

ВЫЧИСЛЕНИЕ ОБЭ НЕЙТРОНОВ НА ОСНОВЕ ДАННЫХ СПЕКТРОВ ЛПЭ ПРОТОНОВ ОТДАЧИ

А.Н. Моисеев, В.А. Климанов, Н.И. Морозова
Научный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
A_Moiseev@bk.ru

В работе рассмотрена возможность использования спектров протонов отдачи для расчёта ОБЭ нейтронных источников разного спектрального состава. Проведено сравнение, которое показало хорошее согласование расчётных и экспериментальных данных.

При использовании источников нейтронов возникает необходимость в вычислении относительной биологической эффективности (ОБЭ) этих источников – как для целей радиационной безопасности, так и для терапевтического использования нейтронного излучения. Вместе с тем, в радиобиологии сложилась ситуация, когда такие данные получают только на основе эмпирических опытов. Большинство источников нейтронов, используемых в лучевой терапии, имеет сложный спектральный состав, зависящий, помимо непосредственно используемой ядерной реакции, от геометрии коллиматора, источника и используемых фильтров. Это делает практически невозможным использование известных радиобиологических данных для вычисления ОБЭ конкретного источника. Авторы предположили, что для вычисления ОБЭ нейтронов можно использовать данные спектров протонов отдачи.

Использование предложенного подхода возможно при выполнении ряда предположений. Во-первых, протоны отдачи должны составлять большую часть нейтронной дозы. Во-вторых, должны быть известны спектры протонов отдачи. И наконец, необходимы данные зависимости ОБЭ протонов от их линейной передачи энергии (ЛПЭ). Все эти проблемы рассмотрены в настоящей работе. В качестве среды, в которой изучались упомянутые процессы, использовалась лёгкая вода, которая является признанным ссылочным материалом для биологической ткани.

Для оценки вклада протонов отдачи в дозу от нейтронов были использованы сечения взаимодействия нейтронов с атомами водорода и кислорода из библиотеки *ENDF-B.VII*, обработанные в программе *PrePRO-2007*. Графически сечения представлены на рис.1.

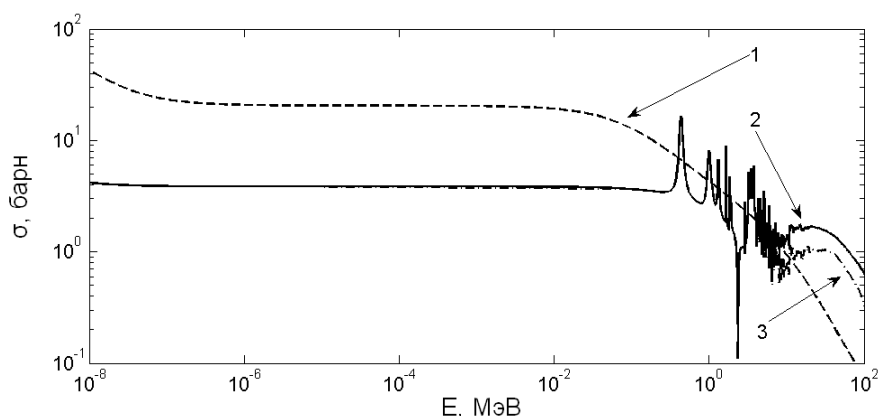


Рис. 1. Сечения взаимодействия в зависимости от энергии нейтронов: 1 – упругое рассеяние на ^1H , 2 – полное сечение взаимодействие с ^{16}O , 3 – упругое рассеяние на ^{16}O

Если считать, что нейтрон при упругом рассеянии в среднем теряет половину своей энергии, то можно получить оценку вклада протонов отдачи в дозу от нейтронов, которая представлена на рис.2. В соответствии с этой оценкой, как минимум 70% дозы в воде для практически значимого диапазона энергий нейтронов составляет доза от протонов отдачи.

