

## РАСЧЕТНАЯ ОЦЕНКА ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ДОЗЫ ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЯ В ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОМ ЗАЛЕ НЕЙТРОННОГО ГЕНЕРАТОРА НГ-11И

**А. В. Долгополов, В. В. Гаганов, И. Ю. Дроздов, М. М. Кузьма**

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ, г. Саров Нижегородской обл.

Статья поступила в редакцию 29.07.2021, после доработки – 07.09.2021, принята к публикации – 18.11.2021

Проведены расчетные исследования полей ДТ-нейтронов и гамма-квантов, образующихся при работе нейтронного генератора НГ-11И. Показано влияние элементов конструкций нейтронного генератора и дополнительного оборудования в экспериментальном зале на формирование спектра нейтронов и дозы гамма-излучения. Представлен расчет пространственного распределения мощности эквивалентной дозы гамма-излучения в экспериментальном зале генератора НГ-11И.

**Ключевые слова:** нейтронный генератор, спектр нейтронов, угловое распределение нейтронов, мощность эквивалентной дозы.

**CALCULATION ESTIMATE OF SPACE DISTRIBUTION FOR GAMMA-RADIATION DOSE IN AN EXPERIMENTAL HALL OF NEUTRON GENERATOR NG-11I / A. V. Dolgopolov, V. V. Gaganov, I. Y. Drozdov, M. M. Kuz'ma** // There were undertaken calculation researches of the fields of DT-neutrons and gamma-quanta formed during the NG-11I neutron generator operation. There was demonstrated the influence of the neutron generator structural elements and secondary equipment available in the experimental hall on the formation of neutron spectrum and gamma-radiation dose. The space distribution calculation of gamma radiation equivalent dose rate in the experimental hall of generator NG-11I is presented.

**Key words:** neutron generator, neutron spectrum, angular distribution of neutrons, equivalent dose rate.

### Введение

Нейтронные генераторы широко используются в различных областях науки в качестве статических и импульсных источников быстрых нейтронов и являются альтернативой ускорителям, плазменным камерам и различным изотопным источникам (таким как PuBe и <sup>252</sup>Cf). В РФЯЦ-ВНИИЭФ нейтронные генераторы НГ-150М и НГ-11И [1, 2] используются в облучательных экспериментах и при градуи-

ровке сцинтилляционных и активационных детекторов в качестве образцовых источников ДТ- и DD- нейтронов.

В связи с началом эксплуатации НГ-11И важным является определение характеристик гамма-нейтронного поля в экспериментальном зале генератора. Это необходимо для составления карты дозовых полей и учета вклада рассеянного гамма-излучения в отклик сцинтилляционных детекторов при проведении градуировочных измерений.

## 1. Экспериментальный зал генератора НГ-11И

Схема экспериментального зала представлена на рис. 1. В зале размещены два нейтронных генератора, НГ-150М и НГ-11И, а также вспомогательное оборудование. Экспериментальный зал окружен биологической защитой в виде бетонных стен толщиной более 3 м.

Нейтронный генератор НГ-11И – это ускоритель заряженных частиц (дейтронов), бомбардирующий нейтрон-образующую мишень, насыщенную дейтерием или тритием (реакция DD и DT соответственно). Из мишени НГ-11И при энергии дейтронов 160 кэВ, в зависимости от выбранной реакции, вылетает от  $10^9$  до

$10^{11}$  нейтронов в секунду. Расчетная модель генератора и мишенного устройства представлена на рис. 2. Нейтрон-образующая мишень охлаждается водой, которая подается на торец мишенного устройства.

## 2. Описание источника DT-нейтронов

Во многих физических задачах при рассмотрении генератора DT-нейтронов подразумевают моноэнергетический источник нейтронов со средней энергией 14,1 МэВ или спектр нейтронов для  $0^\circ$  (рис. 3). Реже используют угловую зависимость средней энергии нейтронов (рис. 4).

