

**В. И. Борисенко***Институт проблем безопасности АЭС НАН Украины, Киев***ОБ ОСОБЕННОСТЯХ ФОРМИРОВАНИЯ СИГНАЛА АВАРИЙНОЙ ЗАЩИТЫ ПРИ РЕАКТИВНОСТНЫХ АВАРИЯХ НА ВВЭР-1000**

Проведено сравнение результатов моделирования режима ускоренной предупредительной защиты на ВВЭР-1000, полученных за последние годы в ряде научных центров, с результатами экспериментальных измерений. Рассмотрено влияние важных начальных и граничных условий расчетных моделей и определены условия получения консервативных оценок при анализе безопасности реактивных аварий на ВВЭР-1000. Рассмотрены отклонения от нормативно-технических требований в вопросе формирования сигнала аварийной защиты при реактивных авариях на ВВЭР-1000.

*Ключевые слова:* аппаратура контроля нейтронного потока (АКНП), реактивность, коэффициенты реактивности, период реактора, аварийная защита (АЗ), ускоренная предупредительная защита ВВЭР, орган регулирования (ОР) системы управления и защиты (СУЗ).

Современные средства нейтронного контроля ядерного реактора, построенные с применением цифровых технологий (АКНП-И, АКНП-ИФ и др.) позволяют определять реактивность реактора безынерционно, а период реактора с инерционностью от 0,4 до 5 с и более в зависимости от уровня мощности и самого значения определяемого периода. Таким образом, в отличие от АКНП предыдущих поколений (АКНП-3, АКНП-07) имеется возможность надежно фиксировать быстрые динамические процессы, происходящие в реакторе [1]. В частности, обеспечивается формирование сигналов АЗ по периоду (АЗТ) при  $T < 10$  с для быстрых реактивных аварий типа «выброс» ОР СУЗ, а также может быть реализована защита по скорости введения реактивности  $0,07 \beta_{эф}/с$  [2].

Современные АКНП позволяют надежно фиксировать период реактора и в не аварийных переходных режимах работы реакторной установки (РУ) с ВВЭР-1000. Так, например, в 2007 - 2008 гг. на ряде энергоблоков с ВВЭР-1000 были зафиксированы срабатывания АЗ по периоду  $T < 10$  с в ходе режима ускоренной предупредительной защиты (УПЗ) в конце топливной кампании. Обсуждению причин такого отклика РУ и АКНП на работу УПЗ посвящено ряд работ, в которых моделируется изменение мощности РУ в режиме УПЗ с применением программных средств как с трехмерной нейтронной кинетикой DYN3D [3], ТРАП [4], НОСТРА [5], так и с точечной нейтронной кинетикой [6, 7].

В рассмотренных работах принято ряд допущений, которые несколько искажают результаты моделирования и, соответственно, повлияли на выводы и рекомендации этих работ. Рассмотрим влияние на результаты моделирования некоторых из допущений, которые необходимо учитывать для корректного расчета нейтронно-физических процессов в активной зоне реактора в режиме УПЗ, а именно:

закон падения группы УПЗ ОР СУЗ (время прохождения зон реактора по высоте);

эффективность группы УПЗ, и управляющей группы ОР СУЗ;

коэффициенты реактивности по температуре топлива и температуры теплоносителя и их постоянные времени;

учет вклада различных участков по высоте периферийных рядов тепловыделяющих сборок (ТВС) в формирование сигналов верхней и нижней ионизационных камер (ИК) измерительного канала каждого из комплектов АКНП;

учет изменения температуры теплоносителя на входе в реактор за счет падения мощности реактора через время замыкания циркуляции теплоносителя по 1-му контуру ( $\sim 10$  с).

Адекватный учет всех указанных факторов должен быть подтвержден приемлемой корреляцией между результатами моделирования и реальными результатами, полученными в ходе работы УПЗ.

© В. И. Борисенко, 2012

Наиболее полная информация имеется по режиму УПЗ 22.09.2007 на ХАЭС-2 [1, 3 - 7]. Приведем график (рис. 1) изменения нейтронной мощности полученной по данным АКНП-И и по результатам моделирования.

