



ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ИНСТИТУТ ФИЗИКИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

ИФВЭ 96-78

ОРИ

Д.В.Горбатков, В.П.Крючков, О.В.Суманев

**ДОЗОВЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ НЕЙТРОНОВ
С ЭНЕРГИЕЙ ОТ ТЕПЛОВЫХ ДО 20 МэВ
В ТКАНЕЭКВИВАЛЕНТНЫХ ФАНТОМАХ**

Протвино 1996

Аннотация

Горбатов Д.В. и др. Дозовые характеристики нейтронов с энергией от тепловых до 20 МэВ в тканеэквивалентных фантомах: Препринт ИФВЭ 96-78. – Протвино, 1996. – 9 с., 3 рис., 9 табл., библиогр.: 6.

С помощью программного комплекса РОЗ6.4 – USCONS проведено детальное исследование дозовых распределений нейтронов в тканеэквивалентных фантомах. Результаты расчетов приведены в виде таблиц, которые могут быть использованы в качестве справочного материала.

Abstract

Gorbatkov D.V. et.al. Dose Characteristics of Neutrons with Energies from Thermal to 20 MeV in Tissue Phantoms: IHEP Preprint 96-78. – Protvino, 1996. – p. 9, figs. 3, tables 9, refs.: 6.

With the help of the program complex ROZ6.4 – USCONS the dose distributions of neutrons in tissue phantoms have been investigated. The results are presented in Tables and may be used as reference information.

Введение

Нейтронное излучение является одним из главных факторов радиационной опасности на ядерно-физических установках, используемых в научных исследованиях, медицине и ядерной энергетике. Именно с этим обстоятельством связан большой интерес к дозовым характеристикам нейтронов.

Вопросу исследования радиационных эффектов, вызываемых нейтронами, а также систематизации накопленных данных посвящено достаточно большое количество работ (например, [1-3]). Однако практическая потребность в информации о дозовых характеристиках нейтронов и, в первую очередь, о распределениях поглощенной и эквивалентной доз нейтронов в тканеэквивалентных фантомах часто превышает объем данных, содержащийся в этих публикациях.

Кроме того, большинство существующих сегодня данных опираются на фундаментальные расчеты, выполненные методом Монте-Карло еще в 50-е годы Снайдером [1] для плоского фантома, и на детальные исследования дозовых распределений в эллиптических фантомах, проведенных в начале 70-х годов Золотухиным и др. [2]. Вполне естественно, что за прошедшие годы произошли серьезные изменения как в оценке качества излучения, так и в самом подходе к расчету дозы. Появились новые, более совершенные алгоритмы и программы расчета переноса нейтронов и фотонов, значительно уточнено и константное обеспечение.

Таким образом, использование современного программного аппарата позволяет, на наш взгляд, получить систематические, значительно более точные и подробные дозовые характеристики нейтронов в фантомах, адекватные современному состоянию знаний как о нейтрон-ядерных взаимодействиях, так и о биологическом действии нейтронов.

1. Метод расчета

Расчет поглощенной и эквивалентной доз ($D(\vec{r})$ и $H(\vec{r})$) в данной работе проводился в керма-приближении:

$$D(\vec{r}) = \int_E F_i(E, \vec{r}) K_i(E) dE; \quad (1)$$

$$H(\vec{r}) = \int_E F_i(E, \vec{r}) K_i(E) Q_i(E) dE, \quad (2)$$

где $F_i(E, \vec{r})$ — флюенс частиц сорта i (нейтронов и фотонов); $K_i(E)$ — керма-фактор частиц сорта i ; $Q_i(E)$ — коэффициент качества частиц сорта i .

Использование керма-приближения (1)–(2) для расчета дозы нейтронов представляется оправданным, поскольку условие равновесия заряженных частиц, образующихся в упругих и неупругих нейтрон-ядерных взаимодействиях и полностью определяющих дозу нейтронов, выполняется с высокой точностью. С другой стороны, именно метод керма-приближения позволяет получить результат с максимальной высокой точностью, так как в этом случае, во-первых, используются табличные значения керма-факторов, учитывающие все процессы, приводящие к выделению энергии в акте взаимодействия излучения с веществом, а во-вторых, исключается статистическая составляющая погрешности, характерная для непосредственного расчета дозы методом Монте-Карло.

Расчет поля нейтронов и вторичных фотонов в веществе фантомов в данной работе проводился с помощью программы РОЗБ.4 [4], реализующей метод дискретных ординат для решения многогруппового уравнения переноса нейтронов и фотонов. Методическая погрешность реализованного алгоритма определяется точностью численных схем и используемых квадратур и составляет не более 1%. Для константного обеспечения расчетов переноса нейтронов и фотонов использовалась система подготовки групповых констант USCONS [5]. Данные по тканевым керма-факторам и коэффициентам качества нейтронов и фотонов, оцениваемые нами как наиболее точные, заимствовались из работы [6].

