

УДК 621.039.5

РАДИАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЕВРОПИЙСОДЕРЖАЩИХ ОРГАНОВ СУЗ РЕАКТОРА СМ-2 ПОСЛЕ ДЛИТЕЛЬНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Клочков Е.П., Рисованный В.Д., Ванев Ю.Е., Дорофеев А.Н.
(ФГУП ГНЦ РФ НИИАР)

В регулирующих органах СУЗ ядерных реакторов широко применяются композиции на основе оксида европия, которые характеризуются высоким сечением поглощения нейтронов и радиационной стойкостью при реакторном облучении. В частности, в реакторах атомных ледоколов регулирующие органы эксплуатируются без перегрузки более 20 лет. По оценкам в активных зонах транспортных реакторов, эксплуатация которых завершена до 1997 г., накоплено более $7,4 \cdot 10^{18}$ Бк радиоактивных изотопов европия ($^{152,154}\text{Eu}$). Европиевые поглотители используются также в исследовательском реакторе СМ-2 и реакторах на быстрых нейтронах БН-600, БОР-60, где накопилось более $2,6 \cdot 10^{17}$ Бк [1].

В настоящее время возникли серьезные проблемы при хранении и переработке поглощающих элементов (пэлов) регулирующих органов вследствие накопления в них изотопов европия с высокой удельной активностью $3,7 \cdot 10^{11}$ — $2,2 \cdot 10^{12}$ Бк/г и длительным периодом полураспада (до 13 лет).

Предварительное рассмотрение геометрических и радиационных характеристик отработавших пэлов с $^{152,154}\text{Eu}$ показало, что их можно использовать в качестве γ -источников промышленных установок для радиационной обработки различных материалов [1, 2]. С 1990 г. в НИИАРе начаты систематические исследования характеристик европийсодержащих пэлов, эксплуатация которых завершена и которые хранятся в бассейнах выдержки или спецхранилищах. На основании этих исследований, проводимых поэтапно, определяются радиационные характеристики органов СУЗ СМ-2, БН-600 после их эксплуатации и длительного хранения, разрабатывается технология изготовления и конструкция γ -источников на их основе.

В настоящей статье описана расчетно-экспериментальная методика и изложены результаты исследований радиационных характеристик пэлов на основе европия в компенсирующих органах СУЗ реактора СМ-2 (см. таблицу).

Характеристики отработавших пэлов СМ-2
по данным на июль 2001 г.

Число пэлов	Время нахождения в активной зоне, год	Год выгрузки
50	7	1989
50	4	1982
29	1,5	1994
29	0,25	1997
156	13,5	1990
52	8	1990
52	3	1996
44	7	1985
33	2	1987
11	4	1986
11	0,25	1990
11	4	1997
76	12	1990
76	8	1986

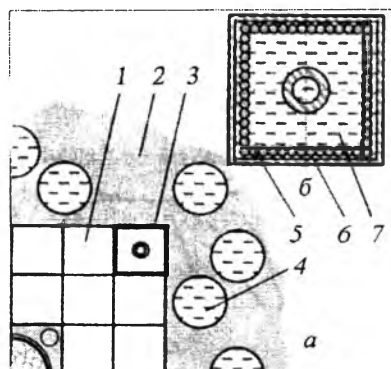
Компенсирующий орган (рис. 1) состоит из нижней топливной подвески (рабочая ТВС) и верхней поглощающей части с 52 пэлами (по 13 пэлов на каждой грани). Пэл представляет собой стержень диаметром 4,1 мм и высотой 360 мм. Внутри его стальной оболочки толщиной 0,3 мм находится сердечник диаметром 3,5 мм из оксида европия (Eu_2O_3) плотностью $5,7 \text{ г/см}^3$. Выбранный для исследований компенсирующий орган отработал в активной зоне реактора в штатном режиме 13,5 лет с 1977 г. За это время его 27 раз извлекали из активной зоны и устанавливали обратно без сохранения азимутальной ориентации граней. В течение 10 лет до начала исследований он находился в бассейне выдержки. После разборки

компенсирующего органа была проведена γ -спекторметрия 24 пэлов, для каждого из которых получено высотное распределение активности изотопов европия [3].

