

ANALYSIS of DETERMINATION METHODS of the AIR INFLOW to the TURBOGENERATOR VACUUM PART with MAIN WATER-JET EJECTORS

O. Emets, S. Chuprynin

Air tightness determination methods of the turbogenerator vacuum system were analyzed. The peculiarities at the calculation of the air inflow discharge to the turbogenerator vacuum part with main water-jet ejectors were revealed. The accuracy at the air inflow determination by means of the analyzed methods is showed to be poor. A number of another disadvantages reduced the effectiveness of these methods using were visualized.

Список использованных источников

1. *Ефимочкин Г.И.* Способ оценки воздушной плотности вакуумной системы турбоустановки с водоструйными эжекторами / Г.И. Ефимочкин // Электрические станции. - 1970. – № 8. – С. 24 - 26.
2. *Кирш А.К.* Методы и результаты испытаний конденсаторов паровых турбин и опыт эксплуатации конденсационных установок / А.К. Кирш // Теплоэнергетика. - 1978. – № 2. – С. 89 - 92.
3. Программа-методика определения присосов воздуха в вакуумную систему при работе турбоустановки на мощности. 141-43/3,4-Пр-СНИО 2005 / ОП «Ровенская АЭС».
4. Алгоритм расчета и представления результатов автоматизированной системы контроля за состоянием схемы воздухоудаления конденсационной установки турбины К-1000-60/3000 ст. № 1 Хмельницкой АЭС.

Надійшла до редакції 11.09.2013 р.

УДК 621.039.73

ОЦЕНКА УСТОЙЧИВОСТИ АЛГОРИТМОВ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ РАСХОДА ДЕЙСТВУЮЩИХ САОЗ ВД РЕАКТОРОВ ВВЭР В СЛУЧАЕ ЕСТЕСТВЕННОЙ ЦИРКУЛЯЦИИ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ

А.Ю. Лавренчук¹, асп., С.Т. Мирошниченко¹, к.т.н., доц.,
В.А. Герлига², д.т.н., проф., Д.В. Шевелев², к.т.н.

¹Севастопольский национальный университет ядерной энергии и промышленности
²Отделение научно-технической поддержки ОП НТЦ НАЭК «Энергоатом», г. Севастополь

Описаны основные проблемы, возникающие при функционировании систем безопасности (систем аварийного охлаждения активной зоны высокого давления), и обоснована необходимость их модернизации. Приводятся технические решения и пути дальнейших исследований по усовершенствованию систем безопасности, применяемых на АЭС с ВВЭР. Сформулированы выводы.

Введение

При авариях с течью первого контура системы аварийного охлаждения активной зоны (САОЗ) выполняют основные функции безопасности – подпитку первого контура и отвод остаточных энерговыделений от активной зоны реактора, предотвращая повре-

ждение ядерного топлива. Выполнение указанных функций для больших течей в полной мере обеспечивается проектом САОЗ без участия систем второго контура [4].

При малых течах процесс расхолаживания активной зоны реактора принципиально отличается. Здесь в ходе развития аварийного процесса может быть достигнуто такое состояние, когда течь первого контура компенсируется САОЗ ВД и давление первого контура перестает снижаться, что препятствует переводу РУ в безопасное конечное состояние. В данной ситуации перед персоналом стоит задача контролируемо, с максимально допустимой скоростью, снижать давление в первом контуре. Проектом не предусмотрена возможность управления давлением и расходом САОЗ. Это вынуждает оперативный персонал использовать систему в непроектных режимах, что усложняет управление аварийным процессом и является предпосылкой ошибочных действий персонала или возникновения дополнительных отказов оборудования. В результате возможно более тяжелое протекание аварийного процесса, нарушение функций безопасности и, в конечном счете, повреждение активной зоны.

