

ЛИТЕРАТУРА

1. E. Hellstrand. *Atoms*, 6, 187 (1955).
2. J. Stone. *Commun. and Electronics*, No. 40, 1003 (1959).
3. A. Estrada. *Trans. Nucl. Sci.*, No. 1, 15 (1957).
4. L. Kemeny. *Nucl. Sci. and Engng*, 6, 208 (1961).

5. В. В. Гончаров и др. В кн. «Труды Второй международной конференции по мирному использованию атомной энергии». Докл. сов. ученых. Т. 2. М., Атомиздат, 1959, стр. 273.
6. C. Cohn. *Nucl. Sci. and Engng*, 13, 12 (1962).
7. O. Henry. *WAPD-141*, 1958.

УДК 548.53 546.45

Некоторые вопросы теории лабораторного фотонейтронного метода определения бериллия

В. Н. Смирнов, Д. В. Токарева

Метод количественного определения бериллия с помощью ядерной реакции (γ, n) в последнее время находит все более широкое применение для анализа бериллиевых руд, продуктов обогащения и металлургической переработки.

В лабораторных условиях при фотонейтронном анализе используют линейно протяженные источники излучения и коаксиальную геометрию расположения пробы относительно источника. Как показали многочислен-

Интеграл легко берется в элементарных функциях. Однако полученное выражение громоздко, поэтому его упрощение представляет большой практический интерес. Расчетная формула существенно упрощается, если предположить, что $a = 0$ (центры источника и пробы находятся на одном уровне) и $l = 0$ (источник излучения считается точечным).

Тогда выражение для выхода нейтронов принимает вид

$$N = A\sigma n \left[r_2 \arctg \frac{L}{2r_2} - r_1 \arctg \frac{L}{2r_1} + \frac{L}{4} \ln \frac{L^2 + 4r_2^2}{L^2 - 4r_1^2} \right]. \quad (3)$$

ные опыты, применение такой геометрии целесообразно при использовании в качестве детекторов нейтронов как пропорциональных борных счетчиков, располагаемых вокруг пробы, так и дисковых сцинтилляционных детекторов.

В настоящей работе предлагаются аналитические выражения для подсчета числа нейтронов, образующихся при ядерной реакции (γ, n), в зависимости от размеров источника излучения и контролируемой пробы и их взаимного положения в условиях коаксиальной геометрии.

Число актов взаимодействия N , происходящих в 1 сек в 1 см³, может быть подсчитано по формуле

$$N = \sigma J n, \quad (1)$$

где σ — эффективное сечение реакции, см²; n — число ядер бериллия в 1 см³; J — плотность потока бомбардирующих γ -квантов.

Если линейно протяженный источник длиной l , общей активностью A расположен вдоль оси цилиндра (пробы), имеющего внутренний радиус r_1 , внешний радиус r_2 и высоту L , то выражение (1) в цилиндрических координатах примет вид

$$N = \frac{A\sigma n}{4\pi l} \int_{\varphi=0}^{2\pi} \int_{\rho=r_1}^{\rho=r_2} \int_{Z=a-\frac{L}{2}}^{Z=a+\frac{L}{2}} \left[\arctg \frac{2Z+l}{2\rho} - \arctg \frac{2Z-l}{2\rho} \right] d\rho d\varphi dZ, \quad (2)$$

где ρ и φ — полярные координаты проекции элемента объема пробы на основную плоскость (XOY); Z — аппликата, т. е. расстояние от этого элемента до основной плоскости; a — смещение по оси Z центров пробы и источника.

Однако полученные формулы не учитывают поглощения γ -лучей пробой. В цилиндрической системе координат выражение для выхода ядерной реакции (γ, n) от точечного источника с учетом поглощения будет иметь вид

$$N = \frac{A\sigma n}{4\pi} \int_{\varphi} \int_{\rho} \int_{Z} \frac{e^{-\mu \frac{\rho-r_1}{\rho}} \sqrt{\rho^2 + Z^2}}{\rho^2 + Z^2} \rho d\rho d\varphi dZ, \quad (4)$$

где μ — коэффициент поглощения, см⁻¹.

Это уравнение не может быть проинтегрировано в элементарных функциях, поэтому использовался метод численного интегрирования с помощью быстродействующей электронно-счетной машины.

Подобные вычисления были проделаны при различных размерах пробы (отвечающих реальным размерам фотонейтронной установки) и различных значениях коэффициента поглощения μ .

На основании этих вычислений и результатов, полученных из формулы (1), можно провести сравнение выходов реакции (γ, n) с учетом и без учета поглощения γ -лучей в пробе. Полученные данные представлены в табл. 1, из которой следует, что величина относи-

тельного расхождения между выходом ядерной реакции (γ, n), подсчитанным без учета поглощения ($\mu = 0$), и выходом, подсчитанным для реальной порошковой пробы ($\mu = 0,07$), зависит от размеров пробы. Для наименьшей пробы ($L = 1$ см, $V = 6,12$ см³) расхож-

Таблица 1

Выход фотонейтронов при разных значениях μ

μ , см ⁻¹	0,00	0,035	0,07	0,14
Высота пробы L , см				
1,0	0,454	0,444	0,441	0,425
2,0	0,752	—	0,728	—
4,0	1,048	—	1,008	—
8,0	1,255	1,221	1,195	1,136

дение составляет 3%, а для наибольшей ($L = 8$ см, $V = 48,95$ см³) — около 5%.

