

14. Nikolaev Yu.A., Nikolaeva A.V., Kryukov A.M. The nickel effect on mechanical property recovery under post-irradiation annealing. — In: Fourth Intern. Conf. on Material Science Problems in NPP Equipment Production and Operation, St. Petersburg, Russia, 1996, v. 1, p. 231—235.
15. Утевский Л.М., Гликман Е.Э., Карк Г.С. Обратимая отпускная хрупкость стали и сплавов железа. М.: Металлургия, 1987. 222 с.
16. Nikolaev Yu.A., Nikolaeva A.V. Embrittlement of low-alloyed steels due to impurity segregation at intergranular boundaries. — Material Science Forum, 1996, v. 207—209, p. 653—656.
17. Николаева А.В., Николаев Ю.А. Кинетика радиационно-стимулированной зернограницной адсорбции фосфора в низколегированных сталях. — In: Fourth Intern. Conf. on Material Science Problems in NPP Equipment Production and Operation, St. Petersburg, Russia, 1996, v. 3, p. 18—26.

Поступила 18.02.2000

В окончательной редакции 24.11.2000

УДК 621.039

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОВЕДЕНИЯ АКТИВИРОВАННЫХ ПРОДУКТОВ КОРРОЗИИ ПРИ ПУСКЕ РБМК-1000 ПОСЛЕ КАПИТАЛЬНОГО ПЛАНОВОГО РЕМОНТА

*Крицкий В.Г., Родионов Ю.А., Стяжкин П.С., Хасанова Г.Б. (ВНИПИЭТ),
Епихин А.И., Ковалев С.М., Козлов Е.П. (Ленинградская АЭС)*

Модели активации продуктов коррозии предлагались неоднократно [1—3]. Модель ТРАКТ-2 наиболее полно учитывает все факторы, влияющие на образование и миграцию радионуклидов в контуре АЭС [1]. Она содержит 24 параметра, характеризующие конкретный конструкционный материал и радионуклид. Кроме того, в контуре выделены семь участков и 13 объектов, для которых составляются свои уравнения и берутся соответствующие коэффициенты. Такая модель может быть полезна для оценки влияния того или иного фактора, но не может служить основой для прогнозирования поведения радионуклидов реальной реакторной установки. Упрощенные модели позволяют получить точное описание изменения концентрации радионуклида в контуре, но, как правило, дают неверные оценки количества отложений в активной зоне реактора [3].

Было показано, что для получения адекватной модели достаточно использовать простую схему контура (рис. 1) и всего четыре параметра:

постоянную выведения радионуклида из контура, включающую в себя сумму путей выведения;

скорость поступления нуклида-мишени в объем контура;

постоянную осаждения радионуклида и нуклида-мишени на поверхности активной зоны;

постоянную смыва радионуклида и нуклида-мишени с поверхности активной зоны.

Модель можно существенно упростить, если пренебречь процессами отложения нуклидов вне активной зоны, так как количество радионуклидов в активной зоне и выводимых из реактора намного больше, чем в остальной части контура.

Пренебрегая активацией примесей, находящихся в теплоносителе, накопление нуклида-мишени и соответствующего радионуклида на поверхности активной части контура и в воде КМПЦ можно описать системой уравнений вида



Р и с. 1. Схема к расчету активации нуклидов в активной зоне

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial N}{\partial t} &= \lambda_{oc} M - \lambda_{oc} N; \\
 \frac{\partial M}{\partial t} &= RN_A / m_m + \lambda_{cm} N - (\lambda_0 + \lambda_{oc}) M; \\
 \frac{\partial A}{\partial t} &= \frac{\sigma \Phi W \lambda}{3.7 \cdot 10^{10}} N - (\lambda + \lambda_{cm}) A + \lambda_{oc} Q; \\
 \frac{\partial Q}{\partial t} &= \lambda_{cm} A - (\lambda_0 + \lambda + \lambda_{oc}) Q,
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

