

Радиоактивность теплоносителя реактора БОР-60

И. Г. КОБЗАРЬ, В. В. КОНЯШОВ, Е. С. ЛИСИЦЫН,
Г. И. ПОЗНЯК, В. И. ПОЛЯКОВ, Ю. В. ЧЕЧЕТКИН

УДК 621.039.534.63:539.16

Широкое внедрение в народное хозяйство АЭС с реакторами на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем требует тщательного изучения вопросов их безопасного обслуживания и, в частности, изучения источников радиоактивности, переноса и накопления радиоактивных изотопов в отложениях по контуру и оборудованию реакторных установок. С целью проведения подобных исследований на реакторе БОР-60 создан экспериментальный комплекс, включающий натриевые и газовые спектрометрические петли, оснащенные специальной аппаратурой. Разработанная методика с применением сменных коллиматоров и сцинтилляционных и полупроводниковых $\text{Ge}(\text{Li})$ -детекторов позволяет производить беспроботборное определение величины радиоактивности различных изотопов в теплоносителе и на стенках трубопроводов и оборудования [1]. Кроме того, для измерения радиоактивности теплоносителя использовали радиохимический и γ -спектрометрический анализы проб с применением $\text{Ge}(\text{Li})$ -детекторов и кристаллов $\text{NaI}(\text{Tl})$.

При работе реактора основные поля ионизирующего излучения от оборудования и коммуникаций установки обусловлены излучением изотопа Na^{24} , мощность дозы γ -излучения достигает 7 p/сек в боксе технологического оборудования при мощности реактора 40 Мвт . Активность Na^{24} , измеренная при различных уровнях мощности реактора и приведенная к максимальной мощности 60 Мвт , остается практически постоянной. Удельная активность других короткоживущих изотопов Ne^{23} и F^{20} изменяется примерно обратно пропорционально расходу теплоносителя. В табл. 1 приведены величины активности основных короткоживущих изотопов в натриевом теплоносителе на выходе из реактора.

Через 8—12 дней после остановки реактора активность Na^{24} становится меньше активности Na^{22} ($T_{1/2} = 2,6 \text{ года}$) и $\text{Ag}^{110\text{m}}$ ($T_{1/2} = 253 \text{ дня}$), которые в дальнейшем определяют радиационную обстановку в боксах технологического оборудования первого контура. Средние величины по результатам анализов радиоактивности долгоживущих изотопов в натриевом теплоносителе и их изменение со временем работы реактора представлены в табл. 2. Характерно, что после работы реактора в течение 216 эффективных суток (мощность 40 Мвт) активность основных коррозионных элементов (Cr^{51} , Mn^{54} , Fe^{59} , Co^{58} , Co^{60}) в натриевом теплоносителе не превышает $(0,5-3) \cdot 10^{-7} \text{ кюри/кг}$ натрия. Активность продуктов деления в натриевом теплоносителе в рассматриваемый период времени при достижении максимального выгорания в активной зоне 5,9%, несмотря на присутствие в активной зоне пакета твэлов с узлами газовой негерметичности (выгорание 2,7%), была ниже чувствительности применяемых в анализах методик ($\leq 5 \cdot 10^{-8} \text{ кюри/кг}$ натрия).

Экстраполяция экспериментальных величин радиоактивности Na^{22} к насыщению при мощности реактора 60 Мвт дает величину $2 \cdot 10^{-3} \text{ кюри/кг}$ натрия (расчетное значение, принятое при проектировании реактора, $4 \cdot 10^{-3} \text{ кюри/кг}$ натрия [2]).

Появление в теплоносителе радиоактивных изотопов (см. табл. 2) обусловлено активацией примесей в натрии. Дополнительный источник серебра, цинка и сурьмы

Радиоактивность натриевого теплоносителя, определяющая основные поля ионизирующего излучения от коммуникаций и оборудования реактора (мощность реактора 60 Мвт , расход теплоносителя $800 \text{ м}^3/\text{ч}$)

Таблица 1

Изотопы	Период полураспада	Реакция образования изотопа из Na^{23}	Экспериментальная величина удельной активности, кюри/кг натрия	Расчетная величина удельной активности, кюри/кг натрия [2]
Na^{24}	14,8 ч	(n, γ)	43 ± 5	57
Ne^{23}	38 сек	(n, p)	$1,8 \pm 0,8$	1,5
F^{20}	11,5 сек	(n, α)	$1,6 \pm 0,3$	—

возникает, вероятно, за счет избирательной коррозии стали. Это подтверждается результатами определения перечисленных элементов в натрии и стали химико-аналитическими и спектральными методами.

