

конечного размера. В этом случае вместо выражений (7) и (8) получим

$$A_0^2 = \left(\frac{1}{\eta-1} + \text{th}^2 \Delta \right)^{-1} \left\{ \left[\left(\text{th}^2 \Delta + \frac{1}{\eta-1} \right) \times \right. \right. \\ \times \left(1 - \frac{1}{\tau} \right) \frac{\text{th} \Delta' + t_1}{\frac{\text{th} \Delta'}{\sqrt{\tau}} - \text{th} \Delta} - \\ \left. \left. - \frac{\eta}{\eta-1} \left(\frac{\sqrt{\tau}}{\eta-1} - t_1 \text{th} \Delta \right) \right]^2 + \right. \\ \left. + \frac{\eta^2}{(\eta-1)^3} (t_1 + \sqrt{\tau} \text{th} \Delta)^2 \right\}; \quad (11)$$

$$\text{tg} \left(\sqrt{\frac{\eta-1}{\tau}} t_k + \delta \right) = -\sqrt{\eta-1} \times \\ \times \frac{\left(1 - \frac{1}{\tau} \right) (\text{th} \Delta' + t_1) \text{th} \Delta + \frac{\eta}{\eta-1} \left(\frac{t_1}{\sqrt{\tau}} \text{th} \Delta' - t_1 \text{th} \Delta \right)}{\left(1 - \frac{1}{\tau} \right) (\text{th} \Delta' + t_1) + \frac{\eta}{\eta-1} (\sqrt{\tau} \text{th} \Delta - \text{th} \Delta')}, \quad (12)$$

где $\Delta = \frac{t_1 - t_k}{\sqrt{\tau}}$; $\Delta' = t_1 - t_k$.

Расчеты конкретных систем показали, что при $\eta \approx 2$ расхождение оптимальной критической массы [2] от критической массы, получаемой, например, при однородном распределении урана с концентрацией порядка $\sim A_0 + \frac{1}{\eta-1}$, не превышает, как правило, нескольких процентов ($\leq 3\%$). Это связано, по-видимому, с тем, что размеры активной зоны малы и происходит сильное «перемешивание» нейтронов, так что перераспределение урана слабо сказывается на критической массе.

Более заметно оптимум выражен при значениях η , близких к единице. Приведем два примера для плоского реактора с бесконечным отражателем.

1. $\eta = 1,08$; $\tau = 4$; $u_0 = 17$. Максимальная концентрация урана [2] $A_0 + \frac{1}{\eta-1} = 25,62$.

Критическая масса (в произвольных единицах): без ограничений [2] составляет 1,000; с ограничением ($u \leq u_0$) — 1,114; с равномерным распределением ($u = u_0$) — 1,198.

2. $\eta = 1,04$; $\tau = 1$; $u_0 = 35$; $A_0 + \frac{1}{\eta-1} = 51$.

Критическая масса (в произвольных единицах): без ограничений [2] составляет 1,000; с ограничением ($u \leq u_0$) — 1,088; с равномерным распределением ($u = u_0$) — 1,182.

Укажем на некоторые возможные обобщения. Переход к большему числу групп с сохранением предположения о размножении нейтронов только в тепловой области не изменит основных результатов. В принципе можно рассмотреть систему с заданным размером активной зоны или систему с несколькими зонами, отличающимися свойствами замедлителя (в этих случаях для вектора ψ на границах должны выполняться так называемые условия скачка), однако вопрос об оптимальности той или иной компоновки должен решаться с помощью вычислительных машин.

Автор благодарит А. П. Рудика за постоянный интерес к работе и обсуждения результатов и А. Д. Галанина за критические замечания.

Поступила в Редакцию 14/VIII 1965 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. Л. С. Понтрягин и др. Математическая теория оптимальных процессов. М., Физматгиз, 1961.
2. G. Goertzel. J. Nucl. Energy, 2, 193 (1956).
3. А. Д. Галанин. Теория ядерных реакторов на тепловых нейтронах. М., Атомиздат, 1957.

Влияние системы очистки на накопление активных продуктов коррозии в реакторах с водой под давлением

А. Н. ВЕСЕЛКИН, О. Я. ШАХ

УДК 621.039.524.4

Рассматриваются процессы образования, накопления и переноса активных продуктов коррозии в реакторах с водой под давлением и влияние на них системы очистки. Получены решения дифференциальных уравнений, описывающих эти процессы при постоянной очистке $\lambda_\phi \neq 0$ и $\lambda_\phi \neq 0$. Проводится анализ этих решений.