где N , M — количество атомов мишени на поверхности активной зоны и в воде КМПЦ соответственно; A , Q — количество радионуклида на поверхности активной зоны и в воде КМПЦ, Ки; $\lambda_{\text{см}}$, $\lambda_{\text{ос}}$ — постоянные смыва и осаднения нуклидов с поверхности активной зоны соответственно, с^{-1} ; R — скорость поступления нуклида-мишени в контур, $\text{г} \cdot \text{с}^{-1}$; N_A — число Авогадро; m_m — масса 1 г атома нуклида-мишени, г; σ — сечение захвата нейтронов мишенью, см^{-2} ; Φ — нейтронный поток на 1 МВт мощности реактора, равный $3,8 \cdot 10^9 \text{ с}^{-1} \cdot \text{см}^2/\text{МВт}$; W — тепловая мощность реактора, МВт; λ_0 — постоянная выведения нуклидов из контура, с^{-1} ; λ — постоянная распада, с^{-1} .

При моделировании оценке скорости выведения радионуклидов из контура уделяется недостаточно внимания. Как правило, постоянную выведения считают одинаковой для всех радионуклидов и равной $(2-8) \cdot 10^{-5} \text{ с}^{-1}$ [3—5]. Однако такая скорость выведения более характерна для продуктов деления, например, изотопов иода, так как эффективность их очистки и переход в пар значительно ниже, чем у активированных продуктов коррозии. Кроме того, эти свойства зависят от физико-химического состояния радионуклидов в воде контура и дисперсности частиц продуктов коррозии. Поэтому постоянная выведения должна оцениваться экспериментально.

Постоянная выведения складывается из следующих величин: байпасная очистка, утечки контурной воды, эжекторные сдувки в паровой части контура, очистка конденсата пара.

Важную роль в выведении радионуклидов играет эффективность байпасной очистки теплоносителя от продуктов коррозии и радионуклидов.

В табл. 1 приведены коэффициенты байпасной очистки по стабильному железу и натрию на основе результатов химического контроля теплоносителя в КМПЦ и после очистки на фильтрах смешанного действия, а также коэффициенты очистки теплоносителя от радионуклидов по данным ежемесячных замеров радионуклидного состава теплоносителя в КМПЦ и после очистки на фильтрах за 1998 г. Обращает на себя внимание высокая эффективность очистки от ^{51}Cr по сравнению с другими радионуклидами. Эффективность удаления ^{54}Mn и ^{60}Co примерно одинакова. По данным работы [6] коэффициент очистки по железу для АЭС с РБМК-1000 составляет 3,3. Данных об эффективности очистки от ^{59}Fe не обнаружено.

Т а б л и ц а 1. Коэффициенты очистки теплоносителя на линии байпаса

Параметр	Na	Fe	^{51}Cr	^{54}Mn	^{60}Co	^{137}Cs
Среднее	12	2,2	540	8,8	9,1	34
Доверительный интервал	0,7	0,3	160	1,7	5,5	32,7
Минимум	4	1	210	2,6	1,9	1,9
Максимум	20	6	1050	15,5	39	365
Число наблюдений	90	72	16	17	15	24

Вторым важным моментом в определении постоянной выведения является распределение радионуклидов между паром и водой. Так, по данным работы [6] коэффициент распределения железа между паром и водой составляет 0,2—0,25. По результатам наблюдений на Ленинградской АЭС он составляет около 0,18. Помимо растворимости в паре (истинный коэффициент распределения) существенную роль играет и механический унос частиц гидроксида железа вместе с сорбированными на нем радионуклидами. Следует отметить, что в нашем случае имеется в виду не истинный, а наблюдаемый коэффициент распределения, который определяется как отношение концентрации в паре и воде и включает в себя также капельный унос нуклидов за

счет влаги, имеющейся в паре. В качестве меры капельного уноса служит соотношение концентрации натрия в паре и воде, поскольку он не растворим в паре ($K_p \approx 10^{-6}$).

Реальный унос $4 \cdot 10^{-4}$ значительно ниже проектного для КМПЦ РБМК [7].