Особенность группы проектных аварий «Малые течи теплоносителя из первого контура» в диапазоне 13...50 мм для РУ В-320 состоит в том, что работа насосов САОЗ ВД поддерживает достаточно высокий уровень давления теплоносителя при компенсации течи [2, 5]. При этом, даже при работе одного канала САОЗ ВД, давление в системе первого контура не снижается до 20 кгс/см^2 , что делает невозможным подключение насоса САОЗ НД к системе первого контура без последовательного отключения насосов ТQ13(23, 33) оператором, как это предусмотрено ИЛА (СОАИ) [1]. Управление данной аварией связано с большим количеством технических переключений, выполняемых оперативным персоналом БЩУ. Одна из операций для управления напорными характеристиками САОЗ связана с необходимостью вмешательства в работу алгоритма каналов СБ для перевода насосов САОЗ ВД на рециркуляцию.

Установка запорно-регулирующих клапанов (ЗРК) на напоре САОЗ ВД позволит при малых течах обеспечить расхолаживание РУ при минимальных давлениях в первом контуре с минимальным интегральным впрыском от САОЗ ВД до включения САОЗ НД [5].

Недостатком данного мероприятия является неустойчивость (возникновение автоколебаний) работы регулятора САОЗ ВД при естественной циркуляции теплоносителя, которая связана с запаздыванием влияния изменения расхода от САОЗ ВД на параметр регулирования – запас до насыщения на выходе из активной зоны [1]. Решением данной проблемы может быть комплекс мероприятий, направленных на установку дополнительных средств измерения температуры теплоносителя в районе зон впрыска от САОЗ ВД, либо использование штатной СВРК для непосредственных измерений температуры теплоносителя в активной зоне. Для выбора оптимального решения необходимо построение математической модели, проведение расчетного анализа и, как результат, выбор закона регулирования и настроечных коэффициентов, при которых будет обеспечена устойчивость работы регулятора при естественной циркуляции теплоносителя. Расчетные анализы могут быть выполнены с использованием реалистических моделей энергоблоков для «интегральных» теплогидравлических кодов, например, RELAP5.

Постановка цели и задач научного исследования

Целью данной научной работы является разработка мероприятий по оценке параметров движения теплоносителя первого контура в режиме естественной циркуляции, создание математической модели процессов и выработка рекомендаций по использованию регулятора ЗРК САОЗ ВД в этих условиях (создание методики).

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- сделать анализ специфики объектов, в которых планируется реализация предлагаемого метода;
- провести анализ результатов современных исследований процессов при течи теплоносителя;
- разработать мероприятия по созданию дополнительных условий оценки параметров теплоносителя первого контура в условиях естественной циркуляции;
- разработать математическую модель протекания теплогидравлических процессов в ГЦТ при наличии “малой течи” в условиях естественной циркуляции теплоносителя первого контура и математической модели регулятора ЗРК САОЗ ВД;
- провести исследование режимов работы ЗРК на напоре САОЗ ВД в случае естественной циркуляции теплоносителя в реакторной установке ВВЭР-1000.

Особенности модернизации системы аварийного охлаждения активной зоны высокого давления

Метод управляемого регулирования давления при расхолаживании в условиях малой течи состоит в том, что расход подпитки, компенсируя течь первого контура, в то же время должен обеспечивать снижение давления (P) в 1-м контуре без вскипания теплоносителя, то есть поддерживать постоянный запас до кипения (dTs) на выходе из активной зоны.

Основные преимущества установки ЗРК САОЗ ВД, которые определены техническими обоснованиями [1], можно обобщенно сформулировать следующими положениями:

1. Повышаются общие показатели безопасности вследствие сокращения числа возможных срабатываний систем 1-го и 2-го контуров, обеспечивающих поддержание давления и расхолаживание в процессе аварий с течами.

