

В. И. Скалозубов<sup>1</sup>, Ю. А. Комаров<sup>1</sup>,  
В. В. Богодист<sup>2</sup>, Ю. Ю. Воробьев<sup>3</sup>,  
И. М. Фольтов<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Институт проблем безопасности АЭС НАН Украины

<sup>2</sup> ГП НАЭК «Энергоатом»

<sup>3</sup> Международный центр по ядерной безопасности КНУ

## Анализ эффективности регулирования системы аварийного охлаждения активной зоны насосами высокого давления на АЭС с ВВЭР-1000/В-320

*Показано, что установка регулирующих клапанов на САОЗ ВД ВВЭР-1000/В-320 может быть эффективной только в случае дополнительных настроек по учету скорости изменения положения рабочего органа запорно-регулирующего клапана, а также конфигурации систем, обеспечивающих охлаждение 1-го контура.*

*Ключевые слова:* водо-водяной энергетический реактор (ВВЭР); защитная система аварийного охлаждения зоны реактора насосами высокого давления (САОЗ ВД); запорно-регулирующий клапан (ЗРК).

В. И. Скалозубов, Ю. А. Комаров, В. В. Богодист, Ю. Ю. Воробьев, И. М. Фольтов

### Аналіз ефективності регулювання системи аварійного охолодження активної зони насосами високого тиску на АЕС з ВВЕР-1000/В320

*Показано, що установлення регулюючих клапанів на САОЗ ВД ВВЕР-1000/В-320 може бути ефективним тільки у разі додаткових налаштувань з урахування швидкості переміщення робочого органу запорно-регулюючого клапана, а також конфігурації систем, що забезпечують охолодження 1-го контуру.*

*Ключові слова:* водо-водяний енергетичний реактор (ВВЕР); захисна система аварійного охолодження активної зони реактора насосами високого тиску (САОЗ ВД); запорно-регулюючий клапан (ЗРК).

© В. И. Скалозубов, Ю. А. Комаров, В. В. Богодист, Ю. Ю. Воробьев, И. М. Фольтов, 2010

**В** целях повышения эффективности и надежности управления авариями с течью 1-го контура реакторной установки малосерийных ВВЭР-1000/В-302, 338, для которых критичной является работоспособность защитной системы безопасности (СБ) — системы аварийного охлаждения активной зоны (САОЗ) с насосами высокого давления (ВД), — разработаны технические обоснования и решения [1] о необходимости модернизации этой системы путем регулирования подачи охлаждающей воды в 1-й контур. Основная цель регулирования расхода САОЗ ВД заключается в установке запорно-регулирующих клапанов (ЗРК) для обеспечения необходимого запаса температуры теплоносителя до кипения на выходе из активной зоны ( $\Delta T_s$ ) за счет поддержания допустимого давления ( $P$ ) в 1-м контуре. По мнению разработчиков [1], такое регулирование позволит существенно повысить эффективность и надежность управления авариями с течью теплоносителя (в том числе и межконтурной течью): сократить время подключения САОЗ с насосами низкого давления (НД) после отключения САОЗ ВД, ограничить потери теплоносителя, уменьшить вероятность отказа проектных арматур и термошока и т. д. [1]. Непосредственное регулирование расхода САОЗ ВД предполагается осуществлять ЗРК, установленными на байпасе проектной арматуры напорной линии САОЗ ВД, которые предназначены для поддержания необходимого запаса до кипения и давления 1-го контура. Примером таких регуляторов могут быть системы автоматического регулирования первой управляющей системы безопасности — УСБ-1 [2, раздел 1.2.1: Регуляторы САОЗ ВД], в которой предполагается поддержание запасов до кипения  $\Delta T_s = 10^\circ\text{C}; 15^\circ\text{C}; 20^\circ\text{C}$  и фиксированного значения давления в трех режимах по выбору оператора: стерегущем режиме (РСТ), режиме поддержания запаса до кипения ( $\Delta T_s$ ) и режиме поддержания давления (РПД). Входными сигналами регуляторов являются давление теплоносителя в 1-м контуре ( $P$ ), температура теплоносителя в разных местах 1-го контура ( $T_{\text{К}}$ ) и положение рабочего органа ЗРК ( $H$ ).

