

УДК 621.039

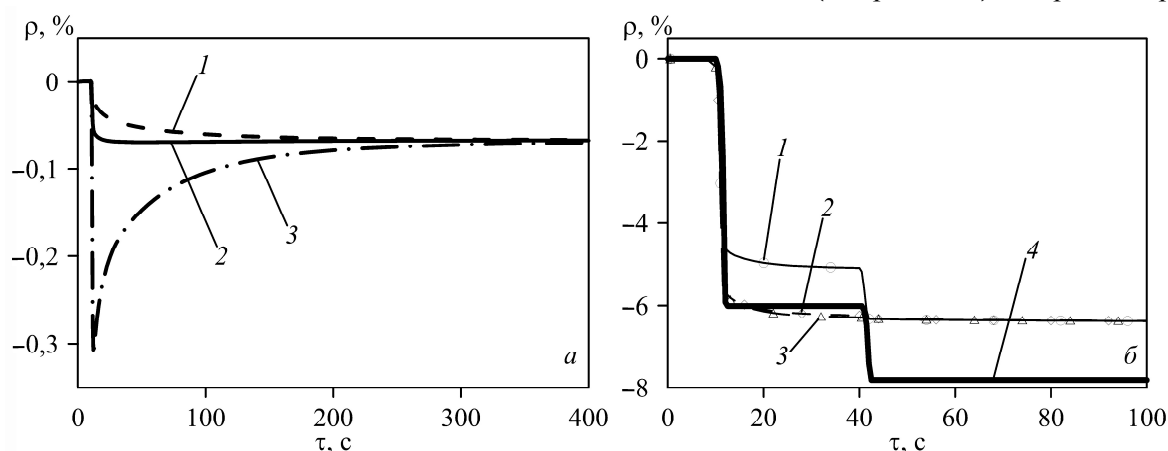
УЧЕТ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ЭФФЕКТОВ РЕАКТИВНОСТИ НА ЭНЕРГБЛОКАХ С ВВЭР МЕТОДОМ SCRM

Пинегин А.А., Афанасьев Д.В., Цыганов С.В. (НИЦ «Курчатовский ин-т», г. Москва)
e-mail: afanasev_dv@nrcki.ru

Физические испытания на энергетических реакторах выполняются для оценки соответствия нейтронно-физических характеристик их проектным значениям. Большинство измеряемых характеристик — коэффициенты и эффекты реактивности, эффективность органов регулирования требуют определения реактивности. Реактивность ВВЭР определяется на основе изменений тока ионизационной камеры, расположенной в измерительных каналах биологической защиты, с помощью реактиметров, использующих математическую процедуру, которую принято называть обращенным решением уравнений кинетики (ОРУК) [1]. Метод ОРУК основывается на приближении точечной модели кинетики, которое предполагает асимптотическое поведение потока нейтронов, позволяющее представить его в виде произведения двух функций, одна из которых зависит от пространственной, другая — от временной переменной [1—3].

Снижение точности метода ОРУК обусловлено выходом за границы используемого им предположения о возможности разделения пространственной и временной переменной [4—9]. На практике применение метода ОРУК в условиях неасимптотического пространственного распределения потока нейтронов в активной зоне приводит к зависимости определения реактивности от места расположения детектора нейтронов [4, 8, 9]. На рис. 1 показано влияние пространственных эффектов на определение реактивности методом ОРУК при имитации типовых испытаний с помощью разработанного в НИЦ «Курчатовский институт» программного средства NOSTRA-EXP, включающего в себя модель формирования токов ионизационных камер.

Для симметричного расположения трех камер вокруг активной зоны ВВЭР-1000 имитировались показания реактиметров при сбросе одного ОР СУЗ (см. рис. 1, а) и сбросе аварийной



Р и с. 1. Реактивность при сбросе одного ОР СУЗ по данным первой (1), второй удаленной камеры (2), ближайшей камеры (3) (а), реактивность при сбросе аварийной защиты по данным ближайшей ионизационной камеры (1), первой (2), второй удаленной камеры (3) и методом решения условно-критической задачи (4) (б)

защиты без одного ОР СУЗ (см. рис. 1, б). При сбросе несимметрично расположенного ОР СУЗ показания реактиметров существенно различаются на интервале времени от сброса и до установления нового асимптотического распределения потока нейтронов (~300 с). При сбросе аварийной защиты без одного ОР СУЗ расчет реактивности методом ОРУК по ближайшей и удаленным ионизационным камерам качественно отличается — реактивность, определяемая по току удаленных ионизационных камер, нечувствительна к сбросу удерживаемого ОР СУЗ. Кроме того, этот метод приводит к значительной методической погрешности эффективности аварийной защиты, что проявляется в несовпадении с решением условно-критической задачи [10—12].

