

СТАТЬИ

УДК 621.039

ГЛУБИНА ИОДНОЙ ЯМЫ В РБМК НА УРАН-ЭРБИЕВОМ ТОПЛИВЕ

*Бурлаков Е.В., Балыгин А.А., Краюшкин А.В., Федосов А.М., Царева С.М.
(РНЦ «Курчатовский ин-т»)*

После аварии на 4-м энергоблоке Чернобыльской АЭС в технологический регламент был введен пункт о том, что продолжительность стоянки реактора после непланового останова с номинальной мощности должна быть не менее 2 сут. Это было сделано во избежание возникновения в процессе повышения мощности состояний реактора с пониженным оперативным запасом реактивности, в которых возрастает паровой коэффициент реактивности и затрудняется управление энергораспределением. Тогда же был установлен нижний предел оперативного запаса реактивности в 30 стержней ручного регулирования.

Перевод РБМК на уран-эрбиевое топливо, начавшийся в середине 90-х годов, изменяет физические характеристики активной зоны таким образом, что появляется возможность пересмотреть продолжительность стоянки после непланового останова в сторону снижения. Его целесообразность определяется тем, что каждые сутки вынужденного простоя энергоблока ведут к существенным экономическим потерям.

Возможность сокращения времени стоянки при переходе на уран-эрбиевое топливо определяется следующим. Наличие резонанса в сечении поглощения эрбия при энергии 0,47 эВ снижает коэффициент реактивности по температуре графита, что, в свою очередь, уменьшает ее «провал» при попадании реактора в иодную яму после останова. Более жесткий спектр нейтронов уран-эрбиевого топлива уменьшает усредненное по спектру сечение поглощения нейтронов в ^{135}Xe , а также и ^{149}Sm , что снижает глубину иодной ямы. Выгрузка дополнительных поглотителей при переходе на уран-эрбиевое топливо снижает среднюю мощность ТВС и уровень потока нейтронов, что также уменьшает глубину иодной ямы. В результате появляется возможность пуска реактора после непланового останова через 1 сут.

Состояние реактора, выведенного на мощность через 1 сут, будет характеризоваться пониженным оперативным запасом реактивности, который тем не менее превышает минимально допустимый оперативный запас реактивности 30 стержней ручного регулирования с достаточным запасом. Необходимо также учесть, что при переходе на уран-эрбиевое топливо уменьшается роль оперативного запаса реактивности в поддержании парового коэффициента реактивности.

Возможность сокращения времени стоянки с 2 до 1 сут покажем на примере 3-го энергоблока Смоленской АЭС. Для состояния реактора после повышения мощности вслед за остановом в течение 2 сут характерен большой оперативный запас реактивности 80—90 стержней ручного регулирования. При сокращении времени останова до одних суток он снижается до 30—40 стержней. Представляет интерес вопрос о том, как изменяются в процессе повышения мощности коэффициенты и эффекты реактивности вследствие сокращения времени стоянки. Для этого проводится расчетное моделирование вывода реактора на мощность после стоянки заданной продолжительности (1 или 2 сут). Последовательно рассматриваются состояния реактора на физическом уровне мощности и первой ступени (160 МВт). Сравниваются варианты с различной загрузкой активной зоны: все ТВС содержат топливо обогащением 2,4% + дополни-

тельные поглотители; 500 ТВС из предыдущего варианта замняются на ТВС с уран-эрибиевым топливом обогащением 2,6%, затем все ТВС заменяются на ТВС с уран-эрибиевым топливом обогащением 2,8% при отсутствии дополнительных поглотителей в двух последних случаях. Расчеты выполняются с помощью специальной версии программы STEPAN.

Основная цель исследования заключается в необходимости показать, что коэффициенты и эффекты реактивности остаются приемлемыми при сокращении времени стоянки с 2 до 1 сут. Повышение мощности после стоянки менее 2 сут будет приводить к формированию состояний с пониженным оперативным запасом реактивности.

Согласно требованию технологического регламента оперативный запас реактивности не должен становиться менее 30 стержней, паровой коэффициент реактивности и эффект обезвоживания активной зоны (ТВС) должны оставаться приемлемыми с точки зрения возможных аварийных ситуаций с обезвоживанием, должен оставаться отрицательным быстрый мощностной коэффициент реактивности.

