

## ФОТОНЕЙТРОННЫЕ ИСТОЧНИКИ НА БАЗЕ РЕНТГЕНОГРАФИЧЕСКИХ УСТАНОВОК РФЯЦ-ВНИИТФ

*Пензин Илья Владимирович ([yniitf@vniitf.ru](mailto:yniitf@vniitf.ru)), Волосенко Ксения Сергеевна,  
Чухаев Евгений Иванович, Петров Дмитрий Витальевич, Никитин Олег Альфредович,  
Ахметов Александр Рамзисович, Хренков Сергей Дмитриевич, Протас Роман Викторович,  
Шепелев Данила Николаевич*

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ», г. Снежинск Челябинской обл.

В работе рассмотрена концепция фотонейтронного источника на базе линейного индукционного ускорителя (ЛИУ), созданного ИЯФ СО РАН совместно с РФЯЦ-ВНИИТФ для проведения рентгенографических экспериментов. Возможность реализации на базе ЛИУ мощного фотонейтронного источника обусловлена параметрами формируемого ускорителем электронного пучка, а именно током пучка и его энергией. Произведено математическое моделирование фотонейтронного выхода в программе ПРИЗМА. Проведена серия экспериментов на рентгенографических установках БИМ234.3000М и ЛИУ-20. Произведена калибровка расчетной модели и апробация измерительных методик.

**Ключевые слова:** фотонейтронный источник, линейный индукционный ускоритель, фотоядерные реакции.

## PHOTONEUTRON SOURCES BASED ON RFNC-VNIITF X-RAY FACILITIES

*Penzin Ilya Vladimirovich ([yniitf@vniitf.ru](mailto:yniitf@vniitf.ru)), Volosenko Ksenia Sergeevna, Chukhaev Evgeny Ivanovich,  
Petrov Dmitry Vitalievich, Nikitin Oleg Alfredovich, Akhmetov Alexander Ramzisevich,  
Khrenkov Sergei Dmitrievich, Protas Roman Victorovich, Shepelev Danila Nikolayevich*

FSUE «RFNC-VNIITF», Snezhinsk Chelyabinsk region

This work addresses the concept of photoneutron source based on the linear induction accelerator (LIA) that has been developed by BINP SB RAS jointly with RFNC-VNIITF to perform X-ray experiments. The possibility of implementing the LIA-based powerful photoneutron source is determined by the parameters of an electronic beam formed by the accelerator, i.e. beam current and beam energy. Mathematical modelling of photoneutron yield was performed using the PRISMA software package. The series of experiments using the BEM 234.3000M and LIA-20 X-ray facilities was conducted. The computational model was calibrated, and the measurement techniques were validated.

**Keywords:** photoneutron source, linear induction accelerator, photonuclear reactions.

### Введение

В настоящее время в РФЯЦ-ВНИИТФ созданы и эксплуатируются импульсные источники нейтронов на основе импульсных ядерных реакторов [1], а также нейтронный генератор НГ-12И [2], но развитие экспериментальной базы источников нейтронов необходимо для задач, решаемых в рамках основной тематик института, таких как:

– моделирование поражающих факторов ядерного взрыва;

– проведение исследований радиоэлектронной аппаратуры и современной электронной компонентной базы на радиационную стойкость.

Создание фотонейтронного источника заключается не только в создании фотонейтронной мишени, но и в отработке измерительных методик, а также в разработке математической модели. Первым этапом работ по созданию фотонейтронного источника

на рентгенографической установке ЛИУ-20 [3] проведены предварительные расчеты, затем были начаты работы по созданию математической модели для нахождения оптимальных конструкций фотонейтронных мишеней. Вторым шагом был проведен фотонейтронный эксперимент.

В связи с пуско-наладочными работами на ЛИУ-20 проведен ряд работ на установке БИМ234.3000М [4] для апробации измерительных методик, а также для калибровки расчетной модели.

В данной работе рассмотрена концепция создания фотонейтронного источника, математическое моделирование фотонейтронного источника, экспериментальное исследование фотонейтронного выхода на рентгенографических установках, а также сравнение результатов моделирования и экспериментов.

### Концепция создания фотонейтронного источника

Рентгенографическая установка ЛИУ-20 характеризуется параметрами: энергии 20 МэВ, количество электронов  $7,5 \cdot 10^{14}$ , длительность импульса 60 нс, которые наилучшим образом соответствуют для целей создания фотонейтронного источника. Для создания мощных потоков нейтронного излучения требуются специальные мишени-конверторы.