Для компенсации влияния пространственного эффекта могут быть использованы экспериментально-расчетные методы определения реактивности [7, 8]. В настоящей работе рассматривается семейство расчетно-экспериментальных методов SCRM — измерение реактивности с учетом пространственных эффектов, основанное на ранее известном методе МОД ОРУК [9]. Методы SCRM интегрированы в программное средство NOSTRA-EXP, которое в настоящее время используется на действующих энергоблоках с ВВЭР для определения эффективности аварийной защиты.

В настоящей работе приводятся результаты применения методов семейства SCRM для определения эффективности аварийной защиты и интегральной эффективности отдельных групп ОР СУЗ. Оценка точности методов приводится на основе статистического моделирования испытаний на разных типах реакторных установок с ВВЭР.

Метод SCRM (МОД ОРУК). В методе ОРУК используется точечная модель реактора, для которой функция ценности потока нейтронов отвечает начальному состоянию активной зоны [4]. Такая точечная модель не учитывает изменение эффективности источника запаздывающих нейтронов, коэффициента пропорциональности между нейтронной мощностью реактора и током ионизационной камеры, эффективной доли запаздывающих нейтронов. Эти особенности точечной модели и приводят к пространственным эффектам реактивности.

Введенную реактивность можно определять на основе точечной модели реактора, полученной из пространственной модели путем ее сворачивания с весом функции ценности потока нейтронов, соответствующей текущему распределению размножающих свойств в активной зоне в любой момент времени [9]. Реактивность, определяемая методом ОРУК для такой точечной модели, согласуется с решением условно-критической задачи в любой момент времени. Ценность источников запаздывающих нейтронов, интеграл источника нейтронов деления и эффективная доля запаздывающих нейтронов в этом случае соответствуют текущей композиции активной зоны.

Таким образом, при моделировании эксперимента метод ОРУК может применяться к двум точечным моделям кинетики реактора.

Одна модель (модель А) строится на основе стационарных функций ценности потока нейтронов. В диффузионном приближении обозначим соответствующую функцию ценности потока нейтронов $\Phi_0^+(\mathbf{r}, E)$. Параметры кинетики для нее определяются традиционным способом [1]. При построении второй точечной модели (модель Б) выполняется сворачивание пространственной модели с весом функции ценности потока нейтронов, соответствующим текущему состоянию активной зоны. В диффузионном приближении обозначим функцию ценности потока нейтронов $\Phi^+(\mathbf{r}, E, t)$. Эта модель содержит дополнительные источники, связанные с изменением функции ценности со временем.

Процедура ОРУК может быть применена к обоим моделям. Для простоты анализа будем предполагать, что введена небольшая положительная или произвольная отрицательная реактивность. В этом случае временем жизни мгновенных нейтронов можно пренебречь. В качестве мощности реактора для модели А используем расчетный ток ионизационной камеры, полученный путем моделирования эксперимента по вводу реактивности $I_{\text{ИК}}(t)$, для модели Б — интеграл от источника нейтронов деления $N(t)$, рассчитанный с весом $\Phi^+(\mathbf{r}, E, t)$.

В моделях А и Б расчет потока нейтронов проводится в рамках диффузионного приближения, для выражения реактивности $\rho_A(t)$ и $\rho_B(t)$ используется метод ОРУК. Оценка введенной реактивности $\rho_E(t)$ в любой момент времени

