

УДК 004.942

## ДИВЕРСИФИКАЦИЯ ШТАТНОЙ СИСТЕМЫ РАСХОЛАЖИВАНИЯ АЭС С РЕАКТОРНОЙ УСТАНОВКОЙ ВВЭР-1200 В РЕЖИМЕ АВАРИИ, ВЫЗВАННОЙ РЕДКИМ ВНЕШНИМ СОБЫТИЕМ (DEC C)

*В. В. Безлепкин, Е. П. Образцов, Д. Р. Альтбреген, Д. В. Капица, М. В. Гаврилов,  
В. Б. Козлов, Э. Г. Ахмедов*

АО «Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт энергетических технологий "АТОМПРОЕКТ", Санкт-Петербург

В рамках проработки решения по применению диверсной схемы по отношению к штатной системе расхолаживания реакторной установки (РУ) для режимов DEC C (авария, вызванная редким внешним событием) рассматривается возможность реализации схемы водо-водяного расхолаживания РУ от 130 до 70 °С системами второго контура энергоблока.

Для возможности осуществления данного решения в состав второго контура энергоблока включается система ЛАН-2, обеспечивающая охлаждение теплоносителя второго контура (вода).

Для перехода к расхолаживанию РУ через второй контур необходим подготовительный этап, включающий прогрев трубопроводов и оборудования систем второго контура, задействованных при реализации режима, а также заполнение парогенераторов (ПГ) и трубопроводов теплоносителем второго контура («затопление»).

В докладе приводятся результаты расчета переходного режима от расхолаживания РУ через систему пассивного отвода тепла через ПГ (СПОТ ПГ) к расхолаживанию РУ через второй контур. Расчет включает в себя подготовительный этап и начало процесса расхолаживания РУ в водо-водяном режиме.

Моделирование данного режима работы энергоблока осуществляется на средствах программно-технического комплекса «Виртуальный энергоблок» (ПТК «ВЭБ») в программном комплексе SimInTech с использованием расчетных программных средств (ПС) КОРСАР и ТРР (Thermal Power Plant).

*Ключевые слова:* аварийный режим, АЭС, виртуальный энергоблок, естественная циркуляция, расхолаживание, реакторная установка.

В современных проектах АЭС, с целью повышения их безопасности, рассматривается широкий спектр различных режимов работы станций. Режим расширенного проектирования DEC C это аварийный режим работы, вызванный редким внешним событием.

Решение о разработке диверсной схемы по отношению к штатной схеме расхолаживания РУ (системы JNA/JNG-1 – системы отвода остаточного тепла и аварийного впрыска низкого давления) обусловлено сценарием падения большого коммерческого самолета на здание безопасности UKD. Компоновка зданий ядерного острова представлена на рис. 1.

Данный сценарий (рис. 2) предусматривает возможность удара с «западной» и «южной» сторон. С «северной» и «восточной» сторон здание безопасности обеспечивается теневой защитой (здания UJA и UKA соответственно).

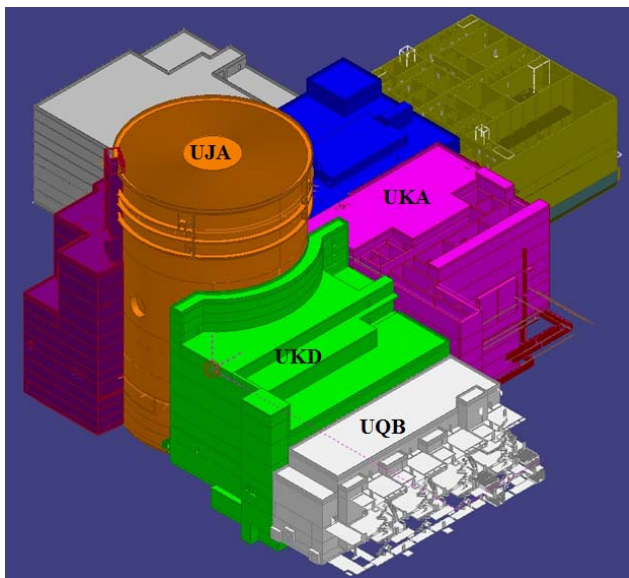


Рис. 1. Компоновка зданий ядерного острова (UJA – здание реактора, UKD – здание безопасности, UKA – вспомогательный корпус, UQB – здание насосной станции ответственных потребителей)

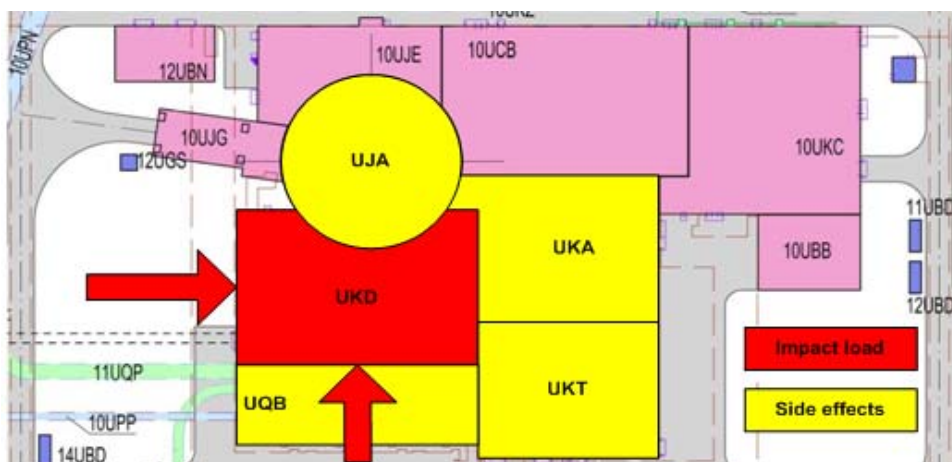


Рис. 2. Схема сценария удара самолета в здание безопасности UKD

Реализация данного сценария предполагает следующую цепочку развития событий:

- здание безопасности UKD разрушено, системы безопасности неработоспособны, системы КАА / КАВ (КАА – промежуточный охлаждающий контур систем важных для безопасности, КАВ – промежуточный охлаждающий контур систем важных для эксплуатации) неработоспособны;
- целостность первого контура не нарушена;
- неработоспособность систем КАА/КАВ приводит к отключению всех главных циркуляционных насосных агрегатов (ГЦНА);
- отключение ГЦНА приводит к формированию сигнала аварийной защиты (АЗ); параметры первого контура после срабатывания АЗ: давление 16,1 МПа, температура 280 °С;
- расхолаживание РУ от 280 до 130 °С осуществляется через систему JNB (СПОТ ПГ) со скоростью 15 °С/час при одновременном борировании первого контура системой КВА (система заполнения и регулирования объема);
- через 72 часа (3 суток) с момента срабатывания АЗ необходимо перейти к расхолаживанию РУ от 130 до 70 °С через штатную систему расхолаживания РУ (JNA / JNG-1), часть оборудования и трубопроводов этих систем размещена в здании безопасности UKD, которое разрушено.

Диверсная схема водо-водяного расхолаживания РУ от 130 до 70 °С должна обеспечить выполнение функций штатной системы в случае её неработоспособности.

Схема водо-водяного расхолаживания (рис. 3) включает в себя существующие элементы систем второго контура (LBA – система трубопроводов свежего пара, LAA – деаэратор питательной воды, LAN / LAJ – система вспомогательной питательной воды, LAB – система трубопроводов питательной воды), а так же новые элементы (объединены в систему LAN - 2), замыкающие перечисленные системы в единый контур охлаждения.

