

А. В. Кучин, Ю. Н. Овдиенко,
В. А. Халимончук

Государственный научно-технический центр по ядерной
и радиационной безопасности

Исследование режима «Падение ОР СУЗ» ра- бочей группы на ВВЭР- 1000 с отработкой АРМ

Представлены результаты численного моделирования процесса, связанного с падением одного ОР СУЗ рабочей группы на ВВЭР-1000 в режиме автоматического поддержания заданного уровня мощности без формирования сигнала предупредительной защиты при достижении падающим кластером нижнего концевого выключателя.

Ключевые слова: активная зона, нейтронно-физические расчеты, анализ безопасности.

О. В. Кучин, Ю. М. Овдiєнко, В. А. Халiмончук

Дослідження режиму «Падіння ОР СУЗ» робочої групи на ВВЕР-1000 з відпрацюванням АРП

Наведено результати чисельного моделювання процесу, пов'язаного з падінням одного ОР СУЗ робочої групи на ВВЕР-1000 у режимі автоматичної підтримки заданого рівня потужності без формування сигналу попереджувального захисту під час досягнення падаючим кластером нижнього кінцевого вимикача.

Ключові слова: активна зона, нейтронно-фізичні розрахунки, аналіз безпеки.

© А. В. Кучин, Ю. Н. Овдиенко, В. А. Халимончук, 2010

Падение одного поглощающего стержня системы управления и защиты (ПС СУЗ) вызывает снижение нейтронной и тепловой мощности реактора. В штатном режиме эксплуатации ВВЭР-1000 автоматический регулятор мощности (АРМ) должен восстановить исходную мощность реактора поднятием регулирующей группы вверх. Однако при достижении падающим кластером нижнего концевого выключателя формируется сигнал предупредительной защиты (ПЗ-2), накладывающий запрет на подъем регулирующей группы, поэтому исходная мощность реактора не будет восстановлена. Приведенные ниже результаты исследования получены в предположении, что вследствие нарушения в функционировании системы группового и индивидуального управления СУЗ (СГИУ) сигнал ПЗ-2, накладывающий запрет на подъем регулирующей группы, не будет сформирован. Поэтому после падения стержня АРМ восстановит исходную мощность реактора. Это приводит к деформации поля энерговыделений, вследствие чего растет температура топлива в максимально нагруженном топливном элементе в районе извлекаемых кластеров рабочей группы.

Исходным событием (ИС) для рассматриваемого режима является падение одного ПС СУЗ 10-й (рабочей) группы под действием собственного веса, время падения составляет 4 с. Расчетное моделирование выполнено с помощью программы DYN3D [1]. Рассматривалось падение стержня регулирующей группы (РГ), находящегося в ячейке № 79. Исходное положение рабочей группы выбиралось из условия, что в результате работы АРМ стержни РГ извлекаются до верхней границы диапазона регулирования (90 %) и при этом достигается максимально возможный уровень мощности реактора 104 % (с учетом погрешности измерения), т. е. не происходит срабатывания аварийной защиты по превышению мощности (АЗМ). Для обеспечения консерватизма реализации такого режима рассматривалось его протекание на номинальном уровне мощности в начале эксплуатации топливной загрузки (выбрана 21-я топливная загрузка 3-го энергоблока Южно-Украинской АЭС). Это связано с тем, что в начале кампании отрицательные коэффициенты реактивности по температуре топлива и теплоносителя по модулю меньше, чем в конце кампании. Поэтому в данном исходном состоянии рабочая группа будет погружена на большую глубину и ее извлечение до 90 % будет приводить к большим аксиальным деформациям. Кроме того, меньшие по модулю отрицательные значения коэффициентов реактивности будут оказывать меньшее ограничивающее воздействие на локальное увеличение мощности в районе извлекаемых ОР СУЗ рабочей группы. Коэффициенты реактивности по температуре топлива и теплоносителя корректировались до консервативных значений, определенных рамочными параметрами, с помощью введения корректирующего множителя к сечению деления на тепловых нейтронах.

Предварительными расчетами было определено, что при максимальной эффективности рабочей группы 1,04 % (в соответствии с таблицей рамочных параметров) глубина погружения рабочей группы должна составлять 78 % от низа активной зоны. Эффективность рабочей группы в 1,04 % была получена коррекцией сечения поглощения нейтронов в тепловой группе для ТВС рабочей группы с погруженным кластером.

