

Температура нейтронов в реакторах с водяным замедлителем Таблица 2

| Реактор | Обогащение по U^{235} , % | $\frac{\Sigma_a(kT_m)}{\Sigma_s}$ | T_n , °К * | A * |
|----------|-----------------------------|-----------------------------------|--------------|------|
| ВВР | 10 | 0,137 | 400±12 | 2,02 |
| МР | 90 | 0,178 ** | 390±12 | 2,04 |
| ВВЭР | 2 | 0,159 | 396±12 | 1,92 |
| | 1,5 | 0,126 | 375±11 | 1,85 |
| RFR | 10 | 0,138 | 394 | 2,11 |
| MELUSINE | 20 | 0,130 | 375 | 1,92 |

* Приведены экспериментальные значения.

** Величина $\frac{\Sigma_a(kT_m)}{\Sigma_s}$ для тепловыделяющей сборки (ТВС) реактора МР рассчитывалась в предположении, что бериллий не оказывает заметного влияния на спектр нейтронов внутри ТВС.

проигрыша 1,1), а также значения параметра А, которые при расчете по соотношению

$$T_n = T_m \left[1 + A \frac{\Sigma_a(kT_m)}{\Sigma_s} \right]$$

(здесь T_m — температура среды, °К) дают температуру нейтронов в замедлителе, равную экспериментальной.

Следует отметить хорошее согласие экспериментальных величин А между собой, полученных в настоящей работе для ячеек с различным обогащением по U^{235} и разным отношением объемов урана и воды, а также с результатами других авторов для реакторов RFR и MELUSINE.

Приведенные результаты измерений в реакторах с водой, а также полученные ранее данные в реакторах с графитовым замедлителем [11] показывают, что определение температуры нейтронов в замедлителе на основе формулы Ковейо или аналогичных формул других

авторов [12—15] возможно в первом приближении, но с соответствующим значением $A_{эфф}$ в зависимости от вида замедлителя, т. е.

$$T_n = T_m \left[1 + A_{эфф} \frac{\Sigma_a(kT_m)}{\Sigma_s} \right].$$

Для реакторов с водой $A_{эфф} = 1,98 \pm 0,08$ (среднее значение величин А приведены в табл. 2).

Поступило в Редакцию 20/V 1971 г.
В окончательной редакции 22/IX 1972 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. C. Westcott et al. II Женевская конференция (1958), доклад 45/P202 (Канада).
2. G. Dixon, R. Sher. Nucl. Sci. and Engng, 41, 357 (1970).
3. В. В. Гончаров и др. III Женевская конференция (1964), доклад 323 (СССР).
4. А. Я. Крамеров и др. Там же, доклад 304 (СССР).
5. С. С. Ломакин и др. Ядерное приборостроение. Труды СНИИП. Вып. XII. М., 1970, стр. 230.
6. C. Westcott. AECL-1101 (1960).
7. Р. Мерребллан, Д. Холмс. «Теория реакторов». М., Атомиздат, 1962.
8. D. Albert. Kernenergie, 10, Н. 2 (1967).
9. D. Albert. ZfK-RN-13, 1961.
10. Neutron Fluence Measurements. Vienna, IAEA, 1970.
11. С. С. Ломакин и др. «Атомная энергия», 29, вып. 1, 36 (1970).
12. R. Coveyou et al. Nucl. Energy, 2, 153 (1956).
13. S. Kobayashi. J. of Nucl. Sci and Technol., 4, No. 9, 451 (1967).
14. E. Cohen. I Женевская конференция (1955), доклад 611 (США).
15. К. Бекурц, К. Вирту. Нейтронная физика. М., Атомиздат, 1968.