В качестве контраргументов установки на байпасе регуляторов САОЗ ВД ВВЭР-1000/В-320 могут выступать следующие соображения:

1. В отличие от малосерийных энергоблоков с ВВЭР-1000 [1] в проекте ВВЭР-1000/В-320 предусмотрено в случае исчерпания запасов баков автоматическое переключение насосов САОЗ ВД на подпитку от приемка гермооболочки. Поэтому вопросы сокращения времени подключения САОЗ НД не столь актуальны для ВВЭР-1000/В-320.

2. Наиболее опасен для возникновения термошока корпуса реактора при срабатывании САОЗ ВД момент достижения некоторой критической температуры, в который ожидается начало развития постулируемого дефекта в корпусе реактора. Главными факторами при этом являются скорость охлаждения и давление 1-го контура, которые максимальны на начальных фазах аварийных процессов с подачей от САОЗ ВД. Предполагаемый алгоритм работы регуляторов путем включения в автоматический режим оператором при несвоевременных действиях может привести к позднему снижению расхода САОЗ ВД и опасным условиям возникновения термошока.

3. ЗРК САОЗ ВД являются дополнительными активными элементами СБ, что определяет возможность возникновения дополнительных отказов, связанных с выполнением процесса регулирования. Тем не менее, без учета действий оператора установленные ЗРК не влияют на процесс охлаждения активной зоны.

4. Установка ЗРК требует пересмотра проекта САОЗ ВД (в том числе связанного с изменением гидравлических характеристик системы, трассировкой и размещением дополнительных элементов, условиями регулирования). Представленные, например, технические обоснования [1] недостаточны для необходимости и возможности установки регулятора на ВВЭР-1000/В-320.

5. Регулирование расхода САОЗ ВД требует субъективного вмешательства операторов (в том числе идентификация исходного события, оценки состояния и распределения теплоносителя в петлях, выбор режимов регулирования, выбор статуса расхолаживания 1-го контура). Это осуществляется в рамках симптомно-ориентированных инструкций по ликвидации аварии (СОАИ), в которые добавляются соответствующие шаги с возможностью использования ЗРК. Путь без использования ЗРК в инструкциях также остается, что усложняет СОАИ.

Поэтому вопрос широкого внедрения установок ЗРК САОЗ ВД (в том числе для серийных энергоблоков ВВЭР-1000/В-320) требует дополнительного изучения. В этой работе анализируется принципиальная возможность осуществления эффективного и надежного регулирования запасов температуры до кипения и давления в 1-м контуре с помощью ЗРК САОЗ ВД на байпасе проектной арматуры напорной магистрали.

### Анализ процессов регулирования

В режиме  $\Delta T_s$  регулятор САОЗ ВД поддерживает запас температуры до вскипания теплоносителя. Уставка по запасу температуры может принимать фиксированное значение, равное  $10^\circ\text{C}$ ,  $15^\circ\text{C}$  или  $20^\circ\text{C}$  [2]. В данном режиме регулятор поддерживает равное нулю рассогласование:

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

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

В режиме РПД регулятор САОЗ ВД поддерживает равное нулю рассогласование:

$$EPS = P_3 - P_{1к} - \alpha H, \quad (2)$$

где  $P_3$  — заданное значение давления.

Алгоритм введения режима регулирования предполагается следующим (ЗРК в начальном положении «открыто» или полностью открывается перед началом работы):

1. Открытие по уставкам срабатывания отсечной проектной арматуры на напоре САОЗ ВД в 1-й контур.

2. Идентификация исходного события и снятие запрета на закрытие отсечной проектной арматуры.

3. Закрытие оператором отсечной проектной арматуры на напоре САОЗ ВД и направление всего расхода канала САОЗ ВД через открытый ЗРК.

4. Перевод оператором регулятора из стерегущего режима (РСТ) в режим поддержания запаса до кипения ( $\Delta T_s$ ) или в режим поддержания давления (РПД) и начало работы насосов ВД через регулятор на байпасе.

