

**ПРОБЛЕМЫ ЯДЕРНОЙ, РАДИАЦИОННОЙ  
И ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ**

УДК 621.039

**ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОЛЕЙ ФОТОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ЖЕЛЕЗЕ  
ДЛЯ ИСТОЧНИКОВ ФОТОНОВ С ЭНЕРГИЯМИ ОТ 10 ДО 50 МэВ**

© 2020 И.Х. Альхагаиш, В.В. Смирнов, **В.К. Сахаров**

*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия*

На основе результатов расчетов методом Монте-Карло пространственно-энергетических распределений фотонов в железе от точечных изотропных и плоских мононаправленных моноэнергетических источников с энергиями 10-50 МэВ определены кратности ослабления воздушной кермы и дозовые факторы накопления рассматриваемого материала. В расчетах учтен вклад флюоресцентного, аннигиляционного и тормозного излучений. Показана независимость факторов накопления и кратностей ослабления от углового распределения излучения источника и слабая зависимость кратностей ослабления от его энергии в диапазоне энергий 30-50 МэВ. Определены поправки на барьерность защиты и отмечена их независимость от толщины защиты и энергии фотонов источника. Полученная информация позволяет снизить погрешности результатов расчетов толщины противорадиационной защиты электронных ускорителей на большие энергии, используя развитые инженерные методы расчета. Полученная информация также может быть использована в расчетах защиты от тормозного излучения электронных ускорителей инженерными методами.

*Ключевые слова:* электронные ускорители, тормозное излучение, защита, дозы, фактор накопления, кратности ослабления, Монте-Карло.

Поступила в редакцию 03.12.2019

После доработки 25.12.2019

Принята к публикации 09.01.2020

**Введение**

Применение для целей дистанционной лучевой терапии и дефектоскопии линейных электронных ускорителей с энергией первичного электронного пучка в диапазоне до 50 МэВ и повышение требований обеспечения радиационной безопасности персонала и населения вызывают необходимость совершенствования методической базы проектирования защиты таких установок [11]. Важным здесь является получение характеристик ослабления фотонов тормозного излучения используемыми в их защите материалами для этого диапазона энергий с учетом рассеянного излучения. Учет рассеянного излучения в развитых инженерных методах расчета защиты от фотонов обычно проводится использованием факторов накопления и кратность ослабления.

Имеющаяся в литературе информация по прохождению фотонного излучения в различных защитных материалах [1, 2, 5] ограничивается энергиями фотонов источника ниже 15 МэВ. Использование электронных ускорителей в промышленности и медицине с энергией первичного электронного пучка в диапазоне до 50 МэВ приводит к необходимости получить данные по характеристикам ослабления фотонов тормозного излучения для этого диапазона энергий. В качестве защитных материалов от тормозного излучения электронных ускорителей используются бетон, железо и свинец, поэтому целью настоящих исследований было получение характеристик полей фотонного излучения в одном из этих материалов – железе.

### Геометрия расчетов и исходные данные

Геометрии рассматриваемых композиций, отличаясь для разных материалов лишь размерами, были одинаковы и приведены на рисунке 1.

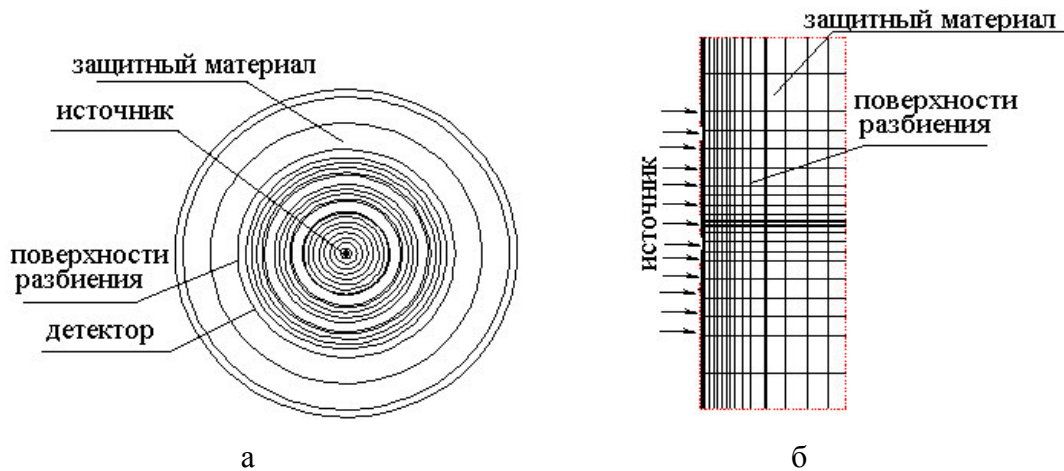


Рисунок 1 – Геометрии рассматриваемых композиций (а – точечный источник, б – мононаправленный источник) [Geometries of the considered compositions (a - point source, b - unidirectional source)]

