

АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ МЕРОПРИЯТИЙ ПО РЕГУЛИРОВАНИЮ РАСХОДА СИСТЕМЫ АВАРИЙНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ РЕАКТОРА НАСОСАМИ ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ В ПРОЦЕССЕ АВАРИЙ С ТЕЧАМИ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ

© 2010 г. В. И. Скалозубов, Т. Н. Зеленцова, Хадж Фараджаллах Даббах А. *,
К. В. Скалозубов

*Институт проблем безопасности АЭС НАН Украины, Киев
* Одесский национальный политехнический университет*

Приведен анализ отраслевых научно-технических обоснований эффективности установки дополнительных регуляторов расхода систем аварийного охлаждения реактора серийных энергоблоков с ВВЭР-1000. Показано, что установка дополнительных регуляторов является неэффективной и не повышает надежность управления авариями с течами теплоносителя.

Ключевые слова: водо-водяной энергетический реактор (ВВЭР); система аварийного охлаждения зоны (САОЗ) высокого давления (ВД), низкого давления (НД); запорно-регулирующие клапаны (ЗРК); реакторная установка (РУ); подпитка/продувка (“Feed/Bleed”).

Актуальность вопроса. В рамках направления повышения эффективности и надежности управления авариями с течами 1-го контура реакторной установки малосерийных ВВЭР-1000/В-302, 338, для которых критичной является работоспособность защитной системы безопасности САОЗ ВД, разработаны технические обоснования [1] о необходимости модернизации этой системы путем регулирования подачи охлаждающей воды в 1-й контур. Основная цель регулирования расхода САОЗ ВД заключается в установке ЗРК для обеспечения необходимого запаса температуры теплоносителя до кипения на выходе из активной зоны (ΔT_s) при поддержании допустимого давления (Р) в 1-м контуре. Основные преимущества установки ЗРК САОЗ ВД, которые определены техническими обоснованиями [1], можно обобщенно сформулировать следующими положениями:

1. Сокращается/исключается временной промежуток и количество необходимых каналов подключения САОЗ НД при опорожнении баков САОЗ ВД в процессе аварий с течами (фактор 1).
2. Исключаются/смягчаются условия термошока на корпус реактора (температура расхолаживания РУ до 60°C/час и ограничивается давление в системе 1-го контура на минимальном уровне) – фактор 2.
3. Повышаются общие показатели безопасности вследствие сокращения числа возможных срабатываний проектных систем 1-го и 2-го контуров, обеспечивающих поддержание давления и расхолаживание в процессе аварий с течами (фактор 3).
4. Сокращаются выбросы теплоносителя в гермообъем РУ и окружающую среду при авариях с течами (фактор 4).

ОП Запорожской АЭС совместно с научными организациями был также проведен расчетный анализ кодом RELAP5 целесообразности установки ЗРК САОЗ ВД на серийных энергоблоках с ВВЭР-1000 (В-320). Расчеты проводились для аварий с течами 1-го контура и межконтурными течами, в которых критичным является работоспособность САОЗ ВД, для двух вариантов: в проектном режиме и при установке ЗРК. Анализ полученных результатов не позволяет сделать однозначный вывод о целесообразности установки ЗРК САОЗ ВД на ВВЭР 1000 (В-320). Кроме того, факторы по целесообразности установки ЗРК, непосредственно влияющие на безопасность, недостаточно проанализированы. Поэтому необходимы дополнительные обоснования целесообразности установки ЗРК.

Анализ эффективности установки регуляторов. В режиме ΔT_s регулятор САОЗ ВД поддерживает запас температуры до вскипания теплоносителя. Уставка по запасу температуры может принимать фиксированное значение, равное 10, 15 или 20°C [2]. В данном режиме регулятор поддерживает равное нулю рассогласование

$$EPS = P_S - P_{1к} - \alpha \cdot H, \quad (1)$$

где EPS – рассогласование регулятора; $P_s = f(T_{1K} + dT)$ – давление насыщения как функция преобразования температуры насыщения; T_{1K} – температура теплоносителя 1-го контура; dT – уставка по запасу температуры, P_{1K} – давление теплоносителя 1-го контура; H – положение ЗРК, %; α – коэффициент.

