

Электрическое поле ионов в случае электронного пучка одинаково влияет на  $\bar{\omega}$  и  $\omega_K$  и вклад в сдвиг не вносит.

Полный сдвиг для сгустка, имеющего круглое поперечное сечение радиусом  $r_0$  и равномерную плотность, можно представить в виде

$$\omega_K - \bar{\omega} \approx \frac{r_e R c N}{v \gamma^3 r_0^2 L} - \frac{r_e R c N}{v \gamma^3 \left(\frac{H}{2}\right)^2 L} - \frac{\pi}{3} \times \\ \times \frac{r_e R c N \Phi}{v \gamma H^3 \sqrt{T \sigma}} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\cos 2\pi n v}{\sqrt{n}},$$

где  $L$  — длина сгустка. График  $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{\cos 2\pi n v}{\sqrt{n}}$  как функции  $v$  приведен на рис. 2.

В заключение можно, по-видимому, сказать, что длинный сгусток при наличии синхро-

тронного фазового движения его частиц с частотой  $\Omega \gg \delta$  может оказаться неустойчивым лишь по отношению к возбуждению когерентных колебаний сгустка как целого (все частицы сгустка летят при этом по одной и той же траектории). В этом случае будет справедлив расчет, проведенный выше для короткого сгустка.

Авторы выражают благодарность Б. В. Чирикову, М. М. Карлинеру и Б. Гиттельману за весьма полезные обсуждения и В. Л. Ауслендеру за интерес к работе.

Поступила в Редакцию 22/XI 1965 г.  
В окончательной редакции 23/V 1966 г.

### ЛИТЕРАТУРА

1. L. Laslett, V. Neil, A. Sessler. Rev. Scient. Instrum., 36, 436 (1965).
2. В. И. Балбеков, А. А. Коломенский. «Атомная энергия», 19, 126 (1965).

## Критерий эффективности использования ядерного горючего

В. В. БАТОВ, Ю. И. КОРЯКИН

УДК 338.409.4:621.039

Практика проектирования и эксплуатации энергетических реакторов выдвигает ряд задач, связанных с обеспечением наиболее эффективного использования ядерного горючего в реакторе. Настоящая работа посвящена обоснованию и определению критерия эффективности использования ядерного горючего.

Сложная взаимосвязь ядерно-физических, тепловых, экономических и других факторов, влияющих на эффективность использования горючего, требует установления критерия эффективности его использования. Критерий должен быть достаточно общим: учитывать все элементы эффективности применительно к различным реакторам и топливным циклам и в то же время однозначно определять эффективность.

В настоящей работе делается попытка определить этот критерий в удобном для практического пользования виде, исследуются условия его применимости.

Рассмотрим однозонный тепловой реактор с однородной начальной топливной загрузкой, работающий без частичных перегрузок (активная зона перегружается одновременно при достижении горючим средней глубины выгорания). Топливный цикл такого реактора может быть как разомкнутым (работа «на

выброс»), так и замкнутым (с регенерацией горючего). Применим общий критерий эффективности производственных фондов [1] к ядерной энергетике и выделим из него часть, связанную с ядерным горючим:

$$Z_T = C_T + pK_T, \quad (1)$$

где  $C_T$  и  $K_T$  — соответственно годовые расходы и производственные фонды АЭС, связанные с ядерным горючим;  $p$  — нормативный коэффициент эффективности производственных фондов.

Возможны два случая определения расчетных затрат. В первом случае, согласно работе [2], при определении составляющих затрат по отпускным ценам в составе капиталовложений смежные капиталовложения\* не учитываются, и следовательно,

$$K_T = K_{об}, \quad (2)$$

где  $K_{об}$  — вложения в оборотные фонды в виде необходимых запасов ядерного горючего, полуфабрикатов и других предметов труда, рас-

\* Капиталовложения в топливодобывающие и топливopеpабатывающие (включая транспорт) предприятия топливного цикла, обслуживающие АЭС.