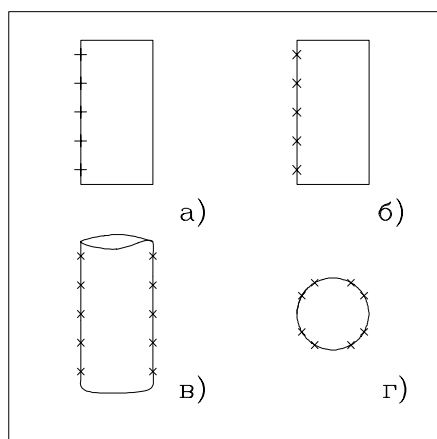


Рис. 1. Геометрия расчетов.

Суммарная погрешность расчетов поглощенной дозы состоит из погрешности расчетных пространственно-энергетических распределений нейтронов и фотонов, полностью определяемой константной составляющей ($\sim 10\%$), и погрешности используемых литературных значений керма-факторов ($\sim 10\%$), и оценивается величиной порядка 15%. Погрешность расчетов эквивалентной дозы целиком определяется погрешностью используемых литературных коэффициентов качества и оценивается величиной $\sim 30\text{--}50\%$.

Расчеты проводили для фантомов четырех стандартных геометрий (рис.1 а-г):

- а) — бесконечная пластина толщиной 30 см, при нормальном облучении;
- б) — бесконечная пластина толщиной 30 см, при изотропном облучении;
- в) — бесконечный цилиндр диаметром 30 см;
- г) — сфера диаметром 30 см.

Источник нейтронов задавался моноэнергетическим, изотропным, равномерно распределенным по поверхности фантома. Для бесконечной пластины также проводились расчеты для нормального падения нейтронов.

Вещество фантома принималось эквивалентным мягкой биологической ткани со следующим химическим составом: кислород 76,2%; углерод 11,1%; азот 2,6%; водород 10,1% (по массе). Плотность вещества фантома 1 г/см^3 .

2. Результаты расчета

На рис.2 дано сравнение результатов наших расчетов, выполненных для условия нормального падения нейтронов на бесконечную пластину, с данными работ [1] и [3]. Как видно из рисунка, наши расчетные данные хорошо согласуются с данными указанных авторов для нейтронов энергией 20 кэВ; 1; 14 МэВ. Для нейтронов низких энергий (1 кэВ и тепловых) согласие несколько хуже, что, по-видимому, связано в основном с различиями в используемых константных системах. На рис.3 представлено сравнение наших данных с литературными по эквивалентной дозе. Отличие наших данных для эквивалентной дозы от литературных заметнее, что может быть отнесено в основном на счет различий в коэффициентах качества.

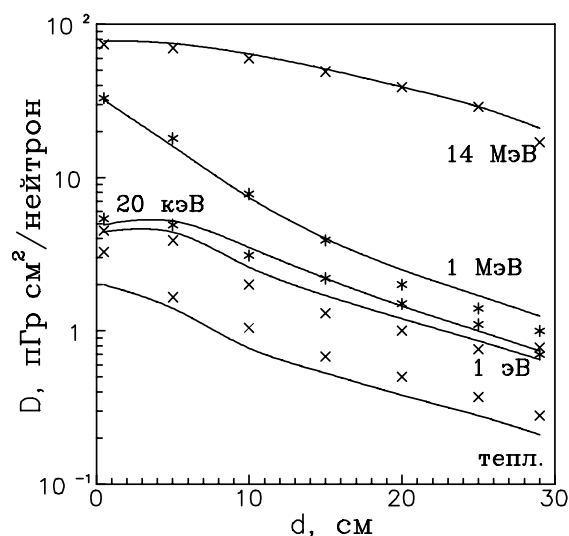


Рис. 2. Глубинные распределения поглощенной дозы нейтронов в плоском полубесконечном фантоме при нормальном облучении: — — наш расчет; * — данные работы [1]; × — данные работы [3].

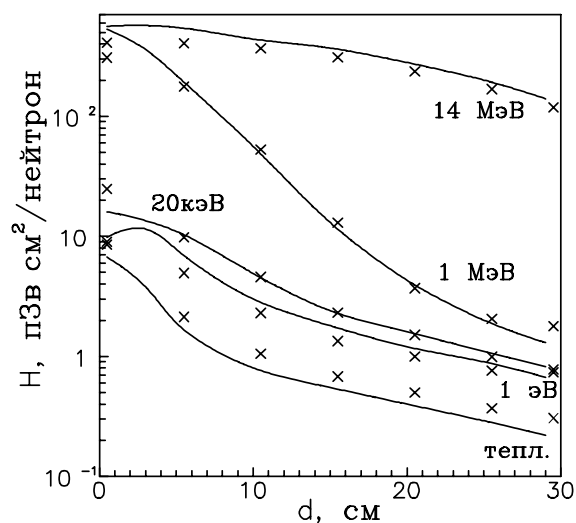


Рис. 3. Глубинные распределения эквивалентной дозы нейтронов в плоском полубесконечном фантоме при нормальном облучении: — — наш расчет; × — данные работы [3].

Пространственные распределения поглощенной и эквивалентной доз в зависимости от энергии падающих нейтронов для плоского фантома представлены в табл. 1–4, для сферического — в табл. 5–6, для цилиндрического — в табл. 7–8.

В табл. 9 приведена энергетическая зависимость максимальной эквивалентной H_{max} и амбиентной $H^*(10)$ дозы для указанных фантомов.

Таблица 1. Глубинные распределения поглощенной дозы нейтронов в плоском полубесконечном фантоме при нормальном облучении, пГр·см².