Показано, что эффективность системы очистки существенно влияет на активность воды и коррозионных отложений в реакторной системе.

Доступность оборудования первого контура, находящегося вне зоны облучения реактора, после его остановки и в отсутствие повреждений в покрытиях твэлов целиком обусловлена процессами образования, накопления и переноса активных продуктов коррозии в контуре [1—7].

Активность воды и поверхности контура, обусловленная продуктами коррозии, является

сложной функцией параметров реакторной системы, таких, как температура, давление, рН и скорость теплоносителя, материал поверхности контура, скорость коррозии c_k ($\text{ядер}/\text{см}^2 \cdot \text{сек}$), наличие и направленность теплового потока, скорость очистки теплоносителя, эффективность фильтра ε , наличие в контуре кислорода и других примесей, уровень мощности реактора и т. д.

Механизм образования и переноса активных продуктов коррозии в контуре можно представить следующим образом. Продукты коррозии, образовавшиеся на поверхности металла, смываются водой и переносятся по контуру. Часть из них выводится системой очистки, а часть осаждается. Наряду с осаждением происходит смыв с поверхности контура уже осевших продуктов коррозии с постоянной смыва k_c (сек^{-1}). Таким образом, в контуре реактора происходит постоянная миграция активных продуктов коррозии с поверхности в воду и обратно.

Математическая постановка задачи по накоплению и переносу активных продуктов коррозии для некоторых частных случаев приведена в работах [4, 5, 8].

Ниже рассматривается образование и перенос активных продуктов коррозии в реакторных системах водо-водяного типа с учетом влияния системы очистки.

Постановка задачи

Система дифференциальных уравнений, описывающих накопление и перенос активных продуктов коррозии в контуре, записанная в общем виде, выглядит весьма громоздко и без упрощающих предположений не поддается аналитическому решению. В качестве таких предположений могут быть приняты следующие условия.

1. Концентрация продуктов коррозии в воде не зависит от пространственных координат.
2. Скорость коррозии c_k не зависит от времени и имеет вид $c_k = \frac{1}{t} \int_0^t c_k(t') dt'$.
3. Эффективность фильтра ε для всех продуктов коррозии одинакова.
4. Значения коэффициентов осаждения k_o и смыва k_c для активных и неактивных изотопов одинаковы по всему контуру и не зависят от времени.
5. Пренебрегается выгоранием ядер-мишеней в воде.
6. Не учитывается наличие различного рода «ловушек шлама» в контуре, так как они обыч-

но обуславливаются конструктивными особенностями каждой конкретной реакторной системы (количеством и величиной застойных зон, опускных участков и т. д.).

Представляет интерес получить выражение для определения активности воды и поверхностной активности коррозионной пленки для двух случаев: для реакторов, снабженных системой очистки теплоносителя, и для реакторов без системы очистки.

Решение для случая наличия системы очистки

С учетом упрощающих предположений системе дифференциальных уравнений, описывающих накопление и перенос активных продуктов коррозии в контуре, можно записать в виде

$$\left. \begin{aligned} \frac{dN_B}{dt} &= k_c \frac{F_K}{V_K} N_p - (\lambda_\phi + k_o) N_B; \\ \frac{dN_p}{dt} &= k_o \frac{V_K}{F_K} N_B - k_c N_p + c_k; \\ \frac{dn_B}{dt} &= Z_a N_B + k_c \left(\frac{F_a}{V_K} n_a + \frac{F_p}{V_K} n_p \right) - (\lambda_\phi + k_o + \lambda) n_B; \\ \frac{dn_a}{dt} &= k_o \frac{V_a}{F_a} n_B + Z N_p - (k_c + \lambda) n_a + \frac{Z c_k}{\lambda} (1 - e^{-\lambda t}); \\ \frac{dn_p}{dt} &= k_o \frac{V_p}{F_p} n_B - (k_c + \lambda) n_p. \end{aligned} \right\} (1)$$

