

---

# Моделирование аварийной ситуации с самоходами и падением стержней СУЗ с помощью программного комплекса QUABOX/CUBBOX-НУСА

---

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

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

В настоящее время на Игналинской АЭС продолжаются процесс перехода на новое уран-эрбиевое топливо повышенного обогащения и внедрение стержней РР новой конструкции (мод. 2477-01). Данные действия направлены на уменьшение эффекта обезвоживания КОСУЗ, а также повышение технических и экономических показателей эксплуатации реакторов. Аварийные ситуации с самоходами и падением стержней СУЗ приводят к изменениям реактивности и мощности в активной зоне реактора. Поэтому важной для безопасности является оценка работоспособности СУЗ по компенсации избыточной реактивности в активной зоне с измененной загрузкой во время таких аварийных процессов. В статье представлены результаты анализа самоходов и падения стержней СУЗ для характерного состояния активной зоны реактора 2-го энергоблока ИАЭС, т. е. при работе реактора на максимально разрешенном уровне мощности 4200 МВт. Для моделирования переходных процессов был использован немецкий п/к QUABOX/CUBBOX-НУСА с усовершенствованной логикой работы СУЗ.

**Ключевые слова:** Игналинская АЭС, СУЗ, самоход стержня, падение стержня, активная зона

---

## 1. ВВЕДЕНИЕ

На реакторе РБМК-1500 Игналинской АЭС имеются 211 стержней СУЗ, нормальная работа которых гарантирует безопасную эксплуатацию энергоблоков при работе реактора на мощности и во время пуска реактора. Для регулирования нейтронного поля в активной зоне реакторов РБМК-1500 используются стержни АР, РР и УСП. Стержни БАЗ (действуя совместно со всеми вышеупомянутыми стержнями СУЗ) используются только при аварийном останове реактора. Падение или самоходы стержней СУЗ приводят к изменениям реактивности и мощности в активной зоне реактора. При такой аварийной ситуации формируются сигналы на срабатывание аварийной защиты реактора. Аварийные ситуации, связанные с самоходами и падением стержней СУЗ, по частоте их возникновения во время эксплуатации энергоблоков ИАЭС класси-

фицируются как проектные аварии и анализируются при обосновании безопасности эксплуатации реакторов РБМК-1500 Игналинской АЭС.

В статье рассматриваются самоход одиночного стержня в центре и в периферийной части активной зоны, самоход группы стержней в центре активной зоны и самопроизвольное падение стержня управления с укороченным поглотителем из активной зоны при работе реактора на максимально разрешенном уровне мощности 4200 МВт, когда выполняются все функции управления и защиты. Извлечение периферийной группы регулирующих стержней не анализировалось, поскольку на периферии отсутствуют полностью или почти полностью погруженные стержни. Выбранные варианты моделирования полностью перекрывают весь спектр ожидаемых переходных процессов и предполагаемых аварийных событий, связанных с самоходами и па-

дением стержней СУЗ и происходящих в реакторе РБМК-1500. Для моделирования переходных процессов с самоходами и падением стержней СУЗ был использован немецкий п/к QUABOX/CUBVOX-НУСА с усовершенствованной логикой работы СУЗ [1].

Наихудшие постулированные состояния активной зоны определялись аналитически с учетом специфики каждой аварии. Поэтому использовались различные начальные распределения энерговыделения, расхода теплоносителя и глубины выгорания топлива для каждой реактивной аварии. Во всех этих состояниях локальные параметры были возмущены до уровня, разрешенного эксплуатационными инструкциями ИАЭС, для того, чтобы оценить максимально возможное повышение энерговыделения в топливе, а следовательно и возможное его повреждение.

Цель данной статьи – представить результаты расчетов самоходов и падения стержней СУЗ, происходящих в реакторе РБМК-1500 Игналинской АЭС, и оценить работоспособность СУЗ по компенсации вызванной ими избыточной реактивности в активной зоне реактора.

## 2. ГРАНИЧНЫЕ УСЛОВИЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ И МЕТОД АНАЛИЗА

Перемещение стержня инициируется либо автоматически по сигналам системы регулирования, либо вручную оператором.

В автоматическом режиме разрешено движение только одного стержня. Дополнительно к этому, непрерывное перемещение каждого стержня ограничивается логикой СУЗ. Движение стержня прекращается, когда значение мощности достигает уставки и сигнал на перемещение стержня исчезает. Самоход стержня также может быть вызван ошибочной командой или отказом задающего устройства при достижении мощностью значения уставки. Кроме того, должно отказать электромеханическое устройство, ограничивающее перемещение стержня вверх в течение времени более 8 с. Таким образом, только множественные отказы независимых систем (логика СУЗ, датчики, задатчик мощности, ограничитель перемещения) могут привести к самоходу стержня.

При движении стержня по команде оператора, электро-

механическое устройство также по времени ограничивает его перемещение восемью секундами. Непрерывное и полное извлечение стержня возможно либо при отказе этого устройства, либо при повторяющейся команде оператора до истечения восьми секунд, однако такие действия оператора запрещены Технологическим регламентом [2]. В любом случае рост реактивности при извлечении стержня ведет к выходу мощности за пределы уставки и СУЗ формирует команду на останов стержня.

Настоящий анализ проводился с консервативных позиций, т. е. пренебрегая первыми сигналами на снижение мощности и/или на останов реактора, а также принимая полный отказ блокировки извлечения стержня(ей).