Таким образом, по отношению к проектному режиму (без регуляторов) в режиме регулирования дополнительно

могут возникнуть следующие отказы/ошибочные действия оператора:

1) ошибочные действия по выводу регулятора из РСТ 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).

Вероятности возникновения критических для выполнения САОЗ ВД функций безопасности отказов могут быть значимыми, так как связаны с действиями персонала («человеческий фактор»). Поэтому при неэффективной работе ЗРК общие показатели (частота повреждения активной зоны) могут быть при прочих равных условиях хуже, чем в проектном режиме. Однако этот вопрос требует дополнительных обоснований и здесь не рассматривается.

Некритичные для безопасности отказы не влияют (при прочих равных условиях) на общие показатели безопасности, но работа регуляторов при таких отказах является неэффективной.

При реализации проектного алгоритма регулирования ЗРК САОЗ ВД на напорной магистрали целесообразно рассмотреть отдельно режимы поддержания  $\Delta T_s$  и РПД.

Исходя из гидравлических характеристик трубопроводов САОЗ ВД, на которых установлены дроссельные и сужающие устройства, эффективное регулирование путем изменения положения штока ЗРК будет осуществляться при создании коэффициента гидравлического сопротивления (КГС) ЗРК, сравнимого с КГС напорного трубопровода или превышающего его значение. Для этого необходимы небольшие степени открытия ЗРК. Очевидно, что уменьшение проходного сечения клапана даже в два раза при изначальном КГС  $\approx 35$  для клапана с условным диаметром 125 мм [3] увеличит КГС ЗРК до  $2^2 \times 35 = 140$ , что меньше, чем суммарный КГС дроссельного и сужающего устройств:  $245 + 49 = 294$  [4]. Таким образом, в области открытия клапана ориентировочно от 40 до 100 % регулирование не будет эффективным. Это означает, что использование одного закона регулирования для всего интервала изменения положения клапана (от 0 до 100 %) также нецелесообразно. Чтобы добиться желаемого эффекта, необходимо «сдвинуть» начальное положение штока ЗРК в область эффективного регулирования.

Для этого в алгоритме регулятора необходимо предусмотреть блокировку принудительного закрытия при повышении запаса до насыщения сверх определенной уставки. Данный алгоритм реализован на энергоблоке № 1 Ровенской АЭС [5], причем при превышении  $\Delta T_s$  (high) блокировка отключает регулятор и выдает команду на закрытие ЗРК с уменьшенной скоростью (например, 5 с — «ход» и 5 с — «стоп» до момента снятия сигнала). Повторное включение регулирования производится при снижении  $\Delta T_s$  до значения уставки минус зона нечувств-

