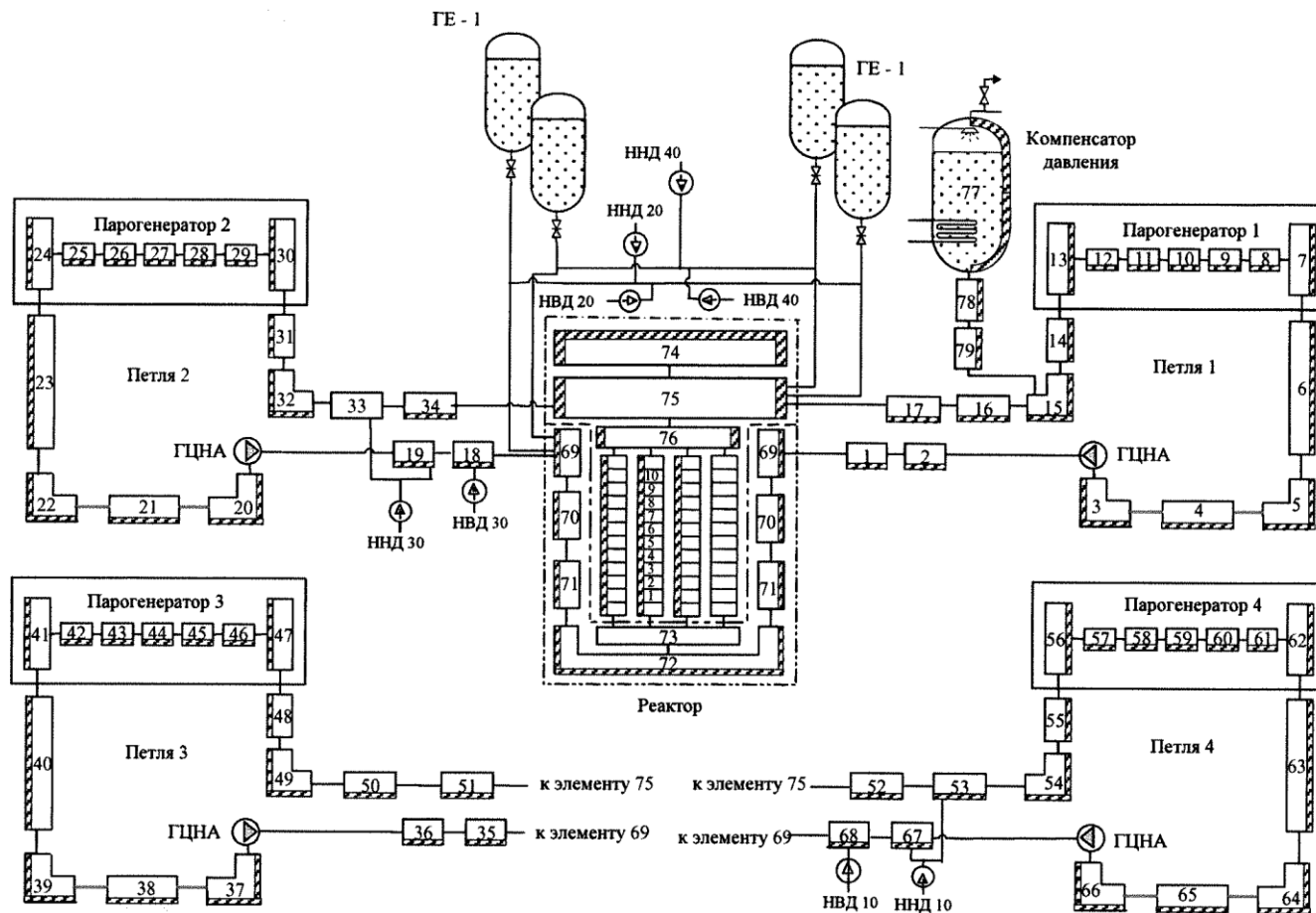
## Цели работы:

- разработать файл входных данных для программного средства ATHLET провести моделирование переходных процессов при проектной и запроектной аварии, вызванной потерей теплоносителя при большой течи;
- проверить выполнение критериев безопасности по температуре топлива и оболочки твэла реакторной установки Белорусской АЭС при рассматриваемых авариях.

В ОООб анализ аварии выполнен с помощью программы  
ТЕЧЬ-М-97 (входит в состав ТРАП-КС)



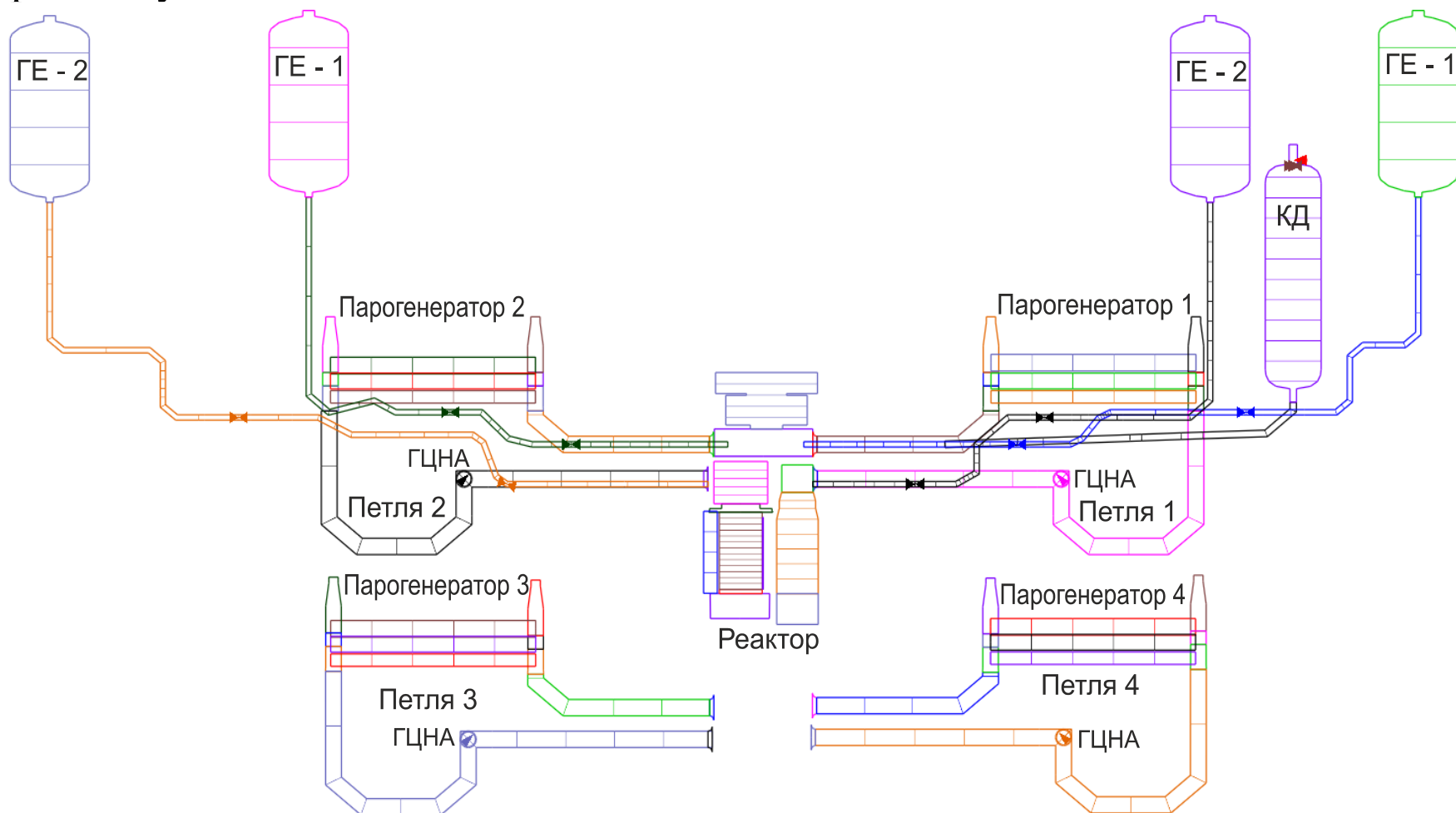
- Расчетная схема первого контура, используемая в программе ТЕЧЬ-М-97



