ВЕСТНИК НАЦИОНАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО ЯДЕРНОГО УНИВЕРСИТЕТА "МИФИ", 2020, том 9, № 1, с. 3–10

## ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ФИЗИКА

УДК 621.039-78

# ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОЛЕЙ НЕЙТРОНОВ В БЕТОНЕ ОТ ИСТОЧНИКА ФОТОНОВ С ЭНЕРГИЕЙ 30 МэВ

© 2020 г. И. Х. Альхагаиш<sup>1</sup>, В. К. Сахаров<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Национальный исследовательский ядерный университет "МИФИ", Москва, 115409, Россия Поступила в редакцию 23.11.2019 г. После доработки 23.11.2019 г. Принята к публикании 24.12.2019 г.

В литературе имеются сведения о прохождении фотонного излучения в различных защитных материалах [7—9] для источников энергии фотонов в диапазоне от 6 до 24 МэВ и, при толщине для этих материалов в диапазоне от 15 см до 80 см [9, 10]. Использование электронных ускорителей в промышленности и медицине с энергией первичного электронного пучка больше, чем эти энергия и толщина, приводит к необходимости получить данные по характеристикам ослабления фотонов тормозного излучения для энергии большей этих энергий, и при толщинах, больших этих толщин. В качестве защитных материалов от тормозного излучения электронных ускорителей используются бетон, железо и свинец. В работе были произведены расчеты энергетических распределений плотностей потока фотонов и эффективных доз в плоской защите из бетона, а также аналогичные характеристики полей нейтронного и вторичного фотонного излучений. Расчеты были выполнены для двух видов источников: плоского мононаправленного моноэнергетического источника фотонов нов с энергией 30 МэВ, и источника тормозного излучения с максимальной энергией 30 МэВ.

*Ключевые слова:* эффективная доза, бетон, метод Монте–Карло, нейтрон, электронные ускорители **DOI:** 10.1134/S2304487X20010022

#### **ВВЕДЕНИЕ**

Фотонное излучение, возникающее при торможении ускоренных электронов на мишени линейного электронного ускорителя на высокие энергии, является основным источником излучения, определяющим радиационную безопасность, при расчетах противорадиационной защиты ускорителей. Помимо этого необходимо учитывать создаваемое им фотонейтронное излучение, которое формируется в защите и на мишени.

"Гигиенические требования к размещению и эксплуатации ускорителей электронов до 100 МэВ" [11] представляют собой в настоящий момент единственный документ в Российской Федерации, регламентирующий методику расчета защиты электронных ускорителей. Согласно этим требованиям, расчет защиты от тормозного излучения выполняется с помощью приближенных методов, использующих длины релаксации фотонов с энергиями в основном до 5 МэВ для бетона. железа и свинца, полученным для моноэнергетических источников фотонов. Использование такого приближенного подхода приводит к значительным погрешностям в определении толщины защиты. Последние могут составлять несколько десятков процентов. Это показано сравнениями результатов расчетов, полученных согласно "Гигиеническим требованиям...", и данными, полученными в аналогичной геометрии методом Монте-Карло [12–14]. Фотонейтроны же в приведенных рекомендациях не учитываются вовсе.

#### ГЕОМЕТРИЯ КОМПОЗИЦИИ И МЕТОДИКА РАСЧЕТА

Характеристики полей фотонного и нейтронного излучений были рассчитаны методом Монте-Карло, реализованным в программе FLUKA [15]. При этом использовались библиотеки оцененных ядерных данных ENDF/B-VI с непрерывной зависимостью сечения взаимодействия излучения с веществом от энергии.

Для проведения расчетов характеристик полей фотонного и фотонейтронного излучений использовалась модель, показанная на рис. 1. Расчеты были выполнены для двух типов источников первичных фотонов. Оба типа источников считались плоскими и мононаправленными. Различие заключалось в задании энергии фотонов. Первый тип источника — моноэнергетический, с энергиями фотонов 30 МэВ. Второй тип — источник тормозного излучения с такими же максимальными энергиями фотонов. Параметры источника фотонов следует рассмотреть более подробно.

