

ном приближении с изотропными переходами. Локальные эффекты реактивности рассчитываются с использованием специальной методики связывания прямого и сопряженного блуждающей нейтронов. Комплекс ПИР позволяет также рассчитывать распределения ценности (по методике [7]) и источников НСД в гистограммном представлении. Комплекс привязан к каталогу АРАМАКО [10] через комплекс АРМОИТ [11], готовящий 26-групповые макроскопические зонные константы. Время расчета одной нейтронной траектории зависит от среднего числа соударений, т. е. от конкретной модели. Средняя скорость счета составляет около 0,03 с на столкновение.

Комплекс ПИР проверяли на различных моделях сравнением с данными, полученными S_N -методом и методом интегрирования по параметру [12] (плоские одногрупповые тесты), по диффузионным программам (6-групповая $R-Z$ -модель [13], отдельные расчеты и по теории малых возмущений), по комплексам АРМОИТ и ММК-2 [14, 15] (26-групповые $R-Z$ -модели).

Результаты проверки комплекса и накопленный опыт его использования для решения практических задач показывают: 1) для достижения точности 5—10% в эффекте реактивности (в рамках принятого N -го приближения) требуется проследить $\sim N \cdot 10^3$ историй нейтронов; 2) практически никогда не требуется рассматривать приближения порядка $N > 3$; 3) статистический подход для расчета возмущений конкурентоспособен в смысле затрат машинного времени и использования ресурсов ЭВМ уже в двумерных задачах даже в случаях применимости диффузионного приближения;

4) наиболее эффективно использование разностных итераций для оценки эффектов реактивности от локальных возмущений с учетом искажения распределения источников.

Приведенная выше концепция разностных итераций появилась под непосредственным влиянием стимулирующих обсуждений идеи с М. Н. Николаевым, Я. В. Шевелевым, А. Д. Франк-Каменецким и Л. В. Майоровым. Всем им автор выражает свою глубокую признательность.

Поступила в Редакцию 11.1.78

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Gubbins M. AEEW-M 581, Winfrith, 1966.
- Hoffman T., Petrie L. «Trans. Amer. Nucl. Soc.», 1972, v. 15, p. 912.
- Berger M., Dogget J. «J. Res.» (National Bureau of Standards, 1956, v. 56, p. 89.
- Михайлов Г. А. «Журн. вычисл. мат. и мат. физ.», 1967, т. 7, № 4, с. 915.
- Золотухин В. Г. В кн.: Вопросы физики ядерных реакторов. Вып. 1. Обнинск, изд. ФЭИ, 1968, с. 140.
- Takahashi H. «Nucl. Sci. Engng», 1970, v. 41, p. 259.
- Matthes W. Ibid., 1972, v. 47, p. 234.
- Усачев Л. Н. В кн.: Реакторостроение и теория реакторов. М., Из-во АН СССР, 1955.
- Irving D. «Nucl. Engng Design», 1971, v. 15, p. 273.
- Хохлов В. Ф., Савоськин М. М., Николаев М. Н. В сб.: Вопросы атомной науки и техники. Серия: Ядерные константы, 1972, вып. 8, ч. 3, с. 3—132 (ЦНИИАтоминформ).
- Коробейников В. В. и др. Там же, 1975, вып. 18, с. 85—155.
- Усиков Д. А. Препринт ФЭИ-423. Обнинск, 1973.
- Зизин М. Н., Кудряшов Л. Н., Николаев М. Н. Препринт НИИАР П-4 (270). Димитровград, 1976.
- Франк-Каменецкий А. Д. Препринт ИАЭ-2416. М., 1974.
- Тимофеев И. Г., Франк-Каменецкий А. Д. Препринт ИАЭ-2526. М., 1975.

УДК 621.311.25:621.039

Исследование образования продуктов коррозии в основных технологических системах АЭС с РБМК-1000 в процессе эксплуатации

СЕДОВ В. М., КРУТИКОВ П. Г., КОНСТАНТИНОВ Е. А., ШУЛЬГИН А. В., РЯБОВ В. И.,
ЗАХАРЬЕВСКИЙ Ю. О., ЕПЕРИН А. П., ШЕВЧЕНКО В. Г.

Химический режим систем АЭС определяется сложной совокупностью специфических свойств водной рабочей среды, конструкционных материалов, условий работы и их взаимного влияния. Анализ химического режима в технологической системе складывается из оценки корро-

зионного состояния материалов системы и наблюдений за параметрами водной среды.