Таким образом, переход активированных продуктов коррозии в пар и последующая конденсатоочистка способны обеспечить значительный их вывод из контура. По данным работы [6] в РБМК с паром из контура удаляется до 20% железа при влажности пара менее 0,1%, тогда как байпасная очистка удаляет только 5—7%.

При проведении расчетов использовали следующие характеристики КМПЦ:

масса теплоносителя, т . . .	1200
скорость циркуляции, т/ч . . .	37 500
производительность байпасной очистки, т/ч . . .	200
эжекторные сдувки, т/ч . . .	4,22
коэффициент капельного уноса . . .	0,001
доля суммарной активности, переходящей в эжекторные сдувки . . .	0,05
производительность по пару, т/ч . . .	5468
среднегодовые протечки, т/ч . . .	11,7

Постоянные выведения приведены в табл. 2. Реальные постоянные выведения активированных продуктов коррозии значительно выше тех, что обычно принимают в расчетах, в основном, за счет довольно высоких коэффициентов распределения между паром и водой. Данных для расчета постоянных выведения ^{59}Fe и ^{24}Na недостаточно, но они могут быть приняты равными постоянным выведения соответствующих стабильных изотопов железа и натрия.

Т а б л и ц а 2. Постоянные выведения радионуклидов для 1-й очереди Ленинградской АЭС, с^{-1}

Параметр	Na	Fe	^{51}Cr	^{54}Mn	^{58}Co	^{60}Co
Коэффициенты распределения, принятые в расчетах	$2,1 \cdot 10^{-6}$	0,18	0,01	0,33	0,47	0,51
Вынос с паром	$2,3 \cdot 10^{-6}$	$4,2 \cdot 10^{-4}$	$2,5 \cdot 10^{-5}$	$7,6 \cdot 10^{-4}$	$1,1 \cdot 10^{-3}$	$1,2 \cdot 10^{-3}$
Выведение радионуклидов на фильтрах контрольной очистки	$2,1 \cdot 10^{-6}$	$2,2 \cdot 10^{-4}$	$2,5 \cdot 10^{-5}$	$6,7 \cdot 10^{-4}$	$6,7 \cdot 10^{-4}$	$7,2 \cdot 10^{-4}$
Выведение на фильтрах байпасной очистки	$3,9 \cdot 10^{-5}$	$2,2 \cdot 10^{-5}$	$4,2 \cdot 10^{-5}$	$3,7 \cdot 10^{-5}$	$2,6 \cdot 10^{-5}$	$2,6 \cdot 10^{-5}$
Вынос радионуклидов с эжекторными сдувками	$4,5 \cdot 10^{-8}$	$1,6 \cdot 10^{-8}$	$9,7 \cdot 10^{-10}$	$2,9 \cdot 10^{-8}$	$4,1 \cdot 10^{-8}$	$4,5 \cdot 10^{-8}$
Унос с протечками	$4,9 \cdot 10^{-6}$	$4,9 \cdot 10^{-6}$	$4,9 \cdot 10^{-6}$	$4,9 \cdot 10^{-6}$	$4,9 \cdot 10^{-6}$	$4,9 \cdot 10^{-6}$
Постоянная выведения	$4,6 \cdot 10^{-5}$	$2,5 \cdot 10^{-4}$	$6,8 \cdot 10^{-5}$	$7,1 \cdot 10^{-4}$	$3,0 \cdot 10^{-4}$	$7,5 \cdot 10^{-4}$

Преимуществом системы уравнений (1) является возможность аналитического решения путем сведения к отдельным дифференциальным уравнениям 2-го порядка, методы решения которых известны. Краткое описание решения приведено в приложении.

Вследствие отсутствия данных (штатным химическим контролем в воде КМПЦ периодически проверяется только железо) на 1-м этапе моделирования скорость поступления нуклида-мишени в контур оценивали по динамике накопления железооксидных отложений на поверхности ТВС и элементному составу отложений, приведенному в работе [8]. Для расчетов использовали решения первых двух уравнений системы (1). Постоянные смыва и осаждения определяли на основе экспериментальных данных об изменении концентрации активированных продуктов коррозии в КМПЦ

при пуске реактора после капитального ремонта. Для проведения расчетов использовали программный пакет «Поиск решения» из Excel 2000.

