
Моделирование аварийной ситуации с обезвоживанием контура охлаждения СУЗ, используя программный комплекс QUABOX/CUBVOX-НУСА

**Эвальдас Бубялис,
Раймондас Пабарчюс,
Ауримас Тонкунас**

*Литовский энергетический институт,
Лаборатория безопасности ядерных установок,
Бреслауёс 3,
3035, Каунас*

До сих пор в процессе эксплуатации реакторов РБМК-1500 Игналинской АЭС не было аварийных ситуаций, связанных с обезвоживанием контура охлаждения СУЗ, приводящих к изменениям реактивности и мощности в активной зоне реактора. Однако обезвоживание КОСУЗ, как проектная авария, всегда анализируется при обосновании безопасности эксплуатации реакторов РБМК-1500 Игналинской АЭС. В данной статье представлены результаты расчетов обезвоживания КОСУЗ для двух характерных состояний активной зоны реактора 2-ого энергоблока Игналинской АЭС (при работе реактора на мощности 4200 МВт и 240 МВт). Для моделирования переходных процессов при обезвоживании КОСУЗ был использован немецкий п/к QUABOX/CUBVOX-НУСА с усовершенствованной логикой работы СУЗ и специально созданным нами дополнительным модулем, позволяющим моделировать обезвоживание КОСУЗ при работе реактора на любом уровне мощности.

Ключевые слова: Игналинская АЭС, обезвоживание КОСУЗ, активная зона

1. ВВЕДЕНИЕ

Обезвоживание контура охлаждения СУЗ реактора РБМК-1500 Игналинской АЭС приводит к изменениям реактивности и мощности в активной зоне реактора. При такой аварийной ситуации формируются сигналы на срабатывания аварийной защиты реактора. В данной статье обезвоживание КОСУЗ проанализировано для двух характерных состояний активной зоны: при работе реактора на максимально-разрешенном уровне мощности (4200 МВт), когда выполняются все функции управления и защиты, и при работе на минимально контролируемом уровне мощности (240 МВт), когда некоторые функции управления не выполняются (например, не работает система ЛАР). Для моделирования переходных процессов при обезвоживании КОСУЗ был использован немецкий п/к QUABOX/CUBVOX-НУСА с усовершенствованной логикой работы СУЗ и специально созданным нами дополнительным

модулем, позволяющим моделировать обезвоживание КОСУЗ при работе реактора на любом уровне мощности [3].

Цель данной статьи – показать новые расширенные возможности п/к QUABOX/CUBVOX-НУСА, представить результаты расчетов процесса обезвоживания КОСУЗ, происходящего в реакторе РБМК-1500 Игналинской АЭС, и оценить работоспособность СУЗ по компенсации избыточной реактивности в активной зоне.

Напомним, что назначение контура охлаждения СУЗ заключается в охлаждении каналов СУЗ, регулирующих стержней, датчиков контроля высотного распределения плотности энерговыделения, камер деления и блоков графитового отражателя.

Возможными событиями, инициирующими обезвоживание КОСУЗ, могут быть:

- прекращение или перерыв в подаче воды в верхние баки;
- различные виды разрывов трубопроводов в КОСУЗ;

- различные виды блокировок расхода теплоносителя в КОСУЗ;
- попадание воздуха в КОСУЗ после останки.

Каждое из этих исходных событий, инициирующих аварийную ситуацию, рассматривается в данной статье для определения наихудшего случая обезвоживания КОСУЗ.

2. ГЕОМЕТРИЧЕСКАЯ СТРУКТУРА КОСУЗ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ АВАРИЙНЫЕ ЗАЩИТЫ

На рис. 1 показана схема контура охлаждения СУЗ. На схеме в метрах обозначены отметки расположения по высоте различных компонентов КОСУЗ. В рассматриваемом контуре вода двумя насосами (8) подается из нижнего циркуляционного бака (11) через напорный трубопровод в раздающий коллектор СУЗ (4), часть расхода от насосов СУЗ поступает в расходный бак СУЗ (10) для обеспечения номинального уровня перелива. Из раздающего коллектора вода проходит через различные каналы СУЗ (каналы для стержней РР, УСП, БАЗ и с ДКЭВ – 1, 2, 3) в сливные коллекторы (5, 6). Затем вода проходит через теплообмен-

ники (9), а охлаждаясь возвращается в циркуляционный водяной бак (11). Два из четырех насосов (8) КОСУЗ находятся в работе, один – в резерве и один может быть выведен в ремонт.

В систему управления и защиты заведены сигналы по уровню воды в расходных баках (10), расходу и давлению воды в раздающем коллекторе (4). Сигналы аварийной защиты АЗ-1 вырабатываются по следующим уставкам:

- снижение уровня воды в расходных баках с номинального уровня 7,6 м до уровня 5,8 м (измеряемого от днища баков);
- снижение номинального расхода воды перед раздающим коллектором с 1250–1350 м³/ч до 920 м³/ч ;
- снижение давления в раздающем коллекторе с номинального в диапазоне 3,0–3,5 кгс/см² до 1,5 кгс/см².

Помимо указанных замеров интегральных параметров, для каждого канала СУЗ имеется собственный индивидуальный расходомер (15). От этих расходомеров поступают аварийные сигналы на панель БЩУ, но при этом сигналы на автоматическое срабатывание аварийной защиты не формируются.