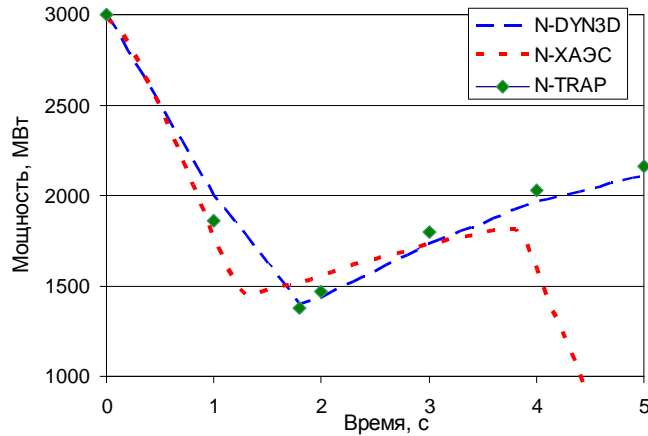


Рис. 1. Изменение нейтронной мощности в режиме УПЗ на ХАЭС-2

Наблюдаемые существенные отличия между расчетными и экспериментальными данными по таким показателям, как время достижения минимума мощности и значения скорости набора мощности вследствие действия обратных связей, требуют дополнительного исследования со стороны расчетчиков.

Рассмотрим, какое влияние на результаты моделирования оказывает каждый из названных выше факторов и как они влияют на указанные отличия. Важен также и вопрос о критериях приемлемости результатов моделирования, а именно какие отличия расчета от эксперимента считать приемлемыми.

1. Закон падения группы УПЗ. При сравнении результатов моделирования по разным программам с данными измерений АКНП-И очевидно отличие во времени снижения мощности в модели и в эксперименте, равные соответственно 1,8 и 1,3 с. Такое отличие вызвано следующим: в материалах отчета [8] указано время падения группы УПЗ, равное 1,58 - 1,8 с, а в моделировании принято время падения 1,8 с. В работах [1, 4], акцентируется внимание на отличии во времени падения мощности в эксперименте - 1,3 с и в модели – 1,8 с. Более точные данные о времени падения группы УПЗ содержатся в информации, полученной с регистраторов времени падения ОР СУЗ. В табл. 1 представлена разбивка по составным частям общего времени падения группы УПЗ. В 3-й топливной кампании ХАЭС-2 в качестве группы УПЗ была выбрана группа № 2. Группа № 2 не рекомендуется для выбора в качестве группы УПЗ. Она расположена в ТВС соседней с управляющей группой № 10, и, следовательно, суммарная эффективность группы УПЗ и управляющей группы будет снижена за счет большей интерференции ОР СУЗ. В 4-й топливной кампании в качестве группы УПЗ выбрана группа № 4, которая расположена через ТВС от управляющей группы (рис. 2).

Таблица 1. Время формирование сигнала и время падения ОР СУЗ

Координата	Время, мс												
	Реакции	Падения	Сумма	Зона 0	Зона 1	Зона 2	Зона 3	Зона 4	Зона 5	Зона 6	Зона 7	Зона 8	Зона 9
13-30	160	1500	1660	140	120	120	120	140	140	120	140	160	300
11-22	180	1400	1580	140	100	120	120	60	140	160	100	160	300
06-21	160	1420	1580	140	100	100	120	100	140	140	120	160	300
03-28	180	1520	1700	160	120	120	140	120	120	140	140	160	300
05-36	180	1620	1800	160	140	160	140	140	140	140	140	160	300
10-37	180	1500	1680	160	120	120	120	140	140	120	120	180	280
<b>Среднее</b>	<b>173</b>	<b>1493</b>	<b>1667</b>	<b>150</b>	<b>117</b>	<b>123</b>	<b>127</b>	<b>117</b>	<b>137</b>	<b>137</b>	<b>127</b>	<b>163</b>	<b>297</b>

Как видно из таблицы, время падения определяется как сумма времени реакции системы, равное  $\sim 180$  мс, требуемое для начала движения ОР СУЗ, и суммы времен прохождения каждой из 10 зон по высоте активной зоны (зоны 9 – 0). Причем время прохождения самой верхней 9-й зоны составляет порядка 300 мс, оно необходимо для разгона кластера, а время прохождения каждой из последующих зон примерно одинаково и составляет в среднем 130 мс. Таким образом, физическое время падения группы ОР СУЗ за вычетом времени реакции и времени на разгон, где дифференциальная эффективность ОР СУЗ незначительна, будет составлять  $1493 - (300/3) = 1393$  мс.

