

ВЫПОЛНЕНИЕ ПРОЦЕДУРЫ "СБРОС-ПОДПИТКА" ПРИ ПОЛНОЙ ПОТЕРЕ ПОДПИТКИ ПАРОГЕНЕРАТОРОВ

В соответствии с "Программой модернизации энергоблоков ХАЭС-2, РАЭС-4" [1] до пуска энергоблоков должно быть реализовано мероприятие "Использование импульсно-предохранительного устройства компенсатора давления для принудительного снижения давления в первом контуре, для выполнения процедуры "сброс-подпитка" по I контуру".

Процедура "сброс-подпитка" направлена на возможность понижения параметров первого контура и дальнейшего расхолаживания энергоблока при невозможности расхолаживания через второй контур без нарушения максимального проектного предела безопасной эксплуатации по температуре оболочек твэл.

Целью настоящей работы являлось расчетное обоснование проведения процедуры "сброс-подпитка" с использованием модифицированного импульсно-предохранительного устройства компенсатора давления, выбора критерия инициализации процедуры.

Все расчетные анализы выполнены с применением принципа консервативного подхода для получения максимально отрицательных результатов, что позволяет осуществить подбор оптимальной требуемой конфигурации оборудования.

Расчетные анализы проводились с использованием аналитической модели энергоблока №2 ХАЭС для теплогидравлического кода RELAP5/MOD3.2 [2].

В данном анализе рассматривается протекание аварии, вызванной полной потерей подпитки парогенераторов. Следствием является потеря теплоотвода от активной зоны по второму контуру, что при невмешательстве оперативного персонала ведет к росту параметров первого контура с последующей некомпенсируемой потерей теплоносителя через импульсно-предохранительное устройство компенсатора давления, оголению и

плавлению активной зоны при высоких параметрах.

Основой алгоритма управления такой аварией является снижение давления первого контура ниже максимального напора насосов САОЗ ВД (ТQ13,23,33D01) с целью компенсации потерь теплоносителя и обеспечения теплоотвода от активной зоны, предотвращения повреждения твэл с последующим расхолаживанием реакторной установки до состояния "холодный останов". Для снижения давления в первом контуре может быть использовано дистанционное принудительное открытие импульсно-предохранительного устройства компенсатора давления совместно с системой аварийного газоудаления из первого контура.

Цель расчета состоит в определении минимально необходимого диаметра искусственно организованной течи первого контура и количества каналов САОЗ, работа которых обеспечивает предотвращение повреждения топлива выше проектных пределов и перевод реакторной установки в состояние "холодный останов". Течь из первого контура с целью снижения давления до уставки срабатывания САОЗ ВД может быть организована, используя следующие возможные варианты:

— открытие оператором арматуры системы аварийного газоудаления (YR) при повышении температуры оболочек твэл выше установленного значения;

— открытие оператором арматуры системы аварийного газоудаления (YR) и одновременное открытие с запретом на закрытие одного клапана импульсно-предохранительного устройства компенсатора давления при повышении температуры оболочек твэл выше установленного значения;

— открытие оператором арматуры системы аварийного газоудаления (YR) и

одновременное открытие с запретом на закрытие двух клапанов импульсно-предохранительного устройства компенсатора давления при повышении температуры оболочек твэл выше установленного значения;

– открытие оператором арматуры системы аварийного газоудаления (YR) и одновременное открытие с запретом на закрытие одного клапана импульсно-предохранительного устройства компенсатора давления при совпадении следующей комбинации сигналов, которые однозначно идентифицируют полную потерю теплоотвода по второму контуру вследствие отсутствия подпитки парогенераторов.

Ниже приводятся требования, на основании которых были определены критерии приемлемости для рассматриваемого исходного события:

– не должен превышать максимальный проектный предел повреждения твэл: температура оболочек твэл не более 1200°C; локальная глубина окисления оболочек твэл не более 18% от первоначальной толщины стенки; доля прореагировавшего циркония не более 1% от его массы в оболочках твэл [3];

– давление в оборудовании и трубопроводах первого контура не должно превышать рабочее более чем на 15%. Рабочее (расчетное) давление для первого контура составляет 180 кгс/см² (17,64 МПа) (абс.) [4].