#### АЛЬХАГАИШ, САХАРОВ



Рис. 1. Геометрия расчетной модели.

Излучение плоского мононаправленного источника фотонов диаметром 200 см падало нормально на торцевую поверхность цилиндрической зашиты диаметром 300 см. Для задания источников второго типа использовались спектры фотонов тормозного излучения, возникшего при торможении электронов на вольфрамовой мишени, полученные в статье [3]. Энергия электронов источника принималась равной 30 МэВ. Использовалась оценка по пересечениям поверхностей. указанных на рис. 1, располагаемых на различных расстояниях от фотонного источника в глубине защиты. Для снижения статистических погрешностей при расчетах требуемых величин использовалось неаналоговое моделирование в виде расщепления и русской рулетки на отмеченных поверхностях. В качестве материала защиты выбран бетон с плотностью 2.3 г/см<sup>3</sup> [2]. В работе использовался бетон с нуклидным составом и процентным содержанием отдельных изотопов, приведенные в справочнике [2]. При этом также было учтено содержание конкретных изотопов в природных материалах [4].

### РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ ПРОСТРАНСТВЕННО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ ПЛОТНОСТИ ПОТОКА ФОТОНОВ В МАТЕРИАЛЕ ЗАЩИТЫ

Расчет пространственно-энергетических распределений плотности потока фотонов на различных толщинах защиты от плоского мононаправленного моноэнергетического источника, с энергиями фотонов 30 МэВ, а также источника тормозного излучения с максимальными энергиями фотонов в том же диапазоне, проводился в диапазоне энергий фотонов 1—30 МэВ с энергетическим интервалом 1 МэВ. Все расчетные результаты нормировались на 1 фотон/см<sup>2</sup> с исходного источника. На рис. 2 представлены графики пространственно-энергетических распределений фотонов от моноэнергетического источника и источника тормозного излучения с такой же максимальной энергией фотонов на различной глубине бетонной защиты.

Полученные расчетные результаты по пространственно-энергетическому распределению плотности потока фотонов от фотонных источников показывают, что форма спектров фотонов слабо зависит от толщины защиты. Для пространственноэнергетических распределений, полученных от моноэнергетических источников, характерно наличие пика нерассеянных фотонов. Практически при всех толщинах защиты остается заметным вклад нерассеянных фотонов источника.

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ СЕЧЕНИЙ ФОТОНЕЙТРОННЫХ РЕАКЦИЙ ДЛЯ БЕТОНА

Процесс образования фотонейтронов в результате ( $\gamma$ , *n*)-реакции относится к числу ядерных реакций, связанных с передачей энергии возбуждения ядра одному из нейтронов. Этот процесс является пороговым, так как для него необходимо, чтобы энергия налетающего фотона



**Рис. 2.** Энергетическое распределение фотонов в бетонной защите от различных источников с максимальной энергией фотонов 30 МэВ на различных глубинах защит, нормированные на 1 фотон/см<sup>2</sup> с источника.

была больше энергии связи нейтронов в ядре. Зачастую влиянием вторичного нейтронного излучения при проектировании защиты пренебрегают, однако оно может вносить существенный вклад в формирование дозы излучений в определенных материалах защиты либо при достаточно большой энергии первоначальных фотонов. Процесс образования фотонейтронов определяется поперечным сечением ( $\gamma$ , *n*)-реакции, которое зависит от энергии падающих фотонов и изотопа, входящего в состав материала.

Отметим из табл. 2, что при сравнении значений сечения для ( $\gamma$ , n) со значениями сечения для ( $\gamma$ , 2n). Отметим значение сечения для ( $\gamma$ , 2n) относительно невелико и, таким образом, можно пренебречь значением сечения для ( $\gamma$ , 2n) в расчетах.