Расчетные параметры активной зоны в исходном состоянии перед падением кластера рабочей группы для начала кампании приведены ниже:

Параметр	Значение
Тепловая мощность реактора, МВт	3120 (максимальная)
Температура теплоносителя на входе в реактор, °С	292,3 (максимальная)
Давление теплоносителя над активной зоной, МПа	15,4 (минимальное)
Расход теплоносителя через реактор, м ³ /ч	80000 (минимальный)
Максимальный радиальный коэффициент неравномерности энерговыделения, ($K_r \times K_{инж}$)	1,74
Положение рабочей группы ОР СУЗ, %	78
Коэффициент реактивности по температуре теплоносителя, $\times 10^5$ 1/К	-12,32 (максимальный)
Коэффициент реактивности по плотности теплоносителя, %/(г/см ³)	3,46 (минимальный)
Коэффициент реактивности по температуре топлива, $\times 10^5$ 1/К	-2,30 (максимальный)
Эффективность рабочей группы, %	1,04 (максимальная)
Эффективная доля запаздывающих нейтронов, %	0,5 (минимальная)

Анализ соблюдения критериев приемлемости в данном процессе оценивался для максимально нагруженных твэлов с помощью задания «горячих каналов» в исследуемых ТВС. Мощность максимально напряженного твэла определялась исходя из максимально допустимого коэффициента неравномерности энерговыделения твэлов по радиусу активной зоны $K_r = 1,5$ (с учетом инженерного коэффициента неравномерности по подогреву теплоносителя 1,16, $K_r = 1,74$). В данном ИС исследовались изменения энерговыделения, температур и коэффициентов запаздывания до кризиса теплообмена в ТВС, находящиеся в районе извлекаемого кластера из ТВС № 85 (с противоположной стороны активной зоны относительно упавшего кластера), так как в этом районе будет происходить максимальный рост энерговыделения.

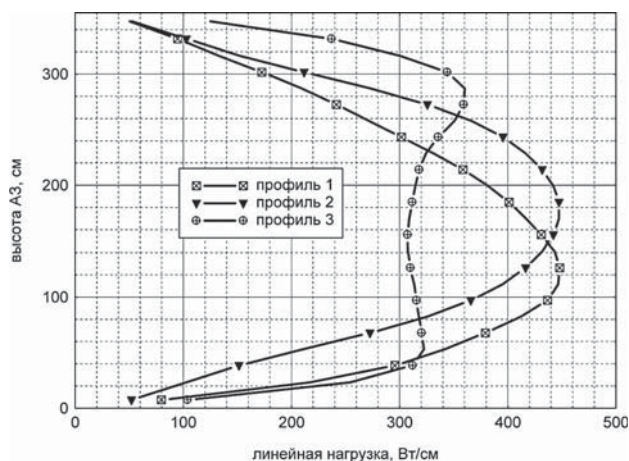


Рис. 1. Аксиальное распределение линейной нагрузки мощности при моделировании «горячего канала»

В качестве исследуемых тепловыделяющих сборок выбраны ТВСА (тепловыделяющая сборка альтернативная разработки ОКБМ) № 84 и № 70, находящиеся соответственно в 1- и 2-м ряду окружения относительно извлекаемого ОР СУЗ из ТВС № 85, так как на них будет наблюдаться наибольший наброс энерговыделения при извлечении кластера для поддержания мощности реактора. В соответствии с концепцией обоснования безопасности ВВЭР-1000, используемой научным руководителем проекта данного реактора, оценка безопасности реактора в различных режимах эксплуатации должна быть выполнена для трех предельных аксиальных распределений энерговыделения (рис. 1), которые могут иметь место в исходном состоянии рассматриваемого процесса [2]. Следуя этой концепции, в каждой из исследуемых ТВС рассматривалось три «горячих канала» с исходными аксиальными распределениями энерговыделения, приведенными на рис. 1.