В качестве начальных условий в процессе моделирования аварийных ситуаций с самоходами и падением стержней СУЗ при работе реактора на максимально разрешенной мощности 4200 МВт принимались параметры 2-го энергоблока Игналинской АЭС, приведенные в таблице 1. Исходные условия моделирования были выбраны консервативным образом, чтобы обеспечивались наиболее неблагоприятные потенциальные последствия моделируемых переходных процессов. Моделировались возмущенные аксиальные и радиальные распределения мощностей, при которых рост реактивности при самоходах или падении стержней становится максимальным. В начале самохода стержня (группы стержней) аксиальный профиль имеет пик в нижней части активной зоны, а при падении стержня УСП – в верхней части активной зоны. Что касается радиальных возмущений, были созданы пики мощности в центре и на периферии активной зоны, позволившие проанализировать эффективность и область действия внутриреакторных датчиков и боковых ионизационных камер, соответственно. Предполагалось, что все внутриреакторные датчики имеют максималь-

Таблица 1. Параметры 2-го энергоблока Игналинской АЭС при работе реактора на мощности 4200 МВт

Наименование параметра	Величина
Тепловая мощность реактора, МВт	4200
Давление в КМППЦ в а. з., кгс/см <sup>2</sup>	77,5
Температура теплоносителя на входе в а. з., °С	261
Оперативный запас реактивности, эффективные стержни РР	56,16
Радиальный коэффициент неравномерности, $K_r$	1,409
Высотный коэффициент неравномерности, $K_z$	1,19
Среднее выгорание, МВт · сутки/кг	11,17

ные уставки при нормальных условиях работы (15%). Каналы с максимальной или близкой к ней мощностью были расположены вблизи аварийного стержня (стержней). Согласно методологии реактивных 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. Кроме того, принималось, что во время самохода отказывает независимая система блокировки движения аварийного стержня в течение 8 с его непрерывного самохода.

В активной зоне извлечение даже сравнительно „легкого“ стержня приводит к локальным возмущениям мощности. Поэтому для анализа необходимо детальное трехмерное моделирование нейтронно-физических и теплогидравлических процессов с подробным описанием всех систем контроля и регулирования, особенно системы СУЗ. Для моделирования нейтронно-физических процессов применялся немецкий п/к QUAVOX/CUBVOX-НУСА [1]. Данный п/к валидирован как для нейтронно-физических расчетов реакторов типа РБМК-1000, так и для реакторов РБМК-1500 [3].

Анализ переходных процессов для случаев самоходов центрального и периферийного регулирующих стержней, центральной группы (из 3 стержней) регулирующих стержней и падения стержня УСП проводился исходя из методологии анализа реактивных аварий. Во время выбранных ожидаемых переходных процессов (ожидаемая частота которых не меньше одного раза во время существования станции) и проектных аварийных событий (вероятность которых меньше, чем  $10^{-2}$  в год) изменение параметров не должно превысить пределы безопасной эксплуатации. Согласно рекомендациям МАГАТЭ [4], пределы безопасной эксплуатации, указанные в Технологическом регламенте Игналинской АЭС [2], служат критериями приемлемости для таких событий. Превышения этих пределов и отказы оболочек твэлов, которые препятствуют возвращению к нормальной эксплуатации после прекращения события, являются неприемлемыми. Если указанные выше критерии приемлемости нарушаются, тогда следует рассматривать еще и дополнительные критерии, представленные в методологии анализа аварий [5].

### 3. САМОХОД ЦЕНТРАЛЬНОГО И ПЕРИФЕРИЙНОГО ОДИНОЧНОГО СТЕРЖНЯ СУЗ

Стержнем-кандидатом на моделируемый самоход был выбран стержень 24–25 (координаты Y–X). По сравнению с исходным состоянием [6] на первом этапе моделирования стержень 24–25 был полностью погружен в активную зону, а поле энерговыделения вокруг данного стержня выровнено моделированием перегрузок и некоторым перемещением вблизи стоящих стержней. Данный кандидат на самоход в центральной зоне расположен довольно далеко от внутризонных детекторов, а также от стержней системы ЛАР [7].

На втором этапе моделирования для формирования состояния с центральным пиком были сделаны некоторые трансформации исходного состояния активной зоны реактора. Локальное искажение распределения мощности связано с вводом свежей тепловыделяющей сборки в ячейку 25–25, перегрузкой небольшого числа других тепловыделяющихборок и изменениями положения небольшого числа регулирующих стержней. По сравнению с исходным состоянием [6] мощности ТВС, окружающих аварийный стержень, повысились в среднем на 31%. Максимум возмущенного высотного распределения энерговыделения был смещен в направлении нижней части активной зоны. Все параметры Игналинской АЭС, связанные с эксплуатационными ограничениями, при этом остались в допустимых пределах.

Ответная реакция систем АЭС на продолжительное извлечение регулирующего стержня 24–25 описана в таблице 2, где приведен перечень событий, характеризующих специфическое для данного сценария развитие ситуации, предшествующее аварийному останову реактора через 9,6 с после начала движения аварийного стержня. Движение регулирующих стержней системы ЛАР предшествует аварийному останову, поскольку эти стержни до некоторой степени компенсируют рост реактивности, так же как и влияет на появление сигналов детекторов.