В расчетах использовались данные библиотеки сечений TENDL-2014 [5]. Сечения фотонейтронной реакции имеют "гигантский резонанс", который приходится на область энергий 10...25 МэВ. Для задания объемного источника фотонейтронов, который необходимо было получить для выполнения второго этапа расчетов, требовалось вычислить значение макроскопического сечения фотонейтронной реакции для бетона в зависимости от энергии фотонов. Поскольку бетон представляет собой гомогенную смесь элементов, названных выше и в табл. 1, для вычисления сечения ( $\gamma$ , *n*)-реакции для бетона использовалась указанная ниже формула массового макроскопического сечения взаимодействия для смеси [1]:

$$\sum_{\delta e_{\rm T}}^m = \sum_{\rm i} \frac{N_{\rm A}}{A_{\rm i}} \sigma_{\rm i} p_{\rm i}^m, \tag{1}$$

где  $\sigma_i$  – сечение ( $\gamma$ , *n*)-реакции для *i*-го изотопа,  $p_i^m$  – массовая доля *i*-го изотопа в материале защиты;  $N_A$  – число Авогадро;  $A_i$  – атомные массы изотопов.

На рис. 3 показаны микроскопические сечения ( $\gamma$ , *n*)-реакции для основных изотопов, входящих в состав бетона. Оно, очевидно, имеет пик в области энергий приблизительно от 15 до 25 МэВ.

**Таблица 1.** Нуклидный состав бетона и процентное содержание отдельных изотопов в нем (с учетом содержания этих изотопов в природных материалах)

Нуклид	Содержание, %	
H-1	0.56	
O-16	49.71	
O-18	0.10	
Na-23	1.71	
Mg-24	0.19	
Al-27	4.56	
<b>Si</b> -28	29.12	
Si-29	1.48	
Si-30	0.98	
S-32	0.11	
K-39	1.79	
K-41	0.13	
Ca-40	8.01	
Ca-44	0.17	
Fe-56	1.12	

<i>E</i> = 30 МэВ	Изотопы	<b>σ</b> , barn	
		$(\gamma, n)$	( <i>γ</i> , 2 <i>n</i> )
	O-16	3.6857E-05	1.2912E-06
	Al-27	8.3869E-04	4.1356E-04
	Si-28	4.1740E-04	0.0
	Ca-40	4.4924E-04	2.1393E-06

**Таблица 2.** Поперечное сечение для ( $\gamma$ , *n*) и ( $\gamma$ , 2*n*) для основного нуклидного состава бетона

#### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭНЕРГИИ НЕЙТРОНОВ, ОБРАЗУЮЩИХСЯ В РЕЗУЛЬТАТЕ (у, *n*)-РЕАКЦИИ В МАТЕРИАЛЕ ЗАЩИТЫ

Определение энергии нейтронов, образующихся в реакции ( $\gamma$ , *n*), осуществлялось по формуле [2]

$$E = \frac{(A-1)}{A} \left[ E_{\gamma} - E_{c_{B}} - \frac{E_{\gamma}^{2}}{1862 \cdot (A-1)} \right] - E_{\gamma} \left[ \frac{2(A-1)(E_{\gamma} - E_{c_{B}})}{931A^{3}} \right]^{1/2} \cos \theta,$$
(2)

где A — атомная масса ядра мишени,  $\theta$  — угол вылета нейтрона относительно направления движения фотона;  $E_{\rm cs}$  — энергия связи нейтронов в ядре; все энергии в формуле подставляются в МэВ.

В формуле (2) второе слагаемое (содержащее  $\cos \theta$ ) много меньше, чем изотропное (первое) слагаемое, поэтому пренебрегаем вторым слагаемым.