Для оценки влияния геометрии композиции на характеристики полей фотонов были рассмотрены два случая: сферическая геометрия с точечным изотропным источником в центре сферы и цилиндрическая геометрия с плоским мононаправленным источником, излучение которого падает нормально на торцевую поверхность цилиндра. Размеры защит и расположение точек детектирования выбирались такими, чтобы геометрию можно было рассматривать как бесконечную. Для оценки влияния барьерности защиты на характеристики поля выборочно выполнялись расчеты в барьерной геометрии. Толщина материала составляла 30 длин свободного пробега для энергии фотонов источника. Радиус цилиндрической защиты составлял 300 см для железной. Радиус мононаправленного источника принимался равным 200 см при железной защите.

Исследуемым защитным материалом являлись железо плотностью  $7,86 \text{ г/см}^3$ . Энергии фотонов источника были выбраны равными 10, 20, 30, 40 и 50 МэВ.

Расчеты характеристик полей фотонов выполнялись методом Монте-Карло по программе FLUKA [3]. Использовались оценка по пересечениям поверхностей, указанных на рисунке 1, располагаемых на различных расстояниях от источника излучения, и локальная оценка потока при точечном изотропном источнике.

В качестве характеристик полей фотонного излучения были приняты мощности поглощенной дозы в воздухе, дозовые факторы накопления и энергетические распределения плотности потока фотонов на различных расстояниях от источника. При этом для мононаправленного источника оценивались средние значения этих характеристик на оси цилиндра. Программа FLUKA вычисляет энергетические распределения плотности потока фотонов в рассматриваемом материале. Эти распределения вычислялись на расстояниях от источника от 0,25 до 30 длин свободного пробега (дсп). При этом для перехода от дсп к истинному расстоянию в линейных размерах использовались массовые коэффициенты ослабления фотонов [1,4]. Переход от энергетических распределений плотности потока фотонов к мощности поглощенной в воздухе дозе проводился на основе удельных дозовых коэффициентов, рассчитываемых по формуле (1):

$$\delta = 10^5 E_\gamma 1,6 \cdot 10^{-13} \mu_{eni}^m(E_\gamma), \quad \text{сГр см}^2 / \text{фотон}, \quad (1)$$

где  $E_\gamma$  – энергия фотонов, МэВ;

$\mu_{en}^m(E_\gamma)$  – массовый коэффициент поглощения энергии для воздуха для фотонов с энергией  $E_\gamma$ , см<sup>2</sup>/г;

$1,6 \cdot 10^{-13}$  Дж/МэВ – коэффициент перехода от Дж к МэВ.

Значения  $\delta$  для энергии фотонов менее 10 МэВ взяты из работы [3], для больших энергий фотонов рассчитаны по формуле (1) с использованием  $\mu_{en}^m(E_\gamma)$ , взятых из работы [4].

Полная мощность поглощенной дозы затем вычислялась по формуле (2) с использованием линейной интерполяции:

$$\dot{D} = \int \varphi(E) \delta(E) dE. \quad (2)$$

Получение характеристик полей фотонов при энергии источника 10 МэВ позволяло сравнить полученные в работе результаты с имеющимися литературными данными в литературе [1, 5, 6] и тем самым использовалось для тестирования используемой в работе методики расчета и программного обеспечения как показано в таблице 1.