Перед выходом на первую ступень мощности (минимально контролируемый уровень) реактор выводится в критическое состояние, характеризующееся как физический уровень мощности (табл. 1). В этом состоянии тепловыделение за счет реакции деления пренебрежимо мало (несколько кВт), что значительно ниже остаточного энерговыделения, составляющего несколько МВт. Тем не менее и на это состояние распространяется требование об оперативном запасе реактивности не менее 30 стержней. Кроме того, поскольку в данном состоянии активная зона содержит большее количество воды (нет кипения), представляет интерес рассмотреть эффект обезвоживания, особенно его изменение при уменьшении времени стоянки.

Т а б л и ц а 1. Характеристики реактора на физическом уровне мощности

Параметр (состояние активной зоны)	Топливо					
	Обогащение 2,4% +дополнительные поглотители		Замена 500 ТВС на уран-эрибиевое топливо обогащением 2,6%		Замена всех ТВС на уран-эрибиевое топливо обогащением 2,8%	
	2 сут	1 сут	2 сут	1 сут	2 сут	1 сут
Оперативный запас реактивности, стержни ручного регулирования (разогретое)	95,1	33,8	96,8	40,5	104,8	45,4
Эффект обезвоживания ТВС, β (разогретое)	-0,63	0,7	-0,37	0,71	-0,50	0,68
Оперативный запас реактивности, стержни ручного регулирования (холодное)	83,7	21,8	92,2	30,0	95,4	33,2
Эффект обезвоживания ТВС, β (холодное)	1,2	2,4	1,4	2,6	1,4	2,5

После останова реактора с номинальной мощности и стоянки заданной продолжительности моделируется вывод реактора в критическое состояние. Рассматриваются два состояния на физическом уровне мощности:

разогретое, в котором температура компонентов активной зоны находится на уровне 280 °С, плотность теплоносителя в рабочих каналах 0,8 г/см³;

холодное, в котором температура равна 70 °С, плотность теплоносителя в рабочих каналах 1 г/см³.

Необходимо заметить, что первое состояние является близким к реальному для реактора после стоянки в течение 1—2 сут. Второе состояние характерно для реактора, пускаемого после длительной остановки, и далее оно рассматривается как предельное для оценки изменения физических характеристик при охлаждении реактора по отно-

шению к первому состоянию. Как и следовало ожидать, переход от стоянки длительностью 2 сут на 1 сут приводит к резкому уменьшению оперативного запаса реактивности в критическом состоянии на физическом уровне мощности. Однако если в варианте с топливом обогащением 2,4% оперативный запас реактивности близок к граничному в 30 стержней, а при охлаждении реактора снижается до менее 30, то в вариантах с уран-эргиевым топливом имеется достаточный запас до граничного значения, возрастающий при повышении обогащения до 2,8%. Это свидетельствует о возможности вывода реактора с уран-эргиевым топливом на физический уровень мощности без нарушения требования регламента о минимальном оперативном запасе реактивности. Необходимо учесть, что процесс вывода реактора в критическое состояние длится 2—3 ч. За это время оперативный запас реактивности может возрасти дополнительно на 5—7 стержней ручного регулирования вследствие распада ^{135}Xe .

Снижение оперативного запаса реактивности из-за сокращения времени стоянки ведет к росту эффекта обезвоживания ТВС, который становится положительным и составляет $\sim 0,7 \beta$ для всех вариантов. При переходе в холодное состояние эффект обезвоживания заметно возрастает. Однако речь идет о пуске реактора через 1 сут, следовательно, его охлаждение до 70 °С невозможно. Последнее утверждение относится и к оперативному запасу реактивности, который в холодном состоянии снижается. Кроме того, в холодном состоянии обезвоживание является длительным и введение при этом положительной реактивности легко может быть скомпенсировано аварийной защитой. Эффект обезвоживания на уровне $\sim 0,7 \beta$ является приемлемым. Таким образом, расчеты не выявили препятствий к выводу реактора на физический уровень мощности после стоянки длительностью 1 сут при загрузке уран-эргиевого топлива.