Отношение постоянных осаждения и смыва отражает соотношение активности на поверхности контура и в воде и является важной характеристикой в моделировании процессов активации и миграции радионуклидов, которая зависит не только от вида радионуклида, но и конструкции контура.

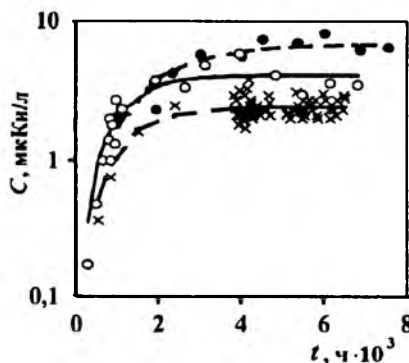
Результаты расчета представлены в табл. 3 и на рис. 2, 3. Проверка по критерию Фишера свидетельствует, что во всех случаях подобранные параметры адекватно описывают изменение концентрации при пуске реактора. Расчеты показывают, что в активной зоне реактора накапливается до 700 Ки ^{60}Co . Очевидно, что выход даже 1% радионуклидов при останове приведет к росту концентрации в воде контура в 100—1000 раз.

Т а б л и ц а 3. Результаты расчетов

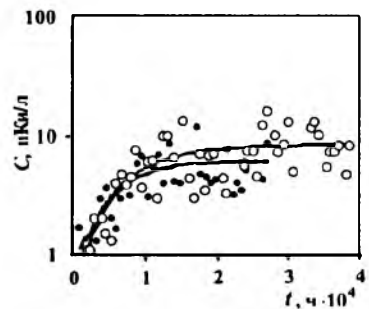
Параметр	^{51}Cr			^{60}Co			
				Блок			
	1-й	2-й	3-й	1-й	2-й	3-й	4-й
Критерий Фишера	1,7	5,1	4,8	2,5	1,64	2,3	2,1
Табличный критерий Фишера	1,5	2,3	2,3	1,8	1,62	2,1	1,5
Отношение констант осаждения/смыв	$1,5 \cdot 10^3$	$1,3 \cdot 10^3$	$8 \cdot 10^2$	$1,4 \cdot 10^4$	$1,7 \cdot 10^4$	$5,5 \cdot 10^3$	$1,9 \cdot 10^4$
Постоянная смыва, с^{-1}	$1,5 \cdot 10^{-6}$	$1,6 \cdot 10^{-6}$	$2,1 \cdot 10^{-6}$	$4,1 \cdot 10^{-7}$	$3,4 \cdot 10^{-7}$	$3,6 \cdot 10^{-7}$	$5,1 \cdot 10^{-7}$
Скорость поступления нуклида-мишени в контур, г/с	$5,9 \cdot 10^{-5}$	$4,5 \cdot 10^{-5}$	$5,1 \cdot 10^{-5}$	$1,1 \cdot 10^{-6}$	$1,1 \cdot 10^{-6}$	$1,4 \cdot 10^{-6}$	$5,9 \cdot 10^{-6}$
Расчетная концентрация радионуклидов в условиях равновесия (модель), Ки/л	$2,4 \cdot 10^{-6}$	$6,9 \cdot 10^{-6}$	$4,1 \cdot 10^{-6}$	$6,0 \cdot 10^{-9}$	$7,8 \cdot 10^{-9}$	$8,9 \cdot 10^{-9}$	$3,8 \cdot 10^{-8}$
Концентрация радионуклидов в КМПЦ (наблюдение), Ки/л	$2,4 \cdot 10^{-6}$	$6,8 \cdot 10^{-6}$	$4,0 \cdot 10^{-6}$	$6,0 \cdot 10^{-9}$	$8,2 \cdot 10^{-9}$	$2,3 \cdot 10^{-9}$	$4,3 \cdot 10^{-8}$
Отложение радионуклидов в активной зоне по данным [9—12], Ки/см ²	$(1,5—39) \cdot 10^{-6}$			$(5,9—11) \cdot 10^{-7}$			
Расчетная активность на ТВС, Ки/см ²	$4,0 \cdot 10^{-5}$	$8,8 \cdot 10^{-5}$	$3,4 \cdot 10^{-5}$	$9,0 \cdot 10^{-7}$	$1,4 \cdot 10^{-6}$	$2,0 \cdot 10^{-7}$	$7,6 \cdot 10^{-6}$