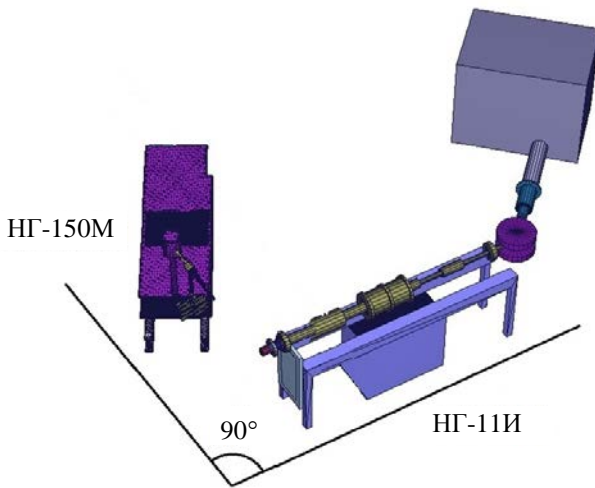


Рис. 1. Модель экспериментального зала

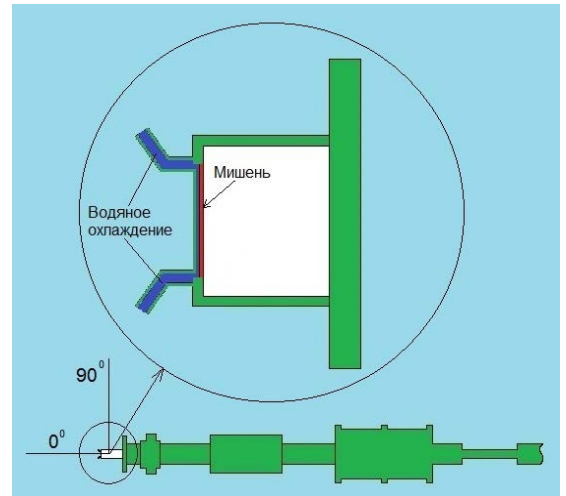


Рис. 2. Расчетная модель нейтронного генератора НГ-11И

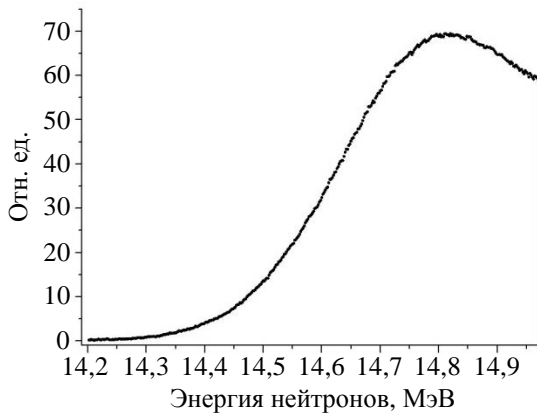


Рис. 3. Расчетный спектр DT-нейтронов для угла вылета  $0^\circ$

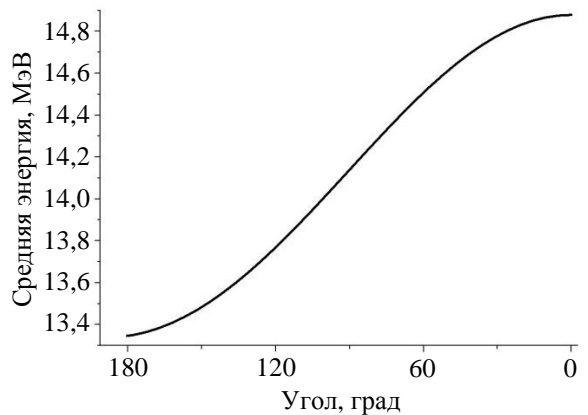


Рис. 4. Угловая зависимость средней энергии DT-нейтронов

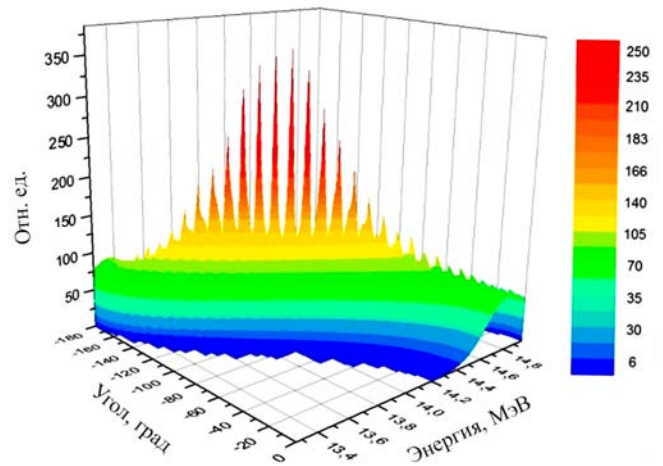
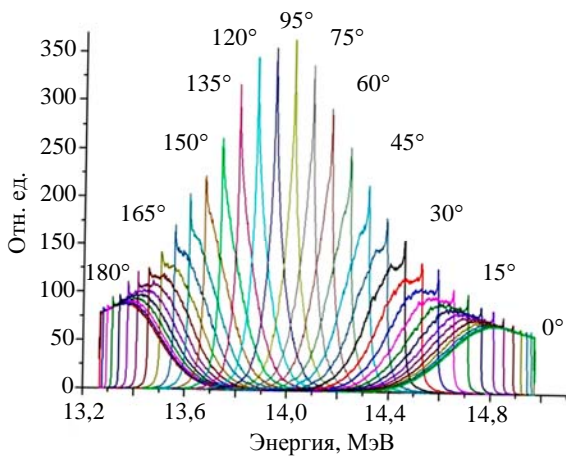


Рис. 5. Спектр DT-нейтронов для нескольких углов вылета, рассчитанный в SRIANG

Для задач градуировки детекторов необходимо рассмотреть источник нейтронов более детально. Источник задавался как диск толщиной 0,01 мм и радиусом 18 мм на медной дисковой подложке толщиной 1 мм. Моделирование спектра нейтронов осуществлялось в несколько этапов. Сначала пространство вокруг источника разбивалось по углу вылета от 180° до 0° на 36 интервалов по 5°. Для каждого интервала углов в программе SRIANG [3] насчитывался спектр вылетающих из мишени нейтронов с энергиями 13,26–14,97 МэВ с шагом 0,002 МэВ. Данная программа предполагает два этапа вычислений: моделирование (по Монте-Карло) траекторий замедляющихся дейтронов с помощью пакета SRIM [4] и расчет энергии вылетевших из мишени нейтронов (с погрешностью не более 0,001 МэВ). Полученный спектр представлен на рис. 5. Для углов, близких к 180° и 0°, наблюдается более пологое распределение. Для углов, близких к 95°, спектр имеет форму узкого пика.