Как видно из таблицы 2, в момент времени 6,9 с после начала самохода стержня 24–25, по показаниям датчиков ДКЭВ одновременно появляются сигналы АЗ-6 в зонах ЛАР/ЛАЗ № 1–4. Поскольку сразу появляются 4 сигнала АЗ-6, то пренебрежение одним из них не дает задержки отработки системы СУЗ по сигналу АЗ-6, который при мощности

Таблица 2. Развитие событий при самоходе центрального регулирующего стержня 24-25 (мощность реактора 4200 МВт)

Время, с	Событие
0,0	Стержень 24-25 начинает движение (мощность реактора 4200 МВт)
1,2	Начинается движение стержня ЛАР в зоне ЛАР/ЛАЗ № 3
2,4	Начинается движение стержней ЛАР в зонах ЛАР/ЛАЗ № 2, 4
3,0	Начинается движение стержня ЛАР в зоне ЛАР/ЛАЗ № 1
4,8	Сигналы избыточного тока от детекторов ДКЭР в зонах ЛАР/ЛАЗ № 1-4
6,9	Сигналы АЗ-6 (АЗ-3) вырабатываются одновременно в зонах ЛАР/ЛАЗ № 1-4
6,9	Вырабатывается первый сигнал АЗ-1 в зонах ЛАР/ЛАЗ № 1-4, но в настоящем анализе им пренебрегают
9,3	Второй сигнал АЗ-1 вырабатывается в зонах ЛАР/ЛАЗ № 1-4
9,6	Начинается ввод всех регулирующих стержней и стержней БАЗ
16,6	24 стержня БАЗ полностью введены
19,6	40 регулирующих стержней УСП полностью введены
23,6	Все регулирующие стержни полностью введены

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. Однако, следуя методологии реактивных аварий, принимается отказ одного датчика ДКЭВ и так избегается появление первого сигнала АЗ-1. Таким образом задерживаются во времени появление сигнала АЗ-1 и его отработка системой СУЗ. Спустя 9,3 с после начала самохода, появляется второй сигнал АЗ-1 и с 9,6 с начинается останов реактора.

Нейтронная мощность реактора за короткий срок времени (т. е. до аварийного останова реактора на 9,6 с после начала самохода стержня) остается приблизительно постоянной (см. рис. 1). С момента времени 6,9 с начинается снижение мощности реактора по сигналу АЗ-3. Дальше с 9,6 с следует процесс останова реактора по сигналу АЗ-1. Мощность реактора падает и реактор останавливается.

На рис. 1 представлена также локальная динамическая характеристика мощности топливного канала ТК 25-23 (начальная мощность которого 3,75 МВт и имеющего максимальное значение мощности на 9,6 с переходного процесса), находящегося вблизи аварийного стержня. Пиковое значение мощности

канала 25-23 в моделируемом процессе самохода центрального стержня достигает около 110% его первоначального значения.

Кроме того, был проведен анализ переходного процесса при самоходе периферийного стержня, который от центрального отличался тем, что за ним „следит“ меньше детекторов ДКЭР, чем их имеется в центральной части активной зоны. Стержнем-кандидатом на моделируемый самоход был выбран стержень 38-11. По сравнению с исходным состоянием [6] стержень 38-11 был полностью погружен в активную зону, а поле энерговыделения вокруг данного стержня выровнено моделированием перегрузок и некоторым перемещением вблизи стоящих стержней. Данный кандидат на самоход в периферийной зоне

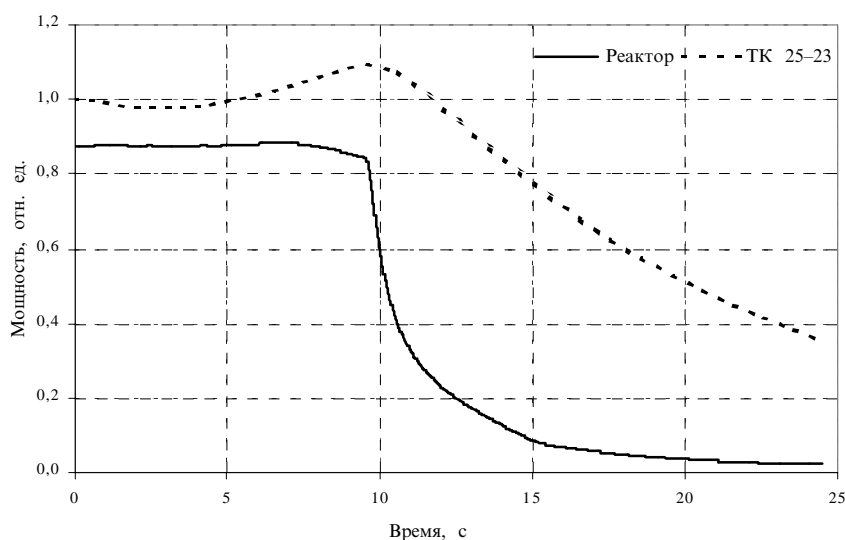


Рис. 1. Динамика мощности при перемещении центрального стержня 24-25

реактора расположен довольно далеко от внутризонных детекторов, а также от стержней системы ЛАР.

Для формирования состояния с периферийным пиком были сделаны аналогичные трансформации исходного состояния активной зоны реактора, как и при формировании центрального пика мощности. Максимум возмущенного высотного распределения энерговыделения был смещен в направлении нижней части активной зоны. По сравнению с исходным состоянием [6] мощности ТВС, окружающих аварийный стержень, повысились в среднем на 12%. Все параметры Игналинской АЭС, связанные с эксплуатационными ограничениями, при этом остались в допустимых пределах.

