

СТАТЬИ

УДК 621.039.50

ИССЛЕДОВАНИЕ КСЕНОНОВЫХ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В ВВЭР-1200 НА НОВОВОРОНЕЖСКОЙ АЭС

*Аверьянова С.П., Вохмянина Н.С., Злобин Д.А., Филимонов П.Е. (НИЦ «Курчатовский ин-т», г. Москва),
Поваров В.П. (Нововоронежская АЭС, г. Нововоронеж)*

В феврале 2017 г. на Нововоронежской АЭС был введен в эксплуатацию энергоблок № 6 — первый энергоблок по проекту АЭС-2006 с ВВЭР-1200. В начале первой кампании на этом энергоблоке проводили экспериментальные исследования ксеноновых переходных процессов, аналогичные подобным испытаниям на энергоблоках ВВЭР-1000 [1]. Следует отметить, что ВВЭР-1200 обладает по сравнению с ВВЭР-1000 большей мощностью, увеличенной высотой активной зоны и более высоким обогащением топлива.

В экспериментах исследовали интегральные и пространственные ксеноновые переходные процессы, обусловленные изменением средней концентрации ^{135}Xe и распределением концентрации ксенона в активной зоне соответственно. Влияние интегральных ксеноновых процессов на работу реактора характеризуется ростом или снижением реактивности соответственно за счет уменьшения или увеличения концентрации ксенона. В отсутствие управления они сопровождаются изменением мощности, что в некоторых случаях может привести к останову реактора или, наоборот, к превышению допустимой мощности [2]. На практике обычно поддерживают постоянную мощность реактора, компенсируя рост или снижение концентрации ксенона изменением концентрации ^{10}B путем перемещения содержащих бор стержней органов регулирования и изменения концентрации борной кислоты в теплоносителе первого контура. Пространственные ксеноновые процессы возникают в результате деформации поля энерговыделения в активной зоне, что обычно происходит при изменении мощности реактора или перемещении органов регулирования. Они сопровождаются колебаниями локальной мощности энерговыде-

ления, которые при постоянной интегральной мощности реактора и фиксированном положении органов регулирования имеют синусоидальный характер. Практическое значение имеют аксиальные и диаметральные ксеноновые колебания с деформацией поля энерговыделения преимущественно в аксиальном (высотном) и диаметрально направленном направлении активной зоны соответственно.

Аксиальные колебания возбуждаются при изменении мощности реактора или положения групп органов регулирования. В целях недопущения превышения предельно допустимой локальной мощности аксиальные ксеноновые колебания обычно подавляют перемещением управляющих групп [3, 4]. Диаметральные колебания возбуждаются при несимметричном перемещении органов регулирования, например, при падении одного из них, но в любом случае они самопроизвольно затухают.

На стадии проектирования реактора расчетное моделирование ксеноновых процессов выполняют по программе БИПР-7 [5], в ходе эксплуатации — по программе ИР [6]. Испытания ксеноновых процессов проводят, в частности, с целью получить данные для верификации этих программ.

На энергоблоке ВВЭР-1200 проводили испытания интегральных ксеноновых процессов переотравления реактора, а также аксиальных и диаметральных ксеноновых колебаний.

Переотравление — процесс достижения стационарного отравления реактора ксеноном после ступенчатого изменения мощности при условии стационарного отравления в исходном состоянии. Известны два принципиально разных метода исследования данного процесса. Они отличаются параметром критичности, измене-

ние которого во времени используется в качестве непосредственно измеряемой характеристики ксенонового процесса. В одном случае это изменение положения групп органов регулирования (метод групп), в другом — концентрации борной кислоты (метод борной кислоты). На энергоблоках ВВЭР-1000 в основном применялся первый метод, метод борной кислоты использовался на первом энергоблоке Тяньваньской АЭС (Китай) [1].