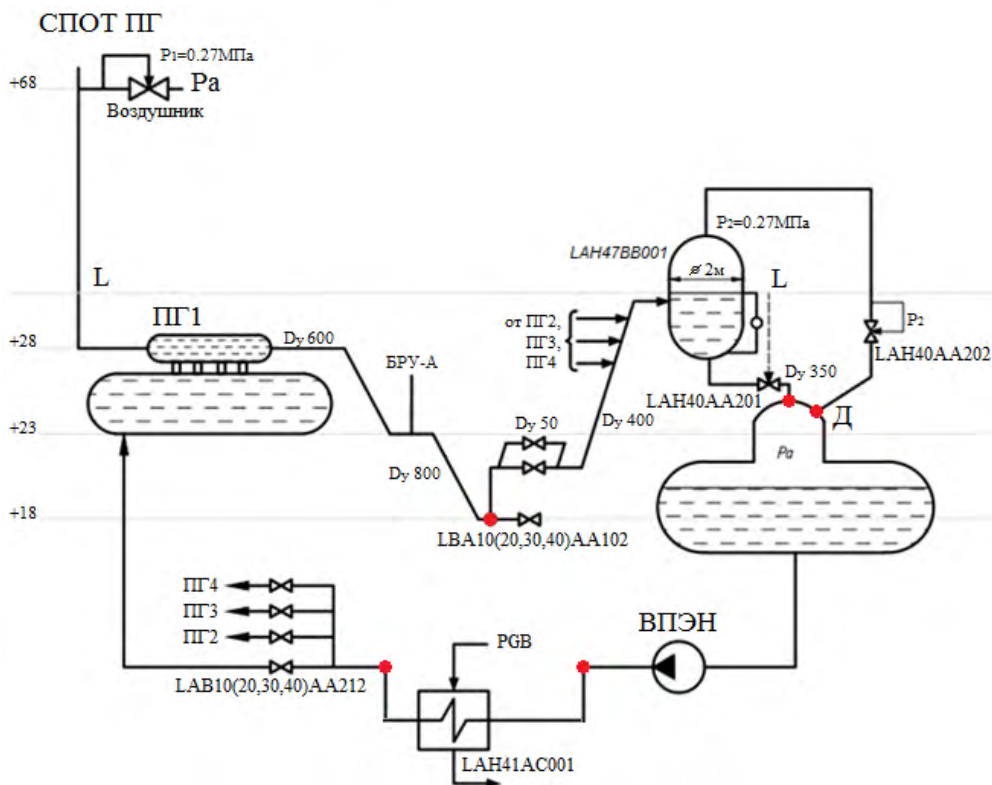


Рис. 3. Принципиальная схема расхолаживания РУ через системы второго контура

#### Принцип работы схемы расхолаживания:

Вспомогательным питательным насосом (ВПЭН) осуществляется подача воды из корпуса деаэратора в трубопровод системы питательной воды, в который осуществлена врезка трубопровода системы LAN-2. По этому трубопроводу вода подается на теплообменник LAN41AC001 (охлаждающая среда – вода системы PGB – промконтур охлаждения неотвественных потребителей). За теплообменником вода возвращается в систему питательной воды и через группу регулирующих клапанов подается на парогенераторы. В ПГ происходит теплообмен между теплоносителями первого и второго контура. Нагретая вода через трубопроводы систем LBA и LAN-2 подается в бак LAN47BB001, откуда сливается обратно в деаэратор.

Для перехода на расхолаживание через систему LAN-2 необходим подготовительный этап, который заключается в заполнении ПГ, части паропроводов системы свежего пара (LBA) и системы LAN-2 водой. При этом осуществляется поддержание номинального уровня в корпусе деаэратора второго контура за счет его подпитки от баков LCU (LCU – система подпиточной воды).

Бак LAN47BB001 предназначен для исключения возможности возникновения конденсационных гидравлических ударов на подготовительном этапе путем разделения пара и воды и недопущения образования паровых пробок, что невозможно реализовать при прямом сливе воды в деаэратор, так как в существующей компоновке высотная отметка установки деаэратора ниже высотной отметки парогенераторов.

Цель работы – на основе численного моделирования оценить работоспособность диверсной схемы расхолаживания РУ на всех этапах её функционирования. Для достижения данной цели поставлены и решены следующие задачи:

- моделирование подготовительного этапа с целью подтверждения возможности «затопления» систем второго контура без конденсационных гидравлических ударов;
- моделирование этапа расхолаживания РУ от 130 °С с контролем и фиксацией теплогидравлических параметров теплоносителя;
- подтверждение наличия стабильной естественной циркуляции теплоносителя первого контура при расхолаживании по водо-водяной схеме.

Разработка модели диверсной схемы расхолаживания РУ осуществлена на средствах программно-технического комплекса «Виртуальный энергоблок» (ПТК «ВЭБ») в программной среде SimInTech.

Первый контур, а так же часть контура охлаждения от ПГ до деаэратора моделируются с помощью расчетного ПС улучшенной оценки КОРСАР (рис. 4). Часть контура охлаждения от деаэратора (включая деаэратор) до входа в ПГ моделируются с помощью расчетного ПС ТРР (рис. 5).

Связь между моделями осуществляется путем обмена теплогидравлическими параметрами теплоносителя второго контура в граничных узлах, моделирующих точки разрыва контура охлаждения.

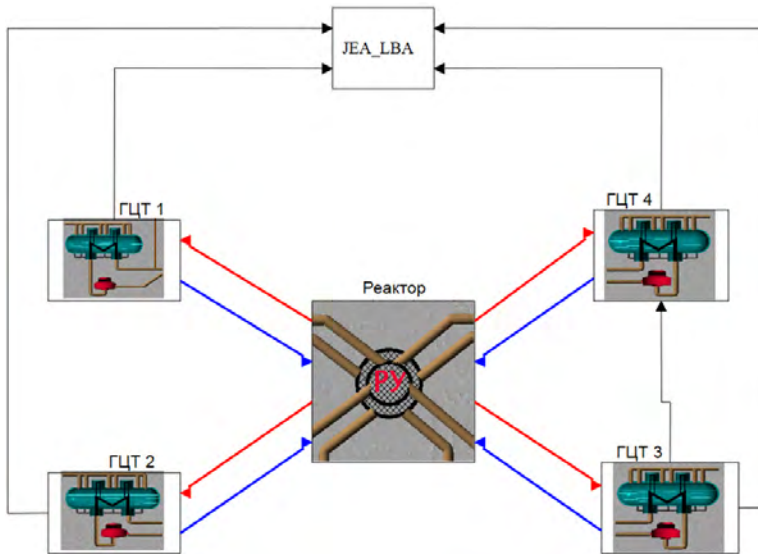


Рис. 4. Модель первого контура

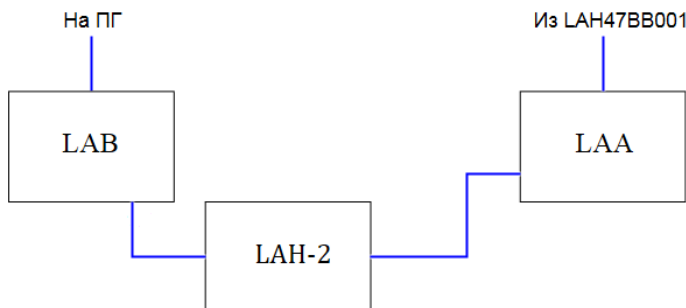


Рис. 5. Модель второго контура

Этап расхолаживания РУ от 280 до 130 °С в расчете не моделируется, исходное состояние модели задается путем определения начальных значений теплогидравлических параметров теплоносителя. На момент начала расчета циркуляция теплоносителя в первом контуре отсутствует.