# Файл входных данных для ПС ATHLET



- В основе данного файла лежат теплогидравлические модели основных элементов оборудования РУ ВВЭР-1200, интегрированные в единую расчетную модель.



Расчетная схема первого контура

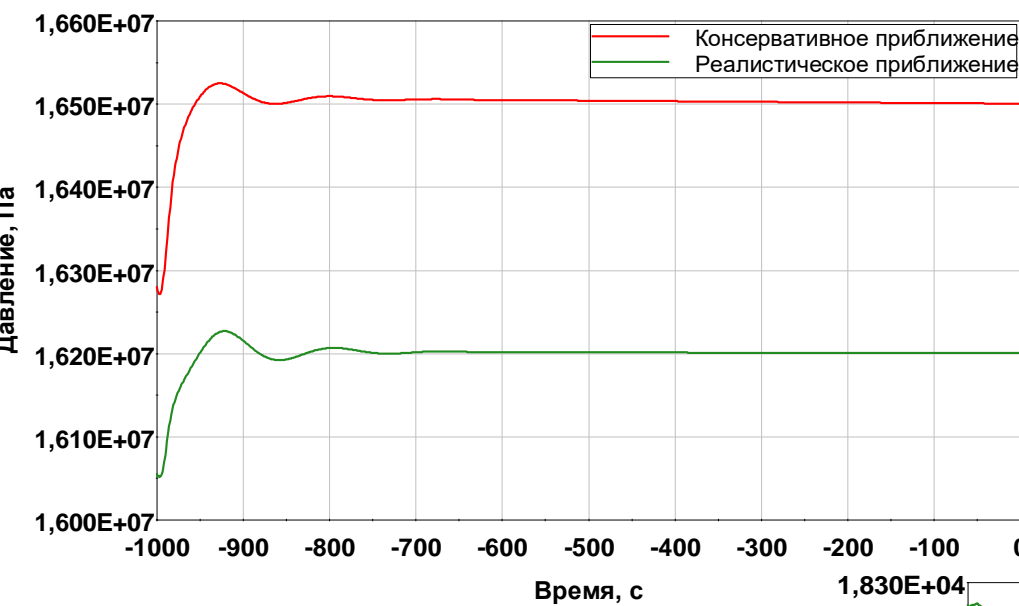
# Сравнение результатов моделирования стационарного состояния «работа на мощности» в консервативном приближении

№ п/п	Наименование	Расчетное значение	Проектное значение	Отклонение от проектного значения
1	Тепловая мощность реактора при максимальном положительном отклонении, МВт	3328	3200	4% N <sub>НОМ</sub>
2	Давление теплоносителя на выходе из активной зоны, МПа	16,5	16,2±0,3	0,3
3	Температура теплоносителя на входе в реактор, °С	300,2	298,2 (+2, -4)	2,0
4	Температура теплоносителя на выходе из реактора, °С	332,0	328,6±4	4,0
5	Расход теплоносителя через реактор, кг/с	17637,0	18260 (+436, -623)	623,0
6	Давление генерируемого пара на выходе из коллектора пара ПГ, МПа	7,10	7,00±0,10	0,1
7	Температура питательной воды при максимальном положительном отклонении мощности, °С	230,0	225±5	5,0
8	Уровень теплоносителя в ПГ, м	2,7	2,7±0,05	0,0
9	Уровень смешения в КД, м	8,17	8,17±0.15	0,0
10	Перепад давления на участке от входных патрубков до входа в хвостовики ТВС, МПа	0,179	0,208	0,029
11	Перепад давления на активной зоне, МПа	0,202	0,194	0,008
12	Перепад давления на участке межтрубного объема БЗТ, МПа	0,029	0,030	0,001
13	Перепад давления на реакторе (без входных и выходных патрубков), МПа	0,433	0,432	0,001