Таблица 1 – Сравнения дозовых факторов накопления фотонов в железе для точечного изотропного источника фотонов с энергией 10 МэВ, полученных в настоящей работе и других различных работах [1, 5, 6] [Comparison of dose factors of photon accumulation in iron for a point isotropic source of photons with an energy of 10 MeV obtained in this work and other various works [1, 5, 6]]

$\mu d$	Энергия фотонов источника, 10 МэВ				
	Т.и.	[1]	[5]	[6]	П.м.
0,25	1,14				1,16
0,5	1,26	1,19	1,28	1,28	1,27
1	1,49	1,33	1,50	1,51	1,46
2	1,89	1,59	1,87	1,92	1,85
3	2,31	1,86	2,26	2,33	2,25
4	2,76	2,16	2,65	2,76	2,67
5	3,26	2,50	3,09	3,23	3,11
6	3,80	2,87	3,54	3,74	3,59
7	4,38	3,27	4,03	4,28	4,09
8	5,01	3,71	4,57	4,87	4,64
10	6,43	4,69	5,73	6,17	5,83
15	11,0	7,88	9,41	10,3	9,64
20	17,5	12,3	14,5	16	15,2
25	26,3	18,1	20,8	23,5	25,4
30	38,2	25,7	29,2	33,2	

### Результаты расчетов для железной защиты

На рисунке 2 для примера представлены рассчитанные пространственные распределения мощности поглощенной дозы в воздухе для железной защиты для двух типов источников при энергии фотонов источников 30 МэВ. Сравнение результатов, умноженных для точечного изотропного источника на  $4\pi R^2$ , где R – расстояние между источником и детектором, с данными для плоского мононаправленного показало, что пространственные распределения для железа при толщинах до 15 дсп с погрешностью, не превышающей 4% совпадают. Разница на больших толщинах защит, доходящая до 25%, обусловлена статистическими погрешностями результатов для мононаправленного источника.

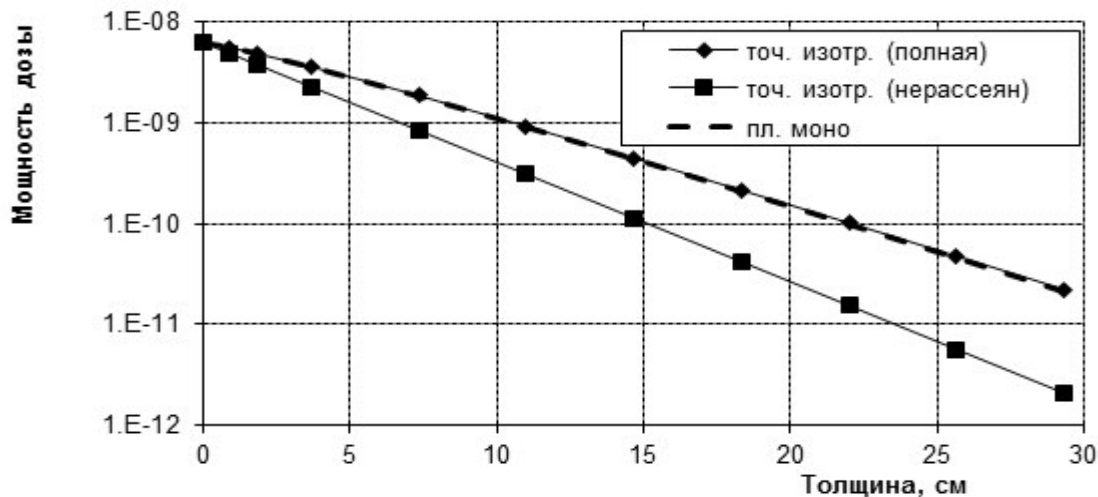


Рисунок 2 – Пространственные распределения мощности поглощенной дозы фотонов в железе на толщинах (0-30) от точечного изотропного мощностью 1 с-1 и плоского мононаправленного мощностью 1 см-2с-1 источников с энергией фотонов 30 МэВ [Spatial power distribution of the absorbed dose of photons in iron at thicknesses (0-30) from a point isotropic power of 1 s-1 and a flat unidirectional power of 1 cm-2s-1 sources with a photon energy of 30 MeV]

При практическом использовании данных по ослаблению фотонов в железе представляется целесообразным использовать дозовые факторы накопления фотонов, которые учитывают отличие характера ослабления от экспоненциального или использовать кратности ослабления мощности поглощенной дозы, приведенные на рисунке 3.

Приведенные данные показывают, что практически во всем диапазоне рассматриваемых толщин железной защиты независимо от энергии фотонов источника кратности ослабления поглощенной дозы не зависят от углового распределения фотонов источника с погрешностью менее 8-12%. Лишь при толщине защиты в 30 дсп разница увеличивается, что объясняется погрешностями расчетов доз для мононаправленного источника. Эти результаты согласуются с результатами, приведенными в литературе [10].