Анализ данных, приведенных в табл. 2, показывает, что изменение активности $\text{Ag}^{110\text{m}}$ со временем происходит быстрее, а Zn^{65} медленнее, чем следует из законов активации и распада. Согласно расчетам, среднее увеличение содержания серебра в контуре составляет 4 мг/сутки , а уменьшение цинка 3 мг/сутки . Результаты расчета хорошо согласуются со спектральным анализом серебра в натрии, подтвердившим увеличение серебра от $7 \cdot 10^{-7}$ до $5 \cdot 10^{-5} \text{ вес. \%}$. Выведение цинка из теплоносителя было доказано также результатами γ -спектрометрических измерений на холодной ловушке окислов натрия, в которой концентрация изотопа Zn^{65} в 15—20 раз выше, чем в трубопроводе первого контура.

Измерения на трубопроводах беспроботборным методом показали, что активность в отложениях $\text{Zn}^{65} \leq 2 \cdot 10^{-4} \text{ кюри/м}^2$, $\text{Ag}^{110\text{m}} \leq 1 \cdot 10^{-3} \text{ кюри/м}^2$.

Полученный изотопный состав натриевого теплоносителя отличается от предполагавшегося в расчете при работе с герметичными твэлами (Na^{22} , Mn^{54} , Co^{58}) [2] и известного по опыту эксплуатации других реакторов (Na^{22} , продукты деления) [3].

Таким образом, проведенные исследования показывают, что в натриевом теплоносителе при длительной эксплуатации реактора с герметичными твэлами и пакетом твэлов с узлами газовой негерметичности практи-

Радиоактивность натриевого теплоносителя, определяющая основные поля ионизирующего излучения от коммуникаций и оборудования остановленного реактора

Таблица 2

Время окончания кампании	Радиоактивность, кюри/кг натрия				
	Na^{22}	$\text{Ag}^{110\text{m}}$	Zn^{65}	Rb^{86}	Sb^{125}
Август 1970 г.	$4 \cdot 10^{-5}$	$1,2 \cdot 10^{-5}$	$0,9 \cdot 10^{-5}$	—	—
Ноябрь 1970 г.	$4,9 \cdot 10^{-5}$	$1,6 \cdot 10^{-5}$	$0,95 \cdot 10^{-5}$	$3,8 \cdot 10^{-5}$	$2 \cdot 10^{-7}$
Февраль 1971 г.	$7,3 \cdot 10^{-5}$	$2,5 \cdot 10^{-5}$	$1,2 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-4}$	$1,4 \cdot 10^{-6}$
Август 1971 г.	$1,9 \cdot 10^{-4}$	$0,9 \cdot 10^{-5}$	$2,0 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-4}$	$1,6 \cdot 10^{-6}$

чески отсутствуют радиоактивные продукты деления и продукты коррозии основных компонентов конструкционных материалов. Радиоактивность теплоносителя обусловлена активацией натрия, его примесей и избирательным выходом из стали в натрий серебра, цинка, сурьмы.

Поступило в Редакцию 31/I 1972 г.

Реактор с эксцентрично расположенной активной зоной

Л. А. МАРЦЫМОВА, Б. З. ТОРЛИН

УДК 621.039.51

При разработке проекта реконструкции экспериментального тяжеловодного реактора ИТЭФ активная зона была размещена эксцентрично относительно тяжеловодного бака (рис. 1). Такое решение обеспечивает существенное снижение фона быстрых нейтронов и γ -квантов в уже имевшихся экспериментальных каналах. Возникла необходимость оценить эффект перекоса нейтронного поля в связи с тем, что толщина тяжеловодного отражателя, окружающего активную зону реактора, оказалась переменной по азимуту. Так как при этом отражатель оставался все-таки достаточно толстым, перекоса поля в активной зоне был незначительным. Наибольший интерес представлял перекоса «всплеска» потока тепловых нейтронов в отражателе.