считываемые по отпускным ценам. Во втором случае при определении составляющих затрат по себестоимости потребляемой продукции в составе производственных фондов необходимо дополнительно учитывать смежные капиталовложения  $K_{см}$ , т. е.

$$K_T = K_{об} + K_{см}. \quad (3)$$

Рассмотрим первый случай. Введем обозначения:  $\tilde{C}(t) = \tilde{C}_i(t)$  — отпускная цена ядерного горючего при его движении по топливному циклу;  $i$  — номер звена топливного цикла;  $T_i = t_i - t_{i-1}$  — длительность передела порции ядерного горючего (продукции, соответствующей 1 кг урана начального обогащения) в  $i$ -м звене, лет. Под переделом подразумевается любая операция, производимая с ядерным горючим, приводящая к изменению его стоимости (например, изготовление тепловыделяющих элементов, облучение горючего в реакторе, выдержка отработавшего ядерного горючего, регенерация и т.д.);  $Q$  — тепловая мощность реактора;  $N$  — электрическая мощность реактора;  $\eta$  — к.п.д. реактора;  $G$  — загрузка реактора;  $t_H$  — начало кампании;  $T_K$  — длительность кампании реактора;  $\bar{B}$  — средняя глубина выгорания ядерного горючего;  $\phi$  — коэффициент использования установленной мощности АЭС.

Величина оборотных фондов топливного цикла определяется, согласно методическим поло-

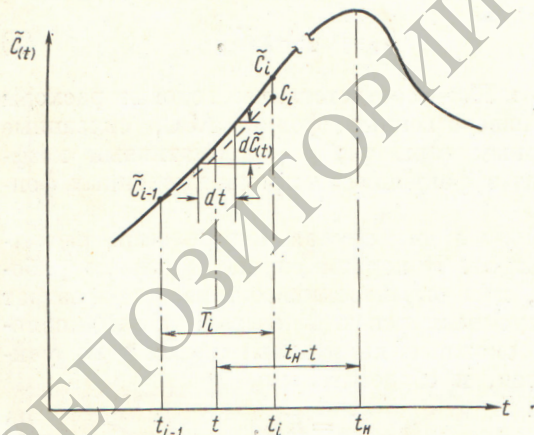


Рис. 1. Изменение во времени стоимости ядерного горючего при его движении по топливному циклу:

$C_i - \tilde{C}_{i-1}$  — себестоимость передела ядерного горючего в  $i$ -м звене топливного цикла, руб/кг U начального обогащения;  $d\tilde{C}(t)$  — изменение цены продукции топливного цикла за интервал времени  $dt$ , руб/кг U начального обогащения;  $t_H - t$  — время «замораживания» стоимости  $\frac{1}{2}d\tilde{C}$ .

жениям, изложенным в работах [1, 2], с учетом их оборачиваемости, изменения стоимости горючего в процессе его передела в каждом звене топливного цикла и приводится к моменту времени, связанному с началом использования горючего в реакторе.

На рис. 1 показано изменение стоимости ядерного горючего при его движении по топливному циклу. Если цикл начинается с добычи урановой руды, то начало кривой  $\tilde{C}(t)$  лежит в точке 0. Увеличение стоимости ядерного горючего связано с перенесением на него прошлого и живого труда при переделе, уменьшение стоимости — с выработкой электроэнергии.

Оборотные фонды топливного цикла складываются из двух частей: стоимости горючего и стоимости передела.

Обозначим первую часть оборотных фондов, которая связана со стоимостью ядерного горючего, поступающего на вход в  $i$ -е звено, и которая не меняется в течение всего передела  $T_i$ , через  $K_{1i}$  и вторую часть оборотных фондов, которая связана со стоимостью передела ядерного горючего, через  $K_{2i}$ . Тогда

$$K_{об} = \sum_i (K_{1i} + K_{2i}) = K_{1об} + K_{2об}. \quad (4)$$

Величину оборотных фондов, связанных с начальной для каждого звена стоимостью ядерного горючего и приведенных к моменту начала использования этого горючего в реакторе, можно записать в виде

$$K_{1об} = \frac{G\phi}{T_K} \sum_i \tilde{C}_{i-1} T_i (1+p)^{t_H-t_i} \quad (5)$$

$$(i=1, 2, \dots; \tilde{C}_0=0).$$

Рассмотрим вторую часть оборотных фондов (передел).

