

# Характеристики индивидуального трекового дозиметра нейтронов ДИНА

И. Б. КЕИРИМ-МАРКУС, Т. В. КОРОЛЕВА, С. Н. КРАЙТОР, Л. Н. УСПЕНСКИЙ

УДК 539.12.08

В работе [1] предложен индивидуальный дозиметр нейтронов ДИНА, основанный на использовании трековых детекторов осколков деления с  $Np^{237}$  за фильтром из  $V^{10}$  и  $U^{235}$ . Состав делящихся изотопов в дозиметре и толщина фильтра выбраны такими, чтобы его энергетическая характеристика наилучшим образом воспроизводила зависимость кермы нейтронов или ее эквивалента от энергии, т. е. те дозиметрические величины, которые должны измеряться индивидуальным дозиметром. В соответствии с этим измерение дозы нейтронов сводится к счету треков от осколков деления и умножению полученного числа треков на цену трека. Последняя слабо зависит от спектра нейтронов, который может иметь место при облучении. Оценки, проведенные в работе [1], показали, что разброс цены трека для действующих спектров нейтронов в помещениях не превышает 15%.

В настоящей работе исследовались характеристики индивидуального дозиметра ДИНА, которые существуют при его практическом применении (чувствительность дозиметра, зависимость его показаний от расстояния до поверхности тела человека и угла облучения, влияние спектра нейтронов на цену трека).

Эксперименты проводили с дозиметром, состоящим из двух детекторов осколков деления, в одном из которых находится мишень из  $Np^{237}$  с борным фильтром, а в другом — мишень из  $U^{235}$  (рис. 1). Осколки деления регистрировались трековыми детекторами из силикатного стекла, которые после облучения протравливали в течение 9 мин в плавиковой кислоте с 5%-ной концентрацией и обсчитывали под микроскопом МБИ-9. Площадь детекторов и мишеней  $1\text{ см}^2$ , толщина мишеней  $0,2-0,5\text{ мг/см}^2$ . Калибровку быстрыми нейтронами проводили по  $Pu - Be$ -источнику, а тепловыми — в парафиновом замедлителе с  $Pu - Be$ -источником.

Цена трека индивидуального дозиметра  $\Delta(E)$  определяется выражением

$$\Delta(E) = \frac{\delta(E)}{\sigma_f(E) \varepsilon_f n}, \quad (1)$$

где  $\delta(E)$  — удельная керма или ее эквивалент для энергии нейтронов  $E$ ;  $\sigma_f(E)$  — сечение деления;  $\varepsilon_f$  — эффективность регистрации осколков деления;  $n$  — число ядер делящегося изотопа

в дозиметре. Среднее по спектру нейтронов значение цены трека для оптимального состава изотопов в дозиметре (99,76%  $Np^{237}$  и 0,24  $U^{235}$ ) рассчитывали по формуле

$$\bar{\Delta} = \frac{\int \delta(E) \varphi(E) dE}{\int \sigma_f^{эфф} Np(E) \varepsilon_f n \varphi(E) dE}, \quad (2)$$

где  $\sigma_f^{эфф} Np(E)$  — эффективное сечение деления  $Np^{237}$  за фильтром из  $V^{10}$ ;  $\varphi(E)$  — дифференциальный перенос нейтронов.

Поскольку чувствительность зависит от толщины фильтра, расчеты проводились для разных толщин  $V^{10}$ . Усредненные по набору спектров [1] результаты расчета для кермы и ее эквивалента приведены на рис. 2. На этом же рисунке представлена зависимость максимальной ошибки измерения для набора действующих спектров нейтронов, полученная в работе [1]. Так как при измерении кермы и ее эквивалента оптимальный состав изотопов в дозиметре одинаковый, то и погрешности одни и те же. Таким образом, дозиметр ДИНА можно применять для аварийного и повседневного контроля, изменив только дозовую цену трека.

