

Абсолютные измерения интенсивности нейтронных источников*)

В. М. Безотосный, Ю. С. Замятин

Кратко изложены методы калибровки нейтронных источников, применяемые в различных лабораториях АН СССР. Подробно рассматривается метод абсолютного измерения интенсивности нейтронного источника, разработанный авторами в 1950—1951 гг. на основе принципа, предложенного О'Нилом и Шарф-Гольдгабером. Приведена таблица значений интенсивности Ra- α -Be-источника Н-23 (смесь 44,25 мг равновесного препарата радия с порошком бериллия, запрессованная в герметическом контейнере), полученных в различных лабораториях АН СССР.

Для того чтобы иметь возможность про-
извести точные измерения абсолютных зна-
чений нейтронных констант, в большинстве
случаев необходимо знать величину потока
используемых нейтронов. Однако точное
измерение потока нейтронов представляет
собой отдельную и весьма нелегкую задачу.
Создание эталонного источника, интенсив-
ность которого определена в отдельных,
специально поставленных измерениях, вы-
полненных с точностью до нескольких про-

центов, позволяет избавиться от решения
этой задачи в каждом отдельном случае и
найти с помощью простой аппаратуры вели-
чину искомого потока путем сравнения его с
известным потоком калиброванного источ-
ника.

Точное измерение интенсивности источ-
ника связано в некоторых методах эта-
лонирования с введением многочисленных
существенных поправок и учетом тонких
и зачастую трудно контролируемых эффек-
тов. Поэтому неудивительно, что еще совсем
недавно сопоставление источников, про-
эталонированных в разных местах и различ-
ными методами, часто показывало, что отно-
шение их паспортных данных и измеренное
отношение мощностей расходятся на вели-
чину, значительно превосходящую границы
указанных точностей.

Мы не будем подробно останавливаться
на методах калибровки нейтронных источ-
ников, описанных в иностранной литерату-
ре. Подробный анализ этих методов и пере-
чень литературы по этому вопросу приведены
в работе Д. Юза [1].

Существующие методы измерения интен-
сивности нейтронных источников можно раз-
делить на следующие основные группы:

1. Методы, основанные на измерении
искусственной радиоактивности индикато-

*) От редакции. В 1951 г. в различных
лабораториях Советского Союза проводились изме-
рения абсолютной нейтронной активности несколь-
ких нейтронных препаратов при помощи различ-
ных методов, разработанных к тому времени в этих
лабораториях. Один из измеренных препаратов
«Нейтронный источник Ra- α -Be Н-23» принят
за стандарт на совещании физиков в 1952 г. в ре-
зультате обсуждения методов измерения и сопостав-
ления полученных результатов. В связи с рассекре-
чиванием проведенных работ редакция обратилась
к авторам с просьбой опубликовать их в журнале
«Атомная энергия».

В данной работе представлены результаты эта-
лонирования Ra- α -Be-источника Н-23, получен-
ные авторами, а также приведена общая харак-
теристика методов эталонирования нейтронных ис-
точников и дан краткий обзор работ по калибровке
источников, выполненных в других лабораториях
АН СССР. В настоящем номере публикуются также
статьи К. А. Петряка, М. А. Бака и Б. А. Ферс-
мана (стр. 319), П. Е. Спивака, Б. Г. Ерозолинского
(стр. 327), В. А. Давиденко, А. М. Кучера (стр. 334).

ров, наведенной нейтронами при замедлении их в водородсодержащих веществах. Как следует из работы Д. Юза, в большинстве стран (США, Франция, Бельгия, Швеция, Италия и Швейцария) этим методом была измерена интенсивность ряда источников, принятых в качестве нейтронных стандартов.

2. Методы калибровки, основанные на измерении объема гелия, образующегося в результате ядерных реакций, например $B^{10}(n, \alpha)Li^7$ и $Be^9(\gamma, n)2He^4$.

3. Методы, основанные на регистрации заряженных частиц, сопровождающих вылет нейтрона в результате различных ядерных реакций: $T(d, n)He^4$, $T(p, n)He^3$, $D(d, n)He^3$, $D(\gamma, n)H$.

4. Методы, основанные на регистрации ядер отдачи при упругом рассеянии нейтронов в водородсодержащих веществах.