Сигналы аварийной защиты по технологическим параметрам системы (т. е. по уровню воды в расходных баках (10), расходу и давлению воды в раздающем коллекторе (4)) могут сформироваться, а могут и не появиться (в зависимости от причины обезвоживания). Если такие сигналы отсутствуют, то в активной зоне будет наблюдаться относительно медленный рост энерговыделения. Когда повышение реактивности выходит за пределы возможностей системы ЛАР по компенсации избыточной реактивности, происходит аварийная остановка реактора по сигналам датчиков нейтронного потока.

Система охлаждения СУЗ реактора РБМК-1500 является сложной, поэтому возможно большое число исходных событий, которые могут привести к различным уровням обезвоживания системы. Как известно, полное обезвоживание контура охлаждения СУЗ вызывает значительный рост реактивности ($\sim 2,5\beta_{эфф}$).

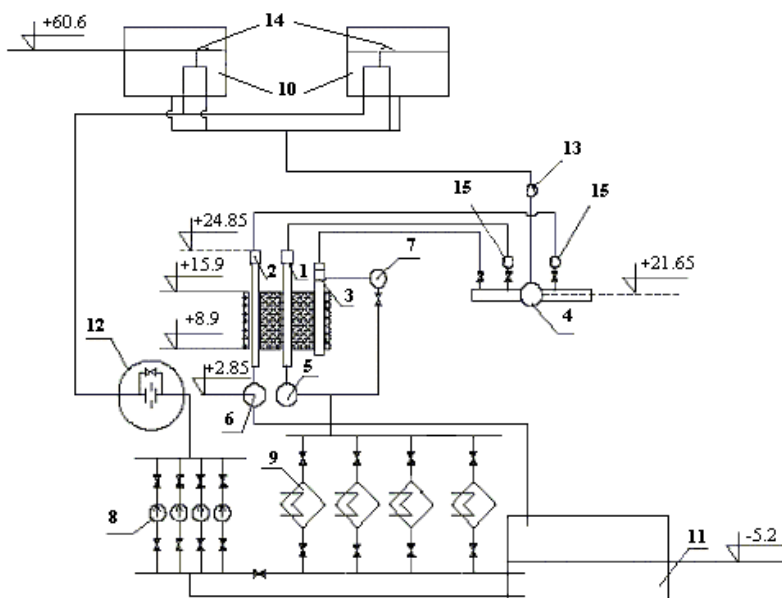


Рис. 1. Принципиальная схема КОСУЗ.

1 – канал СУЗ, 2 – канал БАЗ, 3 – канал охлаждения отражателя, 4 – раздающий коллектор СУЗ, 5 – сливной коллектор СУЗ, 6 – сливной коллектор БАЗ, 7 – сливной коллектор контура охлаждения отражателя, 8 – насосы СУЗ, 9 – теплообменники СУЗ, 10 – расходные баки, 11 – циркуляционный бак, 12 – ограничительная шайба с регулирующим клапаном, 13 – основной расходомер, 14 – срыв сифона, 15 – расходомеры на отдельных каналах

3. ПРОЦЕСС ОБЕЗВОЖИВАНИЯ КОСУЗ

Место образования инициирующего события в системе определяет протекание процесса распространения обезвоживания в активной зоне, количество активных технологических средств аварийной защиты и сколько каналов СУЗ затронуто обезвоживанием. Чем выше в КОСУЗ произойдет инициирующее событие, тем большее число каналов СУЗ может быть затронуто и большее количество технологических средств аварийной защиты должно быть активными.

При моделировании процесса обезвоживания КОСУЗ следует учесть, что: проникновение паровой фазы внутри активной зоны происходит неравномерно по объему активной зоны. Это означает, что некоторые каналы обезвоживаются раньше, чем другие, и все каналы в определенный момент времени будут обезвожены в разной степени. Следовательно, последствия аварии с обезвоживанием КОСУЗ зависят не только от изменения плотности теплоносителя, но и от скорости распространения теплоносителя с низкой плотностью в пределах активной зоны. Процесс обезвоживания КОСУЗ является относительно медленным. Скорость теплоносителя в каналах СУЗ составляет примерно 0,1 м/с (при подаче самотеком). Запаривание пустот в результате кипения происходит еще медленнее. Поэтому любое увеличение реактивности компенсируется срабатыванием системы ЛАР. Эффективность единичного стержня ЛАР составляет около $0,1 \beta_{эфф}$, а скорость перемещения стержня ЛАР в режиме регулирования равна 0,2 м/с. Таким образом, стержни ЛАР могут перемещаться достаточно быстро, чтобы, в зависимости от обстоятельств, компенсировать отдельные или все изменения реактивности. Если увеличение реактивности будет таким, что вызовет локальный рост энерговыделения на 10% выше относительно исходного его значения, то по сигналам нейтронных датчиков будет инициирован процесс аварийной остановки реактора.

На рис. 2 показаны характеристики процесса опорожнения КОСУЗ ниже отметки головки канала (24,85 м) [1]. Показано, что различные каналы СУЗ опорожняются в различные моменты времени и с разной скоростью. Это происходит вследствие различных объемов воды в восходящих трубопроводах, а также различной геометрии стержней СУЗ и различного положения этих стержней в кана-