Относительно критерия по давлению в оборудовании первого контура, можно заключить, что данный параметр будет поддерживаться в допустимых пределах за счет открытия импульсно-предохранительного устройства компенсатора давления. Поэтому в дальнейшем в данной статье будет проанализирован только критерий приемлемости по максимальной температуре оболочек твэл.

Консервативный подход к расчетному анализу определяют следующие начальные условия [5]:

1) начальная мощность реактора равна 104% от номинального значения, что включает в себя погрешность поддержания (2%) и погрешность определения (2%);

2) аксиальный профиль энерговыделений в активной зоне выбран симметричным;

3) расход теплоносителя через реактор выбран минимальным при работе четырех ГЦН;

4) давление в первом контуре принимается минимальным с учетом

отклонения технологического параметра на допустимую проектную величину (3 кгс/см² (0,294 МПа));

5) давление в парогенераторах принимается максимальным с учетом отклонения технологического параметра на допустимую проектную величину (+2 кгс/см² (0,196 МПа));

6) уровень теплоносителя в КД выбран минимальным с учетом отклонения технологического параметра на допустимую величину (-150 мм) и с учетом погрешности определения уровня (-150 мм);

7) уровень в ПГ выбран минимальным с учетом отклонения технологического параметра на допустимую величину (270 ... 320 мм) и с учетом погрешности определения уровня (-15 мм);

8) температура питательной воды выбирается максимальной с учетом отклонения технологического параметра на допустимую величину (215...225°C - при номинальной мощности РУ и подключенных ПВД) и с учетом погрешности определения ($\pm 2^\circ\text{C}$);

9) расход теплоносителя системы подпитки - продувки принят номинальным (30 м³/ч) с учетом погрешности измерения (+4 м³/ч).

Параметры нейтронной кинетики соответствуют состоянию активной зоны на начало топливной загрузки с тем, чтобы получить меньший запас до кризиса теплообмена за счет консервативного распределения энерговыделения.

Так как аварийный процесс не сопровождается снижением концентрации борной кислоты, влияние эффектов реактивности по изменению концентрации борной кислоты не учитывается.

Рассмотрим вариант проведения процедуры с помощью системы аварийного газоудаления

Данный вариант предполагает выполнение процедуры "сброс-подпитка" с помощью открытия арматуры системы аварийного газоудаления и двух насосов САОЗ ВД с инициализацией процедуры по температуре оболочек твэл 400°C (достижение значения температуры оболочек 400°C однозначно свидетельствует о начале оголения головок ТВС).

Потеря подпитки ПГ ведет к резкому снижению уровня в них, что приводит к

отключению ГЦН и сбратыванию АЗ на 12 секунде с момента исходного события, в этот момент постулируется внешнее обесточивание блока. Давление в первом контуре (рис.1) на 1880 секунде процесса возрастает до уставки открытия импульсно-предохранительного устройства компенсатора давления, в дальнейшем давление первого контура поддерживается периодическим открытием импульсно-предохранительного устройства. Давление второго контура также резко возрастает.

Вследствие отсутствия подпитки происходит дальнейшее снижение запаса котловой воды в ПГ. По мере снижения уровня в ПГ и оголения трубочки ухудшается теплоотвод от первого контура, что приводит к росту параметров последнего. После 5000-й секунды в активной зоне формируется уровень теплоносителя и происходит прогрессирующее оголение поверхности твэл.

Температура оболочек твэл при наличии охлаждения возрастает достаточно монотонно, однако при оголении верхней части ТВС на 6915-й секунде процесса происходит резкий скачок температуры и уже к 6982-й секунде температура оболочек достигает значения 400°C. Следствием роста температуры является принятие решения на открытие арматур на линии газовых сдувок, а также включение на рециркуляцию двух неотказавших насосов САОЗ ВД. Однако данный подход не позволяет достаточно

быстро снизить давление первого контура и обеспечить его подпитку от САОЗ ВД. Это приводит к деградации оболочек твэл и плавлению ядерного топлива, что говорит о недопустимости применения рассматриваемого сценария для подобного рода аварий.