### Кратность ослабления

По аналогии с универсальными таблицами Н.Г. Гусева [1] в таблице 2 приведены толщины железа, обеспечивающие заданную кратность ослабления для высокоэнергетичных источников фотонов, позволяющие инженерными методами проводить расчеты защиты электронных ускорителей от тормозного излучения.

Таблица 2 – Толщина железа, обеспечивающая заданную кратность ослабления воздушной кермы фотонов от источников фотонов с различной энергией, см [The thickness of the iron, providing a given ratio of attenuation of the air kerma of photons from sources of photons with different energies, cm]

Кратность ослабления	Энергия, МэВ		
	10	15	20-50
2	4,6	4,4	4,2
5	9,8	9,3	9,2
10	13,7	11,7	13,1
20	16,6	16,3	16,4
50	21,4	21,2	21,1
10 <sup>2</sup>	24,9	24,2	24,1
2·10 <sup>2</sup>	28,2	27,8	27,5
5·10 <sup>2</sup>	32,9	32,4	32,1
10 <sup>3</sup>	36,9	35,4	35,2
2·10 <sup>3</sup>	40,1	39,1	38,5
5·10 <sup>3</sup>	45,8	43,3	43,1

Продолжение таблицы 2

Кратность ослабления	Энергия, МэВ		
	10	15	20-50
$10^4$	47,9	46,7	46,5
$2 \cdot 10^4$	51,4	49,9	49,3
$5 \cdot 10^4$	55,1	54,3	53,6
$10^5$	58,4	57,9	57,7
$2 \cdot 10^5$	61,9	61,2	60,1
$5 \cdot 10^5$	66,5	65,1	64,3
$10^6$	69,7	68,3	67,2
$2 \cdot 10^6$	72,5	71,6	71,2
$5 \cdot 10^6$	77,3	76,2	75,1
$10^7$	80,4	79,6	78,6
$2 \cdot 10^7$	83,2	82,3	81,7
$5 \cdot 10^7$	87,7	86,7	85,9
$10^8$	91,2	89,7	89,1
$2 \cdot 10^8$	94,1	93,2	92,2
$5 \cdot 10^8$	98,2	97,1	96,5
$10^9$	101,7	100,6	99,5

Зависимость кратности ослабления мощности поглощенной дозы от толщины железа для точечных изотропных источников фотонов разных энергий показана на рисунке 3.

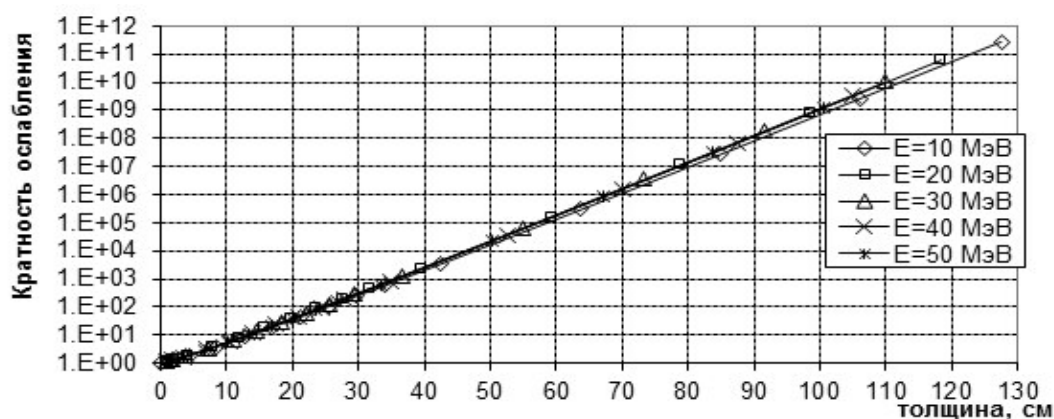


Рисунок 3 – Зависимость кратности ослабления поглощенной дозы в железе от толщины защиты для точечных изотропных источников фотонов с разной начальной энергией [Dependence of the attenuation rate of the absorbed dose in iron on the thickness of protection for point isotropic photon sources with different initial energies]

Можно отметить, что кратность ослабления поглощенной дозы фотонов при энергиях источников от 20 до 50 МэВ практически не зависит от этой энергии, если толщину железа измерять в линейных размерах, а не в длинах свободного пробега фотонов источника. В железе кратность ослабления мощности дозы фотона от источника с энергией 10 МэВ ниже, чем для более высоких энергий источника.

