

Определение поглощенной в биологическом образце дозы при смешанном гамма-нейтронном облучении

© С.С. Арзуманов,¹ В.В. Сафронов,² А.Н. Стрепетов¹

¹ Национальный исследовательский центр „Курчатовский институт“, 123182 Москва, Россия

² Федеральный научно-исследовательский центр „Кристаллография и фотоника“ РАН, 119333 Москва, Россия
e-mail: Arzumanov_SS@nrcki.ru

(Поступило в Редакцию 29 ноября 2017 г.)

Описана процедура и представлены результаты определения поглощенных доз при смешанном гамма-нейтронном облучении биологических образцов на горизонтальном канале исследовательского реактора ИР-8 НИЦ „Курчатовский институт“.

DOI: 10.21883/JTF.2018.10.46505.2580

При сравнении эффектов воздействия излучения на биологическую ткань авторы приводят условия облучения и поглощенные в образцах биоткани дозы [1–5]. При этом для корректного сравнения необходимо знать не только тип излучения, но и плотность потока излучения, его спектральный состав, геометрические размеры образца. А при смешанном, например, гамма-нейтронном облучении отдельно определять вклад в поглощенную дозу каждого вида излучения.

В настоящей работе описывается процедура определения поглощенной дозы при смешанном гамма-нейтронном облучении образцов мезенхимальных стволовых клеток (МСК) мышей. Облучение проводилось на горизонтальном экспериментальном канале (ГЭК-1) реактора ИР-8 НИЦ „Курчатовский институт“. Нейтронное и гамма излучения от активной зоны реактора формировались коллиматором из стали и борированного полиэтилена. Диаметр выходного отверстия коллиматора равнялся 14 мм. Образцы МСК в культуральной жидкости в тонкостенном пластиковом флаконе размещались непосредственно на выходе коллиматора. Поглощенные при облучении дозы (раздельно для нейтронного и гамма излучений) вычислялись методом Монте-Карло с использованием программного пакета Geant4 [6–8] версии 10.1.2. Электромагнитные взаимодействия моделировались с помощью входящего в этот пакет набора физических процессов G4EMLOW, применимого для диапазона энергий фотонов от 10 eV до 100 GeV. Для моделирования взаимодействий нейтронов применялся список физических процессов QGSP_BIC_HP, также входящий в состав Geant4, позволяющий моделировать взаимодействие с веществом нейтронов с энергиями вплоть до нескольких десятков MeV. В расчетах учитывались форма и состав образца, спектры и плотности нейтронного и гамма потоков.

Плотность нейтронного потока в выведенном пучке была измерена методом водяного куба [9] и равнялась $(7.2 \pm 0.6) \cdot 10^7 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ при мощности реак-

тора 6.2 MW. Точность измерения определяется паспортной точностью активности нейтронного источника, используемого при калибровочных измерениях. Постановка в пучок кадмиевого фильтра толщиной 1 мм показала, что доля нейтронов, имеющих энергию больше 0.5 eV, составляет 61%. Облучение образцов проводилось с использованием кадмиевого фильтра, соответственно плотность нейтронного потока была равна $(4.4 \pm 0.4) \cdot 10^7 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$. В расчетах принималось, что энергетический спектр этих нейтронов — это спектр Ферми, для которого зависимость нейтронного потока $N(E)$ от энергии нейтронов E имеет вид $N(E) \propto 1/E$ [10,11]. Это выражение справедливо при замедлении нейтронов в гомогенной слабо поглощающей среде на легких ядрах в реакторах на тепловых нейтронах. Реактор ИР-8 — это реактор водо-водяного типа, замедлителем является вода и бериллий отражателя, в котором начинается ГЭК-1. Верхняя граница нейтронного спектра по энергии $\sim 10 \text{ MeV}$ (граница энергетического спектра нейтронов при делении ^{235}U).

Мощность реактора в различных сериях облучения образцов менялась от 4.8 до 6.5 MW. Полагалось, что нейтронный и гамма потоки в этом интервале пропорциональны мощности реактора.