Из рис. 2 следует, что оптимальная толщина фильтра из  $V^{10}$  равна  $0,1-0,15\text{ г/см}^2$ . При этой толщине цена трека для аварийного контроля составляет около  $2\text{ мрад/трек}\cdot\text{мг } Np^{237}$ , а для повседневного  $20\text{ мбэр/трек}\cdot\text{мг } Np^{237}$ . Такая величина позволяет измерять дозы нейтронов

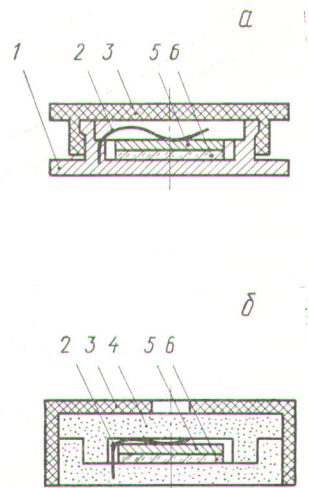


Рис. 1. Конструкция индивидуального дозиметра нейтронов. а — детектор с  $U^{235}$ ; б — детектор с  $Np^{237}$ ; 1 — кассета; 2 — пружина; 3 — полиэтиленовая крышка; 4 — фильтр из  $V^{10}$  толщиной  $0,1\text{ г/см}^2$ ; 5 — мишень; 6 — трековый стеклянный детектор.

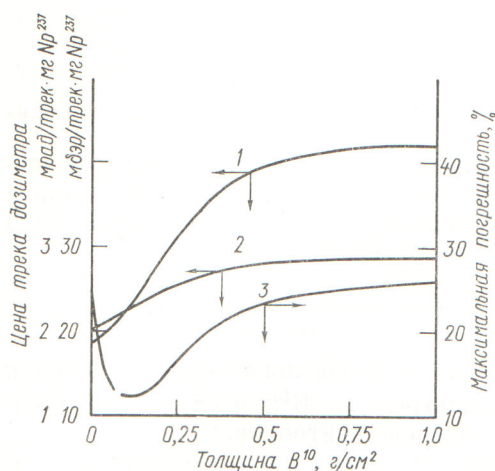


Рис. 2. Зависимость цены трека индивидуального дозиметра при аварийном (1) и повседневном (2) контроле и максимальной ошибки измерения (3) от толщины борного фильтра.

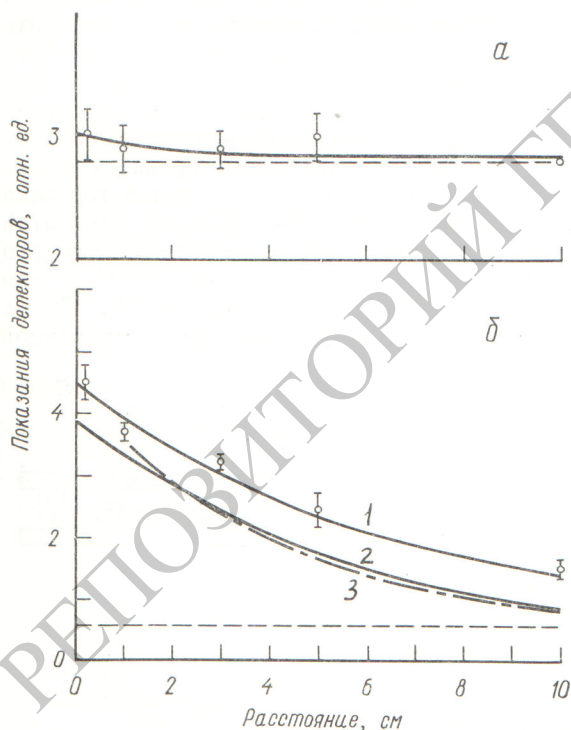


Рис. 3. Зависимость показаний индивидуального дозиметра от расстояния до поверхности фантома.

а — детектор с  $Np^{237}$  и  $0,1 \text{ г/см}^2 \text{ В}^{10}$ ; б — детектор с  $U^{235}$ ; штриховые линии — измерение без фантома; 1 — суммарные показания детектора с  $U^{235}$ ; 2 — тепловые нейтроны из фантома; 3 — расчет для дискового изотропного источника.