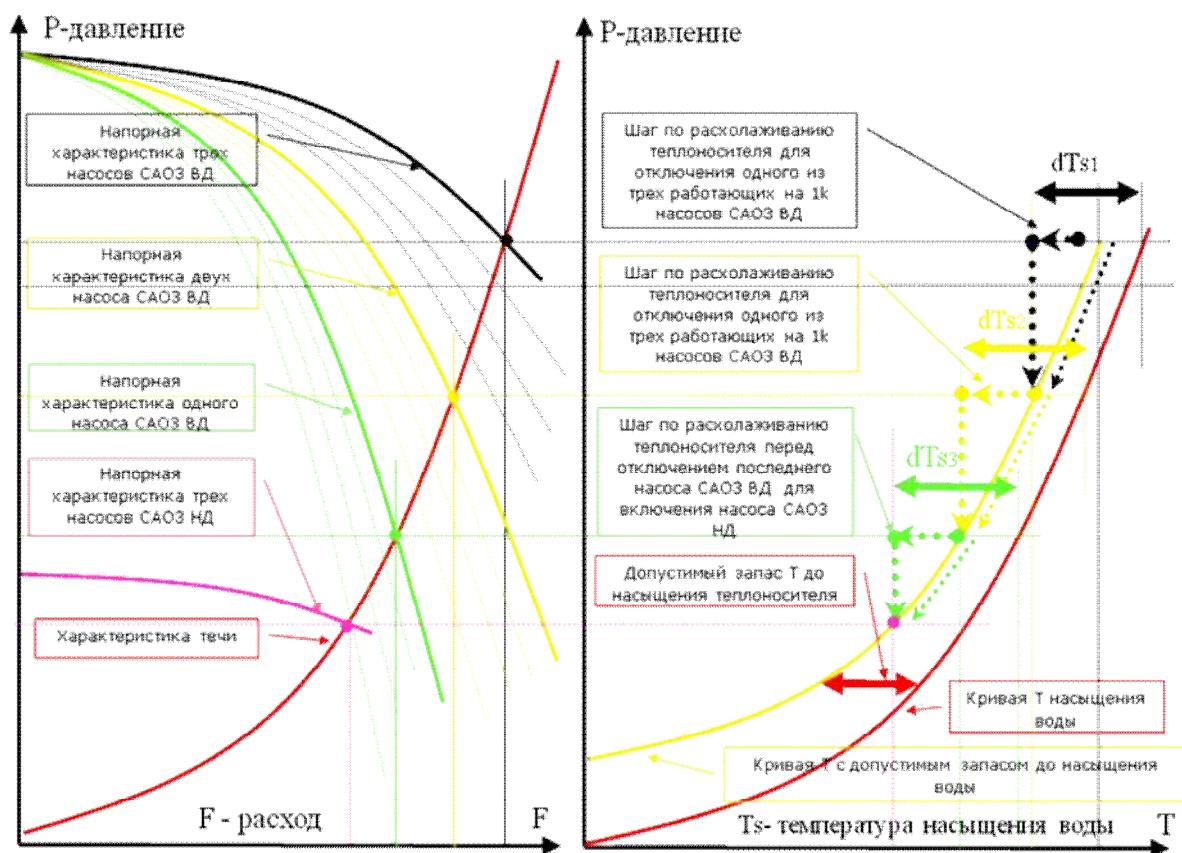
2. Исключаются или существенно смягчаются условия, приводящие к возникновению термошока на корпус реактора (сочетание высокого давления в контуре с низкой температурой теплоносителя в опускной камере реактора).

3. Сокращаются выбросы теплоносителя в гермообъем РУ при авариях с течами первого контура, а также за пределы гермообъема и в окружающую среду при межконтурных течах.

Избыточный расход САОЗ ВД в 1-й контур может привести к неконтролируемому глубокому захолаживанию теплоносителя в опускной камере ядерного реактора при высоком давлении (термошок или холодная перепрессовка), следствием чего будет нарушение критериев по хрупкой прочности корпуса реактора, особенно для РУ с большим сроком эксплуатации.

На рис. 1 представлена стратегия управления расходом аварийного впрыска от САОЗ ВД с заданным dTs 1-го контура.