Целью настоящей работы явилось исследование коррозионного состояния поверхностей конструкционных материалов систем и оборудования АЭС с РБМК-1000. Пробы при прове-

дении исследований отбирали непосредственно из системы (во время работы АЭС) и с внутренних поверхностей оборудования (при останове после 21 тыс. ч работы на мощности). Пробы отложений отбирали в пяти участках (табл. 1) основного контура АЭС (см. рисунок): в барабане-сепараторе, в контуре многократной принудительной циркуляции (КМЩ), в паровом тракте (паропроводы, цилиндры высокого и низкого давления — ЦВД, ЦНД) и конденсатопитательном тракте (деаэратор, механический фильтр).

Характеристика участков отбора проб

Таблица 1

Место отбора отложений	Материал оборудования	Среда, ее параметры
Барабан-сепаратор *	Ст. 22К, ЭИ-898 (плакировка)	Обессоленная вода, пароводяная смесь (влажность 14—27%), пар (влажность 0,1%) $p=7$ МПа, $t=284,5^{\circ}\text{C}$
Расходомер «Шадр»	X18H10T	Обессоленная вода, $p=7$ МПа, $t=280^{\circ}\text{C}$
БАПН **	X18H10T	Обессоленная вода, $t=50\pm 70^{\circ}\text{C}$, контакт с азотом $p=0,15$ МПа, пар (влажность 0,1%), $t=280^{\circ}\text{C}$, $p=5,5$ МПа,
Паровые трубы, выходящие из барабана-сепаратора	Ст. 20	Пар, $p=0,53$ МПа $t=160^{\circ}\text{C}$
ЦВД, 3-я ступень	Ротор — ст. 43ХМ1А, лопатка — ст. 1Х13, диафрагмы — ст. 0Х13	Пар, $p=0,35$ МПа, $t=138^{\circ}\text{C}$, влажность 15,9%
ЦВД, 5-я ступень	То же	Пар, $p=0,6$ МПа, $t=164^{\circ}\text{C}$
Деаэратор ***	Стенки — ст. 3, днище — ст. 20	Пар, $p=0,6$ МПа, $t=164^{\circ}\text{C}$
Механический фильтр питательной воды	Корпус — ст. 20, патрон фильтра — ст. X17H13M3T	Пар, $t=165^{\circ}\text{C}$

* Площадь поверхности 230 м².
**280 м².
***165 м².

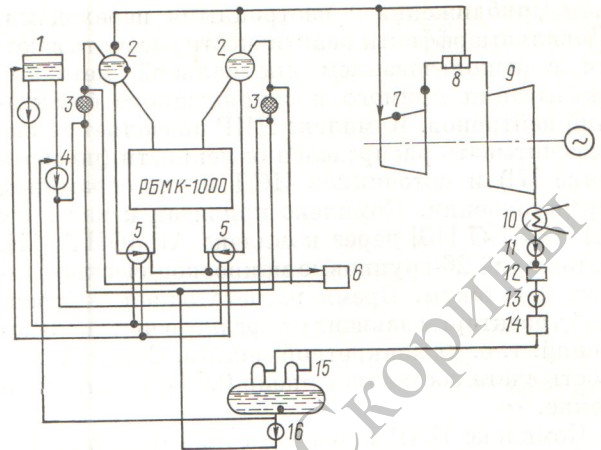


Схема отбора отложений с оборудования АЭС с РБМК-1000:

1 — БАПН; 2 — сепараторы; 3 — механические фильтры; 4 — аварийный питательный насос; 5 — насосы ЦЭН-7; 6 — байпасная очистка; 7 — ЦВД; 8 — сепараторы-пароподогреватели (СПП); 9 — ЦНД; 10 — конденсаторы; 11, 13 — конденсатные насосы КН1 и КН2; 12 — конденсатоочистка; 14 — подогреватели низкого давления; 15 — деаэратор; 16 — питательные электронасосы; ● — места отбора отложений

Для идентификации соединений в отобранных пробах определяли химический, изотопный и фазовый состав (табл. 2, 3). Методики определения химического состава описаны ранее [1, 2]. Фазовый состав малоактивных отложений определяли на рентгеновской установке УРС-50 НМ со стойкой ССД, фазовый анализ радиоактивных отложений — методом ядерного γ -резонанса на спектрометре ЯГРС-4 [3, 4] *. Спектры снимались в геометрии пропускания в режиме постоянной скорости. Энергетический спектр отложений снимался на полупроводниковом детекторе типа ДГДК-40 с собственным разрешением 2,7 кэВ по γ -линии 1332 кэВ ⁶⁰Со с анализатором АИ-4096-ЗМВ-100. Обработку спектров проводили на АСВТ М-6000 по методикам, описанным ранее [5].

