

УДК 551.464.621.039.8

Возможности использования калифорниевых нейтронных источников для определения основного элементарно-солевого состава морской воды в природных условиях

ФИЛИППОВ Е. М.

Калифорниевые источники имеют выход до 10^{10} нейтр./с. Они могут найти применение для изучения изменений элементарно-солевого состава морских вод в природных условиях [1, 2, 3]. Рассмотрим применение для этих целей нейтронного γ -метода (НГМ), основанного на реакции (n, γ), и нейтронного активационного метода (НА).

При НГМ для точечного источника и детектора, расположенных на расстоянии l один от другого, выражение для скорости счета имеет вид

$$N = \frac{Q \varepsilon s i \Sigma}{8 \pi \Sigma_a (L_s^2 - L^2)} B(L_s, L) = Q_0 B(L_s, L) = Q_0 [B(L_s) - B(L)]. \quad (1)$$

Здесь Q — выход нейтронов из источника; ε — эффективность детектора; s — площадь детектора; i — число квантов, возникающих при захвате хлором нейтронов; Σ и Σ_a — макроскопическое сечение (n, γ -реакции и поглощения нейтронов в воде соответственно; L_s и L — длина замедления и длина диффузии нейтронов в морской воде;

$$B(L_s) = \frac{L_s}{l} \left\{ e^{-l/L_s} \left[\text{Ei}[-l(\tau - L_s^{-1})] + \ln \frac{1 + \tau L_s}{|1 - \tau L_s|} \right] - e^{l/L_s} \text{Ei}[-l(\tau + L_s^{-1})] \right\}, \quad (2)$$

где τ — линейный коэффициент ослабления γ -излучения. Аналогичный вид имеет и функция $B(L)$ при замене L_s на L .

В случае, если детектор и источник будут заключены в корпуса конечных размеров с радиусами r_1 и r_2 и расстояниями от их центров до торцов корпусов h_1 и h_2 , расположенных на одной оси, то выражение (1) может быть преобразовано так:

$$N = Q_0 [B(L_s) + \Delta B(L_s) - B(L) - \Delta B(L)] = Q_0 B(L_s, L). \quad (3)$$

Здесь функции $\Delta B(L_s)$ и $\Delta B(L)$ учитывают взаимодействие во внутреннем пространстве — между торцами корпусов источника и детектора, а $B(L_s)$ и $B(L)$ — во внешнем пространстве. Вычислим эти функции. Если радиусы

корпусов источника и детектора равны $r_1 = r_2 = r_0$, то

$$B(L_s) = - \int_{-1}^1 e^{y/L_s} \text{Ei} \left[-\frac{l}{2} (\tau + L_s^{-1})(u+y) \right] dy = - \int_{-1}^1 f(L_s, u+y) dy; \quad (4)$$

$$\Delta B(L_s) = \int_{\alpha_2}^{\alpha_1} f(L_s, u+y) dy - \int_{\alpha_2}^{\alpha_1} f(L_s, 1+y) dy, \quad (5)$$

где $u = \sqrt{1 + (2r_0/l)^2(1-y^2)}$, $\alpha_1 = 1 - 2h_1/l$, $\alpha_2 = -1 + 2h_2/l$, $f(L_s, 1+y)$ — то же, что и $f(L_s, u+y)$ при замене u на единицу.

В случае $r_1 \neq r_2$ рассматриваемые интегралы примут следующий вид:

$$B(L_s) = - \int_0^1 f(L_s, u_1+y) dy + \int_0^{-1} f(L_s, u_2+y) dy; \quad (6)$$

$$\Delta B(L_s) = \int_0^{\alpha_1} f(L_s, u_1+y) dy + \int_0^{\alpha_1} f(L_s, 1+y) dy - \int_0^{\alpha_2} f(L_s, u_2+y) dy + \int_0^{\alpha_2} f(L_s, 1+y) dy. \quad (7)$$

Функции u_1 и u_2 — то же, что и u при замене r_0 на r_1 и r_2 соответственно.