Недостатком метода борной кислоты может являться невысокая точность автоматического измерения концентрации борной кислоты. В то же время этот метод обеспечивает стабильную работу реактора с фиксированным положением органов регулирования и отсутствием пространственных ксеноновых колебаний энерговыделения. Это позволяет, в частности, проводить измерения при любой мощности реактора, включая мощность 100%, что недоступно для метода групп. На энергоблоке ВВЭР-1200 применялся метод борной кислоты. При этом случайная погрешность показаний боромера составила $\pm 0,05$ г/кг, систематической погрешностью можно было пренебречь, поскольку ксеноновый процесс характеризует относительное изменение концентрации борной кислоты.

Мощность реактора от W_1 до W_2 изменяли с максимально возможной скоростью за счет перемещения группы № 12 (рабочей группы) и изменения концентрации борной кислоты в таком сочетании, чтобы не возбудить пространственные ксеноновые колебания энерговыделения. Затем мощность W_2 поддерживали в основном за счет изменения концентрации борной кислоты. На этой стадии можно условно выделить два характерных этапа:

нестационарное отравление реактора ксеноном — происходит изменение концентрации ксенона;

стационарное отравление реактора ксеноном — концентрация ксенона достигла стационарного значения.

Концентрация борной кислоты, измеряемая по показаниям боромера, может быть представлена в виде функции

$$C(t) = C_0 + \Delta C(t) - \beta t,$$

где t , C_0 — время от достижения мощности W_2 и концентрация борной кислоты на время достижения мощности W_2 ; $\Delta C(t)$ — изменение кон-

центрации борной кислоты, компенсирующее рост или снижение концентрации ксенона; β — коэффициент, задающий темп снижения концентрации борной кислоты для компенсации выгорания топлива.

При достижении стационарного отравления $\Delta C(t)$ принимает постоянное значение, соответственно $C(t)$ принимает линейный характер, обусловленный выгоранием топлива. Испытания продолжаются до достижения линейного участка функции $C(t)$ и определения коэффициента β .

Борный эквивалент отравления реактора ксеноном $\Delta C(t)$, который рассматривается как характеристика исследуемого интегрального ксенонового процесса, восстанавливается по результатам измерения следующим образом:

$$\Delta C(t) = C(t) - C_0 + \beta t.$$

На этапе стационарного отравления функция $\Delta C(t)$ принимает постоянное значение, которое далее обозначается как $\Delta C[W_1, W_2]$ и называется борным эквивалентом стационарного переотравления. Это есть изменение концентрации борной кислоты, которое компенсирует изменение концентрации ксенона при переходе реактора от стационарно отравленного состояния на мощности W_1 к стационарно отравленному состоянию на мощности W_2 . Если $W_1 = 0$, то используется обозначение $\Delta C[W]$, которое характеризует стационарное отравление на мощности W и называется борным эквивалентом стационарного отравления.

При ступенчатом повышении мощности последовательно от $W_1 = 0$ до W_2 и затем до W_3 с достижением стационарного отравления на каждом из них

$$\Delta C[W_3] = \Delta C[W_2] + \Delta C[W_2, W_3].$$

Если $W_1 > 0$, то в качестве характеристики интегрального ксенонового процесса также рассматриваются:

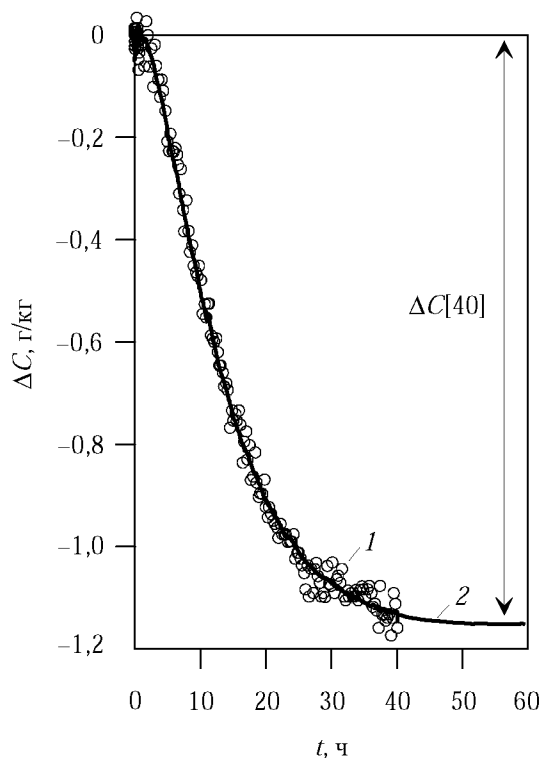
$\Delta C_e[W_1, W_2]$ — величина $\Delta C(t)$ при достижении минимума в процессе отравления реактора после снижения мощности (борный эквивалент глубины иодной ямы) или максимума в процессе выгорания ксенона после увеличения мощности (борный эквивалент выбега реактивности);

$\Delta t_e[W_1, W_2]$ — время достижения $\Delta C(t) = 0$ после снижения (ширина иодной ямы) или увеличения мощности (ширина выбега реактивности).

С использованием борного эквивалента определяются характеристики отравления реактора ксеноном в единицах реактивности: $\Delta\rho[W] = \partial\rho/\partial C\Delta C[W]$; $\Delta\rho[W_1, W_2] = \partial\rho/\partial C\Delta C[W_1, W_2]$; $\Delta\rho_e[W_1, W_2] = \partial\rho/\partial C\Delta C_e[W_1, W_2]$, где $\partial\rho/\partial C$ — расчетная (проектная) или измеренная дифференциальная эффективность борной кислоты на мощности W_2 .

В ходе испытаний трижды ступенчато повышали мощность — от 0 до 40, от 40 до 75, от 75 до 100% и один раз снижали — от 75 до 40%. В результате были экспериментально определены характеристики интегральных ксеноновых процессов, в том числе стационарного отравления на мощности 40, 75 и 100%. При этом борный эквивалент $\Delta C[40]$ измеряли непосредственно, два других определяли суммированием: $\Delta C[75]M = \Delta C[40] + \Delta C[40, 75]$, $\Delta C[100] = \Delta C[40] + \Delta C[40, 75] + \Delta C[75, 100]$.

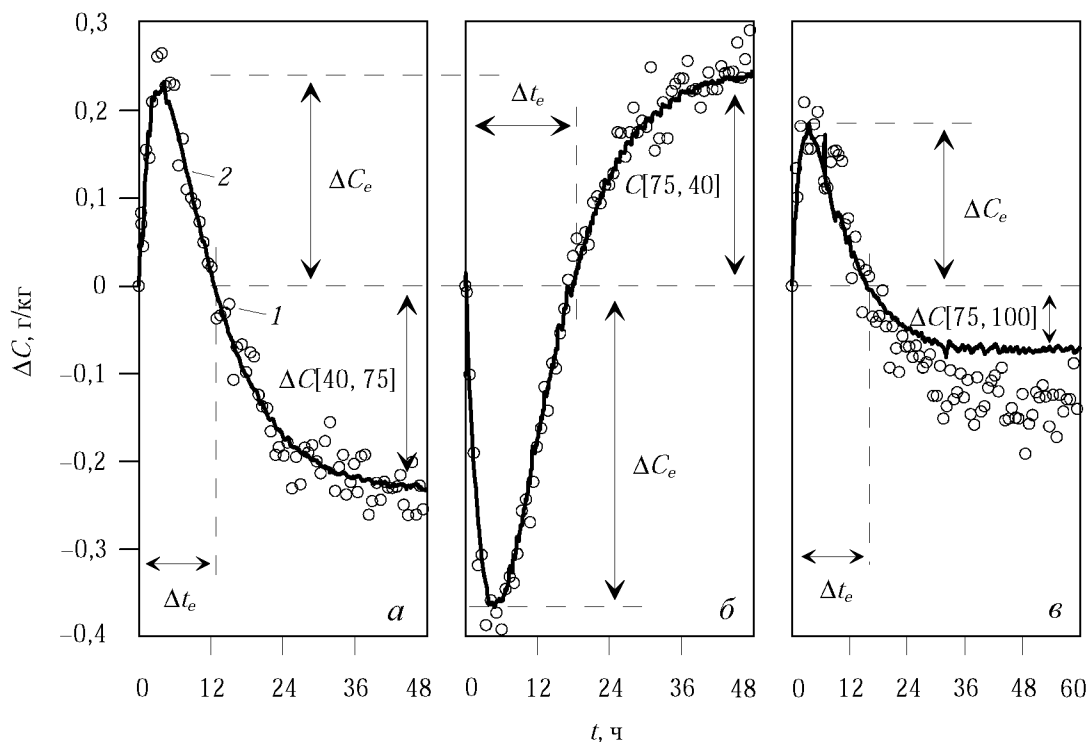
Измеренный борный эквивалент отравления реактора ксеноном сравнивали с полученным по программе ИР, которая в составе системы внутриреакторного контроля непрерывно вычисляла критическую концентрацию борной кислоты, и