В первом слагаемом  $(E_{\gamma} - E_{cs}) \gg \frac{E_{\gamma}^2}{1862 \cdot (A-1)}$ , поэтому мы пренебрегаем выражением  $\left(\frac{E_{\gamma}^2}{1862 \cdot (A-1)}\right)$ . При этом можно записать одно-

значную связь между энергией поглощенного фотона и энергией испускаемого нейтрона:

$$E \approx \frac{A-1}{A} (E_{\gamma} - E_{\rm cB}). \tag{3}$$

Дальнейшие расчеты были выполнены в предположении, что энергия фотона идет только на преодоление связи нейтрона в ядре и придание ему кинетической энергии. Для определения суммарной энергии связи всех нуклонов в ядре изотопа с массой А и атомного числа Z была использована приближенная формула Вайцзекера [6]:

$$E_{\rm cB} = 15.75A - 17.8A^{2/3} - 0.71Z^2/A^{1/3} - -94.8(A/2 - Z)^2/A + 34/A^{3/4}.$$
 (4)

Отсюда удельная энергия связи нейтронов в ядре:

$$\mathbf{E}_{\mathrm{cB.yg.}} = \frac{\mathbf{E}_{\mathrm{cB}}}{\mathbf{A}}.$$

Вычисления показали, что удельная энергия связи нейтронов в ядре слабо зависит от изотопа. Поэтому для дальнейших расчетов по формуле (3) можно использовать усредненную энергию связи. Чтобы ее вычислить, необходимо посчитать энергию связи нейтрона в ядре для каждого изотопа, а затем провести усреднение с учетом концентрации и сечение каждого изотопа. Таким образом было получено значение 8.35 МэВ. После подстановки известных значений в формулу (3), получена зависимость энергии образующегося фотонейтрона от энергии первичного фотона.



Рис. 3. Микроскопические сечения (у, *n*)-реакции для основных изотопов, входящих в состав бетона.



**Рис. 4.** Энергетические распределения плотности потока нейтронов от моноэнергетического источника фотонов с энергией фотонов 30 МэВ и источника тормозного излучения с максимальной энергией фотонов 30 МэВ.

## РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ ВТОРОГО ЭТАПА ВЫЧИСЛЕНИЙ

Формирование распределенного по пространству источника образовавшихся нейтронов проводилось следующим образом. Вычислялась плотность нейтронов на бетонной оси защиты в точках, где на первом этапе рассчитаны спектры фотонного излучения. Предполагая, что плотность нейтронов не зависит от расстояния от оси цилиндрической защиты в перпендикулярном оси направлении в диапазоне от 0 до 100 см и не изменяется вдоль оси в промежутке между выделенными расчетными плоскостями, вычислялось среднее число нейтронов в цилиндрической пространственной ячейке, ограниченной плоскостями, на которых на первом этапе получены спектры фотонов, и радиусом 200 см:

$$N_i(E_n) = \varphi_i(E_\gamma) \sum_{\gamma,n} (E_\gamma) \pi R^2 \Delta t_i, \qquad (5)$$

где  $\phi_i$  — средняя плотность потока средняя плотность потока фотонов с энергией  $E_{\gamma}$  в і-й пространственной ячейке, ограниченной плоскостями, в которых рассчитывалось энергетическое распределение плотности потока фотонов;  $\Sigma_{\gamma n}(E_{\gamma})$  – макроскопическое сечение фотонейтронной реакции для бетона при энергии фотона  $E_{\gamma}$ ; R – радиус ячейки;  $\Delta t_i$  – толщина ячейки, определяемая как расстояние между соседними плоскостями, на которых определялась плотность потока фотонов;  $N_i(E_n)$  — число нейтронов с энергией  $E_n$ , соответствующей энергии фотона  $E_{\gamma}$ , испускаемое і-й ячейкой в единицу времени. При расчете мощности эффективной дозы нейтронов использовались удельные максимальные мощности эффективной дозы на единичный флюенс, взятые из работы [8].

На рис. 4 показаны энергетические распределения плотности потока нейтронов, образующихся в результате (ү, *n*)-реакции при облучении бетонной защиты различными источниками фотонного излучения. На рис. 6 приведены графики пространственно-энергетических распределений плотности потока нейтронов от моноэнергетического источника фотонов с энергией фотонов 30 МэВ и источника тормозного излучения с максимальной энергией фотонов 30 МэВ. Оба распределения получены на расстоянии 40, и 200 см от источника. Полученные распределения плотности потока нейтронов подобны для источников фотонов разных энергий и для различных глубин детектирования источника с определенной энергией фотонов, то есть форма спектров слабо зависит от толщины защиты из бетона.