В режиме поддержания давления (РПД) регулятор САОЗ ВД поддерживает равное нулю рассогласование

$$EPS = P_{зад} - P_{1K} - \alpha \cdot H, \quad (2)$$

где EPS – рассогласование регулятора; $P_{зад}$ – заданное значение давления; P_{1K} – давление теплоносителя 1-го контура; H – положение ЗРК, %; α – коэффициент.

По отношению к проектному режиму (без регуляторов) в режиме регулирования могут возникнуть следующие дополнительные отказы/ошибочные действия оператора:

1) ошибочные действия по выводу регулятора из режима ΔT_S при отказе автоматики на снятие запрета по закрытию отсечной проектной арматуры (некритичный отказ для выполнения функций безопасности);

2) ошибочные действия по открытию байпасируемой арматуры после вывода регулятора из РСТ (некритичный отказ для выполнения функций безопасности);

3) ошибочные действия по включению режима РПД с потерей контроля запаса до кипения теплоносителя в активной зоне (критический для безопасности отказ);

4) ошибочные действия или отказы автоматики по закрытию байпасируемой арматуры при работе регулятора в режиме РСТ (критический для безопасности отказ);

5) ошибочные действия по выбору режимов регулирования и/или связанные с потерей контроля регулирования процесса (критические для безопасности отказы).

Последовательность развития событий при регулировании в режиме поддержания ΔT_S приведена схематично на рис. 1.

В случае срабатывания уставок на включение подачи воды от САОЗ ВД в 1-й контур (в том числе и при авариях с течью теплоносителя) оператор должен включить «режим ΔT_S » и регулятор осуществляет контроль за выполнением рассогласования (1). В начальные моменты происходит увеличение давления ($\uparrow P$) и снижение температуры теплоносителя ($\downarrow T_{1K}$), что приводит к увеличению запаса до кипения ($\uparrow \Delta T_S$). При достижении уставки dT (1) регулятор начнет закрываться ($\downarrow H$ ЗРК), что должно привести к уменьшению общего расхода от насосов САОЗ ВД в 1-й контур ($\downarrow G_{ВД}$), а соответственно, и к снижению давления ($\downarrow P$) при прочих равных условиях. В зависимости от условий охлаждения в 1-м и во 2-м контурах (Q_1, Q_2), а также влияния на температуру теплоносителя непосредственно расхода от САОЗ ВД ($Q_{ВД}$) возможны два разных состояния:

температура теплоносителя увеличивается ($\uparrow T_{1K}$) – при определяющем влиянии сокращения подачи охлаждающей воды от САОЗ ВД;

температура теплоносителя уменьшается ($\downarrow T_{1K}$) – при определяющем влиянии условий охлаждения по 1-му и 2-му контуру другими системами.

В случае первого состояния дальнейшее регулирование по рассогласованию (1) приводит к росту расхода от САОЗ ВД ($\uparrow G_{ВД}$) (см. рис. 1). Таким образом, в этих условиях действия регулятора приводят к *автоколебательному процессу* в системе, а работа регулятора неэффективна и снижает общую надежность САОЗ ВД по выполнению проектных функций (отсутствует возможность устойчивого снижения давления в 1-м контуре до уставок включения насосов САОЗ НД, частые противоположные перемещения рабочего органа ЗРК, циклические термодинамические нагрузки на корпус и конструкции реактора и т.п.).

Во втором случае ($\downarrow P, \downarrow T_{1K}$) в дальнейшем процессе также возможны два разных состояния:

увеличение ΔT_S при условии большей скорости снижения температуры теплоносителя, чем скорости снижения давления ($\left| \frac{dT_{1K}}{dt} \right| > \left| \frac{dT_S(P)}{dt} \right|$);

уменьшение ΔT_s в противном случае.

В дальнейшем эти два разных состояния (см. рис. 1) приведут или к автоколебательному процессу (при $\downarrow \Delta T_s$), или к устойчивому регулированию (при $\uparrow \Delta T_s$).