совпадает с полученной из решения условно-критической задачи, оценка введенной реактивности $\rho_A(t)$ зависит от неасимптотичности потока нейтронов в той же мере, в какой от нее зависит измеренная реактивность. Подробный математический формализм приведен в [9] и приводит к следующему соотношению:

$$\rho_B(t) = \beta_{\text{эф}}^A(t) F_{\beta}(t) - \frac{F_{\text{зап}}(t) \sum_{i=1}^6 \lambda_i c_{A,i}(t)}{F_I(t) I_{\text{ИК}}(t)}, \quad (1)$$

$$\text{где } F_I(t) = \frac{N(t) I_{\text{ИК}}(0)}{I_{\text{ИК}}(t) N(0)};$$

$$F_{\text{зап}}(t) = \frac{\sum_{i=1}^6 \lambda_i c_{B,i}(t) \sum_{i=1}^6 \lambda_i c_{A,i}(0)}{\sum_{i=1}^6 \lambda_i c_{A,i}(t) \sum_{i=1}^6 \lambda_i c_{B,i}(0)};$$

$$F_{\beta}(t) = \beta_{\text{эф}}^B(t) / \beta_{\text{эф}}^A(t).$$

Правая часть формулы (1) определяет истинную введенную реактивность, не зависящую от пространственных эффектов. Функции F_I , $F_{\text{зап}}$, F_{β} называются форм-факторами. Функции типа F_I часто называют эффективностью детектора, определяющей относительное изменение со временем коэффициентов пропорциональности между мощностью реактора и током ионизационной камеры [7]. Форм-фактор $F_{\text{зап}}$ определяет изменение ценности источника нейтронов, образующихся в результате распада эмиттеров запаздывающих нейтронов, F_{β} — относительное изменение со временем эффективной доли запаздывающих нейтронов в результате пространственного перераспределения потока нейтронов.

При обработке экспериментальных данных с помощью предварительно рассчитанных для рассматриваемого испытания форм-факторов F_I , $F_{\text{зап}}$, F_{β} можно исключить влияние неасимптотичности потока нейтронов на реактивность, т.е. пространственные эффекты.

Функции F_I , $F_{\text{зап}}$, F_{β} рассчитываются в режиме of-line для каждой ионизационной камеры с учетом особенностей эксперимента по программам, в которых имеются модели формирования токов. Введенная реактивность в методе SCRM определяется по формуле

$$\frac{\rho_{\text{ИК}}^k}{\beta_{\text{реакт}}} = F_{\beta}(t) - \frac{F_{\text{зап}}^k(t) \sum_{i=1}^6 \lambda_i c_{\text{эксп},i}^k}{\beta_{\text{реакт}} F_I(t) I_{\text{эксп}}^k}. \quad (2)$$

Индекс k в формуле (2) указывает на то, что величина рассчитана для k -го реактиметра; $\beta_{\text{реакт}}$ — эффективная доля запаздывающих нейтронов; $c_{\text{эксп},i}^k$ — концентрация эмиттеров запаздывающих нейтронов i -й группы, рассчитанная по измеренному току; $I_{\text{эксп}}^k$ — измеренный ток. При получении формулы (2) предполагалось, что $\beta_{\text{реакт}} = \beta_{\text{эф}}^A(t)$, зависимость $\beta_{\text{эф}}^A$ от времени пренебрежимо мала.

Такую процедуру определения введенной реактивности будем называть методом SCRM (в [9] — МОД ОРУК). Этим методом устраняются пространственные эффекты. Из-за использования в SCRM расчетных поправок результаты измерения являются экспериментально-расчетными.

В рамках модельной задачи результаты расчета реактивности методом SCRM и из решения условно-критической задачи тождественно равны. Из этого следует математическая корректность метода. При обработке измерений методом SCRM расчетные и экспериментальные неопределенности приводят к погрешности в расчете форм-факторов.

Статистическая оценка точности метода SCRM при определении эффективности аварийной защиты численными экспериментами. Реактивность, определяемая методом SCRM по формуле (2), имеет погрешность, которая равна разнице между полученной этим методом и фактической, на практике неизвестной. Она зависит от точности знания многих параметров и может рассматриваться в качестве случайной величины. Оценку статистических свойств этой случайной величины можно получить путем сопоставления реактивности, рассчитанной по формуле (2), с результатами численных экспериментов, моделирующих испытания по определению эффективности аварийной защиты.

Для рассматриваемой задачи численные эксперименты имитируют разное состояние активной зоны, получение данных в процессе эксперимента и процедуру их обработки методами ОРУК и SCRM с привлечением расчетной модели, параметры которой известны с погрешностями. Наборы параметров модели активной зоны, которые используются для имитации получения экспериментальных данных и в процедурах их обработки методами ОРУК и SCRM в

ходе одного численного эксперимента, случайным образом отличаются.