Полученные распределения плотности потока нейтронов также имеют ряд типичных признаков для подобных величин. Так, в области тепловых нейтронов (энергий  $10^{-8}...10^{-7}$  МэВ) заметен характерный максвелловский пик. Для нейтронов с энергией из промежуточной области спектр близок к спектру вида 1/E.

На этом же этапе были рассчитаны пространственно-энергетические распределения плотности потока вторичных фотонов, образовавшихся при рассеянии фотонейтронов, которые, в свою очередь, появились в результате взаимодействия высокоэнергетичных фотонов с веществом. Вычисления также производились для источников двух типов: моноэнергетического и тормозного излучения. На рис. 5 приведены распределения плотностей потока в различных точках детектирования для одного источника (источник тормозного излучения с максимальной энергией фотонов 30 МэВ).



Рис. 5. Энергетические распределения вторичных фотонов в результате облучения бетонной защиты источником тормозного излучения с максимальной энергией фотонов 30 МэВ на различных толщинах.



Рис. 6. Распределения первичных фотонов, нейтронов и вторичных фотонов для моноэнергетического источника фотонов с энергией 30 МэВ и источника тормозного излучения с максимальной энергией фотонов 30 МэВ.

## РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА ДОЗОВЫХ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ НЕЙТРОНОВ И ВТОРИЧНЫХ ФОТОНОВ

Дозовые распределения для всех видов излучения рассчитывались в тех же точках, что и плотности потока. На рис. 6 приведены полученные дозовые распределения первичных фотонов, нейтронов и вторичных фотонов по глубине бетонной защиты для моноэнергетического источника фотонов и источника тормозного излучения (для примера показан случай, когда моноэнергетический источник испускает фотоны с энергией 30 МэВ, а источник тормозного излучения — фотоны с максимальной энергией 30 МэВ). На рис. 6 приведены дозовые распределения первичных фотонов, нейтронов и вторичных фотонов для моноэнергетических источников с энергией фотонов 30 МэВ в зависимости от расстояния от источника до плоскости, содержащей детектор. Как видно из приведенных графиков, дозовые распределения для указанных источников определяются первичным фотонным излучением. Вклад

2020

нейтронного и вторичного фотонного излучений значительно (приблизительно на три порядка) меньше. Мощность дозы, обуславливаемой фотонами, почти экспоненциально снижается в зависимости от глубины бетонной защиты.

Рис. 6 распределения первичных фотонов, нейтронов и вторичных фотонов для моноэнергетического источника фотонов с энергией 30 МэВ и источника тормозного излучения с максимальной энергией фотонов 30 МэВ.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в работе удалось сделать следующее.

Были рассчитаны пространственно-энергетические распределения фотонов в бетоне от плоских мононаправленных моноэнергетических источников фотонов с энергией 30 МэВ и источников тормозного излучения с максимальной энергией фотонов 30 МэВ.

Были проанализированы библиотеки сечений фотонейтронной реакции для разных изотопов, входящих в состав бетона. Полученные зависимости использовались для вычисления макроскопического сечения ( $\gamma$ , *n*)-реакции, которое, в свою очередь, использовалось для расчета характеристик фотонейтронного источника.

Был предложен способ задания пространственно-энергетического распределения фотонейтронного источника в виде неравномерного объемного источника.

Были рассчитаны энергетические распределения фотонейтронов в зависимости от энергии фотонов, приводящих к их образованию.