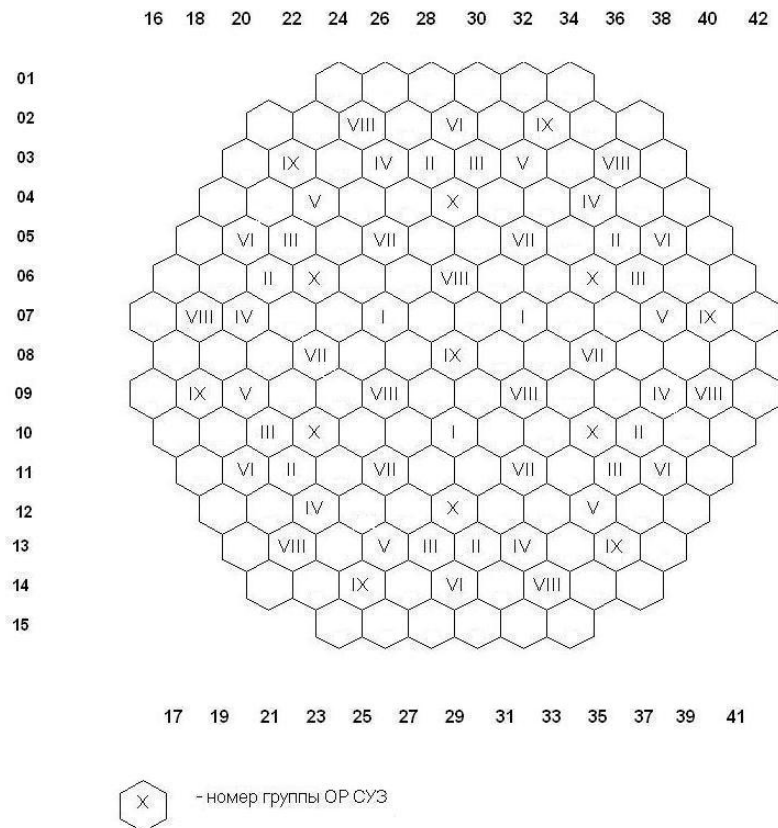


Рис. 2. Картограмма расположения ОР СУЗ на ХАЭС-2.

Принимая также во внимание малую дифференциальную эффективность ОР СУЗ в нижней трети нулевой зоны, можем уточнить реальное физическое время ввода отрицательной реактивности группой УПЗ, равное  $1393 - (150/3) = 1343$  мс, что практически совпадает с зарегистрированным в АКНП-И временем снижения мощности при падении группы УПЗ, равным по 1-му и 2-му комплектам АКНП-И в среднем 1,37 с. Линейный участок падения мощности, соответствующий эффективному вводу отрицательной реактивности группой УПЗ, составляет по данным АКНП-И от 1,2 до 1,3 с. Таким образом, учитывая приведенные данные, более обоснованным будет выбор в моделировании времени падения группы УПЗ 1,3 с. При этом расчеты будут более консервативными по таким параметрам, как минимально достижимый уровень нейтронной мощности и скорость роста мощности вследствие действия обратных связей. Заметим, что время падения группы УПЗ существенно влияет на результаты моделирования и будет обсуждено ниже.

Время падения мощности на 0,5 % от начала падения группы УПЗ составляет по данным АКНП-И в среднем 0,06 с, а время подъема нейтронной мощности за счет действия обратных связей на 0,5 % от момента достижения минимального значения нейтронной мощности составляет порядка 0,1 с по обоим комплектам АКНП-И. Эти данные позволяют оценить вклад начального и конечного участков падения группы УПЗ, а также оценить действие обратных связей по окончании падения группы УПЗ.

2. Дифференциальная и интегральная эффективности группы УПЗ рассчитываются в программах для соответствующих моментов топливной кампании. Интегральная эффективность группы УПЗ может быть скорректирована по экспериментальным данным и параметрам обратных связей по коэффициентам реактивности по температуре топлива и температуре теплоносителя на момент эксперимента.

3. В трехмерных программах необходимо дополнительно моделировать формирование сигнала в АКНП-И, а именно учитывать влияние каждой ТВС периферийных рядов активной зоны реактора на формирование сигналов верхней и нижней ИК в каждом из трех измерительных каналов в двух комплектах АКНП-И. Дополнительно должны быть обоснованы весовые коэффициенты, с которыми учитываются сигналы верхней и нижней ИК в формировании сигнала каждого из измерительных каналов АКНП-И.

Очевидно, что изначально рекомендованные в АКНП-И [8] весовые коэффициенты 0,6 для верхней ИК и 0,4 для нижней ИК зависят от профиля высотного энергораспределения и требуют дополнительного обоснования. Наиболее оптимальным будет автоматическая корректировка весовых коэффициентов ИК по данным высотного энергораспределения, полученным на основе сигналов детекторов прямой зарядки (ДПЗ) системы внутриреакторного контроля (СВРК). Изменение весовых коэффициентов ИК в сигнал измерительного канала существенно влияет на результаты расчета периода реактора.