в области 5—5000 рад (это соответствует рекомендациям МАГАТЭ [2]) со статистической точностью не хуже 2% и эквивалент дозы около 0,5 бэр и выше (что соответствует предельно допустимой квартальной дозе согласно требованиям НРБ — 69 [3]) со статистической точностью не хуже 15%.

Поскольку индивидуальный дозиметр предназначен для измерения максимального значения дозы нейтронов на поверхности тела человека, важно оценить влияние возможного неплотного прилегания дозиметра к телу. Эти оценки были сделаны при анализе зависимости показаний дозиметра ДИНА от расстояния до поверхности тканезквивалентного фантома торса человека. Измерение проводили в коллимированном пучке реактора ИБР ОИЯИ [4] на расстоянии 10 м от активной зоны. Фантом представлял собой эллиптический цилиндр с размерами полуосей 12,7 и 18 см и высотой 60 см, наполненный тканезквивалентным раствором, толщина винилпластовой оболочки фантома была равна 0,3 см [5]. Дозиметры устанавливались по малой полуоси на разных расстояниях от поверхности фантома, причем их взаимная экранировка была исключена. Поле облучения в пределах круга диаметром 40 см было равномерным.

На рис. 3 представлены результаты измерений для детекторов с  $Np^{237}$  и  $U^{235}$ . Показания детектора с  $Np^{237}$  на поверхности фантома на несколько процентов выше, чем в воздухе, вследствие альbedo быстрых нейтронов, кроме того, они слабо зависят от расстояния до поверхности, поскольку определяющими являются быстрые нейтроны из реактора.

Показания детектора с  $U^{235}$  существенно зависят от расстояния, поскольку перенос тепловых нейтронов из фантома являлся основным и на поверхности фантома он в семь раз превышал вклад тепловых нейтронов, падающих на детектор непосредственно из активной зоны. С увеличением расстояния от поверхности перенос тепловых нейтронов  $\Phi$  уменьшается. Эта зависимость близка к рассчитанной для дискового изотропного источника диаметром 40 см (см. рис. 3). Она получена на основании работы [6] по формуле

$$\Phi_{\text{тепл}}(z) = \frac{A}{4\pi R^2} \ln \left( 1 + \frac{R^2}{z^2} \right), \quad (3)$$

где  $A$  — постоянная;  $z$  — расстояние от поверхности фантома;  $R = 20 \text{ см}$  — радиус дискового источника, равный радиусу пучка нейтронов. Расчетная зависимость нормирована к экспериментальной при расстоянии от фантома 2,5 см.

Были проведены измерения с детектором из  $\text{Np}^{237}$  при облучении фантома под углом  $45$  и  $90^\circ$  к поверхности. Эти результаты в пределах погрешности измерений ( $\sim 10\%$ ) аналогичны облучению по нормали.

Таким образом, показания индивидуального дозиметра для промежуточных и быстрых нейтронов в пределах  $10$  см от поверхности тела человека практически не изменяются с расстоянием. Поэтому не обязательно дозиметр помещать вплотную к телу человека (без потери точности его можно укреплять не на поясе, а на кармане спецодежды). Керма тепловых и медленных нейтронов для этих расстояний изменяется примерно в два раза, однако вклад тепловых нейтронов в полную керму нейтронов, как правило, невелик.

При использовании аварийного индивидуального дозиметра нейтронов важно, чтобы его показания не зависели от направления облучения. Однако у трековых детекторов такая зависимость появляется при делении быстрыми нейтронами вследствие анизотропии углового распределения осколков деления [7]. Для оценки этого фактора была вычислена цена трека от  $\text{Np}^{237}$  в индивидуальном дозиметре ДИНА для различных углов облучения. Расчет проводили по формуле

$$\Delta(E, \theta) = \frac{\delta(E)}{\sigma_f(E) \varepsilon_f(E, \theta) n}, \quad (4)$$

где  $\theta$  — угол облучения относительно нормали к поверхности детектора;  $\varepsilon_f(E, \theta)$  — эффективность регистрации осколков деления трековым детектором из силикатного стекла, взятая из работы [8].