$E_0, \text{МэВ}$	$d, \text{см}$										
	0.0	0.5	1.0	3.0	5.0	10.0	15.0	20.0	25.0	29.0	30.0
$1.7 \cdot 10^1$	78.2	80.6	81.4	82.8	81.3	72.2	60.6	48.8	37.6	28.4	25.5
$1.4 \cdot 10^1$	75.9	77.9	78.3	78.1	75.2	63.7	51.0	39.2	28.7	20.7	18.3
$1.0 \cdot 10^1$	68.8	70.4	70.6	69.8	66.6	55.0	42.7	31.7	22.5	15.7	13.7
$8.0 \cdot 10^0$	64.5	66.1	66.2	64.8	60.9	47.9	35.3	24.9	16.7	11.1	9.5
$7.0 \cdot 10^0$	61.1	62.5	62.5	61.0	57.2	44.6	32.5	22.6	14.9	9.7	8.3
$6.0 \cdot 10^0$	59.0	60.5	60.5	59.1	55.2	42.2	39.9	20.2	12.9	8.2	7.0
$5.0 \cdot 10^0$	54.4	55.7	55.6	53.4	48.9	35.2	23.3	15.0	8.9	5.4	4.6
$4.0 \cdot 10^0$	54.9	56.2	55.6	51.2	44.7	28.3	16.6	9.5	5.4	3.2	2.7
$3.0 \cdot 10^0$	47.6	48.5	47.9	44.1	38.4	24.3	14.4	8.4	4.8	3.0	2.5
$2.0 \cdot 10^0$	39.1	40.2	39.7	35.9	30.2	17.4	9.6	5.5	3.2	2.1	1.8
$1.5 \cdot 10^0$	35.0	35.9	35.3	31.1	25.2	13.4	7.2	4.1	2.5	1.7	1.5
$1.0 \cdot 10^0$	32.9	32.4	30.7	23.1	16.4	7.4	4.0	2.5	1.7	1.2	1.1
$5.0 \cdot 10^{-1}$	23.8	24.2	23.0	17.7	12.9	6.5	3.8	2.4	1.7	1.2	1.1
$2.0 \cdot 10^{-1}$	12.5	12.1	11.1	8.3	6.6	4.3	2.7	1.8	1.3	0.94	0.86
$1.0 \cdot 10^{-1}$	9.1	8.5	8.0	6.5	5.7	3.9	2.4	1.6	1.2	0.87	0.79
$5.0 \cdot 10^{-2}$	6.6	6.3	6.1	5.6	5.3	3.7	2.3	1.5	1.1	0.82	0.74
$2.0 \cdot 10^{-2}$	4.9	4.9	5.0	5.3	5.2	3.5	2.2	1.5	1.1	0.79	0.72
$1.0 \cdot 10^{-2}$	4.1	4.4	4.6	5.2	5.1	3.5	2.2	1.5	1.1	0.78	0.71
$1.0 \cdot 10^{-3}$	3.7	4.1	4.4	5.3	5.2	3.4	2.1	1.5	1.0	0.78	0.71
$1.0 \cdot 10^{-4}$	3.8	4.3	4.7	5.5	5.2	3.3	2.1	1.4	1.0	0.77	0.70
$1.0 \cdot 10^{-5}$	4.0	4.6	4.9	5.7	5.1	3.1	2.0	1.4	1.0	0.75	0.68
$1.0 \cdot 10^{-6}$	3.9	4.4	4.7	5.1	4.4	2.6	1.7	1.2	0.86	0.65	0.59
$4.0 \cdot 10^{-7}$	3.5	4.0	4.2	4.4	3.7	2.2	1.4	1.0	0.73	0.55	0.50
Тепл.	1.9	2.1	2.1	1.8	1.4	0.77	0.53	0.38	0.28	0.21	0.19

Таблица 2. Глубинные распределения эквивалентной дозы нейтронов в плоском полубесконечном фантоме при нормальном облучении, пЗв·см².