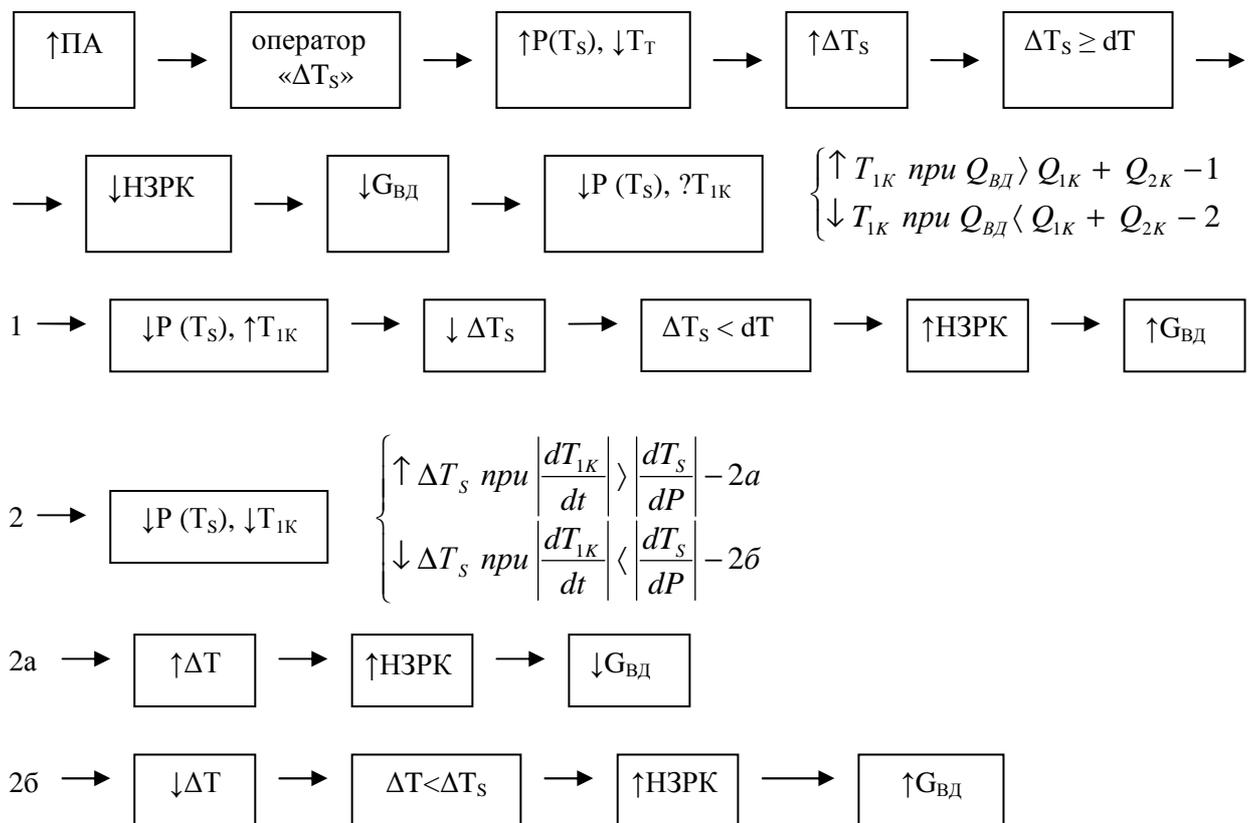


Рис. 1. Процессы регулирования ЗРК САОЗ ВД.

Таким образом, эффективное регулирование ЗРК САОЗ ВД при последовательной схеме подключения возможно только при дополнительных настройках в режиме поддержания ΔT_s :

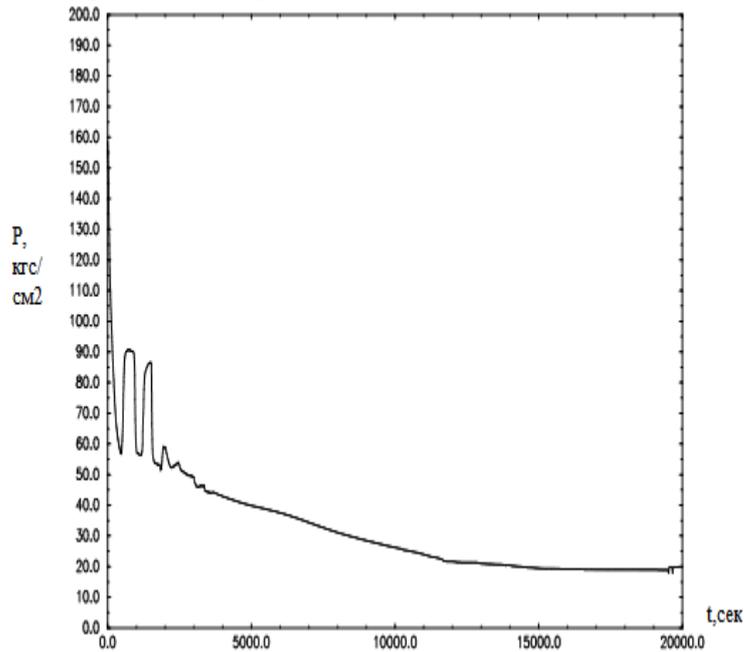
$$\frac{dT_s}{dt} \left[\frac{dP}{dt} \left(\frac{dH}{dt} \right), P \right] < \frac{dT_{1K}}{dt} (Q_{1K}, Q_{2K}), \quad (3)$$