Далее для каждого интервала углов от 180° до 0° интегрированием спектров по энергии рассчитывался показатель анизотропии. Полученное распределение показано на рис. 6. Из рисунка видно, что выход нейтронов под 180° и 0° различается на 10 %.

В итоге спектр нейтронов из источника представлял собой сложную зависимость распределения энергии и показателя анизотропии от угла вылета нейтронов. Каждому интервалу углов соответствует свой спектр энергий

нейтронов с определенным показателем анизотропии. Полученные результаты расчета спектра DT-нейтронов используются в качестве исходных данных для моделирования источника нейтронов в программном пакете RHITS 2.88 [5] (аналог MCNP) с библиотекой сечений ENDF/B-VII.

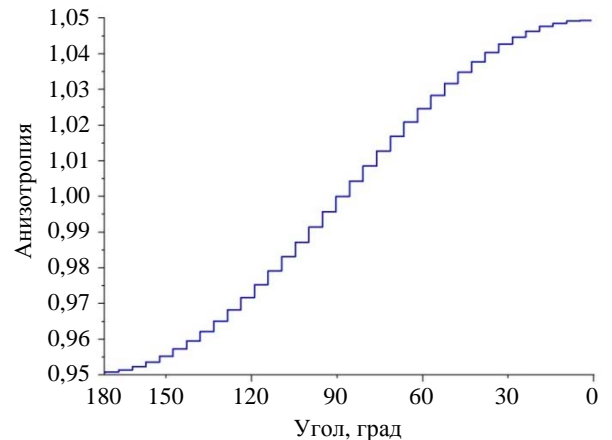


Рис. 6. Зависимость показателя анизотропии выхода нейтронов от угла вылета

### 3. Проверка анизотропии вылета нейтронов

Для проверки правильности моделирования источника вокруг нейтронного генератора НГ-11И на расстоянии 1 м от мишени с шагом 15° выбирались сферические области пространства диаметром 1 см, в которых насчитывался спектр и средний по объему флюенс нейтро-