# Сравнение результатов моделирования стационарного состояния «работа на мощности» в реалистическом приближении

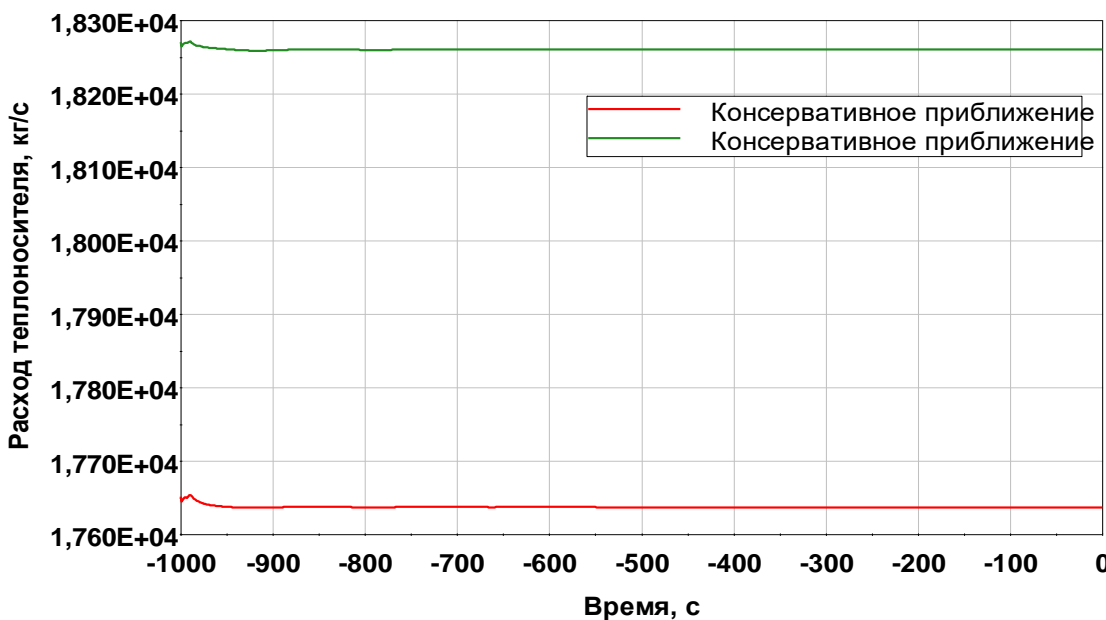
№ п/п	Наименование	Расчетное значение	Проектное значение	Отклонение от проектного значения
1	Тепловая мощность реактора при максимальном положительном отклонении, МВт	3200	3200	0,0
2	Давление теплоносителя на выходе из активной зоны, МПа	16,2	16,2±0,3	0,0
3	Температура теплоносителя на входе в реактор, °С	298,2	298,2 (+2, -4)	0,0
4	Температура теплоносителя на выходе из реактора, °С	328,3	328,6±4	0,3
5	Расход теплоносителя через реактор, кг/с	18260	18260 (+436, -623)	0,0
6	Давление генерируемого пара на выходе из коллектора пара ПГ, МПа	7,0	7,00±0,10	0,0
7	Температура питательной воды при максимальном положительном отклонении мощности, °С	225	225±5	0,0
8	Уровень теплоносителя в ПГ, м	2,7	2,7±0,05	0,0
9	Уровень смещения в КД, м	8,17	8,17±0.15	0,0
10	Перепад давления на участке от входных патрубков до входа в хвостовики ТВС, МПа	0,180	0,208	0,028
11	Перепад давления на активной зоне, МПа	0,201	0,194	0,007
12	Перепад давления на участке межтрубного объема БЗТ, МПа	0,030	0,030	0,0
13	Перепад давления на реакторе (без входных и выходных патрубков), МПа	0,432	0,432	0,0

# Сравнение результатов моделирования стационарного состояния «работа на мощности» в реалистическом и консервативном приближениях



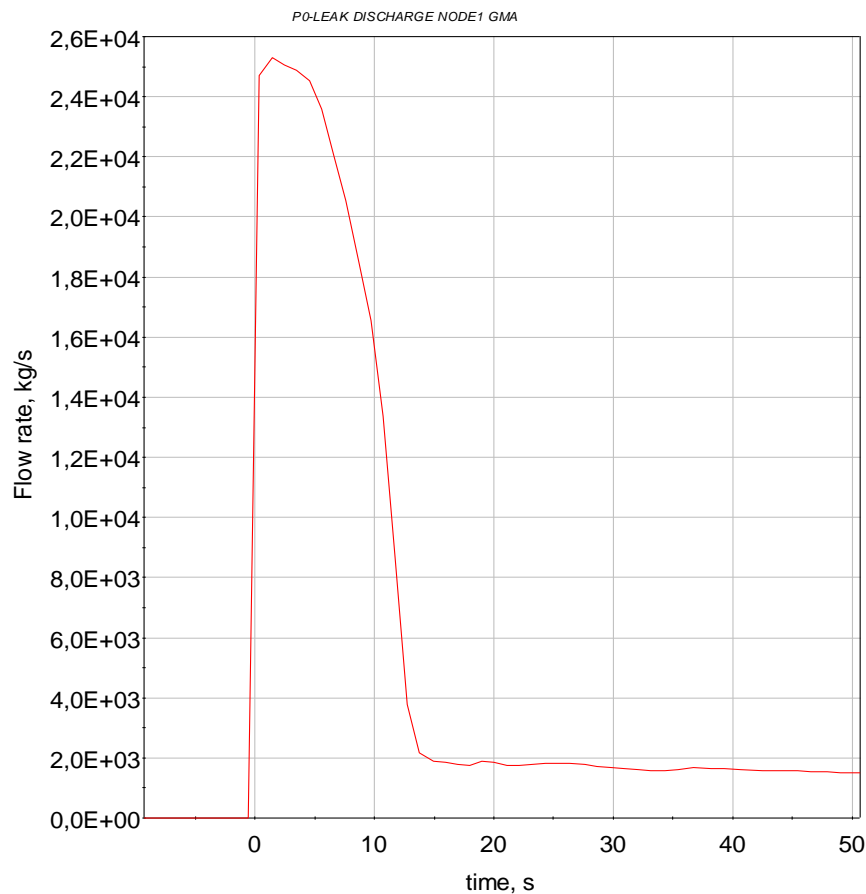
Давление теплоносителя на выходе из активной зоны

## Расход теплоносителя через реактор



Результаты моделирования запроектной аварии с большой течью (Ду 250 мм) теплоносителя из холодной нитки с наложением отказа активной части САОЗ