4. Для корректного отклика РУ на работу УПЗ обязательно моделирование и учет изменения температуры теплоносителя на входе в реактор, которая падает за счет падения нейтронной мощности реактора, и за время циркуляции теплоносителя по первому контуру (~10 с) температура на входе в реактор может падать со скоростью ~1 °C/с.

Таким образом, для корректного моделирования режима УПЗ необходимо учитывать все вышеизложенные факторы. Вернемся к рассмотрению критериев приемлемости, в соответствии с которыми можно признавать результаты моделирования приемлемыми. Обратим внимание на различие в скорости набора нейтронной мощности вследствие действия обратных связей в моделях [3, 4] и в эксперименте (см. рис. 1, табл. 2).

**Таблица 2. Значение параметров РУ в режиме УПЗ и в модели за 1-ю и 2-ю секунды процесса**

Параметр	ХАЭС-2	Модель [3, 4], расчет, 1,8 с
Скорость роста мощности, МВт/с	162 – 154	293 – 227
Скорость роста мощности, % $N_{ном}$ /с	5,4 – 5,1	9,8 – 7,6
Скорость ввода реактивности, $\beta_{эф}$ /с	0,36 – 0,30	0,44 – 0,34

Если же в моделях принять реальное время падения группы УПЗ, равное 1,3 с вместо 1,8 с, то разница будет еще более существенной. Это является следствием того, что, чем быстрее падает группа УПЗ, тем меньше успевают отработать обратные связи по температуре топлива и теплоносителя. Аналогично и в обратном случае, когда группа УПЗ падает достаточно долго, по сравнению со временем действия обратных связей, то тем большая часть обратных связей уже успевает «отработать» за время падения группы УПЗ и на практике обратный ход мощности (рост нейтронной мощности) наблюдаться практически не будет. Такое существенное различие (до 50 %) в скорости роста нейтронной мощности в модели и в эксперименте не может быть приемлемым и требует дополнительного объяснения со стороны расчетчиков (так как ставит под сомнение результаты моделирования).

В рамках международного проекта Европейской комиссии (PHARE PROJECT SRR 1/95) режим УПЗ рассматривался в качестве международной тестовой задачи и обсчитывался в различных научных центрах по нескольким программам [9].

*Список институтов и расчетных кодов, участвовавших в проекте [9]*

Forschungszentrum Rossendorf (FZR), Germany  
 VTT Technical Research Centre of Finland

DYN3D/ATHLET  
 HEXTRAN/SMABRE

РНЦ «Курчатовский институт», Россия  
 ГНТЦ ЯРБ, Украина  
 Institute for Nuclear Research and Nuclear Energy (, Bulgaria

BIPR8KN/ATHLET  
 DYN3D/ATHLET  
 DYN3D/ATHLET

На рис.3 представлены графики изменения нейтронной мощности реактора в режиме УПЗ, полученные участниками указанного проекта. В работе [9] отмечено, что причин для признания режима УПЗ опасным, с точек зрения ядерной безопасности и теплотехнической надежности, не выявлено. Насколько обоснованным является данный вывод для УПЗ, в котором значительно отличаются ряд критических параметров (см. табл. 2 и 3), необходимо дополнительно исследовать.

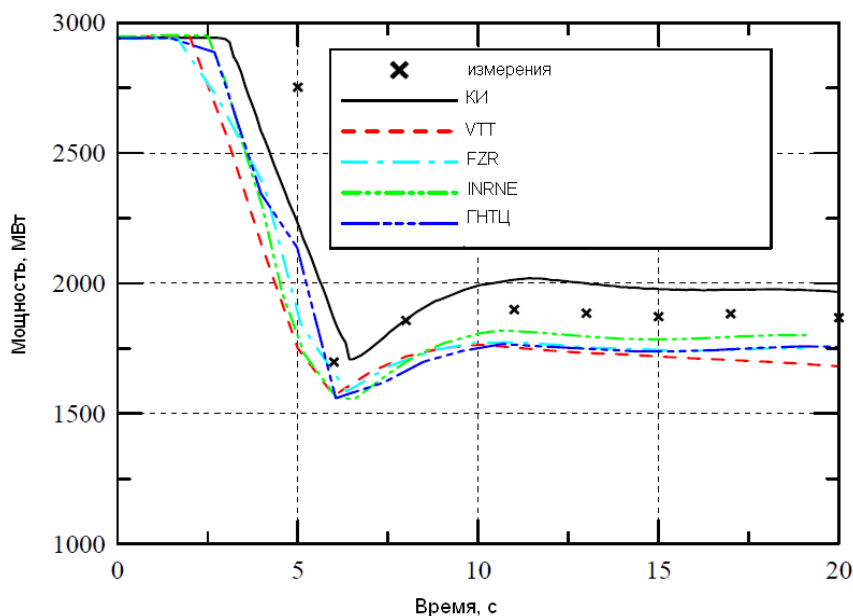


Рис. 3. Сопоставление измеренного изменения мощности с результатами расчетов по разным программам в режиме УПЗ. В качестве экспериментальных данных использованы результаты динамических испытаний при пуске 4-го блока Балаковской АЭС.