5. Методы, основанные на измерении изменения потока нейтронов в графитовой призме реактора при поочередном внесении в нее калибруемого источника нейтронов и поглотителя нейтронов, с последующим измерением наведенной в нем β -активности.

В 1948—1949 гг. Петржак [2] разработал метод калибровки нейтронных источников, основанный на измерении числа фотопротонов, возникающих в результате фоторасщепления дейтона. Этим методом впервые в СССР была произведена калибровка нейтронного $Ra-\alpha-Be$ -источника, представляющего собой запрессованную в контейнер смесь бромистого радия с порошком металлического бериллия. Сравнение интенсивности $Ra-\alpha-Be$ -источника с фотонейтронным источником производилось в водяном баке при помощи различных детекторов тепловых нейтронов.

В 1950—1951 гг. Флёрв и Поредкий разработали метод калибровки нейтронных источников, основанный на измерении числа заряженных частиц He^3 и He^4 , сопровождающих вылет нейтронов в реакциях $D(d, n)He^3$ [3] и $T(d, n)He^4$ [4]. Мишень из тяжелой воды (в случае $D+D$ реакции) и циркониевая мишень, насыщенная тритием (в случае $D+T$ реакции), бомбардировались дейтонами, полученными на ускорительной трубке. Частицы He^3 и He^4 регистрировались пропорциональным α -счетчиком. Сравнение нейтронных потоков в случае $D+D$ реакции производилось посредством «длинного счетчика», подобного описанному в работе Хан-

сона и Мак-Киббена [5]. В случае $D+T$ реакции для сравнения интенсивностей нейтронных потоков реакции и калибруемого источника использовались измерения площадей кривых замедления нейтронов в большом баке с маслом. Аналогичная работа была выполнена в Швеции Ларсоном [6], который также использовал реакцию $T(d, n)He^4$ для абсолютного измерения интенсивности $Ra-\alpha-Be$ -источника.

В 1951—1952 гг. Сливак и Ерозолимский [7] разработали метод калибровки нейтронных источников, основанный на сравнении источника со «стоком» тепловых нейтронов, в качестве которого использовалась мишень из чистого золота, вносимая в нейтронное поле ядерного реактора. Мощность этого «стока» определялась по активности, накапливаемой при облучении этой мишени в том же нейтронном поле. Определение абсолютной активности производилось методом β - γ -совпадений. Следует указать, что ядерный реактор был впервые использован Литлером [8] для калибровки нейтронного источника в 1950—1951 гг. в Харуэлле (Англия); полученные результаты были приняты в качестве английского нейтронного стандарта [1].

В 1951—1952 гг. Давиденко и Кучер [9] применили метод калибровки нейтронных источников, основанный на измерении абсолютной β -активности марганца, наведенной нейтронами в большом объеме раствора $KMnO_4$ в воде. Этот метод представляет собой несколько видоизмененный и усовершенствованный метод Амальди и Ферми [10]. В отличие от метода Амальди и Ферми авторы в качестве замедлителя и детектора нейтронов применили водный раствор перманганата калия, заменив, таким образом, аналитическое интегрирование «физическим» интегрированием. Этот метод особенно выгодно применять при калибровке нейтронных источников малой интенсивности благодаря возможности концентрировать активность по методу Сцилларда—Чалмерса.

В 1950—1951 гг. нами был разработан метод калибровки нейтронных источников [11]—[13], основанный на принципе, предложенном в 1946 г. О'Нилом и Шарф-Гольдгабером [14]. Для измерения интенсивности нейтронного источника данным методом источник необходимо поместить в достаточно большой объем замедлителя (чтобы можно было пренебречь утечкой нейтронов)

с введенным в него поглотителем нейтронов и определить: 1) относительную долю нейтронов K , захватываемых поглотителем, и 2) абсолютное число нейтронов N_a , поглощаемых им в единицу времени. В качестве замедлителя был использован 10%-ный раствор сернистого марганца в воде, которым заполнялся бак диаметром 95 см и высотой 95 см. Для определения интенсивности нейтронного источника его помещали в центре бака. Вокруг источника на расстоянии порядка диффузионной длины тепловых нейтронов в воде располагались тонкие плексигласовые пробирки с твердым поглотителем. В качестве поглотителя применялся мелкий порошок очищенного золота (99,99% чистоты). Общее количество золота, засыпанного в пробирки, было равно 468 г.