Из рис. 1 следует, что приращение стоимости ядерного горючего на величину  $d\tilde{C}(t)$  за интервал времени  $dt$  приводит к приращению приведенной стоимости ядерного горючего в момент времени  $t_i$ :

$$dK_{2i}(t) = k_{n_i} \frac{G\phi}{T_K} T_i d\tilde{C}(t) (1+p)^{t_i-t}, \quad (6)$$

где  $k_{n_i} = \frac{1}{n_i+1}$  ( $n_i \geq 0$ );  $n_i$  — показатель степени в случае представления функции  $\tilde{C}_i = \tilde{C}_i(t)$  в степенном виде. В случае, если  $n_i = 1$  (линейная зависимость),  $k_1 = 1/2$  и

$$dK_{2i}(t) = \frac{1}{2} \cdot \frac{G\phi}{T_K} T_i d\tilde{C}(t) (1+p)^{t_i-t}. \quad (7)$$

Предположим, что зависимость  $\tilde{C}_i = \tilde{C}_i(t)$  в пределах каждого звена линейна (это приближение можно рассматривать достаточным ввиду малости интервалов  $T_i$  по сравнению с календарным годом и равномерности производственных процессов), тогда

$$\tilde{C}_i(t) = \tilde{C}_{i-1} + \frac{\tilde{C}_i - \tilde{C}_{i-1}}{T_i} (t - t_i), \quad (8)$$

откуда

$$\frac{d\tilde{C}_i(t)}{dt} = \frac{\tilde{C}_i - \tilde{C}_{i-1}}{T_i}. \quad (9)$$

Поскольку

$$K_{2i} = \int_{t_{i-1}}^{t_i} dK_{2i}(t), \quad (10)$$

то, подставив выражение (7) с учетом (9) в уравнение (10) и проинтегрировав, получим

$$K_{2i} = \frac{1}{2} \cdot \frac{G\Phi}{T_K} (\tilde{C}_i - \tilde{C}_{i-1}) \frac{[(1+p)^{T_i} - 1]}{\ln(1+p)}. \quad (11)$$

Заметим, что в случае дискретной реализации дохода (в конце каждого года) выражение (11) меняется незначительно:

$$K_{2i} = \frac{1}{2} \cdot \frac{G\Phi}{T_K} (C_i - C_{i-1}) \frac{[(1+p)^{T_i} - 1]}{p}. \quad (11')$$

Величина оборотных фондов топливного цикла, связанных с появлением стоимости передела ядерного горючего в каждом звене и приведенных к началу использования этого горючего в реакторе, имеет вид

$$K_{2\text{об}} = \sum_i K_{2i} (1+p)^{t_n - t_i} \quad (12)$$

или с учетом выражения (11)

$$K_{2\text{об}} = \frac{1}{2} \cdot \frac{G\Phi}{T_K} \sum_i (C_i - C_{i-1}) \times \frac{[(1+p)^{T_i} - 1]}{\ln(1+p)} (1+p)^{t_n - t_i}. \quad (13)$$

Подставив выражения (5) и (13) в уравнение (4), получим полную величину оборотных фондов топливного цикла, приведенных к моменту начала использования ядерного горючего в реакторе:

$$K_{\text{об}} = \frac{G\Phi}{T_K} \sum_i \left\{ \tilde{C}_{i-1} T_i + \frac{1}{2} (\tilde{C}_i - \tilde{C}_{i-1}) \frac{[(1+p)^{T_i} - 1]}{\ln(1+p)} \right\} (1+p)^{t_n - t_i}. \quad (14)$$

Учитывая, что стоимость годового расхода ядерного горючего

$$C_T = \frac{G\Phi}{T_K} \sum_i (\tilde{C}_i - \tilde{C}_{i-1}) \quad (15)$$

и подставив выражение (14) и (15) в уравнение (1), получим уравнение критерия эффективности использования ядерного горючего для однозонного теплового реактора с однородной начальной топливной загрузкой

$$\tilde{Z}_T = \frac{G\Phi}{T_K} \sum_i \left\{ (\tilde{C}_i - \tilde{C}_{i-1}) + p \left[ \tilde{C}_{i-1} T_i + \frac{1}{2} (C_i - C_{i-1}) \frac{[(1+p)^{T_i} - 1]}{\ln(1+p)} \right] (1+p)^{t_n - t_i} \right\} \text{ руб/год}. \quad (16)$$