Для описания поля нейтронов в отражателе использовалось двухгрупповое диффузионное приближение. Учитывая однородность свойств среды по высоте обеих зон реактора, высотную зависимость потоков нейтронов можно считать пропорциональной $\sin(\alpha_z z)$.

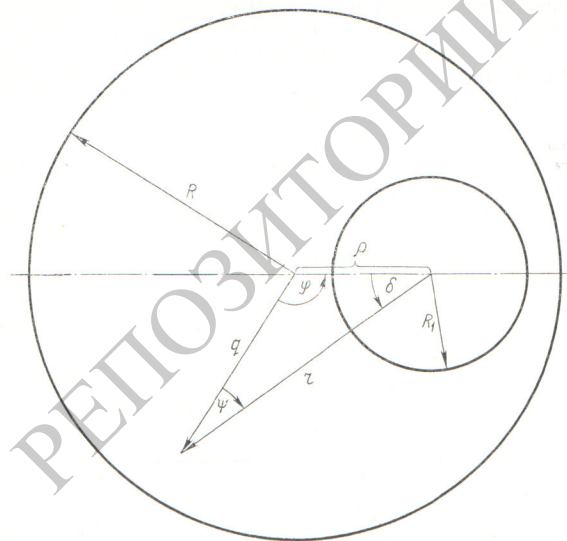


Рис. 1. Размещение активной зоны реактора ИТЭФ в тяжеловодном баке (по проекту реконструкции):

(q, φ) и (r, δ) — соответственно цилиндрические координаты произвольной точки отражателя относительно центра бака и центра активной зоны.

ЛИТЕРАТУРА

1. В. И. Поляков, Ю. В. Чечеткин. «Атомная энергия», 31, вып. 2, 139 (1971).
2. А. И. Лейпунский и др. Препринт ФЭИ-187 (1969).
3. А. И. Лейпунский и др. «Атомная энергия», 23, вып. 6, 503 (1967).

Азимутально-радиальную зависимость потоков соответственно тепловых и замедляющихся нейтронов представим в виде

$$N(r, \delta) = \sum_{-\infty}^{\infty} N_k(r) e^{ik\delta};$$

$$n(r, \delta) = \sum_{-\infty}^{\infty} n_k(r) e^{ik\delta}$$

(принятые здесь обозначения геометрических величин показаны на рис. 1, а другие обозначения взяты из книги А. Д. Галанина [1]).

Введем в рассмотрение векторы $\mathbf{N}(r)$ и $\mathbf{n}(r)$, компонентами которых являются угловые гармоники плотностей соответственно тепловых и замедляющихся нейтронов $N_k(r)$ и $n_k(r)$. Тогда, рассматривая активную зону как размножающий и поглощающий нейтроны блок, можем заменить его граничными условиями вида

$$\mathbf{N}'(R_1) = \hat{\lambda} \mathbf{N}(R_1) + \hat{v} \mathbf{n}(R_1);$$

$$\mathbf{n}'(R_1) = \hat{\lambda} \mathbf{n}(R_1) + \hat{v} \mathbf{N}(R_1),$$

где $\hat{\lambda}$, $\hat{v}$, $\hat{\lambda}$ и $\hat{v}$ — диагональные матрицы, элементы которых весьма просто могут быть выражены через двухгрупповые параметры активной зоны. На внешней поверхности реактора

$$\mathbf{N}(R) = \mathbf{n}(R) = 0.$$

В этом случае можно воспользоваться матричным гетерогенным уравнением А. Д. Галанина [2]

$$\hat{M} \mathbf{N}(R_1) = \mathbf{N}(R_1), \quad (1)$$

где $\hat{M}$ — матрица, элементы которой могут быть выражены через параметры отражателя и эксцентриситет активной зоны с использованием указанных граничных условий. Процедура вычисления матричных элементов описана в книге [2].

Уравнение (1) позволяет найти условие критичности системы и перекоса потока нейтронов на границе активной зоны и отражателя. Это уравнение решалось методом теории возмущения. Решение сравнивалось с точным решением, полученным численным методом. В качестве невозмущенной системы принималась система с бесконечным отражателем. В этом случае все недиагональные члены матрицы $\hat{M}$ становятся нулями и решением уравнения

$$\hat{M}^{(0)} \mathbf{N}^{(0)} = \mathbf{N}^{(0)}$$