Ответная реакция систем АЭС на продолжительное извлечение регулирующего стержня 38–11 описана в таблице 3, где приведен перечень событий, характеризующих специфическое для данного сценария развитие ситуации, предшествующее аварийному останову реактора через 21,1 с после начала движения аварийного стержня. Движение регулирующих стержней системы автоматического регулирования (ЛАР) предшествует аварийному оста-

нову, поскольку эти стержни до некоторой степени компенсируют рост реактивности, так же как и влияют на появление сигналов детекторов.

Как видно из таблицы 3, следуя консервативному подходу (пренебрегая сигналами соответствующих датчиков на 3,7 с и 9,7 с данного переходного процесса), второй сигнал на останов реактора появляется только на 20,8 с, который сопровождается генерированием сигнала АЗ-1. Таким образом, на 21,1 с после начала переходного процесса начинается останов реактора. Такое запоздалое появление второго сигнала на останов реактора (по сравнению с самоходом центрального стержня) является следствием довольно небольшого (в среднем на 12% выше исходного состояния) сформированного периферийного пика мощности.

Как показано на рис. 2, за 4,2 с (до появления сигнала АЗ-3) нейтронная мощность реактора существенно не изменяется. После момента времени 4,2 с и до появления сигнала АЗ-1 на 20,8 с мощность реактора уменьшается под влиянием сигнала АЗ-3. Начиная с момента времени 21,1 с реактор останавливается по сигналу АЗ-1.

Таблица 3. Развитие событий при самоходе периферийного регулирующего стержня 38-11 (мощность реактора 4200 МВт)

Время, с	Событие
0,0	Стержень 38-11 начинает движение (мощность реактора 4200 МВт)
1,0	Начинается движение стержня ЛАР в зоне ЛАР/ЛАЗ № 11
1,3	Начинается движение стержня ЛАР в зоне ЛАР/ЛАЗ № 1
2,0	Начинается движение стержней ЛАР в зонах ЛАР/ЛАЗ № 2, 6
2,3	Начинается движение стержней ЛАР в зонах ЛАР/ЛАЗ № 4, 12
3,7	Сигнал АЗ-6 (АЗ-3) вырабатывается в зоне ЛАР/ЛАЗ № 12 по показаниям двух датчиков ДКЭВ. Этим сигналом пренебрегаем, принимая отказ датчика
3,9	Сигналы избыточного тока от детекторов ДКЭР в зонах ЛАР/ЛАЗ № 11, 12
4,2	Второй сигнал АЗ-6 (АЗ-3) вырабатывается в зоне ЛАР/ЛАЗ № 11 по показаниям двух датчиков ДКЭВ
4,2	Формирование сигнала превышения уставки по БИК № 21
4,5	Сигнал АЗ-6 вырабатывается в зоне ЛАР/ЛАЗ № 12 по показаниям датчиков ДКЭР. Второй сигнал избыточного тока от детекторов ДКЭР в зоне ЛАР/ЛАЗ № 12
7,4	Сигнал избыточного тока от детектора ЛАЗ в зоне ЛАР/ЛАЗ № 4
9,7	Формирование сигнала превышения уставки по БИК № 23. Сигнал АЗМ от БИК № 21 и 23. Оба сигнала - БАЗ и АЗ-1 вырабатываются АЗМ. Этими сигналами пренебрегаем принимая отказ БИК № 23
20,8	По показаниям двух датчиков ДКЭВ, сигнал АЗ-6 вырабатывается в зоне ЛАР/ЛАЗ № 9. Генерируется сигнал АЗ-1 (три сигнала АЗ-6 в зонах ЛАР/ЛАЗ № 9,11,12)
21,1	Начинается ввод всех регулирующих стержней и стержней БАЗ
28,1	24 стержня БАЗ полностью введены
31,1	40 регулирующих стержней УСП полностью введены
35,1	Все регулирующие стержни полностью введены

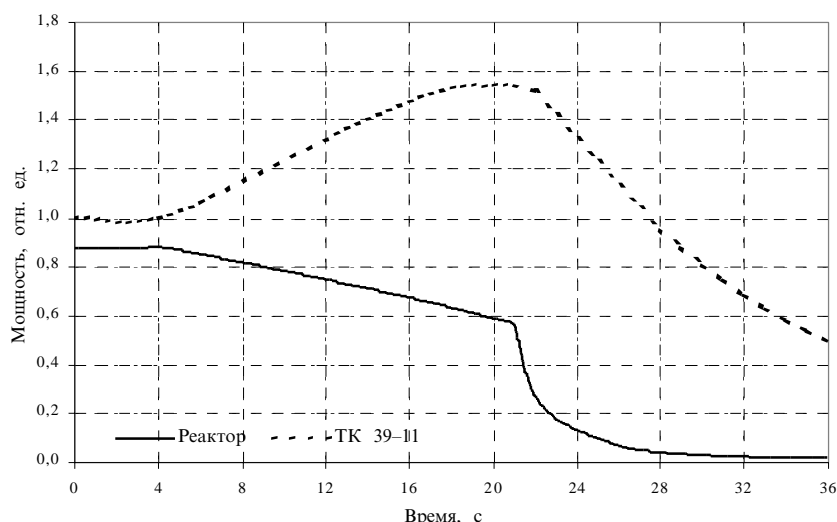


Рис. 2. Динамика мощности при перемещении периферийного стержня 38-11

На рис. 2 также представлена локальная динамическая характеристика мощности топливного канала ТК 39-11, находящегося вблизи аварийного стержня (т. е. мощность рядом расположенного самого „горячего“ топливного канала 39-11 со свежим топливом). Пиковое значение мощности канала 39-11 в моделируемом процессе самохода периферийного стержня достигает около 154% его первоначального значения (3,06 МВт).