Начало аварии отсчитывается с 0 с, когда возникает течь

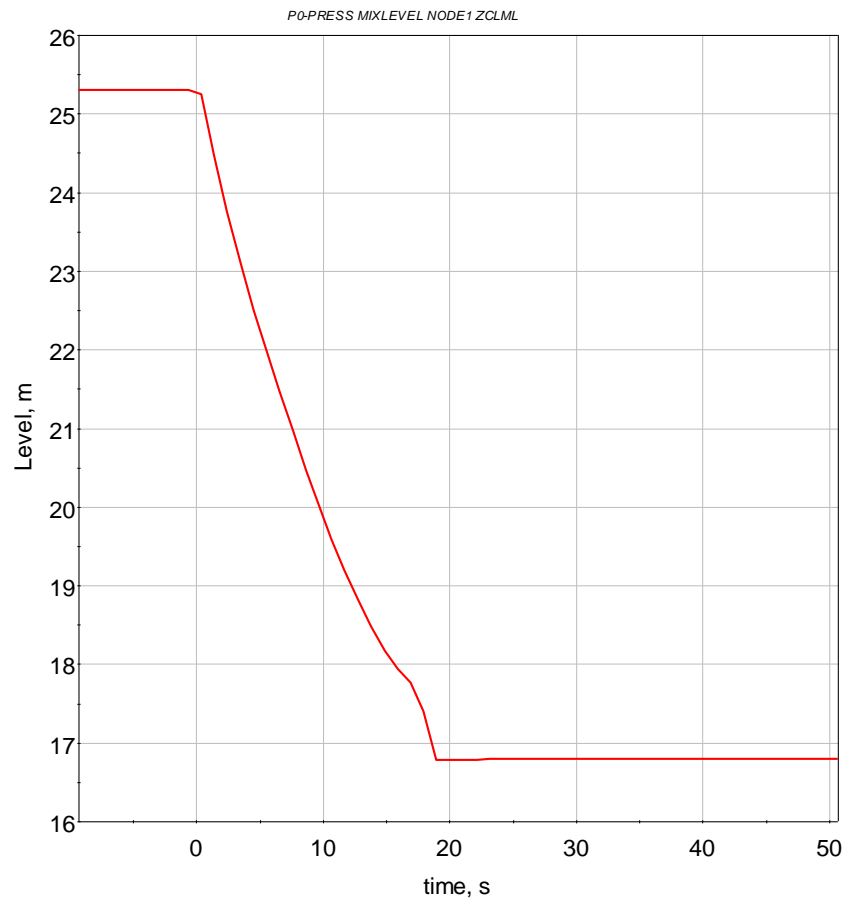


Скорость истечения пароводяной смеси через отверстие течи

# Результаты моделирования запроектной аварии



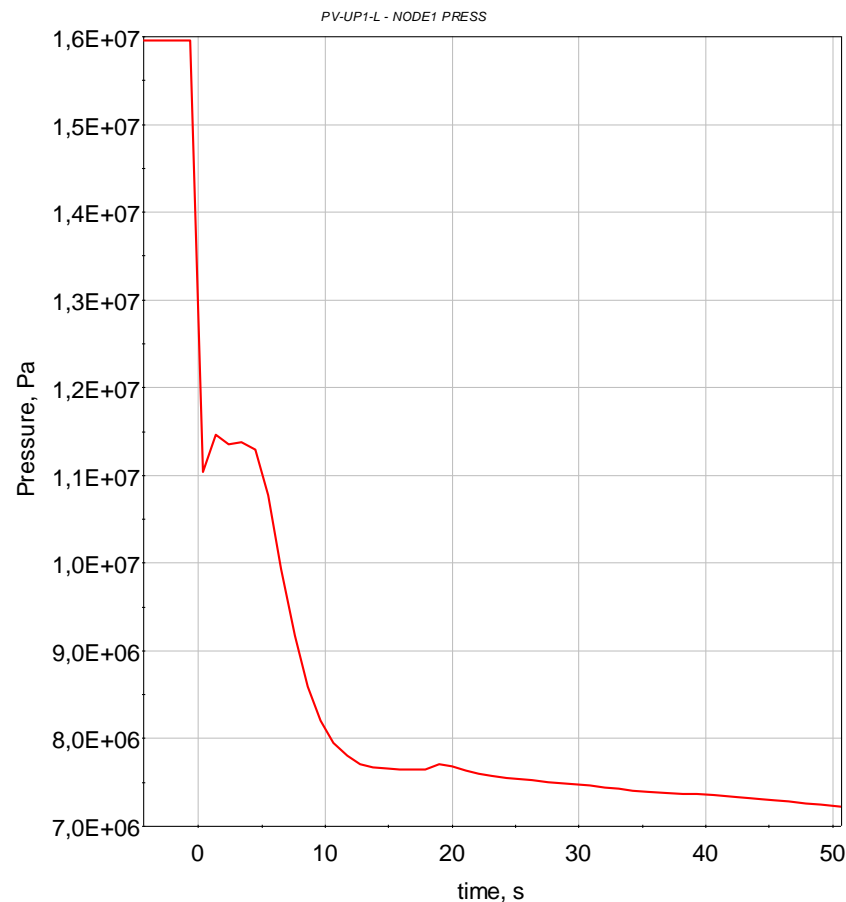
Одновременно с возникновением течи начинает падать уровень в КД



# Результаты моделирования запроектной аварии

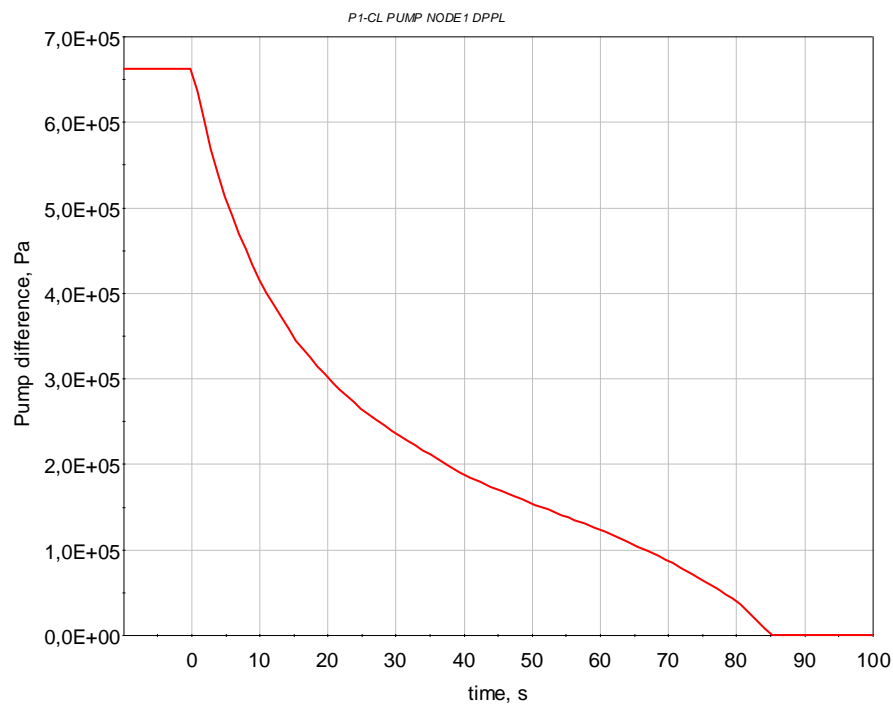
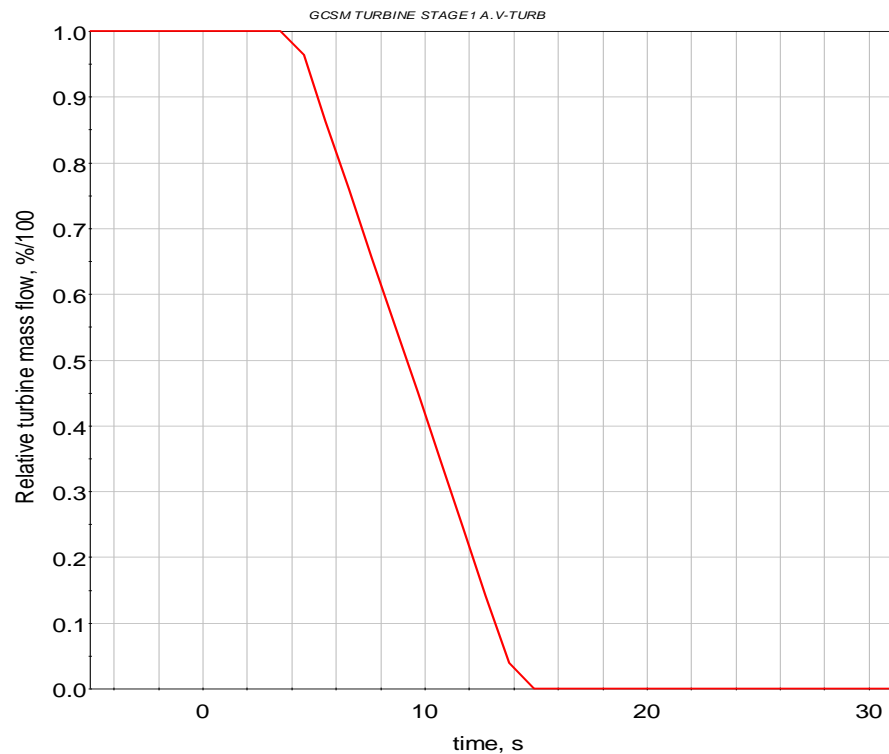


Начинается быстрое падение давления в первом контуре и давление над активной зоной падает ниже 14.2 МПа, что приводит к срабатыванию АЗ реактора.



