

УДК 539.171.4

**О СПЕКТРЕ ОТРАЖЕННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ БЫСТРЫХ НЕЙТРОНОВ,
ПАДАЮЩИХ НА БЕТОННУЮ СТЕНКУ****Загороднюк А.А., Гацкевич Г.В., Миненко В.Ф., Кутень С.А.**

Проведено компьютерное моделирование спектра отраженного излучения моноэнергетического пучка нейтронов, падающего на бетонную стену. Рассмотрены два встречающиеся на практике варианта падения нейтронов, которые могут быть использованы для оценки защиты от отраженных нейтронов в помещениях: перпендикулярно слою и под углом 45° к нему. Спектр отраженного излучения содержит пики, обусловленные упругим рассеянием нейтронов на ядрах элементов, входящих в состав бетона. Пики идентифицированы с элементным составом бетона. По амплитуде преобладают пики, соответствующие элементам с наибольшим содержанием в бетоне. Показано, что вследствие рассеяния пиковые значения в наибольшей степени смещаются в низкоэнергетическую область при нормальном падении пучка нейтронов.

Ключевые слова: компьютерное моделирование, бетон, нейтроны, отражение, спектр.

(Поступила в редакцию 7 июня 2017 г.)

Введение. В настоящее время в Республике Беларусь в практике лучевой терапии все большее распространение получают линейные ускорители электронов. Основными достоинствами линейных ускорителей являются: уменьшенные дозовые нагрузки на здоровые ткани организма при формировании высокой дозы в области опухоли, возможность равномерного облучения опухоли, возможность варьировать характеристики поля облучения [1].

Современные медицинские линейные ускорители электронов способны генерировать пучки фотонов с энергией до 18-20 МэВ. Для их безопасной эксплуатации используются специально спроектированные помещения. Наиболее распространенным материалом защиты от воздействия ионизирующего излучения является бетон, применяющийся в качестве основного строительного материала помещения линейного ускорителя (бункера), и представляющий собой смесь элементов с малым и средним атомным весом [2], [3].

При проектировании помещений линейных ускорителей, в настоящее время основное внимание уделяется защите от тормозного излучения, считая при этом, что защита от другого сопутствующего излучения осуществляется автоматически. Следует, однако, понимать, что успешное использование высокоэнергетического тормозного излучения линейных ускорителей сопровождается целым рядом проблем, связанных с появлением нежелательного нейтронного излучения в поле облучения. При формировании пучка фотонов с энергией выше пороговой энергии фотоядерных реакций (около 10 МэВ) на элементах выходного устройства ускорителя рождаются быстрые нейтроны [1, 2, 5]. В этих условиях расчет оптимальной и экономически обоснованной толщины и состава защиты требует знания спектрального состава нейтронного излучения [6].

Знание спектрального состава необходимо даже при качественной оценке защиты. Простейшие оценки, основанные на геометрическом приближении для распространения нейтронов, показывают, что в некоторых конфигурациях бункера нейтроны, отраженные от бетонной стенки под углом 45° , могут попасть в лабиринт бункера, предназначенный для защиты от прямого и рассеянного излучения. Далее, после серии аналогичных отражений, нейтроны могут попасть на стену и входную дверь бункера, за которой находится персонал и пациенты. Опасность возникающего нейтронного излучения состоит в том, что тяжесть биологического воздействия нейтронов с энергией 1 МэВ в 20 раз выше по сравнению с фотонным излучением. При этом биологическое действие нейтронов сильно зависит от энергии излучения. Так, в диапазоне энергий 0,01 – 1 МэВ радиобиологическая эффективность нейтронного излучения изменяется от 2,5 до 20 [7].

Целью данной работы является моделирование спектра отраженного нейтронного излучения при падении первичного моноэнергетического нейтронного пучка (с энергией 1 МэВ) на бетонную поверхность.

Ниже исследованы спектры отраженного излучения в двух практически важных случаях: нормальное падение пучка на поверхность и падение под углом 45° к поверхности.

Моделирование спектра отраженного нейтронного излучения при падении монохроматического нейтронного пучка перпендикулярно поверхности бетона. Направленный моноэнергетический источник с энергией 1 МэВ расположен на расстоянии 1 метр от бетонной стенки. Пучок нейтронов падает на поверхность стенки перпендикулярно. Спектр отраженного нейтронного излучения фиксируется на расстоянии 30 см от поверхности бетона. Область исследования пучка представляет собой кольцо конечной толщины, образованное двумя конусами с углами раствора 45° и 46° (с вершиной в точке падения пучка), и секущей их плоскостью, параллельной поверхности бетона. Схема моделирования представлена на рисунке 1. Типичный элементный состав бетона, используемый в задачах по расчету пассивной защиты, представлен в таблице 1 [3,4].

