

## Радиоактивные отложения на поверхностях технологического оборудования Белоярской АЭС им. И. В. Курчатова

А. П. ВЕСЕЛКИН, М. А. ЛЮТОВ, Ю. Э. ХАНДАМИРОВ

УДК 621.039.34

При эксплуатации атомных электростанций на возможность осмотра и ремонта оборудования существенное влияние оказывают радиоактивные отложения на поверхностях технологического оборудования. Эта проблема, пожалуй, еще более важна для станций, работающих по схеме подачи пара непосредственно из ядерного реактора на турбину.

Этому вопросу посвящено несколько работ [1—3], однако предсказание активности отложений остается трудным. По-видимому, лишь накопление большего числа экспериментальных данных позволит создать теоретические модели и расчетные методы для прогнозирования радиационной обстановки.

Некоторые данные по отложениям радиоактивных продуктов на технологическом оборудовании и турбине были получены при исследованиях, проведенных на Белоярской АЭС им. И. В. Курчатова, где впервые осуществлен ядерный перегрев пара в промышленном масштабе. На этой АЭС применен уран-графитовый реактор канального типа [4]. Каналы реактора разбиты на две группы: испарительные и пароперегревательные. Тепловая схема реактора двухконтурная. Первый контур изготовлен из нержавеющей стали X18H10T, поверхность его составляет  $8300 \text{ м}^2$ . Второй контур изготовлен из стали X18H10T ( $\sim 6200 \text{ м}^2$ ), углеродистой стали ( $\sim 3000 \text{ м}^2$ ), мельхиора ( $\sim 5000 \text{ м}^2$ ) и латуни ( $\sim 2000 \text{ м}^2$ ). Арматура имеет стelliteвые наплавки, общая поверхность которых для первого и второго контуров составляет соответственно  $\sim 2$  и  $\sim 4 \text{ м}^2$ .

К моменту проведения исследований энерговыработка станции соответствовала  $\sim 160$  суткам работы реактора на номинальной мощности.

Отбор проб для определения активности отложений проводился тремя различными способами. В зависимости от способа отбора пробы

можно условно разделить на мазки, образцы и скребки. Мазки отбирались путем протирания участка поверхности поочередно кусочком марли, смоченным в растворе соляной кислоты, и сухой марлей. Эта операция повторялась несколько раз, пока поверхность не доводилась до металлического блеска. Определялись величина поверхности и вес зольного остатка после озоления тампона в термопечи. Образцами названы металлические пластины, вырезанные из отрезков труб, по которым проходит теплоноситель. Размеры образцов выбирались так, чтобы их форма и величина активности были удобны для измерений. Для определения весового количества отложений в этом случае проводилось химическое удаление поверхностного слоя с отрезков труб на катоде в растворе серной кислоты с добавкой ингибитора ЧМ. Скребки брались путем осторожного протирания исследуемой поверхности шабером.

Для измерения  $\gamma$ -активности проб был применен сцинтилляционный спектрометр с кристаллом NaJ(Tl) размером  $80 \times 80 \text{ мм}$  и анализатором АИ-100-1 с блоком регистрации «чистого времени» и записывающим устройством. Градуировка проводилась при помощи стандартных источников, идентификация изотопов — по положению фотопиков и периодам полураспада. Абсолютные величины активности рассчитывали по площадям фотопиков с учетом эффективности спектрометра. Всего было исследовано около 30 проб, взятых с различных участков поверхности первого контура, и 60 проб — с поверхностей второго контура. По полученным данным были рассчитаны количества отложений на единичной поверхности и поверхностная плотность отдельных изотопов.

Пробы разделяли на группы, соответствующие трем участкам первого контура: водяному

■ РАДИОАКТИВНЫЕ ОТЛОЖЕНИЯ НА ОБОРУДОВАНИИ БЕЛЯРСКОЙ АЭС

(от сепаратора до входа в активную зону), паро-водяному (выход из активной зоны — вход в сепаратор) и паровому (от сепаратора пар идет на испарители, конденсируется, и вода возвращается обратно). Второй контур разбивали на девять участков: 1) пар и вода низкого давления (от конденсаторов до питательных насосов); 2) вода высокого давления (от питательных насосов до испарителей); 3) испарители (вода); 4) насыщенный пар (от испарителей до входа в реактор); 5) перегретый пар (выход из реактора — вход в турбину); 6) турбина (неподвижные части); 7) турбина (лопатки); 8) подогреватели низкого давления ПНД (по пару); 9) подогреватели высокого давления ПВД (по пару).