Данные визуального осмотра поверхностей оборудования приведены в табл. 4. В напорных трубопроводах ГЦН отмечены коррозионные повреждения в виде язв и раковин до 2 мм глубиной, расположенные по окружности в области сварных швов. Раковины покрыты плотной окисной пленкой от светло-коричневого до черного цвета, окислы черного цвета находятся также в местах механической обработки поверхности трубопроводов.

В барабане-сепараторе КМЩ накопилось значительное количество рыхлых продуктов

* Подробнее о методике и некоторых результатах этого анализа см. статью А. И. Москвина и др. (наст. вып., с. 28).

Химический и фазовый состав рыхлых продуктов коррозии с поверхностей оборудования РБМК-1000

Таблица 2

Место отбора пробы	Фазовый состав, мас.%				Химический состав, мас.% к навеске							Не- раст- вори- мый оста- ток
	Fe ₃ O ₄	γ-Fe ₂ O ₃	α-Fe ₂ O ₃	γ-FeOOH	Fe	Cr	Ni	Mn	Cu	Zn	Si	
Барабан-сепаратор (с образцов-свидетелей)	54	46	—	—	49,7	1,85	1,8	1,23	0,07	—	—	—
Барабан-сепаратор (со дна аппарата)	—	—	—	—	44,6	1,64	0,52	0,43	0,43	0,13	—	18,9
БАПН	—	—	—	—	46,2	1,65	0,6	0,6	0,3	0,1	—	4,0
Взвеси в теплоносителе (из барабана-сепаратора)	30	—	70	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Паровые трубы барабана-сепаратора	30	—	70	—	65,0	0,09	0,014	0,56	0,14	0,078	0,003	—
Паропровод перед стопорно-регулирующим клапаном	—	—	100	—	60,3	0,32	0,12	0,49	0,1	0,1	—	—
Диафрагма 3-й ступени ЦВД	—	—	100	—	67,8	0,13	0,006	0,011	0,07	0,091	0,7	—
Паропровод ЦВД-СПП (при выходе пара из 5-й ступени ЦВД)	15	15	70	—	67,3	0,088	0,059	0,014	0,085	0,20	1,6	—
Паропровод ЦВД-СПП:												
верхний слой отложений (черного цвета)	70	—	30	—	73,6	0,03	—	0,004	—	—	—	—
нижний слой отложений (вишневого цвета)	—	—	100	—	68,1	0,1	—	0,003	—	—	—	—
ЦНД, при выходе пара из 5-й ступени (отложения черного цвета)	70	20	—	10	60,5	0,1	—	0,17	—	—	—	—
ЦНД, при выходе пара из 5-й ступени (отложения красного цвета)	—	—	—	100	49,2	0,05	—	0,64	—	—	—	—
Взвесь с конденсатоочистки	39	15	17	24	60	0,3	0,05	0,3	3,4	—	—	—
Бак деаэратора	28	30	42	—	66,4	0,09	0,05	0,013	0,016	0,002	—	—
Механический фильтр питательной воды	—	—	100	—	65,9	0,27	0,1	0,13	0,01	0,1	—	—

коррозии коричневого цвета, которые в основном сконцентрированы на дне сепаратора; стенки покрыты тонким слоем отложений. Поверхность лезового затвора (после снятия рыхлых отложений) без видимых повреждений. В баке аварийно-питательного насоса (БАПН) до 70% поверхности покрыто рыхлыми продуктами коррозии. В паровом тракте при снижении параметров пара изменяется и состав рыхлых продуктов коррозии. Так, уже в ЦВД наблюдаются

двухслойные отложения: верхний слой черного цвета представляет собой смесь магнетита и гематита, а нижний состоит только из гематита (см. табл. 2).