Образцы клеток в культуральной жидкости в течение нескольких минут оседали и собирались в клубок диаметром примерно 4 мм вблизи дна флакона. Поэтому в расчетах поглощенной дозы использовался фантом в виде цилиндра диаметром и длиной 4 мм. Эта форма геометрически близка к форме используемого флакона. В реальности столб жидкости во флаконе был примерно на 10 мм выше интересующей нас области, однако расчеты показали, что на величину поглощенной дозы он практически не влияет.

На рис. 1 представлена расчетная зависимость мощности поглощенной в фантоме дозы D_n при облучении нейтронами в энергетическом диапазоне $0.5 - 1 \cdot 10^7 \text{ eV}$ от расстояния d по оси от основания цилиндра, через

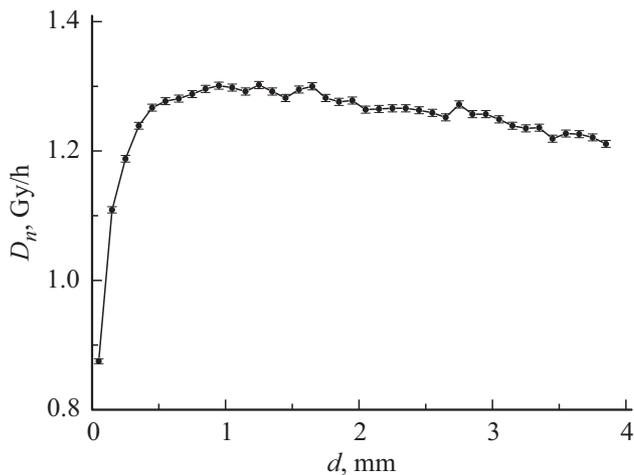


Рис. 1. Расчетная зависимость мощности поглощенной дозы от расстояния d при облучении образца нейтронами.

которое происходит облучение. Здесь и во всех расчетах ниже направление пучка совпадает с осью цилиндрического фантома, и расчеты выполнены для фантома из воды.

Из рисунка видно, что мощность поглощенной дозы максимальна при $d \approx 0.9$ mm и затем медленно падает с ростом d , уменьшаясь на 5–7% при $d = 4$ mm. Среднее по объему значение мощности поглощенной дозы составляет 1.24 ± 0.02 Gy/hr. С учетом того что изначально плотность нейтронного потока была определена с точностью примерно 8%, за мощность поглощенной дозы при нейтронном облучении принята величина 1.24 ± 0.10 Gy/hr при мощности ядерного реактора 6.2 MW.

В расчете поглощенной дозы при облучении образцов гамма-квантами основная трудность заключалась в определении плотности потока и спектрального состава пучка гамма-квантов работающего реактора. При решении этой задачи был использован подход, основанный на дозиметрических измерениях.

Прежде всего, был определен диапазон энергий гамма-квантов. На пути от активной зоны реактора до входа в коллиматор находятся примерно 10 cm воды, 10 cm бериллия, 0.5 cm циркония и 3 m воздушного промежутка. Поэтому в коллиматор попадают гамма-кванты с энергией не меньше 0.1 MeV. Двигаясь по коллиматору, они испытывают комптоновское рассеяние на стенках, при этом в пучке остаются только гамма-кванты, рассеянные на малые углы, и соответственно мало меняющие свою энергию. Выбор верхней границы спектра основан на результатах расчетных работ [12–14], которые показывают практическое отсутствие гамма-квантов с энергиями, большими 3–4 MeV. Исходя из сказанного, дальнейшие расчеты были выполнены для диапазона энергий гамма-квантов 0.1–4.0 MeV.

Далее была измерена зависимость $H(x)$ мощности амбиентной дозы (МАД), создаваемой пучком

гамма-квантов, проходящих сквозь свинцовые экраны различной толщины x (рис. 2). В измерениях использовался дозиметр Radiagem 2000 фирмы Canberra с блоком детектирования STTC, который может работать в больших гамма потоках. Дозиметр фиксировался на пучке вблизи выхода коллиматора в положении наибольшего счета. Затем снимались его показания при постановке на выходе коллиматора свинцовых экранов различной толщины. Мощность реактора при измерениях была равна 6.5 MW. Сплошная кривая на рис. 2 — это аппроксимация экспериментальных точек экспонентой. Из параметров аппроксимации следует, что пучок в целом с хорошей точностью ведет себя как пучок с узким энергетическим диапазоном с энергией гамма-квантов $E_\gamma \sim 2.1$ MeV.

