

СТАТЬИ

УДК 621.039.5

МЕТОДИКА И СРЕДСТВА КОНТРОЛЯ ПОДКРИТИЧНОСТИ БАСЕЙНОВ ВЫДЕРЖКИ ХРАНИЛИЩА ОТРАБОТАВШЕГО ЯДЕРНОГО ТОПЛИВА СМОЛЕНСКОЙ АЭС

Гераскин И.Н., Житарев В.Е., Качанов В.М., Краюшкин А.В., Сергеев А.Ю. (НИЦ «Курчатовский ин-т», г. Москва), Кудрявцев А.В., Мартазов Е.С., Федоров В.А. (НИЯУ МИФИ, г. Москва), Абаимов А.Д., Коротышев В.В., Скворцов Д.Н. (Смоленская АЭС, г. Десногорск)

В связи с накоплением большого числа отработавших ТВС и переходом на уплотненный режим их хранения в бассейнах выдержки хранилища АЭС РБМК-1000 для обоснования и контроля ядерной безопасности большое значение приобретают методы определения, оценки и контроля эффективного коэффициента размножения нейтронов $K_{эф}$ или подкритичности $1 - K_{эф}$.

На Смоленской АЭС внедрена расчетно-экспериментальная методика периодического определения и непрерывного контроля $K_{эф}$ всех бассейнов выдержки хранилища отработавшего ядерного топлива на основе нейтронно-физических расчетов и измерений.

Методика консервативной оценки и контроля $K_{эф}$. Методика [1] предполагает использование импульсного нейтронного эксперимента (α -метод), его расчетного моделирования и определения основных нейтронно-физических характеристик бассейна выдержки как размножающей системы, а также непрерывный контроль нейтронного потока в каждом бассейне выдержки. В соответствии с требованиями [2, 3] $K_{эф} \leq 0,95$ для текущего состояния при консервативном подходе во всех оценках методика предусматривает:

стационарный и нестационарный нейтронно-физические расчеты основных характеристик, включая $K_{эф}$;

периодическое измерение импульсным методом константы спада α потока мгновенных нейтронов;

несколько оценок $K_{эф}(\alpha)$ на основании расчетных и экспериментальных данных и выбор консервативного (наибольшего) начального на время определения $(K_{эф})_{\max}$;

непрерывное измерение скорости счета нейтронов установленными в нескольких точках детекторами и вычисление по этим данным текущих $K_{эф}$ с постоянной индикацией, записью и архивированием результатов, выдачей сигналов предупредительной и аварийной сигнализации о достижении установленных контрольных $K_{эф}$.

Нейтронно-физический расчет включает определение поля нейтронов бассейна выдержки, а также моделирование импульсного эксперимента в заданном месте бассейна выдержки с определением константы спада потока нейтронов. Для перехода от расчетных и экспериментальных значений константы спада α к $K_{эф}$ должны быть рассчитаны доля запаздывающих нейтронов $\beta_{эф}$ и время генерации мгновенных нейтронов Λ для текущей загрузки бассейна выдержки.

Измерительно-вычислительная система, соответствующая предложенной методике, включает:

подвеску с импульсной ионизационной камерой деления и импульсным нейтронным генератором, допускающую погружение на глубину бассейна не менее 8 м от верхнего настила;

временной анализатор импульсов ионизационной камеры от потока нейтронов, возникающего после срабатывания импульсного нейтронного генератора;

цифровую программируемую аппаратуру, обеспечивающую управление импульсным нейтронным генератором, регистрацию, запись и накопление измерительной информации, а также последующую обработку этой информации с получением константы α и $K_{эф}$;

многоканальную систему регистрации скорости счета нейтронов детекторами во всех бас-

сейнах хранилища, позволяющую получать, представлять и записывать данные непрерывно во времени с вычислением в режиме on-line $K_{эф}$ по формуле умножения нейтронов источника (после установки начальных условий). Детекторы непрерывного контроля устанавливаются на месте удаленных ТВС, по высоте — в области максимума нейтронного потока от собственного источника.

Следует отметить, что в части импульсного эксперимента и соответствующих расчетов подобные работы ранее были выполнены для хранилища отработавшего ядерного топлива Ленинградской АЭС [4].