Оценка чувствительности индивидуального дозиметра на основе ядерной эмульсии типа К к дозе тепловых, промежуточных и быстрых нейтронов

М. Г. ГЕЛЕВ *, М. М. КОМОЧКОВ, И. Т. МИШЕВ *, М. И. САЛАЦКАЯ

УДК 539.12.08:621.386.82

В течение последних десяти лет в ОИЯИ для измерения индивидуальной дозы нейтронов, получаемой сотрудниками при работе вблизи источников излучения, используется ядерная эмульсия типа К толщиной 20 мкм, нанесенная на триацетатную пленку и заключенная в корректирующий пакет [1, 2]. В указанных работах этот метод был обоснован для измерения дозы быстрых нейтронов ($0,5 \leq E < 15$ Мэв), он позволяет измерять дозу в пределах 0,02 — 15 бэр. Однако для определения полной индивидуальной дозы нейтронов при работе за толстой защитой реакторов и ускорителей

недостаточно знать только дозу быстрых нейтронов. В таких случаях, как показано в работах [3, 4], вклад тепловых нейтронов ($E < 0,4$ эв) в полную дозу может достигать 10%, а в промежуточных ($0,4$ эв $< E < 0,5$ Мэв) — 60% и более. Следовательно, дозиметры индивидуального контроля должны с достаточной точностью регистрировать дозу не только быстрых, но и дозу тепловых и промежуточных нейтронов. В настоящей работе проведена расчетная оценка чувствительности индивидуального дозиметра нейтронов на основе эмульсии типа К к тепловым и промежуточным нейтронам, а также экспериментальная проверка чувствительности такого дозиметра к тепловым нейтронам.

* Физический институт Болгарской АН (София, НБР).

В состав используемой в индивидуальной дозиметрии нейтронов эмульсии типа К наряду с другими элементами входит азот [5]. Под действием тепловых нейтронов в эмульсии идет реакция $N^{14}(n, p)C^{14}$ с вылетом протонов с энергией около 6 Мэв. Пробег этих протонов в эмульсии составляет приблизительно 6 мкм. Число протонов $N(E)$, образующихся в 1 см² эмульсии при облучении ее нейтронами с энергией E , можно определить из выражения

$$N(E) = \Phi(E) \sigma(E) A,$$

где $\Phi(E)$ — поток нейтронов с энергией E , нейтр·см⁻²; $\sigma(E)$ — сечение реакции $N^{14}(n, p)C^{14}$, см²; A — число атомов азота на 1 см² эмульсии. Для эмульсии типа К толщиной 20 ± 3 мкм величина A равна $(7 \pm 1) \times 10^{18}$ см⁻².

Предположим, что эффективность регистрации протонов составляет 100% и регрессия в эмульсии отсутствует, тогда число протонов, вылетевших из ядер азота, равно числу зарегистрированных треков, образованных этими протонами. На рис. 1 (кривая 1) показана расчетная зависимость чувствительности от энергии нейтронов при указанных выше предположениях. Здесь и далее чувствительность выражена числом треков на 1 см² эмульсии в расчете на 1 бэр нейтронов; значения коэффициента качества (КК) нейтронов взяты из работы [6]. Для нейтронов с энергией 0,025 эв сечение выбрано равным $1,76 \cdot 10^{-24}$ см², а с ростом энергии нейтронов изменение сечения принято обратно пропорциональным их скорости. Как видно на рис. 1 (кривая 1), пленку с эмульсией типа К нельзя использовать в качестве дозиметра промежуточных нейтронов из-за резкого падения ее чувствительности с нарастанием энергии нейтронов. Однако использование такой пленки в кассете дозиметра, который помещается на теле человека, возможно в более широком диапазоне энергий нейтронов. Как показано в работе [7], поток тепловых нейтронов, рассеянных от фантома при облучении его промежуточными нейтронами, слабо зависит от энергии вплоть до 7 кэв и составляет примерно 0,8 нейтрона на один падающий нейтрон (рис. 2). По данным работы [8], эта величина составляет около 0,5 нейтрона на один падающий нейтрон. С увеличением энергии нейтронов поток рассеянных от фантома тепловых нейтронов заметно уменьшается. На основании данных работы [7] была рассчитана зависимость чувствительности эмульсии типа К (20 мкм) к тепловым и промежуточным нейтронам с учетом регистрации эмульсией рассеянных «назад» от фантома тепловых нейтронов. Результаты приведены на рис. 1 (кривая 2). Участок кривой 2 для энергий нейтронов более 0,3 Мэв представляет зависимость чувствительности эмульсии с корректирующим пакетом к быстрым нейтронам [1]. Как видно из этих данных, эмульсия с корректирующим пакетом может использоваться в качестве индивидуального дозиметра нейтронов с энергией от тепловых до 7 кэв и от 0,5 до 15 Мэв. В области энергий нейтронов 7 500 кэв чувствительность такого дозиметра резко меняется, поэтому его нельзя использовать в качестве дозиметра нейтронов в этой области энергий.