Учитывая, что

$$\bar{B} = 365 \frac{Q_{T_K}}{G},$$

получим

$$z_T = \frac{100}{24} \cdot \frac{1}{\bar{B}\eta} \sum_i \left\{ (C_i - C_{i-1}) + p \left[ \tilde{C}_{i-1} T_i + \frac{1}{2} \times (C_i - C_{i-1}) \frac{[(1+p)^{T_i} - 1]}{\ln(1+p)} \right] \times (1+p)^{t_n - t_i} \right\} \text{ коп/квт.ч}. \quad (17)$$

Первый член правой части уравнения (17) представляет собой топливную составляющую стоимости ядерной электроэнергии при определении составляющих затрат по отпускным ценам

$$\tilde{c}_T = \frac{100}{24} \cdot \frac{\sum_i (C_i - C_{i-1})}{\bar{B}\eta} = \sum_i c_{Ti}, \quad (18)$$

где  $c_{Ti}$  — часть топливной составляющей стоимости электроэнергии, обусловленная затратами  $i$ -го звена топливного цикла или стоимостью передела ядерного горючего в этом звене.

Уравнения (16) и (17) получены в предположении непрерывной реализации дохода, связанного с движением ядерного горючего по топливному циклу. Нетрудно показать, что в случае дискретной реализации дохода (в конце каждого года) уравнения (16) и (17) меняются незначительно: только выражение  $\ln(1+p)$  во втором члене правой части уравнений (16) и (17) заменяется на  $p$ .

Если учесть, что

$$\begin{aligned} (1+p)^{t_n-t_i} &\approx 1+p(t_n-t_i); \\ (1+p)^{T_i} &\approx 1+pT_i; \\ \ln(1+p) &\approx p, \end{aligned}$$

получим приближенное выражение критерия эффективности использования ядерного горючего

$$\begin{aligned} \tilde{z}_T &= \frac{100}{24} \cdot \frac{1}{B\eta} \sum_i \left\{ (\tilde{C}_i - \tilde{C}_{i-1}) + \frac{1}{2} p T_i \times \right. \\ &\times (C_i + C_{i-1}) [1 + p(t_n - t_i)] \left. \right\} \text{ коп/квт.ч.} \quad (19) \end{aligned}$$

Формулы (16) и (17) представляют собой уравнения критерия эффективности использования ядерного горючего для однозонного теплового реактора с однородной начальной загрузкой в случае расчета составляющих расхода по отпускным ценам в линейном приближении функции  $\tilde{C}_i = \tilde{C}_i(t)$  и при предположении непрерывной реализации дохода, связанного со стоимостью ядерного горючего.

Приближенная формула критерия эффективности использования ядерного горючего (19) получена из формулы (17) заменой сложных процентов простыми, а также заменой непрерывной реализации дохода дискретной. Приближенная формула (19) удобна для практического пользования: она более проста по сравнению с формулой (17) и в то же время обеспечивает достаточную точность расчетов.

Рассмотрим второй случай, когда годовые расходы рассчитываются по себестоимости, т.е. с учетом смежных капиталовложений.