#### Слой десятикратного ослабления

Часто для расчетов толщины защиты, обеспечивающей заданную кратность ослабления используются значения слоев десятикратного ослабления, при этом часто пренебрегают их зависимостью от толщины защиты. Недопустимость такого подхода демонстрируют приведенные в таблице 3 рассчитанные слои десятикратного ослабления мощности дозы на различных толщинах железной защиты для точечного изотропного источника с разными энергиями фотонов. Анализ приведенных данных показывает, что на первых трех слоях десятикратного ослабления характер ослабления

слабее, чем на последующих, причем наиболее ярко это заметно на отличии первого слоя от остальных. Начиная с толщины слоя в 36 см величина слоя десятикратного ослабления практически не зависит от толщины железной защиты и от энергии фотонов источника. В этом диапазоне она может быть принята равной  $10,4 \pm 0,2$  см. В итоге таблица 1 может быть сведена к таблице 4.

Таблица 3 – Слои десятикратного ослабления мощности поглощенной дозы железной защитой, см [Layers of tenfold attenuation of absorbed dose rate by iron shield, cm]

№ слоя	Толщина, см	Энергия источника, МэВ				
		10	20	30	40	50
1	0-14	13,22	12,75	12,8	13,32	13,42
2	14-25	11,64	11,5	11,22	11,45	11,42
3	25-36	11,53	11	11,15	11	11
4	36-48	11	11	10,63	10,4	10,64
5	48-60	11	10,35	10,76	10,81	10,72
6	60-72	10,55	10,64	10,72	10,72	10,75
7-11	72-120	10,45	10,73	10,71	10,62	10,74

Таблица 4 – Усредненные слои десятикратного ослабления мощности поглощенной дозы железной защитой, см [Averaged layers of tenfold attenuation of absorbed dose rate by iron shield, cm]

№ слоя	Толщина, см	Энергия фотонов источника, МэВ 10 - 50
1	0-14	13,3±0,2
2	14-25	11,5±0,2
3	25-36	11,1±0,1
4-11	36-120	10,4±0,2

### Дозовые факторы накопления

На основе данных по полной мощности дозы и дозе нерассеянного излучения были рассчитаны дозовые факторы накопления фотонов в железе, приведенные для двух типов источников в таблице 5.

Таблица 5 – Дозовые факторы накопления фотонов для железа для точечного изотропного и плоского мононаправленного источников фотонов с разными энергиями [Dose factors of photon accumulation for iron for point isotropic and planar unidirectional photon sources with different energies]

μd	Энергия фотонов источника, МэВ												
	10				20		30		40		50		
	Т.и.	[1]	[5]	[6]	П.м.	Т.и.	П.м.	Т.и.	П.м.	Т.и.	П.м.	Т.и.	П.м.
0,25	1,14				1,16	1,13	1,15	1,14	1,16	1,15	1,16	1,15	1,16
0,5	1,26	1,19	1,28	1,28	1,27	1,26	1,26	1,28	1,29	1,30	1,31	1,31	1,32
1	1,49	1,33	1,50	1,51	1,46	1,50	1,48	1,57	1,56	1,63	1,62	1,66	1,65
2	1,89	1,59	1,87	1,92	1,85	1,98	1,95	2,21	2,18	2,41	2,38	2,53	2,50
3	2,31	1,86	2,26	2,33	2,25	2,52	2,47	2,99	2,94	3,40	3,35	3,68	3,64
4	2,76	2,16	2,65	2,76	2,67	3,13	3,05	3,94	3,86	4,68	4,59	5,25	5,15
5	3,26	2,50	3,09	3,23	3,11	3,84	3,72	5,13	4,99	6,34	6,18	7,34	7,18
6	3,80	2,87	3,54	3,74	3,59	4,66	4,48	6,59	6,37	8,48	8,22	10,2	9,88
7	4,38	3,27	4,03	4,28	4,09	5,61	5,34	8,41	8,07	11,2	10,8	13,9	13,5
8	5,01	3,71	4,57	4,87	4,64	6,71	6,34	10,6	10,1	14,8	14,2	19,0	18,2
10	6,43	4,69	5,73	6,17	5,83	9,44	8,76	16,8	15,8	25,3	23,8	34,5	32,8
15	11,0	7,88	9,41	10,3	9,64	20,9	18,4	49,8	44,9	90,4	82,3	146	134
20	17,5	12,3	14,5	16	15,2	43,6	33,4	140	122	307	275	588	519
25	26,3	18,1	20,8	23,5	25,4	87,8	89,7	381	349	1009	866	2285	2052
30	38,2	25,7	29,2	33,2		173		1016	549	3242	1979	8685	8937

С ростом энергии фотонов источника факторы накопления возрастают и при длинах свободного пробега 20 дсп увеличиваются с 17 при энергии источника 10 МэВ до 590 для энергии 50 МэВ.

