

2. С. М. Рывкин и др. «Докл. АН СССР», 165, 548 (1965).
3. S. M. Ruykin et al. IEEE Trans. Nucl. Sci., 15, 226 (1968).
4. С. М. Рывкин и др. «Физика и техника полупроводников», 4, 1303 (1970).
5. R. Baertsch, R. Hall. IEEE Trans. Nucl. Sci., 17, 235 (1970).
6. M. Nathan. Phys. Rev., 130, 2201 (1963).
7. А. Х. Хусаинов. Диссертация. Л., 1970.

## К вопросу о нормировании нейтронного излучения

В. Г. ЗОЛОТУХИН, И. Б. КЕИРИМ-МАРКУС, О. А. КОЧЕТКОВ, В. И. ЦВЕТКОВ,  
О. . ЧЕ РАШИНА

УДК 539.12.08

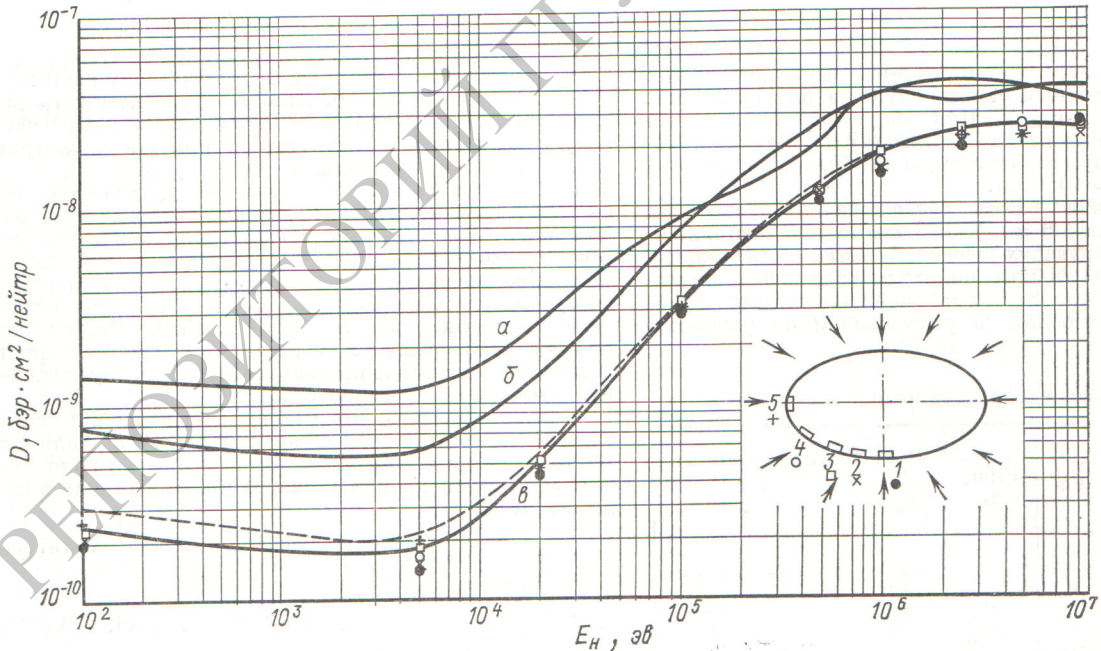
Рекомендации МКРЗ [1] и отечественные нормативы [2] предельно допустимых потоков (ПДП) нейтронов основаны на расчетах максимальной эквивалентной дозы, создаваемой моноэнергетическими нейтронами в теле человека. Такие расчеты выполнены Снайдером и Нойфельдом [3] для модели тела в виде бесконечной пластины из тканеэквивалентного вещества толщиной 30 см, на которую нормально падает поток нейтронов. Очевидно, что принятая модель весьма схематично отражает реальные условия облучения человека. Нами методом Монте-Карло приведены расчеты [4] глубинных доз моноэнергетических нейтронов, падающих по восьми различным направлениям на бесконечный эллиптический цилиндр с осями 24 и 36 см из тканеэквивалентного вещества.

На рисунке приведена энергетическая зависимость максимальной удельной эквивалентной дозы по объему тела [3] на поверхности тела [4]. Нейтроны падают перпендикулярно (вдоль малой оси эллиптического сечения тора). Из сравнения кривых следует, что для промежуточных нейтронов данные работы [3] оказы-

ваются завышенными до 80% (при  $E_n = 5 \text{ кэВ}$ ), что соответствует разнице эквивалентных доз на поверхности тела и в максимуме, который для указанных  $E_n$  располагается в глубине тела.

Человек практически всегда подвергается воздействию не моноэнергетических нейтронов, а нейтронов с широким энергетическим спектром [5]. В этом случае доза нейтронов максимальна на поверхности тела и уменьшается с глубиной, тогда как для моноэнергетических нейтронов максимум может находиться в глубине тела и на разной глубине для нейтронов разных энергий. Поэтому в реальных условиях нужно контролировать максимальную эквивалентную дозу на поверхности тела, а не ориентироваться на кривую Снайдера, которая описывает энергетическую зависимость максимальной эквивалентной дозы по объему тела для моноэнергетических нейтронов.