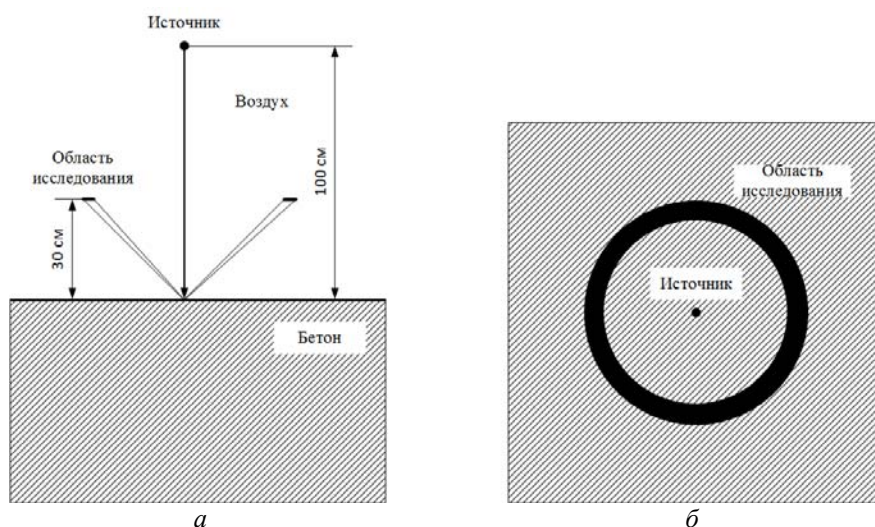


Рисунок 1 – Схема моделирования для нормального падения нейтронного пучка на поверхность бетона: а – вид сбоку; б – вид сверху

Таблица 1. – Состав моделируемого бетона (плотность 2,35 г/см³)

Элемент	Массовая доля
H	0,008485
C	0,050064
O	0,473483
Mg	0,024183
Al	0,036063
Si	0,145100
S	0,002970
K	0,001697
Ca	0,246924
Fe	0,011031

Монте-Карло моделирование процесса переноса нейтронов от источника до «детектора» (область исследования) проводилось с помощью кода MCNP[8]. В рассчитанном спектре отраженного под углом 45° излучения от падающего моноэнергетического пучка нейтронов с энергией 1 МэВ выявляется шесть выраженных пиков. Основным механизмом формирования пиков в спектре отраженных нейтронов является упругое рассеяние на ядрах элементов, входящих в состав бетона. Пики спектра были сопоставлены со средней

энергией нейтронов, упруго рассеявшихся на выделенном элементе бетона, согласно формуле [5]:

$$E = \frac{1+a}{2} E_0, \quad a = \frac{(A-1)^2}{(A+1)^2}, \quad (1)$$

где E_0 – первоначальная энергия нейтрона, МэВ; A – массовое число элемента, на котором происходит рассеяние, а.е.м.

Для каждого элемента было рассчитано пиковое значение энергии упруго рассеянного нейтрона, претерпевшего одно или несколько рассеяний. Энергия рассеянного нейтрона, энергия пиков в спектре, относительное отклонение пиков смоделированного спектра от расчетных энергий упруго рассеянного нейтрона, а также количество рассеяний представлены в таблице 2.

Сравнение результатов моделирования с аналитическими расчетами (1) показывает, что основным механизмом взаимодействия нейтронов 1 МэВ с бетоном является упругое рассеяние. При заданной геометрии нейтрон в среднем дважды упруго рассеивается, прежде чем покидает бетон. Высота пиков в спектре пропорциональна массовой доле элемента, входящего в состав бетона. Спектральный состав отраженного излучения при нормальном падении пучка на бетон представлен на рисунке 2.