По данным электрохимических поляризационных измерений [6], сплошная пленка на корпусе расходомера типа «Шадр» (контур МПЦ) имеет состав шпинели: (Fe, Ni)O-(Fe, Cr)₂O₃. В рыхлых продуктах коррозии со дна барабана-сепаратора содержится (в процентах к навеске)

45—50 Fe, до 2 Cr, до 0,6 Ni и до 0,5 Mn.

В системах из перлитных сталей (ст. 20, ст. 3, ст. 22К) отложения целиком обусловлены окислами железа (на 65—68%), остальных элементов <1%. Фазовый анализ (см. табл. 2) показывает, что железо в системах находится в виде гематита $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ (0—100%), магнетита Fe_3O_4 (0—30%), магемита $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ (0—40%) и лепидокрокита $\gamma\text{-FeOОН}$ (до 24%). В местах возможного скопления рыхлых продуктов коррозии их фазовый состав многокомпонентен (например, на фильтрах конденсатоочистки содержится Fe_3O_4 , $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$, $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$, $\gamma\text{-FeOОН}$). Это говорит об образовании при различных условиях работы окислов разного строения и о перемещении их по технологической системе в участки с пониженными гидродинамическими характеристиками. Изменение условий, влияющих на образование различных окислов, может происходить как при перемене эксплуатационного режима всей АЭС (переходные режимы), так и внутри системы за счет местных перепадов температуры, давления, концентрации различных веществ. Наибольшее количество рыхлых продуктов коррозии наблюдается в деаэраторе и в барабане-сепараторе (см. табл. 2, 4).

В деаэраторе, по-видимому, большей частью скапливаются окислы, которые образуются в процессе коррозии стенок бака деаэратора (ст. 22К). Кроме того, мелкая фракция взвешенных продуктов коррозии, а также коллоидные частицы проходят через установку конденсатоочистки и, частично укрупняясь при

движении, оседают на участке конденсатопитательного тракта от деаэратора до барабана-сепаратора.

Накопление укрупненных взвесей происходит на механических фильтрах. Поскольку радиоактивность задерживаемых на фильтре взвесей высока (10^{-5} Ки/г), то, вероятно, они в основном являются продуктами коррозии парового тракта, укрупнившимися при движении после установки конденсатоочистки. Мелкие взвешенные частицы, которые не задерживаются механическими фильтрами, выносятся с питательной водой в барабан-сепаратор. Поэтому в нем накапливается большое количество продуктов коррозии, хотя следов значительного коррозионного разрушения осмотренных поверхностей ни в КМЩЦ, ни в барабане-сепараторе не наблюдается.

Соотношение содержания в осадках Ni, Mn, Cr (см. табл. 2) одинаково. Взвеси, находящиеся в барабане-сепараторе РБМК, вероятно, являются в основном продуктами коррозии парового и конденсатопитательного трактов. Радиоактивность продуктов коррозии из барабана-сепаратора и механического фильтра обуславливается одинаковыми радионуклидами.

Радиохимический состав рыхлых отложений приведен в табл. 3. Радиоактивность обусловлена в основном ^{51}Cr , ^{54}Mn , ^{60}Co , ^{95}Zr — ^{95}Nb , ^{144}Ce , ^{106}Ru . Так, содержание радионуклидов в продуктах коррозии КМЩЦ, парового и конденсатопитательного трактов составляет соответственно: 20, 30 и 30% ^{124}Ce ; 10, 7 и 10% ^{95}Zr ; 10, 15