Расчетное обеспечение. Для реализации предложенной методики была разработана специальная версия трехмерной нестационарной программы STEPAN [5] — STEPAN-ХОЯТ. В программе расчет ведется в двух энергетических группах в диффузионном приближении. В программу входят блоки, реализующие решение задачи на $K_{эф}$, задачи с источником для расчета поля нейтронов, расчет константы спада потока мгновенных нейтронов, нестационарный расчет, моделирующий эксперимент с импульсным источником нейтронов и нейтронными детекторами и позволяющий определять константу спада на мгновенных нейтронах как функцию координат и времени, расчет времени генерации мгновенных и эффективной доли запаздывающих нейтронов.

В текущей версии программы используется прямоугольная конечно-разностная сетка. Каждый бассейн в плане разбивается на прямоугольные ячейки по числу загруженных ТВС с шагом между рядами и между ТВС в ряду в соответствии со схемой уплотнения, незаполненное пространство разбивается на аналогичные ячейки. Число точек на ячейку в плане существенно меняет $K_{эф}$. По высоте область топлива (7 м) разбита, как правило, на 14 слоев, еще по одному слою высотой 0,5 м добавлено для пространства выше и ниже топлива.

Двухгрупповые сечения для прямоугольных ячеек, полученные с помощью программы WIMS-D4, представлены в виде библиотеки-подпрограммы в функции типа топлива, выгорания, плотности теплоносителя и времени выдержки ТВС после выгрузки из реактора. По типу рассмотрено топливо РБМК разного обогащения без эрбия и с эрбием.

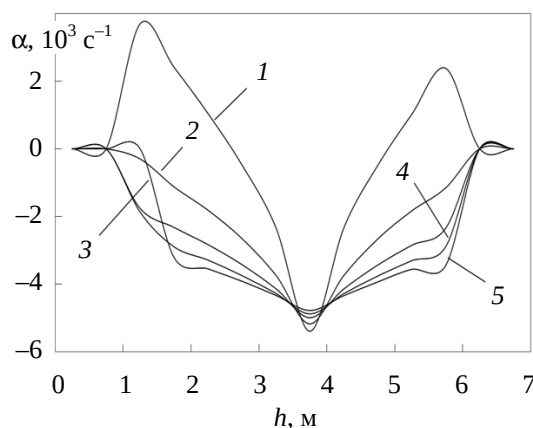
Распределение плотности источников нейтронов деления в стационарном расчете не описывает поле нейтронов в объеме бассейна. Последнее формируется, в основном, нейтронами спонтанного деления, которые генерируются от накопленных в топливе актиноидов, и нейтронами (α, n) -реакции на изотопах кислорода оксидного топлива вследствие α -распада актиноидов. Вклад (γ, n) -реакции в мощность полного собственного источника нейтронов бассейна не учитывается ввиду незначительности спустя характерное время выдержки ТВС в хранилище.

Таким образом, при определении $K_{эф}$ полученное распределение указывает возможную опасную область бассейна с относительно высокими размножающими свойствами. Решение задачи с источником позволяет оценить поле нейтронов и место наибольшего нейтронного потока в бассейне. Эти данные необходимы при планировании измерительно-вычислительной системы, в импульсных измерениях и при установке детекторов постоянного контроля.

Для определения мощности собственного источника спонтанного деления $Q_{с.д.}$ разработана специальная процедура, которая включает в себя расчеты накопления предшественников нейтронов в топливе разного типа и мощности источника нейтронов в зависимости от выгорания и времени выдержки. Спектр нейтронов в топливе твэлов внутреннего и внешнего ряда рассчитывали по программе MCNP [6], выгорание и α -активность топлива и собственного источника для разного времени после останова реактора — по программе CHAIN [7]. Рассматривается урановое топливо обогащением 2 и 2,4% без эрбия и обогащением 2,6 и 2,8% с содержанием эрбия 0,41 и 0,6% соответственно. Для всех типов ТВС были сформированы индивидуальные зависимости интенсивности $Q_{с.д.} = f(k, B, T)$, где k, B — тип и выгорание топлива соответственно; T — время после извлечения ТВС из реактора.

Аксиальное распределение выгорания топлива реакторов Смоленской АЭС рассчитано с помощью программы STEPAN путем восстановления распределения по показаниям нейтронных детекторов.