Время установления равновесной концентрации для ^{51}Cr составляет 4—6 тыс. ч, ^{60}Co — 20—30 тыс. ч, что совпадает с данными, полученными при первом пуске РБМК [13]. За 20 лет эксплуатации 1-го энергоблока Ленинградской АЭС концентрация ^{51}Cr осталась примерно на том же уровне, концентрация ^{60}Co уменьшилась примерно в 6 раз [13].

После установления равновесия между образованием и выведением в дальнейшем концентрация ^{51}Cr начинает снижаться, как это показано на рис. 4, и уменьшается в течение 30—35 тыс. ч. Аналогичная картина наблюдалась и при первом пуске энергоблоков Ленинградской АЭС [13].



Р и с. 2. Изменение концентрации ^{51}Cr в КМПЦ при пуске реактора после капитального ремонта: X, ●, ○ — 1-й, 2-й, 3-й блок соответственно; — — расчет



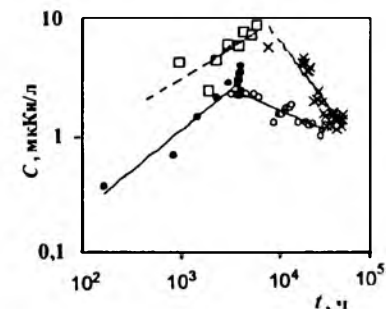
Р и с. 3. Изменение концентрации ⁶⁰Со в воде КМПЦ при пуске реактора после капитального ремонта: ●, ○ — 1-й и 2-й блок соответственно; — — — расчет

В рамках принятой модели это явление объясняется изменением скорости поступления нуклида-мишени в контур, связанным с изменением скорости коррозии. Известно, что скорость коррозии в начале коррозионного контакта возрастает, затем уменьшается пропорционально $\sqrt{t}$ [14, 15]. Известно также эмпирическое уравнение для оценки роста коррозионных отложений от времени вида $K = K_0 t^{0,4-0,66}$ [15].

В начальный период времени концентрация ⁵¹Cr пропорциональна степенной зависимости от времени, причем показатель степени составляет на 1-м блоке 0,53, 2-м — 0,68 (табл. 4).

Т а б л и ц а 4. Зависимость концентрации ⁵¹Cr от времени после капитального ремонта

Блок	Вид зависимости	Диапазон времени, тыс. ч	Коэффициент корреляции	Критерий Фишера		Показатель степени	Число наблюдений
				расчет	таблица		
1-й	$\ln C = b \ln t$	< 4200	0,95	122	2,5	0,683	16
		4200 < t < 32 000	0,55	121	1,2	-0,390	289
2-й	$\ln C = b \ln t$	< 6000	0,78	8,7	4,2	0,531	8
		6000 < t < 35 000	0,78	464	1,2	-1,673	292
	$C = a + bt$	35 000 < t < 45 000	0,08	1,0	1,3	—	173



Р и с. 4. Изменение усредненной концентрации ⁵¹Cr после капитального ремонта: ●, ○ — 1-й блок, t < 4200 ч, t > 4200 ч; □, × — 2-й блок, t < 6000 ч, t > 6000 ч

Очевидно, что после капитального ремонта хромсодержащие отложения в активной зоне состоят, главным образом, из плотных оксидов, способность перехода которых в воду контура незначительна. Таким образом, активация хрома с последующим его выходом в теплоноситель обусловлена коррозией нержавеющей стали, установленной в контуре в ходе капитального ремонта. В начальный период времени возрастает скорость коррозии новых конструкционных материалов и концентрация активированных продуктов коррозии, в том числе и ⁵¹Cr. Скорость коррозии возрастает в течение 100—500 ч, затем начинает уменьшаться [15]. Если общая коррозия $K \sim \sqrt{t}$, то скорость коррозии $dK/dt \sim 1/\sqrt{t}$. Таким

образом, изменение концентрации ⁵¹Cr при длительной эксплуатации блока отражает изменение скорости коррозии стали X18H10T в 1-м контуре.