Годовые расходы на ядерное горючее определяются выражением (см. рис. 1)

$$C_T = \frac{G\Phi}{T_K} \sum_i (C_i - \tilde{C}_{i-1}), \quad (20)$$

а топливная составляющая себестоимости ядерной электроэнергии

$$c_T = \frac{100}{24} \cdot \frac{1}{B\eta} \sum_i (C_i - \tilde{C}_{i-1}) = \sum_i c_{Ti}. \quad (21)$$

Размер оборотных фондов аналогично рассмотренному выше случаю определяется по формуле

$$\begin{aligned} K_{об} &= \frac{G\Phi}{T_K} \sum_i \left\{ C_{i-1} T_i + \right. \\ &+ \frac{1}{2} (C_i - C_{i-1}) \frac{[(1+p)^{T_i} - 1]}{\ln(1+p)} \left. \right\} (1+p)^{t_n-t_i}. \quad (22) \end{aligned}$$

Предположим, что все предприятия топливного цикла построены и нормально функционируют, тогда смежные капиталовложения можно определить выражением

$$K_{см} = \frac{G\Phi}{T_K} \sum_i k_{y.ci}, \quad (23)$$

где  $k_{y.ci}$  — удельные смежные капиталовложения в  $i$ -е предприятие топливного цикла, руб./год/кг У.

Подставив выражения (20), (22) и (23) в уравнение (1), получим

$$\begin{aligned} z_T &= \frac{G\Phi}{T_K} \sum_i \left\{ (C_i - \tilde{C}_{i-1}) + p(1+p)^{t_n-t_i} \times \right. \\ &\times \left[ C_{i-1} T_i + \frac{1}{2} \cdot \frac{[(1+p)^{T_i} - 1]}{\ln(1+p)} (C_i - \tilde{C}_{i-1}) \right] + \\ &+ p k_{y.ci} T_i \left. \right\} \text{ руб/год}, \quad (24) \end{aligned}$$

откуда

$$\begin{aligned} \tilde{z}_T &= \frac{100}{24} \cdot \frac{1}{B\eta} \sum_i \left\{ (C_i - \tilde{C}_{i-1}) + p(1+p)^{t_n-t_i} \times \right. \\ &\times \left[ C_{i-1} T_i + \frac{1}{2} \cdot \frac{[(1+p)^{T_i} - 1]}{\ln(1+p)} (C_i - \tilde{C}_{i-1}) \right] + \\ &+ p k_{y.ci} T_i \left. \right\} \text{ коп/квт.ч.} \quad (25) \end{aligned}$$

Из сравнения выражений (17) и (25), полученных двумя различными способами для критерия эффективности использования ядерного горючего, видно, что они совпадают при условии

$$\begin{aligned} \sum_i \left\{ (\tilde{C}_i - C_i) + p(1+p)^{t_n-t_i} \left[ (\tilde{C}_{i-1} - C_{i-1}) \times \right. \right. \\ \left. \left. \times T_i + \frac{1}{2} (\tilde{C}_i - C_i) \frac{[(1+p)^{T_i} - 1]}{\ln(1+p)} \right] \right\} = \\ = p \sum_i k_{y.ci} T_i, \quad (26) \end{aligned}$$

которое выражает равенство прибавочных продуктов, рассчитанных в одном случае по разнице отпускной цены и себестоимости продукции топливного цикла и во втором случае — по смежным капиталовложениям. На практике приходится учитывать, что отпускные цены не всегда правильно отражают затраты общественно необходимого труда (народнохо-

зайственную стоимость), поэтому более доступное определение топливной составляющей расчетных затрат по формуле (17) следует подкреплять определением топливной составляющей расчетных затрат по формуле (25).

При правильном отражении отпускными ценами общественно необходимых затрат труда равенство (26) имеет место в действительности и формулы (17) и (25), определяющие критерий эффективности использования ядерного горючего, становятся тождественными.

Рассмотрим многозонный реактор. Им может быть тепловой реактор с запальной зоной (или зонами), быстрый реактор с активной зоной и экранами, а также тепловой реактор, но с неоднородной начальной топливной загрузкой. Строго говоря, реактор с однородной начальной топливной загрузкой вследствие неоднородностей выгорания горючего в активной зоне вскоре после начала работы становится реактором с неоднородной загрузкой.