лах. Физически существуют четыре типа каналов СУЗ: каналы с полной длиной поглотителя и вытеснителями (каналы для стержней РР); каналы с укороченными поглотителями (каналы для стержней УСП), каналы с датчиками контроля плотности энерговыделения и каналы стержней БАЗ. Каналы стержней БАЗ охлаждаются водяной пленкой, протекающей по внутренней поверхности канальной трубы. Толщина этой водяной пленки в канале БАЗ – 1,5–2,0 мм. Канал БАЗ с водяной пленкой данной толщины опорожняется за 2,0–3,0 с. Для трех остальных типов каналов (рис. 2) может быть выделено шесть конфигураций, которые приводят к различной динамике опорожнения. Для регулирующих стержней с полной длиной поглотителя/вытеснителя представляют интерес три положения: полностью введенный стержень (регулирующий стержень на нижнем концевом выключателе), полностью выведенный стержень (регулирующий стержень на верхнем концевом выключателе) и положение на половине расстояния между вышеназванными крайними положениями. Для укороченных поглощающих стержней представляют интерес два положения: полностью извлеченный стержень (регулирующий стержень на нижнем концевом выключателе); полностью введенный стержень (регулирующий стержень на верхнем концевом выключателе). Эти пять положений наряду с каналами аксиальных детекторов определяют различия в скорости опорожнения каналов СУЗ. Эти конфигурации (типы) пронумерованы от 1 до 6 (рис. 2). На рис. 2 показано, что наиболее быстро опорожняются те каналы, которые содержат полностью введенные стержни с укороченными поглотителями (кривая 5), т. е. стержни на верхнем концевом выключателе. Показано также, что уровень воды в каналах этого типа за 50 с после гильотинного разрыва трубопровода падает с отметки головки канала (24,85 м) до уровня ниже верха активной зоны (15,9 м). Вода в трубопроводе на участке от места разрыва сразу за расходомером до головки канала опорожняется за 15 с (на диаграмме не показано). Таким образом, на рис. 2 за нулевую отметку по времени принята 15-ая секунда после разрыва, а каналы типа 5 начинают опорожняться с верха активной зоны через 65 с после разрыва трубопровода. Для наиболее медленно дренируемых каналов, т. е. каналов типа 1, требуется 80 с для того, чтобы уровень воды с отметки головки канала до активной зоны, или 95 с от момента разрыва трубопровода. Используя

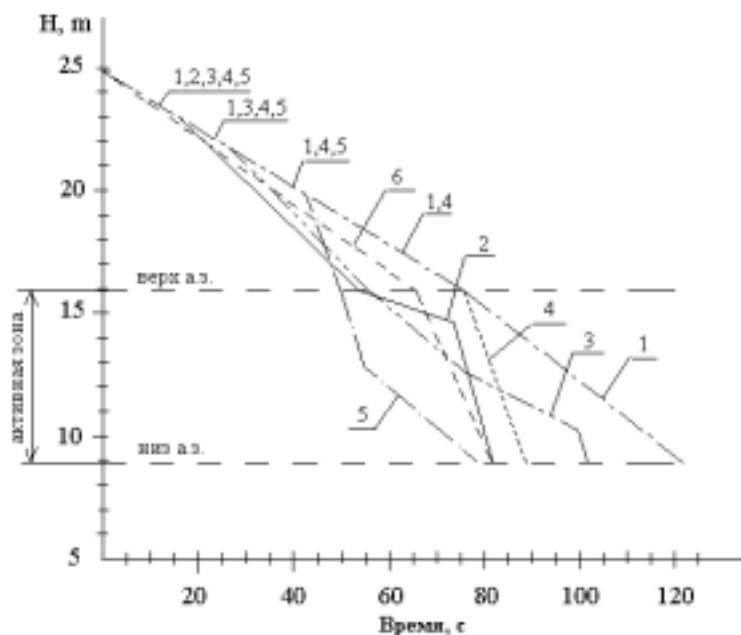


Рис. 2. Скорость движения уровня воды в каналах СУЗ при обезвоживании КОСУЗ.

1 – стержень РР на НК, 2 – стержень РР на ВК, 3 – стержень РР в центре а. з., 4 – стержень УСП на НК, 5 – стержень УСП на ВК, 6 – канал СУЗ с ДКЭВ

этот рисунок, рассчитанное время полного обезвоживания каналов БАЗ (2,0–3,0 с) и данные о положении стержней СУЗ, можно определить уровень воды в каждом канале СУЗ в каждый определенный момент времени. Таким образом и был сформирован сценарий опорожнения КОСУЗ для моделирования аварии с потерей теплоносителя КОСУЗ за расходомером с применением п/к QUABOX/CUBVOX-НУСА. За начало моделирования ($t = 0$ с) принимался тот момент времени, когда дренирующаяся через активную зону вода контура СУЗ достигает нижнюю кромку верхнего графитового отражателя.

4. НАИХУДШАЯ АВАРИЙНАЯ СИТУАЦИЯ С ОБЕЗВОЖИВАНИЕМ КОСУЗ

Опорожнение каналов СУЗ может быть инициировано следующими событиями: отказом насосов СУЗ, разрывами трубопроводов выше основного расходомера, разрывами ниже основного расходомера и выше активной зоны, а также разрывами ниже активной зоны.

Отказ насосов СУЗ прекращает подачу воды в расходные баки и вызывает снижение уровня воды в этих баках. Поскольку вода сливается в циркуляционный бак, воздух со временем поступает в каналы СУЗ. При такой

аварии формируются три технологических сигнала АЗ-1: 1) по снижению уровня воды в расходном баке, 2) по низкому расходу через основной расходомер, 3) по низкому давлению в распределительном коллекторе. К моменту появления третьего сигнала вода в КОСУЗ все еще остается на ~6 м выше активной зоны и, если какой-либо один из них будет принят, то повышения реактивности в активной зоне не произойдет.