Выводы. Таким образом, разработана модель расчета активации продуктов коррозии с ограниченным набором параметров при пуске и в условиях нормальной эксплуатации реактора (давление и температура постоянны, параметры водно-химического режима изменяются в узких пределах и не превышают нормы). Для некоторых радионуклидов определены параметры модели. Установлено, что скорость выведения активированных продуктов коррозии в 3—10 раз выше, чем считают большинство авторов, и составляет для ⁵¹Cr $(2,4-6) \cdot 10^{-4} \text{ с}^{-1}$, ⁶⁰Со — $(7,5-10) \cdot 10^{-4} \text{ с}^{-1}$. Показано,

что выведение ^{51}Cr из КМПЦ вследствие его лучшей растворимости определяется, главным образом, байпасной очисткой, ^{60}Co — уносом с паром и последующей очисткой конденсата.

Результаты модельных расчетов показали удовлетворительное совпадение с наблюдениями (расчетные критерии Фишера больше табличных).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Егоров Ю.А., Носков А.А. Новая модель переноса и накопления активных продуктов коррозии в технологических контурах АЭС ТРАКТ-2. — В сб.: Радиационная безопасность и защита АЭС, вып. 8. М.: Энергоатомиздат, 1984, с. 6—22.
2. Жилкин А.С., Кузнецов И.А. Аналитическое уравнение переноса радиоактивных масс теплоносителем ядерного реактора. — Там же, вып. 5, 1981, с. 78—86.
3. Зиганшин Т.М., Кобзарь И.Г., Чететкин Ю.В. и др. Исследование накопления продуктов коррозии в 1-м контуре АЭС с кипящим реактором по опыту эксплуатации АЭС ВК-50. — Там же, с. 22—27.
4. Черкашин В.А., Комаров В.И., Романцов В.П. и др. Влияние негерметичности твэлов на уровень загрязнения радионуклидами технологических сред. — В сб.: Атомные электрические станции, вып. 10. М.: Энергоатомиздат, 1988, с. 263—272.
5. Дорошенко Г.Г., Мигулин А.И., Панченко С.В. Модель формирования активности газовых продуктов деления в технологических средах АЭС с ядерным реактором РБМК-1000. — Там же, вып. 11, 1989, с. 78—83.
6. Юрманов В.А., Мамет В.А., Тяпков В.Ф. и др. Дисперсионный анализ продуктов коррозии в теплоносителе одноконтурной АЭС. — Там же, вып. 10, 1988, с. 125—134.
7. Ананьев А.Н., Белянин Л.А., Еперин А.П. и др. Безопасность АЭС с канальными реакторами. М.: Энергоатомиздат, 1996. 440 с.
8. Варовин И.А., Еперин Е.А., Константинов Е.А. и др. Коррозионные отложения и их удаление с теплопередающих поверхностей реактора типа РБМК. — В сб.: Атомные электрические станции, вып. 8. М.: Энергоатомиздат, 1985, с. 84—86.
9. Орлов А.К., Степанов И.А., Калашников В.В., Чватов В.Н. Радиационное состояние контура МПЦ 4-го блока ЛАЭС и исследование средств его улучшения. Сосновый Бор, 1989. 113 с.
10. Зиганшин Т.М., Кобзарь И.Г., Чететкин Ю.В. и др. Исследование накопления продуктов коррозии в 1-м контуре АЭС с кипящим реактором по опыту эксплуатации АЭС ВК-50. — В сб.: Радиационная безопасность и защита АЭС, вып. 5. М.: Энергоатомиздат, 1981, с. 22—27.
11. Ампелогова Н.И. Поведение изотопов кобальта в водном теплоносителе реакторов с водой под давлением. Обзор, инв. № 89-05351. Л., ВНИПИЭТ, 1989. 74 с.
12. Пентин В.И., Ампелогова Н.И. Поведение изотопов кобальта в водном теплоносителе кипящих реакторов. Обзор, инв. № 88-05256. Л., ВНИПИЭТ, 1988. 41 с.
13. Бутин Н.В., Егоров Ю.А., Еперин А.Н. и др. Активность продуктов коррозии в теплоносителе и радиационная обстановка на 1-м блоке Ленинградской АЭС. — В сб.: Радиационная безопасность и защита АЭС, вып. 3. М.: Атомиздат, 1977, с. 5—17.
14. Морозова И.К., Громова А.И., Герасимов В.В. и др. Вынос и отложения продуктов коррозии реакторных материалов. М.: Атомиздат, 1975. 280 с.
15. Крицкий В.Г. Проблемы коррозии и водно-химических режимов АЭС. СПб, СИНТО, 1996. 264 с.