$$\left| \frac{dT_{1K}}{dt} \right| \left(\frac{dH}{dt} \right) < \left| \frac{dT_{1K}}{dt} \right| (Q_{1K}, Q_{2K}), \quad (4)$$

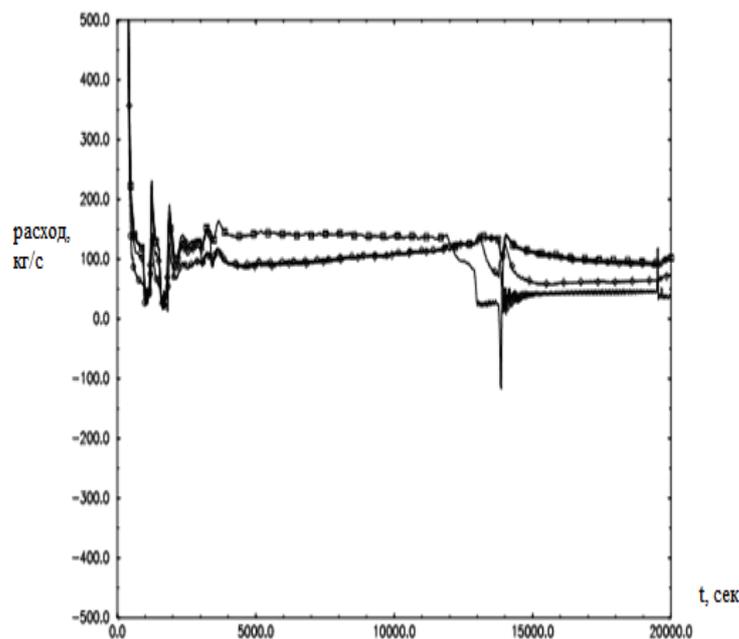
Условия (3), (4) означают, что для эффективного регулирования необходимо не только текущее положение рабочего органа ЗРК (условие (1)), но и скорость его перемещения, а также условия охлаждения в 1-м и во 2-м контурах (в том числе конфигурации систем, их осуществляющие).

В РПД работа регулятора также может приводить к автоколебательному процессу: начальный рост давления (↑P) приводит к уменьшению рассогласования ΔP (условие (2)) и закрытию регулятора (↓Н ЗРК) с последующим снижением расхода САОЗ ВД (↓G_{ВД}) и снижению давления в 1-м контуре. Снижение давления в 1-м контуре при прочих равных условиях может привести к последующему увеличению расхода от САОЗ ВД (↑G_{ВД}), связанному с уменьшением противодействия. Эффективность регулирования в этом случае будет связана с обеспечением дополнительных условий преобладания фактора изменения давления 1-го контура за счет изменения гидравлического сопротивления регулятора перед фактором изменения противодействия для работы насосов САОЗ ВД.

Подтверждением возможности возникновения колебаний основных регулируемых параметров в процессе аварий с течами 1-го контура, являются известные расчетные обоснования эффективности работы ЗРК САОЗ ВД, полученные ОП ЗАЭС с партнерами для серийных энергоблоков с ВВЭР 1000/В-320. Так, для характерного исходного события аварии с малой течью 1-го контура, компенсируемой работой САОЗ ВД (непреднамеренное открытие предохранительного клапана компенсатора давления – ПК КД – с учетом работы ЗРК САОЗ ВД по сигналу запаса температуры теплоносителя до насыщения в горячих петлях – сценарий № 11), подтверждаются существенные колебания основных регулируемых параметров



а) зависимость давления (P) от времени (t)



б) расход в каналах САОЗ ВД от времени

Рис. 2. Поведение режимных параметров в процессе аварии с течью теплоносителя ВВЭР-1000 (В-320) при установке ЗРК.