Нейтронное распределение, рассчитанное в задаче с источником нейтронов спонтанного деления и (α, n) -реакции, используется при мо-



Р и с. 1. Рассчитанная по программе STEPAN-ХОЯТ константа спада в функции аксиальной координаты и времени после импульса нейтронов 0,1 (1), 0,5 (2), 1 (3), 1,5 (4), 2 мс (5) при расположении импульсного источника на середине высоты топлива в ТВС

делировании импульсного эксперимента в качестве начальных условий (рис. 1).

По расчетной схеме, реализованной в программе STEPAN-ХОЯТ, были выполнены некоторые вариантные методические расчеты и полный предварительный расчет одного из бассейнов выдержки ($K_{уп} = 1$) хранилища отработавшего топлива Смоленской АЭС. По результатам расчетов были сделаны следующие основные выводы, обосновывающие и оптимизирующие как схему и порядок расчетов, так и работу с измерительной аппаратурой:

коэффициент размножения заполненного бассейна выдержки при неуплотненном хранении $K_{эф} \sim 0,4$;

удаление из бассейна до девяти соседних ТВС (3×3) вносит изменение $\Delta K_{эф} < 0,1\%$;

увеличение числа расчетных точек на ячейку с ТВС в плане бассейна выдержки мало влияет на подкритичность;

расчетное нейтронное распределение при решении задачи на $K_{эф}$ имеет резкий максимум в плане, по высоте бассейна и сосредоточено в верхнем слое топлива (0,5 м от верха топлива), где меньше выгорание и больше размножающие свойства;

распределение нейтронов в задаче с источником равномернее и отражает распределение мощности источника спонтанного деления с широким максимумом на уровне верхней части нижней секции ТВС;

при размещении детектора в одной ячейке с импульсным источником импульс последнего находит заметный отклик на расстоянии не бо-

лее 2 м вниз и вверх от него, оптимальное расположение детектора составляет около 0,5 м от мишени импульсного нейтронного генератора, при этом константа спада наиболее устойчива во времени в течение $\sim 0,5$ —2 мс после импульса;

максимальная установившаяся (консервативная) константа спада, превышающая ее теоретическое значение, достигается в верхнем слое топлива в ячейке с максимумом нейтронного распределения в задаче на $K_{эф}$, в середине топлива α уменьшается, однако указанные отклонения не превышают $\sim 10\%$;

удаление ТВС вокруг ячейки с импульсным генератором и детектором слабо изменяет $K_{эф}$, заметнее уменьшает константу спада α (на 3—5% удаление четырех ТВС);

расчетные $\beta_{эф}$ и Λ принимают установившиеся значения спустя 1,5—2 мс после импульса источника, и их использование приводит к консервативным $K_{эф}$.

Аппаратурно-техническое обеспечение.

Опытный образец измерительно-вычислительной системы для контроля $K_{эф}$ (подкритичности) был смонтирован и находится в опытно-промышленной эксплуатации в хранилище отработавшего ядерного топлива с 2011 г. Система состоит из двух независимых подсистем — импульсного и непрерывного методов контроля.

Подсистема импульсного контроля, реализующая нейтронный импульсный метод измерения константы спада α с расчетным сопровождением по программе STEPAN-ХОЯТ, предназначена для периодической оценки нейтронно-физических характеристик в любом бассейне. Она включает измерительный блок, блок управления и регистрации, переносной персональный компьютер с преобразователем интерфейса ПИ-05 и пакетом специализированных программ, реализующих процесс измерений, обработку и представление результатов, комплект линий связи.

Стальной герметичный измерительный блок диаметром 65 мм содержит нейтронную ионизационную камеру деления КНТ-54-1 и импульсный нейтронный генератор. Выбран каротажный генератор диаметром 34 мм с повышенной рабочей температурой до 120°C и выходом $0,5 \cdot 10^6$ нейтронов энергией 14 МэВ в импульсе длительностью 1 мкс, частота нейтронных им-

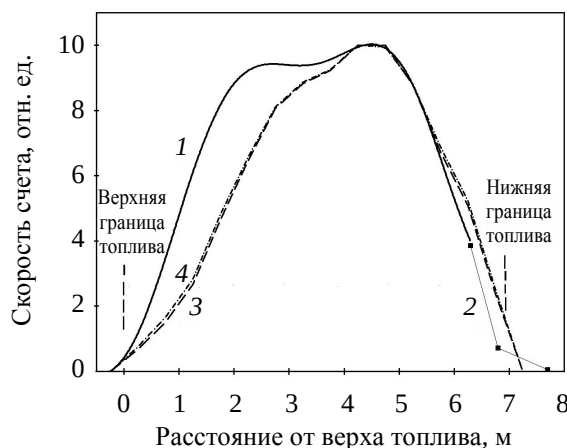
пульсов — от одиночных до 20 Гц. Генератор не требует подвода высоковольтного питания. Расстояние от D—Т-мишени генератора до середины чувствительной области камеры деления можно установить равным от 250 до 500 мм.