Радиохимический состав продуктов коррозии, Ки/г

Таблица 3

Радионуклид	Точка отбора пробы						
	Барабан-сепаратор (со дна аппарата)	Паропровод перед ЦВД (перед стопорно-регулирующим клапаном)	С диафрагм ЦВД	Паропровод ЦВД-СШП при выходе пара из 5-й ступени ЦВД	Паропровод после ЦВД	Деаэратор	Механический фильтр очистки питательной воды
^{51}Cr	$(9,4 \pm 1,3) \cdot 10^{-4}$	—	$(8,0 \pm 2,8) \cdot 10^{-8}$	—	—	$(1,9 \pm 0,3) \cdot 10^{-8}$	—
^{54}Mn	$(2,2 \pm 0,7) \cdot 10^{-5}$	—	—	$(4,7 \pm 2,8) \cdot 10^{-9}$	—	$(9,7 \pm 1,1) \cdot 10^{-9}$	$(1,5 \pm 0,7) \cdot 10^{-7}$
^{59}Fe	—	—	$(9,2 \pm 3,8) \cdot 10^{-9}$	—	—	$(2,2 \pm 0,9) \cdot 10^{-9}$	—
^{58}Co	$(4,4 \pm 0,9) \cdot 10^{-5}$	—	$(5,0 \pm 2,8) \cdot 10^{-9}$	—	—	$(1,9 \pm 0,5) \cdot 10^{-8}$	$(1,9 \pm 0,9) \cdot 10^{-7}$
^{60}Co	$(7,2 \pm 0,9) \cdot 10^{-5}$	$(5,1 \pm 3,3) \cdot 10^{-10}$	$(1,4 \pm 0,3) \cdot 10^{-8}$	—	—	$(1,7 \pm 0,2) \cdot 10^{-8}$	$(3,5 \pm 0,7) \cdot 10^{-7}$
^{65}Zn	$(9,4 \pm 1,7) \cdot 10^{-5}$	—	$(2,5 \pm 0,6) \cdot 10^{-8}$	$(2,4 \pm 0,4) \cdot 10^{-8}$	—	$(6,1 \pm 1,2) \cdot 10^{-9}$	$(4,5 \pm 2,0) \cdot 10^{-7}$
^{95}Zr	$(4,7 \pm 0,5) \cdot 10^{-4}$	—	$(2,4 \pm 0,7) \cdot 10^{-8}$	$(2,8 \pm 0,6) \cdot 10^{-8}$	$(2,8 \pm 1,8) \cdot 10^{-9}$	$(7,2 \pm 0,9) \cdot 10^{-9}$	$(1,1 \pm 0,2) \cdot 10^{-6}$
^{95}Nb	$(9,1 \pm 0,9) \cdot 10^{-4}$	$(3,0 \pm 0,9) \cdot 10^{-9}$	$(2,9 \pm 0,7) \cdot 10^{-8}$	$(5,6 \pm 0,8) \cdot 10^{-8}$	$(3,0 \pm 2,0) \cdot 10^{-9}$	$(6,2 \pm 1,1) \cdot 10^{-9}$	$(2,0 \pm 0,3) \cdot 10^{-6}$
^{103}Ru	$(4,7 \pm 1,2) \cdot 10^{-5}$	—	—	—	—	—	$(1,8 \pm 1,1) \cdot 10^{-7}$
^{106}Ru	$(4,7 \pm 0,9) \cdot 10^{-4}$	—	—	—	—	$(7,4 \pm 3,7) \cdot 10^{-9}$	$(2,0 \pm 0,7) \cdot 10^{-6}$
^{136}Cs	—	—	—	—	—	$(1,3 \pm 0,8) \cdot 10^{-9}$	—
^{137}Cs	—	—	$(2,7 \pm 1,6) \cdot 10^{-9}$	—	$(1,2 \pm 0,7) \cdot 10^{-9}$	—	—
^{140}Ba	—	—	—	—	$(1,2 \pm 0,4) \cdot 10^{-8}$	$(7,5 \pm 1,4) \cdot 10^{-9}$	—
^{141}Ba	—	—	—	—	—	$(8,5 \pm 1,0) \cdot 10^{-9}$	—
^{144}Ce	$(2,1 \pm 0,9) \cdot 10^{-5}$	—	$(6,3 \pm 0,8) \cdot 10^{-8}$	$(1,7 \pm 0,3) \cdot 10^{-8}$	—	—	$(2,5 \pm 1,0) \cdot 10^{-7}$
^{144}Ce	$(9,5 \pm 4,8) \cdot 10^{-4}$	—	—	$(1,2 \pm 0,2) \cdot 10^{-7}$	$(7,2 \pm 0,3) \cdot 10^{-9}$	—	$(3,2 \pm 0,5) \cdot 10^{-6}$
^{144}Ce	$(4,1 \pm 0,2) \cdot 10^{-3}$	$(2,6 \pm 0,1) \cdot 10^{-8}$	$(4,9 \pm 0,3) \cdot 10^{-7}$	$(3,6 \pm 0,3) \cdot 10^{-7}$	$(5,9 \pm 0,6) \cdot 10^{-8}$	$(1,7 \pm 0,1) \cdot 10^{-7}$	$(1,2 \pm 0,1) \cdot 10^{-5}$
Сумма							