На рисунке 4 сравниваются результаты настоящей работы с данными других авторов.

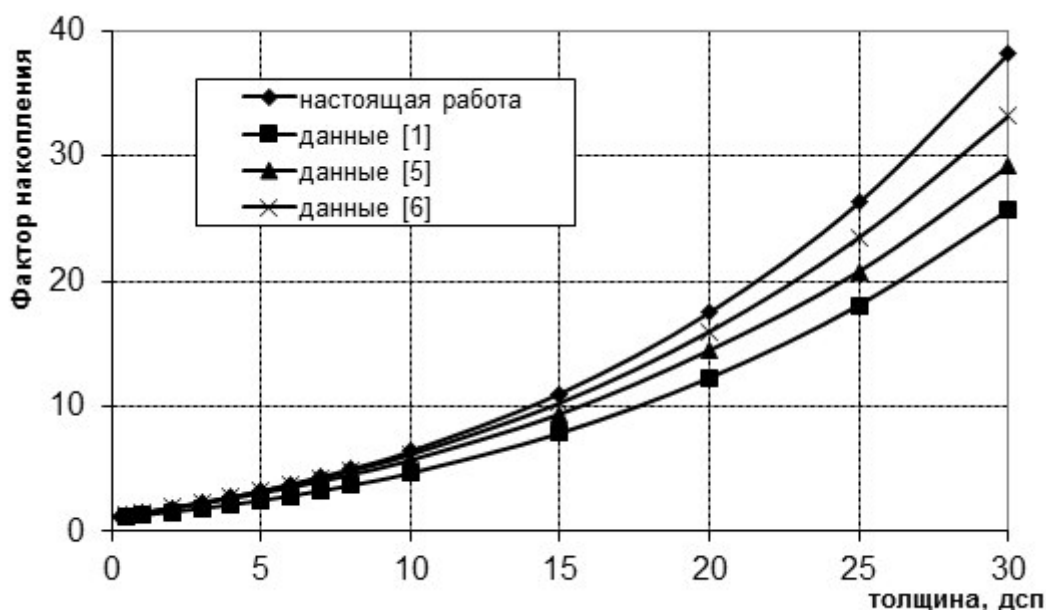


Рисунок 4 – Сравнения дозовых факторов накопления фотонов в железе для точечного изотропного источника фотонов с энергией 10 МэВ, полученных в разных работах [Comparison of dose factors for photon accumulation in iron for a point isotropic source of photons with an energy of 10 MeV obtained in different works]

Сравнение полученных в настоящей работе факторов накопления с аналогичными данными, приведенными в работах [1, 5, 6] для фотонов точечного изотропного источника с энергией 10 МэВ (рис. 4), показало, что результаты, приведенные в работе [5], существенно ниже данных других авторов, и это занижение достигает 40-50% при больших длинах свободного пробега. Разница результатов, полученных в настоящей работе, и данными работы [6] не превышает 15% во всем диапазоне толщин железной защиты. Следует лишь отметить, что полученные в настоящих расчетах результаты дают наибольшие значения по сравнению с данными других авторов.