Согласно [2], для модернизации САОЗ ВД предусмотрены установка байпасного трубопровода с регулирующим клапаном параллельно запорной арматуре TQ13(23,33)S07 и использование регулятора управления расходом впрыска от насосов САОЗ ВД в первый контур. Установка дроссельного устройства на байпасе основного трубопровода САОЗ ВД обеспечит устойчивую работу насоса при давлениях 1-го контура менее $40 \text{ кг}\cdot\text{с}/\text{см}^2$ с условием сохранения проектной напор-расходной характеристики системы при давлении на напоре насоса более $40 \text{ кгс}/\text{см}^2$. Прототипом регулирующего клапана был выбран клапан типа «Диск» с пропускной способностью $120 \text{ м}^3/\text{ч}$, который подходит по размерам стыкуемой трубы $159 \times 17 \text{ мм}$ [3]. Клапан обладает характеристиками, представленными в табл. 1.

Рис. 1. Стратегия управления расходом от САОЗ ВД с заданным dTs I-го контура

Т а б л и ц а 1

Характеристики прототипа ЗРК

№ п/п	Название	Единица измерения	Значение
1	Условный проход	мм	125
2	Давление номинальное (условное)	кгс/см ²	180
3	Температура рабочей среды, не более	°С	350
4	Допустимый перепад давления	кгс/см ²	180
5	Допустимая протечка при закрытом затворе	т/ч	0,024
6	Пропускная способность воды в открытом положении и перепаде 0,1 МПа	м ³ /ч	120
7	Минимальный регулируемый расход	т/ч	0,05
8	Стыкуемая труба	мм	159 x 17

Управление расходом САОЗ ВД при помощи ЗРК может быть применено при «малых» течах теплоносителя первого контура (включая течь через ПК КД), при течах 1-го контура во 2-й (ограничение давления в первом контуре ниже уставки открытия ИПУ второго контура), а также при необходимости реализации режима «сброс - подпитка» в случае потери теплоотвода по 2-му контуру.

На РУ ВВЭР-1000 термопары на холодных нитках циркуляционных петель более удалены от входных патрубков реактора, чем патрубки впрыска от насосов САОЗ ВД (рис. 2).

Данное обстоятельство не дает возможности точно измерить температуру на входе в реактор при работе САОЗ ВД и оценить эффект, вносимый ими в уравнения массового и теплового баланса при течи I-го контура. Поэтому рассматривается предложение реализовать дополнительный канал измерения температуры, установив датчик непосредственно в зоне входа теплоносителя в опускную камеру реактора. Информация с этих датчиков будет задействована в алгоритмах регулирования расхода САОЗ ВД при естественной циркуляции теплоносителя, что позволит снизить временные задержки параметров регулирования, используемых в законе регулирования расхода на напоре САОЗ ВД. Тем не менее, данное решение имеет недостатки. Основные из них – необходимость выполнить дополнительные врезки в ГЦТ, и, кроме того, вопрос транспортного запаздывания теплоносителя в реакторе в условиях естественной циркуляции не снимается.