Результаты расчета приведены на рис. 4 для углов облучения  $0$ ,  $45$  и  $90^\circ$ . Здесь же для сравнения представлены результаты аналогичных расчетов для детектора с  $\text{U}^{238}$ , который в некоторых случаях также применяется в индивидуальных дозиметрах [9]. Как и следовало ожидать, дозовая цена трека зависит от угла облучения. Изменение ее при облучении под углами  $0$  и  $90^\circ$  составляет  $5$ — $10\%$  для  $\text{Np}^{237}$  и  $15$ — $25\%$  для  $\text{U}^{238}$ .

При дозиметрических измерениях приходится иметь дело не с моноэнергетическими нейтронами, а с некоторым спектром  $\varphi(E)$ , поэтому рассчитывалась цена трека, усредненная для нескольких спектров. Были выбраны спектр  $\text{Pu} - \text{Be}$ -источника, который часто используется при калибровке дозиметров, спектры деления и водо-водяного реактора [10], близ-

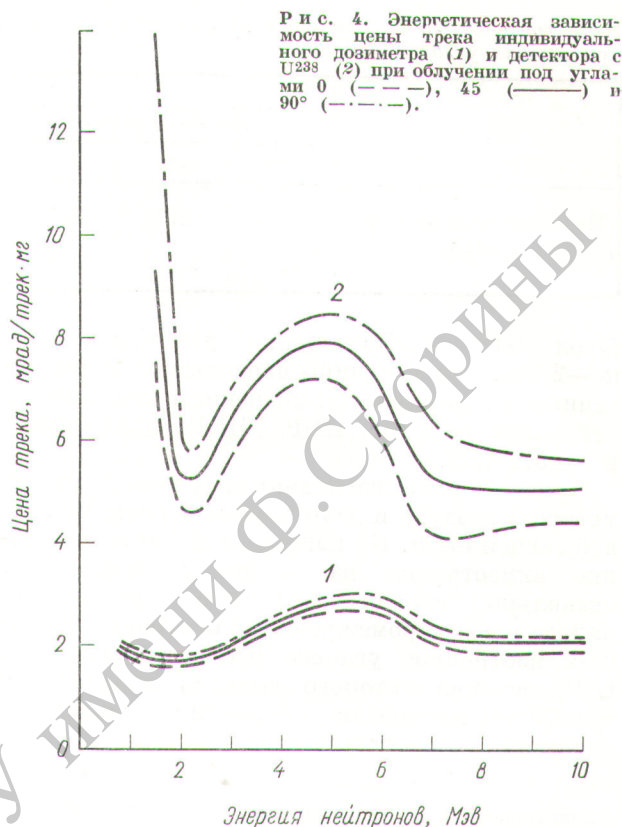


Рис. 4. Энергетическая зависимость цены трека индивидуального дозиметра (1) и детектора с  $\text{U}^{238}$  (2) при облучении под углами  $0$  (---),  $45$  (—) и  $90^\circ$  (— · — · —).

кие к встречающимся на практике. Усреднение проводили по формуле

$$\overline{\Delta(\theta)} = \frac{\int \Delta(E, \theta) \varphi(E) dE}{\int \varphi(E) dE}. \quad (5)$$

Полученные результаты представлены в табл. 1. Видно, что более сильное изменение усредненной цены трека наблюдается для  $\text{U}^{238}$ , анизотропия деления которого больше, чем  $\text{Np}^{237}$ . Такое изменение при неопределенности в направлении облучения приводит к дополнительной ошибке в оценке дозы нейтронов. Для дозиметра с  $\text{Np}^{237}$  она невелика и составляет  $3$ — $5\%$ , а для  $\text{U}^{238}$  значительно выше ( $15$ — $22\%$ ) и существенно ограничивает точность дозиметрических измерений.