Результаты расчетов показывают, что проанализированный переходной процесс не представляет никакой угрозы для безопасности реактора, хотя и является более «жестким» при сравнении с аналогичными результатами, полученными при самоходе центрального стержня. В данном случае локальная мощность соседних ТК повышается на ~50% больше, поскольку за самоходом периферийного стержня „следит“ меньше детек-

торов и сигнал на останов реактора появляется позже. Существующая система внутри- и внезонных датчиков эффективно обеспечивает аварийный останов реактора в случае самохода одиночного регулирующего стержня, а система ЛАР способна поддерживать тепловую мощность реактора на постоянном уровне. Зона распространения возмущения при самоходах как центрального, так и периферийного стержней составляет приблизительно  $5 \times 5$  ячеек, находящихся вблизи аварийного стержня.

#### 4. САМОХОД ГРУППЫ РЕГУЛИРУЮЩИХ СТЕРЖНЕЙ СУЗ

При высоких уровнях мощности и особенно в центре активной зоны реактора не практикуются объединение в группу и маневрирование несколькими стержнями ручного регулирования, поскольку такие действия почти немедленно приводят к аварийному останову реактора. Для настоящего моделирования в группу были объединены только три стержня РР (24-25, 30-23 и 26-19), которые практически полностью введены в активную зону.

Ответная реакция систем АЭС на продолжительное извлечение центральной группы регулирующих стержней описана в таблице 4, где приведен перечень событий, характеризующих специфическое для данного сценария развитие ситуации, предшествующее

Время, с	Событие
1	2
0,0	Стержни 24-25, 30-23 и 26-19 начинают движение (мощность реактора 4200 МВт)
0,5	Начинается движение стержней ЛАР в зонах ЛАР/ЛАЗ № 3, 4
1,4	Начинается движение стержней ЛАР в зонах ЛАР/ЛАЗ № 1, 2
1,8	Сигнал АЗ-6 (АЗ-3) вырабатывается в зоне ЛАР/ЛАЗ № 4 по показаниям датчиков ДКЭВ. Этим сигналом пренебрегаем, принимая отказ датчика
3,4	Сигналы избыточного тока от детекторов ДКЭР в зонах ЛАР/ЛАЗ № 1, 4
3,5	Сигнал АЗ-6 (АЗ-3) повторно вырабатывается в зоне ЛАР/ЛАЗ № 4 по показаниям датчиков ДКЭВ
3,7	Сигналы избыточного тока от детекторов ДКЭР в зонах ЛАР/ЛАЗ № 2, 3

Таблица 4 (продолжение)

1	2
4,0	По показаниям датчиков ДКЭР, сигналы АЗ-6 вырабатываются одновременно в зонах ЛАР/ЛАЗ № 1, 4
4,1	Сигнал АЗ-6 (АЗ-3) вырабатывается в зоне ЛАР/ЛАЗ № 3 по показаниям датчиков ДКЭВ. Из трех сигналов АЗ-6 вырабатывается первый сигнал АЗ-1, но в настоящем анализе им пренебрегаем, принимая отказ датчика
5,4	Сигнал АЗ-6 (АЗ-3) одновременно вырабатывается в зонах ЛАР/ЛАЗ № 2, 3 по показаниям датчиков ДКЭВ. Из трех сигналов АЗ-6 вырабатывается второй сигнал АЗ-1
5,7	Начинается ввод всех регулирующих стержней и стержней БАЗ
12,7	24 стержня БАЗ полностью введены
15,7	40 регулирующих стержней УСП полностью введены
19,7	Все регулирующие стержни полностью введены

аварийному останову реактора через 5,7 с после начала самохода группы регулирующих стержней. Движение регулирующих стержней системы ЛАР предшествует аварийному останову, поскольку эти стержни до некоторой степени компенсируют рост реактивности, так же как и влияют на появление сигналов детекторов.

Как видно из таблицы 4, следуя методологии реактивных аварий (пренебрегая сигналами соответствующих датчиков на 1,8 с и 4,1 с самохода центральной группы стержней СУЗ), второй сигнал АЗ-1 формируется только на 5,4 с переходного процесса и начиная с 5,7 с начинается останов реактора по сигналу АЗ-1.

Нейтронная мощность реактора за короткий срок времени (т. е. до аварийного останова реактора на 5,7 с после начала самохода группы стержней) остается приблизительно постоянной (см. рис. 3). С момента времени 3,5 с начинается снижение мощности реактора по сигналу АЗ-3. Начиная с 5,7 с виден процесс останова реактора по сигналу АЗ-1. Мощность реактора падает и реактор останавливается.