Расчетный анализ исходного события, связанного с падением кластера, выполнялся на временном интервале 100 с без учета действий оперативного персонала. Расчетная хронология событий при рассмотрении падения кластера такова:

Время, с	Событие
0,0	Исходное событие — начало падения ОР СУЗ
0,6	Начало движения вверх ОР СУЗ рабочей группы
4,0	Достижение падающим ОР СУЗ крайнего нижнего положения
≈17÷18	Наступление кризиса теплообмена в «горячих каналах» твэлов и твэггов ТВС первого ряда окружения с исходным аксиальным распределением энерговыделения № 3
20,3	Достижение ОР СУЗ рабочей группы крайнего верхнего положения (90 %)
20,3	Максимальное значение реактивности — 0,02\$ (рис. 11)
20,3	Максимальное значение нейтронной мощности реактора — 3120 МВт
≈30	Наступление кризиса теплообмена в «горячих каналах» твэлов и твэггов ТВС 2-го ряда окружения с исходным аксиальным распределением энерговыделения № 3
100	Максимальное значение тепловой мощности реактора — 3120 МВт
100	Достижение установившихся максимальных значений температуры топлива и оболочек твэлов и твэггов

Расчетный анализ показал, что в результате падения кластера по сигналу рассогласования мощности в момент времени $t \approx 0,6$ с АРМ начинает извлекать вверх пять ОР СУЗ рабочей группы со скоростью 2 см/с. К моменту времени $t \approx 20,3$ с они достигают верхней границы диапазона регулирования (90 %) и останавливаются. При этом достигается новое стационарное состояние активной зоны реактора, соответствующее номинальному уровню мощности с учетом точности ее поддержания (104 %).

В результате падения кластера и отработки АРМ возникшего сигнала рассогласования в секторе, противоположном зоне упавшего ОР, происходит значительный всплеск энерговыделения вследствие деформации поля нейтронов. Так, в исследуемой ТВС первого ряда № 84 относительное энерговыделение (K_q) увеличивается с 1,20 до 1,32, а в ТВС второго ряда № 70 — соответственно с 1,17 до 1,27 (рис. 2).