Р и с. 1. Измеренное (1) и расчетное (2) относительное изменение критической концентрации борной кислоты после повышения мощности реактора от 0 до 40%

с проектным, рассчитанным по программе БИПР-7.

На рис. 1, 2 видно, что в основном расчетные данные совпадают с измеренными в преде-



Р и с. 2. Измеренное (1) и расчетное (2) относительное изменение критической концентрации борной кислоты после повышения мощности реактора от 40 до 75% (а), снижения от 75 до 40% (б) и повышения от 75 до 100% (в)

лах случайной погрешности показаний борометра $\pm 0,05$ г/кг. Исключением является испытание с увеличением мощности от 75 до 100% — расчетное значение $\Delta C[75, 100]$ отклоняется от среднего измеренного примерно на 0,07 г/кг (см. рис. 2, в)

Основные результаты испытаний интегральных ксеноновых процессов представлены в табл. 1, 2. Следует отметить, что расчетные характеристики $\Delta C[75, 100]$ и $\Delta p[75, 100]$ по программе БИПР-7 значительно лучше совпадают с измеренными. На основании этого можно предположить сбой в работе программы ИР на заключительном этапе испытания, учитывая совпадение расчета с измерением на предыдущих этапах.

Таблица 1. Стационарное переотравление реактора при ступенчатом изменении мощности, характеризующее изменение концентрации борной кислоты и реактивности

$W_1, \%$	$W_2, \%$	Измерение	Расчет ИР	Расчет БИПР
$C(W_1, W_2), \text{г/кг}$				
0	40	$-1,14 \pm 0,05$	-1,15	-1,25
40	75	$-0,24 \pm 0,05$	-0,23	-0,25
75	40	$0,26 \pm 0,05$	0,25	0,23
75	100	$-0,14 \pm 0,05$	-0,07	-0,13
$\Delta p(W_1, W_2), \%$				
0	40	$-2,19 \pm 0,23$	-2,21	-2,27
40	75	$-0,47 \pm 0,14$	-0,45	-0,46
75	40	$0,50 \pm 0,13$	0,48	0,42
75	100	$-0,26 \pm 0,09$	-0,13	-0,22

Таблица 2. Стационарное отравление реактора, характеризующее изменение концентрации борной кислоты и реактивности

$W, \%$	Измерение	Расчет ИР	Расчет БИПР
$C(W_1, W_2), \text{г/кг}$			
40	$-1,14 \pm 0,05$	-1,15	-1,25
75	$-1,38 \pm 0,10$	-1,38	-1,50
100	$-1,52 \pm 0,15$	-1,45	-1,63
$\Delta p(W_1, W_2), \%$			
40	$-2,19 \pm 0,23$	-2,21	-2,27
75	$-2,66 \pm 0,37$	-2,66	-2,73
100	$-2,92 \pm 0,46$	-2,79	-2,95