Угловая зависимость показаний индивидуального дозиметра нейтронов ДИНА и детектора с  $\text{U}^{238}$  была определена экспериментально на реакторе ИБР ОИЯИ при облучении дозиметров коллимированным пучком нейтронов под углом  $0$ ,  $45$  и  $90^\circ$  к поверхности мишени. Относительно угла  $45^\circ$  изменение цены трека для  $\text{U}^{238}$  составило  $18\%$  (угол  $0^\circ$ ) и  $-14\%$

Цена трека от  $\text{Np}^{237}$  в индивидуальном дозиметре нейтронов ДИНА и детектора с  $\text{U}^{238}$  при разных углах облучения

Таблица 1

| Детектор                                      | Цена трека, $\text{мрад}/\text{трек}\cdot\text{мг}$ |      |      |                |      |      |                      |      |      |
|---|---|------|------|----------------|------|------|----------------------|------|------|
|   | Pu — Be-источник                                    |      |      | Спектр деления |      |      | Водо-водяной реактор |      |      |
|   | 0°  | 45°  | 90°  | 0°             | 45°  | 90°  | 0°                   | 45°  | 90°  |
| Индивидуальный дозиметр ДИНА $\text{U}^{238}$ | 2,20  | 2,35 | 2,45 | 2,10           | 2,21 | 2,30 | 2,41                 | 2,52 | 2,62 |
|   | 8,7   | 10,0 | 10,9 | 10,0           | 11,4 | 13,3 | 14,1                 | 16,4 | 19,1 |

(угол 90°); соответственно для  $\text{Np}^{237}$  3% и —2,7%. Эти величины соответствуют рассчитанным по формуле (5) значениям для спектра нейтронов реактора ИБР ОИЯИ, измеренного в работе [11].

Приведенные выше данные получены для дозиметров в воздухе и дают верхнюю оценку угловой зависимости. На поверхности фантома влияние анизотропии на величину дозы будет несколько меньше вследствие увеличения вклада в дозу промежуточных нейтронов, имеющих изотропное угловое распределение. Для  $\text{U}^{235}$ , деление которого вызвано практически полностью тепловыми нейтронами, угловая зависимость отсутствует как в воздухе, так

и на поверхности фантома, поскольку распределение осколков деления на тепловых нейтронах изотропно.

Для определения влияния хода с жесткостью на показания индивидуального дозиметра ДИНА его облучали нейтронами деления за защитой из воды, железа и железа с полиэтиленом. На реакторе ИБР ОИЯИ облучение дозиметров осуществляли за слоем воды толщиной 4 см, а на реакторе ИРТ-1000 — за борно-свинцовым фильтром [12], причем дозиметры размещались как в воздухе, так и на поверхности фантома. Результаты измерений приведены в табл. 2, здесь же представлены значения кермы нейтронов, полученные в тех же точках

Характеристики индивидуального дозиметра нейтронов ДИНА

Таблица 2

| Спектр нейтронов  | Расположение дозиметров      | Результаты измерений кермы, $\text{рад}$ |                            |                      | Цена трека, $\frac{\text{мрад}}{\text{трек}\cdot\text{мг}\text{Np}^{237}}$ | Максимальная ошибка по отношению к набору детекторов, % |        |
|---|------------------------------|--|----------------------------|----------------------|--|---|--------|
|   |                              | дозиметр ДИНА                            | набор пороговых детекторов | ионизационные камеры |  | эксперимент   | расчет |
| Спектр ИБР ОИЯИ за фильтром из воды (толщина 4 см)        | Воздух                       | 47,5                                     | 45,0                       | —                    | 2,13   | 5,2   | 6,0    |
|   | Передняя поверхность фантома | 49,5                                     | 48,3                       | —                    | 2,15   | 4,5   | 4,1    |
|   | Задняя поверхность           | 1,47                                     | 1,46                       | —                    | 2,36   | 0,5   | —1,5   |
| Нейтроны деления за защитой из воды                       | Воздух                       | 9,0                                      | 8,5                        | —                    | 2,13   | 5,4   | 6,6    |
|   | Передняя поверхность фантома | 9,6                                      | 9,2                        | 9,7                  | 2,18   | 4,4   | 5,3    |
|   | Задняя поверхность           | 1,41                                     | 1,46                       | —                    | 2,30   | —3,5  | —2,0   |
| Нейтроны деления за защитой из железа                     | Передняя поверхность фантома | 1,94                                     | 2,08                       | 2,0                  | 2,48   | —6,7  | —2,3   |
| Нейтроны деления за защитой из смеси железа и полиэтилена | Передняя поверхность фантома | 2,37                                     | 2,65                       | 2,58                 | 2,50   | —10   | —6,6   |
| ИРТ-1000, фильтр бор—свинец                               | Воздух                       | 28,2                                     | 26,6                       | 26,1                 | 2,12   | 6,0   | 7,0    |