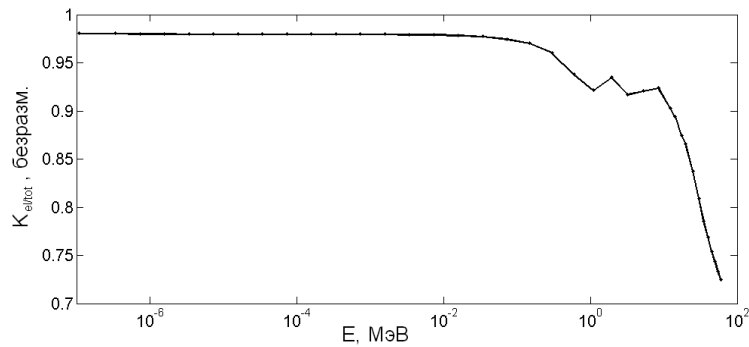


Рис. 2. Оценка вклада протонов отдачи в дозу от нейтронов (без учёта дозы от вторичных гамма-квантов) в зависимости от энергии нейтронов

Спектры ЛПЭ протонов отдачи были вычислены на основании данных по энергетической зависимости ЛПЭ протонов МКРЕ [7]. На основании спектров были получены средние значения ЛПЭ протонов отдачи для разных энергетических групп нейтронов. Эти данные и данные из работы [2] представлены на рис.3. Мы видим некоторое рассогласование в данных при сохранении общей тенденции.

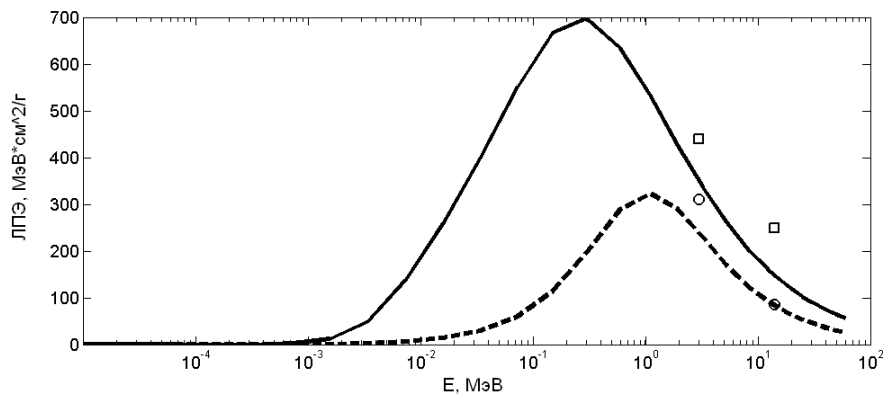


Рис. 3 Среднее значение ЛПЭ протонов отдачи в зависимости от энергии нейтронов: сплошная кривая – дозовые средние, пунктирная кривая – средние по пробегу, □ и ○ – соответственно средние по дозе и пробегу из работы [2]

При больших дозах флуктуациями дозы в клеточном ядре можно пренебречь. При учёте того факта, что ОБЭ с ростом ЛПЭ растёт до достижения максимума в районе 100 кэВ/мкм, это позволяет говорить, что поведение среднего ЛПЭ протонов отдачи отражает зависимость ОБЭ от энергии нейтронов. Эти данные (рис. 3) также согласуются с экспериментальными данными [5], в которых установлено, что максимум ОБЭ соответствует нейтронам с энергией 0,3 МэВ.

Однако для получения точного значения ОБЭ нейтронов конкретного спектра требуется свернуть спектр ЛПЭ протонов отдачи для этих нейтронов и зависимость ОБЭ от ЛПЭ. В работе [6] представлена зависимость выживаемости от ЛПЭ для клеток V79 китайского хомячка вида

$$S_F(D, L) = \exp\left[-\frac{S}{0.16L} \{1 - \exp(-(L/L_1)^2)\} D\right],$$

(1)

где D – доза в Гр, L – ЛПЭ в кэВ/мкм, S – эффективное сечение ядра клетки в мкм², L_1 – параметр, определяющий положение максимума ОБЭ.

Для клеток китайского хомячка лучшее согласование экспериментальных и расчётных данных получено для $S=50$ мкм² и $L_1=152$ кэВ/мкм.