На рис. 3 представлена также локальная динамическая характеристика мощности топливного канала, находящегося вблизи центральной группы регулирующих стержней (т. е. мощность самого „горячего“ топливного канала 25–23). Пиковое значение мощности канала 25–23 в моделируемом процессе самохода центральной группы стержней дости-

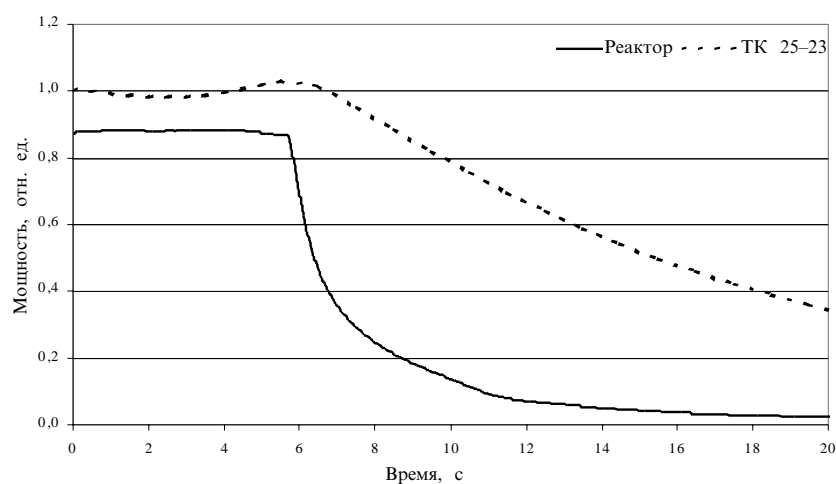


Рис. 3. Динамика мощности при самоходе группы регулирующих стержней

гает около 105% его первоначального значения (3,57 МВт). Это гораздо меньше пика мощности, получаемого при самоходе одиночного стержня. Следовательно, все локальные параметры сохраняются на более низком уровне.

Данный анализ результатов моделирования показал, что извлечение группы регулирующих стержней не вызывает ухудшения локальных или общих условий эксплуатации реактора по сравнению с извлечением одиночного стержня. Причина этого заключается в том, что наличие условий для аварийного останова, которые эффективны в случае перемещения одиночного стержня, является, по крайней мере, столь же эффективным и для извлечения группы стержней. В действительности существует тенденция к более раннему аварийному останову реактора. Следовательно, локальный всплеск энерговыделения не бывает сколько-нибудь сильнее, чем в

случае извлечения одиночного стержня, а общий всплеск мощности остается в безопасных пределах вследствие раннего срабатывания аварийной защиты.

## 5. ПАДЕНИЕ СТЕРЖНЯ СУЗ С УКОРОЧЕННЫМ СТЕРЖНЕМ-ПОГЛОТИТЕЛЕМ

Стержнем-кандидатом на моделируемое падение выбран стержень УСП 28–13, который почти полностью погружен в активную зону реактора. Данный кандидат на самоход расположен в зоне плато довольно далеко от внутризонных детекторов, а также от стержневой системы ЛАР. Для формирования состояния с пиком мощности около выбранного стержня УСП 28–13 были сделаны некоторые трансформации исходного состояния активной зоны реактора [6]. Локальное искажение распределения мощности связано с вводом свежей тепловыделяющей сборки в ячейку 27–13, перегрузкой небольшого числа других тепловыделяющих сборок и изменением положений небольшого числа регулирующих стержней. Все параметры Игналинской АЭС, связанные с эксплуатационными ограничениями, остались при этом в допустимых пределах. Свежая тепловыделяющая сборка в ячейке 27–13, расположенная рядом с аварийным стержнем, работает на мощности 3,51 МВт, которая довольно близка к максимальной разрешенной мощности (в конце переходного процесса данная ТВС имеет максимальную мощность в матрице  $5 \times 5$  вокруг аварийного стержня). Максимум возмущенного высотного распределения энерговыделения был смещен в направлении верхней части активной зоны. По сравнению с исходным состоянием [6] мощ-

ности ТВС, окружающих аварийный стержень, повысились в среднем на 11%.

Ответная реакция систем АЭС при падении регулирующего стержня УСП 28–13 описана в таблице 5, где приведен перечень событий, характеризующих специфическое для данного сценария развитие ситуации. Система ЛАР является системой нормальной эксплуатации, выполняющей функции локального автоматического регулирования, и доступна во время аварии. Рост реактивности, обусловливающий появление командных сигналов отдельных датчиков, компенсируется перемещением стержней ЛАР.

Как видно из таблицы 5, в момент времени 2,9 с после начала падения стержня УСП 28–13 по показаниям датчиков ДКЭР одновременно появляются сигналы АЗ-6 в зонах ЛАР/ЛАЗ № 4, 11. Поскольку появление сигналов АЗ-6 в зонах ЛАР/ЛАЗ № 4, 11 обусловлено срабатыванием двух общих датчиков ДКЭР для обеих зон ЛАР/ЛАЗ, то пренебрежение одним из них результирует в подавлении сигналов АЗ-6 в обеих зонах ЛАР/ЛАЗ № 4, 11. Следующий сигнал АЗ-6 по показаниям датчиков ДКЭВ вырабатывается уже на 3,0 с, вследствие чего формируется сигнал АЗ-3. В момент времени 21,7 с после начала аварийного процесса мощность реактора достигает 50% номинальной мощности и реактор выходит на новый стационарный уровень мощности (2400 МВт).