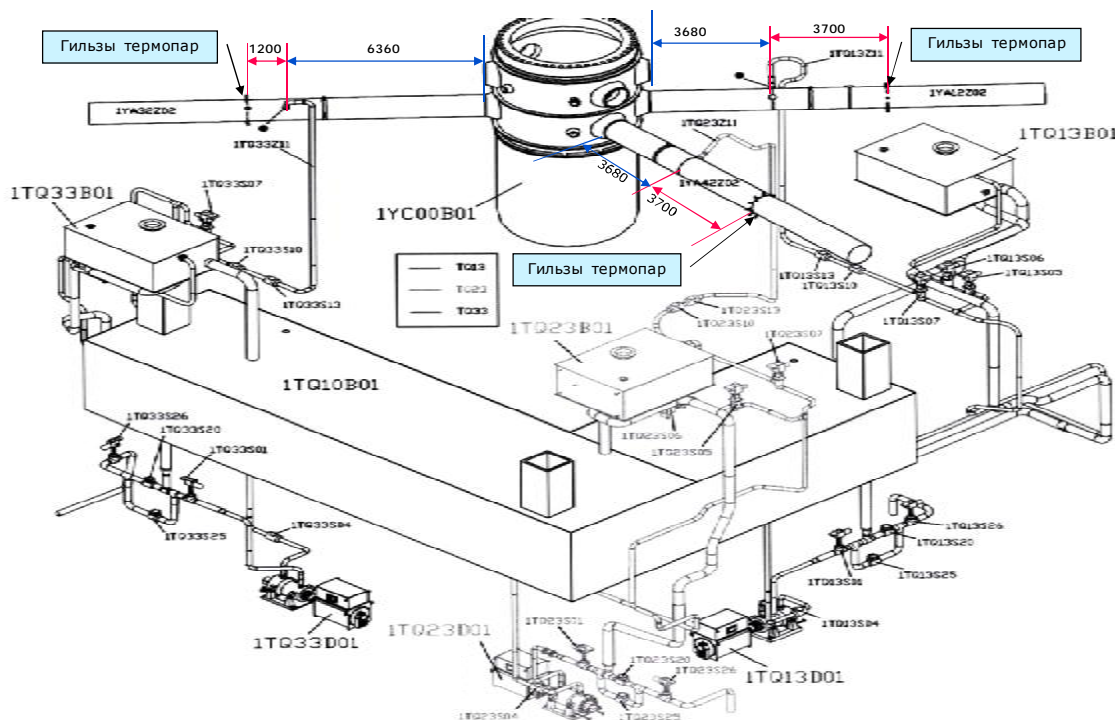


Рис. 2. Схема взаимного расположения гильз термопар относительно патрубков впрыска от насосов САОЗ ВД на холодных петлях РУ В-320

Исследования режимов работы ЗРК на напоре САОЗ ВД в случае естественной циркуляции теплоносителя в реакторной установке ВВЭР-1000

При течах теплоносителя первого контура одним из возможных дополнительных отказов является отключение главных циркуляционных насосов (ГЦН) по технологическим защитам или вследствие наложения потери внешнего электроснабжения. В первом контуре реактора устанавливается режим естественной циркуляции теплоносителя (ЕЦТ), который обеспечивает отвод остаточного энерговыделения ко второму контуру в процессе расхолаживания РУ. При нормальных параметрах теплоносителя на входе в реактор после останова ($t_{вх} = 288 \text{ }^\circ\text{C}$) удастся обеспечить отвод тепловой мощности от реакторной установки (РУ) не менее 7...10 % от номинальной, что вполне достаточно для обеспечения надежного расхолаживания реактора [1].

Как известно [4], условием существования стационарного режима естественной циркуляции в замкнутом контуре является равенство движущего напора $\Delta P_{\text{дв}}$ и гидравлического сопротивления $\Delta P_{\text{сопр}}$ контура циркуляции. Движущий напор прямо пропорционален разности плотностей теплоносителя в подъемном «горячем» и опускном «холодном» участках контура циркуляции и разности высотных отметок участков с подводом (активная зона) и отводом (парогенератор) тепла. Гидравлическое сопротивление пропорционально квадрату расхода теплоносителя через контур. Таким образом, условие существования режима естественной циркуляции имеет вид

$$g(r_x - r_r)\Delta H = \sum_{i=1}^n \xi_i \frac{G_i^2}{2r_i F_i^2}, \quad (1)$$

где g – ускорение свободного падения;

ρ_r, ρ_x – плотность теплоносителя в подъемном и опускном участках главного циркуляционного контура (ГЦК);

ΔH – разность высотных отметок между центрами теплообменной поверхности парогенератора и активной зоны реактора;

ξ_i – коэффициент гидравлического сопротивления i -го участка ГЦК;

G_i, ρ_i – расход и плотность теплоносителя на i -м участке ГЦК;

F_i – площадь проходного сечения i -го участка ГЦК.

Разность высотных отметок между центрами активной зоны реактора и теплообменной поверхности парогенератора составляет 9,4 м. Полное гидравлическое сопротивление реактора и ГЦК (без реактора), составляет 3,354 и 0,505 МПа, соответственно. Коэффициент гидравлического сопротивления (КГС) ГЦК, приведенный к скорости в «холодной» нитке – $\xi_{\text{ГЦК}} = 14,1$. В том числе: КГС реактора – $\xi_r = 9,9$; КГС «холодной» нитки – $\xi_x = 0,284$; КГС «горячей» нитки – $\xi_r = 0,73$; КГС парогенератора – $\xi_{\text{ПГ}} = 3,2$.