Здесь N_B , n_B — соответственно число ядер-мишеней и активных ядер в единице объема воды контура, $\text{ядер}/\text{см}^3$; N_p — число ядер-мишеней на единице поверхности контура, $\text{ядер}/\text{см}^2$; n_a , n_p — число активных ядер на единице поверхности контура в зоне и вне зоны облучения, $\text{ядер}/\text{см}^2$; $F_K = F_p + F_a$ — полная поверхность контура, см^2 ; $V_K = V_p + V_a$ — объем контура, см^3 ; F_a , F_p — поверхность контура в зоне и вне зоны облучения, см^2 ; V_a , V_p — объем контура в зоне и вне зоны облучения, см^3 ; $Z = \sigma_{\text{акт}} \Phi_{\text{акт}}$; $Z_a = \sigma_{\text{акт}} \Phi_{\text{акт}} \bar{T}_a$; $\Phi_{\text{акт}}$ — поток нейтронов, $\text{нейтр}/\text{см}^2 \cdot \text{сек}$; t' — время нахождения единицы объема теплоносителя в зоне облучения, сек ; T_a — полное время цикла теплоносителя, сек ; $\lambda_\phi = \frac{\varepsilon Q_\phi}{V_K}$ — постоянная очистки контура, сек^{-1} ; λ — постоянная распада, сек^{-1} ; Q_ϕ — расход воды на очистку, $\text{см}^3/\text{сек}$. Система уравнений (1) решается при начальных условиях

$$N_B \equiv N_p \equiv n_B \equiv n_a \equiv n_p = 0 \text{ для } t = 0.$$

Применив преобразование Лапласа по переменной t к системе (1), получим

$$N_B(S) = \frac{c_R F_R}{V_R} \cdot \frac{k_c}{[(S + \lambda_\phi)(S + k_c) + S k_0]} ; \quad (2)$$

$$N_P(S) = \frac{c_R (S + \lambda_\phi)}{[(S + \lambda_\phi)(S + k_c) + S k_0]} ; \quad (3)$$

$$n_B(S) = \frac{k_c Z c_R F_a}{V_R} \left\{ \frac{[(S - \varphi_B)(S + \lambda_\phi + k_0)] + [\alpha(k_c + \lambda + S)(S - \varphi_B)] + [(S - \varphi_1)(S - \varphi_2)]}{(S - \varphi_1)(S - \varphi_2)(S - \varphi_3)(S - \varphi_4)(S - \varphi_6)} \right\} ; \quad (4)$$

$$n_P(S) = \frac{k_0 k_c Z c_R F_a F_D}{F_D V_R} \left\{ \frac{[(S - \varphi_6)(S + \lambda_\phi + k_0)] + [\alpha(S - \varphi_6)(S + k_c + \lambda)] + [(S - \varphi_1)(S - \varphi_2)]}{(S - \varphi_1)(S - \varphi_2)(S - \varphi_3)(S - \varphi_4)(S - \varphi_5)(S - \varphi_6)} \right\} ; \quad (5)$$

$$n_a(S) = \beta n_P(S) + Z c_R \left\{ \frac{(S - \varphi_6)(S + \lambda_\phi + k_0) + (S - \varphi_1)(S - \varphi_2)}{(S - \varphi_1)(S - \varphi_2)(S - \varphi_5)(S - \varphi_6)} \right\} ; \quad (6)$$

в активность воды и пленки продуктов коррозии, образовавшихся и смытых с поверхностей вне зоны облучения.

Используя формулу разложения Хэвисайда для перехода от изображения к оригиналу, получим

$$N_B(t) = \frac{c_R F_R}{V_R \lambda_\phi} \left\{ 1 - \left[\frac{\varphi_2 e^{\varphi_1 t} - \varphi_1 e^{\varphi_2 t}}{\varphi_2 - \varphi_1} \right] \right\} ; \quad (7)$$

$$N_P(t) = \frac{c_R (\lambda_\phi + k_0)}{\lambda_\phi k_c} \left\{ 1 - \left[\frac{\varphi_1 \varphi_2 (e^{\varphi_1 t} - e^{\varphi_2 t}) + (\lambda_\phi + k_0) (\varphi_2 e^{\varphi_1 t} - \varphi_1 e^{\varphi_2 t})}{(\varphi_2 - \varphi_1) (\lambda_\phi + k_0)} \right] \right\} ; \quad (8)$$