### Выводы

На основе результатов расчетов дозовых характеристик полей фотонов в рассматриваемых материалах в барьерной геометрии при толщинах защиты выше 3 дсп были определены поправки на барьерность защиты в виде отношения факторов накопления в барьерной геометрии к аналогичным в бесконечной среде. В рассматриваемом диапазоне толщин материалов эти поправки не зависят от энергии. Асимптотические слои десятикратного ослабления для железа получены в работах [7, 8] в зависимости от энергии электронов ускорителя. В диапазоне энергий электронов 20-100 МэВ, что соответствует эффективной энергии фотонов тормозного излучения примерно 6-33 МэВ [9], они практически не зависят от энергии электронов. Полученные характеристики ослабления дозы фотонов в различных защитных материалах для источников фотонов с энергиями в диапазоне от 10 до 50 МэВ дополняют отсутствующие, в литературе данные для энергий фотонов источников выше 30 МэВ и обеспечивают более точные оценки требуемой толщины защиты от тормозного излучения электронных ускорителей.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Машкович, В. П.* Защита от ионизирующих излучений / В. П. Машкович, А. В. Кудрявцева. Справочник. – Москва : Энергоатомиздат, 1999. – 494 с.
2. Kazuaki Kosako, Koji Oishi, Takashi Nakamura, Kouichi Sato, Takashi Kamiyama, Yoshiaki Kiyonagi. Shielding study on iron and concrete assemblies of bremsstrahlung photons and photoneutrons from copper target bombarded by 18, 28 and 38 MeV electrons. Journal of Nuclear Science and Technology, ISSN: 0022-3131 (Print) 1881-1248.
3. Fasso A., Ferrari A., Sala P. R. Electron-Photon Transport in FLUKA: Status // Advanced Monte Carlo for Radiation Physics, Particle Transport Simulation, and Applications: Proc. of the Monte Carlo 2000 Conf., Lisbon, 2000. Berlin; Heidelberg: Springer, 2001. P. 159-164.
4. *Сторм, Э.* Сечения взаимодействия гамма-излучения / Э. Сторм, Х. Исраэль; пер. с англ.: В. А. Климанова, Е. Д. Чистова. – Москва : Атомиздат, 1973. – 252 с.
5. American National Standard. Gamma-Ray Attenuation Coefficients and Buildup Factors for Engineering Materials. ANSI/ANS-6.4.3-1991.
6. Ashimizu, T. Onda, Y. Sakamoto. Calculation of Gamma-Ray Buildup Factors up to Depths of 100 mfp by the Method of Invariant Embedding, III Generation of Improved Data Set. J. Nucl. Sci. and Technology. Vol. 41. № 4 2004. P. 413-424.
7. *Беспалов, В. И.* Лекции по радиационной защите / В. И. Беспалов. – Томск : Издательство Томского политехнического университета, 2011. – 348 с.
8. NCRP. Radiation Protection Design Guidelines 1-100 MeV Particle Accelerator Facilities. NCRP Report № 51. 1977.
9. *СанПиН 2.6.1.2573-10.* Гигиенические требования к размещению и эксплуатации ускорителей электронов с энергией до 100 МэВ. Санитарные правила и нормативы. Москва : Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2010. – 50 с.
10. *Сахаров, В. К.* Кратности ослабления дозы фотонов в бетоне, железе и свинце для моноэнергетических источников с энергиями от 10 до 90 МэВ / В. К. Сахаров // Ядерная физика и инжиниринг – Т. 7, Вып. 3. – 2016. – С. 268-272.
11. *Сахаров, В. К.* Дозовые факторы накопления в бетоне, железе и свинце для источников моноэнергетических фотонов с энергиями от 10 до 50 МэВ / В. К. Сахаров, А. В. Борисенко // Атомная энергия. – Т. 114, Вып. 6. – 2014. – С. 177-179
12. *Yukio Fujita, Hidetoshi SAITOH and Atsushi MYOJOYAMA, J.* Bremsstrahlung and Photoneutron Leakage from Steel Shielding Board Impinged by 12-24 MeV Electrons Beams. Radiat. Res. 50. 363-369 (2009).