Пространственные ксеноновые процессы исследовали для аксиальных и диаметральных свободных ксеноновых колебаний. Аксиальные

колебания регистрировали по изменению аксиального офсета AO распределения энерговыделения активной зоны, диаметральные — по изменению относительной мощности ТВС № 11 ($Kq11$) и 153 ($Kq153$), расположенных во втором периферийном ряду симметрично относительно центра активной зоны. Определяли период колебаний T и индекс стабильности α , исходя из представления колебаний в виде

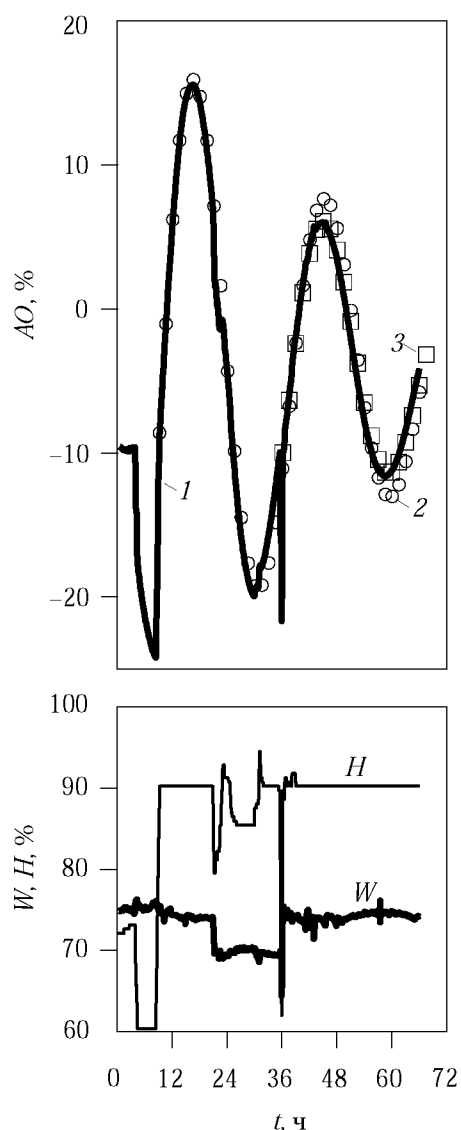
$$A(t) = A_0 \exp(\alpha t) \cos(\omega t),$$

где A — отклонение измеряемой величины относительно начального стационарного значения; A_0 — отклонение при достижении первого экстремума; t — время относительно времени достижения первого экстремума; $\omega = 2\pi/T$.

Аксиальные ксеноновые колебания возбуждали погружением рабочей группы регулирующих органов СУЗ до 60% высоты активной зоны, через 4 ч ее извлекли до 90%, в это время по программе ИР был выполнен первый расчетный прогноз колебаний (рис. 3). Затем в течение 60 ч изменением концентрации борной кислоты должен был поддерживаться постоянный уровень мощности $\sim 75\%$ при постоянном положении рабочей группы. Однако на этапе между первым и вторым максимумом колебаний из-за неисправности оборудования произошло снижение мощности реактора до 70% с перемещением группы. Поскольку отклонение офсета от прогнозируемого было незначительным — не более 2% в единицах офсета, испытания были продолжены. Через 20 ч на второй восходящей фазе колебаний были восстановлены исходная мощность реактора 75%, положение группы 90% и по программе ИР выполнен второй расчетный прогноз колебаний.

В табл. 3 приведены итоговые результаты испытаний. Численные значения «измерений 1 и 2» получены соответственно без корректировки и с корректировкой, учитывающей влияние снижения мощности.