Нейтронная мощность реактора при работающей системе ЛАР за короткий срок времени (т. е. до 3,0 с после начала падения стержня) остается приблизительно постоянной (см. рис. 4). Работа системы ЛАР почти без задержки начинает компенсировать увеличение мощности вводя в активную зону регулирующие стержни. Начиная с момента вре-

Таблица 5. Развитие событий при падении стержня УСП 28–13 (мощность реактора 4200 МВт)

Время, с	Событие
0,0	Начинается падение стержня 28-13 (мощность реактора 4200 МВт)
0,3	Начинается движение стержня ЛАР в зоне ЛАР/ЛАЗ № 4
0,4	Начинается движение стержней ЛАР в зонах ЛАР/ЛАЗ № 3, 11
0,5	Начинается движение стержня ЛАР в зоне ЛАР/ЛАЗ № 10
2,9	Сигналы избыточного тока от детекторов ДКЭР в зонах ЛАР/ЛАЗ № 4, 11
2,9	Сигналы АЗ-6 (АЗ-3) вырабатываются одновременно в зонах ЛАР/ЛАЗ № 4, 11. Этими сигналами пренебрегаем принимая отказ датчика
3,0	По показаниям двух датчиков ДКЭВ, сигнал АЗ-6 (АЗ-3) вырабатывается в зоне ЛАР/ЛАЗ № 11
21,7	Мощность реактора достигает 50% максимальной номинальной мощности. Реактор выходит на новый стационарный уровень мощности (2400 МВт)



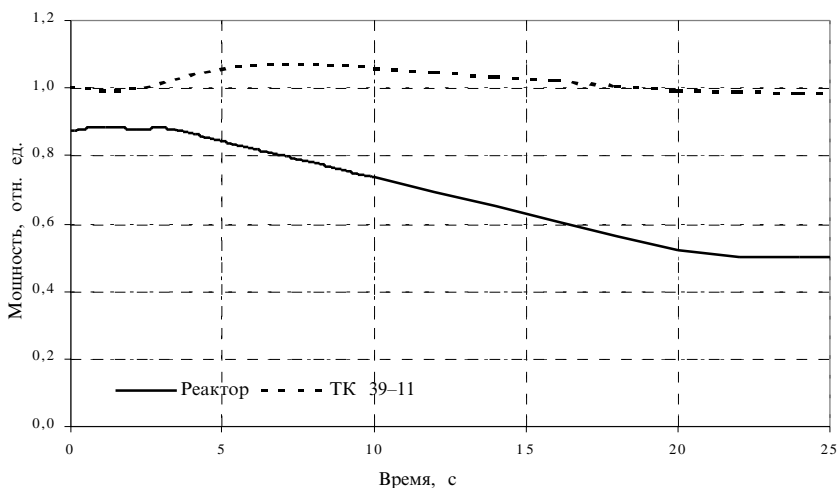


Рис. 4. Динамика мощности при перемещении стержня УСП 28–13

мени 3,0 с видно снижение мощности реактора по сигналу АЗ-3, которое заканчивается в момент времени 21,7 с после начала падения УСП 28–13. Реактор выходит на новый стационарный уровень мощности.

На рис. 4 представлена также локальная динамическая характеристика мощности топливного канала, находящегося вблизи аварийного стержня (т. е. мощность рядом расположенного топливного канала 27–13 со свежим топливом). Пиковое значение мощности канала 27–13 в моделируемом процессе падения стержня УСП достигает около 107% его первоначального значения (3,51 МВт).

Приведенные результаты подтверждают, что в случае аварий с выпадением стержня УСП из активной зоны реактора, вследствие довольно небольшой эффективности этого стержня, ранний аварийный останов реактора не происходит. После срабатывания аварийной защиты по сигналу АЗ-6 мощность реактора снижается до нового стационарного уровня мощности 2400 МВт к 21,7 секунде с начала аварийного процесса. Результаты расчетов показывают, что проанализированный переходный процесс протекает с большим запасом до критериев приемлемости и не представляет никакой угрозы для безопасности реактора.

Анализ переходных процессов с самоходами и падением стержней СУЗ при работе реактора на максимально разрешенном уровне мощности 4200 МВт показал, что мощность отдельных ТК, находящихся вблизи аварийного стержня, повышается очень незначительно, а максимальные значения температур топлива, оболочки топлива и трубы канала ТК, которые фиксируются в момент

времени появления сигнала на останов реактора, не превышают критериев приемлемости для соответствующих параметров реактора. Результаты детального анализа динамики основных термогидравлических параметров активной зоны реактора представлялись в работе [5] и, в связи с большим объемом информации, в данной статье не публикуются. Согласно представленным результатам расчета, все аварийные переходные процессы, проанализированные в данной статье, протекают с

большими запасами до критериев приемлемости.

## 6. ВЫВОДЫ

Расчеты переходных процессов с самоходами и падением стержней СУЗ проводились на базе данных активной зоны реактора 2-го энергоблока Игналинской АЭС при работе его на максимально разрешенном уровне мощности 4200 МВт. Данное состояние работы реактора характерно для рабочего диапазона изменения мощности реактора (1000–4200 МВт), когда возможны все переходные процессы и выполняются все функции управления и защиты. Результаты расчетов, полученные с помощью немецкого п/к QUABOX/CUBVOX-НУСА с усовершенствованной логикой работы СУЗ, показали, что реактор РБМК-1500 располагает адекватной системой защиты от роста реактивности, вызываемого самоходами и падением стержней СУЗ. Во время таких событий самые напряженные ТК по мощности остаются в безопасном эксплуатационном диапазоне, а все основные параметры реактора не превышают критериев приемлемости.