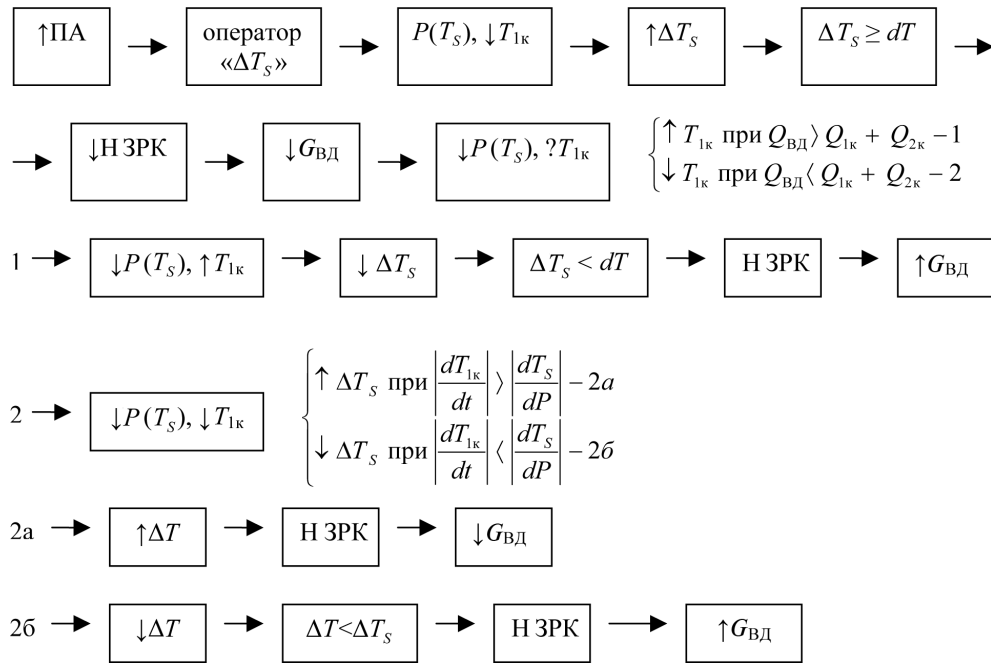


Рис. 1. Процессы регулирования ЗРК САОЗ ВД

вительности, причем на момент включения запоминается текущее положение ЗРК в качестве «0» отсчета, от которого будет отсчитываться обратная связь по положению клапана. Данный алгоритм позволяет перевести регулятор из полностью открытого положения в положение, когда его регулирование будет эффективно, т. е. ближе к небольшим степеням открытия.

Последовательность развития событий при регулировании в режиме поддержания  $\Delta T_s$  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  $\Delta T_s$ », и регулятор осуществляет контроль за выполнением рассогласования (1). В начальные моменты происходит увеличение давления ( $\uparrow P$ ) и снижение температуры теплоносителя ( $\downarrow T_{1к}$ ), что приводит к увеличению запаса до кипения ( $\uparrow \Delta T_s$ ). При достижении уставки  $dT$  (1) регулятор начнет закрываться ( $\downarrow НЗРК$ ), 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- и 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 ( $\uparrow T_{1к}$ ) — при определяющем влиянии сокращения подачи охлаждающей воды от САОЗ ВД;

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

В первом состоянии дальнейшее регулирование по рассогласованию (1) приведет к росту расхода от САОЗ ВД ( $\uparrow G_{ВД}$ , 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 ( $\downarrow P, \downarrow T_{1к}$ ) в дальнейшем процессе также возможны два разных состояния:

увеличение  $\Delta T_s$  при условии, что скорость снижения температуры теплоносителя больше, чем скорость снижения давления  $\left( \left| \frac{dT_{1к}}{dt} \right| > \left| \frac{dT_s(P)}{dt} \right| \right)$ ;

уменьшение  $\Delta T_s$  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  $\uparrow \Delta T_s$ ).

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

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

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

Условия (3), (4) означают, что для эффективного регулирования необходим не только сигнал по текущему положению рабочего органа ЗРК [условие (1)], но и учет сигналов по скорости его перемещения, а также конфигурации систем, обеспечивающих расхолаживание и поддержание давления в 1-м контуре.

В зависимости от величины течи 1-го контура возможны несколько случаев. Для относительно малых течей (например, диаметром 20 мм) характерен достаточно быстрый

отклик давления 1-го контура на увеличение подпитки САОЗ ВД при регулировании ЗРК. В этом случае в запасе до насыщения «срабатывает» составляющая по давлению 1-го контура. Регулирование для данных течей происходит уверенно, колебательный процесс возможен. Расхода охлаждающей воды недостаточно для отвода всего тепла активной зоны, поэтому тепло направляется из 1-го контура в парогенераторы (ПГ), и естественная циркуляция или главные циркуляционные насосы (ГЦН) позволяют перемешивать воду 1-го контура. При наличии в таком состоянии расхода живания по 2-му контуру температура 1-го контура следует за 2-м и ЗРК позволяет поддерживать давление 1-го контура, соответствующее заданному запасу. Для снижения автоколебаний возможно отключение избыточных каналов САОЗ ВД (нагружение оставшегося ЗРК) или подача стабилизирующего расхода от системы подпитки-продувки.