Начальное значение остаточных тепловыделений активной зоны (а. з.) задается равным 14.08 МВт, что соответствует 72 часам с момента срабатывания АЗ. В модель заложена зависимость величины остаточных тепловыделений от времени, которая задана путем линейной интерполяции по известным точкам (рис. 6).

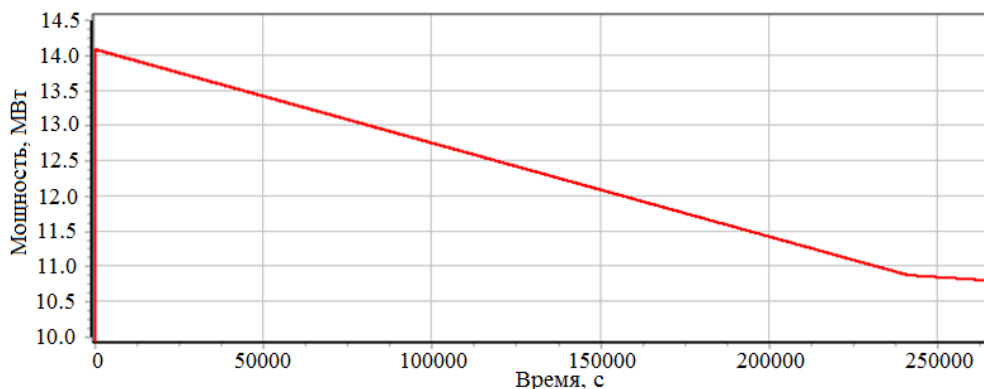


Рис. 6. Мощность остаточных тепловыделений а. з.

Начальные параметры первого контура: температура теплоносителя 130 °С, давление над а. з. 1,5 МПа.

Начальные параметры второго контура: уровень воды в ПГ 3,7 м, температура воды в ПГ 130 °С, давление в ПГ 0,27 МПа (соответствует давлению насыщения при 130 °С).

### 1) Расчет подготовительного этапа и начала расхолаживания через диверсную схему.

#### Сценарий расчета:

Первые 500 секунд расчетного времени отводятся на установление естественной циркуляции теплоносителя первого контура. Воздушники СПОТ ПГ поддерживают давление 0,27 МПа в паропроводах СПОТ ПГ.

Далее в работу вступает ВПЭН, подающий воду из деаэратора в ПГ, и регулирующие клапаны на входе в ПГ, обеспечивающие поддержание номинального уровня в ПГ (3,7 м). Открываются задвижки на прогревочных линиях ЛАН - 2 – пар из ПГ поступает в трубопроводы ЛАН-2 и бак ЛАН47ВВ001 – происходит их прогрев, по окончании которого происходит открытие основных линий ЛАН-2.

Регулирующие клапаны на входе в ПГ переходят в режим поддержания постоянного расхода 7,5 кг/с (30 кг/с на четыре ПГ суммарно). Клапан ЛАН40АА202 включается в работу и, аналогично воздушникам СПОТ ПГ, поддерживает давление 0,27 МПа перед собой (т. е. в баке ЛАН47ВВ001).

Затопление трубопроводов отслеживается в расчете путем контроля значения величины паросодержания в контрольных ячейках. Контрольные точки выбраны исходя из трассировок трубопроводов и указаны на рис. 7.

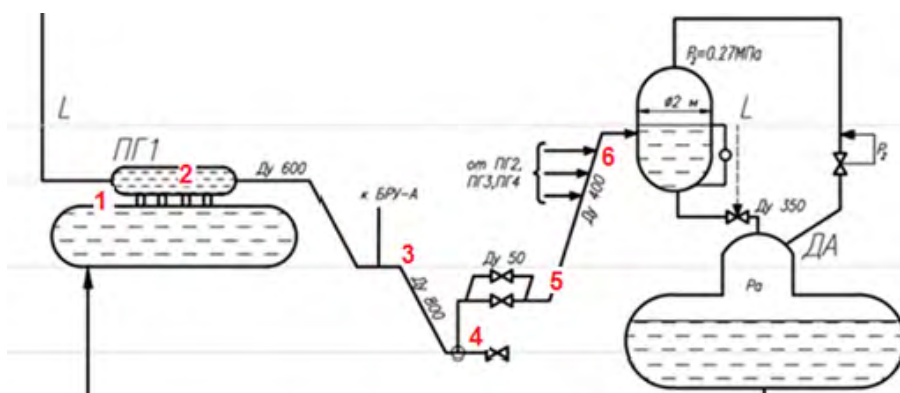


Рис. 7. Схема контроля затопления паропроводов свежего пара

При достижении в баке уровня 1,7 м включается в работу клапан ЛАН40АА201, который поддерживает номинальный уровень (2,0 м) в баке.

При достижении номинального уровня в баке ЛАН47ВВ001 и открытия линии слива теплоносителя второго контура в деаэратор подготовительный этап завершен. Регулирующие клапаны на входе в ПГ переходят на режим поддержания постоянного расхода 12,5 кг/с (50 кг/с на четыре ПГ суммарно) и начинается этап расхолаживания.

#### Результаты расчета:

На рис. 8 представлен график затопления контрольных точек трубопроводов системы (в соответствии с рис. 7).

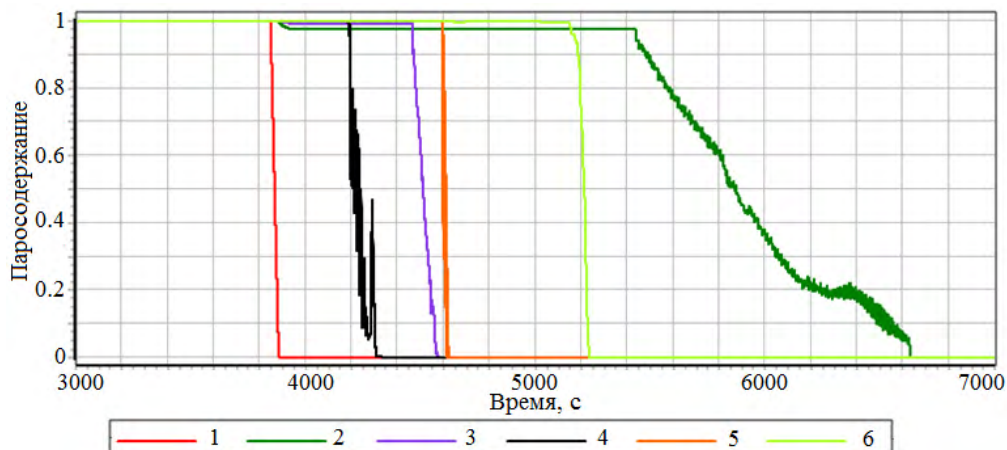


Рис. 8. Паросодержание в контрольных точках

Затопление трубопроводов происходит последовательно, в соответствии с высотными отметками контрольных точек и без выраженных пульсаций и ударов.

Одним из главных условий для возникновения конденсационных гидроударов является недогрев воды относительно пара, критические значения которого равны 15 °С и больше. Значение расхода питательной воды на подготовительном этапе выбран таким, чтобы процесс заполнения ПГ и паропроводов происходил водой, близкой к состоянию насыщения. Благодаря этому удастся избежать конденсационных гидроударов, возникающих при контакте пара с холодной жидкостью.