Для определения интенсивности источника производились две серии опытов. В первой серии золото в растворе отсутствовало и после облучения раствора до насыщения измерялась его активность N_0 , обусловленная γ -излучением, сопровождающим β -распад Mn^{56} . Во второй серии в раствор вводилось золото и после облучения измерялась активность раствора N_1 . Тогда по отношению

$K = \frac{N_0 - N_1}{N_0}$ можно было определить относительную долю нейтронов, поглощаемых золотом. Из второй серии опытов определялось также абсолютное число нейтронов N_a , поглощаемых золотом. Активность раствора измерялась большим γ -счетчиком Гейгера—Мюллера (типа МС-6), который погружался непосредственно в облученный раствор (счетчик помещался в тонкий плексигласовый чехол). Перед каждым облучением раствора проверялся его фон, а также контролировалась эффективность счетчика посредством γ -препарата радия. Максимальное расхождение измеренной активности раствора от опыта к опыту не превышало статической ошибки измерения 0,5%. Другие ошибки определения доли нейтронов K , поглощаемых золотом (утечка нейтронов за пределы бака, поглощение нейтронов плексигласовыми пробирками), были учтены в дополнительных опытах и составляли в сумме около 1%. Абсолютное число нейтронов, поглощаемых золотом, определялось по наведенной в нем β -активности. Измерение абсолютного числа β -распадов производилось методом β - γ -совпадений.

Облученный порошок золота высыпался из всех пробирок и тщательно перемешивался. Определенные навески порошка (примерно около 1 г каждая) засыпались равномерным слоем в специальные кассеты диаметром 20 мм и толщиной около 300 мг/см². Размеры мишени подбирались такими, чтобы эффективность счета γ -компонента излучения Au^{198} была постоянной для всего объема мишени.

Для регистрации β -частиц применялся торцовый счетчик типа ТМ-20 с диаметром окна, равным 20 мм, и толщиной слюды 15 мк. В начале разработки метода в 1951 г. для регистрации γ -лучей применялся блок из гейгеровских счетчиков типа АМА-4, а в последующих опытах в 1953 г. и 1956 г. — сцинтилляционный счетчик, состоящий из кристалла NaI(Tl) диаметром 28 мм и высотой 15 мм и фотоэлектронного умножителя типа ФЭУ-19. Использование сцинтилляционного счетчика в γ -канале схемы β - γ -совпадений дало возможность повысить эффективность регистрации γ -лучей золота ($E = 411$ кэв) примерно в 10 раз, а также уменьшить разрешающее время схемы совпадений. Расстояние от мишени до торцового счетчика составляло 25 мм, до кристалла — 20 мм. Такой выбор геометрии опыта давал возможность получать нормальные загрузки β -и γ -каналов схемы совпадений.

В каждом отдельном измерении абсолютного числа β -распадов Au^{198} число β - γ -совпадений исправлялось на присутствие γ - γ -совпадений и случайные совпадения, а также вводилась поправка на регистрацию γ -лучей β -счетчиком. При оценке γ - γ -совпадений и γ -фона β -счетчика последний экранировался алюминиевым фильтром (толщиной 2 мм), достаточным для того, чтобы задержать β -частицы Au^{198} ($E_0 = 970$ кэв). Гамма-фон β -счетчика составлял около 3—4% от числа регистрируемых β -частиц. Фон от γ - γ -совпадений практически равнялся фону от космического излучения и составлял примерно 0,5% от общего числа β - γ -совпадений.