Успешное проведение процедуры "сброс-подпитка" с использованием только системы аварийного газоудаления возможно при инициализации процедуры по факту снижения уровня во всех парогенераторах менее 1 м. Однако данный вариант требует от оператора выполнения большого количества действий (отключение насосов САОЗ ВД, отсечение ГЕ САОЗ), что неприемлемо в условиях запроектной аварии.

Рассмотрим вариант проведения процедуры с помощью системы аварийного газоудаления и двух импульсно-предохранительных устройств компенсатора давления

Данный вариант предполагает выполнение процедуры "сброс-подпитка" с помощью открытия арматуры системы аварийного газоудаления и двух импульсно-предохранительных устройств компенсатора давления, а также работы двух насосов САОЗ ВД, с инициализацией процедуры по температуре оболочек твэл 400°C. Данный вариант проведения процедуры "сброс-подпитка" рассматривается как гипотетический.

Вне зависимости от сценария управления аварией до достижения максимальной

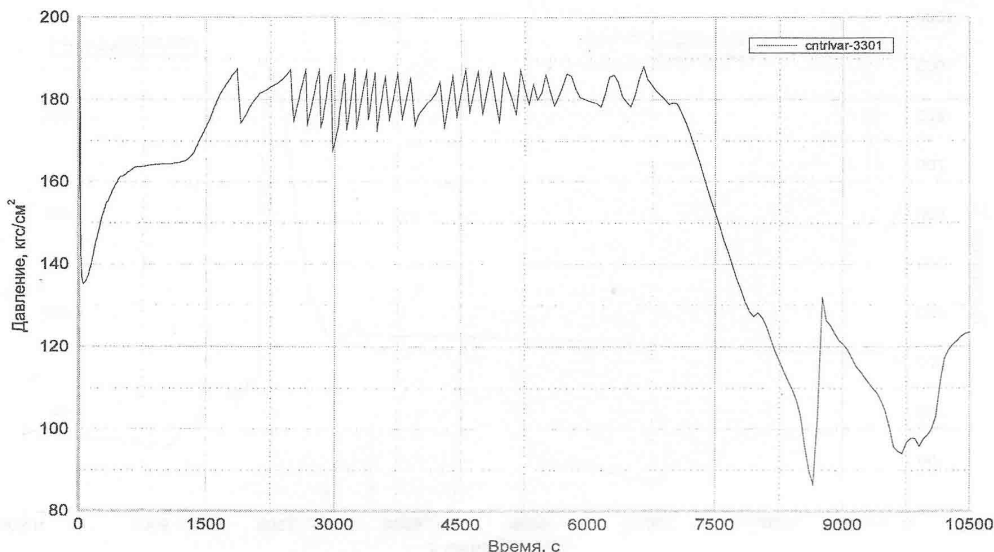


Рис. 1. Давление на выходе из реактора

температурой оболочек твэл значения 400°C хронология процесса выглядит идентично описанному выше.

На 6982-й секунде максимальная температура оболочки наиболее теплонапряженных твэл превышает 400°C, что является сигналом к началу процедуры управления аварией.

Учитывалась потеря управления одним импульсно-предохранительным устройством компенсатора давления (отказ на открытие от ключа), что может быть связано с отказом одного дизель-генератора. Таким образом, количество импульсно-предохранительных устройств компенсатора давления, участвующих в процедуре, ограничивалось двумя.

Данный расчет демонстрирует непревышение критериев приемлемости по температуре оболочек твэл, которая согласно графику составляет порядка 906°C (рис.2), что ниже максимально допустимой 1200°C.

Однако проведение процедуры, с использованием указанной конфигурации оборудования имеет некоторые недостатки, основными из которых являются:

- инициализация процедуры по температуре оболочек твэл более 400°C носит весьма условный характер, так как конструктивно действующие ТВС не имеют датчиков температуры оболочек твэл;
- открытие одного импульсно-предохранительного устройства компенсатора давления и всей арматуры на линиях газовых

сдувок из реактора и коллекторов ПГ приводит к недостаточно быстрому снижению давления первого контура, вследствие чего максимальная температура оболочек твэл успеваает незначительно превысить предельно допустимое значение 1200°C, что неприемлемо;

- открытие двух импульсно-предохранительных устройств компенсатора давления и всей арматуры на линиях газовых сдувок из реактора и коллекторов ПГ приводит к возникновению течи эквивалентным диаметром Ду 270, что приводит к высокой динамике параметров первого контура в ходе переходного процесса и возникновению дополнительных нагрузок на оборудование реакторной установки.