Основные характеристики РУ с ВВЭР-1000 при работе в номинальном режиме приведены в табл. 2.

Т а б л и ц а 2

Основные характеристики РУ с ВВЭР-1000 при работе в номинальном режиме

Наименование параметра	Единица измерения	Величина
Тепловая мощность реактора	МВт	3000
Давление теплоносителя	МПа	16
Температура теплоносителя - на входе в реактор - на выходе из реактора	°С	289 321
Объемный расход теплоносителя через реактор,	м ³ /ч	84800
Средняя скорость теплоносителя в активной зоне	м/с	5,4
Скорость теплоносителя в «холодной» нитке ГЦК	м/с	10

Состояние с отключенными ГЦН ужесточает требования к регулированию ЗРК САОЗ ВД за счет низкой скорости циркуляции в 1-м контуре (значительное транспортное время) и вызванных этим эффектов временного рассогласования параметров в различных точках циркуляционного контура.

Регулирование расхода от САОЗ ВД при отсутствии принудительной циркуляции характеризуется значительным запаздыванием влияния подачи от САОЗ ВД на параметр регулирования – запас до насыщения на выходе из реактора. В этом случае регулирование приобретает колебательный режим (неустойчиво) с периодом колебания запаса до насыщения на выходе активной зоны около 8...10 мин [1], который соизмерим с характерным временем транспорта теплоносителя первого контура от активной зоны к ПГ и обратно. Для случая течей 40...50 мм колебания менее выражены и затухают быстрее, чем для течей 20..30 мм, по причине увеличенного необходимого расхода САОЗ ВД.

В [5] рассматривалась работа ЗРК САОЗ ВД в трех режимах по выбору оператора:

- стерегущий (РСТ);
- поддержания запаса температуры до вскипания теплоносителя (ΔT_s) для $\Delta T_s = 3\text{ }^\circ\text{C}; 10\text{ }^\circ\text{C}; 15\text{ }^\circ\text{C}; 20\text{ }^\circ\text{C}; 30\text{ }^\circ\text{C}$;
- поддержания фиксированного значения давления на напоре насоса САОЗ ВД (РПД).

Входными сигналами регуляторов являются давление теплоносителя в 1-м контуре (P); температуры теплоносителя в разных местах 1-го контура ($T_{1к}$) и положение импульсного механизма регулятора (S). Следуя аналогичному подходу РАЭС-1 [3], принят разбаланс вида

$$e = dT_{s0} - dT_s(t) - k \cdot S(t), \quad (2)$$

где dT_{s0} – уставка регулирования;

$dT_s(t)$ – текущее значение запаса до насыщения;

k – коэффициент обратной связи по положению клапана;

S – положение клапана.

Положение клапана выбирается относительно начального положения, в котором регулятор начал работу. Наличие обратной связи по положению клапана приводит к тому, что поддерживаемое значение запаса до насыщения сдвигается вниз при увеличении степени открытия или, что то же самое, при увеличении размера течи.

На основании [1] для случаев отсутствия принудительной циркуляции отличие измеренного запаса до насыщения в горячих нитках и на выходе активной зоны является значимым. Зстой и возможный обратный ток циркуляции в петлях приводят к тому, что сигнал по петлям РУ становится непредставительным для оценки охлаждения активной зоны. Его низкое значение заставляет ЗРК САОЗ ВД продолжать подачу воды САОЗ и фактически отключает регулирование.

Данный факт достаточно быстро приводит к достижению условий нарушения КФБ «Целостность». На рис. 3 - 6 представлены результаты анализа течи первого контура 20 мм из холодной нитки с последующим выводом каналов САОЗ ВД при отсутствии принудительной циркуляции теплоносителя с учетом работы ЗРК САОЗ ВД по сигналу запаса до насыщения в горячих нитках ГЦТ.