В численных экспериментах в качестве экспериментальных данных о токе ионизационных камер использовались их расчетные значения, полученные при моделировании сброса аварийной защиты с помощью программы NOSTRA-EXP при номинальных параметрах модели активной зоны, фактические свойства активной зоны принимались равными номинальным значениям. Обработка данных численного эксперимента проводилась при случайных параметрах активной зоны и параметрах реактиметра, которые выбирались методом Монте-Карло с учетом принятых в анализе статистических свойств неопределенностей [13]. Отклонения параметров активной зоны приводили к изменениям форм-факторов (2), которые вычислялись по программе NOSTRA-EXP.

Неопределенности отдельных параметров были условно разбиты на три группы:

технологические — неопределенности материального состава элементов активной зоны из-за технологических допусков;

экспериментальные — погрешности измерительного тракта и параметров запаздывающих нейтронов;

модельные — неопределенности параметров нейтронно-физической модели, влияющие на точность расчета форм-факторов.

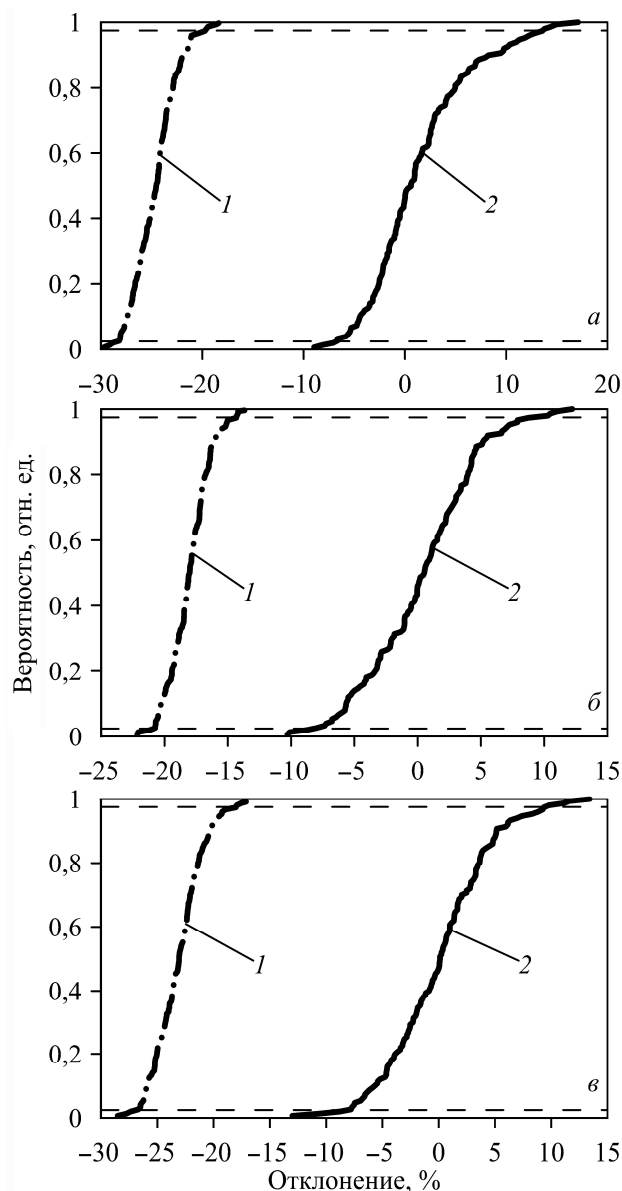
Для неопределенностей всех параметров использовалась гипотеза о нормальном законе их распределения и равенстве нулю соответствующих математических ожиданий. Стандартные отклонения для неопределенности отдельных параметров определялись на основе технической документации, паспортных данных программы NOSTRA-EXP и экспертных оценок.

Методом численных экспериментов были выполнены три статистических исследования эффективности аварийной защиты с удержанием в крайнем верхнем положении в каждом испытании наиболее эффективного ОР СУЗ на минимальном контролируемом уровне мощности в начале 1-й кампании 1-го энергоблока Ленинградской АЭС-2, в начале 4-й кампании 2-го энергоблока Ростовской, в начале 36-й кампании 1-го энергоблока Кольской АЭС. В каждом исследовании учитывались неопределенности 20 параметров. Каждая серия численных экспе-

риментов включала в себя 150 вариантов моделирования сброса аварийной защиты.

Расчетный ток ионизационных камер для каждого моделирования сброса аварийной защиты обрабатывался методами ОРУК и SCRM. Объем оценок эффективности аварийной защиты достаточен для построения 95%-ных доверительных интервалов их значений [14].