Блок управления и регистрации обеспечивает регистрацию импульсов на последовательных временных интервалах (до 8000) длительностью от 0,5 до 1000 мкс.

Подсистема непрерывного метода контроля, стационарно установленная в бассейнах выдержки хранилища, содержит 20 подвесок камер деления КНТ-31, блок обработки сигналов детекторов, устройство индикации и регистрации, комплект линий связи. Выходными данными устройства индикации и регистрации являются текущее значение $K_{эф}$, звуковой и световой сигналы при превышении соответствующих предупредительных и аварийных уставок и при отказах в работе подсистемы. Устройство обеспечивает индикацию основных измеряемых и расчетных сигналов и параметров, накопление архива данных и их передачу в персональный компьютер.

В настоящее время в каждом бассейне хранилища установлены по четыре подвески с ионизационными камерами подсистемы непрерывного контроля, расположенными по высоте в области максимума нейтронного потока от собственного источника.

Испытания. В процессе реализации методики и системы контроля подкритичности хранилища отработавшего ядерного топлива проводились тестирование и испытание расчетных и экспериментальных средств, обеспечивающих работу системы. Стационарные расчеты $K_{эф}$ показали, что при расчете с шагом 0,5 м по высоте бассейна плотность источников деления в топливе имеет максимум в верхнем расчетном слое, что обусловлено профилем выгорания ТВС. Измерения и расчеты аксиального распределения нейтронов неоднократно выполнялись в разных бассейнах хранилища. На рис. 2 показаны результаты трех измерений и двух расчетов при решении задачи с источником по программе STEPAN-ХОЯТ. Экспериментальные значения усреднены и аппроксимированы полиномом 9-й степени. Отдельно показаны точки в области нижней границы топлива, где измерения проводены один раз. Видны некоторые отличия в форме измеренного и рассчитанного распре-



Р и с. 2. Измеренная аксиальная плотность потока нейтронов, аппроксимированная полиномом 9-й степени, в бассейне выдержки 2 (1) хранилища отработавшего топлива Смоленской АЭС в 2008 г., бассейна 4 (2) в 2011 г., рассчитанная для бассейна 4 (3) в 2011 г. и бассейна 2 (4) в 2014 г.

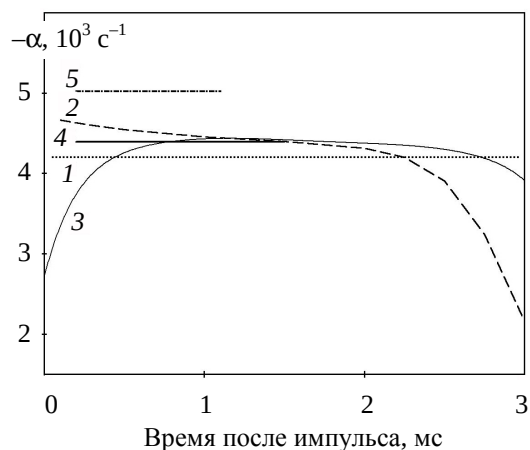
ления, определяемые как погрешностями экспериментальных данных (небольшая статистика счета $\leq 103 \text{ с}^{-1}$) и аксиальной координаты ионизационной камеры ($\pm 0,15 \text{ м}$) при измерениях, так и отличием реального распределения выгорания от заданного в программе. Полученные данные были использованы при выборе мест установки ионизационных камер подсистемы непрерывного контроля по высоте бассейна — на уровне середины ТВС.

Как показали тестовые расчеты для реальных загрузок бассейна, $K_{эф}$ слабо чувствителен к образованию локальных полостей в загрузке: извлечение девяти (3×3) соседних ТВС изменяет $K_{эф}$ менее чем на 0,1%. Для установки ионизационных камер подсистемы непрерывного контроля в бассейнах 1, 2, 3 сдвигом подвесок ТВС были освобождены по четыре полости размером каждая 2×2 ячейки, в бассейне 4 образованы четыре полости по две ячейки в каждой.