Уровень 160 МВт является первой ступенью, на которой реактор работает после повышения мощности. Из данных, приведенных в табл. 2, видно, что сокращение времени стоянки до 1 сут ведет к существенному снижению оперативного запаса реактивности при работе на первой ступени. Вследствие этого возрастает паровой коэффициент реактивности. Если для состояния реактора с топливом обогащением 2,4% это возрастание превышает 1β , то на состоянии реактора с уран-эргиевым топливом оно оказывается немного меньше ($0,8 \beta$). Это можно объяснить ослаблением зависимости парового коэффициента от числа поглотителей в реакторе, работающем на уран-

Т а б л и ц а 2. Физические характеристики реактора на уровне мощности 160 МВт

Параметр	Топливо					
	Обогащение 2,4% +дополнительные поглотители		Замена 500 ТВС на уран-эргиевое топливо обогащением 2,6%		Замена всех ТВС на уран-эргиевое топливо обогащением 2,8%	
	2 сут	1 сут	2 сут	1 сут	2 сут	1 сут
Оперативный запас реактивности, стержни ручного регулирования	94,6	37,5	96,7	42,9	96,8	47,1
Паровой коэффициент реактивности, β	0	1,07	0,19	1,00	-0,06	0,74
Доплеровский коэффициент реактивности, $10^{-5} 1/^\circ\text{C}$	-1,75	-1,75	-1,77	-1,78	-1,79	-1,81
Графитовый коэффициент реактивности, $10^{-5} 1/^\circ\text{C}$	3,2	3,55	2,92	3,21	2,66	2,98
Быстрый мощностной коэффициент реактивности, $10^{-4} \beta/\text{МВт}$	-5,3	-1,32	-4,79	-1,39	-6,4	-3,26
Эффект обезвоживания ТВС, β	-0,64	0,53	-0,43	0,62	-0,51	0,71

эрбиевом топливе, по отношению к штатному топливу. Снижение длины диффузии нейтронов в решетке рабочих каналов при загрузке эрбия немного снижает эффективность поглотителей и их воздействие на паровой коэффициент реактивности. Абсолютная величина быстрого мощностного коэффициента реактивности при сокращении времени стоянки с 2 до 1 сут заметно снижается, однако он остается отрицательным. Таким образом, исследование физических характеристик на уровне мощности 160 МВт не выявляет препятствий к сокращению времени стоянки.

При дальнейшем повышении мощности различия в физических характеристиках для двух вариантов длительности стоянки будут уменьшаться. Расчеты, проведенные в настоящей работе, показывают, что минимальное время стоянки могло быть сокращено до 1 сут и до перевода РБМК на уран-эрбиевое топливо (см. табл. 1, 2). Ограничение по минимальному оперативному запасу реактивности при этом не было бы нарушено. Однако запас до граничного значения в 30 стержней не велик и с учетом погрешности расчета все-таки можно было бы ожидать нарушения ограничения. При переходе на уран-эрбиевое топливо запас до граничного значения существенно возрастает (до 10 стержней и более). В табл. 3 приведены оценки по точечной модели реактора вклада каждого из факторов по отдельности в изменение глубины иодной ямы*. Изменения параметров соответствуют загрузке примерно 500 ТВС с уран-эрбиевым топливом обогащением 2,6% + 0,41% Ег (за исключением уменьшения средней мощности ТВС, которое взято в предположении выгрузки всех 80 дополнительных поглотителей). Здесь $\sigma_{\text{Xe}} \Phi$, $\sigma_{\text{Sm}} \Phi$ — скорость реакции выжигания ^{135}Xe и ^{149}Sm в расчете на одно ядро соответственно.

Т а б л и ц а 3. Характеристики иодной ямы в результате изменения характеристик реактора, вызванных переходом на уран-эрбиевое топливо (по отношению к работе на топливе обогащением 2,4%)

Изменение параметра	Уменьшение глубины иодной ямы, стержни ручного регулирования	Увеличение оперативного запаса реактивности через 1 сут после останова, стержни ручного регулирования
Уменьшение графитового коэффициента реактивности на $0,8 \cdot 10^{-5} \text{ } 1/^{\circ}\text{C}$	3,2	3,2
Уменьшение $\sigma_{\text{Xe}} \Phi$ на $0,7 \cdot 10^{-5} \text{ c}^{-1}$	5,2	3,8
Уменьшение $\sigma_{\text{Sm}} \Phi$ на $0,4 \cdot 10^{-6} \text{ c}^{-1}$	0,3	0,5
Уменьшение средней мощности ТВС на 5%	3,8	2,5
Суммарное действие эффектов	11,9	9,7