Таблица 2. – Результаты идентификации максимумов в спектре отраженного излучения при нормальном падении пучка на бетон

Максимум в модельном спектре E_{\max} , МэВ	Рассеивающий элемент	Средняя энергия упруго рассеявшихся на элементе нейтронов E , МэВ (формула (1))	Относительная разность, $(E-E_{\max})/E$, %	Количество рассеяний
0,750	C	0,736	1,89	2
0,806	O	0,790	1,92	2
0,868	Mg	0,866	0,13	2
0,884	Si	0,871	1,46	2
0,918	Ca	0,907	1,20	2
0,938	Fe	0,929	0,87	2

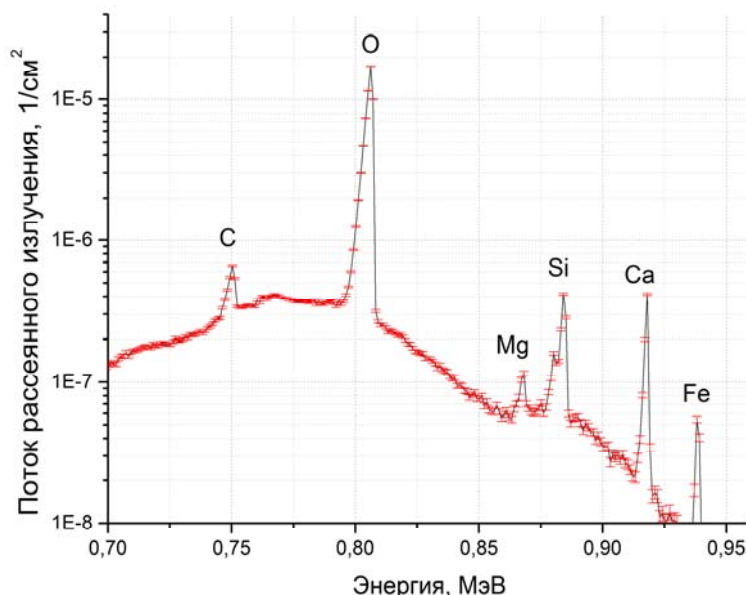


Рисунок 2. – Спектральный состав рассеянного излучения, отраженного под углом 45° при падении пучка с энергией 1Мэв перпендикулярно бетонной стенке, с указанием происхождения пиков

Моделирование спектра отраженного нейтронного излучения при падении монохроматического нейтронного пучка с энергией 1 МэВ под углом 45° к поверхности бетона. Направленный моноэнергетический источник расположен на расстоянии 1 метр от

бетонной стенки. Пучок нейтронов падает на поверхность бетона под углом 45° . Спектр отраженного излучения фиксируется на расстоянии 20 см от поверхности бетона в области, представляющей собой прямоугольник, образованный двумя плоскостями, выходящими из центра под углами 45° и 46° . Данные плоскости пересекает плоскость, расположенная под углом 45° к поверхности бетона. Схема моделирования представлена на рисунке 3.

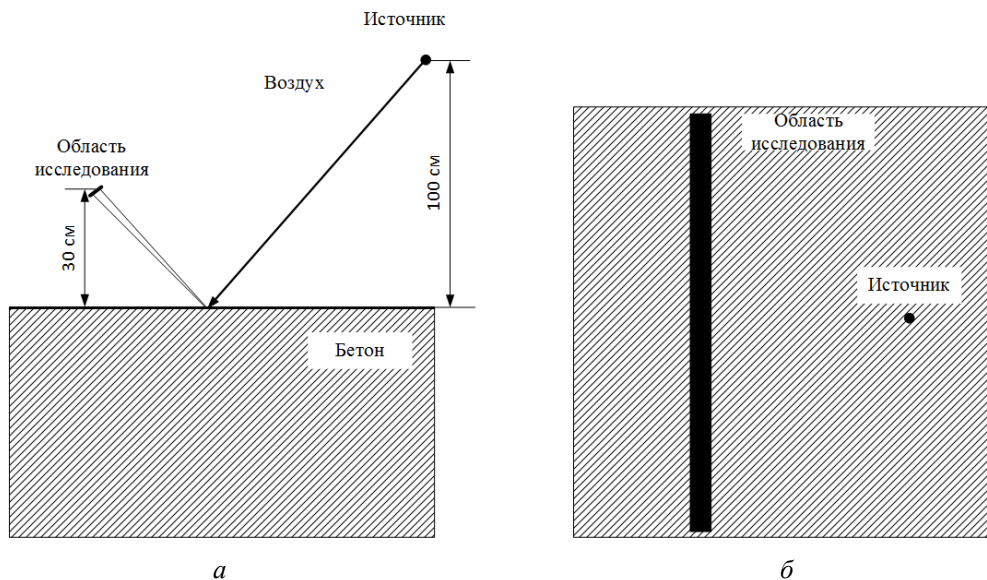


Рисунок 3. – Схема моделирования для падения нейтронного пучка под углом 45° на поверхность бетона: а – вид сбоку; б – вид сверху

В этом случае в спектре выделяется пять пиков. Энергии выделенных пиков, в предположении упругого рассеяния, были соотнесены с рассчитанными по формуле (1) энергиями рассеянных нейтронов. Результаты идентификации максимумов в спектре отраженного излучения представлены в таблице 3.