Рассмотрены два типа конверсионных мишеней: однородная и комбинированная. Однородная мишень – это мишень из одного материала-конвертора, обеспечивающая поглощение всех фотонов. Водородной мишени поток нейтронов формируется по схеме:  $e \rightarrow \gamma \rightarrow n$ .

Этот тип мишени более эффективный, но его реализация требует внесения изменений в конструкцию мишенного узла, а также несет опасность повреждения катода ускорителя и загрязнения тракта проводки пучка. Применение однородной мишени возможно только на установке ЛИУ-20.

Комбинированная мишень – мишень из двух материалов-конверторов, в которой поток нейтронов формируется в два этапа: в первом материале-конверторе генерируется поток фотонов ( $e \rightarrow \gamma$ ), а во втором материале-конверторе – поток нейтронов ( $\gamma \rightarrow n$ ).

Оба типа мишеней представлены на рис. 1.

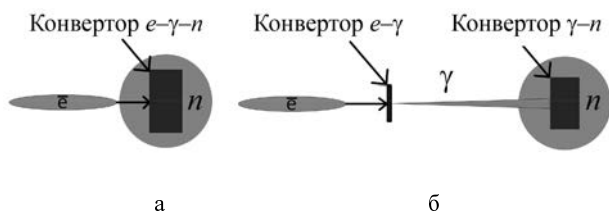


Рис. 1. Типы мишеней конверторов: а – однородная мишень, б – комбинированная мишень

В качестве материалов-конверторов применялись материалы: тантал ( $E_{пор} = 7,6$  МэВ), вольфрам ( $E_{пор} = 7,3$  МэВ), свинец ( $E_{пор} = 7,4$  МэВ), уран 238 ( $E_{пор} = 6,2$  МэВ), бериллий ( $E_{пор} = 1,7$  МэВ).

### Математическое моделирование фотонейтронного источника

Математическая модель разработана в программе ПРИЗМА [5]. Расчеты проводились с использованием фотонных констант из библиотеки ENDF/B-VII. Нейтронные константы в области энергий до 20 МэВ создавались на основе библиотеки ENDF/B-V, а для учета высокоэнергетических взаимодействий были дополнены данными [6]. Моделирование электронов и позитронов прекращалось после вылета частиц из танталовой мишени для соответствия эксперименту, энергия этих частиц была ограничена снизу пороговым значением фотоядерных реакций на свинце – 7,4 МэВ. Для уменьшения статистической погрешности применялись алгоритмы смещения траекторий частиц в сторону фотонейтронной мишени и повышение вероятностей фотоядерных взаимодействий.

Проводилась серия предварительных расчетов, в которых варьировалась толщина свинцовой мишени. Геометрия и состав системы расчета показаны на рис. 2. Расчет проведен со следующими параметрами электронного пучка: энергия 55 МэВ, длительность импульса 130 нс, количество электронов  $5 \cdot 10^{12}$ .

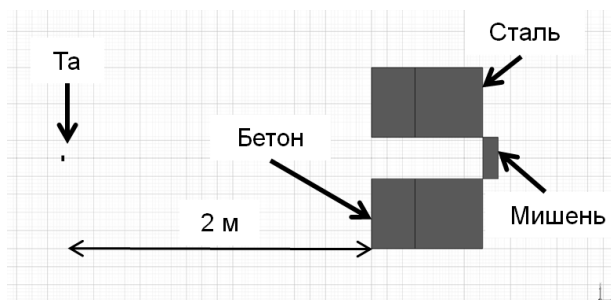


Рис. 2. Геометрия и состав системы расчета (сечение плоскостью XOZ)

По результатам предварительных расчетов получены зависимости выходов нейтронов из мишени (ТОК нейтронов) от толщины свинцовой мишени, рис. 3, и спектральный состав нейтронов, выходящих из свинцовой мишени толщиной 20 см, рис. 4.

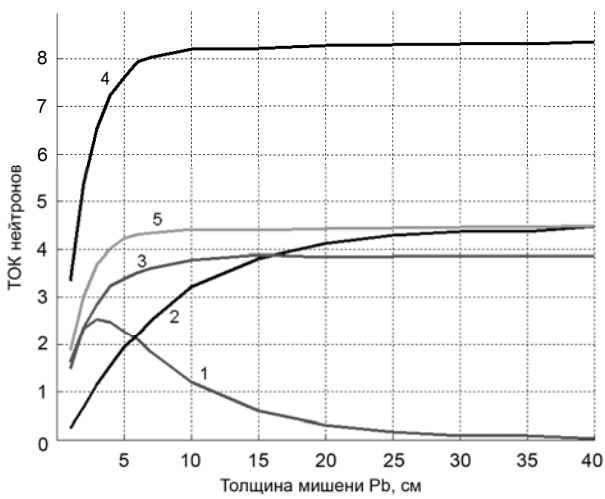


Рис. 3. Расчетная зависимость выходов нейтронов (ТОК нейтронов) из мишени от толщины свинцовой мишени: 1 – выход вперед, 2 – выход через боковую поверхность, 3 – выход назад, 4 – суммарный выход, 5 – выход вперед + выход через боковую поверхность

На рис. 4 показан спектр нейтронов, выходящих из свинцовой мишени толщиной 20 см.