На рис. 2 показано относительное отклонение эффективности аварийной защиты для 150 расчетов сброса методами ОРУК и SCRM от полученного из решения условно-критической задачи при номинальных параметрах. В рамках



Р и с. 2. Распределение относительного отклонения эффективности аварийной защиты, рассчитанной методами ОРУК (1), SCRM (2), от фактической для испытаний, проведенных на Ленинградской АЭС-2 (а), Ростовской АЭС (б), Кольской АЭС (в)

статистического анализа эффективность аварийной защиты, полученная из решения условно-критической задачи при номинальных параметрах модели, рассматривалась в качестве фактической, учитывающей неопределенности композиции активной зоны из-за технологических отклонений в элементах конструкции. Относительное отклонение эффективности аварийной защиты для выборочного распределения рассчитывается относительно таким образом оцененной фактической эффективности.

Из статистического анализа рассмотренных испытаний можно сделать некоторые выводы. Обработка тока ионизационных камер методом ОРУК приводит к значительной систематической недооценке эффективности аварийной защиты, что связано с влиянием пространственных эффектов реактивности. Симметричный 95%-ный доверительный интервал относительного отклонения эффективности аварийной защиты, рассчитанной методом SCRM, от фактической для рассмотренных типов реакторов лежит внутри интервала $\pm 13\%$. Наибольшее отклонение на 13% в сторону завышения характерно только для 1-й кампании 1-го энергоблока Ленинградской АЭС-2. Все остальные доверительные интервалы не превышают 10%.

Оценки погрешности расчета реактивности на основе численных экспериментов позволяют проанализировать большее число возможных ситуаций, связанных с отклонением отдельных параметров от номинальных, и их вклад в погрешность. При этом они дополняют оценки, полученные на основе анализа экспериментальных данных.

Обработка измерений эффективности аварийной защиты методом SCRM. Проведена оценка эффективности аварийной защиты на всех типах эксплуатируемых ВВЭР с разными вариантами топливных загрузок и сценариев измерений. Измеренная эффективность аварийной защиты определялась методами ОРУК и SCRM на базе экспериментальных токов ионизационных камер, расчетная — из решения условно-критической задачи. Рассматриваются два варианта погружения аварийной защиты в активную зону — полная и с удержанием отдельного органа регулирования в крайнем верхнем положении.

Параметры запаздывающих нейтронов для методов ОРУК и SCRM, а также для моделиро-

вания нейтронной кинетики активной зоны формировались на базе изотопных характеристик библиотеки БНАБ—93 [15]. Ионизационные камеры, ток которых использовался при обработке измерений, были расположены в ближайших измерительных каналах к удерживаемому ОР СУЗ.

Из табл. 1 следует, что эффективность аварийной защиты без одного ОР СУЗ и для большинства вариантов полной аварийной защиты на блоках с ВВЭР-1000, -1200, определенная методом ОРУК, занижена относительно расчетной. Это объясняется конструктивной особенностью реакторов — отсутствием ОР СУЗ в периферийном ряду ТВС, реакция деления в которых доминирует в формировании тока ионизационной камеры. Эффективность аварийной защиты ВВЭР-440, наоборот, завышена, что объясняется наличием в периферийном ряду ТВС аварийных регулирующих кассет, вытесняющих топливный сегмент поглощающим материалом при введении аварийной защиты.

Эффективность аварийной защиты, измеренная методом SCRM, не имеет систематического отклонения от расчетной. Разница относительного отклонения, полученного методами ОРУК и SCRM для отдельных измерений, представляет собой оценку пространственного эффекта реактивности. Для приведенной выборки максимальное относительное отклонение, полученное методом SCRM, от расчетного значения не превышает 10%, что подтверждает оценку точности метода SCRM на основании численного статистического моделирования.