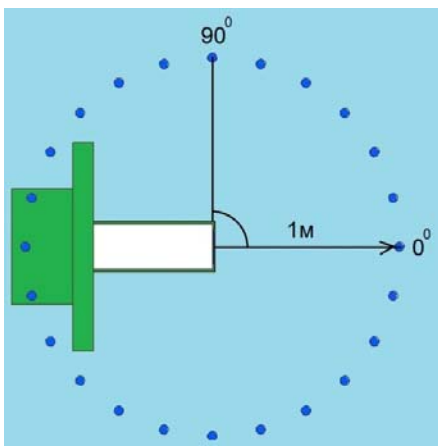
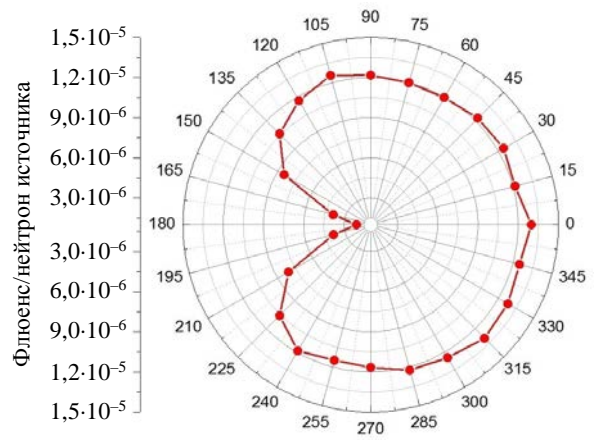


Рис. 7. Результаты расчета показателя анизотропии выхода нейтронов



нов с учетом конструкционных материалов генератора и без них. Статистическая погрешность счета флюенса для каждой выбранной области не превышала 5 % при доверительной вероятности 0,95. Результаты расчета показателя анизотропии выхода нейтронов из мишенного устройства НГ-11И показаны на рис. 7. На графике наблюдается сильный «провал» значения флюенса на углах 165–195°. Это прежде всего связано с низкой интенсивностью вылета нейтронов под такими углами в DT-реакции.

#### 4. Спектр гамма-излучения в экспериментальном зале генератора НГ-11И

После проверки анизотропии источника проводился расчет характеристик поля гамма-

излучения. Нейтроны, замедляющиеся в упругих и неупругих столкновениях с ядрами материалов стен и вспомогательного оборудования в экспериментальном зале, приводят к возникновению гамма-излучения. Реакции радиационного захвата нейтронов также вносят свой вклад в формирование поля гамма-излучения в зале НГ-11И. Расчет спектра гамма-излучения проводился в нескольких выбранных областях экспериментального зала. Усредненное спектральное распределение гамма-излучения в экспериментальном зале приведено на рис. 8. В спектре четко выделяются линии кислорода, углерода, водорода, кремния и железа. Все эти элементы содержатся в бетоне стен, пола и потолка экспериментального зала НГ-11И.

