

# РАСЧЕТ БИОЛОГИЧЕСКОЙ ЗАЩИТЫ НЕЙТРОННОГО ИСТОЧНИКА, УПРАВЛЯЕМОГО УСКОРТЕЛЕМ ЭЛЕКТРОНОВ

*А.В. Ганн, В.В. Ганн, Г.Д. Пугачев, И.И. Шаповал*

*Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт»,  
Харьков, Украина*

*E-mail: gann@kipt.kharkov.ua*

Проведены предварительные расчеты радиационного фона за биологической защитой нейтронного источника. Методом эквивалентного источника с помощью программы MCNPX рассчитаны пространственное, угловое и энергетическое распределения нейтронов деления, прошедших через биологическую защиту. Показано, что угловое распределение нейтронов за биологической защитой является весьма анизотропным, а поток фотонейтронов с  $E > 10$  МэВ превышает поток нейтронов деления, поэтому при проектировании биологической защиты следует учитывать высокоэнергетические фотоны и фотонейтроны. Обсуждены методы снижения уровня высокоэнергетического нейтронного фона за биологической защитой нейтронного источника.

## ВВЕДЕНИЕ

В ННЦ ХФТИ проводятся работы по созданию нейтронного источника на основе подкритической сборки из низкообогащенного урана, управляемой электронным ускорителем. Конструкция нейтронного источника была предложена сотрудниками Аргоннской национальной лаборатории [1]. Установка может быть использована как мощный источник нейтронов для фундаментальных и прикладных исследований в области ядерной физики, физики твердого тела, радиационного материаловедения, а также для получения медицинских изотопов. При этом важная роль отводится вопросам ядерной и радиационной безопасности всей установки как в условиях нормальной эксплуатации, так и при возможных нарушениях нормальных условий [2].

При проектировании биологической защиты следует особо учитывать высокоэнергетические фотоны и фотонейтроны, рожденные в нейтронообразующей мишени. С целью определения вклада высокоэнергетических фотонейтронов проведены расчеты радиационного фона от нейтронного источника за биологической защитой для параметров ускорителя электронов  $E_0 = 200$  МэВ,  $P = 100$  кВт.

Проведена оценка радиационного фона как от высокоэнергетических фотонейтронов, родившихся в мишени-конвертере, так и от нейтронов деления, родившихся в топливных элементах подкритической сборки. С помощью программы MCNPX рассчитаны пространственное, угловое и энергетическое распределения нейтронов, прошедших через биологическую защиту.

## 1. МЕТОДИКА РАСЧЕТОВ

Модель нейтронного источника и радиационной защиты показана на Рис.1, а размеры элементов защиты из графита, воды и бетона представлены в таблице.

Расчеты проводились методом Монте-Карло с использованием программы MCNPX. Для снижения статистических погрешностей при расчете весьма редких событий прохождения нейтронов через защиту применялась специальная методика, заложенная в код MCNPX.

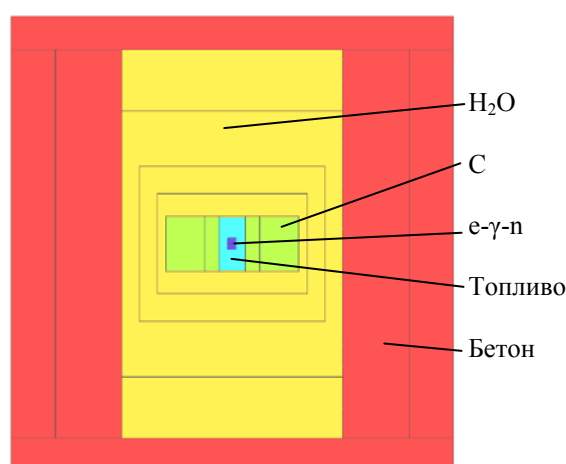


Рис. 1. Расчетная модель сборки

Материал	Высота, м	Диаметр, м
Топливо	0,5	0,24
Графит	0,5	1,2
Вода	3,5	2,0
Легкий бетон	4,1	4,0