Таблица 3. Значение параметров режима УПЗ в проекте [9] и на ХАЭС-2

Параметр	Проект SRR 1/95	ХАЭС-2
Время падения группы УПЗ, с	3,5	1,37
Минимально достигнутая нейтронная мощность, % $N_{ном}$	52	48
Максимальная нейтронная мощность после УПЗ, % $N_{ном}$	60	70 в модели 61 - сработала АЗ
Максимальная скорость роста нейтронной мощности, МВт/с	62 – 100	162

Выше упоминалось о существенном влиянии времени падения группы УПЗ на интенсивность действия обратных связей. Так, уменьшение времени падения группы УПЗ с 3,5 до 1,37 с приводит к увеличению скорости набора мощности с 62 - 100 до 162 МВт/с. Необходимо также отметить, что на скорость набора нейтронной мощности значительное влияние оказывают и параметры обратных связей по коэффициентам реактивности и их постоянным времени. Например, коэффициент реактивности по температуре теплоносителя изменяется во времени от начала до конца борного регулирования по абсолютной величине в  $\sim 2$  раза.

Таким образом, протекание УПЗ на ХАЭС-2 значительно отличается от моделируемого в проекте [9]. Наибольшее внимание необходимо уделить, так называемому набросу нейтронной мощности, который может превышать 20 %  $N_{ном}$  (см. табл. 3) и это без учета

дальнейшего подъема мощности за счет прихода более холодного теплоносителя в результате замыкания циркуляции.

Режим наброса мощности на максимум 20 %  $N_{\text{ном}}$  предусмотрен документацией на топливо [10, 11]. Количество таких набросов, в течение установленного срока эксплуатации топливных кассет, составляет 15 для ТВС и 20 для ТВСА.

Апробация трехмерных нейтронно-физических расчетных программ на данных режиме УПЗ позволяет дополнить валидацию самих программы и используемых баз данных. При этом также можно выбрать наиболее консервативные параметры для проведения анализа безопасности быстрых реактивных аварий типа «выброс» ОР СУЗ. Очевидно, что наихудшие последствия по «всплеску» нейтронной мощности и скорости ее последующего снижения после «выброса» ОР СУЗ, вследствие действия обратных связей по температуре топлива и теплоносителя, будут при наименьших по абсолютному значению коэффициентах реактивности по температуре топлива и теплоносителя, а также наибольших постоянных времени действия этих коэффициентов. А в результатах моделирования [3, 4] наблюдается как раз противоположенное, а именно в моделях коэффициенты реактивности по температуре топлива и теплоносителя явно больше по абсолютному значению, чем наблюдаемые при УПЗ.

На практике для оценки безопасности режима УПЗ по основным нейтронно-физическим параметрам (нейтронная мощность реактора и скорость ее изменения, период и реактивность реактора) оказывается достаточным применение точечной модели реактора. Тем более что в режиме УПЗ возмущения, вносимые в реактор, симметричные, а перераспределение мощности происходит между нижней и верхней половинами активной зоны. Такое перераспределение мощности, при необходимости, может быть учтено в двухточечной модели реактора [6], в которой реактор представлен в виде двух «половинок» - точек с сосредоточенными параметрами. Различие между «половинками» учитывается по средней температуре теплоносителя, определяемой отдельно для нижней и верхней «половинок» реактора, а потоки нейтронов между «половинками» активной зоны не учитываются. Такое двухточечное представление реактора позволяет упрощенно моделировать работу верхней и нижней ИК в измерительном канале АКНП.

Изменения, внесенные в алгоритм определения периода в АКНП-И в соответствии с ОТР [12], реализованного после срабатывания АЗ в ходе режима УПЗ на ряде ВВЭР-1000, а также изначально реализованные в АКНП-И: алгоритм формирования сигнала АЗТ при  $T < 10$  с; алгоритм формирования сигнала предупредительной защиты 1-го рода (ПЗ-1) при  $T < 20$  с не соответствуют требованиям НТД [2] и положениям проектных документов [13].