Наиболее вероятный участок, в котором могут происходить конденсационные гидроудары при заполнении – паровой коллектор ПГ. На рис. 9 – 11 представлены графики изменения паросодержания, температуры и давления в паровых коллекторах четырех ПГ. Как видно из результатов расчета, при заполнении вода находится при температуре близкой к температуре насыщения (момент времени от 3500 до 7000 секунд). Температура воды начинает существенно снижаться только после полного заполнения паропроводов (после 10000 секунд).

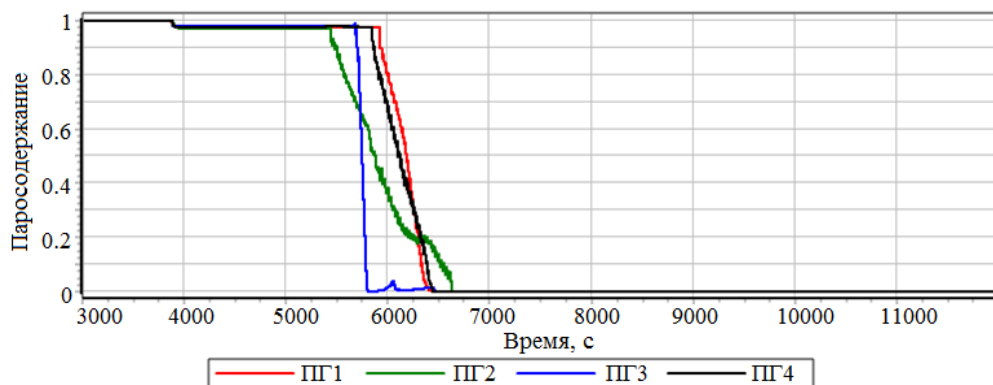


Рис. 9. Паросодержание в коллекторах ПГ

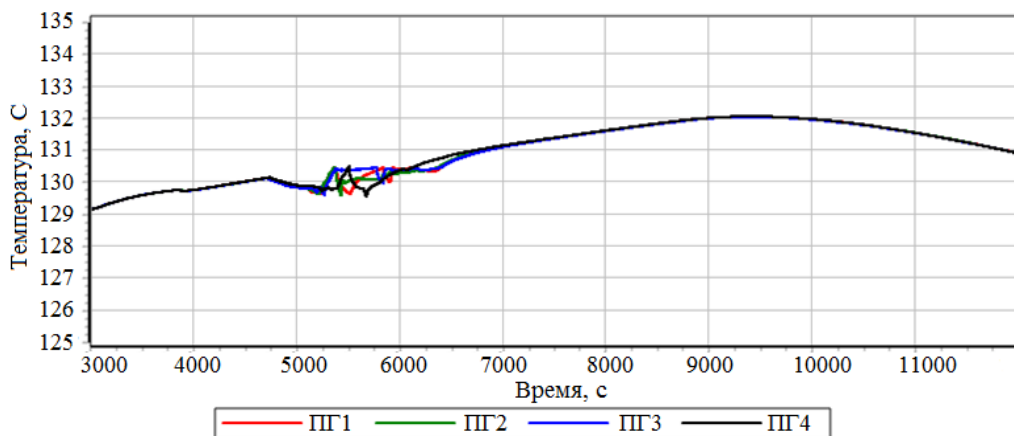


Рис. 10. Температура в коллекторах ПГ

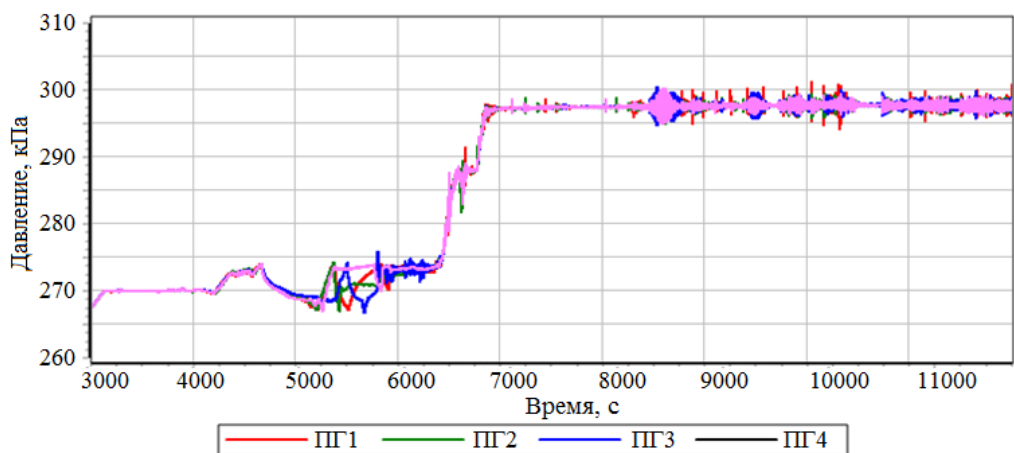


Рис. 11. Давление в коллекторах ПГ

По окончании подготовительного этапа, не останавливая расчет, осуществляется переход к этапу расхолаживания. На рис. 12 представлен график изменения температуры теплоносителя первого контура перед и за активной зоной реактора в процессе расхолаживания.

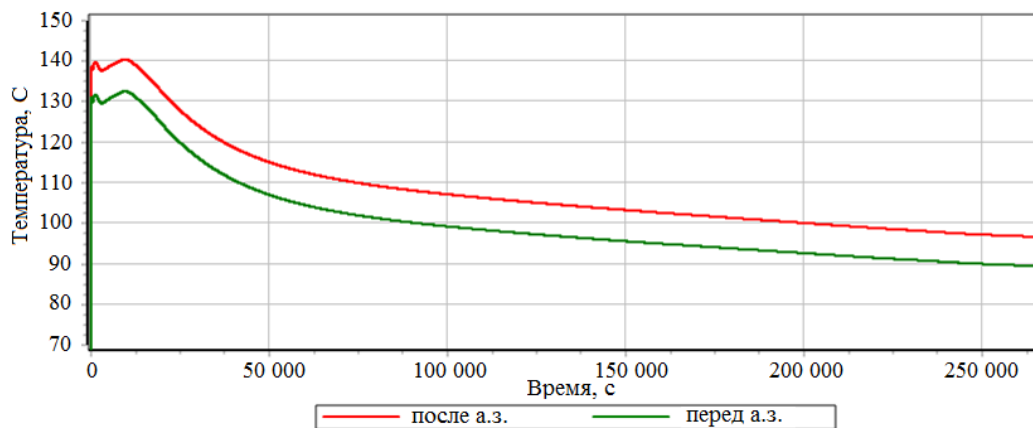


Рис. 12. Температура теплоносителя первого контура

Расчет доведен до момента, когда температура теплоносителя первого контура перед а. з. составляет 90 °C (~ 97 °C за а. з.).

На рис. 13 представлен график суммарного расхода воды, подаваемой ВПЭН из деаэратора, через теплообменник системы ЛАН-2 в ПГ в ходе расчета. На начальном этапе, при поддержании номинального уровня в ПГ, значение расхода близко к нулю. На подготовительном этапе регулирующие клапаны перед ПГ поддерживают постоянный расход 30 кг/с. При переходе на этап расхолаживания значение расхода плавно увеличивается до рабочего значения 50 кг/с.