В импульсном эксперименте, проведенном в 2014 г., измерительный блок с нейтронным генератором и ионизационной камерой поочередно размещали в одной из полостей каждого бассейна после извлечения подвески непрерывного контроля. Расстояние от ионизационной камеры до мишени нейтронного генератора было установлено равным 50 см (камера ниже). Расстояние до ионизационной камеры (точка измерения) от настила бассейна сохранялось равным 4,75 м (в бассейне 2 дополнительно выполнено измерение на глубине 8,1 м). Эти расстояния были выбраны с учетом расчетов по программе

СТЕРАН-ХОЯТ и измерений аксиального нейтронного распределения. Измерения в ячейках с максимумом радиального распределения из задачи на $K_{эф}$ не предусмотрены по технологическим соображениям.

В табл. 1 приведены основные результаты расчетов по программе СТЕРАН-ХОЯТ по состоянию загрузки бассейнов на конец июня 2014 г.: результат решения условно-критической задачи $K_{эф}$, теоретическая константа спада потока мгновенных нейтронов α_0 , модельный расчет импульсного эксперимента, где α_h — установившаяся во времени константа спада на глубине h от верха топлива и на расстоянии 0,5 м от импульсного источника в указанной ячейке бассейна, $\alpha_{\Sigma F}$ — установившаяся константа спада, рассчитанная по суммарному сигналу всех ячеек расчетной сетки в объеме бассейна с учетом весовых коэффициентов, равных текущей плотности потока нейтронов. Область установившихся значений (изменение менее 10%) константы спада во всех случаях можно наблюдать при 0,5—2,25 мс после импульса источника. На рис. 3 показано изменение во времени константы спада, рассчитанной для бассейна 2 (импульсный источник в ячейке Л70-04). По указанным в табл. 1 константам



Р и с. 3. Расчетная константа спада потока мгновенных нейтронов α_0 (1), установившаяся по суммарному сигналу источника на глубине 0,75 м $\alpha_{\Sigma F}$ (2), по времени на глубине 0,25 (3), 0,75 (4), 4,1 м (5) от верха топлива и на расстоянии 0,5 м от импульсного источника для ячейки Л70-04 бассейна 2 хранилища отработавшего ядерного топлива Смоленской АЭС

спада с использованием расчетных установившихся $\beta_{эф}$ и Λ вычислены соответствующие коэффициенты размножения.

Расчет для бассейна 2 показал, что в области максимума размножающих свойств по задаче на $K_{эф}$ (верхняя расчетная зона топлива в ячейке Л52-20) константа спада как α_h , так и $\alpha_{\Sigma F}$ меньше на 7%, чем в месте размещения детектора

Таблица 1. Основные расчетные характеристики бассейнов выдержки хранилища отработавшего ядерного топлива Смоленской АЭС по состоянию на июнь 2014 г. ($h = 0,25$ м в бассейнах 1—3, $h = 0,75$ м в бассейне 4)

Параметр	Бассейн выдержки				
	1	2	3	4	
	Коэффициент уплотнения				
	1,67	2	2	1	
	Число ТВС				
	6992 (6948)	8080	4986 (2496)	3248	
	Ячейка с импульсным нейтронным генератором				
	Л24-04	Л70-04	Л52-20	П24-04	П24-08+09
$-\alpha_0, \text{с}^{-1}$	4178	4201		4204	4455
$-\alpha_{\Sigma F}, \text{с}^{-1}$	4732	4400	4070	—	4524
$-\alpha_h, \text{с}^{-1}$	4731	4420	4101	4487	4577
$\beta_{эф}$	0,006148	0,006216		0,006069	0,006960
$\Lambda, \text{мс}$	0,1535	0,1250		0,1256	0,3245
$K_{эф}$	0,60415	0,65348		0,65249	0,39278
$K_{эф}(\alpha_0)$	0,6116	0,6584		0,6597	0,4101
$K_{эф}(\alpha_{\Sigma F})$	0,5814	0,6478	0,6655	—	0,4064
$K_{эф}(\alpha_h)$	0,5813	0,6467	0,6638	0,6421	0,4035