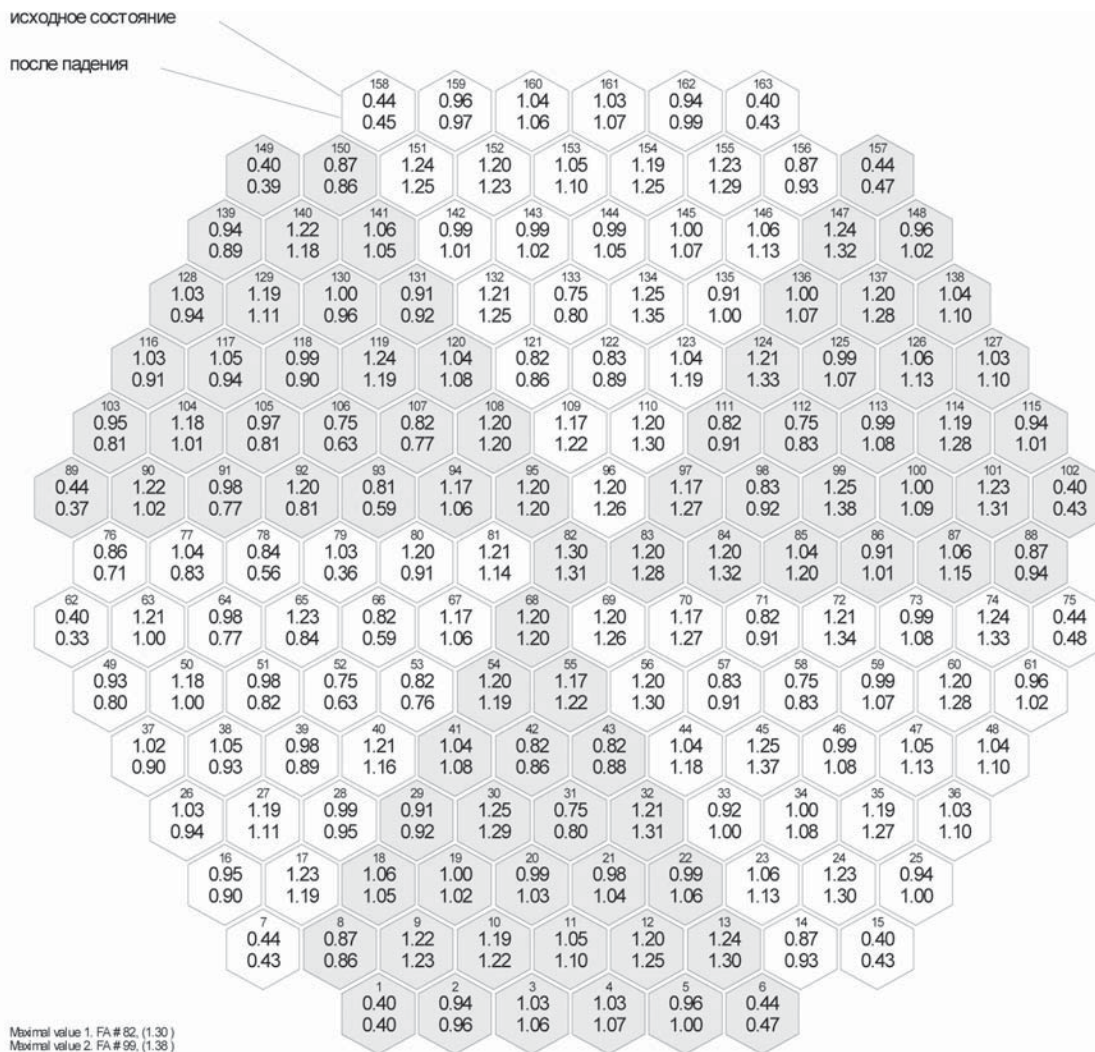


Рис. 2. Деформация поля энерговыделения после падения кластера

Как отличаются 1-, 2- и 3-й исходные аксиальные распределения энерговыделения в «горячих каналах» исследуемых ТВС 1- и 2-го рядов окружения относительно ТВС № 85, где происходит извлечение ОР СУЗ рабочей группы, от соответствующих аксиальных распределений в конце данного переходного процесса, представлено на рис. 3–5.

Результаты расчетов показали, что в зависимости от исходного аксиального распределения энерговыделения как для ТВСА № 84, находящейся в 1-м ряду окружения относительно извлекаемого кластера, так и для ТВС 2-го ряда окружения (№ 70) может наблюдаться кризис теплообмена (рис. 6 и 7).

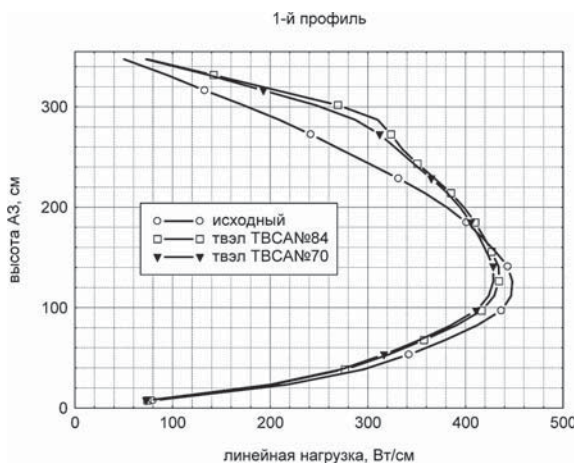


Рис. 3. Изменение аксиального профиля энерговыделения в «горячих каналах» исследуемых ТВС (исходный профиль энерговыделения № 1)

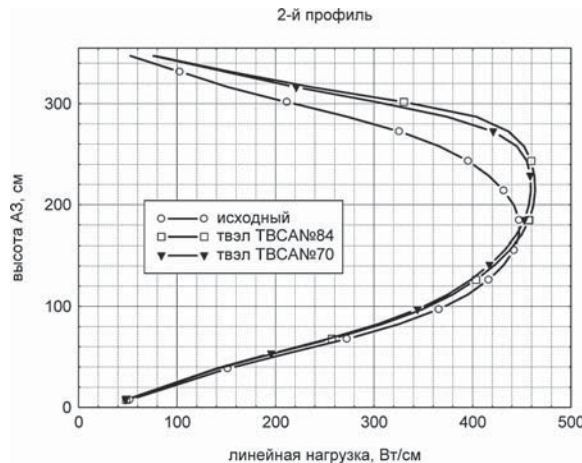


Рис. 4. Изменение аксиального профиля энерговыделения в «горячих каналах» исследуемых ТВС (исходный профиль энерговыделения № 2)

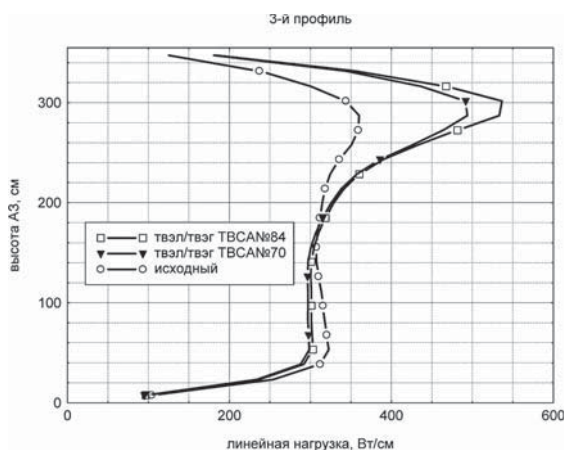


Рис. 5. Изменение аксиального профиля энерговыделения в «горячих каналах» исследуемых ТВС (исходный профиль энерговыделения № 3)