$E_0, \text{МэВ}$	$d, \text{см}$										
	0.0	0.5	1.0	3.0	5.0	10.0	15.0	20.0	25.0	29.0	30.0
1.7 10 ¹	571.2	590.6	599.8	608.7	603.1	530.0	444.6	352.0	256.1	204.3	174.0
1.4 10 ¹	538.3	563.6	566.3	573.0	549.8	473.4	372.2	280.8	201.4	139.0	122.2
1.0 10 ¹	452.5	467.5	480.9	501.4	482.2	403.8	310.3	227.5	157.9	114.1	90.6
8.0 10 ⁰	419.1	445.7	459.6	469.7	457.0	369.0	270.9	189.2	124.4	79.5	65.4
7.0 10 ⁰	405.2	440.6	454.3	464.4	452.2	365.0	257.7	177.7	121.9	72.6	59.3
6.0 10 ⁰	417.5	454.6	459.6	470.2	456.7	363.6	252.8	162.5	101.3	62.5	50.3
5.0 10 ⁰	428.1	464.8	467.9	482.5	451.7	325.0	211.3	120.1	70.1	39.8	31.5
4.0 10 ⁰	489.5	525.5	533.0	520.6	462.8	275.6	154.9	77.5	36.6	19.0	13.8
3.0 10 ⁰	468.1	500.1	497.2	487.0	424.2	252.5	132.1	66.2	31.5	16.5	12.0
2.0 10 ⁰	484.1	518.9	506.9	473.8	384.8	194.6	81.7	32.7	13.4	6.2	4.7
1.5 10 ⁰	476.8	498.6	496.4	436.9	340.0	144.1	49.4	17.1	6.5	3.1	2.4
1.0 10 ⁰	538.3	525.9	499.8	361.5	216.7	55.4	12.9	4.3	2.0	1.3	1.1
5.0 10 ⁻¹	418.3	423.4	399.6	269.6	148.4	33.0	8.1	3.1	1.8	1.3	1.1
2.0 10 ⁻¹	217.9	178.4	160.1	69.8	30.6	7.2	3.2	1.9	1.3	0.97	0.88
1.0 10 ⁻¹	109.1	91.3	76.1	31.6	16.1	5.8	2.8	1.7	1.2	0.90	0.81
5.0 10 ⁻²	47.5	38.5	31.5	17.3	12.3	5.2	2.6	1.6	1.1	0.85	0.76
2.0 10 ⁻²	18.8	16.4	15.2	13.1	10.6	4.9	2.4	1.6	1.1	0.82	0.74
1.0 10 ⁻²	9.3	9.8	9.9	11.9	9.9	4.7	2.4	1.6	1.1	0.81	0.73
1.0 10 ⁻³	5.0	7.3	8.8	11.6	9.6	4.4	2.3	1.5	1.1	0.80	0.73
1.0 10 ⁻⁴	5.3	8.1	9.8	12.7	10.0	4.1	2.2	1.5	1.1	0.79	0.72
1.0 10 ⁻⁵	6.0	9.3	10.8	12.6	9.7	3.8	2.1	1.4	1.0	0.77	0.70
1.0 10 ⁻⁶	6.7	9.8	12.3	11.7	7.8	3.0	1.8	1.2	0.90	0.67	0.61
4.0 10 ⁻⁷	6.9	10.1	11.1	9.9	6.2	2.5	1.5	1.0	0.76	0.57	0.51
Тепл.	6.2	6.7	6.5	3.8	1.9	0.80	0.55	0.40	0.29	0.22	0.20

Таблица 3. Глубинные распределения поглощенной дозы нейтронов в плоском полубесконечном фантоме при изотропном облучении, пГр·см².

$E_0, \text{МэВ}$	$d, \text{см}$										
	0.0	0.5	1.0	3.0	5.0	10.0	15.0	20.0	25.0	29.0	30.0
1.7 10 ¹	79.2	76.6	72.4	59.8	52.3	37.1	26.8	19.9	14.2	9.8	8.6
1.4 10 ¹	75.1	71.3	67.1	53.7	46.0	31.3	22.1	15.2	10.0	6.8	5.9
1.0 10 ¹	68.4	64.1	60.3	48.1	40.1	26.1	18.4	12.0	7.6	5.0	4.3
8.0 10 ⁰	63.1	58.8	54.6	42.3	35.4	22.0	13.9	8.7	5.4	3.4	2.9
7.0 10 ⁰	60.5	56.0	52.3	40.0	32.1	20.4	12.1	7.7	4.7	2.9	2.5
6.0 10 ⁰	58.5	54.0	50.1	37.8	31.0	17.9	11.0	6.7	4.0	2.4	2.0
5.0 10 ⁰	52.9	49.1	45.0	33.1	25.5	14.1	8.1	4.7	2.7	1.6	1.4
4.0 10 ⁰	53.1	46.7	41.7	29.1	21.2	10.2	5.5	3.0	1.7	1.0	0.89
3.0 10 ⁰	46.4	41.2	37.2	25.2	17.8	9.0	4.7	2.6	1.5	0.96	0.83
2.0 10 ⁰	37.9	33.1	29.0	19.1	13.1	6.1	3.1	1.8	1.1	0.74	0.65
1.5 10 ⁰	33.1	29.0	24.6	14.7	10.2	4.6	2.4	1.4	0.91	0.64	0.57
1.0 10 ⁰	31.2	24.3	20.2	9.9	6.1	2.6	1.5	0.94	0.64	0.47	0.42
5.0 10 ⁻¹	21.7	16.9	13.9	7.4	4.7	2.4	1.4	0.92	0.64	0.47	0.42
2.0 10 ⁻¹	11.0	7.6	6.1	3.2	2.6	1.7	1.1	0.72	0.51	0.38	0.34
1.0 10 ⁻¹	7.3	5.1	4.1	2.6	2.3	1.6	0.98	0.67	0.47	0.35	0.32
5.0 10 ⁻²	4.8	3.5	3.0	2.3	2.2	1.5	0.94	0.64	0.46	0.34	0.31
2.0 10 ⁻²	3.1	2.5	2.3	2.2	2.2	1.5	0.91	0.63	0.45	0.33	0.30
1.0 10 ⁻²	2.2	2.1	2.1	2.2	2.2	1.4	0.90	0.62	0.44	0.33	0.30
1.0 10 ⁻³	1.7	1.8	2.0	2.3	2.2	1.4	0.88	0.61	0.44	0.33	0.30
1.0 10 ⁻⁴	1.7	1.9	2.1	2.4	2.2	1.4	0.86	0.60	0.43	0.33	0.30
1.0 10 ⁻⁵	1.8	2.1	2.2	2.4	2.1	1.3	0.82	0.58	0.42	0.31	0.29
1.0 10 ⁻⁶	1.8	2.0	2.1	2.2	1.8	1.1	0.70	0.50	0.36	0.27	0.25
4.0 10 ⁻⁷	1.7	1.9	2.0	1.9	1.6	0.92	0.61	0.43	0.32	0.24	0.22
Тепл.	1.1	1.1	1.1	0.89	0.67	0.38	0.26	0.19	0.14	0.11	0.1