Разрыв трубопровода до основного расходомера отводит часть потока теплоносителя КОСУЗ, вытекающего из расходного бака в раздающий коллектор. Если предположить наличие гильотинного разрыва с разошедшимися концами трубопровода, то развитие процесса обезвоживания аналогично случаю отказа насосов КОСУЗ, с тем только различием, что после возникновения инициирующего события активная зона обезвоживается быстрее. Для рассматриваемого инициирующего события имеются те же три технологических сигнала на срабатывание аварийной защиты.

Разрыв трубопровода большого диаметра на участке ниже основного расходомера и выше активной зоны вызывает появление технологического сигнала на срабатывание АЗ-1 по низкому давлению в распределительном коллекторе.

Разрывы в КОСУЗ ниже активной зоны могут привести к эффектам, варьирующимся от незначительного до полного опорожнения КОСУЗ. Однако ни один из этих эффектов реально не сможет вызвать рост реактивности в течение нескольких десятков минут с момента возникновения инициирующего события, поскольку влияние всех этих событий может быть ослаблено действиями оператора и эти аварийные ситуации будут развиваться аналогично аварии с отказом насосов КОСУЗ, в случае которого формируются три технологических сигнала АЗ-1.

Наиболее тяжелой аварией, связанной с обезвоживанием КОСУЗ, является авария, которая приводит к максимальному росту реактивности за кратчайший возможный отрезок времени, в то время как реактор продолжает работать на мощности. Такая авария должна быть связана с поступлением среды с наимень-

шей плотностью (т. е. воздуха) в большое число каналов СУЗ (т. е. за пределами компенсирующей возможности ЛАР) до того, как будет задействована аварийная защита. Кроме того, одно из событий, инициирующих опорожнение КОСУЗ (а именно: авария СУЗ с потерей теплоносителя ниже основного расходомера и выше активной зоны), не будет сопровождаться сигналом на срабатывание аварийной защиты, поскольку, согласно [2], при проведении анализа безопасности первый (и в данном случае единственный) сигнал на срабатывание аварийной защиты не учитывается. Поэтому в качестве наихудшего инициирующего события постулируется такой гильотинный разрыв трубопровода с разошедшимися концами на участке между основным расходомером (рис. 1, 13) и раздающим коллектором (рис. 1, 4), что находящийся ниже по потоку конец разрыва контактирует с атмосферой. Как упоминалось выше, первый сигнал на срабатывание аварийной защиты (по низкому давлению в распределительном коллекторе) при моделировании не учитывается. Следовательно, в то время как воздушный фронт проникает в каналы СУЗ, реактор работает на доаварийном уровне мощности. Локальная мощность увеличивается в соответствии с динамикой перемещения границы раздела „воздух–вода“ через активную зону (т. е. с динамикой перемещения профиля плотности). Всплеск мощности прекращается вводом поглощающих стержней СУЗ, приходящих в движение по одному из сигналов нейтронно-физических датчиков.

Если не учитывать ни один из сигналов по технологическим параметрам, то сценарии опорожнения КОСУЗ обладают одинаковыми возможностями для повреждения активной зоны. Специфика аварийных ситуаций, связанных с опорожением (т. е. произошел ли разрыв трубопровода или опорожнение связано с прекращением подачи воды в расходные баки), влияет только на временную задержку между возникновением инициирующего события и первым появлением пустоты в активной зоне (т. е. момента исчерпания запаса воды над активной зоной). Поскольку в течение этой временной задержки не происходит изменения глобальных или локальных параметров, возможность для повреждения только начинает зарождаться, когда пустотная фаза появляется вблизи активной зоны. Этот момент может быть принят в качестве нулевой отметки (по времени) для описания аварийной ситуации, а

все другие моменты отмечаются относительно этой нулевой отметки. Развитие аварийной ситуации после попадания пустоты в активную зону протекает одинаково для всех аварий, связанных с опорожением КОСУЗ.

5. МОДЕЛИРОВАНИЕ ОБЕЗВОЖИВАНИЯ КОСУЗ

Аварийная ситуация, связанная с обезвоживанием каналов системы управления и защиты при работе реактора на максимально разрешенном уровне мощности (4200 МВт), а также при работе реактора на минимально контролируемом уровне мощности (240 МВт), исследовалась постулируя разрыв трубопровода, по которому течет теплоноситель КОСУЗ без учёта всех аварийных сигналов, основанных на технологических параметрах КОСУЗ (т. е. уровню воды в расходных баках, расходу и давлению воды в раздающем коллекторе КОСУЗ). При таких предположениях достигается наиболее быстрый рост реактивности, который не ослабляется исполнительной частью СУЗ, активированной какими-либо технологическими сигналами. Первое состояние активной зоны характерно для рабочего диапазона изменения мощности реактора (1000 – 4200 МВт), когда выполняются все функции управления и защиты. Во втором случае некоторые функции управления не выполняются (например, не работает система ЛАР, основанная на показаниях внутриреакторных датчиков). Параметры 2-ого энергоблока Игналинской АЭС, приведенные в табл. 1, принимались в качестве начальных условий в процессе моделирования.

Исходные условия моделирования, используя реальную базу данных активной зоны реактора 2-ого энергоблока Игналинской АЭС, были выбраны консервативным образом, чтобы обеспечивались наиболее неблагоприятные потенциальные последствия моделируемых переходных процессов. Созданы возмущенные аксиальные и радиальные распределения мощностей, при которых рост реактивности при анализируемых ожидаемых переходных процессах становится максимальным. Согласно методологии реактивностных аварий, все первые сигналы (превышения уставок, любые аварийные сигналы, включая нейтронные) при динамическом моделировании не учитывались. Дополнительно к перечисленным допущениям применялся принцип единичного отказа, т. е. принималось, что первый детектор, который должен сформировать сигнал, неработоспособен.