Какие же опасности могут реализоваться вследствие применения в АКНП-И алгоритма формирования сигнала АЗТ не соответствующего физике контролируемых процессов. В этом случае при реактивных авариях, когда и требуется формирование АЗТ, такой сигнал не может быть сформирован. Так, например, при выбросе ОР СУЗ, в соответствии с проектом [13], должен быть сформирован сигнал АЗТ, однако к моменту определения периода с инерционностью  $\sim 1$  с нейтронная мощность в реакторе уже достигнет своего пикового значения и будет снижаться за счет действия обратных связей, а, следовательно, второе условие в алгоритме АЗТ – подтверждение роста мощности на 5 % – выполнено не будет, и сигнал АЗТ не будет сформирован. Очевидное невыполнение требований проекта «прикрывается» ссылкой на результаты работы [3], в которой расчетным образом обосновывается для режима «выброс» ОР СУЗ недостижение температуры плавления топлива и сохранение запасов до кризиса теплообмена. Однако разработчиками ВВЭР однозначно определен перечень исходных событий аварий (ИСА), при которых срабатывание АЗ является обязательным и выброс ОР СУЗ относится к этому перечню [13]. Вопрос об апробации расчетного кода DYN3D для описания сложных реактивных аварий требует дополнительных подтверждений. Выше приводились данные, из которых следует, что результаты моделирования даже более мягкого режима УПЗ значительно отличаются от экспериментальных данных.

Тем более в работе [3] используется не взаимодействующий код (совместное решение нейтронно-физической и теплогидравлической задачи моделирования процессов в активной зоне реактора), а только нейтронная часть при стационарных внешних теплогидравлических условиях, что позволяет моделировать только первые ~10 с процесса при постоянных «внешних» условиях. При выбросе ОР СУЗ теплогидравлические условия в активной зоне меняются с самого момента выброса ОР СУЗ, так как возникает течь в крышке реактора эквивалентным диаметром ~50 мм и необходимо учитывать падение давления в РУ.

Если же представленные расчеты [3] для реактивных аварий считаются обоснованными и приняты эксплуатирующей организацией, то следует внести изменения в проектные документы и включить в таблицу формирования сигналов АЗ [13] условие «период реактора меньше 10 с и подтверждение роста мощности на 5 %», а также исключить графу «обосновывающие режимы», в которой указано, что сигнал АЗТ должен быть сформирован при выбросе ОР СУЗ.

Включение же в алгоритм формирования сигнала предупредительной защиты 1-го рода (ПЗ-1, 2-го рода ПЗ-2) по периоду  $T < 20$  с дополнительного условия подтверждения роста мощности на 5 % вообще не имеет никакого физического обоснования. При этом нарушается сама логика построения сигналов защит ПЗ-2, ПЗ-1 и АЗ, последовательное формирование которых позволяет своевременно принимать компенсирующие действия по недопущению АЗ, а именно: ПЗ-2 – запрет на подъем управляющей группы ОР СУЗ при  $T < 40$  с; ПЗ-1 – ввод в активную зону с рабочей скоростью управляющей группы ОР СУЗ при  $T < 20$  с, и только, если принятых действий ПЗ-2 и ПЗ-1 недостаточно и  $T < 10$  с, в действие вступает АЗ. Поэтому чем раньше будет сформирован и задействован сигнал ПЗ-1, тем больше времени в реактор будет вводиться отрицательная реактивность и тем более вероятнее, что не будет сформирован сигнал АЗТ. К тому же защиты ПЗ-2 и ПЗ-1 являются «мягкими» защитами, а именно действие защиты снимается, если сняты условия, сформировавшие эти защиты, в отличие от АЗ, действие которой доводится до конца и не снимается, даже если сняты условия, сформировавшие АЗ.

Дополнительные проблемы могут иметь место после реализации технического решения [12], в соответствии с которым изменено время дискриминации в алгоритме определения периода только для диапазона мощности 25 - 75 %  $N_{ном}$ . В этом случае при переходном процессе, в котором будет выход за диапазон 25 - 75 %  $N_{ном}$  возможно нарушение в последовательности формирования сигналов ПЗ-2, ПЗ-1 и АЗ, а также скачкообразное изменение определяемого периода вследствие «несогласованного» изменения временного буфера, на котором рассчитывается период.

Рассмотрим технические проблемы, которые наблюдались в режиме УПЗ на ХАЭС-2 при формировании сигналов ПЗ-2, ПЗ-1 и АЗ вследствие реализации в алгоритме формирования ПЗ-1 и АЗ условия подтверждения роста мощности на 5 % (табл. 4).