Рассмотрим вариант проведения процедуры по комбинации трех сигналов

Учитывая результаты двух предыдущих расчетных анализов, в данной части предлагается вариант, согласно которому процедура будет инициализирована по комбинации сигналов, которые однозначно идентифицируют потерю теплоотвода по второму контуру и необходимость выполнения действий, направленных на снижение параметров первого контура, а именно:

- 1) уровень теплоносителя по четырехметровым уровнемерам во всех парогенераторах менее 0,5 метра;
- 2) давление теплоносителя первого

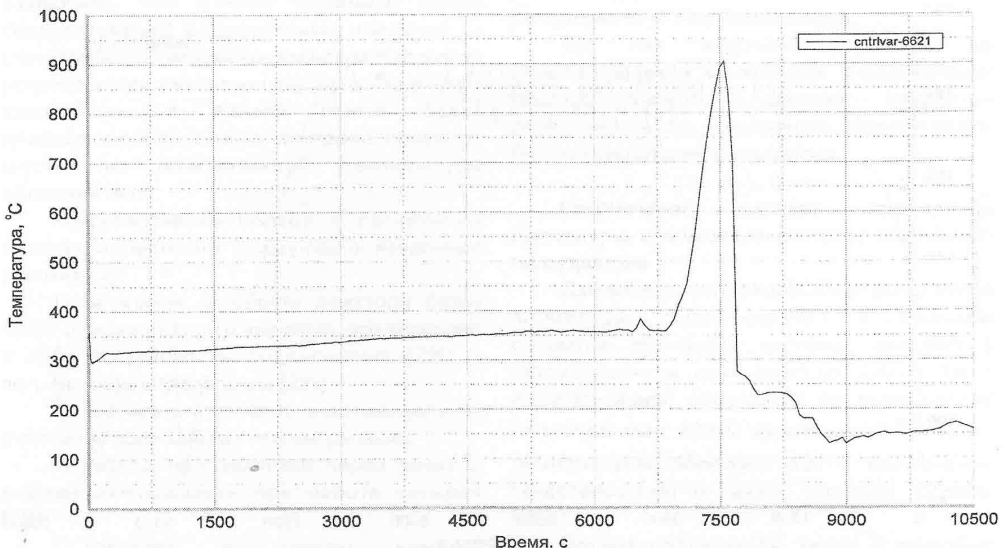


Рис.2. Максимальное значение температуры наружной поверхности оболочек твэл

контура выше уставки включения системы впрыска в КД и составляет не менее 167 кгс/см^2 (16,38 МПа);

3) разность между температурой насыщения и температурой первого контура менее 10°C , что свидетельствует о наличии кипения в активной зоне реактора.

Выполнение процедуры также предполагает использование для снижения давления первого контура только арматуры на линии аварийного газоудаления из реактора и коллекторов ПГ и одного клапана импульсно-предохранительного устройства компенсатора давления, что позволит уменьшить размер течи.

Хронология протекания аварии до 3802-й секунды полностью соответствует рассмотренной выше. С 4315-й секунды, когда появляется последний из трех сигналов, а именно, $\Delta T_S < 10^\circ\text{C}$, предполагается начало проведения процедуры "сброс-подпитка" путем открытия арматуры на линии аварийного газоудаления из реактора и коллекторов ПГ, а также одного импульсно-предохранительного устройства компенсатора давления. Массовые расходы через импульсно-предохранительное устройство компенсатора давления и линию аварийного газоудаления показаны на рис.3, а интегральный расход через импульсно-предохранительное устройство компенсатора давления приведен на рис.4. При этом температура оболочек твэл не превышает начального значения 349°C (рис.5) на всем

протяжении расчета.

В результате снижения давления на 4590-й секунде происходит подача раствора от двух насосов САОЗ ВД ТQ13,23D01 в первый контур.

С 5850-й секунды наблюдается подача воды из ГЕ САОЗ по факту снижения давления над активной зоной ниже 60 кгс/см^2 (5,89 МПа).