# Результаты моделирования запроектной аварии

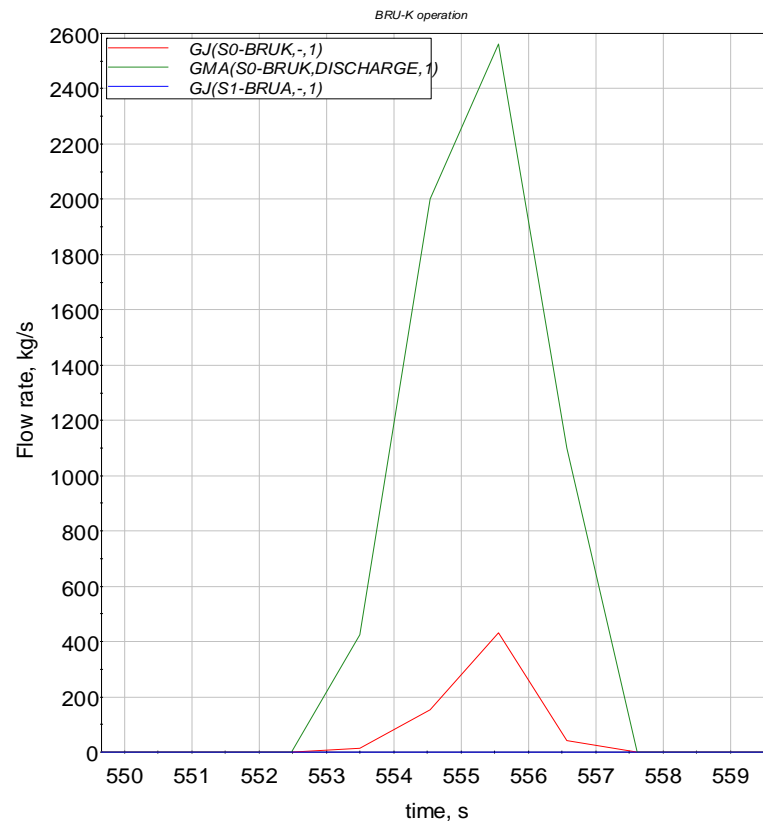
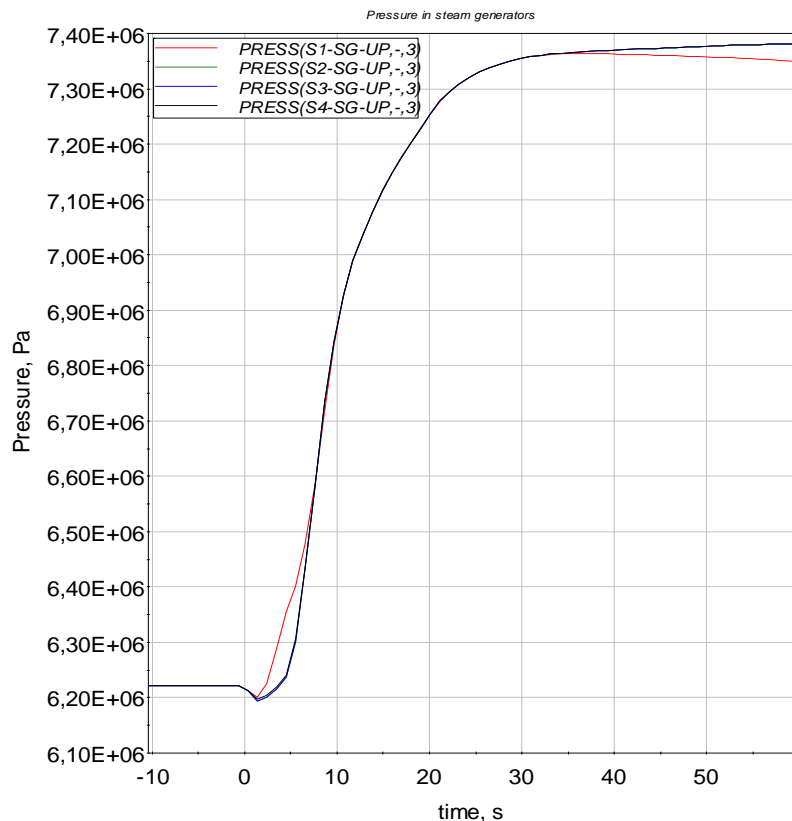
После срабатывания АЗ спустя 4 с подается сигнал на закрытие  
стопорного клапана турбины



Изменение напора ГЦНА

# Результаты моделирования запроектной аварии

Когда стопорный клапан турбины закрывается, давление пара в парогенераторах начинает увеличиваться. Клапан БРУ-К открывается при достижении давления 7,4 МПа, сбрасывая излишки произведенного пара в конденсатор турбины. Клапан открывается через 553 с и закрывается через 557 с, когда давление падает ниже 6,92 МПа.