При дальнейшей загрузке уран-эрбиевого топлива и особенно с переходом на топливо обогащением 2,8% + 0,6% Ег можно ожидать больших изменений параметров в благоприятную сторону. Из табл. 3 следует, что основной вклад в уменьшение глубины иодной ямы вносят составляющие, обусловленные спектральным эффектом эрбия (уменьшение графитового коэффициента реактивности и $\sigma_{\text{Xe}} \Phi$), причем эффект, связанный с уменьшением $\sigma_{\text{Xe}} \Phi$, оказывается даже немного больше обусловленного снижением графитового коэффициента. Суммарное действие всех эффектов приводит к увеличению оперативного запаса реактивности через 1 сут после останова на 7—10 стержней по отношению к исходному состоянию с топливом обогащением 2,4%, что согласуется с результатами трехмерных расчетов (см. табл. 1). Это увеличение свидетельствует о возможности пуска реактора через 1 сут стоянки.

*Галанин А.Д. Введение в теорию ядерных реакторов на тепловых нейтронах. М.: Энергоатомиздат, 1984.

Основные отличия физических характеристик реактора, пускаемого через 1 и 2 сут, заключается в повышенных значениях парового коэффициента реактивности и эффекта обезвоживания на первых ступенях повышения мощности из-за снижения оперативного запаса реактивности. Так, в состоянии реактора, пускаемого после стоянки в течение 2 сут, он превышает 90 стержней, паровой коэффициент близок нулю, эффект обезвоживания отрицателен и составляет $-(0,6-0,5\beta)$. При пуске реактора через 1 сут оперативный запас реактивности снижается до 35—40 стержней, паровой коэффициент достигает 1β , эффект обезвоживания повышается до уровня $0,6-0,7\beta$. Однако вскоре после пуска он начинает нарастать из-за продолжающегося распада ^{135}Xe , ускоренного его выжиганием, и характеристики возвращаются к характерным для стационарной работы на номинальной мощности. Быстрый мощностной коэффициент реактивности во всех состояниях находится в отрицательной области. Таким образом, кратковременное повышение парового коэффициента реактивности не может рассматриваться как препятствие к сокращению времени стоянки до 1 сут.

Поступила в Редакцию 13.03.02

УДК 621.039.51

СТОХАСТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ЯДЕРНОГО РЕАКТОРА

Бойко Р.В. (Высшая аттестационная комиссия Украины),

Рязанов В.В. (ИЯИ НАН Украины)

К описанию поведения нейтронов в ядерном реакторе применяются ветвящиеся с переменным режимом случайные процессы. Это позволяет строго описать критический режим его работы с учетом эффектов управления и обратных связей и показывает сложность этого режима. Обнаружены три режима критического поведения, зависящие от знака управляющих воздействий и обратных связей. Выявлено влияние различных параметров на режимы работы. Записаны явные выражения для статистических характеристик различных режимов, определены границы между ними.

Для исследования поведения ядерного реактора привлекали теорию ветвящихся процессов (см., например, работы [1, 2]), непосредственно отражающую основные детали закономерностей размножения нейтронов. Но ограничения, заложенные в математической теории, а именно в классической теории ветвящихся случайных процессов [3], в частности, предположение о независимости эволюции различных частиц, не позволяют детально описывать наиболее важные для практики режимы работы. Это относится, например, к номинальному рабочему режиму энергетических реакторов — критическому режиму.

Такие существенные для работающих на мощности реакторов эффекты, как влияние управления и обратных связей, не удастся описать с помощью классической теории ветвящихся процессов. В работе [4] введен и исследован класс ветвящихся случайных процессов с переменным режимом. Применение результатов этих работ к моделированию поведения нейтронов [5, 6] позволяет строго определить и описать те важные для эксплуатации явления, которые не выявляются и не описываются детерминированным методом и классической теорией ветвящихся процессов, но могут иметь место в критическом режиме работы энергетических реакторов, если рассматривать этот режим как частный случай общих критических явлений. Даются более детальные, чем при детерминированном описании, характеристики критического (рабочего режима) и подкритического состояний, а также динамическое описание процессов управления.

Возможности ветвящихся случайных процессов с переменным режимом покажем на примере простейшей модели реактора, которую можно усложнять. Число нейтронов