Диаметральные ксеноновые колебания возбуждали погружением регулирующего органа СУЗ в ТВС № 11 до нижнего предельного положения, через 4 ч его извлекли из активной зоны, в это время по программе ИР был выполнен расчетный прогноз колебаний (рис. 4). Затем в течение 48 ч изменением концентрации борной кислоты поддерживали постоянный уровень



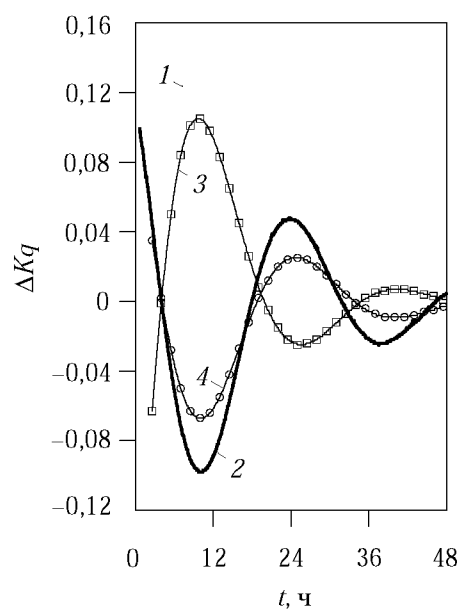
Р и с. 3. Ход испытаний свободных аксиальных ксеноновых колебаний: 1 — измерение; 2, 3 — первый и второй прогноз соответственно (H — положение рабочей группы)

мощности $\sim 75\%$ при постоянном положении рабочей группы (табл. 4).

Испытания интегральных ксеноновых процессов подтвердили проектное отравление реактора ксеноном, достаточно высокую точность программ ИР и БИПР-7, а также эффективность

Т а б л и ц а 3. Параметры свободных аксиальных ксеноновых колебаний

Параметр	α , 1/ч	T , ч
Измерение 1	-0,023	27,9
Измерение 2	-0,024	28,4
Проектные значения	-0,017	28,6
Первый прогноз ИР	-0,019	28,7
Второй прогноз ИР	-0,024	28,5



Р и с. 4. Относительная измеренная в процессе диаметральных ксеноновых колебаний мощность ТВС № 11 (1), 153 (2) и расчетная № 11 (3), 153 (4)

Т а б л и ц а 4. Параметры свободных диаметральных ксеноновых колебаний

Параметр	α , 1/ч	T , ч
Измерение	-0,067	28,6
Проектные значения	-0,076	33,0
Прогноз ИР	-0,091	29,8

и целесообразность методики экспериментального исследования интегральных ксеноновых процессов, основанной на регистрации изменения критической концентрации борной кислоты в реакторе. Испытания пространственных ксеноновых колебаний в целом подтвердили заявленную в проекте устойчивость реактора в отношении аксиальных и диаметральных колебаний: индексы стабильности имеют отрицательные значения.

Количественно расчетные характеристики аксиальных колебаний надежно подтверждаются экспериментальными данными. Совпадение расчетных характеристик диаметральных колебаний с данными измерений значительно хуже, что указывает на необходимость соответствующей корректировки расчетных программ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аверьянова С.П., Косоуров К.Б., Семченков Ю.М. и др. Исследование ксеноновых переходных процессов в ВВЭР-1000 на Тяньваньской АЭС (Китай). — Атомная энергия, 2008, т. 105, вып. 4, с. 183—190.

2. Терешонок В.А., Степанов В.С., Поваров В.П., Лебедев О.В. Исследование поведения реакторной установки ВВЭР-1000 в переходном режиме, вызванном малым снижением мощности. — Там же, 2002, т. 93, вып. 4, с. 319—320.
3. Филимонов П.Е., Аверьянова С.П. Поддержание равновесного офсета — эффективный способ подавления ксеноновых колебаний в ВВЭР-1000. — Там же, 2001, т. 90, вып. 3, с. 231—233.
4. Аверьянова С.П., Косоуров К.Б., Семченков Ю.М. и др. Испытание усовершенствованных алгоритмов управления энерговыделением ВВЭР-1000 в условиях

маневренных режимов на Тяньваньской АЭС (Китай). — Там же, 2007, т. 103, вып. 5, с. 277—282.