Таблица 2. Импульсные измерения в бассейнах выдержки хранилища отработавшего ядерного топлива Смоленской АЭС в 2011 г. на глубине 0,75 м (в бассейне 4 $-\alpha_{zh} = -4860 \pm 130 \text{ с}^{-1}$)

Параметр	Бассейн выдержки				
	1	2	3	4	
	Коэффициент уплотнения				
	1,67	2	2	1	
	Ячейка с измерительным блоком				
	Л24-04	Л70-04	П24-04	П24-09	
	Глубина от верха топлива, м				
	0,75	0,75	4,1	0,75	0,95
	Глубина от настила бассейна, м				
	4,75	4,75	8,1	4,75	4,75
$-\alpha_{zh}, \text{ с}^{-1}$	4730 ± 20	4390 ± 25	5020 ± 30	4670 ± 50	4800 ± 30
$K_{эф} (\alpha_{zh})$	$0,581 \pm 0,034$	$0,648 \pm 0,032$	—	$0,633 \pm 0,033$	$0,392 \pm 0,034$

нейтронов в эксперименте Л70-04, что соответствует $\Delta K_{эф} \sim 1,7\%$. Результаты для бассейна 3 — частично уплотненного $K_{уп} = 2$ и с большим числом незагруженных ячеек в целом характерны для системы с $K_{уп} = 2$. Выбранная для импульсного эксперимента ячейка находится в уплотненном массиве ТВС. Из-за большой неоднородности загрузки в модельном импульсном расчете данного бассейна не наблюдается установившихся значений α_{ZF} .

Коэффициенты размножения $K_{эф} (\alpha_0)$ немного превышают полученные в задаче на $K_{эф}$, а также по константам спада, рассчитанным для мест установки подвесок непрерывного контроля (до $\leq 3\%$), но в бассейне 2 $K_{эф} (\alpha_0)$ меньше на $\sim 0,7\%$ рассчитанного по константам спада в максимуме размножающих свойств (Л52-20). Во всех бассейнах $K_{эф}$ в условно-критической задаче отличается от вычисляемых по любым константам спада в пределах 1—2%.

Измеренная константа спада потока мгновенных нейтронов на глубине h в топливе α_{zh} для четырех бассейнов в 2014 г. приведена в табл. 2. Показаны случайные погрешности, вычисленные при обработке спектров импульсов методом наименьших квадратов. Область обработки спектров для получения константы спада на глубине h составила около 0,2—1,5 мс. В табл. 2 приведены $K_{эф}(\alpha_{zh})$ и среднеквадратичные погрешности $\Delta K_{эф}$, вычисленные с использованием рассчитанных (установившихся) $\beta_{эф}$ и Λ и оценок их относительных среднеквадратичных погрешностей $\delta\beta_{эф} = \delta\Lambda = 0,1$. При этом

погрешности константы спада незначительны при $\delta\alpha \leq 0,05$. Поэтому для всех бассейнов погрешность $\Delta K_{эф} \sim \pm 3\%$.

Для бассейна 2 импульсные измерения и расчеты в ячейке с немаксимальными размножающими свойствами могут снизить на 1—2% оценку $K_{эф}$.

Таким образом, для каждого бассейна выдержки получены близкие расчетные и экспериментальные $K_{эф}$, из которых согласно консервативному подходу [2] выбраны наибольшие $(K_{эф})_{\text{макс}}$. Полученные таким образом значения с учетом консервативной погрешности 3% были установлены как исходные после завершения испытаний в системе непрерывного контроля — 0,642, 0,696, 0,690, 0,440 для бассейнов выдержки 1—4 хранилища отработавшего ядерного топлива Смоленской АЭС.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Способ** контроля безопасности бассейнов выдержки хранилищ отработавшего ядерного топлива АЭС. Патент РФ RU(11) 2 488 181(13) С1. — Бюл. «Изобретения. Полезные модели», 2013, № 20.
2. **Правила** безопасности при хранении и транспортировании ядерного топлива на объектах использования атомной энергии НП-061—05. М., Ростехнадзор, 2005.
3. **Правила** ядерной безопасности для объектов ядерного топливного цикла НП-063—05. М., 2005.
4. **Методика** контроля подкритичности хранилищ отработавшего ядерного топлива Ленинградской АЭС с помощью установки УИП-06. РДЭО 0613—2005. М., Концерн «Росэнергоатом», 2005.
5. **Кубарев А.В., Краюшкин А.В.** Программа STEPAN-S для расчета характеристик ядерной безопасности. Тези-

- сы докл. VII Всес. сем. по проблемам физики реакторов «Волга-1991». М., ЦНИИАтоминформ, 1991, с. 229—230.
6. **MCNP-4A** Monte Carlo N-Particle Transport Code System. LA-12625-M, 1993.