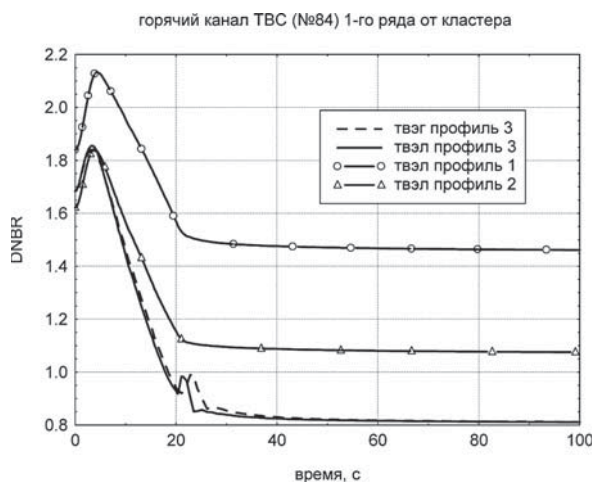


Рис. 6. Изменение минимальной величины DNBR для ТВС № 84 в 1-м ряду от кластера, извлекаемого для поддержания мощности реактора, для трех исходных аксиальных распределений энерговыделения

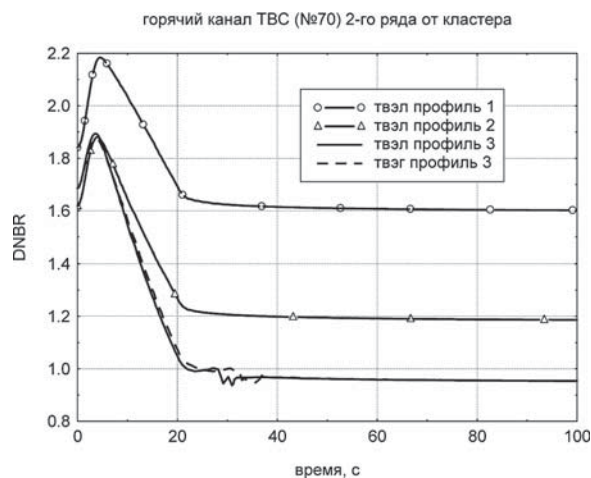


Рис. 7. Изменение минимальной величины DNBR для ТВС № 70 во 2-м ряду от кластера, извлекаемого для поддержания мощности реактора, для трех исходных аксиальных распределений энерговыделения

Причиной возникновения кризиса теплообмена является то, что основной рост энерговыделения в данном процессе происходит в верхней части активной зоны, тогда как в нижней оно практически не изменяется (рис. 3–5).

Как следует из представленных выше данных, чем больше в исходном состоянии аксиальное распределение энерговыделения в рассматриваемой ТВС смещено в верхнюю часть активной зоны и чем ближе эта ТВС находится к извлекаемому для поддержания исходного уровня мощности реактора ОР СУЗ, тем вероятнее появление кризиса теплообмена. Как для ТВС 1-го ряда, так и для ТВС 2-го ряда кризис теплообмена наступает только в случае, когда в исходном состоянии данного процесса в «горячем канале» ТВС имеет место аксиальное распределение энерговыделения со значительным смещением максимума в верхнюю часть активной зоны (распределение № 3). Для остальных профилей энерговыделения кризис теплообмена не наблюдается. Если для ТВС 1-го ряда кризис наступает в момент времени $t \approx 17 \div 18$ с (рис. 6), то для ТВС 2-го ряда — позже ($t \approx 30$ с, рис. 7). При этом максимальные температуры топлива и оболочек твэлов также достигаются в варианте расчета, когда в исходном состоянии имеет место аксиальное распределение энерговыделения № 3. В этом случае максимальные температуры оболочек твэлов в «горячих каналах» ТВСА 1-го (№ 84) и 2-го (№ 70) рядов окружения составляют соответственно 815 °С и 672 °С (рис. 8). Если в исходном состоянии данного переходного процесса аксиальное распределение энерговыделения соответствует распределению № 1 или № 2, то максимальные значения температур оболочек твэлов не превышают 351 °С.

