

тировки пор определенную роль играет кинетика развития дислокационной структуры. Различная ориентировка зерен, их размер существенно влияют на характер дислокационной структуры, развитие петель и полигонизацию при облучении. Наблюдаемая связь между порами и линиями дислокаций может быть приписана влиянию примесей, которые, как известно [9], скапливаются на краевых дислокациях и понижают энергию образования зародышей пор. Результаты экспериментов указывают на важную роль взаимодействия дислокаций и пор как в тонких фольгах, так и в массивных образцах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Быков В. Н. и др. — Физика твердого тела, 1973, т. 15, вып. 3, с. 910.
2. Delaplace J., Azam N., Le Naour N. — J. Nucl. Mater., 1973, v. 47, N 3, p. 278.

3. Конобеев Ю. В., Печенкин В. А. — Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение, 1978, вып. 1(6), с. 3.
4. Bondarenko A. I., Konobeev Yu. V. — Rad. Effects, 1976, v. 29, N 1, p. 47.
5. Evans J. — Nature, 1971, v. 229, p. 403.
6. Brimhall J., Kulcinski G. — Rad. Effects, 1973, v. 20, p. 25.
7. Конобеев Ю. В. — В кн.: Труды конф. по реакторному материаловедению. М., изд. ЦНИИатоминформ, 1978, т. 1, с. 296.
8. Эллиби М., Браун Л. Прямые методы исследования дефектов в кристаллах. М., Мир, 1965.
9. Кригман Дж. Теория фазовых превращений в металлах и сплавах. М., Мир, 1978.

Поступило в Редакцию 24.01.79
В окончательной редакции 22.01.80

УДК 621.039.534.44

Исследование эффективности очистки теплоносителя РБМК-1000 от трансурановых элементов

ВОРОБЬЕВ А. М., СТАРОДОНОВА Н. П.

В целях радиационной безопасности на АЭС всех типов как отечественных, так и зарубежных предусмотрено очистка водяного теплоносителя от радионуклидов. Установки байпасной очистки на АЭС предназначены для извлечения из продувочной воды продуктов коррозии, растворимых солей и радионуклидов. При общем объеме контура многократной принудительной циркуляции (КМПЦ) $\sim 1200 \text{ м}^3$ на АЭС с РБМК очищается 200 м^3 воды в час. Вода отбирается с напорного коллектора главных циркуляционных насосов и после соответствующей подготовки и охлаждения до $40-50^\circ \text{C}$ подается в очистную установку, где последовательно проходит механический (намыной перлитный), смешанный катионит-анионитный (КУ-2, АВ-17) фильтры и фильтр-ловушку. При этом осуществляют контроль за рН, жесткостью, содержанием Cl^- , продуктами коррозии (железо, медь), удельной электропроводностью и содержанием некоторых радионуклидов до и после очистки. Очищенный теплоноситель подогревают до 270°C и направляют в контур.

Вода КМПЦ помимо радионуклидов коррозионного происхождения и продуктов деления может быть загрязнена и α -излучателями, которые образуются вследствие незначительного поверхностного загрязнения твэлов ураном или миграции радионуклидов из дефектных твэлов. Накопление трансурановых элементов в ядерном топливе изучено в работах [1, 2]. Показано, что из-за последовательного захвата нейтронов в топливе образуется боль-

шое количество весьма опасных в радиационном отношении изотопов плутония, америция и кюрия. Например, после трехлетней кампании в 80 т топлива с 3,3%-ным обогащением по ^{235}U при мощности реактора 1000 МВт образуется 19 кг ^{237}Np , ~ 700 кг изотопов плутония, >100 кг изотопов америция, >2 кг кюрия [2].

К сожалению, опубликованных данных о коэффициентах диффузии трансурановых элементов из герметичных и негерметичных твэлов нам найти не удалось. Однако эту величину можно ориентировочно оценить, учитывая близость свойств лантаноидов и актиноидов. Так, если принять относительную диффузию иода и цезия из негерметичных твэлов за 1, то для цезия диффузия равна 10^{-4} [3]. При серьезном нарушении герметичности твэлов и контакте топлива с теплоносителем это значение может существенно возрасти. В аварийных случаях при расплывании топлива α -излучатели могут играть решающую роль в увеличении активности теплоносителя и формировании радиационной обстановки на АЭС и в окружающей среде. В связи с этим особое значение приобретает очистка теплоносителя.