В дальнейшем, в момент времени 7200 секунд начинается подача из бака-приямка раствора борного концентрата с начальной концентрацией 16 г/кг в первый контур от насосов САОЗ НД ТQ12(22,32)D01.

Результаты показывают, что режим устойчивого охлаждения активной зоны восстанавливается системой САОЗ ВД еще до снижения давления первого контура ниже давления в гидроемкостях и напора насосов САОЗ НД. Таким образом, указанные компоненты (ГЕ САОЗ и САОЗ НД) не влияют на выполнение приемочных критериев.

Из представленных данных следует, что проектное функционирование только системы аварийного газоудаления не обеспечивает требуемую скорость снижения давления первого контура, следствием чего является 100% плавление активной зоны.

Выводы

Исходя из вышесказанного, предлагается реализация процедуры по совпадению трех сигналов.

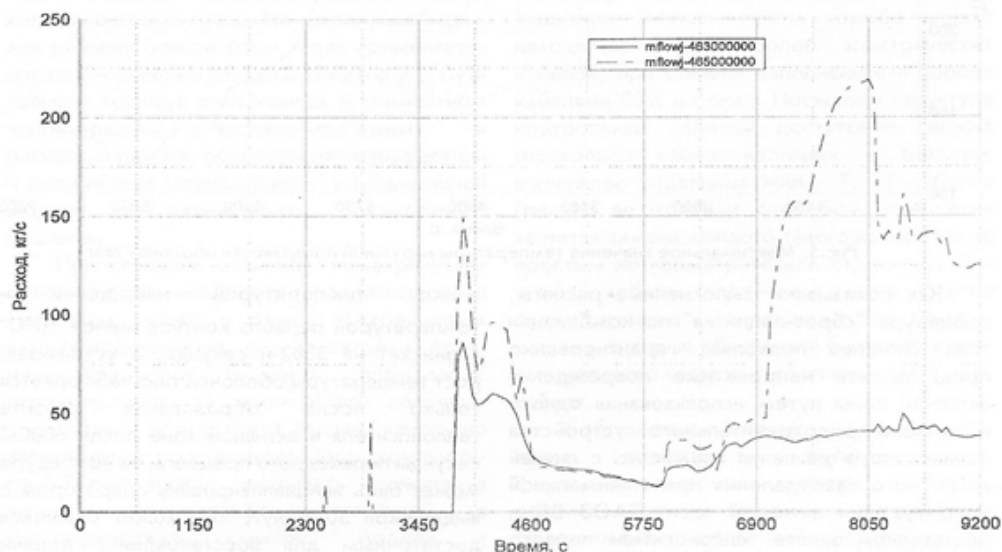


Рис.3. Массовый расход через ИГУ КД и линию аварийного газоудаления

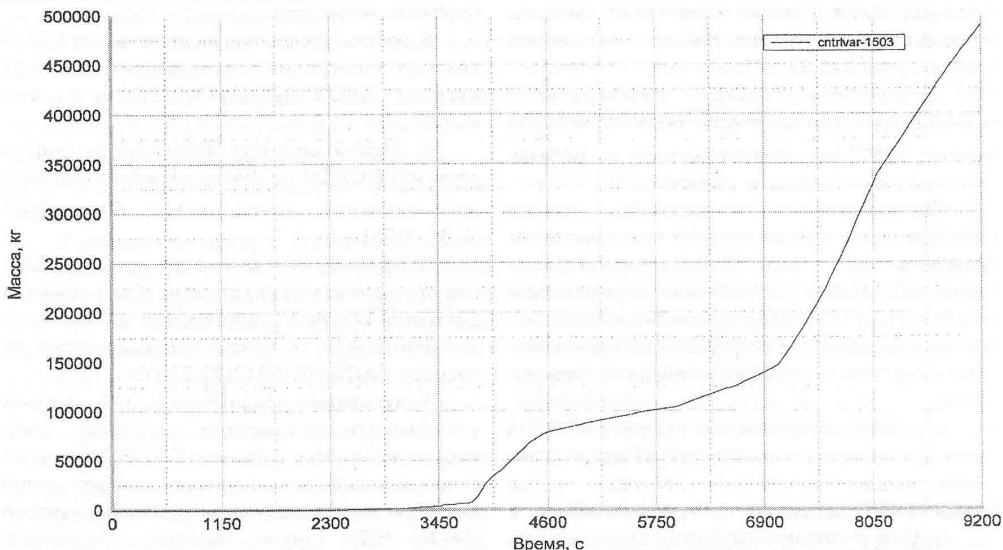


Рис. 4. Интегральный массовый расход через ИПУ КД

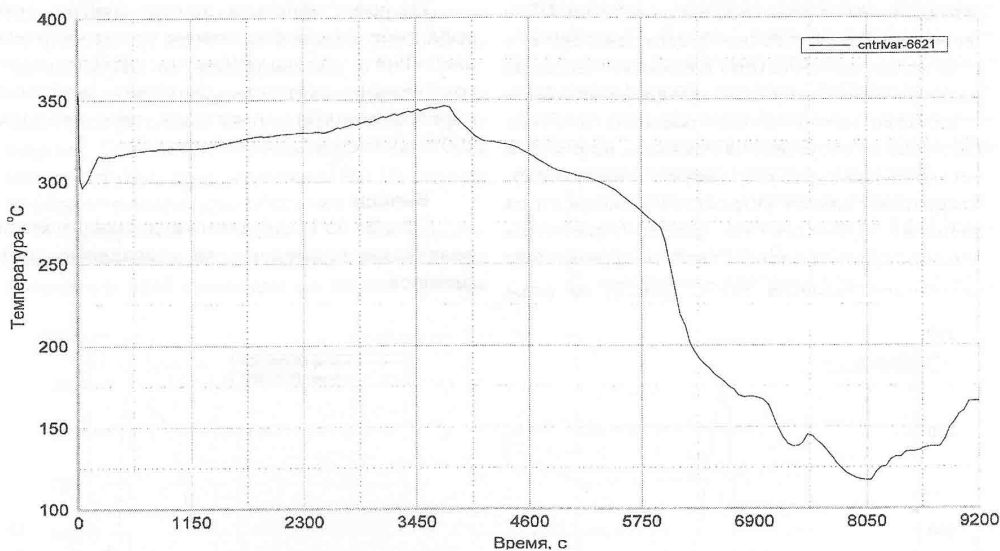


Рис. 5. Максимальное значение температуры наружной поверхности оболочек ТВЭЛ

Как показывают выполненные расчеты, процедура "сброс-подпитка" по комбинации трех сигналов позволяет гарантированно предотвратить нештатные повреждения активной зоны путем использования одного импульсно-предохранительного устройства компенсатора давления совместно с линией аварийного газоудаления при минимальной конфигурации активной части САОЗ ВД и достаточном запасе теплоносителя первого контура на момент инициализации процедуры. Причем, исходя из того, что сигнал "разность