Для поглощения конверсионных электронов, образующихся при внутренней конверсии γ -лучей золота [15] и [16], между мишенью и β -счетчиком ставился алюминиевый фильтр толщиной 400 мк. Такая толщина была выбрана после нескольких контрольных измерений абсолютного числа распадов золота с разными алюминиевыми фильтрами (толщиной от 50 мк до 600 мк). При толщине

Результаты калибровки Ra- α -Be источника Н-23 в различных лабораториях АН СССР

№ пп.	Год калибровки	Авторы	Метод калибровки	Интенсивность источника $Q \cdot 10^5$ нейтр/сек	Примечание
1	1949	К. А. Петржак	Регистрация фотопротонов реакции $D(\gamma, n)H$	$3,20 \pm 0,29$	Среднее значение из результатов сравнения источника Н-23 с Ra- α -Be-источником В-IV и Ra- α -Be-источником К-9
2	1951	Ю. С. Замятнин, В. М. Безотосный	Активация Au в растворе $MnSO_4$ в H_2O и абсолютный счет Au^{198} методом β - γ -совпадений	$4,50 \pm 0,31$	Непосредственная калибровка Ra- α -Be-источника Н-23
3	1953	Ю. С. Замятнин, В. М. Безотосный	То же	$4,40 \pm 0,24$	То же
4	1956	В. М. Безотосный, И. Н. Парамонова	»	$4,53 \pm 0,25$	»
5	1951	Г. Н. Флёрв, Л. Б. Порецкий	Регистрация He^3 в реакции $D(d, n)He^3$	$4,30 \pm 0,3$	Сравнение Ra- α -Be-источника Н-23 с нейтронами реакции на «длинном счетчике» BF_3
6	1951	Г. Н. Флёрв, Л. Б. Порецкий	Регистрация He^4 в реакции $T(d, n)He^4$	$4,45 \pm 0,36$	Сравнение Ra- α -Be-источника Н-23 с нейтронами реакции в баке с маслом ионизационной камерой BF_3
7	1951	В. А. Давиденко, А. М. Кучер, И. С. Погребов, Ю. Ф. Турутов	Активация водного раствора $KMnO_4$ в H_2O и абсолютный счет Mn^{56}	$4,40 \pm 0,40$	Сравнение источника Н-23 с Ra- α -Be-источником Н-26
8	1952	В. А. Давиденко, А. М. Кучер	То же	$4,70 \pm 0,30$	То же
9	1952	П. Е. Сливак, Б. Г. Ерозолимский	Сравнение интенсивности источника со «сточком» тепловых нейтронов в ядерном реакторе и абсолютный счет Au^{198} методом β - γ -совпадений	$5,0 \pm 0,20$	Среднее значение из результатов сравнения источника Н-23 с Ra- α -Be-источником Н-22 и Ra- γ -Be-источником Н-29
10	1951	И. М. Франк	Сравнение интенсивности источника с интенсивностью нейтронов спонтанного деления U^{238} в графитовой призме счетчиком BF_3	$4,8 \pm 0,5$	Сравнение Ra- α -Be-источника Н-23 с Ra- α -Be-эталонном ФИАН СССР (по данным конференции, октябрь 1952 г.)

алюминия от 300 до 600 мк измеренная активность золота оставалась постоянной в пределах статистической точности измерений, равной 1—2%.

Радиотехническая схема для регистрации β -частиц, γ -лучей и β - γ -совпадений имела разрешающее время 0,5 мксек, при котором не было просчетов истинных совпадений, и число случайных совпадений составляло около 4% от общего числа β - γ -совпадений.

Для проверки стабильности работы счетчиков и схемы совпадений проводился периодический контроль при помощи β -эталоны Co^{60} .

Из полученных величин N_β , N_γ , $N_{\beta\gamma}$, сосчитанных за определенный промежуток времени $(t_2 - t_1)$, вычитались соответствующие фоны и вычислялись счетности $(N_\beta)_0$, $(N_\gamma)_0$ и $(N_{\beta\gamma})_0$, приведенные к моменту времени снятия золота с облучения, по следующей интегральной формуле радиоактивного распада:

$$N_{\text{привед}} = \frac{\lambda (N_{\text{измер}} - N_{\text{фон}}) e^{\lambda t}}{[1 - e^{-\lambda(t_2 - t_1)}]}, \quad (1)$$

где t — промежуток времени от момента прекращения облучения до начала измерения; λ — константа распада Au^{198} *).

Абсолютное число нейтронов, поглощенных золотом, вычислялось по формуле

$$N_a = \frac{P \cdot (N_\beta)_0 \cdot (N_\gamma)_0}{P \cdot (N_{\beta\gamma})_0 \cdot (1 - e^{-\lambda T})}, \quad (2)$$

где P — вес золота; P — вес измеряемой навески и T — время облучения.