На основе экспериментов были определены средние величины отложений и поверхностная плотность радиоактивных веществ по отдельным участкам контуров. Эти величины для первого контура приведены в табл. 1. По средним величинам были рассчитаны полные количества и активности отложений на поверхностях. Принималось, что в пределах одного участка удельные количества и активности отложений постоянны и равны средним изменившимся величинам. Общее количество отложений на поверхностях первого контура вне активной зоны реактора составляет  $\sim 80$  кг (водяной участок  $\sim 66\%$ , паро-водяной  $\sim 19\%$ , паровой  $\sim 15\%$ ), что соответствует средней скорости коррозии для поверхностей первого контура  $\sim 1,2 \text{ мг}/\text{м}^2 \cdot \text{ч}$ . Полное количество отложений на поверхностях второго контура вне активной зоны составляет  $\sim 770$  кг, распределение по участкам следующее: пар и вода низкого давления — 260 кг; вода высокого давления — 150 кг; испарители (вода) — 230 кг; насыщенный пар — 46 кг; перегретый

Активность отложений  
на поверхностях первого контура

Таблица 2

Изотоп	Активность, киори	Распределение по участкам контура, %		
		водяной	паро- водяной	паровой
$\text{Co}^{60}$	14	30	68	1,9
$\text{Mn}^{54}$	3,2	44	54	1,8
$\text{Co}^{58}$	2,3	21	77	1,8
$\text{Cr}^{51}$	11	65	30	4,6

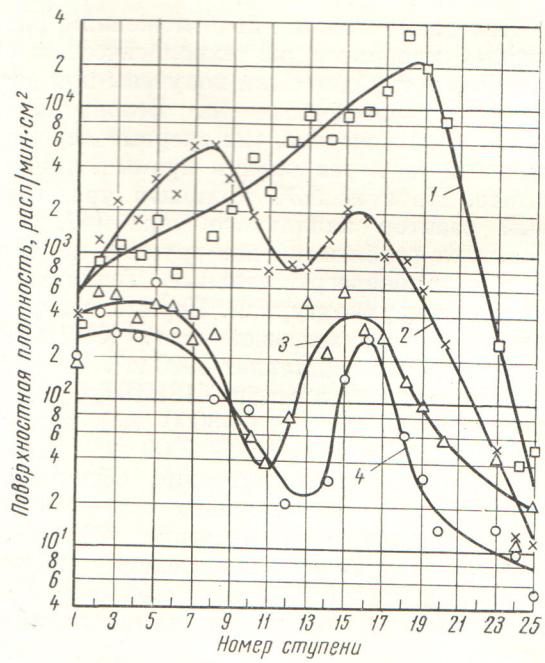
пар — 20 кг; турбина (неподвижные части) — 16 кг; турбина (лопатки) — 0,3 кг; ПНД (по пару) — 5 кг; ПВД (по пару) — 40 кг. Величины полной активности отложений на поверхностях первого и второго контуров приведены в табл. 2 и 3. На рисунке представлены распределения различных радиоактивных изотопов в отложениях на лопатках турбины.

Мощности доз близ оборудования второго контура и турбины при остановленном реакторе, измеренные в период проведения исследований, не превышали 0,8 мкр/сек, близ оборудования первого контура составляли от 1 до 30 мкр/сек.

Средние величины отложений  
и поверхностная плотность  
радиоактивных веществ  
(первый контур)

Таблица 1

Участок контура	Сред- няя ве- личина отло- жений, $\text{мг}/\text{см}^2$	Поверхностная плотность, расп/мин. $\cdot \text{см}^2$			
		$\text{Co}^{60}$	$\text{Co}^{58}$	$\text{Mn}^{54}$	$\text{Cr}^{51}$
Водяной	2,0	$3,6 \cdot 10^5$	$4,2 \cdot 10^4$	$1,2 \cdot 10^5$	$6,1 \cdot 10^5$
Паро-водя- ной	0,63	$9,3 \cdot 10^5$	$1,7 \cdot 10^5$	$1,7 \cdot 10^5$	$3,2 \cdot 10^5$
Паровой	0,49	$2,4 \cdot 10^4$	$3,8 \cdot 10^3$	$5,1 \cdot 10^3$	$4,5 \cdot 10^4$



Поверхностная плотность радиоактивных отложений на лопатках различных ступеней турбины:

1 —  $\text{Cr}^{51}$ ; 2 —  $\text{Sb}^{124}$ ; 3 —  $\text{Co}^{60}$ ; 4 —  $\text{Mn}^{54}$ .