Калифорниевые источники, как известно, имеют весьма малые размеры, поэтому их в наших расчетах можно принять точечными. В этом случае $r_1 = h_1 = 0$, и, следова-

Таблица 1

Значения функций $B(L_s, L)$ при различной солености морской воды

L, см	E γ , МэВ	Содержание соли в воде, г/л					
		0			17,5		
		0	17,5	35	0	17,5	35
		Точечный источник и детектор			Точечный источник и детектор конечных размеров		
10	0,5	0,2233	0,2440	0,2535	0,07440	0,08284	0,08706
	3,0	0,3232	0,3537	0,3696	0,1397	0,1548	0,1630
	6,1	0,3535	0,3871	0,4051	0,1608	0,1781	0,1874
30	0,5	0,007135	0,007361	0,007309	0,005035	0,005231	0,005182
	3,0	0,02199	0,02314	0,02351	0,01819	0,01916	0,01944
	6,1	0,02922	0,03093	0,03162	0,02456	0,02601	0,02656
50	0,5	0,0003350	0,0003434	0,0003319	0,0002869	0,0002923	0,0002811
	3,0	0,003164	0,003317	0,003332	0,002730	0,002842	0,002842
	6,1	0,005433	0,005749	0,005837	0,004639	0,004874	0,004927

Ожидаемые погрешности определения химических элементов солевого состава воды Черного моря

Таблица 2

Элемент	C, г/л	T	E_{γ} , МэВ	i	Σ_i , см ⁻¹	δC , %
Натрий	5,25	15 ч	2,76 1,38	1 1	$7,42 \cdot 10^{-5}$	0,805
Бром	0,0325	17,55 мин	0,62	0,13	$1,07 \cdot 10^{-6}$	8
Магний	0,675	10 мин	1,013	0,3	$4,8 \cdot 10^{-8}$	23
Кальций	0,2	8,75 мин	4,68 4,05 3,1	0,03 0,08 0,89	$5,2 \cdot 10^{-9}$	23,5

тельно, $u_1 = \alpha_1 = 1$. Выражения (6) и (7) при этом упрощаются:

$$B(L_s) = - \int_0^1 f(L_s, 1+y) dy + \int_0^{-1} f(L_s, u_2+y) dy; \quad (8)$$

$$\Delta B(L_s) = - \int_0^{\alpha_2} f(L_s, u_2+y) dy + \int_0^{\alpha_2} f(L_s, 1+y) dy. \quad (9)$$

Все интегралы необходимо вычислять численно. Функции $B(L)$ и $\Delta B(L)$ во всех случаях аналогичны функциям $B(L_s)$ и $\Delta B(L_s)$ при замене L_s на L .

Расчеты рассматриваемых функций для точечного источника и детектора по формуле (1), точечного источника и детектора стандартных размеров типа «Лимон» из NaI(Tl) (15×10 см, $d = 2r_2 = 15$ см, $h_2 = 5$ см) по формулам (8) и (9) приведены в табл. 1. Соленость 17,5 г/л соответствует воде Черного моря, а 35 г/л — океанической. Из табл. 1 видно, что с увеличением l значения функции $B(L_s, L)$ резко убывают, а с увеличением энергии γ -квантов и солености воды — незначительно возрастают. Учет геометрии детектора приводит к уменьшению значений функции $B(L_s, L)$. Причем наиболее значительное различие в геометрии измерений оказывается для малых значений l . Это связано с тем, что зазор между корпусами источника и детектора при введении конкретных их размеров становится малым по сравнению с l .