Поступила в Редакцию 14.12.2000

ПРИЛОЖЕНИЕ

Решение системы (1).

Преобразуем первые два уравнения системы (1) к виду

$$\frac{\partial^2 M}{\partial t^2} + (\lambda_{\text{ос}} + \lambda_{\text{см}} + \lambda_0) \frac{\partial M}{\partial t} + \lambda_{\text{см}} \lambda_0 M = \lambda_{\text{см}} R;$$

$$\frac{\partial^2 N}{\partial t^2} + (\lambda_{\text{ос}} + \lambda_{\text{см}} + \lambda_0) \frac{\partial N}{\partial t} + \lambda_{\text{см}} \lambda_0 N = \lambda_{\text{см}} R.$$

Если $R_{1,2}$ — корни соответствующего дифференциальному уравнению 2-го порядка характеристического уравнения

$$R_{1,2} = -\frac{(\lambda_{oc} + \lambda_{cm} + \lambda_0)}{2} \pm \sqrt{\frac{(\lambda_{oc} + \lambda_{cm} + \lambda_0)^2}{4} - \lambda_{cm} \lambda_0},$$

то решение для N с учетом нулевых начальных условий может быть записано в виде

$$N = \frac{R}{\lambda_0} \frac{\lambda_{oc}}{\lambda_{cm}} \left[1 - \frac{R_2}{R_2 - R_1} e^{R_1 t} + \frac{R_1}{R_2 - R_1} e^{R_2 t} \right].$$

Следующие два уравнения системы (1) могут быть преобразованы аналогичным способом, только в правой части уравнения вместо постоянных коэффициентов появляются члены, содержащие N и dN/dt , давая неоднородное дифференциальное уравнение с особой правой частью.

Для упрощения вида получаемых уравнений введем дополнительные обозначения:

$$a = \frac{\sigma \Phi W \lambda}{3,7 \cdot 10^{10}}; \quad b = (\lambda + \lambda_{cm}); \quad d = \lambda_{oc}; \quad e = \lambda_{cm};$$

$$f = \lambda_0 + \lambda + \lambda_{oc}; \quad \alpha = \frac{ae\lambda_{oc}}{\lambda_{cm}\lambda_0} R.$$

Корни соответствующего характеристического уравнения имеют вид

$$R_{3,4} = \frac{(f+b)}{2} \pm \sqrt{\frac{(f+b)^2}{4} + de - bf}.$$

Запишем

$$\beta = \frac{\alpha}{bf - de};$$

$$\delta = \alpha \frac{R_2}{(R_2 - R_1)(R_1 - R_3)(R_1 - R_4)};$$

$$\gamma = \alpha \frac{R_1}{(R_2 - R_1)(R_2 - R_3)(R_2 - R_4)}.$$

Общее решение относительно Q записывается как общее решение соответствующего однородного уравнения (с нулевой правой частью) и суммы полученных частных решений:

$$Q = \beta + C_3 \exp(R_3 t) + C_4 \exp(R_4 t) - \delta \exp(R_1 t) + \gamma \exp(R_2 t).$$