Спектр нейтронов в активной зоне состоит из двух компонентов: фотонейтронов, выходящих из е-γ-п-конвертера, и нейтронов деления, образующихся в подкритической сборке под действием пучка электронов и γ-квантов. Спектр нейтронов в активной зоне подкритической сборки, управляемой ускорителем, представлен на Рис.2. Нейтроны с энергией  $E_n < 20$  МэВ образуются, в основном, за счет процессов деления, а нейтроны с энергией  $E_n > 20$  МэВ – это фотонейтроны, их количество на 5 порядков меньше, чем число нейтронов деления, но их проникающая способность на шесть порядков выше (см. зависимость  $K(E)$  на Рис.3).

С целью экономии машинного времени был применен метод эффективного источника: были использованы результаты, полученные ранее [3] – значения выхода нейтронов из е-γ-п-конвертера, и смоделированы источники нейтронов деления и фотонейтронов, с которыми и были проведены все дальнейшие расчеты.

## 2. РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

Проведены отдельно расчеты потоков нейтронов деления и фотонейтронов за биологической защитой и проведено сравнение потока высокоэнергетических фотонейтронов (с энергией  $E_n > 10$  МэВ), рожденных в нейтронообразующей мишени, с потоком нейтронов деления, родившихся в топливе подкритической сборки.

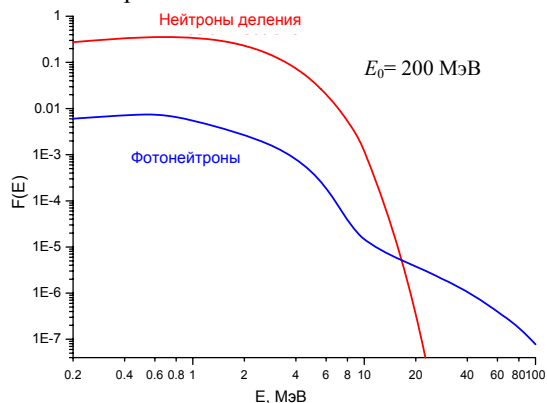


Рис.2. Спектры фотонейтронов и нейтронов деления в активной зоне

На Рис.3 изображены спектры фотонейтронов  $Y_{pn}(E_n)$  и нейтронов деления  $Y_{fis}(E_n)$ , получающиеся на выходе после прохождения нейтронами слоев графита, воды и легкого бетона в биологической защите подкритической сборки, управляемой ускорителем электронов с энергией  $E_0 = 200$  МэВ. За защитой поток высокоэнергетических фотонейтронов превышает поток нейтронов деления [4].

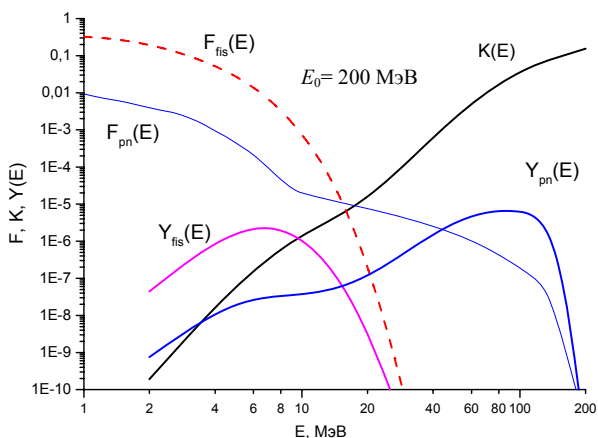


Рис.3. Спектры фотонейтронов  $F_{pn}(E_n)$  и нейтронов деления  $F_{fis}(E_n)$  в активной зоне и спектры фотонейтронов  $Y_{pn}(E_n)$  и нейтронов деления  $Y_{fis}(E_n)$  за защитой;  $K(E_n)$  — коэффициент прохождения как функция энергии нейтрона  $E_n$

На Рис.4 представлены угловые распределения фотонейтронов и нейтронов деления за защитой при энергии электронного пучка  $E_0 = 200$  МэВ. Угловое распределение нейтронов деления за биологической защитой является весьма анизотропным, причем максимум нейтронного потока располагается в центральной плоскости сборки.