Для экспериментальной проверки чувствительности индивидуальных дозиметров с эмульсией К (20 мкм), нанесенной на триацетатную пленку, к тепловым нейтронам дозиметры облучались на тепловой колонне реактора ИРТ-2000 (Физический институт БАН, София). Кадмиевое отношение в пучке нейтронов превышало

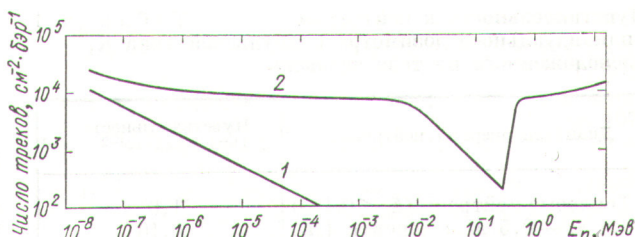


Рис. 1. Зависимость расчетной чувствительности индивидуального дозиметра на основе ядерной эмульсии типа «К» от энергии нейтронов:

1 — облучение без фантома; 2 — облучение с фантомом.

1000. Поток тепловых нейтронов измеряли индиевым детектором, ошибка определения составляла $\pm 20\%$. При таких условиях было найдено, что чувствительность дозиметра к тепловым нейтронам без фантома равна $(0,84 \pm 0,19) \cdot 10^4$ трек·см⁻²·бэр⁻¹. Как уже было показано (см. рис. 1, кривая 1), его расчетная чувствительность равна $(1,23 \pm 0,18) \cdot 10^4$ трек·см⁻²·бэр⁻¹. В действительности, согласно произведенной оценке, примерно 10% треков, входящих в расчетную величину, не будет сосчитано при просмотре под микроскопом вследствие малых длин треков протонов (менее 3 мкм), выходящих из эмульсии, и больших углов между треком и поверхностью эмульсии (более 77°). Таким образом, в пределах ошибок расчетная и экспериментальная величины чувствительности совпадают.

Чувствительность индивидуального дозиметра, расположенного на теле человека, к тепловым нейтронам определяли на основании данных работы [7] путем умножения его чувствительности без фантома на 1,86. Полученные результаты приведены в табл. 1.

Для оценки чувствительности дозиметра к промежуточным нейтронам за толстой бетонной защитой реактора или ускорителя спектр нейтронов (особенно на реакторе) можно принять обратно пропорциональным их энергии. Полученная при этом предположении чувствительность дозиметра с учетом обратного рассеяния тепловых нейтронов от фантома и экспериментально определенной чувствительности к тепловым

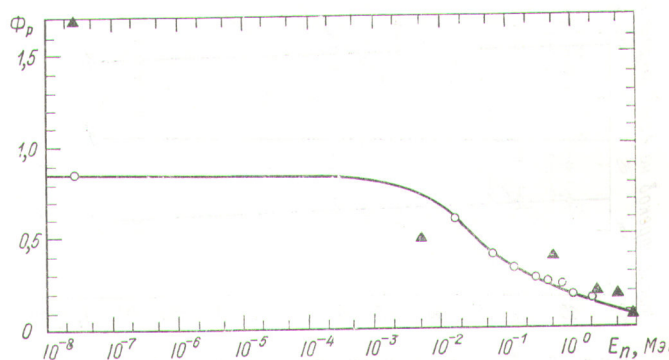


Рис. 2. Зависимость потока тепловых нейтронов Φ_p , рассеянных «назад» от фантома при падении на него единичного потока с энергией E (данные работы [7]):

○ — эксперимент; ▲ — расчет.