7. **Давыдова Г.Б.** Программа расчета изотопного состава CHAIN. — В сб.: 13-й семинар по проблемам физики реакторов «Волга-2004». М., МИФИ, 2004, с. 151—153.

Поступила в Редакцию 22.05.15

УДК 621.039.51

УЧЕТ АНИЗОТРОПИИ РАССЕЯНИЯ В МНОГОГРУППОВЫХ РАСЧЕТАХ ЯЧЕЕК ТИПА ВВЭР МЕТОДОМ ПОВЕРХНОСТНЫХ ПСЕВДОИСТОЧНИКОВ

Султанов Н.В. (НИЦ «Курчатовский ин-т», г. Москва)

В настоящее время в реакторной практике установились два расчетных подхода. Первый относится к проектным расчетам, которые позволяют для некоторого ограниченного класса задач определять реакторные характеристики с достаточной точностью за короткое время. Бенчмарк-расчеты относятся к второй группе. Здесь точность результатов ограничивается только неопределенностями знания микросечений. Однако эти расчеты требуют большого времени и поэтому используются для оценки точности проектных кодов в некотором числе состояний. Для этого подхода непросто анализировать даже промежуточные (интерполяция), в частности, состояния за пределами бенчмарк-расчетов (экстраполяция). Предпочтительнее применять последовательный подход с использованием методов, в которых начальное число приближений удовлетворяет требованиям проектных расчетов, результаты — бенчмарк-расчетам. Такой подход есть и развивается группой исследователей. Первым является метод поверхностных псевдоисточников, который применяется для расчета характеристик ячеек, вторым — метод поверхностных гармоник, используемый для расчета как кассет, так и крупносеточного расчета реактора в целом. В настоящей работе разработана методика учета анизотропии рассеяния в методе поверхностных псевдоисточников для уточнения многогрупповых расчетов одномерных (приближение Вигнера—Зейца) и двумерных цилиндрических ячеек, находящихся в сильно неоднородных нейтронных полях.

В многогрупповых расчетах цилиндрических ячеек ядерных реакторов анизотропия рассеяния почти всегда учитывается в транспортном приближении, которое позволяет решать уравнение переноса нейтронов в изотропном

приближении с соответствующей корректировкой сечений рассеяния [1]. Линейно-анизотропное приближение в одnogрупповом случае усложняет расчеты, что влечет за собой увеличение времени. Метод поверхностных псевдоисточников позволяет этого избежать, так как в нем анизотропия рассеяния может быть учтена достаточно просто. В настоящее время в связи с ростом мощностей вычислительной техники анизотропия рассеяния стала учитываться [2, 3]. Так, в работе [3], использующей метод вероятностей прохождения, различие $K_{эф}$ в многогрупповых расчетах кассет ВВЭР-1000 и сборок ZR-6 между транспортным и анизотропным приближением достигает 0,5—0,7%, отличие линейно-анизотропного приближения от точного $K_{эф}$ составляет меньше 0,25%. Но при этом необходимо большое время расчета, что затрудняет оперативный инженерный расчет. В настоящей статье предлагается многогрупповые расчеты ячеек проводить сначала с учетом анизотропии рассеяния с использованием метода поверхностных псевдоисточников, затем в малогрупповом приближении рассчитывать кассеты и реактор в целом методом поверхностных гармоник [4]. При таком подходе время расчета с учетом анизотропии рассеяния будет мало отличаться от времени транспортного приближения. Преимущества данного подхода перед другими как дифференциальными (методы сферических гармоник в P_N -приближении, дискретных ординат в S_N -приближении, характеристик и др.), так и интегральными методами (метод вероятности первых столкновений) приведены в работе [5].

Метод расщепления оператора для решения уравнения переноса нейтрона с анизотропным рассеянием. Решается многогрупповое уравнение переноса нейтронов внутри