Таблица 4. Глубинные распределения эквивалентной дозы нейтронов в плоском полубесконечном фантоме при изотропном облучении, пЗв·см².

$E_0, \text{МэВ}$	$d, \text{см}$										
	0.0	0.5	1.0	3.0	5.0	10.0	15.0	20.0	25.0	29.0	30.0
1.7 10 ¹	582.4	560.1	531.3	441.1	380.1	270.3	202.7	140.1	95.9	66.0	55.9
1.4 10 ¹	553.6	519.7	492.4	400.1	339.9	228.5	159.8	102.4	68.1	43.8	36.7
1.0 10 ¹	461.9	441.2	418.3	343.9	290.8	190.1	130.1	82.1	52.0	32.1	26.1
8.0 10 ⁰	419.8	410.2	383.1	319.2	268.7	171.2	109.6	63.7	38.1	22.1	18.0
7.0 10 ⁰	411.1	400.3	378.9	309.2	260.2	160.3	100.1	60.1	34.8	20.2	16.1
6.0 10 ⁰	423.1	413.1	380.1	311.1	260.2	159.7	92.4	52.7	29.3	16.7	12.8
5.0 10 ⁰	430.3	412.7	379.2	303.3	238.8	130.2	71.2	37.0	19.0	9.7	7.5
4.0 10 ⁰	490.7	450.2	410.3	304.1	223.2	101.1	46.8	21.1	9.4	4.5	3.4
3.0 10 ⁰	482.1	441.4	400.7	282.1	210.1	92.3	40.2	17.2	7.5	3.6	2.8
2.0 10 ⁰	492.0	429.8	391.2	248.9	168.8	60.9	21.9	7.8	3.0	1.4	1.1
1.5 10 ⁰	491.9	417.2	372.8	220.1	141.2	41.2	12.0	4.0	1.6	0.85	0.71
1.0 10 ⁰	527.1	421.4	345.1	159.0	76.8	14.8	3.6	1.3	0.72	0.49	0.44
5.0 10 ⁻¹	433.1	330.8	261.1	111.3	51.0	8.8	2.4	1.1	0.68	0.49	0.44
2.0 10 ⁻¹	210.5	131.1	96.0	22.8	9.0	2.6	1.2	0.76	0.53	0.39	0.35
1.0 10 ⁻¹	111.1	65.1	45.3	10.1	5.5	2.2	1.1	0.70	0.49	0.36	0.33
5.0 10 ⁻²	47.2	26.1	17.1	6.2	4.7	2.1	1.0	0.67	0.48	0.35	0.32
2.0 10 ⁻²	16.8	10.0	8.1	5.2	4.5	2.0	1.0	0.66	0.47	0.34	0.31
1.0 10 ⁻²	7.0	5.4	5.1	5.1	4.4	1.9	0.99	0.65	0.46	0.34	0.31
1.0 10 ⁻³	2.5	3.4	4.1	5.3	4.4	1.8	0.96	0.64	0.46	0.34	0.31
1.0 10 ⁻⁴	2.6	3.9	4.6	5.6	4.3	1.7	0.93	0.63	0.45	0.34	0.30
1.0 10 ⁻⁵	3.1	4.6	5.3	5.6	3.9	1.5	0.87	0.60	0.44	0.32	0.29
1.0 10 ⁻⁶	3.9	5.3	5.7	4.9	3.1	1.2	0.74	0.52	0.38	0.28	0.25
4.0 10 ⁻⁷	4.3	5.4	5.6	4.1	2.5	1.1	0.64	0.45	0.33	0.25	0.22
Тепл.	4.9	4.2	3.5	1.7	0.89	0.39	0.27	0.20	0.15	0.11	0.10

Таблица 5. Глубинные распределения поглощенной дозы нейтронов в сферическом фантоме при изотропном облучении, пГр·см².