5. Петрунин Д.М., Семенов В.И. Трехмерные программы — имитаторы работы ВВЭР. — Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика и техника ядерных реакторов, 1985, вып. 9, с. 44—54.
6. Аверьянова С.П., Ковель А.И., Мамичев В.В., Филимонов П.Е. Развитие, внедрение и современное состояние расчетной программы «Имитатор реактора». — Атомная энергия, 2008, т. 105, вып. 4, с. 237—240.

Поступила в Редакцию 25.12.17

УДК 621.039.51

УРАН-ЭРБИЕВОЕ ТОПЛИВО РБМК

Федосов А.М. (НИЦ «Курчатовский ин-т», г. Москва)

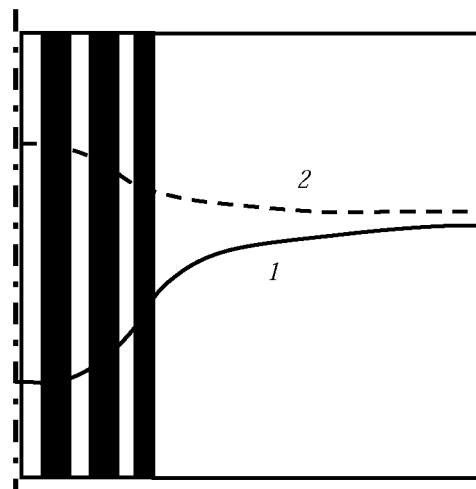
Эрбий рассматривается в качестве перспективного выгорающего поглотителя для легководных реакторов в длительных (~2 лет) кампаниях топлива. В нашей стране накоплен 20-летний опыт полномасштабного использования уран-эрбиевого топлива в РБМК.

Разработка и внедрение уран-эрбиевого топлива РБМК начались после аварии на Чернобыльской АЭС [1, 2]. Для снижения парового коэффициента реактивности α_p примерно в 80 технологических каналов вместо ТВС загрузили дополнительные поглотители из бористой стали, что привело к увеличению расхода ТВС на 30%, ухудшению экономики, быстрому заполнению бассейнов выдержки и хранилищ отработавшего ядерного топлива. Поиски альтернативного пути повышения безопасности РБМК в конце 1980-х — начале 1990-х гг. привели к созданию уран-эрбиевого топлива [3—5].

Механизм влияния эрбия на паровой коэффициент реактивности. Природный эрбий содержит шесть стабильных изотопов, из которых основное влияние на баланс нейтронов оказывают ^{166}Er (содержание 33,6%) и ^{167}Er (22,95%). Главную роль играет ^{167}Er , сечение поглощения которого примерно в 10 раз больше, чем ^{166}Er .

Исследования показали, что наиболее эффективным способом снижения парового коэффициента реактивности РБМК является добавление выгорающего поглотителя с резонансным сечением захвата в эпитепловой области энергии в топливо — диоксид урана [5]. Действие

резонансного поглотителя на паровой коэффициент (или эффект) реактивности основано на изменении спектра нейтронов в топливе РБМК при уменьшении содержания воды в канале. Поскольку температура графитового замедлителя ~500 °С примерно на 200 °С выше температуры охлаждающей твэлы воды, при обезвоживании повышается температура нейтронного газа в топливе, т.е. спектр тепловых нейтронов сдвигается в сторону более высокой энергии (рис. 1). Если в топливо добавить изотоп с резонансным сечением поглощения в эпитепловой области энергии, то из-за сдвига спектра поглощение нейтронов при обезвоживании каналов увеличится, что приведет к снижению положительного эффекта обезвоживания и парового коэффициента реактивности (рис. 2).



Р и с. 1. Эффективная температура нейтронов в ячейке РБМК с водой (1) и без воды (2): $\blacksquare$ — твэлы; $\square$ — вода; $\square$ — труба канала; $\square$ — графит