Таблица 3. – Результаты идентификации максимумов в спектре отраженного излучения при падении пучка на бетон под углом 45°

Максимум в модельном спектре E_{\max} , МэВ	Рассеивающий элемент	Средняя энергия упруго рассеявшихся на элементе нейтронов E , МэВ, (формула (1))	Относительная разность, $(E - E_{\max})/E$, %	Количество рассеяний
0,845	C	0,857	1,50	1
0,882	O	0,889	0,80	1
0,931	Si	0,933	0,25	1
0,951	Ca	0,952	0,14	1
0,964	Fe	0,964	0,02	1

Сравнение результатов моделирования с аналитическим расчетом показывает, что при падении на бетонную плоскость под углом 45° , нейтрон рассеивается в среднем один раз, прежде чем покинет бетон. Отсутствие пика магния связано с тем, что он из-за своей малой амплитуды неразличим на фоне пика кремния. Окончательный результат моделирования спектра отраженного излучения представлен на рисунке 4.

Заключение. Результаты моделирования подтверждают, что основной механизм взаимодействия нейтронов с бетоном – упругое рассеяние на элементах, входящих в состав бетона. Процессы рассеяния нейтронов в бетоне, приводящие к формированию отраженного излучения, смещают энергию нейтрона в низкоэнергетическую область. Наибольшее энергетическое смещение пики спектра нейтронов испытывают при перпендикулярном падении на бетонную стенку. Наблюдаемое уменьшение смещения пиков при отклонении от нормального падения связано со средним количеством упругих рассеяний нейтронов на элементах бетона. Высота пика при смещении зависит от массовой доли элемента, входя-

щего в бетон, и от среднего количества рассеяний. Основной по величине пик упругого рассеяния обусловлен присутствием в бетоне кислорода, массовая доля которого в исследуемом бетоне порядка 47 %.

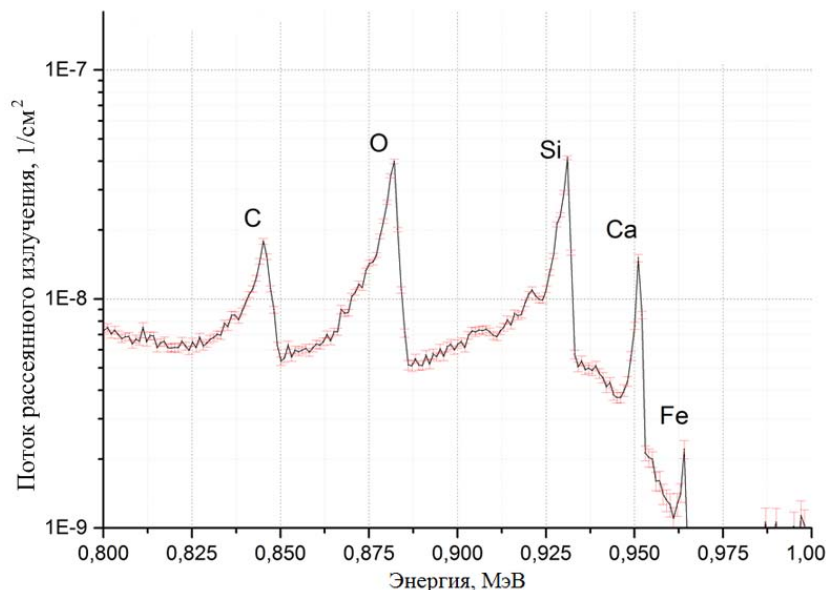


Рисунок 4. – Спектральный состав рассеянного излучения, отраженного под углом 45° при падении пучка с энергией 1МэВ под углом 45° к бетонной стенке, с указанием происхождения пиков

В реальных помещениях при многократном отражении нейтронного пучка от стен, будет действовать тот же механизм взаимодействия быстрых нейтронов (порядка 1 МэВ) с компонентами бетона и смещения пиков спектра.

Полученные результаты могут быть использованы для качественного определения компонент спектра отраженного излучения исходя из состава бетона и среднего количества упругих отражений, испытываемых нейтронами при распространении в помещении.