Таблица 4. Время формирования сигналов защит по периоду

№ канала	Время формирования сигнала защиты		
	ПЗ-2	ПЗ-1	АЗ
1-го комплекта АКНП-И			
1	01:02:54:960	01:02:54:960	01:02:55:150
2	<b>01:02:54:870</b>	01:02:54:870	<b>01:02:55:090</b>
3	01:02:54:730	<b>01:02:54:950</b>	01:02:54:950
2-го комплекта АКНП-И			
1	01:02:54:840	01:02:54:830	<b>01:02:55:020</b>
2	<b>01:02:54:820</b>	<b>01:02:54:820</b>	01:02:55:080
3	01:02:54:790	01:02:54:790	01:02:54:970

В соответствии с данными табл. 4 можно определить времена формирования условий выходных сигналов ПЗ-2, ПЗ-1 и АЗ в соответствии с принципом мажоритирования «2 из 3» [8]:

первым комплектом АКНП-И защиты ПЗ-2, ПЗ-1, АЗ по временному интервалу сформированы в 01:02:54:870, 01:02:54:950, 01:02:55:090, т.е. разница во времени между временем формирования защит составила ПЗ-2 и ПЗ-1- 80 мс; ПЗ-1 и АЗ - 140 мс;

вторым комплектом АКНП-И защиты ПЗ-2, ПЗ-1, АЗ по временному интервалу сформированы в 01:02:54:820, 01:02:54:820, 01:02:55:020, защиты ПЗ-2 и ПЗ-1 сформированы одновременно, а разница во времени между временем формирования защит ПЗ-2, ПЗ-1 и АЗ составила 200 мс.

Таким образом, для рассматриваемого УПЗ минимальный временной промежуток между формированием ПЗ-1 и АЗ составил 140 мс, а максимальный - 200 мс, что в свою очередь исключило реакцию системы программно-технического комплекса (ПТК) системы группового и индивидуального управления (СГИУ-М) на сигнал ПЗ-1. В соответствии с проектными документами прохождение управляющей команды ПЗ-1 по цепям ПТК СГИУ-М составляет 1,0 с. Соответственно включение в алгоритм формирования сигнала ПЗ-1 условия подтверждения роста мощности на 5 %, с учетом времени прохождения сигнала ПЗ-1 по цепям ПТК СГИУ-М, не позволяет для быстрых процессов вводить в действие ПЗ-1, а следовательно, увеличивается вероятность достижения уставок АЗ, что будет приводит к преждевременному исчерпанию ресурса оборудования РУ.

Для исключения избыточного срабатывания АЗ при нормальном протекании режима УПЗ интервал времени, на котором вычисляется период, может быть увеличен до 3-4 с [1], но не по условию - нейтронная мощность в диапазоне 25 - 75 %  $N_{ном}$ , а по условию - реактивность отрицательная:  $\rho < 0,1\beta_{эф}$ . В этом случае не будут формироваться «ложные» сигналы АЗТ в режиме УПЗ, а основная задача АКНП – формирование сигнала АЗ при реактивных авариях, в том числе и выброс ОР СУЗ, – будет реализована при исключения из алгоритма формирования сигнала АЗТ условия - подтверждение роста мощности на 5 %  $N_{ном}$ .

Выброс кластера может произойти в случае разрыва чехла привода ОР СУЗ, в этом случае из-за разности давлений минимальное время выброса ОР СУЗ оценивается в 0,1 с [1, 14, 15]. Такая возможность не является незначительной, особенно принимая во внимание доступную информацию о регулярно обнаруживаемых дефектах чехлов приводов ОР СУЗ на ВВЭР-1000:

на АЭС Козлодуй-5 в 2006 и 2011 гг. обнаружены дефекты в чехлах – заменены все чехлы приводов ОР СУЗ;

на АЭС Козлодуй-6 в 2010 г. выявлены микротрещины в 31 чехле из 61 – принято решение о замене всех чехлов ОР СУЗ;

на АЭС Калинин-3 в 2011 г. произошел инцидент с повреждением двух чехлов приводов ОР СУЗ во время гидроиспытаний вследствие взрыва водорода, накопившегося в чехлах приводов ОР СУЗ.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Борисенко В.И.* Что необходимо определять: период или реактивность реактора? // Проблемы безопасности атомных электростанций і Чернобиля. - 2010. - Вип. 13. - С. 8 - 18.
2. *Правила ядерной безопасности реакторных установок атомных станций з реакторами з водою під тиском.* НП 306.2.145-2008
3. *Технический отчет «Модернизация проектного режима работы УРБ реакторной установки ВВЭР-1000. Разработка ОАБ по модернизации режима работы УРБ».* - ООО «ФИЗАР», 2008.
4. *Быков М.А., Алехин Г.В., Петкевич И.Г.* Анализ показаний аппаратуры нейтронного потока в режимах со срабатыванием ускоренной предупредительной защиты для реакторных установок с реактором ВВЭР-1000 // Шестая междунар. науч.-техн. конф. "Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР". - 6-29.05.2009 (ОКБ "ГИДРОПРЕСС", Подольск, Россия).
5. *Техническая справка.* Анализ НФХ и надежности топлива блока № 2 Хмельницкой АЭС в переходном режиме после срабатывания ускоренной предупредительной защиты. - М.: РНЦ «Курчатовский институт», 2008.