$$\lambda n_B(t) = \frac{\lambda Z c_R F_a}{V_R \lambda_\phi} \left[\frac{\lambda_\phi k_c + \lambda (k_c + k_0 + \lambda + \lambda_\phi)}{\lambda_\phi k_c + \lambda (k_c + k_0 + \lambda + \lambda_\phi)} \right] \left\{ 1 - \frac{\varphi_1 \varphi_2 \varphi_3 \varphi_4}{\left[\lambda_\phi + k_0 + \alpha(k_c + \lambda) + \frac{\lambda_\phi k_c}{\lambda} \right]} \times \right. \\ \left. \times \left[\frac{e^{\varphi_6 t}}{\varphi_1 \varphi_4 \varphi_6} + \sum_{i=1}^4 \frac{e^{\varphi_i t} [(1 + \alpha) \varphi_i + \alpha_i]}{\prod_{h=1}^4 [-\varphi_i (\varphi_i - \varphi_h)]} \right] \right\} ; \quad (9)$$

$$\lambda n_P(t) = \frac{\lambda Z c_R F_a k_0}{F_D V_R \lambda_\phi} \left[\frac{\lambda_\phi k_c + \lambda (k_c + k_0 + \lambda + \lambda_\phi)}{\lambda_\phi k_c + \lambda (k_c + k_0 + \lambda + \lambda_\phi)} \right] \left(\frac{V_P}{k_0 + \lambda} \right) \left\{ 1 - \frac{\varphi_1 \varphi_2 \varphi_3 \varphi_4 \varphi_5}{\left[\lambda_\phi + k_0 + \alpha(k_c + \lambda) + \frac{\lambda_\phi k_c}{\lambda} \right]} \times \right. \\ \left. \times \left[\frac{e^{\varphi_6 t}}{\varphi_1 \varphi_2 \varphi_6 (\varphi_6 - \varphi_5)} + \sum_{i=1}^5 \frac{e^{\varphi_i t} [(1 + \alpha) \varphi_i + \alpha_i]}{\prod_{h=1}^5 [-\varphi_i (\varphi_i - \varphi_h)]} \right] \right\} ; \quad (10)$$

$$\lambda n_a(t) = \beta \lambda n_P(t) + \lambda \xi(t) ; \quad (11)$$

$$\lambda \xi(t) = \frac{\lambda Z c_R \left(\lambda_\phi + k_0 + \frac{\lambda_\phi k_c}{\lambda} \right)}{\lambda_\phi k_c (k_c + \lambda)} \left\{ 1 - \frac{\lambda_\phi k_c (k_c + \lambda)}{\lambda_\phi + k_0 \frac{\lambda_\phi k_c}{\lambda}} \left[\sum_{i=1, 2, 5, 6} \frac{e^{\varphi_i t} (\varphi_i + \lambda_\phi + k_0)}{\prod_{h=1, 2, 5, 6} [-\varphi_i (\varphi_i - \varphi_h)]} \right] \right\} . \quad (11')$$

В этих выражениях принято:

$$\begin{aligned} \varphi_{1,2} &= -\frac{d}{2} \pm \frac{\sqrt{d^2 - 4l}}{2}; \quad \varphi_3 = \varphi_1 - \lambda; \quad \varphi_4 = \varphi_2 - \lambda; \\ \varphi_5 &= -(k_c + \lambda); \quad \varphi_6 = -\lambda; \quad d = k_o + k_c + \lambda\phi; \\ l &= \lambda_\phi k_c; \\ \alpha_i &= \lambda_\phi + k_o + \alpha(k_c + \lambda) + \frac{(\varphi_i - \varphi_1)(\varphi_i - \varphi_2)}{\varphi_i - \varphi_6}; \\ \alpha &= \frac{t'}{T_{II}} \cdot \frac{F_R}{F_A}; \quad \beta = \frac{F_p}{F_A} \cdot \frac{V_a}{V_p}. \end{aligned}$$