## REFERENCES

- [1] Mashkovich V.P., Kudryavtseva A.V. Zashchita ot ioniziruyushchikh izlucheniya [Protection against ionizing radiation]. Moskva [Moscow]. Energoatomizdat. 1999. P. 494. (in Russian)
- [2] Kazuaki Kosako, Koji Oishi, Takashi Nakamura, Kouichi Sato, Takashi Kamiyama, Yoshiaki Kiyonagi. Shielding Study on Iron and Concrete Assemblies of Bremsstrahlung Photons and Photoneutrons from Copper Target Bombarded by 18, 28 and 38 MeV Electrons. Journal of Nuclear Science and Technology. ISSN: 0022-3131 (Print) 1881-1248.
- [3] Fasso A., Ferrari A., Sala P. R. Electron-Photon Transport in FLUKA: Status // Advanced Monte Carlo for Radiation Physics, Particle Transport Simulation, and Applications: Proc. of the Monte Carlo 2000 Conf., Lisbon, 2000. Berlin; Heidelberg: Springer, 2001. P. 159-164.
- [4] Storm E., Israel' Kh.. Secheniya vzaimodeystviya gamma-izlucheniya [Cross Sections for the Interaction of Gamma Radiation]. Perevod s anglijskogo [Translated from English] V.A. Klimanova, Ye.D. Chistova Moskva [Moscow]. Atomizdat. P. 1973. 252 (in Russian).
- [5] American National Standard. Gamma-Ray Attenuation Coefficients and Buildup Factors for Engineering Materials. ANSI/ANS-6.4.3-1991.
- [6] Ashimizu A., Onda T., Sakamoto Y.. Calculation of Gamma-Ray Buildup Factors up to Depths of 100 mfp by the Method of Invariant Embedding, III Generation of Improved Data Set. J. Nucl. Sci. and Technology. Vol. 41. № 4 2004. P. 413-424.
- [7] Bepalov V.I. Leksii po radiatsionnoy zashchite [Lectures on radiation protection]. Tomsk. Izd-vo Tomskogo politekhnicheskogo universiteta [Tomsk: Publishing House of the Tomsk Polytechnic University]. 2011. P. 348 (in Russian).
- [8] NCRP. Radiation Protection Design Guidelines 1-100 MeV Particle Accelerator Facilities. NCRP Report № 51. 1977.
- [9] Gigiyenicheskiye trebovaniya o razmeshchenii i ekspluatatsii uskoriteley elektronov s energiyey do 100 MeV [Hygienic Requirements for the Placement and Operation of Electron Accelerators with Energies up to 100 MeV]. SanPin 2.6.1.2573-10, 2010 (in Russian).



- [10] Sakharov V.K. Kratnosti oslableniya dozy fotonov v betone, zheleze isvintse dlya monoenergeticheskikh istochnikov s energiyami ot 10 do 90MeV [Multiples of Attenuation of the Dose of Photons in Concrete, Iron and Lead for Monoenergetic Sources with Energies from 10 to 90 MeV]. *ZH. Yadernaya fizika i inzhiniring* [Nuclear Physics and Engineering]. 2016. Vol. 7, №. 3 (in Russian).
- [11] Sakharov V.K., Borisenko A.V., Dozovyye faktory nakopleniya v betone, zheleze i svintse dlya istochnikov monoenergeticheskikh fotonov s energiyami ot 10 do 50 MeV [Dose Factors of Accumulation in Concrete, Iron and Lead for Monoenergetic Photon Sources with Energies from 10 to 50 MeV]. *Atomnaya energiya* [Atomic energy] Vol. 114. No. 6. 2014 (in Russian).
- [12] Yukio FUJITA, Hidetoshi SAITOH and Atsushi MYOJOYAMA, J. Bremsstrahlung and Photoneutron Leakage from Steel Shielding Board Impinged by 12-24 MeV Electrons Beams // *Radiat. Res.* 50. 363-369 (2009).

### Characteristics of Photon Radiation Fields in Iron for Photon Sources with Energies from 10 to 50 MeV

I.K. Alhagaish<sup>1</sup>, V.V. Smirnov, V.K. Sakharov

*Institute of Nuclear Physics and Technology (INP&T), National Research Nuclear University «MEPhI»,  
Kashirskoye shosse, 31, Moscow, Russia 115409*

<sup>1</sup>*ORCID iD: 0000-0003-0099-153X*

*Wos Researcher ID: AAE-8983-2019*

*e-mail: alhigesh@gmail.com*

**Abstract** – Based on the results of Monte Carlo calculations of the spatial energy distributions of photons in iron from point isotropic and planar monodirectional monoenergy sources with energies of 10-50 MeV, the air Kerma attenuation multiplicities and dose accumulation factors of the material under consideration are determined.. The calculations take into account the contribution of the fluorescence, annihilation radiation and bremsstrahlung. The independence of the accumulation factors from the angular distribution of the source radiation is shown, and the independence of the attenuation multiplicities from the angular distribution of the source radiation and the weak dependence on its energy in the energy range 30-50 MeV is also shown. The corrections for the barrier protection are determined and their independence from the thickness of the protection and the photon energy of the source is noted. The obtained information allows to reduce the errors of the results of calculations of the thickness of anti-radiation protection of electronic accelerators at high energies, using developed engineering methods of calculation. The obtained information can also be used in calculations of protection against brake radiation of electronic accelerators by engineering methods.

**Keywords:** electronic accelerators, bremsstrahlung radiation, protection, dose, accumulation factor, attenuation multiplicity, Monte Carlo.