Кроме того, в реальных условиях профессиональной деятельности человек подвергается не мононаправленному, а всестороннему облучению нейтронами. Даже если нейтронное излучение, действующее на человека



Удельная эквивалентная доза  $D$  моноэнергетических нейтронов:

$\alpha$  — максимальная в теле человека при нормальном падении [3];  $\delta$  — на поверхности тела при нормальном падении [4];  $\beta$  — максимальная на поверхности тела при изотропном облучении; точки — значения на соответствующих участках поверхности тела; пунктир — рекомендуемые значения.

Плотность потока моноэнергетических нейтронов ( $\text{нейтр} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{сек}^{-1}$ ), создающая максимальную мощность эквивалентной дозы 0,1 бэр/неделя

Критерий облучения	Энергия нейтронов										Литература
	Тепловые	100 кэв	5 кэв	20 кэв	100 кэв	500 кэв	1 Мэв	2,5 Мэв	5 Мэв	10 Мэв	
Максимум по телу при нормальном падении излучения «спереди»	730	550	670	280	80	37	19	23	19	17	[1, 3]
То же	694	771	926	434	109	35	27	20	17	14	[7]
Максимум по поверхности тела для мононаправленного излучения	—	1000	1290	520	95	30	20	18	18	17	Данные авторов
Максимум по поверхности для излучения, изотропного в горизонтальной плоскости	—	2250	2880	1320	220	65	43	31	28	28	То же
Максимум по поверхности для излучения, изотропного в пространстве	—	3100	4100	1470	230	65	42	32	30	30	» »
Рекомендуемые значения	4000	2500	3500	1400	230	65	40	30	30	30	» »
Рекомендуемый коэффициент изотропности	6,0	5,0	6,1	5,0	2,9	2,2	2,2	1,5	1,6	1,7	» »

не изотропно, при перемещении человека в процессе работы угловое распределение излучения относительно его тела становится симметричным по отношению к вертикали.

Пользуясь собственными данными [4], мы рассчитали удельную эквивалентную дозу моноэнергетических нейтронов на поверхности тела человека в точках, указанных на рисунке, для изотропного распределения направлений нейтронов в пространстве. Полученные результаты представлены на рисунке в виде точек; кривая  $\delta$  является огибающей по максимальным значениям.

Как видно из рисунка, дозы по периметру тела неодинаковы. При малых  $E_n$  максимальные значения эквивалентной дозы на поверхности смещены от середины тела к бокам. Однако различие в поверхностных дозах не превышает 25%. Дозы на поверхности тела при изотропном облучении ниже в четыре раза, чем при нормальном падении излучения, а по сравнению с данными работы [3] и регламентированными значениями работ [1, 2] — в семь раз. Это объясняется тем, что в теле человека нейтроны всех энергий, кроме самых больших, поглощаются практически полностью. Соответственно на поверхность тела действует излучение примерно из половины полного телесного угла. (Для учета этого обстоятельства мы рекомендовали [5] вводить коэффициент изотропности нейтронного излучения  $K$ , равный в большинстве случаев двум.) Кроме того, при наклонном падении нейтронов дозы оказываются значительно меньше, чем при нормальном, из-за возрастания альбедо нейтронов [6]. Вследствие этого  $K$  значительно больше двух при  $E_n < 500$  кэв.

В таблице приведены значения ПДП нейтронов, соответствующие 0,1 бэр за 36-часовую рабочую неделю, рассчитанные по данным работ [3], [7] и [4] для случая нормального падения излучения и, по нашим данным [4], для излучения, изотропного в горизонтальной плоскости и в пространстве. Из таблицы видно, что принятые в настоящее время ПДП нейтронов установлены с большим запасом. Поэтому следует либо пересмотреть

ПДП нейтронов, увеличив их с учетом полученных данных, либо при их практическом применении учитывать коэффициент изотропности излучения  $K$ , который можно считать равным 2,5 и уточнять для конкретных действующих спектров нейтронов и углового распределения излучения, падающего на тело человека.

Реальные условия облучения человека при профессиональной деятельности в поле нейтронов за защитой в большинстве случаев являются промежуточными между указанными в строках 4 и 5 таблицы. Излучение обычно не вполне изотропно в пространстве. В то же время оно не все сосредоточено в горизонтальных направлениях, а падает также наклонно на тело человека, что приводит к уменьшению создаваемых доз. На основе этих соображений в строке 6 таблицы приведены рекомендуемые величины ПДП моноэнергетических нейтронов, а в строке 7 — соответствующие им значения коэффициента изотропности  $K$ .

На коэффициент  $K$  нужно умножать значения ПДП нейтронов, если они вычислены для нормально падающего излучения (строка 1 таблицы), и делить значения эквивалентной дозы нейтронов и их потоков, полученные с помощью дозиметрических приборов с изотропной чувствительностью детекторов при измерениях «в воздухе» (в отсутствие экранировки телом человека).

Поступило в Редакцию 3/VI 1971 г.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Радиационная защита. (Рекомендации МКРЗ, 6-я публикация.) Перев. с англ. М., Атомиздат, 1967.
2. Нормы радиационной безопасности. М., Атомиздат, 1969.
3. Protection Against Neutron Radiation up to 30 Mev. Handbook 63 NBS USA. Washington, 1957.
4. В. Г. Золотухин и др. Тканевые дозы нейтронов в теле человека. М., Атомиздат, 1972.
5. И. Б. Кеирим-Маркус, О. А. Кочетков. В сб. «Вопросы дозиметрии и защиты от излучений». Вып. 9. Под ред. В. И. Иванова. М., Атомиздат, 1969, стр. 15.