Постоянные интегрирования при нулевых начальных условиях определяются из уравнений

$$C_3 = -(\delta - \beta - \gamma) \frac{R_3}{R_4 - R_3} + \delta \frac{R_1}{R_4 - R_3} - \gamma \frac{R_2}{R_4 - R_3};$$

$$C_4 = (\delta - \beta - \gamma) \frac{R_4}{R_4 - R_3} - \delta \frac{R_1}{R_4 - R_3} + \gamma \frac{R_2}{R_4 - R_3}.$$

Для ^{60}Co из-за большого периода полураспада даже за время капитального ремонта не достигается значительного снижения активности, поэтому для него при формулировке начальных условий учитывается его количество в активной зоне.

Можно показать, что при неотрицательных $\lambda_{oc} > \lambda_{cm}$ решения характеристического уравнения $R_1 - R_4$ всегда отрицательны.

Поскольку все значения R имеют отрицательные значения, то в состоянии равновесия при достаточно больших t

$$Q = \frac{\sigma \Phi W \lambda}{3,7 \cdot 10^{10}} \frac{\lambda_{oc}}{\lambda_0 [(\lambda_{cm} + \lambda)(\lambda_0 + \lambda + \lambda_{oc}) - \lambda_{oc} \lambda_{cm}]} R.$$

Параметрами модели, подлежащими определению, являются постоянные смыва, осаждения и выведения, а также скорость поступления стабильного нуклида-мишени в контур.

УДК 614.2+546.718

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ПОЛУЧЕНИЯ ^{99m}Tc НА ЦЕНТРАЛИЗОВАННОМ ЦИРКОНИЙ-МОЛИБДЕНОВОМ ГЕЛЬ-ГЕНЕРАТОРЕ

Гурко О.Б., Равкова Е.И., Савушкин И.А. (Институт проблем энергетики Национальной академии наук Беларуси)

^{99m}Tc является одним из наиболее широко используемых в диагностической ядерной медицине. В настоящее время сырьем для его получения является генератор, содержащий ^{99}Mo . По способу выделения ^{99m}Tc генераторы делятся на хроматографические, экстракционные и сублимационные, по способу использования — на малые и централизованные. Первые после зарядки (обычно на месте получения сырья — ^{99}Mo) доставляют в медицинское учреждение. Базовый радиофармпрепарат и его производные получают по месту проведения диагностики. Отсюда вытекает такое требование к малым генераторам, как портативность, т.е. матрица генератора ограничена по размеру и активности. Обычно это хроматографические генераторы, в которых в качестве сырья используется осколочный ^{99}Mo с высокой удельной активностью. Основным недостатком малого генератора является дороговизна сырья, возможность попадания в него, а значит, и в элюат продуктов деления урана. Централизованные генераторы предназначены для снабжения ^{99m}Tc целого региона. После получения и расфасовки препарат развозят по медицинским учреждениям, которые расположены в радиусе, допускающем незначительное снижение его активности при доставке. В качестве сырья для таких генераторов используют активационный ^{99}Mo . Недостатком указанного вида генераторов является возможность попадания растворителя и продуктов его радиолиза в конечный продукт.

В Институте проблем энергетики Национальной академии наук Беларуси разработан централизованный цирконий-молибденовый гель-генератор для получения ^{99m}Tc [1]. Технологический процесс осуществляется следующим образом. Мишень на основе MoO_3 облучают в нейтронном поле реактора. При этом по реакции $^{98}\text{Mo}(n, \gamma)^{99}\text{Mo}$ образуется радиоактивный ^{99}Mo . В результате химической переработки облученной мишени образуется цирконий-молибденовый гель, из которого по истечении 2 ч откачивают жидкую фазу и промывают. После промывки гель-матрицу сушат в вакууме. Зарядка генератора занимает около 3 ч. ^{99m}Tc , образующийся по реакции $^{99}\text{MoO}_4^{2-} \xrightarrow{\beta} ^{99m}\text{TcO}_4^-$, отделяют раз в сутки, фасуют, стерилизуют и отправляют в клиники.