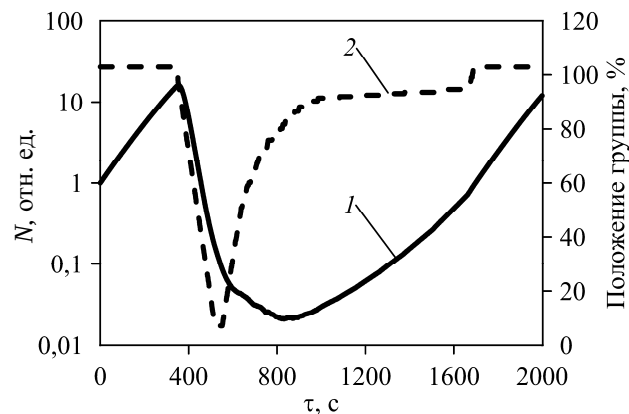
Обработка измерений интегральной эффективности групп ОР СУЗ методом SCRM. Этот метод применялся при обработке измерений интегральной эффективности отдельных групп ОР СУЗ при их вводе в активную зону с рабочей скоростью. Такие измерения проводятся в начале каждой кампании энергоблоков Тяньваньской АЭС (Китай) и АЭС «Темелин» (Чехия) с ВВЭР-1000. Кроме того, они проводились в начале первых кампаний энергоблоков Нововоронежской АЭС-2 и Белорусской АЭС с ВВЭР-1200. В рассматриваемых испытаниях каждая из групп ОР СУЗ поочередно вводится в активную зону с последующим извлечением. Интегральная эффективность групп ОР СУЗ определяется по измеряемому току ионизационных камер. Типовая схема испытания показана на рис. 3.

Т а б л и ц а 1. Относительное отклонение измеренной методами ОРУК и SCRM эффективности аварийной защиты от расчетной

Номер блока	Кампания	Без одного ОР		Полный вес аварийной защиты	
		ОРУК	SCRM	ОРУК	SCRM
ВВЭР-1000					
Калининская АЭС					
3	6	-34	-3	-16	1
3	8	-25	-8	-19	-6
4	1	-18	-3	-18	2
4	2	-23	-9	-16	-6
Ростовская АЭС					
1	11	-28	-3	-24	-1
1	12	-25	-2	-8	6
2	2	-19	5	-17	6
2	3	-26	2	-18	6
2	4	-16	2	4	7
3	1*	-25	-7	-23	-6
3	1**	-18	-2	-20	-1
Балаковская АЭС					
1	20	-26	-6	-23	-7
2	19	-17	-10	-19	-7
3	19	-22	3	3	5
4	16	-10	-3	-5	0
Тяньваньская АЭС					
3	1	-26	0	-21	2
ВВЭР-1200					
Нововоронежская АЭС-2					
1	1***	-25	-6	-19	-2
1	1****	-18	-2	-17	1
ВВЭР-440					
Кольская АЭС					
1	34	-13	10	42	7
1	35	-12	10	32	4
1	36	-11	9	55	6
2	35	-15	7	39	3
2	36	-11	5	25	-6
3	26	8	-8	9	-3
3	27	33	-4	7	0
3	28	2	-4	7	1
4	25	4	-5	1	-3
4	26	8	-7	10	-2
4	27	4	-9	1	-5
Нововоронежская АЭС					
3	39	55	1	53	-8

*, **, ***, *****, Удержание ОР СУЗ в ячейке № 153, 155, 13, 153 соответственно.

*, **, ***, **** Удержание ОР СУЗ в ячейке № 153, 155, 13, 153 соответственно.



Р и с. 3. Нейтронная мощность (1) и положение измеряемой группы ОР СУЗ от низа активной зоны (2)

Как видно в табл. 2, пространственные эффекты реактивности, наблюдаемые при введении в активную зону отдельных групп ОР СУЗ, имеют сильную зависимость от их расположения в активной зоне. В отдельных случаях, например, 2-го энергоблока 12-й кампании Тяньваньской АЭС учет пространственных эффектов приводит к корректировке измеренной эффективности более чем на 30%.

Метод SCRM позволяет учесть значительные пространственные эффекты при определении интегральной эффективности групп ОР СУЗ. Для приведенного набора измерений отклонение от расчета не превышает 10%.

Заключение. Определение реактивности лежит в основе физических испытаний, проводимых в начале каждой кампании ВВЭР. Измеренная эффективность аварийной защиты и интегральная эффективность некоторых групп органов регулирования, определенная методом обращенного решения уравнений точечной кинетики, содержат систематические отклонения от расчетной. Так, измеренная эффективность аварийной защиты ВВЭР-1000, -1200 занижена по сравнению с расчетом, ВВЭР-440 — завышена. При измерении интегральной эффективности некоторых групп органов регулирования при их погружении в активную зону с рабочей скоростью пространственные эффекты также могут приводить к существенным отклонениям традиционных подходов к определению реактивности от расчета. Наблюдаемые отличия являются проявлениями пространственных эффектов реактивности, степень влияния которых зависит от особенностей топливных загрузок, конфигурации органов регулирования и детекторов.