В случае равновесия ($t \rightarrow \infty$) выражения (7) — (11') значительно упрощаются:

$$N_B(\infty) = \frac{c_R F_R}{V_R \lambda_\phi}; \quad (12)$$

$$N_p(\infty) = \frac{c_R (\lambda_\phi + k_o)}{\lambda_\phi k_c}; \quad (13)$$

$$\lambda n_B(\infty) = \frac{\lambda Z c_R F_A \left[\lambda_\phi + k_o + \alpha(k_c + \lambda) + \frac{k_c \lambda_\phi}{\lambda} \right]}{V_R \lambda_\phi [\lambda_\phi k_c + \lambda(k_c + k_o + \lambda + \lambda_\phi)]}; \quad (14)$$

$$\lambda n_p(\infty) = \frac{\lambda Z c_R F_A k_o \left[\lambda_\phi + k_o + \alpha(k_c + \lambda) + \frac{k_c \lambda_\phi}{\lambda} \right]}{F_p V_R \lambda_\phi [\lambda_\phi k_c + \lambda(k_c + k_o + \lambda + \lambda_\phi)] (k_c + \lambda)}; \quad (15)$$

$$\lambda n_a(\infty) = \beta \lambda n_p(\infty) + \frac{\lambda Z c_R \left(\lambda_\phi + k_o + \frac{k_c \lambda_\phi}{\lambda} \right)}{\lambda_\phi k_c (k_c + \lambda)}. \quad (16)$$

Интересно сравнить влияние различных составляющих на величину активности коррозионной пленки вне зоны облучения. Из выражения (5) при $t \rightarrow \infty$ получим

$$\gamma = \frac{Z}{Z_a} \cdot \frac{F_a}{F_R} \cdot \frac{\lambda_\phi + k_o}{k_c + \lambda} = \frac{T_{II}}{t'} \cdot \frac{F_a}{F_R} \cdot \frac{\lambda_\phi + k_o}{k_c + \lambda}. \quad (17)$$

Величина γ характеризует отношение слагаемых, описывающих вклад в активность продуктов коррозии, образовавшихся в зоне и вне зоны облучения и активировавшихся в процессе циркуляции по контуру. Обычно

$$\frac{T_{II}}{t'} \approx 10; \quad \frac{F_a}{F_R} \approx 0,3 \div 0,5.$$

Если принять $\lambda_\phi \approx 10^{-5} \text{ сек}^{-1}$, $k_o \approx 10^{-5} \text{ сек}^{-1}$, $k_c \approx 10^{-7} \text{ сек}^{-1}$ [4, 5, 8], то для долгоживущих

изотопов ($\lambda < 10^{-7} \text{ сек}^{-1}$) $\gamma \approx 300 \div 500$; для короткоживущих ($\lambda \approx 10^{-4} \text{ сек}^{-1}$) $\gamma \approx 0,3 \div 0,5$.

Таким образом, в случае долгоживущих изотопов (Cr^{51} , Fe^{59} , Co^{60} и т. д.) основной вклад в активность коррозионных отложений вносят продукты коррозии, образовавшиеся или смытые с поверхностей в зоне облучения. Для короткоживущих изотопов вклад от обеих частей контура может быть примерно одинаковым.

Отношение составляющих активности коррозионных отложений вне зоны облучения, обусловленных коррозией металла в зоне облучения и смывом осевшего там шлама, определяется величиной λ_ϕ/k_o . Отсюда следует, что если выбрать $\lambda_\phi \gg k_o$, то миграцией активного шлама в контуре и вкладом его в поверхностную активность можно пренебречь.

Сравнив выражения (14) и (15), получим соотношение для оценки постоянного смыва и осаждения

$$\frac{\lambda n_B(\infty)}{\lambda n_p(\infty)} = \frac{F_p}{V_p} \cdot \frac{k_c + \lambda}{k_o}.$$

Для долгоживущих изотопов можно получить простое разложение в виде

$$\lambda n_B(t) \approx \left(1 + \frac{\lambda_\phi}{\lambda} \right) k_c \frac{\lambda F_a c_R Z}{V_R} \cdot \frac{t^3}{6} \quad (18)$$

(max $\varphi_i t \ll 1$).