Таблица 1. Параметры 2-ого энергоблока Игналинской АЭС при работе на уровнях мощности 4200 МВт и 240 МВт

Параметр	Величина	
Тепловая мощность реактора, МВт	4200	240
Давление в КМПЦ в а.з., кгс/см ²	77,5	77,5
Температура теплоносителя на входе в а.з., °С	261	281
Оперативный запас реактивности, эффективный стержень РР	56,16	61,53
Эффективный коэффициент размножения	1,003	1,002
Радиальный коэффициент неравномерности, K_r	1,409	1,399
Высотный коэффициент неравномерности, K_z	1,19	1,36
Среднее выгорание, МВт · сутки/кг	11,17	11,23

Поскольку в процессе обезвоживания КОСУЗ отдельные каналы СУЗ опорожняются неравномерно и с разной скоростью, что приводит к локальным возмущениям мощности, то для данного анализа необходимо детальное трехмерное моделирование нейтронно-физических и теплогидравлических процессов в активной зоне реактора с подробным описанием всех систем контроля и регулирования, особенно системы СУЗ. Для моделирования нейтронно-физических процессов применялся немецкий программный комплекс QUAVOX/CUBVOX-НУСА [3].

В модели активной зоны реактора РБМК-1500, созданной с помощью п/к QUAVOX/CUBVOX, по методу грубой сетки решаются трёхмерные пространственно-временные двухгрупповые уравнения диффузии нейтронов, основанные на локальной полиномиальной аппроксимации нейтронного потока. Для решения уравнений используется обычная конечно-разностная схема с одной точкой на ячейку в координатах x - y и с разбиением по высоте через каждую 1/4 метра. Используемая библиотека макроскопических сечений материалов имеет макросечения ячеек для различных вариантов загрузки как топливных, так и нетопливных каналов, в зависимости от выгорания топлива, температуры компонентов, плотности теплоносителя. Для согласования трехмерного расчетного распределения нейтронного поля с показаниями датчиков внутриреакторного контроля в п/к QUAVOX/CUBVOX предусмотрена возможность восстановления среднего по активной зоне высотного профиля выгорания и проведения корректировки поканальных энерговыработок в пределах 5% от исходных значений. Данный п/к валидирован как для нейтронно-физических расчетов реакторов типа РБМК-1000, так и для реакторов РБМК-1500 [4].

Для анализируемых состояний активной зоны высотное распределение энерговыделения

перераспределялось таким образом, чтобы сформировать высотный профиль энерговыделения с максимумом в верхней половине активной зоны. Такой профиль высотного энерговыделения дает максимально возможные последствия данной аварии, поскольку обезвоживание каналов СУЗ начинается с верхней части активной зоны, там же, где находится максимальное количество воды.

Отказ системы ЛАР не рассматривался в качестве кандидата при выборе наихудшего единичного отказа, поскольку без ее компенсирующего воздействия аварийная остановка по сигналам от нейтронно-физических датчиков происходит быстрее. Также следует отметить, что почти весь рост реактивности происходит при обезвоживании верхней половины активной зоны.

Ответная реакция систем реакторной установки на аварию с потерей теплоносителя КОСУЗ за основным расходомером описана в таблицах 2 и 3, для состояний работы реактора на уровнях мощности 4200 МВт и 240 МВт, соответственно. В табл. 2 приведен перечень событий, характеризующих специфическое для данного сценария развитие ситуации, предшествующее аварийной остановке реактора через 17,6 с после начала аварийного процесса. Движение регулирующих стержней системы локального автоматического регулирования предшествует аварийной остановке, поскольку эти стержни до некоторой степени компенсируют рост реактивности, обусловленный обезвоживанием каналов СУЗ, и влияют на появление аварийных сигналов от детекторов.

После начала обезвоживания каналов СУЗ в момент времени 16,8 с по показаниям датчиков ДКЭВ в районе активной зоны реактора одновременно появляются сигналы АЗ-6 в зонах ЛАР/ЛАЗ № 5, 12. Поскольку сразу появляются 2 сигнала АЗ-6, то пренебрежение одним из них не дает задержки отработки систе-

Таблица 2. Развитие событий при обезвоживании КОСУЗ (мощность реактора 4200 МВт)

Время, с	Событие
0,0	После начала аварии с потерей теплоносителя КОСУЗ за основным расходомером (тепловая мощность реактора 4200 МВт) прошло примерно 50 с и уровень воды в некоторых каналах СУЗ упал до верхней кромки графитового отражателя
0,5	Начинается движение стержня ЛАР в зоне ЛАР/ЛАЗ № 3
0,6	Начинается движение стержней ЛАР в зонах ЛАР/ЛАЗ № 2, 4, 10, 11
0,7	Начинается движение стержней ЛАР в зонах ЛАР/ЛАЗ № 1, 8, 9
16,8	По показаниям датчиков ДКЭВ сигналы АЗ-6 (АЗ-3) вырабатываются одновременно в зонах ЛАР/ЛАЗ № 5, 12
17,2	По показаниям датчиков ДКЭВ сигнал АЗ-6 вырабатывается в зоне ЛАР/ЛАЗ № 8
17,2	Вырабатывается первый сигнал АЗ-1 в зонах ЛАР/ЛАЗ № 5, 8, 12, но в настоящем анализе им пренебрегают
17,3	По показаниям датчиков ДКЭВ сигнал АЗ-6 вырабатывается в зоне ЛАР/ЛАЗ № 10
17,3	Второй сигнал АЗ-1 вырабатывается в зонах ЛАР/ЛАЗ № 5, 10, 12
17,6	Начинается ввод всех регулирующих стержней и стержней БАЗ
24,6	24 стержня БАЗ полностью введены
27,6	40 регулирующих стержней УСП полностью введены
31,6	Все регулирующие стержни полностью введены