Таблица 2. Относительное отклонение измеренной методами ОРУК и SCRM интегральной эффективности группы ОР СУЗ от расчетной

Группа ОР СУЗ	ОРУК	SCRM	ОРУК	SCRM	ОРУК	SCRM	ОРУК	SCRM
	Тяньваньская АЭС				Белорусская АЭС, блок 1, 1-я кампания		Нововоронежская АЭС-2, блок 1, 1-я кампания	
	Блок 2, 12-я кампания		Блок 3, 1-я кампания					
1	39	10	5	-1	11	1	—	—
2	13	7	-2	-1	-1	0	3	5
3	-10	-2	-4	2	-10	-4	-9	-3
4	-1	1	-8	0	-5	-1	-3	-1
5	3	3	-3	2	-14	-10	-12	-9
6	8	2	-6	-1	-9	-5	-10	-6
7	-1	0	-6	-1	-12	-8	-6	-4
8	8	10	-4	2	-6	-6	0	0
9	14	6	-1	-2	-14	-10	-11	-9
10	-4	1	4	8	-2	4	-2	2
11	—	—	—	—	1	-1	4	3
12	—	—	—	—	-3	-2	-3	0

Экспериментально-расчетный метод SCRM, разработанный в НИЦ «Курчатовский институт», позволяет устранить влияние пространственных эффектов реактивности в рассмотренных типах испытаний. Показано, что эффективность аварийной защиты, определенная методом SCRM, отклоняется от расчета в пределах 10%, при этом отсутствуют систематические отклонения. Для исследованных топливных загрузок ВВЭР-1000, -1200 с применением метода SCRM экспериментальная и расчетная интегральная эффективность групп ОР СУЗ согласуется в пределах 10%.

Неопределенность метода SCRM оценивалась также посредством численного статистического моделирования. Показано, что в 95% реализаций случайного отклонения параметров статистической модели для разных типов ВВЭР эффективность аварийной защиты, рассчитанная методом SCRM, отличается от истинной в пределах 13%, что согласуется с оценками, полученными при расчетно-экспериментальном сравнении.

В настоящее время метод SCRM реализован на базе трехмерного динамического кода NOSTRA и используется на отечественных и китайских энергоблоках ВВЭР для определения эффективности аварийной защиты и интегральной эффективности регулирующих групп. Представляется, что он может быть реализован на базе других трехмерных динамических нейт-

ронно-физических кодов и применен для разных возможных испытаний по определению эффективности органов регулирования.

Авторы выражают благодарность В.И. Орлову (АО «ВНИИАЭС») за предоставление данных измерений эффективности аварийной защиты для АЭС.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Казанский Ю.А., Матусевич Е.С. Экспериментальные методы физики реакторов. М.: Энергоатомиздат, 1984.
2. Киппин Дж. Физические основы кинетики реакторов. Пер. с англ. Под ред. В.А. Кузнецова. М.: Атомиздат, 1965.
3. Белл Д., Глесстон С. Теория ядерных реакторов. Пер. с англ. Под ред. В.Н. Артамкина. М.: Атомиздат, 1974.
4. Казанский Ю.А., Матвиенко И.П., Тютюнников П.Л., Шокодько Л.Д. К учету пространственных эффектов реактивности при измерении реактивности методом обращенного решения уравнений кинетики. — Атомная энергия, 1981, т. 51, вып. 6, с. 387—389.
5. Абрамов Б.Д. Некоторые обобщения уравнений обратной кинетики реактора: Препринт ФЭИ-2970, 2003.
6. Абрамов Б.Д. Некоторые вопросы классификации и оценки погрешностей метода ОРУК определения реактивности. — Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика ядерных реакторов, 2004, вып. 3, с. 3—13.
7. Селезнев Е.Ф. Разработка и использование эксплуатационных программ нейтронно-физического расчета реакторов. Автореф. дис. на соискание ученой степени д.т.н. М., ВНИИАЭС, 2001.
8. Chao Y., Lam H., Gibbons J. e.a. The Spatially Corrected Inverse Count Rate (SCICR) Method for Subcritical Reactivity Measurement. WCAP-16260-P-A, Revision 1, July 2007.