ЛИТЕРАТУРА

1. Hashemi S.M. Raisali G. Shokrani P. A study of the photoneutron dose equivalent resulting from a Saturne 20 medical linac using Monte Carlo method. / S.M. Hashemi, G. Raisali, P. Shokrani // *Nukleonika* – 2007. – Vol. 1 – P. 39-43.
2. Kazuaki K. Koji O. Takashi N. Yoshiaki K. Optimum shielding structure for the wall of medical LINAC facility. / K. Kazuaki, O. Koji, N. Takashi, K. Yoshiaki // *Progress in Nuclear Science and Technology* – 2014. – Vol. 4 – P. 276-279.
3. Бродер Д.Л. Зайцев Л.Н. Бетон в защите ядерных установок / Д.Л. Бродер, Л.Н. Зайцев – М.: Атомиздат, 1966. – 240 с.
4. Машкович В.П. Кудрявцева А.В. Защита от ионизирующих излучений / В.П. Машкович, А.В. Кудрявцева – М.: Энергоатомиздат, 1995. – 498с.
5. Рубчя В.А. Нейтронная физика и ядерная энергетика / В.А. Рубчя – СПб.: Изд-во С.-Петерб. ун-та, 2013 – 155 с.
6. Гусев Н.Г. Машкович В.П. Суворов А.П. Защита от ионизирующих излучений. Том 1: Физические основы защиты от излучений. / Н.Г. Гусев, В.П. Машкович, А.П. Суворов – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 512 с.
7. Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. – ICRP Publication 60 // *Ann. ICRP* 21 (1-3), 1991.
8. Briesmeister J.F. MCNP-A general monte Carlo N-particle Transport Code (Version 4B) / J.F. Briesmeister – Los Alamos National Laboratory, 1997. – 736 p.

ABOUT THE SPECTRUM OF THE MONOENERGETIC QUICK NEUTRONS BEAM REFLECTED FROM CONCRETE

Aliaksei Zaharadniuk

Belarusian State University, Minsk, Belarus

Georgy Gatskevich

National Cancer Centre of Belarus, Lesnoy, Belarus

Victor Minenko, PhD in Biological Sciences

Siamion Kutsen, PhD in Physical and Mathematical Sciences

Institute for Nuclear Problems of Belarusian State University, Minsk, Belarus

Purpose. The aim of this paper is to simulate the spectrum of reflected neutron radiation when a primary monoenergetic neutron beam (1 MeV) falls on a concrete surface.

Methods. Computer modeling using Monte Carlo method.

Findings. The spectra of the reflected radiation are calculated when the neutron beam hits the surface of the concrete. The maxima in the spectra are identified with the elemental composition of concrete

Application field of research. The obtained results can be used for energy spectrum estimations of the reflected neutrons in the bunker of the medical electron accelerator.

Conclusions. The processes of neutron scattering in concrete, leading to the formation of reflected radiation, shift the neutron energy into the low-energy region. The largest energy shift of the peak of the neutron spectrum is observed for the perpendicular incidence of the neutron beam on a concrete wall.

Keywords: computer modeling, concrete, neutrons, reflection, energy spectrum.

(The day of submitting: June 7, 2017)

REFERENCES

1. Hashemi S.M. Raisali G. Shokrani P. A Study of the photoneutron dose equivalent resulting from a Saturne 20 medical linac using Monte Carlo method. *Nukleonika*, 2007. Vol. 1. Pp. 39-43.
2. Kazuaki K. Koji O. Takashi N. Yoshiaki K. Optimum shielding structure for the wall of medical LINAC facility. *Progress in Nuclear Science and Technology*, 2014. Vol. 4. Pp. 276-279.
3. Broder L.D. Zaytsev L.N. *Beton v zashchite yadernykh ustanovok* [Concrete for protection of nuclear devices] Moscow: Atomizdat, 1966. (rus)
4. Mashkovich V.P. Kudryavtseva A.V. *Zashchita ot ioniziruyushchikh izlucheniye* [Ionizing radiation protection] Moscow: Energoatomizdat, 1995. (rus)
5. Rubchenya V.A. *Neytronnaya fizika i yadernaya energetika* [Neutron physics and Nuclear Energetics] Saint-Petersburg: University Press, 2013. (rus)
6. Gusev V.P. Mashkovich V.P. Suvorov A.P. *Zashchita ot ioniziruyushchikh izlucheniye* [Ionizing radiation protection] Vol. 1: Fizicheskie osnovy zashchity ot izlucheniye. Moscow: Energoatomizdat, 1989. (rus)
7. *Recommendations of the International Commission on Radiological Protection*. ICRP Publication 60. Ann. ICRP 21 (1-3), 1991.
8. Briesmeister J.F. *MCNP-A general monte Carlo N-particle Transport Code (Version 4B)*. Los Alamos National Laboratory, 1997. – 736 p.