Анализ показывает, что для течей 1-го контура до 50 мм, включая открытие ПК КД, своевременное включение ЗРК в работу по сигналу запаса до насыщения на выходе активной зоны (по данным СВРК) предотвращает нарушение КФБ «Целостность». Использование регулятора ЗРК САОЗ ВД сокращает интегральный выброс в течь при течах 1-го контура до 25 % для течей 20 мм и до 7...12 % для течей 40...50 мм.

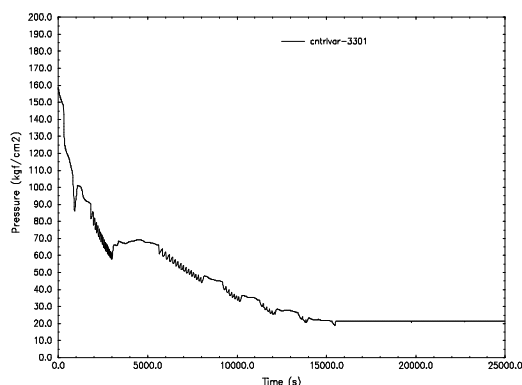


Рис. 3. Давление на выходе из реактора

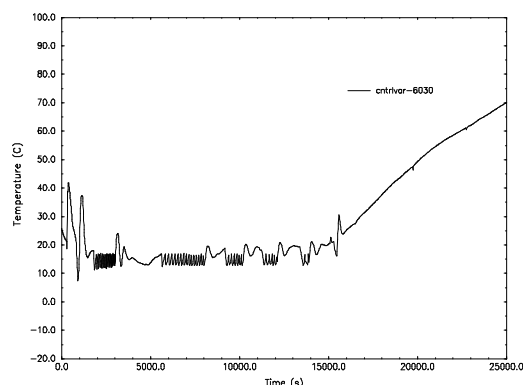


Рис. 4. Минимальный запас до насыщения в горячих нитках

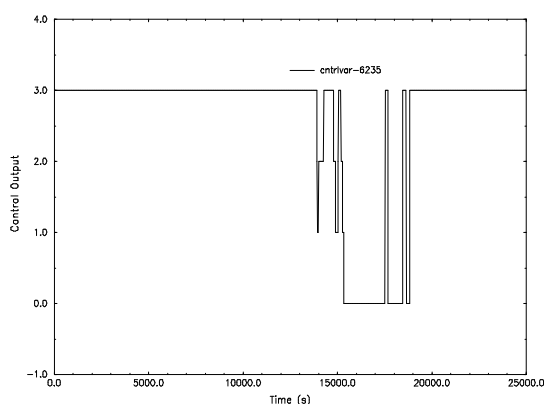


Рис. 5. Приоритет КФБ «Целостность»

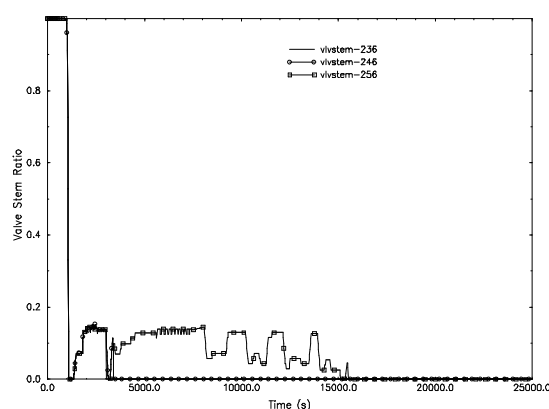


Рис. 6. Положение штока ЗРК на напоре насосов САОЗ ВД

Выводы

Работа регулирующих клапанов в общем случае может быть эффективной при дополнительных настройках по учету скорости рабочего органа регулятора, а также условиях и конфигурациях систем, обеспечивающих охлаждение 1-го контура. В противном случае установка регулирующих клапанов может быть не только неэффективной, но и снижать эффективность выполнения САОЗ ВД проектных функций безопасности.