Максимальные температуры топлива в твэле и твэге также реализуются для 3-го предельного профиля с максимумом энерговыделения в верхней части активной зоны (рис. 9 и 10). Их наибольшие значения в ТВСА 1- и 2-го рядов окружения составляют, соответственно, 2160 и 2062 °С для твэла, 2370 и 2212 °С — для твэга. При этом расчетные значения увеличения температур топлива в твэле и твэге ТВСА 1- и 2-го рядов окружения весьма существенные и составляют, соответственно, 540 и 400 °С для твэла, 630 и 430 °С — для твэга. Уменьшение максимальных температур топлива на первых секундах данного переходного процесса (рис. 9 и 10) объясняется уменьшением интегральной мощности реактора (рис. 11).

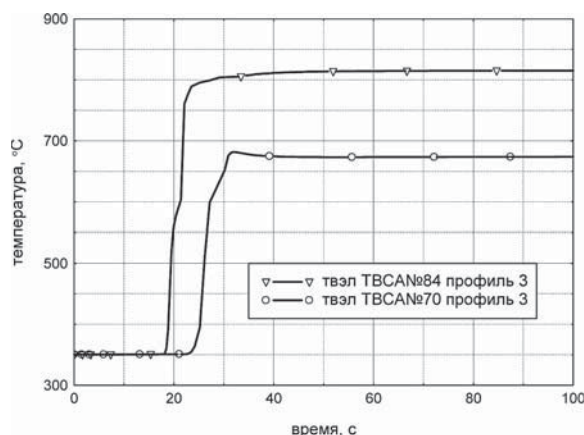


Рис. 8. Изменение максимальной температуры оболочки твэла в «горячих каналах» ТВС № 84 и № 70 (исходный профиль энерговыделения № 3)

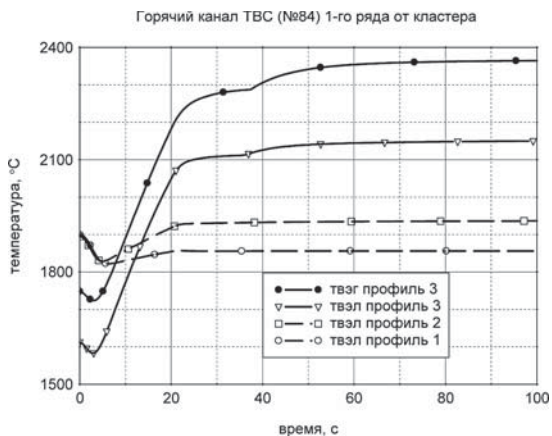


Рис. 9. Изменение максимальной температуры топлива твэл/твэг для ТВС 1-го ряда окружения относительно извлекаемого кластера при различных исходных профилях энерговыделения (ТВС № 84)

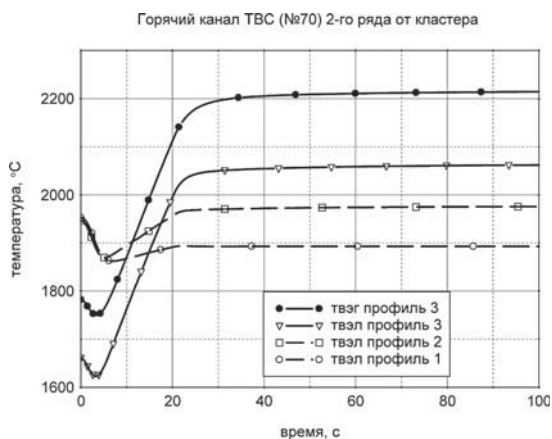


Рис. 10. Изменение максимальной температуры топлива твэл/твэг для ТВС второго ряда окружения относительно извлекаемого кластера при различных исходных профилях энерговыделения (ТВС № 70)