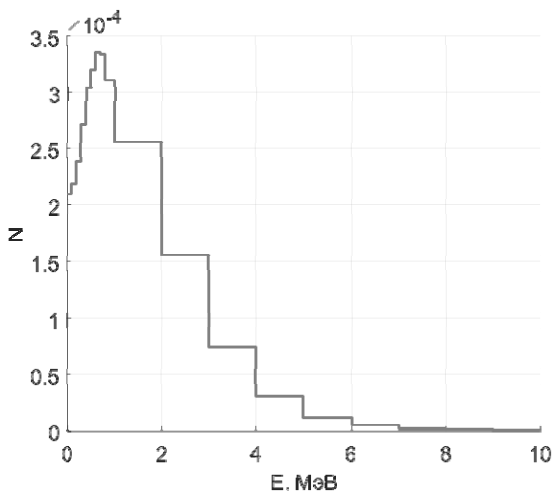


Рис. 4. Спектр нейтронов, выходящих из свинцовой мишени толщиной 20 см

Для сравнения результатов расчетов по программе ПРИЗМА с экспериментальными данными, вычислялось количество нейтронов, попадающих на плоскую поверхность, имитирующую детектор в эксперименте.

Расположение детектора в расчете по программе ПРИЗМА показано на рис. 5 (детектор отнесен на 10,3 м).

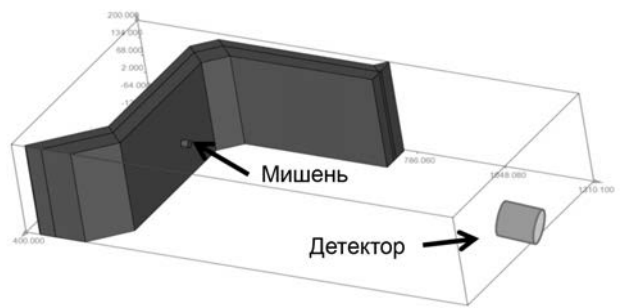


Рис. 5. Расположение детектора в расчете по программе ПРИЗМА

Показания детектора складываются из количества нейтронов, вылетевших из мишени напрямую, а также количества нейтронов, отраженных от грунта и стен каземата. При добавлении отражающих поверхностей, результат, получаемый на детекторе, увеличивается. Результаты проведенных расчетов показаны на рис. 6.

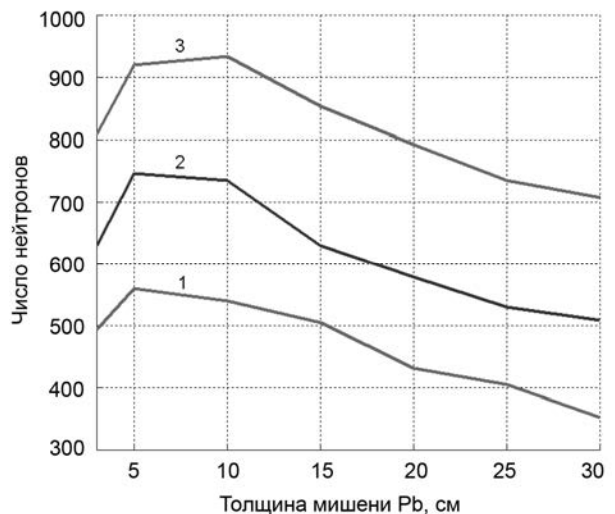


Рис. 6. Расчетная зависимость числа нейтронов, попадающих на детектор, от толщины мишени: 1 – базовый расчет, 2 – расчет с добавлением грунта, 3 – расчет с добавлением грунта и стен каземата

В серии расчетов, проведенных с добавлением к расчетной модели грунта и стен каземата, максимальное число нейтронов, полученное на детекторе, достигается в расчете со свинцовой мишенью толщиной 10 см.

Результат расчета по программе ПРИЗМА согласуется с расчетной зависимостью выходов нейтронов из мишени от толщины свинцовой мишени при суммарном выходе нейтронов из боковой и фронтальной поверхностей мишени, рис. 3 (5 – выход вперед + выход через боковую поверхность).