Решение для случая отсутствия системы очистки

В этом случае $\lambda_\phi = 0$ и равновесие может быть достигнуто только при $c_R = 0$. Решение системы (1) может быть получено в виде

$$N_B(t) = \frac{k_c}{k_c + k_o} \cdot \frac{c_R F_R}{V_R} t; \quad (19)$$

$$\begin{aligned} N_p(t) &= \frac{c_R}{k_c + k_o} [1 + k_o t] + \\ &+ \frac{c_R}{k_c} e^{-(k_c + k_o)t} \left[\frac{k_o}{k_o + k_c} - 1 \right]. \quad (20) \end{aligned}$$

Так как обычно $k_c \ll k_o$, то вторым слагаемым в выражении для N_p можно пренебречь. Кроме того, для упрощения дальнейших выкладок в выражении (19) опущено слагаемое вида $\text{const} [1 - e^{-(k_o + k_c)t}]$, которое при обычно встречающихся значениях k_o и k_c становится пренебрежимо малым уже при $t \approx 1$ суткам.

В этом случае выражения для λn_p и λn_b можно записать в виде

$$\lambda n_b(t) = \frac{\lambda k_c}{k_c + k_0} \cdot \frac{Z c_R F_a}{V_R} \left\{ \frac{\lambda(1+\alpha) + k_0 + k_c}{\lambda c} + \frac{(ct-b)[k_0 + \lambda(k_c + \lambda)]}{c^2} + \frac{\lambda(1+\alpha)(\varphi_2 e^{\varphi_1 t} - \varphi_1 e^{\varphi_2 t}) - [e^{\varphi_1 t}(\varphi_2^2 - 2\varphi_1\varphi_2) + \varphi_1^2 e^{\varphi_2 t}]}{\lambda c(k_0 + k_c)} + \frac{[k_0 + \alpha(k_0 + \lambda)][\varphi_2^2 e^{\varphi_1 t} - \varphi_1^2 e^{\varphi_2 t}]}{c^2(k_0 + k_c)} \right\}; \quad (21)$$

$$\lambda n_p(t) = \frac{\lambda k_c k_0 V_p Z c_R F_a}{(k_c + k_0) V_R F_p} \left\{ \frac{\alpha \varphi_3^2 (\varphi_1 + \varphi_2) - k_0 (\varphi_1 \varphi_2 + \varphi_1 \varphi_3) + k_c \varphi_2 \varphi_3 - \varphi_1 \varphi_2 \varphi_3}{(\varphi_1 \varphi_2 \varphi_3)^2} + \frac{(\alpha \varphi_3 - k_0) t}{\varphi_1 \varphi_2 \varphi_3} + \frac{e^{\varphi_1 t} [(\varphi_1 - \varphi_2)(\varphi_1 - \varphi_3) \varphi_1 + k_0 + \alpha(\varphi_1 - \varphi_3) - (k_0 + k_c)(\varphi_1 - \varphi_3)] (2\varphi_1 - \varphi_2) + \varphi_1 (\varphi_1 - \varphi_2)}{\varphi_1^2 (\varphi_1 - \varphi_2)^2 (\varphi_1 - \varphi_3)^2} - \frac{e^{\varphi_2 t} [\varphi_2 (k_0 + k_c) - (\varphi_1 - \varphi_2)(\varphi_2 + k_0) + \alpha(\varphi_2 - \varphi_3)]}{\varphi_2^2 (\varphi_1 - \varphi_2)^2 (\varphi_2 - \varphi_3)} + \frac{e^{\varphi_1 t} [\varphi_3 (k_0 + k_c) + (\varphi_1 - \varphi_3)(\varphi_3 + k_0)]}{\varphi_3^2 (\varphi_1 - \varphi_3)^2 (\varphi_2 - \varphi_3)} \right\}. \quad (22)$$

Здесь

$$\varphi_1 = -\lambda; \quad \varphi_2 = -(k_c + k_0 + \lambda); \quad \varphi_3 = -(k_c + \lambda); \\ c = \lambda(k_0 + k_c + \lambda); \quad b = k_0 + k_c + 2\lambda.$$

Для долгоживущих изотопов и при большой продолжительности работы реактора ($\min \varphi_i t \gg 1$) выражения (21), (22) принимают асимптотический вид:

$$\lambda n_b(t) \approx \frac{k_c}{k_c + k_0} \cdot \frac{Z c_R F_a}{V_R} t; \quad (23)$$

$$\lambda n_p(t) \approx \frac{k_0 k_c}{(k_c + k_0)(k_c + \lambda)} \cdot \frac{V_p}{V_R} \cdot \frac{Z c_R F_a}{F_p} t. \quad (24)$$