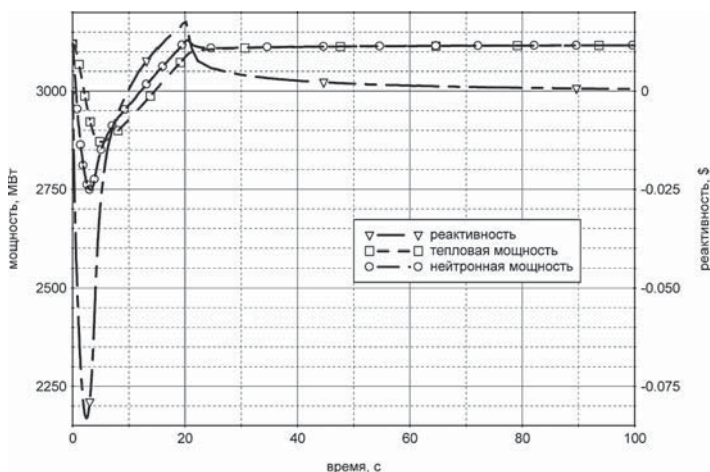


Рис. 11. Изменение реактивности, нейтронной и тепловой мощности в переходном процессе

Если в исходном состоянии имеет место аксиальное распределение энерговыделения № 1, то в данном переходном процессе наблюдается снижение температуры топлива по сравнению с ее значением в исходном стационарном состоянии. Это объясняется тем, что в данном случае извлечение ОР СУЗ рабочей группы сопровождается выравниванием аксиального распределения энерговыделения по высоте «горячего канала» и снижением максимальной величины линейной нагрузки мощности (см. рис. 3). В случае аксиального распределения энерговыделения № 2 (рис. 4) смещение поля нейтронов в верхнюю часть активной зоны из-за работы АРМ приводит к увеличению максимального значения линейной нейтронной мощности по отношению к исходной максимальной величине приблизительно на 12 и 15 Вт/см соответственно для ТВС 2- и 1-го рядов окружения. Наблюдаемое при этом увеличение максимальной температуры топлива незначительное и составляет около 50 °С.

Результаты моделирования исходного события, связанного с падением кластера, показали, что нейтронная и тепловая мощности реактора при извлечении рабочей

Таблица 3. Изменение параметров твэла и твэга после падения кластера

Параметр	Состояние		
	исходное	после падения	
Положение рабочей группы ОР СУЗ, см	278	319	
Положение падающего ОР СУЗ, см	278	0	
Мощность реактора, МВт	3120	3120	
Относительное энерговыделение исследуемых ТВС, K_q /номер ТВС	1.20/84 1.17/70	1.32/84 1.27/70	
<i>Максимальное значение линейной нагрузки мощности / номер слоя, Вт/см:</i>			
профиль 1	ТВСА № 84	448 / 9	434 / 9
профиль 2	ТВСА № 84	448 / 12	464 / 15
профиль 1	ТВСА № 70	448 / 9	428 / 9
профиль 2	ТВСА № 70	448 / 12	460 / 15
профиль 3	ТВСА № 70	360 / 20	495 / 20

Параметр		Состояние	
		исходное	после падения
<i>Максимальная температура топлива в твэле (минимальная проводимость зазора) / номер слоя, °С:</i>			
профиль 1	ТВСА № 84	1898 / 9	1855 / 9
профиль 2	ТВСА № 84	1898 / 12	1938 / 15
профиль 1	ТВСА № 70	1951 / 9	1892 / 9
профиль 2	ТВСА № 70	1951 / 12	1977 / 15
профиль 3	ТВСА № 70	1660 / 20	2066 / 20
<i>Максимальная температура топлива в твэге (минимальная проводимость зазора) / номер слоя, °С:</i>			
профиль 3	ТВСА № 70	1781 / 20	2219 / 20
<i>Максимальное значение усредненной по радиусу энтальпии топливной таблетки твэла (минимальная проводимость зазора) / номер слоя, кДж/кг:</i>			
профиль 1	ТВСА № 84	407 / 9	400 / 9
профиль 2	ТВСА № 84	407 / 12	413 / 15
профиль 1	ТВСА № 70	416 / 9	406 / 9
профиль 2	ТВСА № 70	416 / 12	420 / 15
профиль 3	ТВСА № 70	366 / 20	434 / 20
<i>Максимальное значение усредненной по радиусу энтальпии топливной таблетки твэга (минимальная проводимость зазора) / номер слоя, кДж/кг:</i>			
профиль 3	ТВСА № 70	384 / 20	454 / 20
<i>Минимальный коэффициент запаса до кризиса теплообмена твэла (максимальная проводимость зазора) / номер слоя:</i>			
профиль 1	ТВСА № 84	1,84 / 17	1,47 / 21
профиль 2	ТВСА № 84	1,62 / 19	1,07 / 21
профиль 1	ТВСА № 70	1,84 / 17	1,61 / 20
профиль 2	ТВСА № 70	1,62 / 19	1,18 / 21
профиль 3	ТВСА № 70	1,69 / 23	<1/ 23
<i>Максимальная температура поверхности оболочки (максимальная проводимость зазора) / номер слоя, °С</i>			
профиль 1	ТВСА № 84	351.0 / 9	351.0 / 9
профиль 2	ТВСА № 84	350.9 / 12	350.9 / 13
профиль 1	ТВСА № 70	351.0 / 9	351.0 / 9
профиль 2	ТВСА № 70	350.9 / 12	350.9 / 13
профиль 3	ТВСА № 70	350.4 / 19	672.7 / 23