Таким образом, окончательное выражение интенсивности нейтронного источника принимает вид

$$Q = \frac{P \cdot (N_\beta)_0 \cdot (N_\gamma)_0}{P \cdot (N_{\beta\gamma})_0 \cdot \left(1 - \frac{N_1}{N_0}\right) \cdot (1 - e^{-\lambda T})}. \quad (3)$$

Описанный метод калибровки нейтронных источников обладает тем преимуществом, что он базируется лишь на экспериментально полученных величинах и не требует знания различных констант (например, знания величины сечения поглощения), которые прямым или косвенным образом вводятся во всех других методах калибровки нейтронных источников. Проведенная в 1951, 1953 и 1956 гг. неоднократная калибровка $\text{Ra-}\alpha$ - Be -источника Н-23 (представляющего собой запрессованную в герметический контейнер смесь 44,25 мг равновесного препарата радия с порошком бериллия) показала, что разработанный нами метод достаточно прост и точен.

Выше приведена таблица значений выхода нейтронов $\text{Ra-}\alpha$ - Be -источника Н-23, полученных в различных лабораториях АН СССР. Таблица составлена по результатам непосредственной калибровки источника Н-23 и сравнения его интенсивности с интенсивностью эталонов различных лабораторий.

Результаты эталонирования нейтронных источников в различных лабораториях АН СССР обсуждались на совещании физиков в Москве в октябре 1952 г. При сравнении интенсивности различных источников оказалось, что результаты абсолютных измерений, полученные в различных лабораториях СССР разными методами калибровки, находятся в согласии между собой в пределах 10%, за исключением результатов, полученных Петржаком. На конференции в качестве временного нейтронного эталона СССР был выбран $\text{Ra-}\alpha$ - Be -источник Н-23, интенсивность которого была принята равной среднему значению, полученному из результатов калибровки, проведенной в разных лабораториях (см. таблицу, № 2, 5—10).

Поступила в редакцию 1 VIII 1956 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. D. J. Hughes, Nucleonics 12, № 12, 26 (1954).
2. К. А. Петржак, Отчет АН СССР, 1951 г., К. А. Петржак, М. А. Бак, Б. А. Ферсман, Атомная энергия 2, 319 (1957).
3. Г. Н. Флёров, Л. Б. Порецкий, Отчет АН СССР, 1951 г.
4. Г. Н. Флёров, Л. Б. Порецкий, Отчет АН СССР, 1951 г.
5. A. O. Hanson, J. L. McKibben, Phys. Rev. 72, 673 (1947).
6. K. Larsson, Arkiv. för Fysik 9, 318 (1955).
7. П. Е. Спывак, Б. Г. Ерозолимский, Отчет АН СССР, 1952 г., Атомная энергия 2, 327 (1957).
8. D. J. Littler, Proc. Phys. Soc. 64A, 638 (1951).

*) Во всех расчетах период полураспада Au^{198} принимался равным $T = (63,82 \pm 0,13)$ часа [17].

9. В. А. Давиденко, А. М. Кучер, И. С. Погребов, Ю. Ф. Турутов, Отчет АН СССР, 1951 г.; В. А. Давиденко, А. М. Кучер, Отчет АН СССР, 1952 г., Атомная энергия 2, 334 (1957).
10. Е. Amaldi, Е. Fermi, Phys. Rev. 50, 899 (1936).
11. Ю. С. Замятнин, В. М. Безотосный, Отчет АН СССР, 1951 г.
2. Ю. С. Замятнин, В. М. Безотосный, Отчет АН СССР, 1953 г.
13. В. М. Безотосный, И. Н. Парамонова, Отчет АН СССР, 1956 г.
14. R. D. O'Neal, G. Scharff-Goldhaber, Phys. Rev. 69, 368 (1946).
15. P. W. Levy, E. Greuling, Phys. Rev. 75, 819 (1949).
16. П. Е. Сливак, В. Р. Лазаренко, Отчет АН СССР, 1954 г.
17. P. E. Cavanagh, J. F. Turner, D. V. Booker, H. J. Dunster, Proc. Phys. Soc. 64A, 13 (1951).