При увеличении размера течи (например, до течи через предохранительный клапан компенсатора давления — ПК КД), теплоотвод через САОЗ ВД практически соответствует энерговыделению от активной зоны. Для данных течей начинает также вступать в действие температурная составляющая в запасе до насыщения, соответствующая изменению температуры теплоносителя. При уменьшении запаса и увеличении расхода от САОЗ ВД благодаря значительным паровым областям в 1-м контуре отклик давления слабый, а снижение температуры на выходе активной зоны после прохода охлаждающей воды через активную зону значительно. Это может привести к колебаниям «температурного» типа, поскольку скорость движения теплоносителя при естественной циркуляции на порядок меньше и время отклика определяется минутами. В этом интервале течей возможны колебания запаса с периодом 10–15 мин. Стабилизирующими мерами в этом случае может служить снижение избыточности подпитки и наличие стабилизирующего постоянного расхода совместно с расхолаживанием 2-го контура.

Дальнейшее увеличение диаметра течи приводит к разрыву циркуляции в 1-м контуре и реверсу теплового потока от 2-го контура к 1-му контуру. Характерны разрывы циркуляции в горячих нитках и переохлаждение активной зоны водой САОЗ. Использование уставки по запасу в горячих нитках теряет эффективность из-за большого отличия от запаса на выходе активной зоны. Использование же уставки по запасу на выходе из активной зоны может привести к колебательному процессу. Несмотря на это, использование в качестве уставки запаса на выходе из активной зоны для данных течей позволит избежать или смягчить условия термшока (включая течь через ПК КД).

Дальнейшее увеличение диаметра течи потребует непрерывной подпитки САОЗ для охлаждения. Запас до насыщения (особенно для течей холодной нитки) достаточно долго будет находиться около  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ , что означает охлаждение активной зоны путем кипения. В этом случае включение регулятора ЗРК САОЗ ВД приводит к нахождению его в открытом положении без осуществления регулирования. Таким образом, для данных течей регулирование практически не происходит.

Учитывая сложность системы, над которой осуществляется регулирование, выбор характеристик регулятора, алгоритма ввода его в действие и вывода из автоматического режима возможен только с помощью расчетного анализа при использовании расчетных моделей энергоблоков, таких как RELAP-5. Анализ должен учитывать меры по

снижению автоколебаний в системе. Данная работа в настоящий момент проводится.

В режиме поддержания давления (РПД) работа регулятора также может приводить к автоколебательному процессу: начальный рост давления ( $\uparrow P$ ) приводит к уменьшению рассогласования  $\Delta P$  [условие (2)], закрытию регулятора ( $\downarrow H$  ЗРК) с последующим снижением расхода САОЗ ВД ( $\downarrow G_{ВД}$ ) 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 ( $\uparrow G_{ВД}$ ), связанному с уменьшением противодействия. Эффективность регулирования в этом случае будет обусловлена 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.

Более того, режим поддержания давления (РПД) вообще нецелесообразен, потому что в этом случае регулирование осуществляется только по давлению в 1-м контуре без контроля запаса до кипения теплоносителя в активной зоне, являющегося одним из критериев безопасности.

## Выводы

Приведенный в работе анализ позволяет сделать следующие основные выводы:

1. Установка на байпасе проектной арматуры напорной магистрали САОЗ ВД регулирующих клапанов может привести к возникновению критических для безопасности дополнительных отказов, связанных с возможными ошибочными действиями персонала, вероятность которых возрастает в условиях автоколебательных режимов регулирования.

2. Проектный алгоритм действия регулирующих клапанов САОЗ ВД при несвоевременных действиях оператора не эффективен для устранения наиболее опасных условий возникновения термшока корпуса реактора.

3. 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 надежность выполнения САОЗ ВД 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 противоположными перемещениями рабочего органа регулятора;

- б) увеличением вероятности ошибочных действий операторов, связанных с отсутствием идентификации таких

режимов и/или регламентированием действий в условиях автоколебательных процессов.

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

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

б) оценку влияния (при прочих равных условиях) на общие показатели безопасности энергоблока установки регуляторов САОЗ ВД (в том числе с учетом возможных автоколебательных режимов);

в) более глубокий анализ условий возникновения термошока и холодной опрессовки корпуса реактора в проектном режиме и при регуляторах САОЗ ВД;

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

д) 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 RELAP-5.

Эти вопросы будут рассмотрены в последующих работах.

## 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.
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.
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. — Гл. 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.

*Надійшла до редакції 24.02.2010.*