Поток фотонейтронов с  $E_n > 10$  МэВ за защитой превышает поток нейтронов деления. Имеется превышение потока нейтронов с энергией  $E_n > 100$  МэВ

более чем в 10 раз. Это связано с их высокой проникающей способностью.

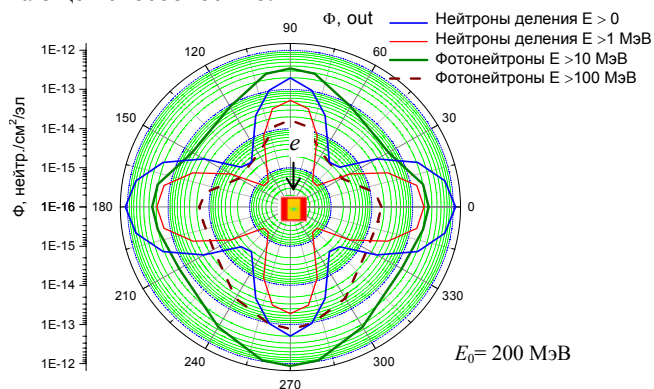


Рис.4. Угловое распределение фотонейтронов и нейтронов деления за защитой

На Рис.5 изображена зависимость функции выхода нейтронов за защиту от энергии электронного пучка. Из рисунка следует, что снижение энергии электронов  $E_0$  с 200 до 100 МэВ ведет к уменьшению потока фотонейтронов за биологической защитой в 25 раз.

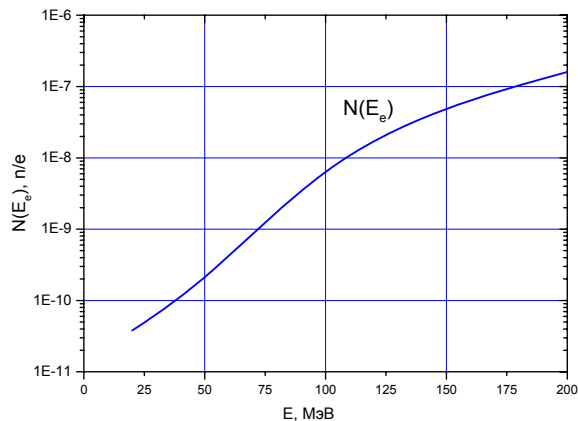


Рис.5. Зависимость коэффициента прохождения нейтронов от энергии пучка электронов  $E_0$

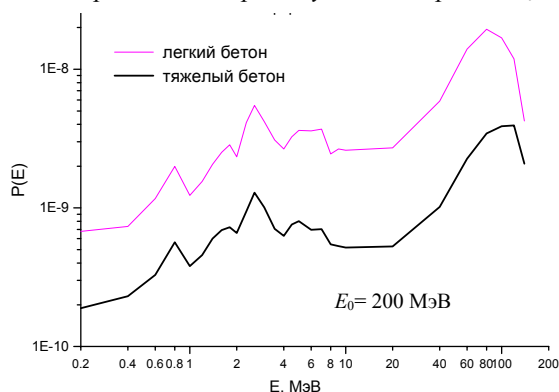


Рис.6. Спектры фотонейтронов за защитой из легкого и тяжелого бетона

На Рис.6 представлены результаты расчета спектра фотонейтронов за защитой от высокоэнергетических нейтронов из легкого и тяжелого бетона, из которого видно, что применение тяжелого бетона имеет более высокую эффективность.