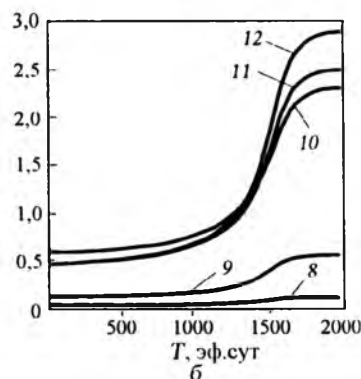
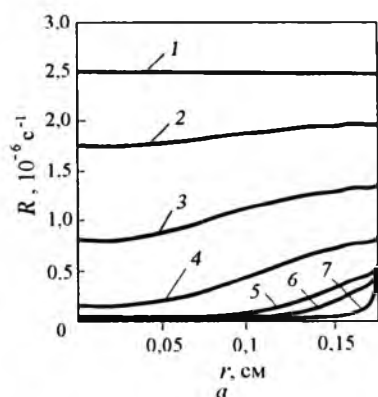
Для моделирования условий облучения пэлов использовали реализованный в программе MCU-RR [4] алгоритм АЛИГР расчета скоростей реакций на изотопах европия в два этапа. На первом этапе решалась условно критическая задача (см. рис. 1, а) и запоминались параметры всех нейтронов, попадающих во внутреннюю полость компенсирующего органа. На втором этапе решалась задача с заданным поверхностным источником нейтронов (см. рис. 1, б), сформированным на первом этапе, с условиями поглощения при вылете нейтронов через любую его грань. Во время прослеживания траекторий нейтронов в объеме компенсирующего органа регистрировали высотное и радиальное распределение скорости захвата нейтронов на изотопах европия $^{151-155}\text{Eu}$. Такие двухэтапные расчеты были проведены для четырех высотных положений компенсирующего органа. Для любого промежуточного положения скорость реакции определяли с помощью подготовленных заранее полиномиальных зависимостей. Для решения уравнений кинетики накопления изотопов европия в объеме пэла при разбиении его на радиальные зоны и высотные слои была создана программа КОСМЕУ, работающая с базой данных, в которой содержатся значения эксплуатационных характеристик реактора (графики перемещения органов СУЗ и изменений мощности), а также параметры полиномов, описывающих высотное и радиальное распределение скорости реакции в объеме пэла для всех изотопов европия на каждом шаге облучения (рис. 2—4).

Для пэла, разбитого на 35 радиальных зон и 120 слоев, с использованием программы КОСМЕУ решалась задача, в которой пэл из крайнего нижнего положения дискретно двигался вверх в соответствии с реальным графиком его перемещений. Для интервала времени между двумя последовательными перемещениями из базы данных бралось соответствующее значение мощности реактора. Таким образом, в результате работы программы КОСМЕУ получали значения концентрации всех изотопов европия в 4200 зонах пэла для заданного календарного времени работы компенсирующего органа в реакторе СМ-2.

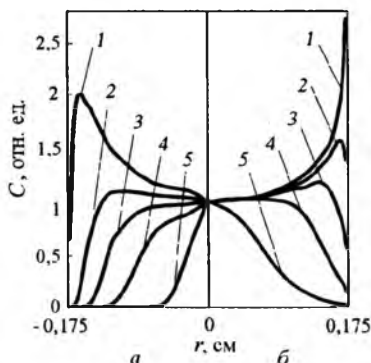
Усредненные расчетные (по 52 пэлам) и экспериментальные (по 24 пэлам) координаты (высотная отметка — активность) максимума высотного распределения суммарной активности изотопов европия совпадают в пределах погрешностей расчетов и измере-



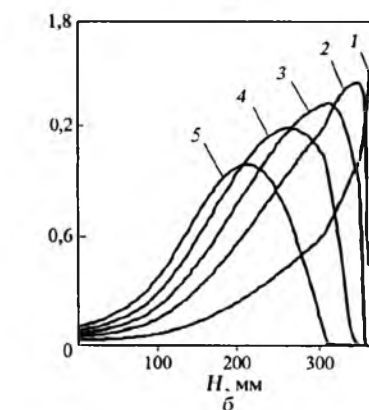
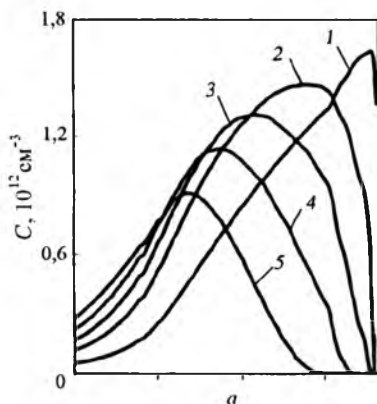
Р и с. 1. Сечение расчетных моделей активной зоны и компенсирующего органа реактора СМ-2: а — активная зона с отражателем (1-й этап расчета); б — компенсирующий орган (2-й этап расчета); 1 — ТВС; 2 — бериллиевый отражатель; 3 — компенсирующий орган; 4 — канал; 5 — пэл; 6 — стальной кожух; 7 — теплоноситель (вода)