спектрометрическим набором пороговых детекторов [11, 13], и значения кермы, полученные В. И. Цветковым и Е. Н. Черновым с помощью тканеэквивалентных и графитовых ионизационных камер [14]. Из табл. 2 следует, что результаты измерений кермы различными методами совпадают в пределах  $\pm 10\%$ . При оценке хода с жесткостью была рассчитана максимальная ошибка  $\eta$  измерения кермы по спектрам, полученным набором пороговых детекторов. Она совпадает с ошибкой измерения эквивалента кермы и определяется выражением

$$\eta = 1 - \frac{\int \delta(E) \varphi(E) dE}{\int \Delta(E) \varphi(E) dE} \quad (6)$$

Приведенные в табл. 2 погрешности согласуются с экспериментальными. В этой же таблице представлены значения цены трека индивидуального дозиметра ДИНА для разных спектров нейтронов. Среднее ее значение, равное  $2,3 \text{ мрад/трек} \cdot \text{мг Np}^{237}$ , имеет разброс  $\pm 8\%$  и соответствует расчетному значению  $2,2 \text{ мрад/трек} \cdot \text{мг Np}^{237}$  (см. рис. 2).

Авторы признательны Л. Б. Пикельнеру, Н. Н. Хотько, В. И. Цветкову, Е. Н. Чернову за полезные обсуждения и помощь при измерениях.

Поступила в Редакцию 23/II 1972 г.  
В окончательной редакции 29/V 1972 г.

## ЛИТЕРАТУРА

1. И. А. Бочвар и др. Handling of Radiation Accidents, Proc. Symp., Vienna, IAEA, 1969, p. 235.
2. Nuclear Accident Dosimetry Systems, Proc. IAEA Panel, Vienna, 1970.
3. Нормы радиационной безопасности (НРБ-69). М., Атомиздат, 1970.
4. Г. Е. Блохин и др. «Атомная энергия», **10**, 437 (1961).
5. В. Г. Золотухин и др. Тканевые дозы нейтронов в теле человека. М., Атомиздат, 1972.
6. Б. Прайс, К. Хартон, К. Спинни. Защита от ядерных излучений. М., Изд-во иностр. лит., 1959.
7. Т. В. Королева, С. Н. Крайтор. «Атомная энергия», **31**, 52 (1971).
8. Т. В. Королева, С. Н. Крайтор. В сб. «Метрология нейтронного излучения на реакторах и ускорителях». М., ВНИИФТРИ, 1971, стр. 74.
9. Г. М. Обатуров, Ю. К. Чумбаров. В сб. «Вопросы дозиметрии и защиты от излучений». Вып. 10. М., Атомиздат, 1969, стр. 155.
10. Ю. А. Егоров, В. И. Жарков, В. В. Постников. «Атомная энергия», **28**, 170 (1970).
11. К. К. Кошаева, С. Н. Крайтор, Л. Б. Пикельнер. «Атомная энергия», **32**, 68 (1972).
12. Ю. И. Брегадзе и др. «Атомная энергия», **12**, 537 (1962).
13. Т. В. Королева, К. К. Кошаева, С. Н. Крайтор. «Атомная энергия», **32**, 157 (1972).
14. В. Н. Храпачевский. В сб. «Биологическое действие быстрых нейтронов». Вып. 1. Киев, «Наукова думка», 1969, стр. 11.

### Уважаемые читатели!

Если Вы хотите приобрести отдельные номера журнала «Атомная энергия», извещайте нас об этом за 1,5–2 месяца до выхода интересующего Вас номера в свет (декабрьский номер заказывайте в октябре, январский — в ноябре и т. д.). Заявки шлите по адресу: 101876, Москва, Центр, ул. Кирова, 18, редакция журнала «Атомная энергия».