Чувствительность к нейтронам индивидуального дозиметра с эмульсией типа К, расположенного на теле человека

Таблица 1

| Диапазон энергий нейтронов | Чувствительность, $\times 10^{-4}$ трек · см ⁻² · бар ⁻¹ |
|-----------------------------------|--|
| Тепловые нейтроны ($E < 0,4$ эв) | 1,6 |
| 0,4 эв — 0,5 Мэв (спектр 1/E) | 0,16 |
| 0,5—0,15 Мэв (Po—Be-источник) | 0,92 |

нейтронам без фантома приведена в табл. 1. Здесь же указана чувствительность дозиметра к быстрым нейтронам согласно работе [1].

В применяемой до настоящего времени в ОИЯИ методике измерения индивидуальной дозы нейтронов используется чувствительность дозиметра к быстрым нейтронам. Однако это не является корректным, так как в контролируемых полях имеются тепловые и промежуточные нейтроны. Соотношение вкладов в дозу нейтронов различных энергий на рабочих местах за защитой ядернофизических установок ОИЯИ при-

ведено в табл. 2 [9]. В этой же таблице представлены вычисленная в соответствии с этими данными чувствительность индивидуального дозиметра к нейтронам и поправочные коэффициенты K , на которые следует и поправочные коэффициенты K , на которые следует умножить зарегистрированную в соответствии с методикой [1] дозу, чтобы получить полную индивидуальную дозу нейтронов с энергиями от тепловых до 15 Мэв.

Таким образом, регистрируемая с помощью индивидуального дозиметра с ядерной эмульсией доза нейтронов при работе в помещениях за защитой занижается на 10—65%, степень занижения зависит от источника излучения и защиты. При этом вклад частиц с энергией больше 20 Мэв в полную дозу за защитой не должен превышать 5% [10]. Большой вклад в дозу частиц высоких энергий может привести даже к завышению регистрируемой индивидуальной дозы.

В связи с тем что треки протонов из азота имеют малую длину, представляло интерес изучить зависимость регрессии треков в эмульсии от интервала времени между облучением и обработкой эмульсии. Результаты соответствующих экспериментов приведены на рис. 3 и 4. Из рисунков следует, что в течение 100 суток после облучения регрессией можно пренебречь, так как ее величина остается в пределах ошибок, составляющих примерно $\pm 20\%$. Кроме того, не было обнаружено уменьшения числа треков на пленках при хранении пленок

Вклад в дозу нейтронов различных групп на установках ОИЯИ и соответствующая им чувствительность индивидуального дозиметра

Таблица 2

| Установка | Вклад в дозу, % | | | Чувствительность индивидуального дозиметра, трек · см ⁻² · бар ⁻¹ | Поправочный коэффициент |
|-----------------|---------------------------------|--|--------------------------------------|---|-------------------------|
| | тепловые нейтроны, $E < 0,4$ эв | промежуточные нейтроны, $0,4$ эв $< E < 0,5$ Мэв | быстрые нейтроны, $0,5 < E < 15$ Мэв | | |
| Синхроциклотрон | 5 | 55 | 40 | $0,56 \cdot 10^4$ | 1,65 |
| Синхрофазотрон | 5 | 15 | 80 | $0,84 \cdot 10^4$ | 1,1 |
| ИБР | 10 | 55 | 35 | $0,59 \cdot 10^4$ | 1,56 |
| Циклотрон | 3 | 37 | 60 | $0,67 \cdot 10^4$ | 1,37 |