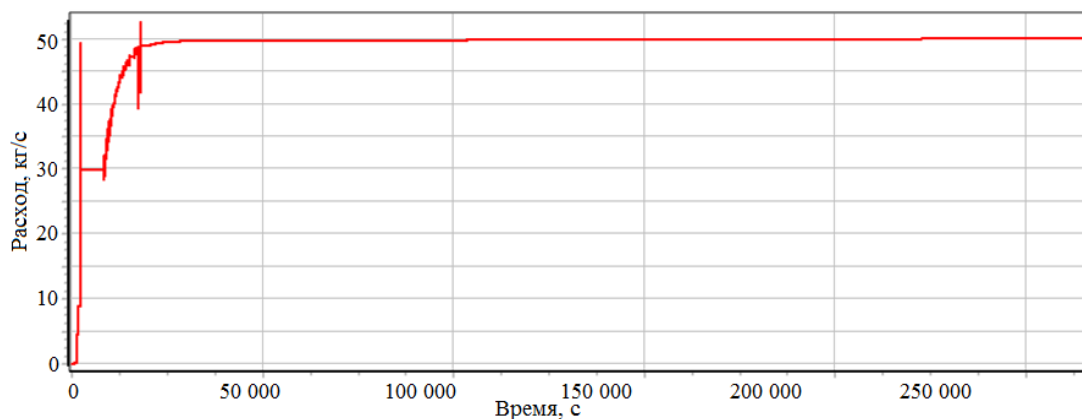


Рис. 13. Суммарный расход воды на ПГ

Уровни воды в ПГ и баке ЛАН47ВВ001 представлены на рис. 14 и 15 соответственно:

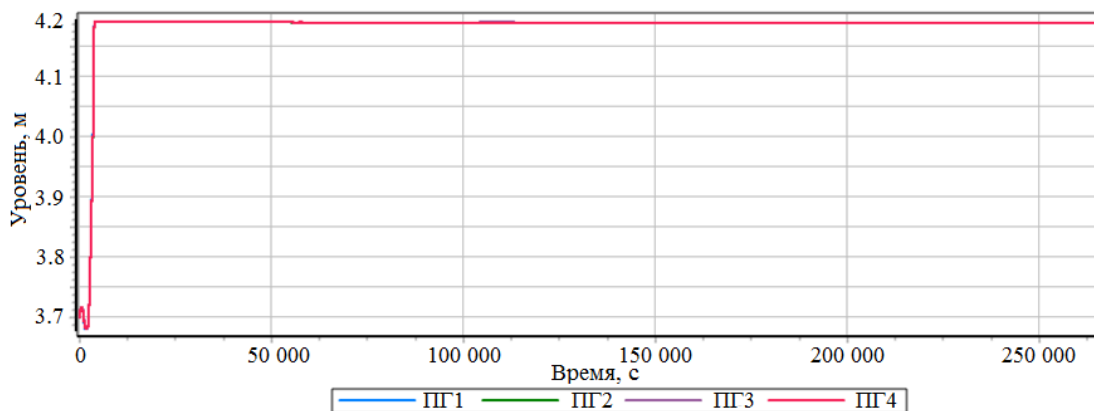


Рис. 14. Уровень в ПГ

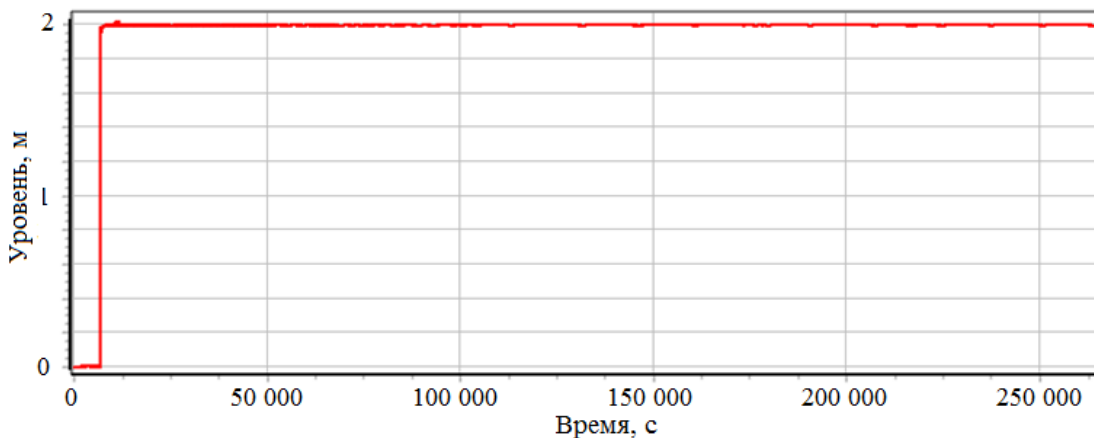


Рис. 15. Уровень в баке ЛАН47ВВ001



ПГ полностью затоплены на подготовительном этапе и остаются в таком состоянии в ходе этапа расхолаживания. В баке LAN47BV001 на этапе заполнения достигнут уровень 2 м (номинальный) и на этапе расхолаживания этот уровень поддерживается постоянным за счет работы регулирующего клапана на линии слива в деаэратор.

Температура воды второго контура на выходе из ПГ представлена на графике на рис. 16.

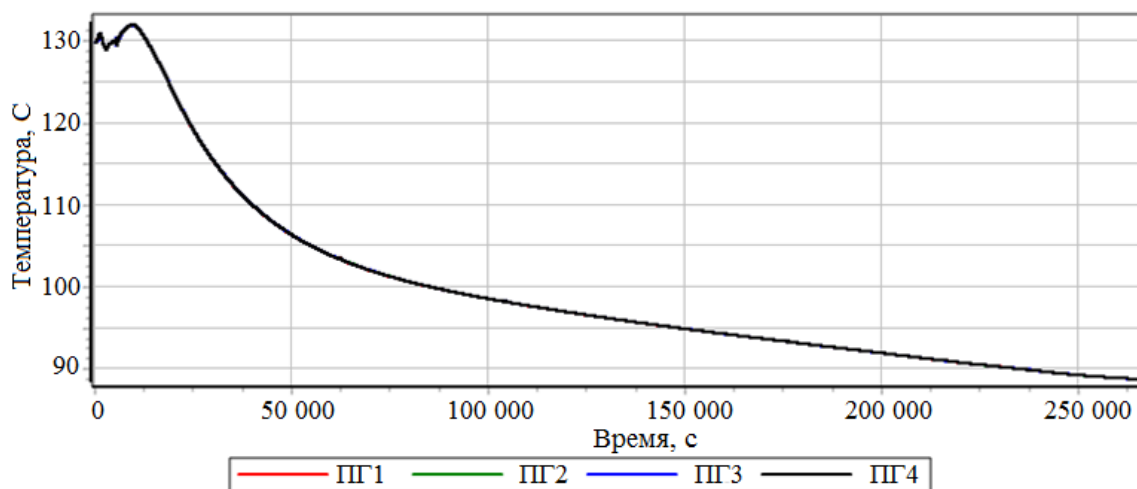


Рис. 16. Температура воды второго контура на выходе из ПГ

Температура воды второго контура на входе и выходе теплообменника LAN41AC001 представлена на рис. 17.