Коррозионное состояние поверхностей оборудования

Таблица 4

Оборудование	Характеристика состояния поверхности
Барaban-сепаратор Расходомер «Шадр»	Поверхность лазового затвора после снятия рыхлых отложений не имеет повреждений. Основная масса продуктов коррозии на дне аппарата покрыта плотной, тонкой, прочно сцепленной с металлом пленкой серого и черного цвета
БАПН	На дне бака значительное количество отложений темно-коричневого цвета. Стенки бака на 70% покрыты рыхлыми продуктами коррозии, которые расположены большей частью в области сварных швов
Паровые трубы барабана-сепаратора	Поверхность сплошь покрыта мелкими язвами диаметром до 7 мм, глубиной до 0,5 мм. На горизонтальных участках труб имеются ватерлинии. Поверхность нижней части подвержена более интенсивной коррозии, чем поверхность, расположенная выше ватерлинии. Большинство крупных язв на поверхности трубопроводов расположено в нижней части
Паропровод перед стопорно-регулирующим клапаном	Отложения коричневого цвета, наносные, плотно сцеплены с поверхностью металла. После снятия отложений на поверхности не обнаруживается видимых дефектов
Паропровод (рессивер) ЦВД-СПП (в 4 м от 5-й ступени ЦВД)	На стенках паропровода плотные двухслойные наносные отложения. Верхний слой состоит из продуктов коррозии черного цвета, которые отслаиваются плитками, толщина их до 0,2—0,3 мм. Нижний, прилегающий к металлу слой отложений вишневого цвета достигает толщины 0,5 мм. Поверхность под отложениями без видимых коррозионных повреждений
ЦВД	На подводящем к ЦВД паропроводе после снятия рыхлых коричневого цвета отложений нет видимых повреждений. Поверхности паропроводов и диафрагм ЦВД гладкие, без следов коррозионных разрушений. Сегменты уплотнения и пружины их крепления покрыты черными окисными плотными пленками, на которых есть налет рыхлых отложений красно-кирпичного цвета. Лопатки первой и второй ступени покрыты раковинами и язвами в результате эрозии металла. Лопатки 4-й и 5-й ступеней покрыты с противоположной потоку пара стороны плотной окисной пленкой. При выходе пара из ЦВД поверхности трубопровода и направляющих лопаток покрыты язвами различной формы с ровными вертикальными краями диаметром от 2 до 20 мм глубиной до 1 мм. На изгибе паропровода (при изменении направления потока) поверхность блестящая, как бы остеклованная
ЦНД	Поверхность кожуха турбины покрыты рыхлыми отложениями от красно-коричневого до черного цвета. Поверхность под отложениями подвержена равномерной коррозии. Поверхность выходных кромок лопаток ротора поздравата с многочисленными язвами и точками
Деаэратор	В баке деаэратора на стенках на расстоянии 0,2 ∅ от дна ватерлиния, разделяющая паровую и водную фазы. Ниже ватерлинии поверхность красновато-коричневого цвета, однотонная, сплошь покрыта язвами и точками до 1 мм в диаметре и глубиной 0,5 мм. Выше ватерлинии на поверхности находятся рыхлые отложения кирпично-красного цвета, под которыми обнаруживаются мелкие точки и язвы диаметром 2—3 мм. Состояние сварных швов не отличается от состояния поверхности стенок бака. Поверхности деаэрационной колонки, подводящих паропроводов и решеток покрыты темной (с зеленовато-фиолетовым отливом), плотной, окисной пленкой
Механические фильтры питательной воды	Крышки фильтров, стенки корпуса и направляющие лопатки фильтрующих патронов покрыты продуктами коррозии кирпичного цвета. На поверхности крышки после снятия рыхлых отложений имеются язвы диаметром до 1—2 мм. Очень много точечных повреждений, вследствие чего поверхность шероховатая. Поверхности деталей из нержавеющей стали без следов коррозионных разрушений

и 17% ^{106}Ru . Максимальную удельную радиоактивность $(4,1 \pm 0,2) \cdot 10^{-3}$ Ки/г имеют отложения в барабане-сепараторе. По мере удаления по технологической схеме мест отбора проб от реактора удельная радиоактивность отложений уменьшается до $(5,9 \pm 0,6) \cdot 10^{-8}$ Ки/г (паропровод после ЦНД).

Анализ полученных данных показывает, что

внутри основных систем АЭС с РБМК-1000 есть незначительное количество отложений только коррозионного происхождения. Фазовый состав продуктов коррозии обусловлен изменениями условий работы системы. Рабочие поверхности систем и оборудования находятся в удовлетворительном состоянии.