6. Борисенко В.И., Каденко И.М., Самойленко Д.В. Особливості перехідного процесу в реакторній установці ВВЕР-1000 при спрацюванні прискореного попереджувального захисту // Ядерна фізика та енергетика. - 2009. - Т. 10, № 2. - С. 157 - 164.
7. О безопасности и устойчивости эксплуатации энергоблоков АЭС с ВВЭР-1000 в динамических режимах со срабатыванием УПЗ (УРБ): (Отчет) / ОАО «ВНИИАЭС», 2008.
8. Обосновывающие материалы по корректировке настроек АКНП-И энергоблока №2 ХАЭС. НАЭК «Энергоатом». ХАЭС. - Нетешин, 2008.
9. Validation of coupled neutron kinetic/thermalhydraulic codes against transients measured in VVER reactors. Final Technical Report. Reference: FZR/SRR195/FIN2.1 / European commission. Phare programme / Safety related research project SRR 1/95.
10. Комплекс составных частей активной зоны ВВЭР-1000. Каталогное описание. У0401.21.00.000 ДКО.
11. Комплекс составных частей активной зоны ВВЭР-1000. Каталогное описание. У0401.04.00.000 ДКО.
12. Отраслевое техническое решение НАЭК «Энергоатом» «О внедрении усовершенствованного алгоритма формирования сигнала АЗ в аппаратуре контроля нейтронного потока АКНП-И (ИФ) по периоду изменения нейтронной мощности реактора ВВЭР-1000» ОТР-1234.03.127-08.
13. Пределы и условия безопасной эксплуатации. 43-923.203.254.ОБ.16.РЕД.2.Ф. ОАБ. Т. 16, гл. 16. - НАЭК «Энергоатом», 2004.
14. Абдуллаев А.М., Жуков А.И., Слепцов С.Н. Трехмерный анализ аварии с выбросом ОР СУЗ в реакторе ВВЭР-1000 на номинальной мощности // Збірник з наукових праць СНУЯЕтаП. - 2011. - С. 7 -1 5.
15. Кучин А.В., Овдиенко Ю.Н., Халимончук В.А. Консервативный анализ реактивных аварий (RIA) с использованием модели пространственной кинетики // Ядерна та радіаційна безпека. - 2009. - № 4.- С. 10 - 22.

**В. И. Борисенко**

#### **ПРО ОСОБЛИВОСТІ ФОРМУВАННЯ СИГНАЛУ АВАРІЙНОГО ЗАХИСТУ ПРИ РЕАКТИВНОСТНИХ АВАРІЯХ НА ВВЕР-1000**

Проведено порівняння результатів моделювання режиму прискореного попереджувального захисту на ВВЕР-1000, отриманих за останні роки в ряді наукових центрів, із результатами експериментальних вимірювань. Розглянуто вплив важливих початкових і граничних умов розрахункових моделей, а також визначено умови отримання консервативних оцінок при аналізі безпеки реактивнісних аварій на ВВЕР-1000. Розглянуто відхилення від нормативно-технічних вимог у питанні формування сигналу аварійного захисту при реактивнісних аваріях на ВВЕР-1000.

*Ключові слова:* апаратура контролю нейтронного потоку, реактивність, коефіцієнти реактивності, період реактора, аварійний захист, прискорений попереджувальний захист, ВВЕР, орган регулювання системи управління та захисту.

**V. I. Borysenko**

#### **ABOUT FEATURES OF THE FORMATION OF SIGNAL EMERGENCY PROTECTION IN REACTIVITY ACCIDENT AT VVER-1000**

A comparison of simulation results on the accelerated unit unloading mode at VVER-1000, received in recent years, several research centers, with the results of experimental measurements. The influence of the important initial and boundary conditions for computational models, and determine the conditions obtaining conservative estimates in the analysis of security incidents on the reactivity of VVER-1000. Are considered deviations from the regulatory and technical requirements the question of the signal for an emergency protection reactivity accidents in the VVER-1000.

*Keywords:* neutron flux monitoring system, reactivity, reactivity coefficients, the period of the reactor. emergency protection, accelerated unit unloading, VVER, control rods of reactor protection system.

Надійшла 23.04.2012

Received 23.04.2012