В целях изучения эффективности байпасной очистки от трансурановых элементов определяли содержание ^{239}Np , изотопов плутония, ^{241}Am и ^{242}Cm в теплоносителе до и после очистки. Исследования проводили в различные периоды эксплуатации АЭС. Содержание ^{239}Np определяли γ -спектрометрическим методом с помощью полупро-

Таблица 1

Содержание α -излучателей в воде КМПЦ, Ки/л

Период эксплуатации	$\Sigma \text{Pu, Am, Cm}$	ΣPu	$^{241}\text{Am} + ^{242}\text{Cm}$	ΣU
Начальный (до одного года)	$(1 \div 5) \cdot 10^{-13}$	$(1 \div 2) \cdot 10^{-13}$	$(1 \div 2) \cdot 10^{-13}$	$1 \cdot 10^{-13}$
Нормальный	$(1 \div 10) \cdot 10^{-11}$	$(1 \div 5) \cdot 10^{-11}$	$(1 \div 5) \cdot 10^{-11}$	$(1 \div 3) \cdot 10^{-11}$
Нарушение герметичности твэлов	$1 \cdot 10^{-9}$	$4,6 \cdot 10^{-10}$	$5,4 \cdot 10^{-10}$	$5 \cdot 10^{-10}$

Таблица 2
Эффективность байпасной очистки теплоносителя
от трансурановых элементов

Радионуклид	Активность теплоносителя, Ки/л		Коэффициент очистки
	до очистки	после очистки	
Σ Pu, Am, Cm	$1,2 \cdot 10^{-9}$	$3,1 \cdot 10^{-13}$	3700
	$1,2 \cdot 10^{-9}$	$6 \cdot 10^{-13}$	2000
	$7 \cdot 10^{-10}$	$9,1 \cdot 10^{-13}$	755
	$2 \cdot 10^{-10}$	$4 \cdot 10^{-13}$	500
	$4 \cdot 10^{-10}$	$4 \cdot 10^{-13}$	1000
	$5 \cdot 10^{-11}$	$1 \cdot 10^{-13}$	500
	$4,4 \cdot 10^{-12}$	$< 1 \cdot 10^{-13}$	> 44
	$3 \cdot 10^{-13}$	$< 1 \cdot 10^{-13}$	
			$K_{cp} = 1075$
Σ Pu (239 Pu, 238 Pu и др.)	$3,5 \cdot 10^{-10}$	$7 \cdot 10^{-13}$	500
	$4,6 \cdot 10^{-10}$	$3 \cdot 10^{-13}$	1535
	$2 \cdot 10^{-10}$	$2 \cdot 10^{-13}$	1000
	$1,8 \cdot 10^{-10}$	$2 \cdot 10^{-13}$	900
	$1 \cdot 10^{-11}$	$< 1 \cdot 10^{-13}$	> 100
	$2 \cdot 10^{-12}$	$< 1 \cdot 10^{-13}$	> 20
			$K_{cp} = 985$
$^{241}\text{Am} + ^{242}\text{Cm}$	$5,35 \cdot 10^{-10}$	$3,3 \cdot 10^{-12}$	160
	$5,4 \cdot 10^{-10}$	$4 \cdot 10^{-13}$	1350
	$2,2 \cdot 10^{-10}$	$3 \cdot 10^{-13}$	740
	$7,5 \cdot 10^{-11}$	$1 \cdot 10^{-13}$	750
	$2 \cdot 10^{-12}$	$< 1 \cdot 10^{-13}$	> 20
			$K_{cp} = 750$
^{239}Np	$4,5 \cdot 10^{-4}$	$3,1 \cdot 10^{-7}$	1450
	$1,1 \cdot 10^{-4}$	$3,1 \cdot 10^{-7}$	360
	$2,5 \cdot 10^{-5}$	$1,3 \cdot 10^{-8}$	1900
	$1,5 \cdot 10^{-5}$	$3,8 \cdot 10^{-7}$	390
			$K_{cp} = 1025$