Неэффективность работы ЗРК в автоколебательном режиме связана с такими основными факторами:

а) отсутствием возможности устойчивого снижения давления в 1-м контуре до уставок включения насосов САОЗ НД;

б) возникновением дополнительных циклических термодинамических нагрузок на конструкции реактора и оборудование реакторного контура и др.

Снижение надежности выполнения функций САОЗ ВД в автоколебательном режиме обуславливается:

а) увеличением вероятности отказа регуляторов, вызванного частыми перемещениями исполнительных механизмов;

б) увеличением вероятности ошибочных действий операторов, связанных с отсутствием идентификации таких режимов и/или регламентированием действий в условиях автоколебательных процессов.

Дальнейшее развитие обоснования целесообразности установки регуляторов на САОЗ ВД должно быть направлено:

а) на анализ исходных событий, проектных и запроектных аварийных последовательностей, в которых критичной для безопасности является работа САОЗ ВД, на предмет возможности возникновения автоколебательных процессов при установке регуляторов;

б) анализ возможных трудностей с реализацией изменения проекта САОЗ ВД (изменение гидравлических характеристик, перетрассировка и перекомпоновка оборудования);

в) выбор характеристик регулятора, алгоритма ввода его в действие и вывода из автоматического режима (с учетом мер по снижению автоколебаний) путем расчетного анализа с использованием расчетных моделей энергоблоков для интегральных расчетных кодов, таких как RELAP5.

ОЦІНКА СТІЙКОСТІ АЛГОРИТМІВ АВТОМАТИЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ ВИТРАТИ ДІЮЧИХ САОЗ ВД РЕАКТОРІВ ВВЕР У РАЗІ ПРИРОДНОЇ ЦИРКУЛЯЦІЇ ТЕПЛОНОСІЯ

О.Ю. Лавренчук, С.Т. Мирошніченко, В.А. Герлига, Д.В. Шевельов

Описані основні проблеми, які виникають під час функціонування систем безпеки (аварійного охолодження активної зони високого тиску) і обґрунтована необхідність їх модернізації. Наведені технічні розв'язання і шляхи подальших досліджень з удосконалення систем безпеки, діючих на АЕС з ВВЕР. Сформульовані висновки.

ALGORITHMS STABILITY ESTIMATION for the AUTOMATIC DEMAND CONTROL of OPERATING SACZ HP of WWER REACTORS in the CASE of HEATCARRIER' NATURAL CIRCULATION

O. Lavrenchuk, S. Miroshnichenko, V. Gerliga, D. Shevielov

The basic problems incipient during the safety systems operation (emergency core cooling systems, high-pressure zone) and its modernization necessity have been described. The engineering solutions and further research ways for the safety systems improving used at NPPs with WWER were given. Conclusions were formulated.

Список использованных источников

1. Оценка модернизации САОЗ ВД для обеспечения возможности управления давлением на напоре при работе насоса системы на 1-й контур: отчет. - 01-461.05.ЛИП.ЗП.ОТ.246.

2. Модернизация САОЗ ВД для обеспечения возможности управления давлением на напоре при работе насоса системы на 1-й контур: Концептуальное техническое решение 05.РО.ТQ.РШ.2149 от 21.10.09, согласованное с ГКЯРУ. - Исх. № 15-29/4-6041 от 28.10.09.

3. Система автоматического регулирования реакторного отделения РАЭС: Альбом алгоритмов САР УСБ2 бл. № 1 РАЭС. - 804.17833618.070481.С1.21.1-1М. - ТЕХ-ЭНЕРГО, 2008.

4. Гусев Б.Д. Гидродинамические аспекты надежности современных энергетических установок / Б.Д. Гусев, Р.И. Калинин, А.Я. Благовещенский. – Л.: Энергоатомиздат, 1985. – 215 с.

5. О регулировании расхода впрыска в первый контур от насосов САОЗ ВД при компенсируемых течах теплоносителя первого контура на РУ В-302 и В-338 энергоблоков № 1 и № 2 ЮУ АЭС: Концептуальное технич. решение, 2007.

Надійшла до редакції 10.09 2013 р.