Для спектра $f_D(L)$ вклада протонов отдачи с определённым значением ЛПЭ L в нейтронную дозу D выражение (1) модифицируется в (2):

$$S_F(D, L) = \exp\left[-\frac{S}{0.16} \int_L \{1 - \exp(-(L/L_1)^2)\} \frac{f_D(L)}{L} dL * D\right]$$

(2)

В работе [4] представлены экспериментальные данные облучения клеток V79 китайского хомячка моноэнергетическими нейтронами с энергией 0,32 МэВ. По этим данным авторы настоящей статьи вычислили по МНК коэффициент k в показателе экспоненты $S_F(D) = \exp(-kD)$ (3), который оказался равным 0.86 Гр⁻¹.

Авторы также произвели интегрирование в формуле (2) для спектра протонов отдачи нейтронов группы 0.2-0.4 МэВ и получили значение $k=0.84$ Гр⁻¹. Это показывает, что применение предложенного подхода вполне оправданно, однако требует знания зависимости $k(L)$, которая известна лишь для ограниченного числа клеток.

В работе [2] представлены данные зависимости ОБЭ от ЛПЭ шести линий клеток человеческого происхождения для 10% уровня выживания. Пять из этих шести линий лежат достаточно плотно, что позволило интерполировать эти данные – после соответствующего сглаживания – кубическими сплайнами. Это, в свою очередь, позволило рассчитать соответствующие значения ОБЭ для различных спектров нейтронов, исследованных в данной работе. Соответственно, для нейтронов спектра деления Cf-252, D-T реакции и нейтронов спектра p(66)+Be(40) [3] были получены следующие значения ОБЭ: 1.85, 1.41 и 1.37. По данным работы [1] о спектре нейтронов канала реактора, оптимизированного для нейтрон-захватной терапии, вычисленное значение ОБЭ составило 1.98. Однако, при вычислениях не учитывались тяжёлые ядра отдачи, вносящие существенный вклад для нейтронов высокой энергии, и доза от вторичных γ -квантов, что может быть источником значительных ошибок для нейтронов спектра реакции p(66)+Be(40) и теплового спектра соответственно.

Таким образом, предложенный авторами подход позволяет производить вычисление ОБЭ нейтронов различного спектрального состава, что может существенно сократить затраты на проведение радиобиологических исследований. Однако основным лимитирующим в данном случае фактором является недостаточный уровень развития теоретических моделей зависимости клеточной радиочувствительности от ЛПЭ ионизирующего излучения и других параметров.

Данная работа проводится в рамках ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 годы.

1. Кураченко Ю.А. Реакторные пучки для лучевой терапии // дисс., Обнинск, 2008.
2. Alpen E. Radiation Biophysics, 2nd ed. // Academic Press, USA, 1998
3. Jones D., Symons J., Fulcher T. et al. Neutron fluence and kerma spectra of a p(66)/Be(40) clinical source // Med. Phys., Vol. 19, No. 5, 1992.
4. Kubota N., Okada S., Nagamoto S. et al. Mutation Induction and RBE of low-energy neutrons in V79 cells // J. Radiat. Res., 40, pp.21-27, 1999
5. Miller R., Marino S., Martin S. et al. Neutron-energy-dependent cell survival and oncogenic transformation // J. Rad. Res., 40, pp. 53-59, 1999.
6. Sato Y., Soga F. Analysis of Relative Biological Effectiveness of High Energy Heavy Ions in Comparison to Experimental Data // J. Radiat. Res., 38, pp.103-109, 1997
7. Stopping powers and ranges for protons and alpha-particles // ICRU Report #49, 1993.

NEUTRON RBE ESTIMATION IN TERMS OF RECOIL PROTONS LET SPECTRA

A.N. Moiseev, V.A. Klimanov, N.I. Morozova
MEPhI

Authors demonstrate in present paper the possibility of neutron RBE estimation based on recoil protons LET spectra. This approach can be very useful for RBE calculation for different neutron sources with known spectra. The results of calculation agree well with experimental data.