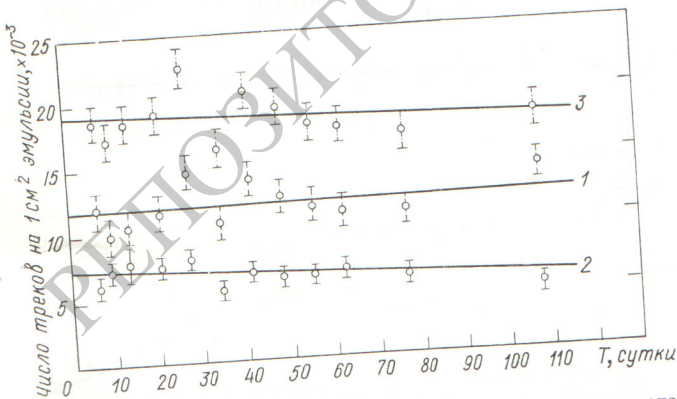


Рис. 3. Зависимость числа треков в эмульсии от интервала времени между облучением и обработкой (при постоянной поглощенной дозе):

1 — число треков длиной ≤ 6 мкм; 2 — число треков длиной > 6 мкм; 3 — полное число треков в эмульсии.

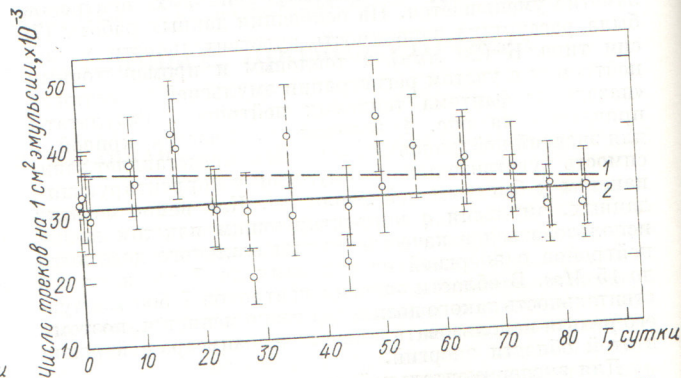


Рис. 4. Зависимость числа треков в эмульсии от интервала времени между облучением и обработкой (при постоянной поглощенной дозе):

1 — число треков на пленках, хранимых в холодильнике при 6° С; 2 — число треков на пленках, хранимых при комнатной температуре.

в холодильнике и в комнатных условиях, близких к рабочим условиям, в которых обычно сотрудники носят или хранят индивидуальные дозиметры.

Таким образом, с помощью применяемой в ОИЯИ методики измеряемая величина индивидуальной дозы быстрых нейтронов, завышается на 10—80% из-за чувствительности ядерной эмульсии типа К к тепловым нейтронам. Однако если ввести коэффициент коррекции, равный 1,5, то можно считать, что индивидуальный дозиметр в условиях работы сотрудников на ИБР и циклотроне регистрирует суммарную дозу нейтронов с энергией от тепловых до 15 Мэв. Для сотрудников, работающих на синхротронном и синхрофазотроне, введение такого коэффициента правомерно лишь в тех случаях, когда вклад в дозу сверхбыстрых нуклонов не превышает 5%.

Авторы приносят благодарность Л. Б. Смирновой и Г. П. Кораблевой за просмотр пленок под микроскопом, С. Пшоне и В. Е. Алейникову за помощь при облучении пленок.