Следующим шагом весь интервал энергий гамма-квантов был поделен на подынтервалы разной ширины по числу используемых свинцовых экранов. Ширины подынтервалов определялись видом зависимости линейного коэффициента ослабления потока гамма-квантов

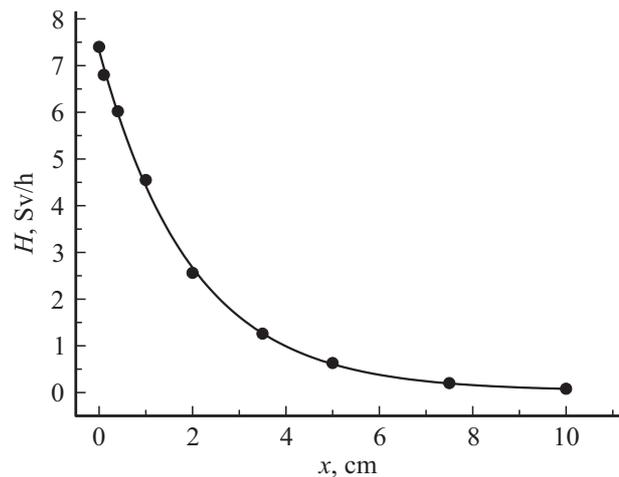


Рис. 2. Измеренная зависимость МАД создаваемой исследуемым пучком гамма-квантов, проходящим сквозь свинцовые экраны, от толщины экрана.

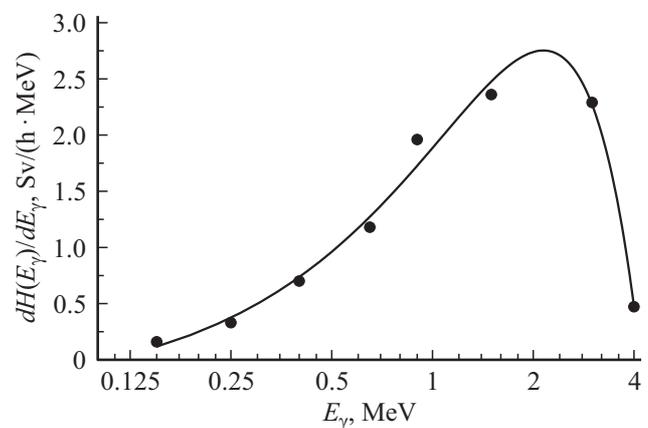


Рис. 3. Дифференциальный спектр МАД на выходе коллиматора.

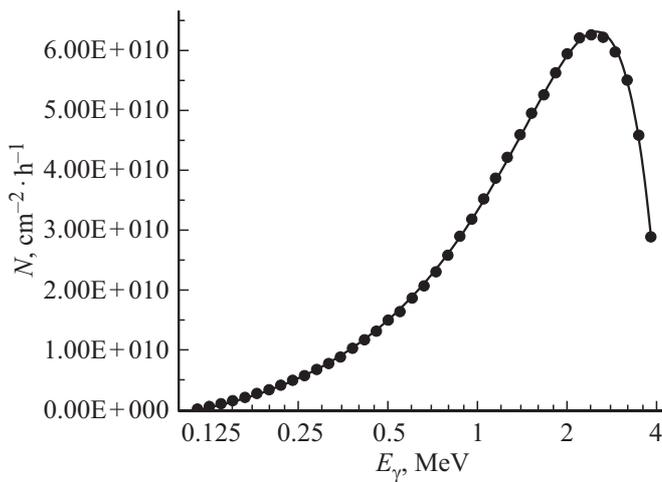


Рис. 4. Восстановленная зависимость плотности потока гамма-квантов от энергии в месте облучения образцов.