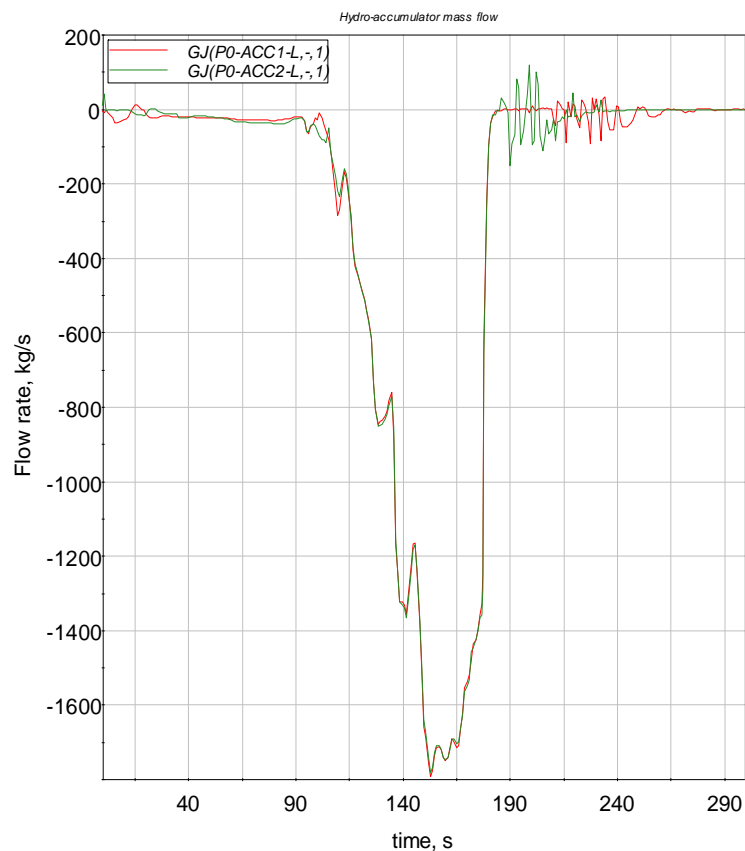


Изменение давления в парогенераторах

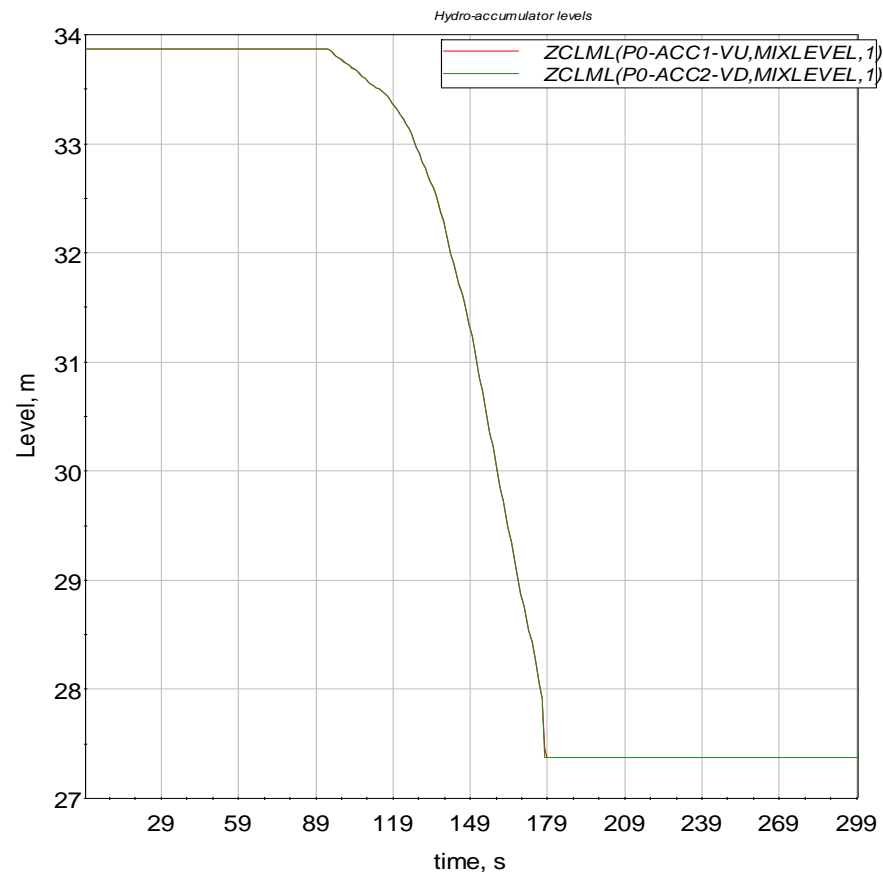
Расход теплоносителя через БРУ-А и БРУ-К: красная кривая: расход через БРУ-К; голубая кривая: расход через БРУ-А; зеленая кривая: критическое истечение через БРУ-К

# Результаты моделирования запроектной аварии

Когда давление в точках соединения трубопроводов гидроемкостей САОЗ падает ниже 5,88 МПа, раствор борной кислоты начинает вытекать из этих сосудов



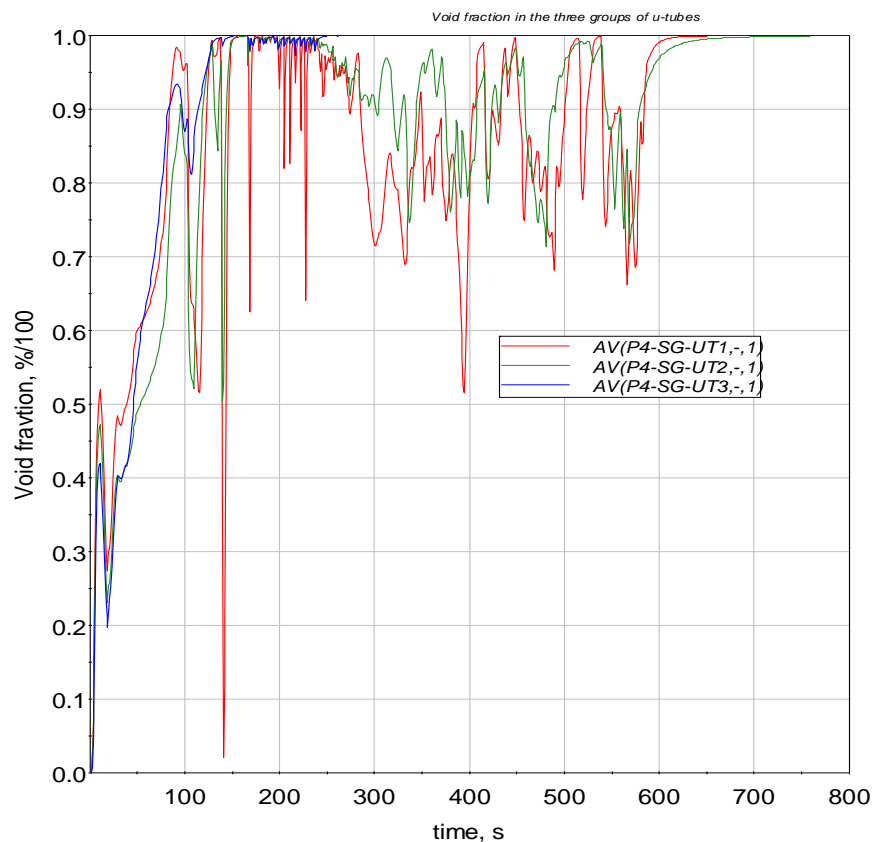
Расход теплоносителя из гидроемкостей САОЗ