## Активность отложений на поверхностях второго контура

Таблица 3

Изотоп	Активность, мкюри	Распределение по участкам, %							
		Пар и вода низкого давления	Вода высокого давления	Испарители (вода)	Насыщенный пар	Перегретый пар	Турбина	ПНД (по пару)	ПВД (по пару)
Co <sup>60</sup>	29	8,0	20	25	3,8	34	6,3	0,1	0,08
Mn <sup>54</sup>	26	4,5	8,3	41	7,2	33	3,3	0,06	0,04
Cr <sup>51</sup>	140	5,1	2,8	5,4	0,7	17	65	1,0	0,06
Sh <sup>124</sup>	45	4,0	2,8	12	0,4	43	29	0,5	0,1
Co <sup>58</sup>	5	24	34	34	8	—	—	—	—

Полученные данные позволили определить условные скорости уноса радиоактивных продуктов коррозии стали с поверхностей, находящихся в активной зоне. Предполагая, что основным источником долгоживущих радиоактивных изотопов является активация конструкционных материалов в активной зоне реактора с последующим «уносом» их теплоносителем, для полной активности каждого изотопа, находящегося в системе, можно записать:

$$\frac{d(N_p + N_t)}{dt} = nSv - N_p\lambda - N_t \left( \lambda + \frac{G}{P} \right);$$

$$\frac{dn}{dt} = \Sigma\Phi - \lambda n,$$

где  $N_p$  — число ядер изотопа, находящихся на поверхностях вне активной зоны;  $N_t$  — полное число ядер изотопа в теплоносителе;  $n$  — число изотопа в стали, находящейся в зоне облучения, ядер/с;  $S$  — поверхность стали в активной зоне,  $\text{м}^2$ ;  $v$  — условная скорость уноса продуктов коррозии из активной зоны,  $\text{см}/\text{сек}$ ;  $G$  — скорость подпитки контура,  $\text{м}/\text{сек}$ ;  $P$  — полное количество воды в контуре,  $\text{м}$ ;  $\Sigma$  — сечение образования изотопа для стали,  $\text{см}^2/\text{г}$ ;  $\lambda$  — постоянная распада изотопа,  $\text{сек}^{-1}$ ;  $\Phi$  — плотность потока нейтронов, активирующих сталь,  $\text{нейтр}/\text{см}^2 \cdot \text{сек}$ . Положив  $\frac{dN_t}{dt} = 0$ , получим

$$N_p(t) = \frac{1}{\lambda} \left[ \frac{\Sigma\Phi S v}{\lambda} - N_t \left( \lambda + \frac{G}{P} \right) \right] (1 - e^{-\lambda t}) - \frac{\Sigma\Phi S v t}{\lambda} e^{-\lambda t}.$$

Отсюда  $v$  равно:

$$v = \frac{\lambda \left[ \lambda N_p + N_t \left( \lambda + \frac{G}{P} \right) (1 - e^{-\lambda t}) \right]}{\Sigma\Phi S (1 - e^{-\lambda t}) + \Sigma\Phi S \lambda t e^{-\lambda t}}.$$

Для равновесия

$$v = \frac{\lambda \left[ N_p \lambda + N_t \left( \lambda + \frac{G}{P} \right) \right]}{\Sigma\Phi S};$$

для долгоживущих изотопов ( $1/\lambda \gg t$ )

$$v = \frac{2N_p + N_t \left( \lambda + \frac{G}{P} \right)}{\Sigma\Phi S t^2}.$$

Исследование радиоактивности долгоживущих изотопов в теплоносителе показало, что величины активности низкие ( $\sim 10^{-10} \div 10^{-9}$  кюри/л), продувка практически не играет никакой роли в общем балансе активности, т. е. скорость «выведения» радиоактивных ядер из теплоносителя на поверхности (осаждение) значительно превышает скорость «выведения» с продувкой (постоянная продувки для первого контура  $\sim 5,5 \cdot 10^{-6}$  сек $^{-1}$ , для второго контура  $\sim 3,5 \cdot 10^{-6}$  сек $^{-1}$ ). Поэтому при расчете условных скоростей уноса для первого контура  $N_t \left( \lambda + \frac{G}{P} \right) \ll N_p \lambda$ ; для второго контура проводилась оценка условных скоростей уноса как без учета влияния продувки, так и с учетом продувки, причем использовались максимальные значения измеренной удельной активности теплоносителя второго контура.

Полученные величины условных скоростей уноса радиоактивных продуктов коррозии стали с поверхностей первого и второго контуров, находящихся в активной зоне, приведены в табл. 4. Изотопы Co<sup>60</sup> и Mn<sup>54</sup> обладают более

Условные скорости уноса  
( $\text{см}/\text{сек}$ ) радиоактивных изотопов  
с поверхностей стали, находящихся  
в активной зоне

Таблица 4

Изотоп	Первый контур	Второй контур
Co <sup>60</sup>	$6 \cdot 10^{-7}$	$(4 \div 5) \cdot 10^{-9}$
Mn <sup>54</sup>	$4 \cdot 10^{-7}$	$(1 \div 2) \cdot 10^{-8}$
Co <sup>58</sup>	$9 \cdot 10^{-8}$	$(6 \div 8) \cdot 10^{-10}$
Cr <sup>51</sup>	$5 \cdot 10^{-8}$	$2 \cdot 10^{-9}$
Fe <sup>59</sup>	$\leq 4 \cdot 10^{-7}$	$\leq 3 \cdot 10^{-9}$