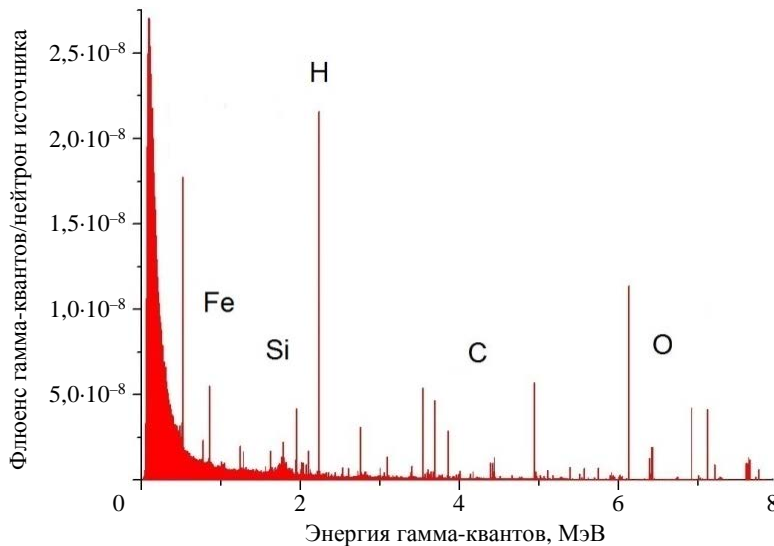


Рис. 8. Расчетный спектр гамма-излучения в зале НГ-11И

## 5. Пространственное распределение мощности эквивалентной дозы гамма-излучения

В расчетной модели экспериментального зала использовалась пространственная сетка с шагом 6 см по всем координатным направлениям. Статистическая погрешность результатов расчета для каждого элемента сетки не превышала 4 % (при доверительной вероятности 0,95). На рис. 9 показан фрагмент пространственного распределения мощности эквивалентной дозы гамма-излучения. Максимум ( $4,7 \cdot 10^{-11}$  Зв/ч на нейтрон источника в секунду) приходится на пространство вблизи мишенного устройства генератора НГ-11И.

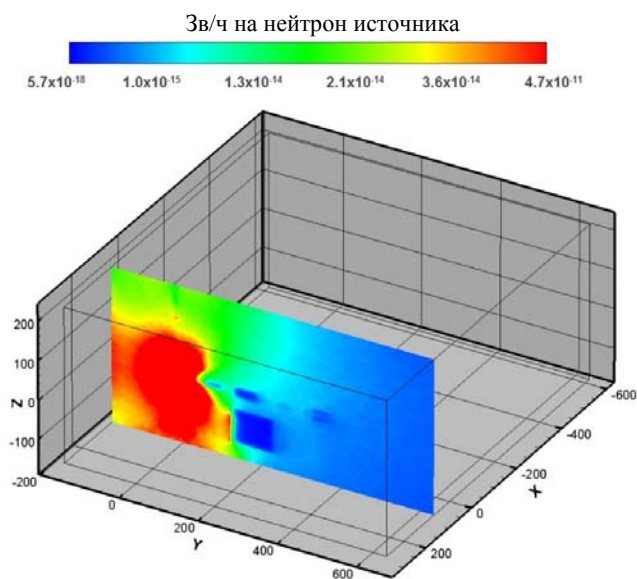


Рис. 9. Фрагмент пространственного распределения мощности эквивалентной дозы гамма-излучения

### Заключение

Выполнено детальное моделирование работы генератора НГ-11И при использовании мишени с тритиевым насыщением. Согласно полученным оценкам, при потоке ДТ-нейтронов  $\sim 5 \cdot 10^{10}$  н/с в полный телесный угол  $4\pi$ ,

мощность эквивалентной дозы гамма-излучения вблизи мишенного устройства составляет  $\sim 2$  Зв/ч. По результатам расчетов составлена трехмерная дозовая карта поля гамма-излучения.

### Список литературы

1. Abramovich S. N., Nefedov Y. Y., Semenov V. I., Shmarov A. E., Orlov R. A., Livke A. V., Savin M. V., Shvetsov A. M., Nagorny V. I., Zhitnik A. K. Benchmark Experiments on Measurement of Neutron and Gamma-Ray Leakage Spectra and Yields from Three Vanadium Spheres // Fusion Engineering and Design, 2001, vol. 58–59, p. 601–606.
2. Кирьянов Г. И. Генераторы быстрых нейтронов. – М.: Энергоатомиздат, 1990, 224 с.
3. Gaganov V. V. Calculation of Neutron Spectra Produced in Neutron Generator Target: Code Testing // Applied Radiation and Isotopes, 2018, vol. 133, p. 85–87.
4. Ziegler J. F., Ziegler M. D., Biersack J. P. SRIM – The stopping and range of ions in matter // Nucl. Inst. Meth. Phys. Res. B 268, 2010, 1818–1823.
5. Sato T., Niita K., Matsuda N., Hashimoto S., Iwamoto Y., Noda S., Ogawa T., Iwase H., Nakashima H., Fukahori T., Okumura K., Kai T., Chiba S., Furuta T., Sihver L. Particle and Heavy Ion Transport Code System PHITS, Version 2.52, J. Nucl. Sci. Technol. 50:9, 913-923 (2013).

Контактная информация –

Долгополов Александр Викторович,  
младший научный сотрудник ИЯРФ,  
РФЯЦ-ВНИИЭФ,  
e-mail: otd4@exped.vniief.ru

Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика ядерных реакторов, 2021, вып. 4, с. 127–131.