При $\max \varphi_i t \ll 1$ можно получить простые разложения:

$$\lambda n_b(t) \approx \frac{\lambda k_c \left(1 + \frac{\lambda \Phi}{\lambda}\right)}{k_c + k_0} \cdot \frac{Z c_R F_a}{V_R} \cdot \frac{t^2}{2}; \quad (25)$$

$$\lambda n_p(t) \approx \frac{\lambda k_c \left(1 + \frac{\lambda \Phi}{\lambda}\right)}{k_c + k_0} \cdot \frac{Z c_R F_a}{F_p} \cdot \frac{V_p}{V_R} \cdot \frac{t^3}{6}. \quad (26)$$

В первый момент времени работы отношение активности воды в реакторах с системой очистки к активности воды в реакторах без системы очистки на основании выражений (18) и (25) равно

$$\frac{\lambda n_b(\lambda \Phi \neq 0)}{\lambda n_b(\lambda \Phi = 0)} = \frac{(k_c + k_0) t}{3}. \quad (27)$$

Обсуждение полученных результатов

В настоящее время известно очень мало экспериментальных данных о постоянных смыва и осаждения в реакторных системах [4, 5, 8].

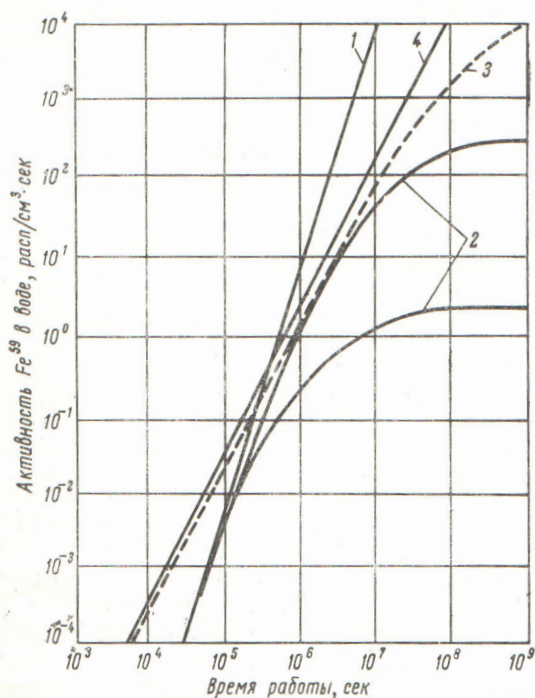
В работе [4] приведена величина k_0 для изотопов Co^{60} и Fe^{59} , равная $\sim 0,06 \text{ сек}^{-1}$, которая,

как признают сами авторы, является весьма ненадежной. На основании анализа результатов работ [5, 8] наиболее достоверной величиной постоянной осаждения можно считать значение $k_0 \approx 10^{-5} \text{ сек}^{-1}$. Значение $k_c \approx 10^{-7} \div 10^{-8} \text{ сек}^{-1}$, приведенное в работе [4], является более приемлемым, так как по порядку величины оно довольно хорошо соответствует постоянной роста коррозионной пленки.

По приведенной выше методике с использованием указанных значений k_c и k_0 на примере изотопа Fe^{59} было оценено влияние системы очистки для гипотетического контура с параметрами $V_R = 5 \text{ м}^3$; $F_R = 600 \text{ м}^2$; $F_a = 300 \text{ м}^2$; $\Phi_{\text{акт}} = 10^{13} \text{ нейтр/см}^2 \cdot \text{сек}$ при различных значениях λ_Φ (0 ; 10^{-5} и 10^{-3} сек^{-1}). Для обычно используемой байпасной системы очистки с отбором $\sim 1-3\%$ от общего расхода величина $\lambda_\Phi = 10^{-3} \text{ сек}^{-1}$ несколько завышена. Однако ее можно считать вполне приемлемой, если отбор на очистку будет составлять $\sim 30\%$ и более, т. е. при использовании полнорасходных фильтров.