Были выполнены расчеты дозовых распределений фотонов и нейтронов в бетонной защите для источников фотонного излучения различных энергий. Полученные результаты можно использовать для решения задач расчета защиты линейных электронных ускорителей.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Сахаров В.К. Введение в теорию переноса и физику защиты от ионизирующих излучений. Учебное пособие. М., 2013. 268 с.
- Машкович В.П., Кудрявцева А.В. Защита от ионизирующих излучений. Справочник. М. Энергоатомиздат. 1995. 494 с.
- 3. *Сахаров В.К.* Спектры тормозного излучения и фотонейтронов из вольфрамовой мишени ускорителя электронов энергией 5–90 МэВ. Атомная энергия. 2016. Т. 120. № 4. С. 228–231.
- 4. De Laeter J.R., Heumann K.G., Rosman K.G.R. Isotopic Compositions of the Elements. Journal of Physical and

Chemical Reference Data. 1991. V. 6. № 20. P. 1327–1338.

- 5. http://www.talys.eu/tendl-2014/
- Mirzaei Mahmoud Abadi Vahid, Mirhabibi Mohsen, Askari Mohammad Bagher. Estimation of Semi-Empirical Mass Formula Coefficients. Nuclear Science. 2017. V. 2. № 1. P. 11–15. doi: Received: December 26, 2016; Accepted: January 12, 2017; Published: February 4, 2017

https://doi.org/10.11648/j.ns.20170201.13

- 7. Gamma-Ray Attenuation Coefficients and Buildup Factors for Engineering Materials. American National Standard, ANSI/ANS-6.4.3-1991.
- Машкович В.П., Кудрявцева А.В. Защита от ионизирующих излучений. Справочник. М.: Энергоатомиздат, 1995. 494 с.
- 9. Shielding study on iron and concrete assemblies of bremsstrahlung photons and photoneutrons from copper target bombarded by 18, 28 and 38 MeV electrons, Kazuaki Kosako, Koji Oishi, Takashi Nakamura, Kouichi Sato, Takashi Kamiyama & Yoshiaki Kiyanagi, Journal of Nuclear Science and Technology, ISSN: 0022-3131 (Print) 1881-1248.
- Bremsstrahlung and Photoneutron Leakage from Steel Shielding Board Impinged by 12-24 MeV Electrons Beams, Yukio FUJITA\*, Hidetoshi SAITOH and Atsushi MYOJOYAMA, J. Radiat. Res. 2009. V. 50. P. 363– 369.
- Гигиенические требования о размещении и эксплуатации ускорителей электронов с энергией до 100 МэВ. СанПин 2.6.1.2573-10, 2010.
- Сахаров В.К., Борисенко А.В. Дозовые факторы накопления в бетоне, железе и свинце для источников моноэнергетических фотонов с энергиями от 10 до 50 МэВ. Ж. Атомная энергия. 2014. Вып. 6. С. 114.
- 13. *Сахаров В.К.* Кратности ослабления дозы фотонов в бетоне, железе и свинце для моноэнергетических источников с энергиями от 10 до 90 МэВ. Ж. Ядерная физика и инжиниринг. 2016. Т. 7. № 3. С. 268–272.
- 14. Пропалова О.И., Сахаров В.К., Соловьев И.П., Чайкина С.А. Погрешности результатов расчетов защиты линейных электронных ускорителей при использовании данных для моноэнергетических источников фотонов.
- Ferrari A., Sala P.R., Fasso A., Ranft J. FLUKA: A Multi-Particle Transport Code, CERN-2005-010 INFN TC 05/11 SLAC-R-773 12 October 2005.

ВЕСТНИК НАЦИОНАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО ЯДЕРНОГО УНИВЕРСИТЕТА "МИФИ" том 9 № 1 2020

## Vestnik Natsional'nogo issledovatel'skogo yadernogo universiteta "MIFI", 2020, vol. 9, no. 1, pp. 3-10

# Characteristics of Neutron Fields in Concrete from a Photon Source with an Energy of 30 MeV

## I. K. Alhagaish<sup>*a*</sup> and V. K. Sakharov<sup>*a*</sup>

<sup>a</sup> National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, 115409 Russia Received November 23, 2019; revised November 23, 2019; accepted December 24, 2019

Abstract—Information on the passage of photon radiation from photon sources in the energy range from 6 to 24 MeV in various protective materials with thicknesses in the range from 15 to 80 cm is reported in [7-10]. The use of electron accelerators in industry and medicine with the primary electron beam energy higher than these energies requires data on the characteristics of the attenuation of bremsstrahlung photons for energy higher than these energies and thickness larger than these thicknesses. Concrete, iron, and lead are used as protective materials against the bremsstrahlung of electron accelerators. In this work the energy distributions of photon flux densities and effective doses in planes of concrete protections, as well as similar characteristics of the fields of neutron and secondary photon radiation, have been calculated. The calculations have been performed for two types of sources: a flat unidirectional monoenergetic photon source with an energy of 30 MeV.