При НГМ в случае захвата хлором нейтронов с наибольшей вероятностью образуются γ -кванты энергии 6,11 МэВ

($i = 0,1578$). Поэтому все расчеты по НГМ проведены для этого излучения. При взаимодействии с веществом детектора указанное излучение расщепляется за счет уноса одного и двух фотонов с энергией 6,11; 5,60 и 5,09 МэВ. При измерениях на оптимальном расстоянии 20 см в течение 1 с в указанных фотопиках зарегистрировано 1403, 2022 и 2265 имп./с соответственно (при $Q = 10^8$ нейтр./с). По суммарной скорости счета содержание хлора в черноморской воде (9,5 г/л) определяется с относительной погрешностью $\delta C = 1,325\%$, а при длительности замера 2 с — 0,94%.

Выражение для скорости счета γ -излучения радионуклидов, возникающих при НА, будет иметь вид, аналогичный (1) и (3) при замене Q_0 на $Q_1 = Q \varepsilon i \Sigma_i f(t) / 4\pi \Sigma_a (L_s^2 - L^2)$. Здесь $f(t) = \int_0^T \exp\left(-\frac{0,693}{T} t_0\right) \times \left[\exp\left(-\frac{0,693}{T} t_p\right) - \exp\left(-\frac{0,693}{T} t\right) \right] dt$ — временной мно-

житель, в котором t_0, t_p, t — соответственно время облучения, паузы и спада наведенной активности после прекращения облучения изучаемой среды; T — период полураспада.

По методике НА лучше всего активизируются химические элементы, приведенные в табл. 2 для источника с выходом 10^8 нейтр./с. Функции $B(L_s, L)$ для γ -излучения возникающих радионуклидов нетрудно оценить по данным табл. 1. При расчетах скоростей счета по НА $t_p = 0, t_0 = t = 30$ мин. При увеличении активности источника на порядок указанные погрешности уменьшаются примерно в 3 раза. Кальций при этих исследованиях может быть определен по естественной радиоактивности ^{40}K ($E_{\gamma} = 1,46$ МэВ). При длительности замера 1 ч содержание калия в черноморской воде (0,19 г/л) определяется с относительной погрешностью 1,74% (данные эксперимента).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Филиппов Е. М. «Морские гидрофизические исследования», Севастополь, 1977, № 3 (78), с. 138.
2. Филиппов Е. М. Ядерная разведка полезных ископаемых. Киев, «Наукова думка», 1978.
3. Филиппов Е. М., Ламанова И. А. «Морские гидрофизические исследования», Севастополь, 1978, № 1 (80), с. 98.

Поступило в Редакцию 17.07.78
В окончательной редакции 02.04.79

УДК 621.039.542.4

Эффективность использования ядерного топлива жидкосолевыми конвертерными реакторами

НОВИКОВ В. М., БЛИНКИН В. Л.

Жидкосольевый реактор (ЖСР) обычно рассматривается как одна из возможных систем, способных обеспечить расширенное воспроизводство делящихся материалов в уран-ториевом топливном цикле [1, 2], если при самом реакторе организовано непрерывное выведение продуктов деления. Однако на первом этапе своего развития такие реакторы могут, работая без непрерывной переработки топлива [2], поэтому имеет смысл оценить эффективность ЖСР, работающего без непрерывного выведения продуктов деления. В этом случае реактор работает в конвертерном режиме (при коэффициенте воспроизводства меньше единицы) и должен непрерывно подпитываться делящимся топливом. В конвертерном ЖСР может

быть реализован не только уран-ториевый, но и уран-плутониевый топливный цикл.

Предельно допустимая концентрация продуктов деления в топливной соли ограничена их растворимостью, которая при рабочей температуре (700 °C) достигает 5%. Такая концентрация в реакторе типа MSBR-1000 [1] при отсутствии переработки топлива достигается за 12 лет его работы. Поэтому конвертерный ЖСР может работать на одной загрузке соли-носителя 10—12 лет при непрерывной подпитке обогащенным ураном, компенсирующей выгорание и отравление реактора продуктами деления. В конце кампании топливная соль заменяется новой (открытый цикл), а делящиеся материалы, содержащиеся в отрав-