(давления в 1-м контуре P , минимального запаса до кипения теплоносителя на выходе из активной зоны ΔT_s , расхода теплоносителя через активную зону и в течь в диапазоне времени

работы регуляторов от 900 с процесса (открытие оператором ЗРК САОЗ ВД в режиме поддержания запаса до кипения $\Delta T_S = 20$ °С в горячих петлях) до 3000 с (последовательное отключение по критерию запаса более 15 °С оператором двух каналов САОЗ ВД с ЗРК) (см., например, рис. 2).

Из полученных результатов можно сделать следующие выводы.

1. На начальных этапах аварии работа регулятора не только является неэффективной, но и вредной, так как приводит к дополнительным циклическим динамическим и термическим нагрузкам. Так, например, в процессе колебаний положения штока регулятора, определяющего динамику поведения параметров теплоносителя в реакторе, амплитуды колебаний температуры теплоносителя достигают десятки градусов при скоростях изменения температуры более 300 - 400 °С/ч. Такие условия способствуют возникновению термошока на корпус и внутрикорпусные устройства реактора. Возникновение высокочастотных и высокоамплитудных колебаний давления теплоносителя в активной зоне приводит к дополнительным высокоциклическим нагрузкам на оболочки твэлов, которые могут привести к недопустимым нарушениям их целостности [6].

2. В процессе одновременной работы всех трех регуляторов каналов САОЗ ВД может возникнуть асинхронность (или противофазность) движений штоков ЗРК (например, случайно или при ошибочных действиях оператора), следствием которой может быть возникновение межканальной теплогидродинамической неустойчивости, способствующей развитию недопустимых автоколебательных процессов в реакторной установке (см., например [6, 7]).

3. Эффективность работы ЗРК САОЗ ВД осуществляется на более поздних стадиях аварии (когда процесс становится стабильным) в отношении «экономного» использования запасов баков САОЗ ВД до подключения САОЗ НД и сокращения расхода в течь. Однако для серийных ВВЭР-1000 (В-320) эти факторы не являются критичными, так как в этих проектах предусмотрено автоматическое переключение насосов САОЗ ВД на прямом гермообъема, а влияние суммарного выброса теплоносителя за весь период аварии в течь на безопасность практически одинаково для проектного режима и при установке ЗРК.

4. В отношении условий возникновения термоудара (термошока) на корпус реактора установка ЗРК САОЗ ВД ВВЭР 1000/В320 также неэффективна, так как наиболее вероятными условиями термоудара являются начальные моменты подачи охлаждающего раствора от САОЗ ВД (максимальные градиенты температур и скорости расхолаживания при относительно высоких давлениях). Подключение же ЗРК осуществляется оператором позднее открытия проектной арматуры на напоре САОЗ ВД (в данном случае через 600 с). Кроме того, как следует из результатов расчетного моделирования, на начальных этапах открытия ЗРК возникают существенные колебания теплогидродинамических параметров (см. рис. 2), способствующие возникновению дополнительных циклических динамических и термических нагрузок на корпус реактора и внутрикорпусных устройств, а также условию возникновения термошока (скорость изменения температуры теплоносителя сотни градусов в час).

На более поздних стадиях развития аварийного процесса установка ЗРК САОЗ ВД также не исключает возможности возникновения термошока, так как в потенциальной области возможного возникновения термошока (температура теплоносителя ниже 140°С при давлениях 40 – 20 кгс/см²) происходит относительно резкое снижение температуры теплоносителя при подключении насосов САОЗ НД со скоростью более 400 °С/ч.

5. При проектных условиях протекания аварии установка ЗРК также не является эффективной в отношении сокращения срабатываний систем 1-го и 2-го контуров для расхолаживания и регулирования давления. Кроме того, установка ЗРК предполагает различные действия оператора (идентификация события, выбор режимов регулирования и т.п.), а вероятность ошибочных действий персонала в относительно короткий промежуток времени (в данном случае несколько минут) может быть существенно выше вероятности отказов систем в автоматических режимах, что в конечном итоге отразится на показателях надежности и безопасности.