Keywords: effective dose, concrete, Monte-Carlo method, neutron, electron accelerators

DOI: 10.1134/S2304487X20010022

#### REFERENCES

- 1. Sakharov V.K. *Vvedenie v teoriyu perenosa i fiziku zashchity ot ioniziruyushchih izluchenij* [Introduction to transport theory and physics of protection against ionizing radiation]. Moscow, Tutorial. 2013, 268 p.
- Mashkovich V.P., Kudryavtseva A.V. Zashchita ot ioniziruyushchih izluchenij. Spravochnik [Protection against ionizing radiation. Directory]. Mscow, Energoatomizdat. 1995. 494 p.
- Sakharov V.K. Spectra of bremsstrahlung and photoneutrons from a tungsten target of an electron accelerator with an energy of 5–90 MeV. Atomic Energy. 2016. V. 120. No. 4. P. 228–231.
- De Laeter J.R., Heumann K.G., Rosman K.G.R. Isotopic Compositions of the Elements. Journal of Physical and Chemical Reference Data, pp. 1337–1338, Vol. 6, No. 20, 1991.
- 5. http://www.talys.eu/tendl-2014/
- Mirzaei Mahmoud Abadi Vahid, Mirhabibi Mohsen, Askari Mohammad Bagher. Estimation of Semi-Empirical Mass Formula Coefficients. Nuclear science. Vol. 2, No. 1, 2017, pp. 11–15. doi: 10.11648/ j.ns.20170201.13 Received: December 26, 2016; Accepted: January 12, 2017; Published: February 4, 2017.
- 7. Gamma-Ray Attenuation Coefficients and Buildup Factors for Engineering Materials. American National Standard, ANSI / ANS-6.4.3-1991.
- Mashkovich V.P., Kudryavtseva A.V. Zashchita ot ioniziruyushchih izluchenij. Spravochnik [Protection against ionizing radiation. Directory]. Moscow, Energoatomizdat. 1995. 494 p.

- Shielding study on iron and concrete assemblies of bremsstrahlung photons and photoneutrons from copper target bombarded by 18, 28 and 38 MeV electrons, Kazuaki Kosako, Koji Oishi, Takashi Nakamura, Kouichi Sato, Takashi Kamiyama & Yoshiaki Kiyanagi, Journal of Nuclear Science and Technology, ISSN: 0022-3131 (Print) 1881-1248.
- Bremsstrahlung and Photoneutron Leakage from Steel Shielding Board Impinged by 12–24 MeV Electrons Beams, Yukio FUJITA \*, Hidetoshi SAITOH and Atsushi MYOJOYAMA, J. Radiat. Res., 50, 363–369 (2009).
- 11. Gigienicheskie trebovaniya o razmeshchenii i ekspluatacii uskoritelej elektronov s energiej 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.
- 12. Sakharov V.K., Borisenko A.V. Dose accumulation factors in concrete, iron and lead for monoenergetic photon sources with energies from 10 to 50 MeV. J. Atomic energy, 114, issue 6, 2014.
- Sakharov V.K. Multiple attenuation of the dose of photons in concrete, iron and lead for monoenergetic sources with energies from 10 to 90 MeV. J. Nuclear physics and engineering. 2016. V. 7. No. 3. P. 268–272.
- Propalova O.I., Sakharov V.K., Soloviev I.P., Chaykina S.A. Errors in the results of calculations of the protection of linear electron accelerators when using data for monoenergetic photon sources. *J. Atomic energy*, 125, issue 2, 2018.