Поступило в Редакцию 1/II 1972 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. Л. С. Золин, В. Н. Лебедев, М. И. Салацкая. «Атомная энергия», 13, вып. 5, 467 (1962).
2. М. И. Салацкая, В. Н. Лебедев, Л. С. Золин. В сб. «Радиационная физика». Т. П. Рига, 1964, стр. 107.
3. D. N a c h t i g a l l. Neutron Monitoring. Vienna, IAEA, 1967, p. 333.
4. В. А. Князев и др. «Атомная энергия», 27, 210 (1969).
5. М. Ф. Родичева. «Ж. научн. и прикл. фотографии и кинематографии», 5, № 3, 221 (1960).
6. Основные нормы безопасности при защите от излучения. Серия изданий по безопасности № 9. Вена, МАГАТЭ, 1968.
7. J. D e n n i s e t a l. Neutron Monitoring. Vienna, IAEA, 1967, p. 537.
8. P. N a g a r a j a n, D. K r i s h n a n. Health Phys., 17, 323 (1969).
9. В. Е. Алейников и др. Публикация ОИЯИ Б1-2759 (1966).
10. В. Е. Алейников и др. Proceedings of International Congress on Protection Against Accelerator and Space Radiation. Vol. I. Geneva, CERN, 1971, p. 282.

Способ оценки счетной эффективности кремниевых ППД для γ -квантов с энергией 0,661 и 1,25 Мэв

М. Л. ГОЛЬДИН, К. Р. ПАТЕР-РАЗУМОВСКИЙ, Ф. В. БИРНИК

УДК 539.1.074

Одна из важных задач в области радиоизотопного приборостроения — расчет активности гамма-излучателей по известной счетной эффективности ξ детектора. Представляет интерес получение формулы для расчета величины ξ кремниевых полупроводниковых детекторов (ППД), которые находят все более широкое применение в технике.

Кремниевый *p-i-n*-детектор можно рассматривать как слой полупроводника толщиной W (глубина компенсированной области), не зависящей от напряжения смещения $U_{см}$. Эффективность регистрации параллельного потока γ -квантов такой моделью можно определить по формуле

$$\xi = 1 - \exp(-\mu W), \quad (1)$$

где μ — линейный коэффициент ослабления. Взаимодействие излучения с «мертвым» слоем не учитывается, так как в большинстве случаев толщина последнего значительно меньше W .

В кремнии для энергии γ -квантов 0,661 и 1,25 Мэв (значения, широко используемые в радиоизотопном приборостроении) преобладает комптоновское взаимодействие [1]. Следует учитывать лишь однократное взаимодействие [2], так как длина свободного пробега γ -квантов указанных энергий больше величины W детекторов, пригодных для промышленного применения. Спектр комптоновских электронов будет воспроизводиться детектором в виде спектра амплитуд импульсов. Поэтому число зарегистрированных γ -квантов, а следовательно, и счетная эффективность детектора, будет зависеть от порога регистрации $E_{п}$, обычно определяемого уровнем шума системы детектор — предусилитель. Однако регистрация γ -квантов с энергией

$E_{к} < E_{п}$ связана с некоторыми трудностями, так как величина их энергии соизмерима с шумом. Поэтому формулу (1) для рассматриваемого случая следует переписать так:

$$\xi = 1 - \exp[-(\mu - \mu_{п}) W], \quad (2)$$

где $\mu_{п}$ — линейный коэффициент ослабления, учитывающий потери энергии γ -квантами $E_{к} < E_{п}$. Энергия

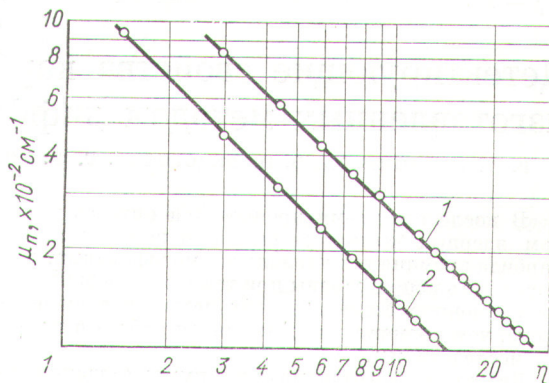


Рис. 1. Зависимость величины $\mu_{п}$ от отношения энергии первичного γ -кванта к порогу регистрации: 1 — Cs¹³⁷, $E_{\gamma} = 0,661$ Мэв; 2 — Co⁶⁰, $E_{\gamma} = 1,25$ Мэв; \circ — расчетные значения $\mu_{п}$.