водникового Ge(Li)-детектора, идентификацию проводили одновременно по пяти пикам (210, 228, 278, 316 и 334 кэВ). Америций и кюрий определяли радиохимическими методами путем осаждения их на фосфате висмута после окисления плутония до шестивалентного состояния. Восстановленный плутоний (III) или (IV) затем также соосаждился с фосфатом висмута. Счет α -активности (эффективность 100%) проводили в слое твердого сцинтиллятора

(ZnS) по методике [1]. При фоне 0,2 имп./мин чувствительность метода составляла 10^{-13} Ки/л (1 Ки = $3,700 \times 10^{10}$ Бк), погрешность определения $\pm 20\%$ [2].

В табл. 1 приведены усредненные данные исследования содержания α -излучателей в воде для различных периодов эксплуатации АЭС. Как показывают расчеты, содержание трансурановых элементов в начальный период эксплуатации ($1 \div 5$) $\cdot 10^{-13}$ Ки/л обусловлено в основном поверхностным загрязнением твэлов ураном при изготовлении. По мере увеличения сроков кампании в оболочке появляются микротрещины и содержание трансурановых элементов в теплоносителе возрастает на два порядка. Дальнейшее увеличение содержания этих элементов (до 10^{-9} Ки/л) наблюдается при появлении дефектных твэлов, подлежащих замене. Через некоторое время после их замены концентрация α -излучателей в теплоносителе вновь стабилизируется на уровне $(1 \div 10) \cdot 10^{-11}$ Ки/л.

В табл. 2 приведены некоторые результаты оценки эффективности байпасной очистки от трансурановых элементов на АЭС с РБМК-1000.

Из этой таблицы следует, что коэффициенты очистки воды от названных трансурановых элементов довольно близки и равны 3000 при свежей загрузке фильтров ионообменными смолами, ~ 1000 спустя 5–8 мес и 25–100 спустя 9 мес после загрузки. Индивидуальные K_{oc} при сроке службы фильтров 5–8 мес составляют для нептуния 1025, плутония 985, америция и кюрия 750.

Степень очистки теплоносителя от трансурановых элементов на ионитовых фильтрах выше, чем от радионуклидов коррозионного и осколочного происхождения. Эти результаты можно было ожидать, поскольку известно, что прочность сорбции катионов на смоле КУ-2 растет с увеличением заряда катиона. Интересующие нас радионуклиды по прочности связи с катионитом располагаются в следующий ряд: Cs < Ba, Sr < Y, La, Ce, Am, Cm < Ru < Zr, Nb < Np, Pu. Коэффициенты байпасной очистки теплоносителя от трансурановых элементов на порядок выше, чем от других радионуклидов. Хорошая очистка от трансурановых элементов имеет место при сепарации пара от воды в барабан-сепараторах: соответствующие коэффициенты равны 10^4 – 10^5 , т. е. на турбины подается пар, практически свободный от α -излучателей.

Таким образом, штатная система очистки на АЭС с РБМК-1000 обеспечивает эффективное удаление из теплоносителя нептуния, плутония, америция и кюрия.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Габескирия В. Я. и др. — Атомная энергия, 1978, т. 44 вып. 5, с. 446.
2. Raman S. — In: Proc. Advisory Group Meeting on Transactinium Isotopes Nuclear Date. Karlsruhe, 3–7 Nov. 1975, v. 1, p. 39.
3. Коэн Д. Вопросы ядерной энергетики. М., Атомиздат, 1958.
4. Центер Э. М. и др. — В кн.: Дозиметрические и радиометрические методики. М., Атомиздат, 1966, с. 404.
5. Стародонова Н. П. — Гигиена и санитария, 1978, № 10, с. 68.

Поступило в Редакцию 11.02.80