Аналогичные результаты следуют также из дополнительного расчетного моделирования аварии с непреднамеренным открытием ПК КД ВВЭР 1000 (В-320), в которых предполагались только действия оператора по включению ЗРК в работу на 900 с при дальнейших действиях по расхолаживанию РУ и при отсутствии воздействий защит САОЗ по снижению запаса по насыщению менее 10 °С на ЗРК после первого срабатывания (при регулировании по сигналам запаса до насыщения как в горячих нитках, так и на выходе теплоносителя из активной зоны).

Следует также отметить некоторые противоречия результатов расчетных обоснований [1] для малосерийных ВВЭР-1000:

1. Время начала подключения каналов САОЗ ВД не зависит от времени начала регулирования, которое осуществляется на более поздних этапах развития аварийных процессов. Однако в полученных расчетах [1] в случае регулирования момент начала подключения каналов САОЗ ВД наступает более чем в два раза позже, чем без вмешательства оператора, без достаточных обоснований.

2. В отдельных расчетных обоснованиях установлено отсутствие колебаний давления теплоносителя в реакторе при регулировании расхода от насосов САОЗ ВД вызывает вполне обоснованные сомнения, так как алгоритм регулирования, заложенный в ЗРК САОЗ ВД имеет колебательный характер.

Одной из причин полученных результатов может быть недостаточная оптимизированность нодализационных схем и численных методов моделирования, под которой понимается независимость получаемых результатов от пространственно-временных интервалов в процессе численного интегрирования (или в пределах принятых погрешностей). Особенно актуальным вопрос оптимизированности численных методов интегрирования становится в режимах с регулированием, так как в этих случаях на принимаемый временной интервал численного интегрирования накладываются дополнительные ограничения по определенному соотношению с характерным временем перемещения (скоростью перемещения) штока регуляторов и характерным временем «отклика» всей системы РУ на перемещение штока регуляторов. Возможно, что именно неучет этого фактора и повлиял на не вполне обоснованную аperiodичность поведения давления теплоносителя на всех этапах регулирования.

В технических обоснованиях [1] приведен также расчет течи 1-го контура с эквивалентным диаметром 30 мм (определена как паровая течь КД), в проектном режиме со скоростью расхолаживания 30°С/ч и при регулировании с уставкой $\Delta T_S = 15^\circ\text{C}$ и скоростью расхолаживания 30°С/ч. В результатах этих расчетов поведение давления в 1-м контуре при регулировании более реалистичного (сопровождается колебаниями давления, вызванными процессом регулирования). При этом установлено, что применение ЗРК САОЗ ВД позволяет сократить интегральный расход от САОЗ ВД и время до подключения САОЗ НД. Вместе с тем в результате расчетного моделирования этих режимов установлено, что от момента включения ЗРК САОЗ ВД до подключения САОЗ НД в режиме регулирования имеют место существенные по частоте и амплитуде колебания температуры теплоносителя на входе в активную зону и давления (в отличие от режима без ЗРК САОЗ ВД). Например, амплитуды колебаний температуры до 80 °С и скорость ее изменения более 300 °С/ч. Таким образом, необходим дополнительный анализ влияния этих колебаний на условия возникновения термоудара на корпус реактора и внутрикорпусных устройств, так как скорости и амплитуды изменения теплогидродинамических параметров в процессе этих колебаний значительны.

Использованные для оценки условий возникновения термоудара и холодного охрупчивания корпуса реактора известные методики и диаграммы Westinghouse и ОКБ «Гидропресс» учитывают только точечные значения давления и температуры теплоносителя на входе в реактор. Для условий возникновения термоудара и холодного охрупчивания важным фактором является также скорость изменения температуры поверхности корпуса реактора, зависящая не только от давления и температуры теплоносителя на входе, но также и от условий теплообмена, определяемых скоростью изменения теплогидродинамических параметров.

Поэтому непосредственное использование указанных диаграмм (без оценок скорости изменения теплогидродинамических параметров) в общем случае недостаточно обосновано. Кроме того, если основываться на методике Westinghouse оценки условий термоудара, то при регулировании расхода от САОЗ ВД также возникают условия термоудара в диапазоне давления 40 - 20 кг/см² и температуры теплоносителя в опускном участке 120 - 80°С при значительных скоростях изменения параметров.