между температурой насыщения и температурой первого контура менее 10°C" возникает на 3802-й секунде, а устойчивый рост температуры оболочек ТВЭЛ наблюдается только после образования фронта теплоносителя в активной зоне после 6000-й секунды переходного процесса, то процедура может быть инициализирована оператором с выдержкой 30 минут, что может оказаться достаточным для восстановления подачи питательной воды в парогенераторы.

Литература

1. Программа модернизации энергоблоков АЭС Украины с реакторами ВВЭР-1000 (В-320). Часть 2. Энергоблок № 2 Хмельницкой АЭС. UGK W00001 Yr.
2. Хмельницкая АЭС. Энергоблок №2. Отчет по анализу безопасности. Глава 15. Анализ проектных аварий. Описание расчетной модели для кода RELAP. 43-923.203.031.PM01-09. ОАО "Киевский научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт "ЭНЕРГОПРОЕКТ".
3. Правила ядерной безопасности реакторных установок атомных станций (ПБЯ РУ АС-89). ПНАЭ-Г-1-024-90. Госпроматомнадзор СССР. 1990.
4. Правила устройства и безопасной эксплуатации оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок. ПНАЭ-Г-7-008-89. Госпром-атомнадзор СССР. 1990.
5. Запорожская АЭС. Энергоблок №5. Расчетное обоснование использования режима "сброс-подпитка" теплоносителя первого контура для отвода остаточных тепловыделений от активной зоны реактора при полной потере питательной воды. 21.5.70.ОБ.07.