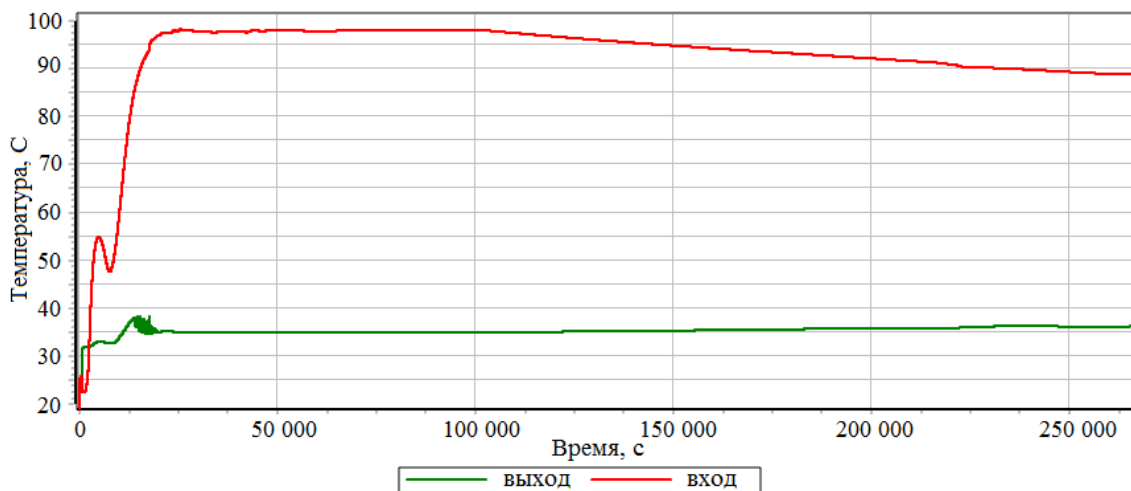


Рис. 17. Температура воды на входе/выходе теплообменника системы LAN-2

Стоит отметить, что на этапе затопления ПГ уровень в деаэраторе поддерживается постоянным за счет воды, подаваемой из баков системы LCU. Таким образом, на момент начала расхолаживания в деаэраторе находится номинальный объем воды при температуре 25 °C. Этот объем воды является причиной существенной инерции температуры воды, подаваемой на теплообменник (температура воды второго контура, отводимой от ПГ, выше температуры воды, подаваемой на вход теплообменника LAN41AC001).

Температура охлаждающей воды на входе и выходе теплообменника LAN41AC001 представлена на рис. 18.



Рис. 18. Температура охлаждающей воды на входе/выходе теплообменника системы ЛАН-2

Подача охлаждающей воды на теплообменник осуществляется системой PGB (промконтур охлаждения неответственных потребителей). Максимальное проектное значение температуры на входе в теплообменник составляет 32 °С и является граничным условием при моделировании. Одним из требований со стороны системы PGB, куда и возвращается охлаждающая вода после прохождения теплообменника системы ЛАН-2, является максимально допустимая величина нагрева воды, которая составляет 8 °С. Данное требование обеспечивается (как видно из рис. 18) путем регулирования расхода охлаждающей воды соответствующим регулирующим клапаном.

Расход охлаждающей воды, подаваемой на теплообменник, представлен на рис. 19.

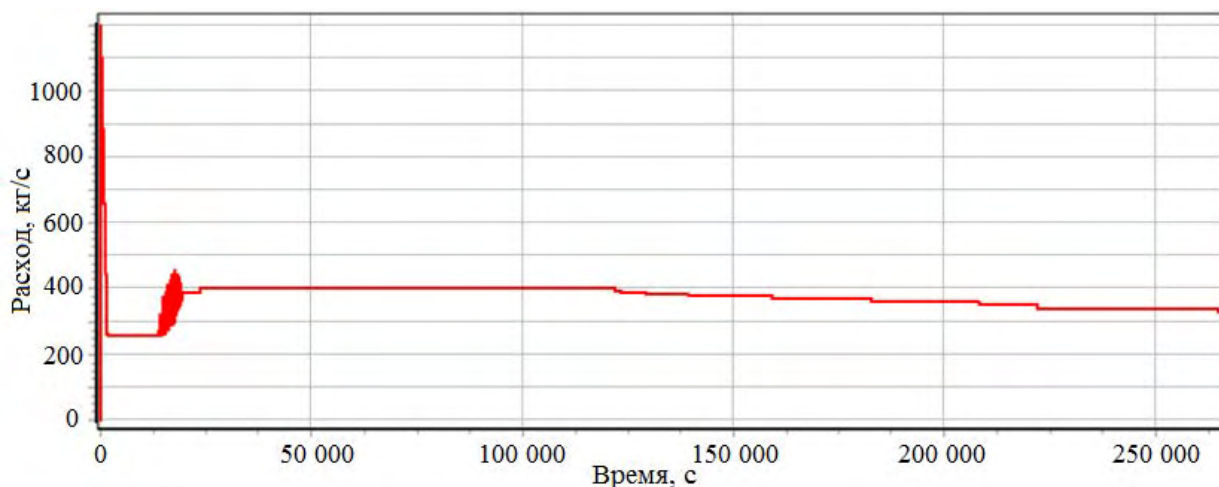


Рис. 19. Расход охлаждающей воды

Тепловая мощность, отводимая в теплообменнике ЛАН41АС001, представлена на рис. 20.

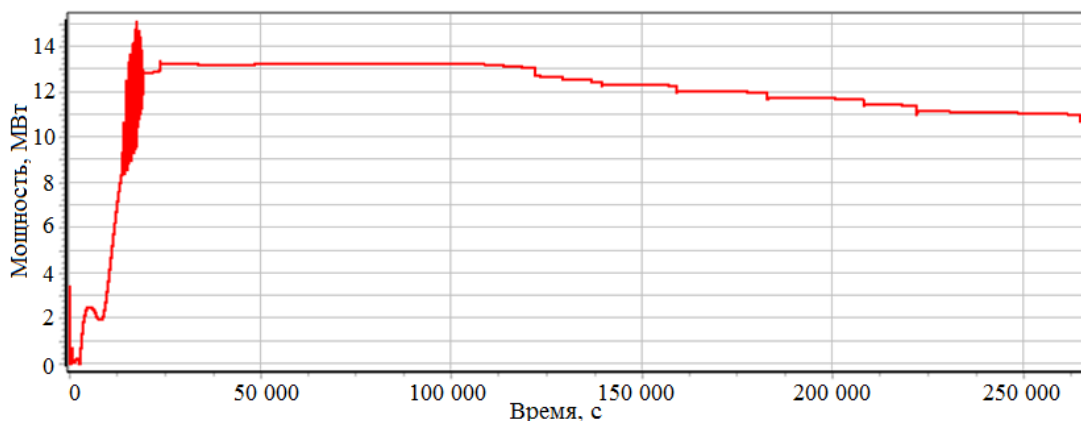


Рис. 20. Тепловая мощность, отводимая через ЛАН41АС001

На рис. 21 и 22 представлены расходы теплоносителя первого контура в петлях ГЦТ и через активную зону реактора. Данные графики демонстрируют наличие естественной циркуляции теплоносителя первого контура при расхолаживании РУ в водо-водяном режиме через систему ЛАН-2.