Изменение уровня теплоносителя в гидроемкостях САОЗ

# Результаты моделирования запроектной аварии

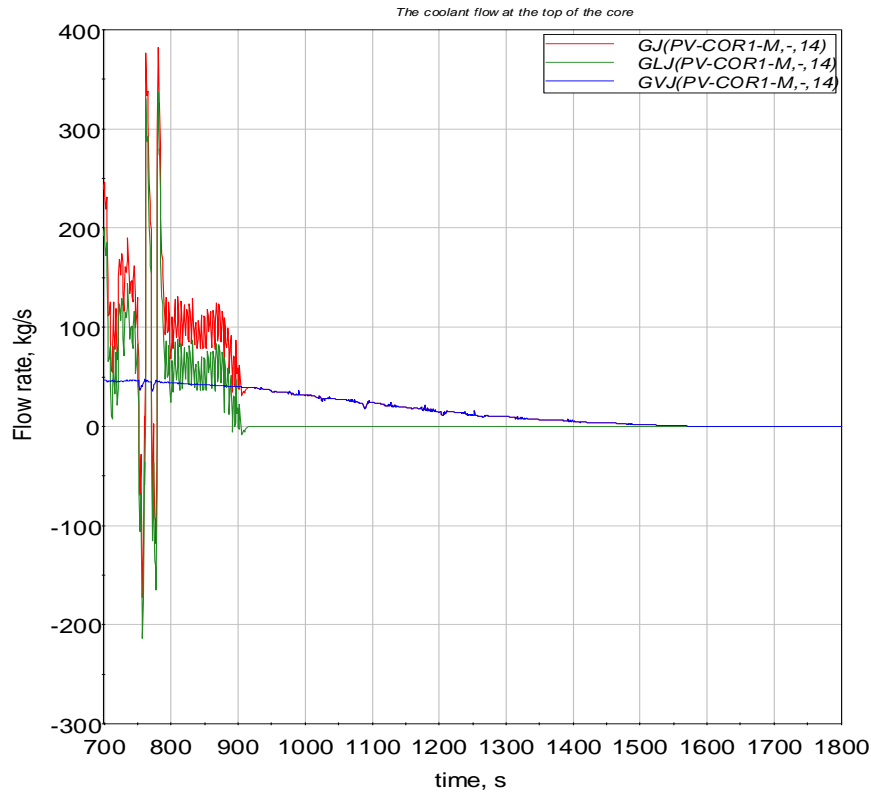
к 750-й секунде U-образные трубки парогенератора полностью высыхают



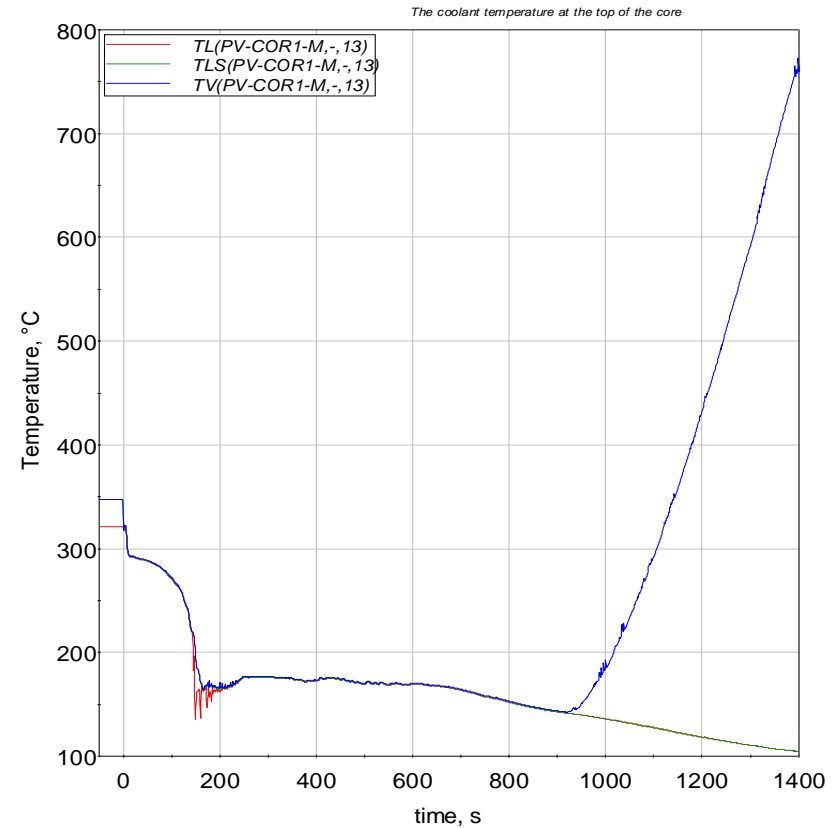
Доля пара в трех группах U-образных трубок парогенератора

## Результаты моделирования запроектной аварии

массовый расход жидкости в верхней части активной зоны за 900-ю секунду составляет 0 кг/с, что указывает на начало процесса осушения активной зоны; температура пара начинает резко возрастать, что приведет к возникновению пароциркониевой реакции, а затем к плавлению топливных стержней