Р и с. 2. Изменение со временем облучения 0 (1), 450 (2), 750 (3), 1200 (4), 1425 (5), 1550 (6), 1850 эф. сут (7) скорости поглощения нейтронов по радиусу пэла для ядра ^{151}Eu и на боковой поверхности для ядер ^{153}Eu (8), ^{154}Eu (9), ^{155}Eu (10), ^{151}Eu (11), ^{152}Eu (12)



Р и с. 3. Изменение со временем облучения 1 год (1), 3 года (2), 5 лет (3), 8 лет (4), 13,5 лет (5) распределения концентрации ядер ^{152}Eu (а), ^{154}Eu (б) по радиусу пэла



Р и с. 4. Изменение со временем облучения 1 год (1), 3 года (2), 5 лет (3), 8 лет (4), 13,5 лет (5) распределения концентрации ядер ^{152}Eu (а), ^{154}Eu (б) по высоте пэла

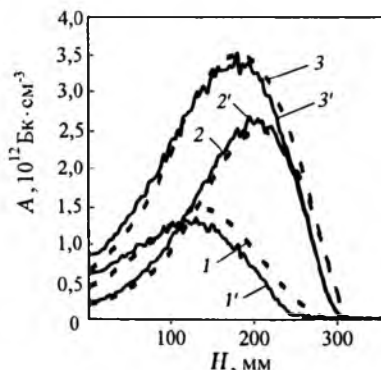
ний (рис. 5), расчетная интегральная по объему пэла активность на 15% выше экспериментальной.

Измерена мощность поглощенной дозы γ -излучения одиночного пэла в воде бассейна выдержки для нескольких расстояний от его оси и в нескольких точках по высоте. На уровне центра пэла на расстоянии от его оси 25,5 см мощность поглощенной дозы составила $1,3 \pm 0,3 \text{ мГр} \cdot \text{с}^{-1}$. Полученное радиальное и высотное распределение мощности поглощенной дозы будет использовано при разработке расчетной методики моделирования дозовых характеристик поля γ -излучения решеток пэлов.

Таким образом, на основе комплекса программ MCU-RR и реализованного в нем метода АЛИГР разработана методика и проведено моделирование накопления изотопов европия в процессе длительного циклического облучения поглощающих элементов органов СУЗ реактора СМ-2. Достоверность полученной расчетной информации подтверждена экспериментальными данными.

Посредством разработанной расчетно-экспериментальной методики проведена оценка активности отработавших пэлов всех органов СУЗ реактора СМ-2 и показано, что для всех 680 пэлов эта активность составляет $4,8 \cdot 10^{15} \text{ Бк}$.

Разработанная методика, основанная на использовании прецизионного комплекса программ, применима к любому типу реакторных установок. Она позволяет определять радиационные характеристики облученных пэлов, необходимые для обоснования их утилизации, включая использование в качестве γ -источников в промышленных установках для радиационной обработки различных материалов.



Р и с. 5. Распределение объемной активности ^{152}Eu (1, 1'), ^{154}Eu (2, 2'), $^{152}\text{Eu} + ^{154}\text{Eu}$ (3, 3') по высоте пэла компенсирующего органа реактора СМ-2: - - - — расчет; — — эксперимент

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рисованный В.Д., Ключков Е.П. Утилизация европийсодержащих органов регулирования ядерных реакторов путем создания гамма-источников на основе европия. — В сб.: Докл. Межд. сем. «Анализ рисков, связанных с выводом из эксплуатации, хранением и утилизацией атомных подводных лодок». Москва, 24—26 ноября 1997 г., с. 119—134.