## ВЫВОДЫ

Высокоэнергетические фотонейтроны, рожденные в  $e-\gamma-n$ -конвертере, вносят существенный вклад в величину потока нейтронов за биологической защитой. При проектировании биологической защиты следует учитывать высокоэнергетические фотонейтроны, а не только нейтроны деления, рожденные в подкритической сборке.

Уровень высокоэнергетического нейтронного фона за биологической защитой нейтронного источника может быть снижен путем выбора энергии электронного пучка и применения тяжелого бетона.

Снижение энергии электронного пучка с 200 до 100 МэВ (при той же мощности пучка) приводит к уменьшению уровня фона быстрых фотонейтронов за биологической защитой приблизительно в 12 раз.

Применение в защите тяжелого бетона снижает поток высокоэнергетических фотонейтронов в 3 раза.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Y. Gohar, I. Bolshinsky, D. Naberezhnev, et al. Accelerator Driven Sub-Critical Facility: Conceptual Design Development // *Nucl. Instrum. and Meth. in Phys. Res. A*. 2006, v.562, p.870-874.
2. Z. Zhong, Y. Gohar. Biological Shield Design and Analysis of KIPT Accelerator Driven Subcritical Facility // *Nuclear Technology*. 2009, v.168, №3, p.871.
3. А.В. Ганн, В.В. Ганн, Г.Д. Пугачев, И.И. Шаповал, И.А. Шаповал, В.С. Шестакова. Зависимость скорости образования радионуклидов  $^{13}\text{N}$  и  $^{15}\text{O}$  в воздухе от максимальной энергии и спектра тормозного излучения // *Вопросы атомной науки и техники. Серия «Ядерно-физические исследования»* (53). 2010, №2, с.178-180.
4. А.В. Ганн, В.В. Ганн, Г.Д. Пугачев. Расчет биологической защиты нейтронного источника, управляемого ускорителем электронов // *Тезисы докладов на VIII конференции по физике высоких энергий, ядерной физике и ускорителям*. 2010, Харьков, ННЦ ХФТИ.

*Статья поступила в редакцию 05.10.2011 г.*

## EVALUATION OF SHIELDING EFFICIENCY FOR ELECTRON ACCELERATED DRIVEN SUB-CRITICAL ASSEMBLY FACILITY

*A.V. Gann, V.V. Gann, G.D. Pugachev, I.I. Shapoval*

Preliminary evaluations of neutron flux behind the neutron source biological shielding were performed. Using the equivalent source method and MCNPX code were calculated spatial, angular and energy distributions for neutrons, which were created in sub-critical assembly and passed through the biological shield. The angular distribution of neutrons behind the biological shield is shown to be quite anisotropic. Evaluation of the efficiency for biological shielding for high-energy photons and neutrons was performed. The flux of high-energy ( $E > 10$  MeV) photo-neutrons, which were created in  $e-\gamma-n$  converter, was found to be higher than flux of fission neutrons behind the biological shield. Methods of reducing of the high-energy photo-neutron flux behind the biological shield were discussed.

## РОЗРАХУНОК БІОЛОГІЧНОГО ЗАХИСТУ НЕЙТРОННОГО ДЖЕРЕЛА, КЕРОВАНОВОГО ПРИСКОРЮВАЧЕМ ЕЛЕКТРОНІВ

*A.V. Gann, V.V. Gann, G.D. Pugachev, I.I. Shapoval*

Проведені попередні розрахунки радіаційного фону за біологічним захистом нейтронного джерела. Методом еквівалентного джерела за допомогою програми MCNPX розраховані просторовий, кутовий і енергетичний розподіли нейтронів ділення, що пройшли через біологічний захист. Показано, що кутовий розподіл нейтронів за біологічним захистом є вельми анізотропним, а потік фотонейтронів з  $E > 10$  MeV перевищує потік нейтронів ділення, тому при проектуванні біологічного захисту слід враховувати високоенергетичні фотони і фотонейтрони. Обговорені методи зниження рівня високоенергетичного нейтронного фону за біологічним захистом нейтронного джерела.