Чрезвычайно важным является решение вопроса о возможности проведения расчетов по упрощенной формуле (3). Для этого проводилось сравнение выходов нейтронов, рассчитанных по формуле (2) для различных длин источников и различных размеров пробы, и выходов нейтронов, рассчитанных по формуле (3) для тех же размеров пробы. Данные расчетов приведены в табл. 2.

Не обсуждая вопрос об абсолютном выходе нейтронов и о практической целесообразности использования источников той или иной длины, можно заметить, что если длина источника равна высоте пробы, то относительное расхождение между выходом, вычисленным для линейно протяженного источника, и выходом, подсчитанным для точечного источника (для проб толщиной 0,3 и 0,95 см), составляет 10—13%. По мере увеличения отношения высоты пробы к длине источника это расхождение уменьшается и при отношении 2:1 наблюдается практическое совпадение значений выходов нейтронов от линейного и точечного источников.

Поэтому при $\frac{L}{I} \gg 1$ все аналитические расчеты выхода нейтронов можно проводить по упрощенной формуле (3), соответствующей точечному источнику излучения.

По данным табл. 2 можно сравнить расчетные данные с экспериментальными. Среднее относительное расхождение между ними равно 5%. Величина этого расхождения столь незначительна (а с введением поправки на поглощение γ -лучей в пробе может быть еще меньшей), что совпадение экспериментальных и расчетных данных можно считать удовлетворительным. С помощью полученных формул можно учесть и оценить влияние различия коэффициентов поглощения эталона и пробы (см. табл. 1), вычислить чувствительность метода и ее зависимость от размеров пробы и источника и их взаимного положения; оценить эффективность регистрирующей установки; теоретически установить зависимость выхода нейтронов от высоты и толщины пробы; точно учитывать изменение геометрических факторов при проведении анализа; теоретически решить вопрос о выборе оптимального соотношения между высотой и толщиной пробы; оценить влияние расстояния от источника излучения до пробы; учесть влияние изменения геометрических факторов

Таблица 2

Вычисленные и экспериментальные относительные выходы фотонейтронов

Длина источника I , см	Размеры пробы *, см		Выход нейтронов **, отн. ед.		Расхождение между расчетными и экспериментальными данными **, отн. ед.
	r_2	L	расчетные данные	экспериментальные данные	
0	1,50	1	1,74	1,75	+0,01
1	1,50	1	1,73	1,53	-0,20
2	1,50	1	1,41	1,35	-0,06
4	1,50	1	1,00	1,00	0,00
0	1,50	2	1,47	1,46	-0,01
1	1,50	2	1,43	1,30	-0,13
2	1,50	2	1,32	1,26	-0,06
4	1,50	2	1,00	1,00	0,00
0	1,50	4	1,13	1,15	+0,02
1	1,50	4	1,13	1,07	-0,06
2	1,50	4	1,11	1,07	-0,04
4	1,50	4	1,00	1,00	0,00
0	1,50	8	1,01	1,00	-0,01
1	1,50	8	1,01	0,92	-0,09
2	1,50	8	1,01	0,94	-0,07
4	1,50	8	1,00	1,00	0,00
0	0,85	1	2,04	2,05	+0,01
1	0,85	1	1,87	1,85	-0,02
2	0,85	1	1,53	1,52	-0,01
4	0,85	1	1,00	1,00	0,00
0	0,85	2	1,59	1,64	+0,05
1	0,85	2	1,55	1,43	-0,12
2	0,85	2	1,40	1,40	0,00
4	0,85	2	1,00	1,00	0,00
0	0,85	4	1,13	1,18	+0,05
1	0,85	4	1,12	1,08	-0,04
2	0,85	4	1,11	1,10	-0,01
4	0,85	4	1,00	1,00	0,00
0	0,85	8	1,01	1,05	+0,04
1	0,85	8	1,01	0,95	-0,06
2	0,85	8	1,01	0,99	-0,02
4	0,85	8	1,00	1,00	0,00

* Везде значение $r_1=0,55$ см.

** Выход нейтронов с источником длиной 4 см принят за единицу.

при проведении анализа и т. п. Все эти вопросы должны решаться, исходя из конкретных условий в каждом отдельном случае.

Примерами решения подобных проблем могут служить исследования по выбору рациональных геометрических условий при анализе малых навесок проб [формула (1)] и вычисления для введения поправок на зависимость выхода нейтронов от высоты пробы при анализе продуктов обогащения без предварительной подготовки [формула (2)].

Поступило в Редакцию 25/XII 1962 г.