группы изменяются медленно, причем тепловая мощность незначительно отстает от нейтронной (рис. 11). Учитывая это, а также то, что согласно принятому консервативному сценарию при рассмотрении данного события срабатывания аварийной защиты не происходит, выполнена оценка соблюдения критериев приемлемости на основании стационарных расчетов состояния после падения кластера.

Результаты стационарных расчетов состояния после падения кластера представлены в табл. 3 (расчеты выполнены в 22 аксиальных слоях, из них 20 — в активной зоне и по одному — в нижнем и верхнем аксиальном отражателе).

Сравнение результатов расчета исходного события, связанного с падением кластера, полученных при помощи стационарной и нестационарной версий программы

DYN3D, показало их хорошую согласованность. Поэтому для анализа переходных процессов, связанных с медленным перемещением рабочей группы, допустимо использование стационарных расчетов.

Выводы

Исходное событие, связанное с падением кластера, в обосновывающих материалах проекта ВВЭР-1000 классифицируется как нарушение нормальных условий эксплуатации. Для этих событий критерием приемлемости является отсутствие в ходе их протекания кризиса теплообмена. В разработанных отчетах по анализу безопасности блоков с ВВЭР-1000 украинских АЭС для этого события показано выполнение критериев приемлемости (отсутствие кризиса теплообмена). Результаты же выполненных исследований показали, что в данном исходном событии критерий приемлемости по недопущению кризиса теплоотдачи не соблюдается, если в ТВС имеет место аксиальное распределение энерговыделения № 3 [3].

Основная причина в расхождении представленных результатов с более ранними исследованиями состоит в том, что в ранних исследованиях при использовании модели точечной кинетики не учитывалась деформация аксиального профиля энерговыделения в «горячих каналах» в районе извлекаемого кластера, а при использовании трехмерной модели кинетики не рассматривался исходный аксиальный профиль энерговыделения со смещением в верхнюю часть активной зоны (профиль № 3). Выполненные исследования показали, что основное увеличение энерговыделения в твэлах происходит в верхней части активной зоны, в то время как в нижней части энерговыделение твэлов практически не изменяется (рис. 3–5). Дополнительный рост энерговыделения в верхней части приводит к тому, что создаются условия для возникновения кризиса теплообмена.

Возможность реализации в стационарных и переходных режимах эксплуатации РУ с ВВЭР-1000 аксиального распределения энерговыделения № 3 в ТВС, расположенной в 1-м ряду от кластера, извлекаемого для поддержания мощности реактора, при максимально возможной эффективности ОР СУЗ рабочей группы 1,04 % излишне консервативна. Вероятность же образования в нормальных или переходных процессах эксплуатации ВВЭР-1000 исходного аксиального распределения энерговыделения № 3 во 2-м ряду окружения относительно извлекаемого ОР СУЗ рабочей группы должна быть обоснована в зависимости от величины принимаемого в данном исследовании «веса» рабочей группы. Только после этого такой сценарий может быть использован при выполнении консервативной оценки безопасности данного исходного события.

Список литературы

1. Grundmann U., Rohde U., Mittag S., Kliem S. DYN3D Version 3.2. Code for Calculation of Transients in Light Water Reactors (LWR) with Hexagonal or Quadratic Fuel Elements. Description of Models and Methods, FZR 434, August, 2005.
2. Спассков П. В. Расчетное обоснование теплогидравлических характеристик реактора и РУ ВВЭР/ П. В. Спассков, Ю. Г. Драгунов, С. Б. Рыжов и др. — М.: ЖИКЦ «Академкнига», 2004. — 340 с.
3. Ровенская АЭС. Энергоблок № 4. Отчет по анализу безопасности. Дополнительные материалы, связанные с внедрением ТВСА Дополнительные материалы к главе 15 «Анализ проектных аварий» 38–692.203.010.ОБ.00.

Надійшла до редакції 04.08.2010.