$E_0, \text{МэВ}$	$r, \text{см}$							
	0.0	3.0	5.0	10.0	13.0	14.0	14.5	15.0
1.7 10 ¹	96.8	96.9	97.0	99.9	109.8	110.5	111.1	112.0
1.4 10 ¹	83.0	83.7	84.1	90.2	95.9	101.1	103.2	105.1
1.0 10 ¹	70.9	71.4	72.1	78.3	85.4	88.0	91.1	94.3
8.0 10 ⁰	58.8	59.4	60.7	67.0	75.1	78.0	81.1	84.4
7.0 10 ⁰	54.7	54.9	57.0	63.1	71.2	74.4	76.9	79.7
6.0 10 ⁰	51.0	51.6	51.9	59.2	67.3	70.0	73.1	76.3
5.0 10 ⁰	40.1	40.3	40.8	49.0	57.2	61.1	63.9	68.1
4.0 10 ⁰	27.7	29.1	30.1	39.2	48.7	54.0	59.1	64.2
3.0 10 ⁰	24.1	24.4	26.2	33.1	41.9	47.1	51.1	56.4
2.0 10 ⁰	14.0	16.3	16.9	23.0	32.2	36.2	40.2	44.1
1.5 10 ⁰	10.7	11.2	11.8	18.1	26.3	30.1	33.7	38.3
1.0 10 ⁰	5.2	5.4	5.9	9.5	17.1	21.7	27.1	33.4
5.0 10 ⁻¹	4.5	4.7	5.0	7.2	11.9	16.0	19.2	23.8
2.0 10 ⁻¹	3.0	3.1	3.2	3.6	4.6	6.1	7.9	11.0
1.0 10 ⁻¹	2.7	2.8	2.9	3.1	3.3	4.0	5.2	7.3
5.0 10 ⁻²	2.5	2.6	2.7	3.0	2.7	2.9	3.5	4.7
2.0 10 ⁻²	2.4	2.5	2.6	2.9	2.4	2.3	2.4	2.9
1.0 10 ⁻²	2.4	2.5	2.6	2.9	2.4	2.1	2.0	2.1
1.0 10 ⁻³	2.3	2.3	2.5	2.9	2.5	2.0	1.8	1.5
1.0 10 ⁻⁴	2.2	2.2	2.4	2.9	2.7	2.2	1.9	1.6
1.0 10 ⁻⁵	2.0	2.1	2.2	2.8	2.8	2.4	2.1	1.7
1.0 10 ⁻⁶	1.6	1.7	1.8	2.3	2.6	2.3	2.1	1.7
4.0 10 ⁻⁷	1.4	1.4	1.5	1.9	2.2	2.1	1.9	1.6
Тепл.	0.79	0.81	0.85	1.1	1.3	1.4	1.3	1.2

Таблица 6. Глубинные распределения эквивалентной дозы нейтронов в сферическом фантоме при изотропном облучении, пЗв·см².

$E_0, \text{МэВ}$	$r, \text{см}$							
	0.0	3.0	5.0	10.0	13.0	14.0	14.5	15.0
1.7 10 ¹	742.1	742.6	743.4	779.8	812.2	833.1	843.1	852.3
1.4 10 ¹	641.7	642.2	643.1	681.1	722.3	741.1	762.4	771.1
1.0 10 ¹	553.0	553.7	559.8	592.6	616.3	630.2	641.2	650.8
8.0 10 ⁰	481.4	490.0	491.4	531.5	552.1	568.7	574.9	579.4
7.0 10 ⁰	470.6	481.1	482.4	522.1	547.6	564.1	570.1	570.6
6.0 10 ⁰	462.1	463.0	470.2	520.4	545.3	561.6	567.4	567.4
5.0 10 ⁰	401.1	402.4	421.1	481.5	529.2	552.5	560.1	571.9
4.0 10 ⁰	312.4	313.1	329.7	420.1	521.0	550.2	581.1	603.2
3.0 10 ⁰	269.4	280.1	301.7	401.6	490.2	528.5	559.9	590.1
2.0 10 ⁰	181.5	182.5	202.0	318.7	443.1	501.1	542.6	581.6
1.5 10 ⁰	111.1	120.1	141.3	250.1	393.1	461.4	512.9	571.1
1.0 10 ⁰	33.2	36.8	48.1	131.0	292.1	393.2	471.3	580.7
5.0 10 ⁻¹	17.6	20.1	27.3	84.9	211.0	301.1	371.0	468.3
2.0 10 ⁻¹	4.8	5.2	6.1	14.2	51.8	95.8	142.8	219.7
1.0 10 ⁻¹	4.0	4.3	5.0	8.4	22.1	42.4	68.0	118.9
5.0 10 ⁻²	3.6	3.9	4.5	6.9	10.2	16.9	27.2	48.1
2.0 10 ⁻²	3.4	3.7	4.2	6.5	6.7	7.8	11.0	16.8
1.0 10 ⁻²	3.2	3.5	4.1	6.4	6.0	5.3	5.6	7.0
1.0 10 ⁻³	2.9	3.2	3.7	6.3	6.2	4.6	3.6	2.3
1.0 10 ⁻⁴	2.7	2.9	3.3	6.1	6.8	5.3	4.1	2.4
1.0 10 ⁻⁵	2.4	2.5	2.9	5.5	7.3	6.2	4.9	3.0
1.0 10 ⁻⁶	1.9	2.0	2.2	4.2	6.8	6.7	5.8	3.9
4.0 10 ⁻⁷	1.5	1.6	1.8	3.3	5.8	6.4	5.9	4.3
Тепл.	0.89	0.93	1.0	1.8	3.3	4.1	4.6	5.2

Таблица 7. Глубинные распределения поглощенной дозы нейтронов в цилиндрическом бесконечном фантоме при изотропном облучении, пГр·см².