Расход теплоносителя в активной зоне

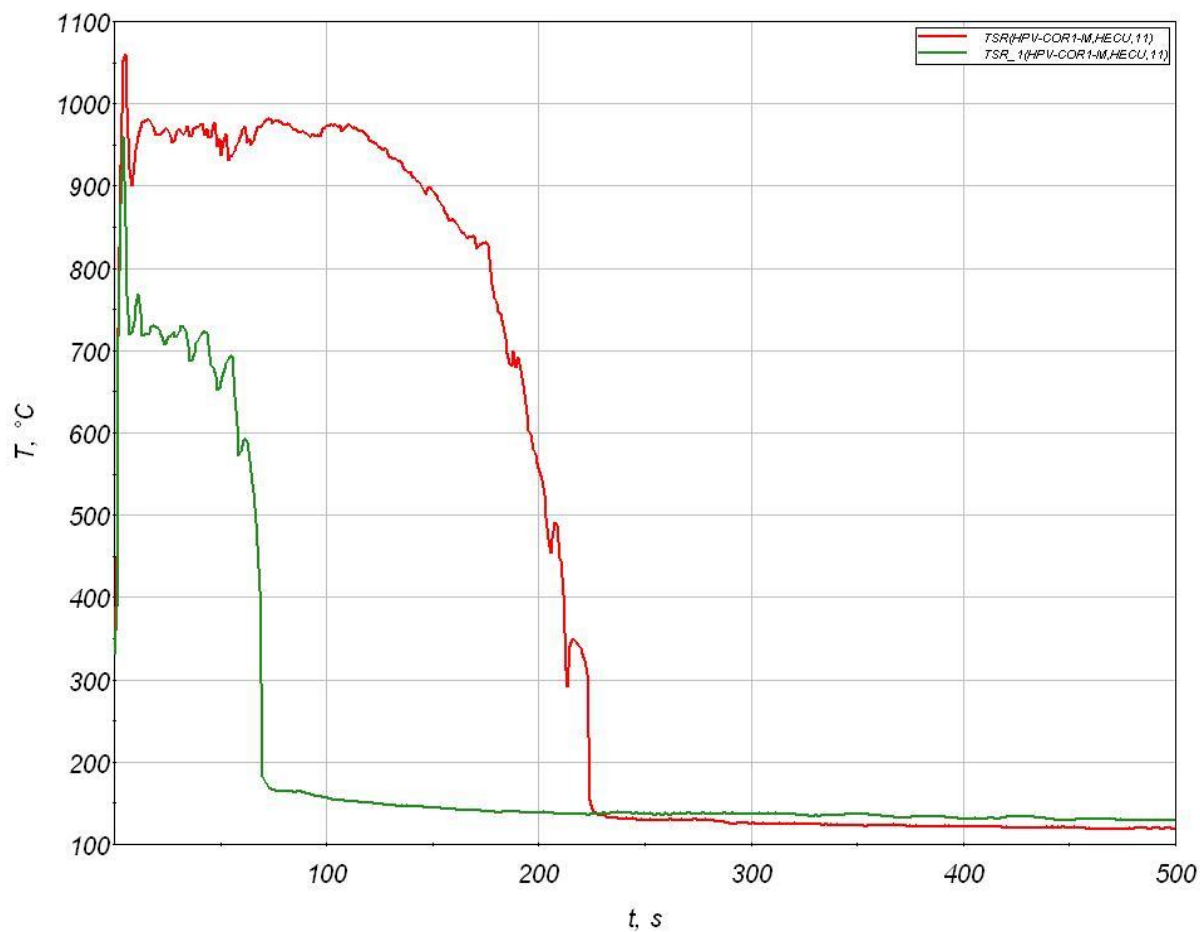


Температура теплоносителя в активной зоне

# Анализ изменения температуры оболочки ТВЭлов при проектной аварии с большой течью теплоносителя из холодной нитки на входе в реактор с двухсторонним истечением

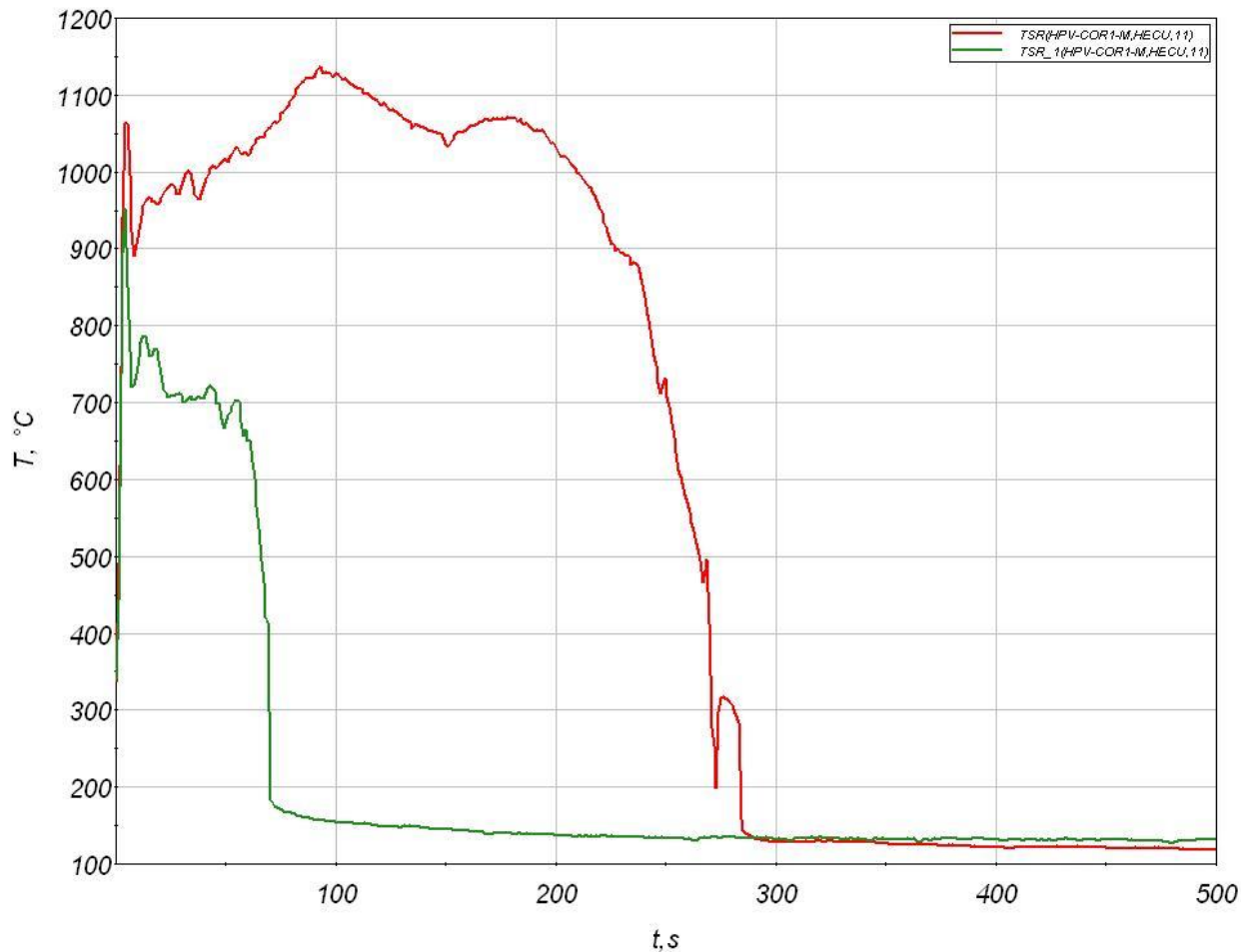
- С помощью нового файла исходных данных был выполнен расчет переходных процессов, возникающих при разрыве главного циркуляционного трубопровода (Ди 850 мм) на входе в реактор с двухсторонним истечением для различных коэффициентов расхода в течь 1.0 и 0.6.
- Расчетные значения максимальной температуры оболочки ТВЭлов:
  - ❑  $(T_{об})_{\max} = 1060^{\circ}\text{C}$  ( $1050^{\circ}\text{C}$  в ОООб) (при  $\mu = 1.0$ ),
  - ❑  $(T_{об})_{\max} = 960^{\circ}\text{C}$  ( $936^{\circ}\text{C}$  в ОООб) (при  $\mu = 0.6$ ).
- Расчетные значения максимальной температуры оболочки ТВЭлов при условии отказа работы одной из ГЕ САОЗ (вариант 4 ОООб) :
  - первый пик –  $T_{об\max} = 1063^{\circ}\text{C}$  ( $1050^{\circ}\text{C}$  в ОООб),
  - второй –  $T_{об\max} = 1135^{\circ}\text{C}$  (при  $\mu = 1.0$ ),  $T_{об\max} = 953^{\circ}\text{C}$  (при  $\mu = 0.6$ ).

# Анализ изменения температуры оболочки твэла при проектной аварии с течью теплоносителя из холодной нитки



Максимальная температура оболочки твэла при  $\mu = 1.0$  (красная кривая) и  $\mu = 0.6$  (зеленая кривая)

# Анализ изменения температуры оболочки твэла при проектной аварии с течью теплоносителя из холодной нитки



Максимальная температура оболочки твэла при  $\mu = 1.0$  (красная кривая) и  $\mu = 0.6$  (зеленая кривая) при условии отказа работы одной из ГЕ САОЗ (вариант 4 ОООб)

Спасибо за внимание!