2. Голанвили Т.В., Чечев В.П., Лбов А.А. Справочник пуклидов. М., ЦИИИатоминформ, 1995.
3. Вансеев Ю.Е., Булычева Л.В., Дорофеев А.Н. и др. Опыт использования пакета программ MCU для обоснования ядерной и радиационной безопасности работ в топливном цикле исследовательских реакторов НИИАР. Тезисы докладов 12-й ежегодной научно-техн. конф. ЯО РФ «Исследовательские реакторы: наука и высокие технологии», Димитровград, 2001, с. 238—239.
4. Gomin E., Maiorov L. The MCU Monte Carlo Code for 3D Depletion Calculation. — In: Proc. Intern. Conf., September 27—30, 1999, Madrid, Spain, p. 997—1006.

Поступила в Редакцию 17.09.01

УДК 621.039.546

СНИЖЕНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ УРАНА В ТВЭЛАХ РЕАКТОРА ПИК

Петров Ю.В., Котова Л.М. (ПИЯФ им. Б.П. Константинова)

Штатный твэл ПИК. В высокопоточном реакторе ПИК, строящемся в Гатчине, используются твэлы реактора СМ-2 длиной 500 мм вместо 350 мм в СМ-2 [1]. Твэлы (рис. 1) имеют крестообразное сечение и образуют в ТВС треугольную решетку с шагом $a = 5,23$ мм [2]. Они имеют стальную оболочку толщиной 0,17 мм и сердечник, содержащий UO_2 90%-ного обогащения в медно-бронзовой матрице. Объемная доля UO_2 в сердечнике составляет 25%. Сердечник занимает от объема ячейки ($V_c = H \sqrt{3} a^2 / 2 = 11,8$ см³) самую большую долю среди отечественных твэлов исследовательских реакторов $\omega_m = 0,305(3)$. Плотность меди в сердечнике составляет 6,2(1) г/см³, топлива — $\gamma_5^M = 1,968(2)$ г/см³ [2]. Это приводит к высокой средней плотности топлива в ячейке: $\gamma_5 = \omega_m \gamma_5^M = 600$ г/л. Доля воды

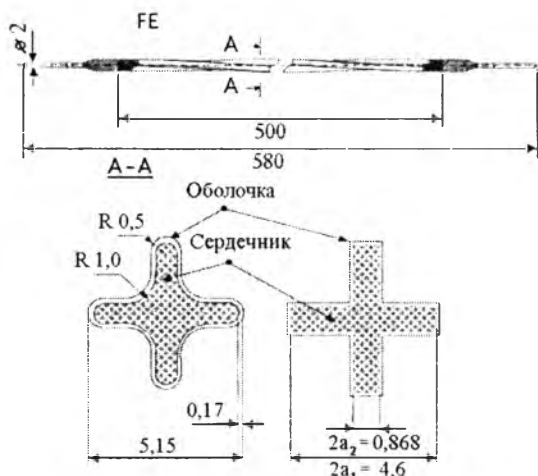


Рис. 1. Твэл реактора ПИК [2] и его модель

$\omega_{H_2O} = 0,575(3)$, $H/^{235}U = 25$. Сильное неупругое замедление в меди в области энергии нейтронов несколько МэВ сокращает их возраст и утечку из зоны. Для дистанционирования ребра твэлов образуют винтовую линию.

За почти 40-летнюю эксплуатацию в НИИАРе (с 1964 г.) твэлы реактора СМ-2 хорошо себя зарекомендовали [3]. Они работали при поверхностной тепловой нагрузке до 15 МВт/м² в режиме частичного поверхностного кипения, обеспечивая герметичность при выгорании топлива до 40% и более. Благодаря хорошей теплопроводности медно-бронзовой матрицы твэлы выдерживают большие коэффициенты неравномерности энерговыделения K_v : более 5 при среднем энерговыделении в зоне около 2 МВт/л.

Однако наряду с этими достоинствами имеются и недостатки: во-первых, медь сильно поглощает нейтроны и уменьшает коэффициент размножения реактора, во-вторых, для получения высокого коэффициента размножения необходима большая концентрация урана в зоне γ_5 .

Конструкция нового твэла ПИК. Выход состоит в переходе к слабопоглощающим конструкционным материалам, например, алюминию [4]. Как материал теплопроводящей матрицы сердечника алюминий стоит на втором месте после меди. Коэффици-