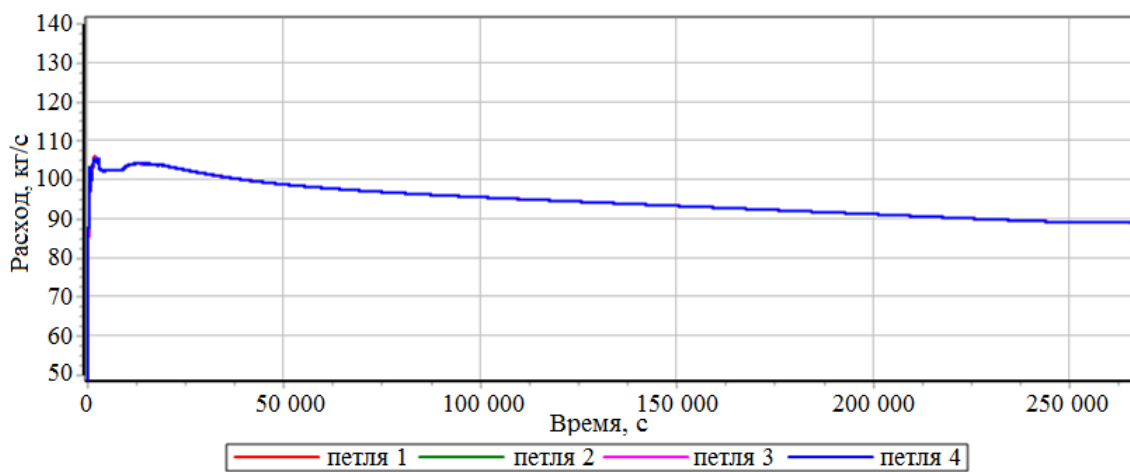


Рис. 21. Расход в петлях ГЦТ

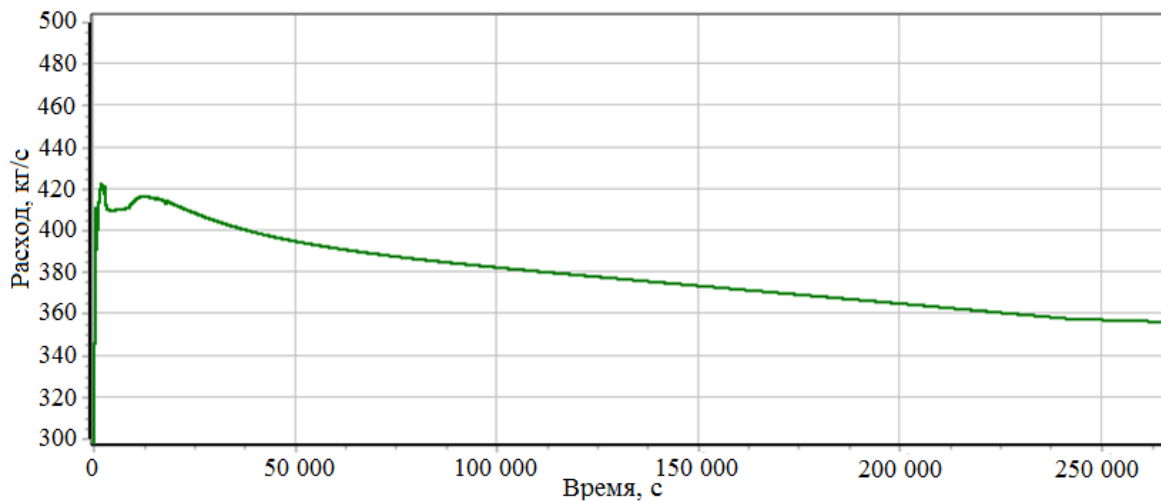


Рис. 22. Расход через а. з.

## 2) Анализ наличия стабильной естественной циркуляции теплоносителя первого контура при расхолаживании через диверсную схему

Для данного анализа проводятся два расчета при постоянных значениях мощности остаточных тепловыделений 3,0 и 1,5 МВт. В качестве дополнительного условия моделируется отключение рабочего ВПЭН, обеспечивающего подачу воды в ПГ, и отказ резервного.

За исходное состояние модели для данных расчетов принят момент, когда система ЛАН-2 работает продолжительное время и поддерживает температуру первого контура на значении 70 °С. Начальное давление над активной зоной было принято 0,7 МПа, температура теплоносителя 70 °С. Все четыре ПГ и каналы системы ЛАН-2 в работе и заполнены водой с температурой 60 °С.

По сценарию отключение насоса происходит через 4 часа после начала расчета.

На рис. 23 представлены графики температуры теплоносителя первого контура при мощности остаточных тепловыделений 3 МВт (слева) и 1,5 МВт (справа).

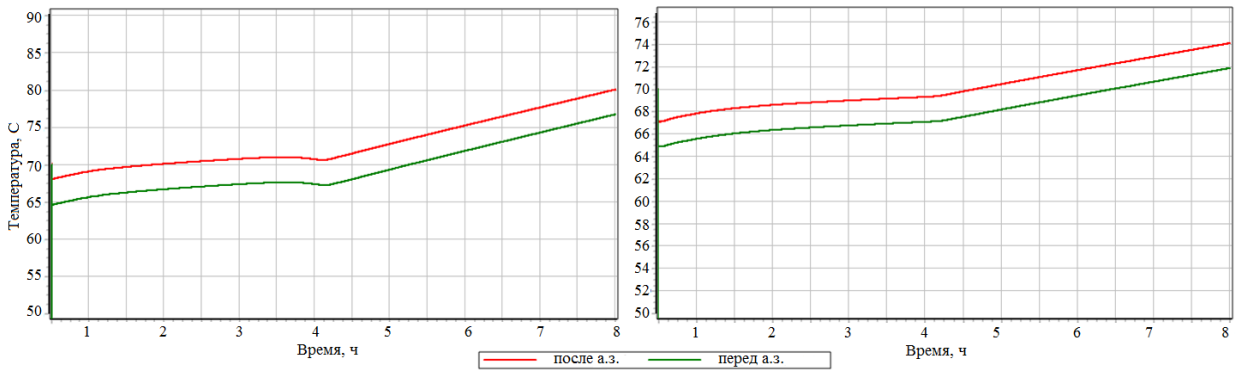


Рис. 23. Температура теплоносителя первого контура

Начальный рост температуры теплоносителя первого контура обусловлен отсутствием циркуляции теплоносителя на момент начала расчета. Данный факт не оказывает существенного влияния на результаты расчетов, их анализ и делаемые выводы.

Как видно из графиков на рис. 23, после отключения рабочего насоса, наличие остаточных тепловыделений приводит к разогреву теплоносителя первого контура. Скорость разогрева составляет ~ 2,5°С/час при мощности 3 МВт и ~ 1°С/час при мощности 1,5 МВт.