Обозначим через  $\rho_j$  долю мощности  $j$ -й зоны реактора

$$\rho_j = \frac{Q_j}{Q} \quad (\sum_j \rho_j = 1)$$

и через  $\bar{B}_j$  глубину выгорания ядерного горючего  $j$ -й зоны (по смыслу это тоже средняя глубина выгорания, но усредненная по меньшему объему горючего, в пределе — по каждому каналу или даже части его)

$$\bar{B}_j = \frac{365 \cdot Q_j T_{kj}}{G_j}$$

Рассмотрим каждую  $j$ -ю зону как однозонный реактор, для которого справедливы все вышеприведенные уравнения, получим уравнения для топливной составляющей стоимости и топливной составляющей расчетных затрат для многозонного реактора в случае расчета затрат по отпускным ценам:

$$\tilde{c}_T = \frac{100}{24} \cdot \frac{1}{\eta} \sum_i \sum_j \frac{\rho_j}{B_j} (\tilde{C}_{i,j} - \tilde{C}_{i-1,j}); \quad (27)$$

$$\begin{aligned} \tilde{z}_T = & \frac{100}{24} \cdot \frac{1}{\eta} \sum_i \sum_j \frac{\rho_j}{B_j} \left\{ (\tilde{C}_{ij} - \tilde{C}_{i-1,j}) + \right. \\ & \left. + p(1+p)^{t_{nj}-t_{ij}} [\tilde{C}_{i-1,j} T_{ij} + \right. \\ & \left. + \frac{1}{2} (\tilde{C}_{ij} - \tilde{C}_{i-1,j}) \frac{[(1+p)^{T_{ij}} - 1]}{\ln(1+p)}] \right\}. \quad (28) \end{aligned}$$

При замене в формуле (28) сложных процентов простыми и непрерывной реализации дохода дискретной получим приближенную формулу критерия эффективности использования ядерного горючего для многозонного реактора

$$\begin{aligned} \tilde{z}_T = & \frac{100}{24} \cdot \frac{1}{\eta} \sum_i \sum_j \frac{\rho_j}{B_j} \left\{ (\tilde{C}_{ij} - \tilde{C}_{i-1,j}) + \right. \\ & \left. + \frac{1}{2} p T_{ij} (\tilde{C}_{i,j} + \tilde{C}_{i-1,j}) [1 + p(t_{nj} - t_{ij})] \right\}. \quad (29) \end{aligned}$$

Аналогично можно получить выражения для  $c_T$  и  $z_T$  в случае определения затрат по себестоимости, которые в настоящей работе не приводятся. При выводе формул (27) и (28) мощность  $j$ -й зоны предполагалась неизменной лишь в течение отрезков времени  $\Delta T_k$  между каждыми двумя соседними вариантами реактора из  $j$  зон. Например, в случае вывода реактора в установившийся режим перегрузок  $\Delta T_k$  представляет собой время между двумя соседними частичными перегрузками (рис. 2). Другими словами, выражения (27) и (28) определяют величины топливной составляющей стоимости и топливной составляющей расчетных затрат электроэнергии только в пределах этих отрезков времени  $\Delta T_k$ . Средние значения  $\tilde{c}_T$  и  $\tilde{z}_T$  за отчетные периоды можно получить путем обычного усреднения. Так, в случае вывода реактора в установившийся режим перегрузок

$$\tilde{c} = \frac{\sum_k \tilde{c}_{Tk} \Delta t_k}{T};$$

$$\tilde{z} = \frac{\sum_k \tilde{z}_{Tk} \Delta t_k}{T},$$

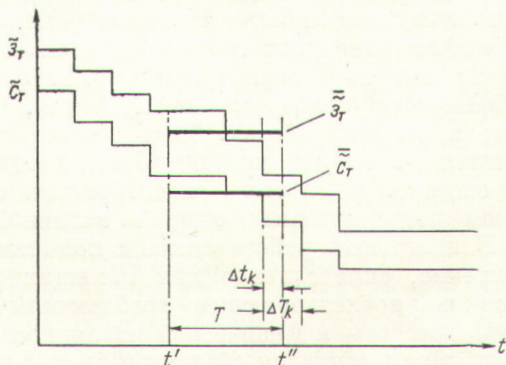


Рис. 2. Изменение топливной составляющей стоимости и топливной составляющей расчетных затрат электроэнергии при выводе реактора в установившийся режим перегрузок.