9. Пинегин А.А., Шумский Б.Е. Экспериментальные погрешности и возможность их компенсации при определении эффективности аварийной защиты и дифференциальной эффективности группы ОР СУЗ в реакторе ВВЭР-1000. — Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика ядерных реакторов, 2007, № 1, с. 76—89.
10. Krell J., Mängel B., Rebohm H. Analysis of rod-drop measurements at a VVER-440 reactor. — Nucl. Engng Design, 1995, v. 159, № 2—3, p. 265—271.
11. Цыганов С.В., Шишков Л.К. Измерение эффективности органов регулирования ВВЭР. — Атомная энергия, 2004, т. 96, вып. 3, с. 183—188.
12. Кавун О.Ю., Попыкин А.И., Шевченко Р.А. Расчеты ввода большой реактивности в реактор ВВЭР-1000. — Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика ядерных реакторов, 2007, вып. 1, с. 35—42.
13. Соболев И.М. Метод Монте-Карло. М.: Наука, 1968. 64 с.
14. Wilks S., Determination of sample sizes for setting tolerance limits. — Ann. Math. Stat., 1941, № 12, p. 91—96.
15. Забродская С.В. Новые типы данных в системе БНАБ-93 для расчета радиационных характеристик. Дис. на соискание ученой степени к.ф.-м.н. Обнинск, ГНЦ РФ — ФЭИ, 2001.

Поступила в Редакцию 4.02.22

УДК 621.039.51...17

СНИЖЕНИЕ СИСТЕМАТИЧЕСКОЙ ОШИБКИ МЕТОДА МОНТЕ-КАРЛО В РАСЧЕТАХ ЯДЕРНЫХ РЕАКТОРОВ С ПОМОЩЬЮ КОДА MSU

Богданович Р.Б. (ИБРАЭ РАН, г. Москва), Герасимов А.С. (НИЦ «Курчатовский ин-т», г. Москва),
Тихомиров Г.В. (НИЯУ МИФИ, г. Москва)
e-mail: geras-alexander@yandex.ru

Особенность кода MSU, как и других программ, использующих метод Монте-Карло, заключается в том, что рассчитываемые функционалы и их дисперсии содержат систематическую ошибку [1]. В MSU используется метод серий, в котором поколения нейтронов группируются в серии. Для снижения систематических ошибок необходимо увеличивать число поколений в одной серии и число нейтронов в поколении, однако четкой методики определения этих величин нет. Реализация методики вычисления систематической ошибки [1], основанной на учете влияния одного поколения на другие, связана со значительными затратами вычислительных ресурсов.

Предлагаемый в настоящей работе метод приближенного определения числа поколений в серии и числа нейтронов в поколении показан на расчете эффективного коэффициента размножения нейтронов K_0 и скорости реакций деления для модели элементарной ячейки ВВЭР-1000. Он может оказаться полезным для понимания расхождений результатов при верификации кодов Монте-Карло, валидации кода MSU, а также проведении связанных нейтронно-физических и теплогидравлических расчетов ядерных реакторов с использованием кодов Монте-Карло. Систематическая ошибка дисперсии скорости реакции деления может приводить

к значительному увеличению числа итераций в связанных расчетах с критериями сходимости, например, критерием [2].

Код MSU имеет широкие возможности для моделирования в реакторах разных типов — ВВЭР, РБМК, быстрые, БРЕСТ-ОД-300 и др. переноса нейтронов, γ -излучения и электронов в 3D-геометрии с помощью аналоговых или весовых методов Монте-Карло [3]. Его можно использовать для расчетов стационарного состояния и выгорания топлива (подмодуль BURN), радиационной защиты, создания групповых библиотек констант, прецизионных связанных расчетов, поскольку он поддерживает многопроцессорный интерфейс, необходимый для ускорения расчетов, использует поточечные и групповые библиотеки эффективных сечений взаимодействия и включает подмодули их преобразования в зависимости от температуры среды. Для учета температурной зависимости эффективные сечения в тепловой области энергии рассчитываются с использованием фоновых спектров — библиотеки THERCON и VESTA, в области разрешенных резонансов — формализмов Брейта—Вигнера, Адлера—Адлера или Рейха—Мура (библиотека LIPAR), неразрешенных резонансов — f -факторов Бондаренко, подгрупповых параметров библиотек BNAB/MSU или MULTIC.