$\mu(E_\gamma)$ от E_γ и в каждом из них $\mu(E_\gamma)$ считалась постоянной. Тогда для каждого подынтервала закон ослабления МАД свинцовым экраном будет иметь вид $N = N_0 \exp[-\mu(E_\gamma)x]$, где N_0 — МАД падающего пучка. Используя это соотношение, а также данные по ослаблению пучка гамма-квантов свинцовыми экранами, можно для каждого подынтервала восстановить значения МАД. На рис. 3 эти значения МАД, пересчитанные на единичный интервал энергии, обозначены точками. Сплошная кривая — аппроксимация полученных значений гладкой кривой.

Далее в диапазоне энергий гамма-квантов 0.1–4.0 MeV были выбраны 39 значений E_γ с логарифмическим распределением внутри диапазона. Для каждого значения E_γ рассчитывалась соответствующая МАД. Затем в соответствии с определением МАД выполнялся расчет плотности потока гамма-квантов N с энергией E_γ , необходимого для получения мощности поглощенной дозы, равной МАД для данной энергии. Расчеты выполнялись для цилиндрического (диаметром и длиной 30 см) водного фантома, близкого по свойствам шаровому фантому МКРЕ, для точки, расположенной на оси цилиндра на расстоянии 10 мм от основания [15]. Поток гамма-квантов направлялся также по оси цилиндра. Полученный таким образом энергетический спектр плотности потока гамма-квантов представлен на рис. 4. Максимум спектра приходится на диапазон энергий 2.0–2.5 MeV и, по-видимому, в значительной степени такая форма спектра обеспечивается вкладом гамма-квантов с энергией $E_\gamma = 2.23$ MeV из реакции поглощения нейтронов на водороде воды.

С целью проверки восстановленного спектра был выполнен расчет мощности поглощенной дозы для 30-сантиметрового водяного фантома на расстоянии 10 мм от основания по оси. Полученная величина 7.5 Gy/hr хорошо согласуется с экспериментально изме-

ренной мощностью амбиентной дозы 7.4 Sv/hr (показания дозиметра без свинцового экрана на пути пучка).

С этим спектром был выполнен расчет мощности поглощенной дозы D_γ в водном фантоме диаметром и длиной 4 мм, принятом за аналог облучаемых образцов, а также в водном фантоме диаметром и длиной 30 см. Как и в ранее выполненных расчетах, использовался пакет Geant4. Результаты расчета приведены на рис. 5. Как видно из рисунка, мощность поглощенной дозы для 30-сантиметрового фантома заметно превышает аналогичную величину для 4-миллиметрового фантома, что связано с увеличением доли перерассеянных гамма-квантов, дающих вклад в поглощенную дозу. Также из рисунка видно, что наблюдается заметное увеличение поглощенной дозы при удалении от основания. Это означает, что в процессе облучения необходимо обеспечить перемешивание раствора, содержащего образцы клеток.

Среднее по объему значение мощности поглощенной дозы при облучении гамма-квантами для 4-миллиметрового фантома равно 2.47 Gy/hr. Учитывая, что дозиметрические измерения не обеспечивают точность лучше 20%, окончательному результату мощности поглощенной дозы приписывается точность в 20%. Статистическая погрешность всех выполненных расчетов на порядок ниже.

Окончательно в пересчете на 1 MW мощности реактора имеем

$$\bar{D}_n = 0.20 \pm 0.02 \text{ Gy/hr}, \quad \bar{D}_\gamma = 0.38 \pm 0.08 \text{ Gy/hr}.$$

Аналогичный цикл измерений и расчетов был выполнен с использованием дозиметра-радиометра МКС-АТ1117М с блоком детектирования БДКГ-01. Значение средней мощности поглощенной дозы в пересчете на 1 MW мощности реактора составило $\bar{D}_\gamma = 0.45 \pm 0.09 \text{ Gy/hr}$. Таким образом, значения \bar{D}_γ , полученные с использованием двух различных дозимет-