Таблица 3. Развитие событий при обезвоживании КОСУЗ (мощность реактора 240 МВт)

Время, с	Событие
0,0	После начала аварии с потерей теплоносителя КОСУЗ за основным расходомером (тепловая мощность реактора 240 МВт) прошло примерно 50 с и уровень воды в некоторых каналах СУЗ упал до верхней кромки графитового отражателя
0,6	Начинается движение стержней ЛАР
9,3	По показаниям датчиков ДКЭВ сигнал АЗ-6 вырабатывается в зоне ЛАР/ЛАЗ № 6. Этим сигналом пренебрегаем, принимая отказ датчика 32–41
9,4	По показаниям датчиков ДКЭВ сигнал АЗ-6 вырабатывается в зоне ЛАР/ЛАЗ № 5
9,5	По показаниям датчиков ДКЭВ сигналы АЗ-6 вырабатываются одновременно в зонах ЛАР/ЛАЗ № 1, 8, 11, 12. Генерируется сигнал АЗ-1 (три и более сигналов АЗ-6 в зонах ЛАР/ЛАЗ)
9,8	Начинается ввод всех регулирующих стержней и стержней БАЗ
16,8	24 стержня БАЗ полностью введены
19,8	40 регулирующих стержней УСП полностью введены
23,8	Все регулирующие стержни полностью введены

мы СУЗ по сигналу АЗ-6, который при мощности реактора выше 2400 МВт сразу же формирует сигнал АЗ-3. По этому сигналу мощность реактора начинает снижаться со скоростью $2\% N_{\text{ном}}$ в секунду до 50% номинальной мощности. В момент времени 17,2 с после начала обезвоживания каналов СУЗ по показаниям датчиков ДКЭВ появляется сигнал АЗ-6 в зоне ЛАР/ЛАЗ № 8. При наличии трех сигналов АЗ-6 формируется первый сигнал АЗ-1 на остановку реактора. Однако, следуя методологии реактивных аварий, принимается отказ одного датчика ДКЭВ (ответственного за появление третьего сигнала АЗ-6) и так избегается появление первого сигнала АЗ-1. Таким образом, появление сигнала АЗ-1 и его отработка системой СУЗ задерживаются во времени. Спустя 17,3 с после начала обезвожи-

вания каналов СУЗ появляется второй сигнал АЗ-1 (сигнал АЗ-6 появляется в зоне ЛАР/ЛАЗ № 10) и, начиная с 17,6 с аварийного процесса, начинается остановка реактора.

Нейтронная мощность реактора в течение короткого промежутка времени (до аварийного останова реактора на 17,6 с после начала обезвоживания каналов СУЗ) остается приблизительно постоянной (рис. 3). С момента времени 16,8 с начинается снижение мощности реактора по сигналу АЗ-3. Дальше с 17,6 с следует процесс остановки реактора по сигналу АЗ-1. Мощность реактора падает и реактор останавливается.

На рис. 3 также показана локальная динамическая характеристика мощности ТК 40–16, находящегося вблизи детектора ДКЭВ 40–17 в зоне ЛАР/ЛАЗ № 12, т. е. в той области,

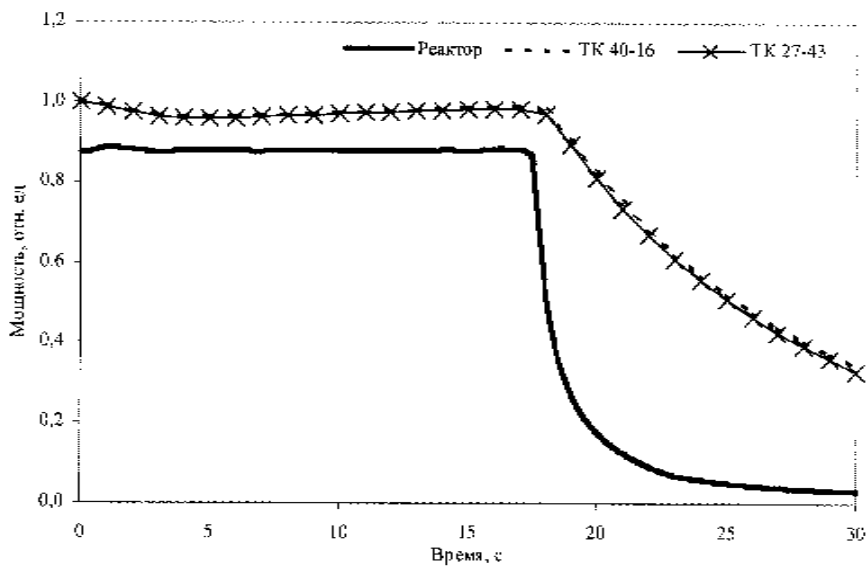


Рис. 3. Динамика мощности при обезвоживании Косуз (мощность реактора 4200 МВт)

где появился первый сигнал АЗ-3, и характеристика мощности максимально нагруженного ТК 27–43, в котором в момент времени $t = 0$ с – в начале моделируемого процесса обезвоживания Косуз – наблюдался пик мощности. Мощности ТК 40–16 и ТК 27–43 остаются приблизительно постоянными на протяжении всего аварийного процесса до момента останова реактора.