4. Формально, согласно техническим обоснованиям [1], уменьшение суммарной частоты повреждения активной зоны (ЧПАЗ) связано с сокращением количества конечных состояний с повреждением активной зоны в результате совместной реализации режима "Feed/Bleed" и работы ЗРК САОЗ ВД. Однако при этом недостаточно обоснованы следующие положения:

1) непосредственное влияние ЗРК САОЗ ВД на общие показатели безопасности (без "Feed/Bleed" или невозможность реализации "Feed/Bleed" без ЗРК);

2) включение ЗРК САОЗ ВД требует действий оператора по контролю, идентификации исходного события, переключению/выбору режимов регулирования и т.п., что может снизить общие показатели надежности выполнения функций безопасности САОЗ ВД («человеческий фактор»), а соответственно, ухудшить показатели безопасности (ЧПАЗ) по отношению к автоматическим режимам без вмешательства персонала.

Таким образом, проведенный анализ показывает неэффективность установки регуляторов САОЗ ВД, а негативными последствиями является возникновение автоколебательных процессов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Концептуальное* техрешение № ТР.0.38.01.1656 «О регулировании расхода впрыска в 1-й контур от насосов САОЗ ВД при компенсируемых течах теплоносителя 1-го контура на РУ В-302 и В-338 энергоблоков № 1 и № 2 ЮУ АЭС» - 2008 г.
2. *Программно-технический* комплекс системы аварийных регуляторов первой управляющей системы безопасности энергоблока №1 ЮУ АЭС на базе ПТК «Вулкан-М-АР-1/1» - УСБ1.21001.ПБ.01.2-1.М – «Львов ОРГРЭС» - 2009 г.
3. *Арматура* энергетическая. Клапаны регулирующие типа «Диск» DN 50-700. ТУ У 29.1-24930577-002-2004.
4. *Ровенская АЭС*. Энергоблок № 4. Окончательный отчет по анализу безопасности. Глава 15. Анализ проектных аварий. База данных по ЯППУ. 38-223.203.007.БД.01-09.
5. *Система* автоматического регулирования реакторного отделения РАЭС. Альбом алгоритмов САР УСБ2 бл. № 1 РАЭС. 804.17833618.070481.С1.21.1-1М. ТЕХЭНЕРГО. - 2008 г.
6. *Герлига В.А., Хабенский В.Б.* Нестабильность потока теплоносителя в энергооборудовании АЭС. - М.: Атомэнергоиздат, 1994. – 288 с.
7. *Скалозубов В.И., Коврижкин Ю.Л.* Термоакустическая неустойчивость теплоносителя в ВВЭР: Монография. – 2000. – 120 с.

АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ ЗАХОДУ З РЕГУЛЮВАННЯ ВИТРАТИ СИСТЕМИ АВАРІЙНОГО ОХОЛОДЖЕННЯ РЕАКТОРА НАСОСАМИ ВИСОКОГО ТИСКУ В ПРОЦЕСІ АВАРІЙ З ТЕЧАМИ ТЕПЛОНОСІЯ

В. І. Скалозубов, Т. М. Зеленцова, Хадж Фараджаллах Даббах А., К. В. Скалозубов

Наведено аналіз галузевих науково-технічних обґрунтувань ефективності встановлення додаткових регуляторів витрати систем аварійного охолодження реактора серійних енергоблоків з ВВЕР-1000. Показано, що встановлення додаткових регуляторів є неефективним і не підвищує надійність управління аваріями з течами теплоносія.

Ключові слова: водо-водяний реактор; система аварійного охолодження зони високого тиску, низького тиску; запірно-регулювальні клапани; реакторна установка, підживлення/піддування.

THE ANALYSIS OF EFFICIENCY OF ACTIONS FOR REGULATION OF THE EXPENSE OF SYSTEM OF EMERGENCY COOLING OF A REACTOR BY PUMPS OF A HIGH PRESSURE IN THE COURSE OF FAILURES WITH HEAT-CARRIER LEAKS**V. I. Skalozubov, T. M. Zelentsova, Haj Farajallah Dabbach A., K. V. Skalozubov**

The analysis of branch scientific and technical substantiations of efficiency of installation of additional regulators of the expense of systems of emergency cooling of a reactor of serial power units with ВВЭР 1000 is resulted. It is shown, that installation of additional regulators is inefficient and does not raise reliability of management of failures with heat-carrier leaks.

Keywords: water power reactor; system of emergency cooling zone of high pressure, regulating valves; reactor installation, Feed/Bleed.

Поступила в редакцию 20.05.10