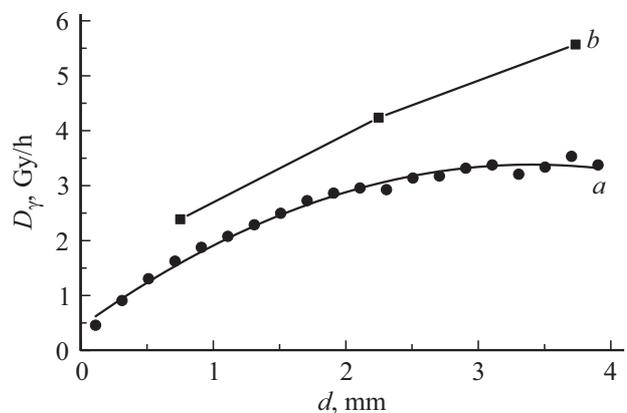


Рис. 5. Расчетная зависимость мощности поглощенной дозы при облучении образца гамма-пучком от расстояния d вдоль оси цилиндра для 4-миллиметрового фантома (a) и начальная часть такой же зависимости для 30-сантиметрового фантома (b).

рических приборов, в пределах заявленной точности непротиворечивы.

Знания величин \overline{D}_n , \overline{D}_γ и мощности реактора позволяют определить время облучения образцов для задаваемой поглощенной дозы.

Работа выполнена при частичной поддержке гранта РФФИ 15-29-01234-офи_м.

Список литературы

- [1] Ульяненко С.Е., Лычагин А.А., Соколов В.А. и др. // Медицинская физика. 2006. № 4. С. 10–17.
- [2] Матчук О.Н., Замулаева И.А., Селиванова Е.И. и др. // Радиационная биология. Радиоэкология. 2012. Т. 52. № 3. С. 261–267.
- [3] Москалева Е.Ю., Жорова Е.С., Семочкина Ю.П. и др. // Цитология. 2017. Т. 59. № 4. С. 271–278.
- [4] Посыпанова Г.А., Москалева Е.Ю., Родина А.В. и др. // Радиационная биология. Радиоэкология. 2016. Т. 56. № 1. С. 35–43. DOI: 10.7868/50869803116010124
- [5] Ульяненко С.Е., Корякин С.Н., Исаева Е.В. и др. // Радиационная биология. Радиоэкология. 2016. Т. 56. № 6. С. 598–605. DOI: 10.7868/5086980311606014X
- [6] Электронный ресурс. Режим доступа: <http://geant4.cern.ch>
- [7] Agostinelli S., Allison J., Amato A. et al. // Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. 2003. Vol. A506. N 3. P. 250–303. DOI: 10.1016/50168-9002(03)01368-8
- [8] Allison J., Walker A., Amato A. et al. // IEEE Trans. Nucl. Sci. 2006. Vol. 53. N 1. P. 270–278. DOI: 10.1109/TNS.2006.869826
- [9] Арзуманов С.С., Морозов В.И., Панин Ю.Н., Стрепетов А.Н. Ноу-хау НИЦ „Курчатовский институт“. Рег. № 143/2013 от 28.03.2013.
- [10] Баранник А.А. Лекции по курсу „Теория переноса нейтронов“. М.: НИЯУ МИФИ, 2012. 164 с.
- [11] Гуревич И.И., Протасов В.П. Нейтронная физика. М.: Энергоатомиздат, 1997. 416 с.
- [12] Гарусов Е.А., Грачев С.Д., Петров Ю.В. Препринт ЛИЯФ № 1473. Ленинград. 1989. 25 с.
- [13] Брискман Б.А., Бондарев В.Д., Захаров Л.Н. // Атомная энергия. 1974. Т. 37. № 3. С. 208–211. [Briskman B.A., Bondarev V.D., Zakharov L.N. // Atomic Energy. 1974. Vol. 37. N 3. P. 920–924.].
- [14] Кошелев А.С., Хоруджий В.Л. // ВАНТ. Серия: Физика ядерных реакторов. 2013. № 3. С. 65–82.
- [15] Комочков М.М. Дозиметрия ионизирующих излучений. Дубна: Международный университет природы, общества и человека, 2006. 76 с.