высокой скоростью уноса по сравнению с  $\text{Co}^{58}$  и  $\text{Cr}^{51}$ . Рассчитанные условные скорости уноса для второго контура (пароперегревательные каналы) значительно меньше, чем для первого контура (испарительные каналы). Качественно это может быть объяснено следующим образом: скорость уноса продуктов коррозии перегретым паром значительно ниже, чем водой. Кроме того, процессы, происходящие в перегревательных каналах, возможно, приводят к преимущественному осаждению продуктов коррозии на поверхностях в этих каналах, и образующаяся пленка более прочная, чем в испарительных каналах, что препятствует смыву активных продуктов, долгое время находившихся в зоне облучения.

Анализ полученных данных показал, что «выведение» радиоактивных продуктов из теплоносителя на поверхности контуров (осаждение) — процесс достаточно быстрый, причем скорость этого процесса значительно превышает для ряда изотопов скорость «выведения с продувкой» и по порядку величины близка к обратному времени циклов ( $10^{-2} \div 10^{-3} \text{ сек}^{-1}$ ). Отсюда можно определить минимальную величину активности теплоносителя из соотношения

$$A_t(t) = \frac{n(t) v S}{G_t},$$

где  $G_t$  — расход теплоносителя.

## Исследование радиоактивности долгоживущих изотопов в теплоносителе Белоярской АЭС им. И. В. Курчатова

В. Н. АЛЕКСАНДРОВА, А. П. ВЕСЕЛКИН, А. А. ЛЕВИЧ, М. А. ЛЮТОВ,  
В. П. СКЛЯРОВ, Ю. Э. ХАНДАМИРОВ, Г. А. ЩАПОВ

На Белоярской АЭС им. И. В. Курчатова [1] проведены исследования радиоактивности долгоживущих изотопов, находящихся в теплоносителе первого и второго контуров. К моменту проведения исследований энерговыработка станции составляла около 300 эффективных суток.

После остановки станции радиационная обстановка и возможность ремонта технологического оборудования обусловлены в основном долгоживущими радиоактивными продуктами коррозии —  $\text{Co}^{60}$ ,  $\text{Mn}^{54}$  и пр. Вследствие низких удельных активностей этих продуктов в теплоносителе БАЭС при проведении исследований для концентрирования примесей были использованы ионитовые и механические фильтры. Ионитовый фильтр представлял собой

Сравнение рассчитанных величин  $A_t$  с измеренными в течение 1965—1966 гг. показывает, что результаты по изотопам  $\text{Co}^{60}$  и  $\text{Mn}^{54}$  хорошо согласуются, а по  $\text{Co}^{58}$  и  $\text{Cr}^{51}$  рассчитанные величины превышают измеренные.

Это, по-видимому, объясняется тем, что скорость уноса со временем уменьшается, причем значительно заметнее для  $\text{Co}^{58}$  и  $\text{Cr}^{51}$ , чем для  $\text{Co}^{60}$  и  $\text{Mn}^{54}$ .

Авторы благодарят Л. Г. Варначеву, Г. А. Веретенникова, А. И. Васильева, А. Н. Зейгарника, В. А. Кутеряева, В. Н. Миронова, Н. Н. Фокина и эксплуатационный персонал БАЭС им. И. В. Курчатова за помощь, оказанную при проведении исследований.

Поступила в Редакцию 22/VI 1967 г.

### ЛИТЕРАТУРА

- П. А. А科尔зин, В. В. Герасимов. Коррозия конструктивных материалов ядерных и тепловых энергетических установок. М., «Высшая школа», 1963.
- F. Grutschy et al. In book «Corrosion of Reactor Materials». Vol. 1. Vienna, IAEA, 1962, p. 133.
- А. П. Веселкин, А. В. Никитин. «Атомная энергия», 21, 184 (1966).
- П. И. Алещенков и др. «Атомная энергия», 16, 489 (1964).

УДК 621.039.534

цилиндр из оргстекла высотой ~50 см, наполненный катионитом КУ-2 в водородной форме, анионитом АВ-17 в гидроксильной форме или их смесь. Иониты регенерировались в лабораторных условиях. Механический фильтр представлял собой цилиндр из оргстекла с равномерно расположенными фильтрами различной пористости. Фильтры устанавливали в различной комбинации на пробоотборных точках первого и второго контуров БАЭС. Фильтрование проб проводилось непрерывно в течение 4—20 суток. Скорость фильтрации через ионитовые фильтры поддерживали равной 10—15 м/ч, а через механические — 0,1—0,5 м/ч. Расход воды через фильтры изменили каждые 2—4 ч. Общее количество воды, пропущенной через фильтры, составило для