Обезвоживание Косуз на низких уровнях мощности (240 МВт) качественно отличается от подобной аварии на максимально разрешенном уровне мощности. Поскольку в данном случае система ЛАР не работает, стержни АР не в состоянии обеспечить компенсирующий эффект. Именно по этой причине, в конечном итоге, быстро нарастающее повышение реактивности создает всплеск энерговыделения, приводящий к ранней аварийной остановке реактора.

В табл. 3 приведен перечень событий, характеризующих специфическое для данного сценария развитие ситуации, предшествующей аварийной остановке реактора через 9,8 с после начала аварийного процесса.

Как видно из табл. 3, в момент времени 9,3 с после начала обезвоживания каналов СУЗ в районе актив-

ной зоны реактора по показаниям датчиков ДКЭВ появляется сигнал АЗ-6 в зоне ЛАР/ЛАЗ № 6. Однако, следуя методологии реактивных аварий, принимается отказ одного датчика ДКЭВ (ответственного за появление сигнала аварийной защиты) и так избегается появления первого сигнала АЗ-6. Спустя 0,1 с, в момент времени 9,4 с после начала обезвоживания каналов СУЗ, по показаниям датчиков ДКЭВ появляется сигнал АЗ-6 в зоне ЛАР/ЛАЗ № 5. По этому сигналу мощность реактора начинает снижаться со скоростью 1% от

номинальной мощности в секунду до исчезновения сигнала. В момент времени 9,5 с после начала аварийного процесса по показаниям датчиков ДКЭВ одновременно появляются сигналы АЗ-6 в зонах ЛАР/ЛАЗ № 1, 8, 11, 12. При наличии трех или более сигналов АЗ-6 формируется сигнал АЗ-1 на останов реактора. Поскольку сразу появляются 4 сигнала АЗ-6, то пренебрежение одним/двумя из них не дает задержки отработки системы СУЗ по сигналу АЗ-1. С 9,8 с аварийного процесса обезвоживания Косуз начинается останов реактора.

Нейтронная мощность реактора в течение короткого промежутка времени (до аварий-

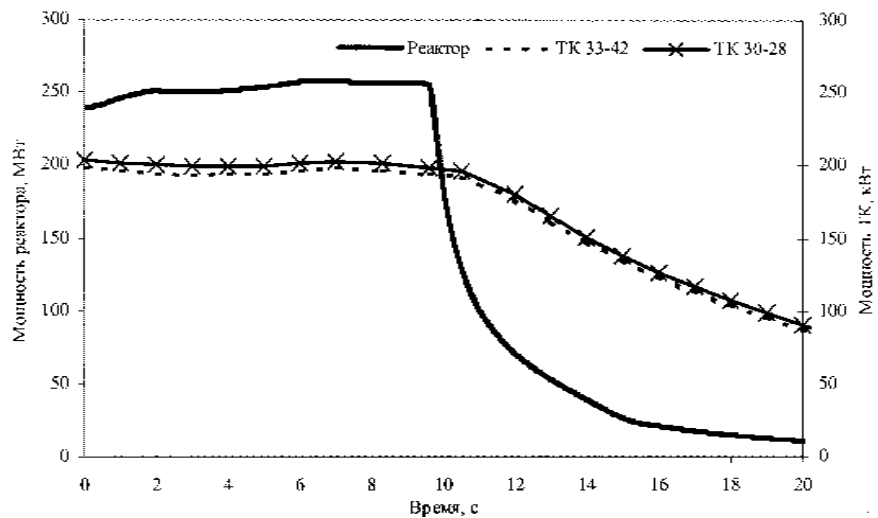


Рис. 4. Динамика мощности при обезвоживании Косуз (мощность реактора 240 МВт)

ного останова реактора на 9,8 с после начала обезвоживания каналов СУЗ) незначительно повышается и достигает значения примерно 260 МВт (рис. 4). С момента времени 9,4 с начинается снижение мощности реактора по сигналу АЗ-6. Дальше с момента времени 9,8 с следует процесс останова реактора по сигналу АЗ-1. Мощность реактора падает, и реактор останавливается.

На рис. 4 также показана локальная динамическая характеристика мощности ТК 33–42, находящегося вблизи детектора ДКЭВ 32–41 в зоне ЛАР/ЛАЗ № 6, т. е. в той области, где появился первый сигнал АЗ-6, и характеристика мощности максимально нагруженного ТК 30–28, в котором в момент времени $t = 0$ с – в начале моделируемого процесса обезвоживания КОСУЗ – наблюдался пик мощности. Мощности ТК 33–42 и ТК 30–28 остаются приблизительно постоянными на протяжении всего аварийного процесса до момента останова реактора.

Анализ переходных процессов при обезвоживании КОСУЗ для состояний активной зоны реактора (4200 МВт и 240 МВт) показал, что мощность отдельных ТК повышается очень незначительно, а максимальные значения температур топлива, оболочки топлива и трубы ТК, которые фиксируются в момент времени, когда вырабатывается сигнал на остановку реактора, не превышают критериев приемлемости для соответствующих параметров реактора [5].

6. ВЫВОДЫ

В целях проведения расчета процесса обезвоживания КОСУЗ для максимально разрешенного уровня мощности реактора (4200 МВт) и для минимально контролируемого уровня мощности реактора (240 МВт) 2-ого энергоблока Игналинской АЭС п/к QUABOX/CUBVOX-НУСА был модифицирован, включив в него специально созданный дополнительный модуль, позволяющий моделировать обезвоживание КОСУЗ при работе реактора на любом уровне мощности. Полученные результаты расчетов показали, что реактор РБМК-1500 располагает адекватной системой защиты от роста реактивности, вызываемого обезвоживанием КОСУЗ. Во время таких событий самые напряженные ТК по мощности остаются в безопасном эксплуатационном диапазоне и их основные технологические параметры не превышают критериев приемлемости.