Поступила в Редакцию 7.IV.78

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Марченко З. М. Фотометрическое определение элементов. М., «Мир», 1971.
2. Шарло Г. Методы аналитической химии. Т. 1, 2. М., «Химия», 1969.
3. Повицкий В. А. и др. «Защита металлов», 1977, т. 13, № 1, с. 498.
4. Samaga G. «Corros. Sci.», 1975, v. 15, № 1, p. 8.
5. Бельковский Н. Г. и др. Препринт РИ-40. Л., 1975.
6. Фрейман Л. И., Макаров В. А., Брыскин И. Е. Потенциометрические методы в коррозионных исследованиях и электрохимической защите. Л., «Химия», 1972.

УДК 621.039.553

Определение фазового состава продуктов коррозии конструкционных материалов основного контура РБМК-1000 с нейтральным водным режимом с помощью ЯГР-спектроскопии

МОСКВИН Л. Н., ЕФИМОВ А. А., ВАРОВИН И. А., УСАЧЕВА Г. А., ТОМИЛОВ С. Б., ПЕТРОВ А. А.

При решении вопросов, связанных с организацией водного режима АЭС, дезактивацией оборудования, прогнозированием радиационной обстановки возникают задачи изучения загрязнения теплоносителя и поверхностей конструкционных материалов продуктами их коррозии. В основном коррозионные отложения и взвеси состоят из смеси загрязненных радионуклидами окисных соединений железа, форма которых зависит от температуры, рН и скорости движения теплоносителя, концентрации кислорода в нем, теплового потока и интенсивности облучения [1]. Анализ продуктов коррозии (ПК) значительно облегчается благодаря применению неdestructивных методов анализа, из которых метод ядерного гамма-резонанса (ЯГР) обладает рядом достоинств. Параметры ЯГР-спектров имеют индивидуальные (для различных соединений железа) значения, что позволяет, анализируя такие спектры, определять качественный состав ПК и их первоначальную структуру. Линейная (в определенных пределах) зависимость площадей ЯГР-спектров от содержания железа в той или иной форме делает возможным непосредственно определять количество различных структурных компонентов коррозионных отложений. В обычной теплоэнергетике наряду с электронографией и рентгеноструктурным анализом в последнее время все шире привлекается ЯГР-спектроскопия [2—4], основным преимуществом которой по сравнению, например, с рентгеноструктурным анализом является большая информативность мессбауэровских спектров и возможность автоматизации их обработки на ЭВМ. Применение метода ЯГР в ядерной энергетике осложняется присутствием в коррозионных продуктах реакторных материалов значи-

тельного количества долгоживущих радионуклидов, излучение которых приводит к уменьшению отношения сигнал/шум и затруднению обработки ЯГР-спектров. По-видимому, этим не в последнюю очередь объясняется тот факт, что нет опубликованных данных о применении ЯГР-спектроскопии для изучения ПК реакторных материалов.

Отбор ПК проводили на различных участках основного контура Ленинградской АЭС им. В. И. Ленина (ЛАЭС): из барабана-сепаратора, аппаратов конденсатоочистки, деаэратора, системы дренажа острого пара*. В качестве проб ПК, образовавшихся в условиях барабана-сепаратора, брали коррозионные отложения на стальных образцах-свидетелях, выдерживавшихся в теплоносителе и пароводяной фазе в течение 13500 ч. Образцы-свидетели в теплоносителе барабана-сепаратора представляли собой сборку из пластин стали 20 и стали 08X18H10T размером 20 × 20 × 3 мм; в пароводяной фазе сборка состояла только из пластин стали 08X18H10T такого же размера. В период пуска реактора был проведен отбор взвешенных частиц ПК после отстаивания в течение 24 ч в стеклянной посуде пробы теплоносителя из барабана-сепаратора. Из деаэратора и системы дренажа острого пара образцы коррозионных отложений непосредственно соскабливали с поверхности нержавеющей стали шпателем. ПК из аппаратов конденсатоочистки были отобраны при взрыхлении катионита обессоленной водой. При нормальных условиях работы реактора температура в барабанах-сепараторах поддерживается на уровне 285 °С, в условиях конденсатоочистки изменяется от 30 до 40 °С.

* Статья В. М. Седова и др. (наст. вып., с. 23).