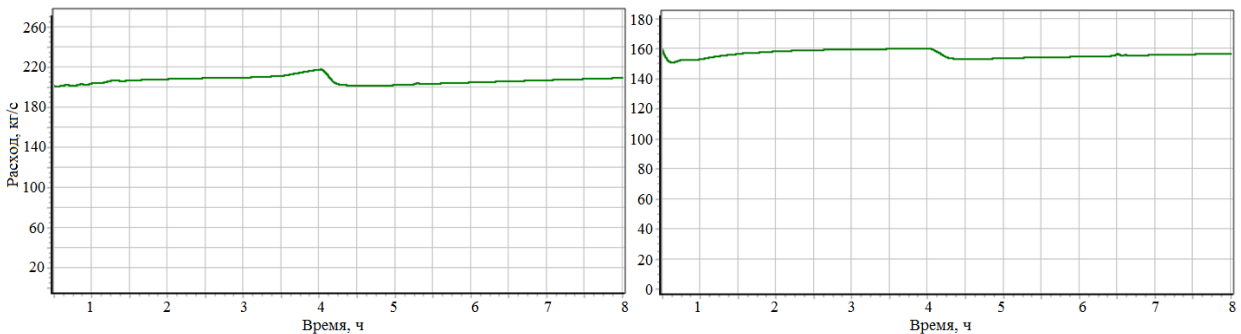


Рис. 24. Расход теплоносителя через активную зону реактора

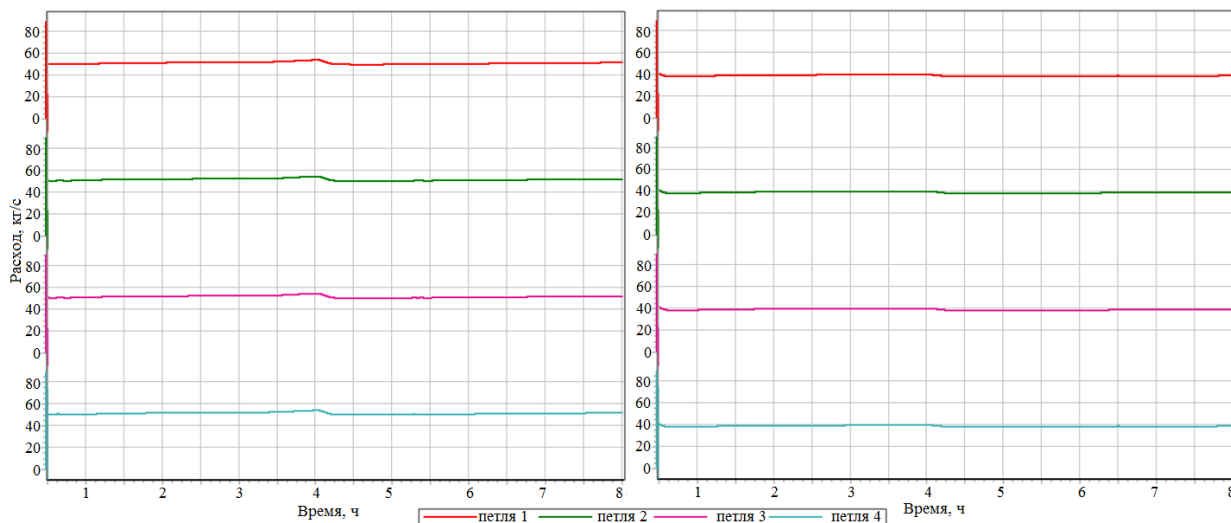


Рис. 25. Расход теплоносителя в петлях ГЦТ

На рис. 24 и 25 показаны графики зависимости расхода теплоносителя первого контура через активную зону и петли ГЦТ от времени при уровне мощности остаточных тепловыделений 3 МВт (слева) 1,5 МВт (справа).

Остаточные тепловыделения и расхолаживание РУ через систему ЛАН-2 обеспечивают наличие естественной циркуляции теплоносителя первого контура около 210 кг/с при мощности 3 МВт и 160 кг/с при мощности 1,5 МВт. Отключение насоса приводит к небольшому снижению естественной циркуляции (до 200 и 150 кг/с соответственно). Наличие теплоносителя второго контура в ПГ (ПГ заполнены) и разогрев теплоносителя первого контура обеспечивают наличие теплообмена между первым и вторым контуром даже после отключения насоса. Разогрев первого контура и наличие теплообмена между первым и вторым контуром обеспечивают плавный рост значения естественной циркуляции теплоносителя первого контура, который продолжается до начала кипения и испарения теплоносителя второго контура в корпусе ПГ. При атмосферном давлении в корпусе деаэратора значение давления в корпусе ПГ, после отключения насоса, будет составлять ~ 0,2 МПа (абс.). Кипение теплоносителя второго контура в корпусе ПГ, при указанном давлении, начнется при разогреве первого контура до 120 °С.

Таким образом, естественная циркуляция в первом контуре обеспечивается и при низких уровнях мощности остаточных тепловыделений. Отключение насоса, обеспечивающего подачу воды в ПГ, не приводит к срыву естественной циркуляции теплоносителя первого контура. При мощности остаточных тепловыделений 3 МВт скорость разогрева первого контура составляет ~ 2,5°С/час, при мощности 1,5 МВт ~ 1°С/час. При начальной температуре теплоносителя первого контура 70 °С (на момент отключения насоса) для недопущения начала кипения теплоносителя второго контура в корпусах ПГ и восстановления работоспособности контура расхолаживания необходимо восстановить работоспособность насоса в течение 20 часов при мощности 3 МВт и 50 часов при мощности 1,5 МВт.

Выполненные расчеты демонстрируют работоспособность диверсной схемы расхолаживания РУ в водо-водяном режиме через системы второго контура. Принятые конструктивные решения позволяют исключить конденсационные гидроудары на подготовительном этапе. Результаты проведенных расчетов подтверждают наличие естественной циркуляции теплоносителя первого контура при расхолаживании РУ по рассматриваемой схеме даже при низких уровнях мощности остаточных тепловыделений.

## **DIVERSIFICATION OF THE STANDARD COOLDOWN SYSTEM OF NPP WITH THE VVER-1200 REACTOR IN EMERGENCY MODE CAUSED BY A RARE EXTERNAL EVENT (DEC C)**

*V. V. Bezlepkin, E. P. Obratsov, D. R. Altbregen, D. V. Kapitsa, M. V. Gavrilov,  
V. B. Kozlov, E. G. Ahmedov*

JSC «ATOMPROEKT», Saint-Petersburg

To work on a solution for applying an alternative scheme relatively the standard reactor cooldown system for DEC C mode (emergency caused by a rare external event) we are considering the possibility of implementing a scheme of water-water cooling of the reactor plant from 130 to 70°C through the second circuit systems.

To implement this decision LAH-2 system is included in the second circuit of the power unit. LAH-2 system provides cooling of the coolant of the second circuit (water).

The preparatory stage is necessary for transition to reactor cooldown through the second circuit. This stage includes the heating of pipelines and equipment of secondary circuit systems (which are used to implement the regime) and filling steam generator (SG) and pipelines with second circuit coolant («flooding»).

The report presents calculation results of transient mode from the reactor cooldown through the passive heat removal system (PHRS) to reactor cooldown through the second circuit. The calculation includes the preparatory stage and the beginning of the reactor cooldown process in water-water mode.

The simulation of this mode is carried out using the CSS «VEB» in the SimInTech software with using calculation software KORSAR and TPP (Thermal Power Plant).

*Keywords:* emergency mode, NPP, virtual power unit, natural circulation, cooldown, reactor.

УДК 519.6

## **СМЕШАННОЕ РАСПАРАЛЛЕЛИВАНИЕ И ОРГАНИЗАЦИЯ ВЫЧИСЛЕНИЙ ПРИ РЕШЕНИИ УРАВНЕНИЙ ГАЗОВОЙ ДИНАМИКИ МЕТОДОМ SPH И РЕШЕНИИ УРАВНЕНИЯ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ НА АДАПТИВНО-ВСТРАИВАЕМОЙ СЕТКЕ**

*И. Д. Блажнов, Н. В. Мелешкин, С. Н. Полищук, Е. И. Рябов*

Российский федеральный ядерный центр –  
Всероссийский НИИ экспериментальной физики, Саров

Работа посвящена численному моделированию процессов газовой динамики с теплопроводностью. При решении уравнений используется подход с совмещением двух методов: уравнения газовой динамики решаются методом сглаженных частиц (SPH), а уравнение лучистой теплопроводности для сокращения вычислений решается разностным методом на адаптивно-встраиваемой сетке. В работе рассматриваются алгоритмы распараллеливания вычислений с использованием смешанной модели MPI + OpenMP и алгоритмы балансировки вычислений при комбинировании мето-