где  $\Delta T_k$  — время между  $k$ -й и  $(k + 1)$ -й частичными перегрузками;  $T$  — отчетный период времени ( $T = t'' - t'$ );  $\Delta t_k$  — часть интервала  $\Delta T_k$ , входящая в интервал времени  $T$ .

Как видно из рис. 2, вывод реактора в установившийся режим работы связан с уменьшением топливной составляющей стоимости и топливной составляющей расчетных затрат от некоторого начального значения до равновесного, соответствующего выходу реактора в установившийся режим частичных перегрузок.

В заключение авторы выражают свою признательность В. Б. Лыткину за ценные замечания при обсуждении статьи.

Поступила в Редакцию 26/IV 1966 г.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Типовая методика определения экономической эффективности капитальных вложений и новой техники в народном хозяйстве СССР. М., Госпланиздат, 1960.
2. Основные методические положения технико-экономических расчетов в энергетике. М., Гостехиздат, 1959.

## Активация продуктов коррозии в ядерных реакторах

А. П. ВЕСЕЛКИН, А. В. НИКИТИН

УДК 621.039.56

Рассмотрены вопросы массопереноса и активации продуктов коррозии в ядерных реакторах с водой под давлением и в кипящих реакторах. Изложено состояние проблемы и отмечены трудности ее решения. Приводится математическая постановка задачи и решение системы уравнений массопереноса для стационарного случая, а также приближенное решение нестационарной задачи для накопления  $\text{Co}^{60}$ . На основании решений проанализированы известные экспериментальные данные и получены средние по нескольким реакторным системам значения коэффициентов массопереноса: для вероятности осаждения ( $\omega = 3,5 \cdot 10^{-5} \text{ сек}^{-1}$ ) и смыва ( $\gamma = 5 \cdot 10^{-8} \text{ сек}^{-1}$ ) частиц.

струкционных материалов контура. На поверхности металла образуется окисная пленка и происходит эмиссия ионов металла в воду [11, 12]. Наружный слой окисной пленки формируется под влиянием осаждения частиц из потока воды и в результате эрозии поверхности. Увеличение внутренней окисной пленки (называемой в дальнейшем основной) является процессом с диффузионным контролем, скорость роста пленки уменьшается со временем. Толщина внешней пленки (называемой в дальнейшем наносной) под влиянием конкурирующих процессов стабилизируется и остается неизменной. Для поверхностей из нержавеющей стали характерная толщина наносной пленки 1—10 мк [6, 8, 10].

В литературе имеются сведения о величине радиоактивной загрязненности на действующих реакторах [1—7] и приводятся рекомендации по методам их расчета [6—10]. Однако для кипящих реакторов такие рекомендации отсутствуют.

Как показано в работе [10], математическое усложнение задачи не приводит к существенному повышению точности решения, что обусловлено неудовлетворительным знанием констант массопереноса. Кроме того, недостаточно обоснованы некоторые ограничения, принятые в ранних работах. Так, в одних работах учитывали не все источники радиоактивности в системе, в других — пренебрегали осаждением радиоактивных ядер в активной зоне.

В настоящей работе сделана попытка найти решение, справедливое для кипящих реакторов и удовлетворяющее требованиям точности, простоты и физической наглядности. При этом рассматривался следующий механизм массопереноса примесей в реакторе. Нерadioактивные ядра-мишени появляются в системе циркуляции в результате коррозии кон-

Концентрация молекул и ионов металла в воде, несмотря на наличие ионообменника, увеличивается со временем и может достигнуть насыщения по растворимости, когда из раствора начнет выделяться твердая фаза — частицы различных размеров. Эти частицы, а также продукты эрозии при циркуляции по контуру оседают на его поверхности. В зонах с максимальным изменением скорости и плотности теплоносителя (так называемые ловушки частиц) возможно селективное осаждение частиц.

В кипящих реакторах появляются два дополнительных источника примесей: коррозия конструкционных материалов в паровой и конденсатной частях контура и подсосы в конденсаторе. Механизм уноса примесей реакторной воды с паром такой же, как и в котельных установках с органическим топливом, и обусловлен двумя процессами: растворением примесей в паре и уносом примесей с влагой [13,