### Обозначения

- АЗ-1,3,6 – аварийные защиты определенного рода
- АР – автоматическое регулирование
- АЭС – атомная электростанция
- БАЗ – быстродействующая аварийная защита
- БЩУ – блочный щит управления
- ДКЭВ – датчик контроля энерговыделения высотный
- ИАЭС – Игналинская АЭС

КОСУЗ	– контур охлаждения СУЗ
ЛАЗ	– локальная аварийная защита
ЛАР	– локальное автоматическое регулирование
ЛЭИ	– Литовский энергетический институт
РБМК	– реактор большой мощности канальный
РР	– ручное регулирование
СУЗ	– система управления и защиты
ТК	– топливный канал
УСП	– укороченный стержень поглотитель
а.з.	– активная зона
$N_{ном}$	– номинальная мощность
поз.	– позиция
п/к	– программный комплекс

Поступило  
02.06.2003

### Литература

1. 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/CUBBOX-HYCA. Каунас, ЛЭИ, 2001.
2. Технологический регламент по эксплуатации Игналинской АЭС с реакторами РБМК-1500. Игналинская АЭС, 2001.
3. Отчет по анализу безопасности второго энергоблока Игналинской АЭС, Анализ аварий. Глава 1. Методология анализа аварий. Раздел 1.2. Валидационные отчеты для используемых моделей. Подраздел 1.2.3. Валидация модели активной зоны реактора, созданной с помощью программного комплекса QUABOX/CUBBOX-HYCA, Каунас. ЛЭИ, 2001.
4. International Atomic Energy Agency, Accident and Transient Analysis of RBMK Nuclear Power Plants. Appendix C (final draft). Vienna, 2000.
5. 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.
6. 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 1.1.6. База исходных данных для модели активной зоны реактора РБМК-1500. Каунас, ЛЭИ, 2001.
7. Бубялис Э., Пабарчюс Р., Демченко М. Нелинейность зависимости эффекта обезвоживания от плотности теплоносителя в реакторах РБМК-1500 Игналинской АЭС // Energetika. 1999. Nr. 2. P. 13–20.

Evaldas Bubelis, Raimondas Pabarčius, Aurimas Tonkūnas

### AVARINIŲ SITUACIJŲ, KAI RVAS STRYPAI IŠTRAUKIAMAI IR IŠKRENTA, MODELIAVIMAS, NAUDOJANT PROGRAMŲ PAKETĄ QUABOX/CUBBOX-HYCA

#### S a n t r a u k a

Šiuo metu Ignalinos AE tęsiasi naujojo didesnio sodrinimo urano ir erbio kuro ir naujos konstrukcijos rankinio reguliavimo (RR) strypų (mod. 2477-01) įdiegimo procesas. Šio proceso tikslas – sumažinti reaktoriaus valdymo ir apsaugos sistemos (RVAS) aušinimo kontūro nusausėjimo efektą bei padidinti techninius ir ekonominius reaktorių eksploatacijos parametrus. Dėl avarinių situacijų, kai RVAS strypai ištraukiami bei iškrenta, kinta reaktyvumas ir galia reaktoriaus aktyviojoje zonoje. Todėl saugos požiūriu yra svarbu įvertinti RVAS sugebėjimą kompensuoti atsirandantį perteklinį reaktyvumą aktyviojoje zonoje, pakitus jos pakrovimo lygiui tokių avarinių situacijų metu.

Šiame straipsnyje pateikiami avarinių situacijų, kai RVAS strypai ištraukiami bei iškrenta, skaičiavimų rezultatai, gauti būdingai Ignalinos AE 2-ojo bloko reaktoriaus aktyviosios zonos būsenai, t. y. reaktoriui dirbant didžiausia leistina 4200 MW galia. Pereinamiesiems procesams modeliuoti buvo naudojamas vokiškas programų paketas QUABOX/CUBBOX-HYCA su patobulinta RVAS veikimo logika.

**Raktažodžiai:** Ignalinos AE, RVAS, strypo ištraukimas, strypo iškritimas, aktyvioji zona

Evaldas Bubelis, Raimondas Pabarčius, Aurimas Tonkūnas

### MODELING OF CONTINUOUS WITHDRAWAL AND FALLING OUT OF CPS CONTROL RODS ACCIDENT, USING QUABOX/CUBBOX-HYCA CODE

#### S u m m a r y

At present, at the Ignalina NPP the process of a wider use of the new uranium–erbium fuel of higher saturation and the manual control rods (MCRs) of new design (mod. 2477-01) is going on. These actions are directed to reducing the reactor control and protection system (CPS) cooling circuit voiding effect and to improving the technical and economical reactor operation parameters. Continuous withdrawal and falling out of CPS control rods lead to the reactivity and power changes in the reactor core. Therefore, important for safety is the evaluation of the CPS ability to compensate for the resulting excess reactivity in the reactor core, having the changed core loading conditions during such accidents. This article presents the calculation results of the continuous withdrawal and falling out of CPS control rods for the specific reactor core conditions of the Ignalina NPP Unit 2, i.e. during its operation on the maximum allowed power level of 4200 MW. The German code QUABOX/CUBBOX-HYCA with the improved CPS logic was used for the simulation of the above-mentioned transients.

**Key words:** Ignalina NPP, CPS, rod withdrawal, rod falling out, reactor core