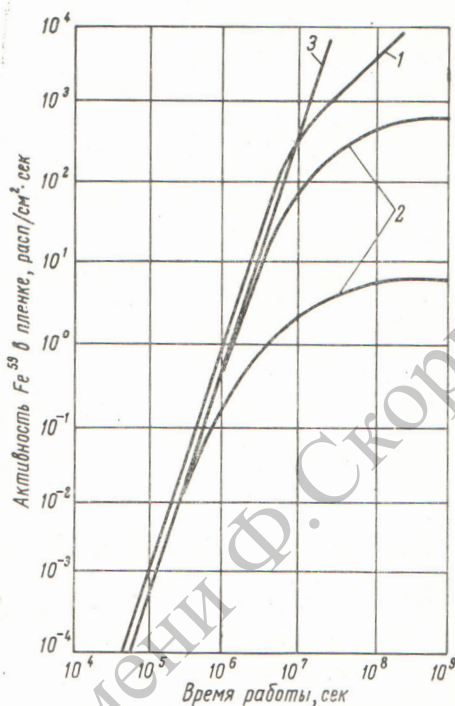
На рис. 1 показано изменение активности воды контура в зависимости от времени работы и постоянной очистки. Как видно (см. кривую 2), постоянная очистки заметно влияет на равновесную активность воды. Для долгоживущих изотопов равновесная активность примерно обратно пропорциональна постоянной очистки.

Аналогичные результаты расчетов активности коррозионной пленки приведены на рис. 2. Как видно из рис. 1, 2, при наличии системы очистки активность воды и поверхности контура с течением времени достигает равновесия (см. кривые 2). При $\lambda_\Phi = 0$ и $t \gg 10^6 \text{ сек}$ выражения для изменения активности со временем имеют асимптотический вид (23), (24).



Р и с. 1. Изменение активности Fe^{59} в воде в зависимости от времени работы реактора и величины λ_{Φ} :

1 — расчет по приближенной формуле (19); 2 — расчет по формуле (9), λ_{Φ} равна 10^{-5} и 10^{-3} $сек^{-1}$; 3 — расчет по формуле (21), $\lambda_{\Phi} = 0$; 4 — расчет по формуле (25).



Р и с. 2. Изменение активности Fe^{59} в пленке на поверхности вне зоны облучения в зависимости от времени работы реактора и величины λ_{Φ} :

1 — расчет по формуле (22), $\lambda_{\Phi} = 0$; 2 — расчет по формуле (10), λ_{Φ} равна 10^{-5} и 10^{-3} $сек^{-1}$; 3 — расчет по приближенной формуле (26).

Авторы благодарят А. В. Никитина за полезный обмен информацией и дискуссии и Т. Ручеву за помощь в проведении численных расчетов.

Поступила в Редакцию 3/VIII 1965 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. C. Bred en. Behavior of Reactor Structural Materials from the Shend Point of Corrosion and Crud-formation. Qq Corrosion of Reactor Materials, TID-7587, ANL.
2. Д. Ротон, П. Коэн. В кн. «Труды Второй международной конференции по мирному использова-

- нию атомной энергии (Женева, 1958)». Избр. докл. иностр. ученых. Т. 4. М., Атомиздат, 1959, стр. 336.
3. J. Deddens, R. Freyberg. Brit. Nucl. Energ., 4, No. 1 (1965).
4. The migration the Activator Corrosion Products in High Pressure Water Loops. In book «Corrosion of Reactor Materials». IAEA, 1962.
5. S. Yerazunis et al. Mechanisms of Reactor System Activation, KAPL-M-SMS-98.
6. C. Baes. Nucl. Safety, 5, 45 (1963).
7. W. Brown, C. Bergman. Nucleonics, 18 No. 7, 60 (1960).
8. Защита ядерных реакторов. Под ред. Т. Роквэлла. М., Изд-во иностр. лит., 1958.

Аппаратура для нейтронного активационного анализа

Б. Г. ЕГИАЗАРОВ, О. А. КАРПУХИН, В. В. МАТВЕЕВ

УДК 543.53

Описаны комплексы аппаратуры и оборудования для стационарной и транспортабельной лабораторий активационного анализа, разработанные в СССР за последние годы. Приведена блок-схема и описана система взаимосвязи отдельных узлов комплекса, позволяющая автоматизировать процесс анализа. Приводятся характеристики нейтронного генератора,

пневмопочты, измерительной аппаратуры и системы мониторинга.

Часть вопросов настоящей работы была освещена в докладе, представленном авторами на Международную конференцию «Современные тенденции в активационном анализе» (19—22 апреля 1965 г., Техас, США).