$E_0, \text{МэВ}$	$r, \text{см}$							
	0.0	3.0	5.0	10.0	13.0	14.0	14.5	15.0
1.7 10 ¹	82.3	82.4	82.9	89.6	96.2	98.8	100.1	104.3
1.4 10 ¹	68.0	68.2	70.1	77.3	86.1	89.8	92.6	96.2
1.0 10 ¹	57.3	57.8	59.2	66.2	75.4	79.1	81.9	84.8
8.0 10 ⁰	46.1	47.4	48.3	57.2	66.1	69.8	73.4	77.1
7.0 10 ⁰	41.9	43.4	44.7	53.3	62.5	65.8	69.1	73.1
6.0 10 ⁰	38.1	39.2	41.2	49.4	58.5	62.0	66.5	69.4
5.0 10 ⁰	29.2	30.1	31.8	40.4	49.9	54.1	58.5	62.2
4.0 10 ⁰	20.3	20.8	22.1	31.2	43.1	49.4	52.7	59.1
3.0 10 ⁰	16.7	18.1	19.1	26.9	37.4	42.2	47.2	51.9
2.0 10 ⁰	11.2	11.6	12.4	18.8	27.9	33.1	37.5	41.1
1.5 10 ⁰	7.7	8.2	9.1	15.1	23.1	27.9	31.2	36.3
1.0 10 ⁰	4.2	4.4	4.8	8.2	16.2	21.1	25.9	32.1
5.0 10 ⁻¹	3.8	4.0	4.3	6.4	11.3	15.1	18.4	22.9
2.0 10 ⁻¹	2.7	2.8	3.0	3.5	4.6	6.2	8.0	11.0
1.0 10 ⁻¹	2.5	2.6	2.7	3.1	3.4	4.2	5.4	7.6
5.0 10 ⁻²	2.3	2.4	2.6	3.0	2.9	3.1	3.7	5.0
2.0 10 ⁻²	2.2	2.3	2.5	2.9	2.6	2.5	2.7	3.2
1.0 10 ⁻²	2.2	2.3	2.4	2.9	2.6	2.3	2.3	2.4
1.0 10 ⁻³	2.1	2.2	2.4	2.9	2.7	2.3	2.1	1.8
1.0 10 ⁻⁴	2.1	2.1	2.3	2.9	2.8	2.4	2.2	1.9
1.0 10 ⁻⁵	1.9	2.0	2.1	2.8	2.9	2.6	2.3	2.0
1.0 10 ⁻⁶	1.6	1.7	1.8	2.3	2.7	2.5	2.3	1.9
4.0 10 ⁻⁷	1.4	1.4	1.5	2.0	2.3	2.3	2.1	1.8
Тепл.	0.81	0.83	0.88	1.1	1.4	1.5	1.4	1.3

Таблица 8. Глубинные распределения эквивалентной дозы нейтронов в цилиндрическом бесконечном фантоме при изотропном облучении, пЗв·см².

$E_0, \text{МэВ}$	$r, \text{см}$							
	0.0	3.0	5.0	10.0	13.0	14.0	14.5	15.0
1.7 10 ¹	613.4	621.1	630.1	672.4	723.1	749.4	760.3	782.3
1.4 10 ¹	513.1	517.7	529.7	583.6	641.1	660.6	678.5	701.1
1.0 10 ¹	429.8	441.0	451.2	501.9	540.2	557.4	570.1	580.8
8.0 10 ⁰	371.4	382.4	390.2	439.8	488.7	501.9	521.2	522.3
7.0 10 ⁰	362.4	368.6	380.3	431.1	484.1	503.2	510.3	510.6
6.0 10 ⁰	340.2	350.1	363.1	423.1	481.6	490.1	509.7	517.4
5.0 10 ⁰	281.1	290.1	312.7	380.3	452.5	481.6	500.2	511.9
4.0 10 ⁰	199.7	210.4	230.2	340.7	440.2	491.1	521.1	553.2
3.0 10 ⁰	171.7	190.4	211.4	312.1	418.5	470.7	500.7	540.1
2.0 10 ⁰	102.0	109.5	129.8	242.0	381.1	438.3	492.1	541.6
1.5 10 ⁰	61.3	70.1	86.2	191.9	341.4	410.7	462.0	531.1
1.0 10 ⁰	17.2	21.1	31.4	97.1	253.2	361.9	441.9	560.7
5.0 10 ⁻¹	9.08	12.0	16.8	67.2	191.3	269.2	349.1	448.3
2.0 10 ⁻¹	3.06	3.9	4.1	12.1	46.8	90.1	141.6	221.1
1.0 10 ⁻¹	3.01	3.4	4.0	7.4	20.1	41.2	66.1	118.9
5.0 10 ⁻²	2.08	3.1	3.6	6.1	9.6	15.8	25.8	48.3
2.0 10 ⁻²	2.07	3.0	3.5	5.8	6.6	7.8	11.2	17.1
1.0 10 ⁻²	2.06	2.9	3.4	5.8	5.8	5.4	5.7	7.3
1.0 10 ⁻³	2.05	2.7	3.1	5.7	6.0	4.7	3.8	2.6
1.0 10 ⁻⁴	2.3	2.5	2.9	5.5	6.6	5.4	4.3	2.7
1.0 10 ⁻⁵	2.1	2.3	2.6	5.0	7.1	6.2	5.1	3.2
1.0 10 ⁻⁶	1.7	1.8	2.1	3.8	6.6	6.7	5.9	4.1
4.0 10 ⁻⁷	1.5	1.5	1.7	3.1	5.7	6.3	6.0	4.5
Тепл.	0.87	0.91	0.99	1.7	3.2	4.1	4.7	5.3

Таблица 9. Максимальная эквивалентная (H_{max}) и амбиентная доза ($H^*(10)$) нейтронов для различных геометрий, пЗв·см².