Обозначения

АР	– автоматический регулятор
АЗ-1,3,6	– аварийные защиты определенного рода
АЭС	– атомная электростанция
БАЗ	– быстродействующая аварийная защита
БЩУ	– блочный щит управления
ВК	– верхний концевик
ДКЭВ	– датчик контроля энерговыделения высотный
КОСУЗ	– контур охлаждения системы управления и защиты
ЛАЗ	– локальная аварийная защита
ЛАР	– локальное автоматическое регулирование
ЛЭИ	– Литовский энергетический институт
НК	– нижний концевик
РБМК	– реактор большой мощности канальный
РР	– стержень ручного регулирования
СУЗ	– система управления и защиты
УСП	– укороченный стержень-поглотитель
ТК	– топливный канал
а.з.	– активная зона
$N_{ном}$	– номинальная мощность
поз.	– позиция
п/к	– программный комплекс

Поступило
18.10.2002

Литература

1. Ignalina NPP Safety Analysis Report. Volume 3 Task Group 5, VATTENFALL, 1996.
2. Отчет по анализу безопасности второго энергоблока Игналинской АЭС. Анализ аварий. Глава 1. Методология анализа аварий. Раздел 1.3. Методология анализа переходных и аварийных процессов в контуре охлаждения реактора, активной зоне реактора, реакторном пространстве и помещениях Игналинской АЭС. Каунас, ЛЭИ, 2001.
3. Отчет по анализу безопасности второго энергоблока Игналинской АЭС. Анализ аварий. Глава 1. Методология анализа аварий. Раздел 1.1. База исходных данных и инженерные справочники. Подраздел 1.1.7. Инженерный справочник для модели активной зоны реактора РБМК-1500, созданной с помощью программного комплекса QUABOX/CUBVOX-НУСА. Каунас, ЛЭИ, 2001.
4. Отчет по анализу безопасности второго энергоблока Игналинской АЭС. Анализ аварий. Глава 1. Методология анализа аварий. Раздел 1.2. Валидационные отчеты для используемых моде-

лей. Подраздел 1.2.3. Валидация модели активной зоны реактора, созданной с помощью программного комплекса QUABOX/CUBBOX-HYCA. Каунас: ЛЭИ, 2001.

5. Технологический регламент по эксплуатации Игналинской АЭС с реакторами РБМК-1500. Игналинская АЭС, 2001.

Evaldas Bubelis, Raimondas Pabarčius, Aurimas Tonkūnas
RVAS AUŠINIMO KONTŪRO NUSAUSĖJIMO
MODELIAVIMAS, NAUDOJANT PROGRAMŲ PAKETĄ
QUABOX/CUBBOX-HYCA

S a n t r a u k a

Iki šiol Ignalinos AE RBMK-1500 reaktorių eksploatacijos metu nebuvo įvykių, susijusių su reaktoriaus valdymo ir apsaugos sistemos (RVAS) aušinimo kontūro nusausėjimu, sukeliančiu reaktyvumo ir galios kitimą aktyviojoje zonoje. Tačiau RVAS aušinimo kontūro nusausėjimas, kaip projektinė avarija, visada yra analizuojamas, pagrindžiant Ignalinos AE RBMK-1500 reaktorių eksploatacijos saugą. Šiame straipsnyje pateikiami RVAS aušinimo kontūro nusausėjimo skaičiavimų rezultatai, gauti esant dviems būdingoms Ignalinos AE 2-ojo bloko reaktoriaus aktyviosios zonos būsenoms (reaktoriui dirbant 4200 MW ir 240 MW galia). Pereinamųjų procesų, vykstančių RVAS aušinimo kontūro nusausėjimo metu, modeliavimui buvo naudojamas vokiškas programų paketas QUABOX/CUBBOX-HYCA, turintis patobulintą RVAS veikimo logiką bei specialiai

mūsų sukurtą papildomą modulį, leidžiantį modeliuoti RVAS aušinimo kontūro nusausėjimą, reaktoriui dirbant bet kuria galia.

Raktažodžiai: Ignalinos AE, RVAS nusausėjimas, aktyvioji zona

Evaldas Bubelis, Raimondas Pabarčius, Aurimas Tonkūnas
MODELING OF CPS COOLING CIRCUIT VOIDING,
USING QUABOX/CUBBOX-HYCA CODE

S u m m a r y

Until now, during the operation of RBMK-1500 reactors of the Ignalina NPP, there were no accidents related to the control and protection system cooling circuit (CPSCC) voiding, which would lead to the reactivity and power changes in the reactor core. However, the CPSCC voiding, as the design basis accident, is always analyzed when performing the safety substantiation of the Ignalina NPP RBMK-1500 reactor operation. The article presents the calculation results of the CPSCC voiding accident for the two specific reactor core conditions of the Ignalina NPP Unit 2 (for the reactor operation on power levels of 4200 MW and 240 MW). For the simulation of transients taking place during the CPSCC voiding, the German code QUABOX/CUBBOX-HYCA was used. The code has the improved CPS operation logic and a specially created by us additional module, which allows to simulate the CPSCC voiding for the reactor operation at any power level.

Key words: Ignalina NPP, CPS voiding, active core