$E_0, \text{МэВ}$	Пл. норм.		Пл. изотр.		Сфера		Цилиндр	
	H_{max}	$H^*(10)$	H_{max}	$H^*(10)$	H_{max}	$H^*(10)$	H_{max}	$H^*(10)$
1.7 10 ¹	608.7	599.8	582.4	531.3	852.3	833.1	782.3	749.4
1.4 10 ¹	573.0	566.3	553.6	492.4	771.1	741.1	701.1	660.6
1.0 10 ¹	501.4	480.9	461.9	418.3	650.8	630.2	580.8	557.4
8.0 10 ⁰	469.7	459.6	419.8	383.1	579.4	568.7	522.3	501.9
7.0 10 ⁰	464.4	454.3	411.1	378.9	570.6	564.1	510.6	503.2
6.0 10 ⁰	470.2	459.6	423.1	380.1	567.4	561.6	517.4	490.1
5.0 10 ⁰	482.5	467.9	430.3	379.2	571.9	552.5	511.9	481.6
4.0 10 ⁰	533.0	533.0	490.7	410.3	603.2	550.2	553.2	491.1
3.0 10 ⁰	500.1	497.2	482.1	400.7	590.1	528.5	540.1	470.7
2.0 10 ⁰	518.9	506.9	492.0	391.2	581.6	501.1	541.6	438.3
1.5 10 ⁰	498.6	496.4	491.9	372.8	571.1	461.4	531.1	410.7
1.0 10 ⁰	525.9	499.8	527.1	345.1	580.7	393.2	560.7	361.9
5.0 10 ⁻¹	423.4	399.6	433.1	261.1	468.3	301.1	448.3	269.2
2.0 10 ⁻¹	217.9	160.1	210.5	96.0	219.7	95.8	221.1	90.1
1.0 10 ⁻¹	109.1	76.1	111.1	45.3	118.9	42.4	118.9	41.2
5.0 10 ⁻²	47.5	31.5	47.2	17.1	48.1	16.9	48.3	15.8
2.0 10 ⁻²	18.8	15.2	16.8	8.1	16.8	7.8	17.1	7.8
1.0 10 ⁻²	11.9	9.9	7.0	5.1	7.0	5.3	7.3	5.4
1.0 10 ⁻³	11.6	8.8	5.3	4.1	6.3	3.6	6.0	4.7
1.0 10 ⁻⁴	12.7	9.8	5.6	4.6	6.8	4.1	6.6	5.4
1.0 10 ⁻⁵	12.6	10.8	5.6	5.3	7.3	4.9	7.1	6.2
1.0 10 ⁻⁶	12.3	12.3	5.7	5.7	6.8	5.8	6.7	6.7
4.0 10 ⁻⁷	11.1	11.1	5.6	5.6	6.4	5.9	6.3	6.3
Тепл.	6.7	6.5	4.9	3.5	5.2	4.6	5.3	4.1

Заклучение

Проведены детальные расчеты глубинных распределений поглощенной и эквивалентной доз нейтронов в плоском, цилиндрическом и сферическом тканеэквивалентных фантомах. Показано различие наших данных с литературными, связанное с использованием разных константных систем и коэффициентов качества.

Рассчитанные данные приведены в таблицах и могут быть использованы в качестве справочного материала.

Список литературы

- [1] Snyder W., Neufeld J. // Brit. J. Radiol. 1955, v.28, p.342.
- [2] Золотухин В.Г. и др. Тканевые дозы нейтронов в теле человека. — М.: Атомиздат, 1972.
- [3] Shaw K.B. et al. RHEL/M149, Chilton, 1968.
- [4] Волощенко А.М. и др. — В кн.: V Всесоюзная научная конференция по защите от ионизирующих излучений ядерно-технических установок. / Тезисы докладов. Протвино, 1989.
- [5] Дубинин А.А. и др. — В кн.: Труды IV Всесоюзной научной конференции по защите от ионизирующих излучений ядерно-технических установок. — Томск, 1985.
- [6] Alekseev A.G. et al. // Radiat. Prot. Dosim. 1986, v.14, pp.289-298.

Рукопись поступила 18 сентября 1996 г.

Д.В.Горбатков и др.

Дозовые характеристики нейтронов с энергией от тепловых до 20 МэВ в тканеэквивалентных фантомах.

Оригинал-макет подготовлен с помощью системы \LaTeX .

Редактор Н.В.Ежела.

Технический редактор Н.В.Орлова.

Подписано к печати 26.09.96. Формат $60 \times 84/8$. Офсетная печать.

Печ.л. 1,12. Уч.-изд.л. 0,86. Тираж 180. Заказ 874. Индекс 3649.

ЛР №020498 17.04.97.

ГНЦ РФ Институт физики высоких энергий
142284, Протвино Московской обл.