При увеличении толщины мишени от 1 см до 10 см значение этого результата растет, при дальнейшем увеличении толщины мишени суммарный выход нейтронов из мишени меняется слабо (отли-

чие между расчетами с мишенями толщиной 10 см и толщиной 40 см не превышает 2 %). При этом число нейтронов, полученных на детекторе, уменьшается. Это объясняется тем, что с увеличением толщины мишени увеличивается число частиц, выходящих через боковую поверхность мишени, а число частиц, летящих в сторону детектора напрямую, уменьшается.

Окончательные расчеты для ЛИУ-20 еще не проведены, поскольку требуется калибровка расчетной модели по экспериментальным данным.

### Экспериментальное исследование фотонейтронного выхода на рентгенографических установках

Измерения количества нейтронов и их энергетических характеристик производились с помощью методик РФЯЦ-ВНИИТФ. Применялись два типа детекторов: ССДИ8М и ВСПМ-2М.

Геометрия расстановки детекторов для установок БИМ234.3000М и ЛИУ-20 изображена на рис. 7. Все детекторы были подняты от земли на уровень фотонейтронных мишеней с помощью деревянных подставок, удалены на определенное расстояние и вынесены в сторону для уменьшения воздействия направленного тормозного излучения.

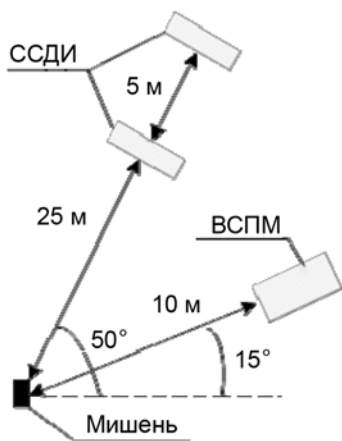


Рис. 7. Геометрия расстановки детекторов в эксперименте

В постановке, рис. 7, проведен ряд экспериментов по определению флюенса нейтронов из мишеней различных материалов и разной геометрии.

Результаты экспериментов на установке БИМ234.3000М представлены на рис. 8, приведена зависимость количества нейтронов на выходе их мишени от толщины мишеней.

Результаты экспериментов на установке ЛИУ-20 представлены на рис. 9, на котором изображено количество нейтронов на выходе их мишени из различных материалов и их эффективные толщины.

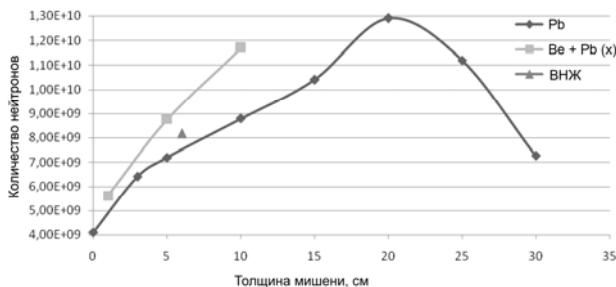


Рис. 8. Результаты экспериментов на БИМ234.3000М

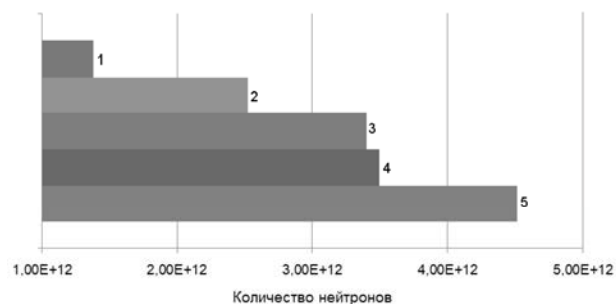


Рис. 9. Результаты экспериментов на ЛИУ-20: 1 – бериллий, 6 см; 2 – вольфрам, 6 см; 3 – свинец, 5 см; 4 – бериллий, 9 см + свинец, 5 см; 5 – уран 238, 9 см

Данные о спектральном составе нейтронов получить не удалось из-за насыщения детекторов ССДИ-8М. Экранирование свинцом и отдаление на большее расстояние также не позволило получить полезных данных. В будущем планируется проведение такого эксперимента с помощью использования менее чувствительных детекторов с меньшим временем высвечивания.

### Сравнение результатов математического моделирования и эксперимента

На рис. 10 приведено сравнение результатов, полученных на детекторе в расчете по программе ПРИЗМА и в эксперименте. При заложенной погрешности эксперимента 40 % большинство данных соотносится. Разность двух первых точек можно объяснить разностью захваченных электронов в ускорительной камере БИМ.

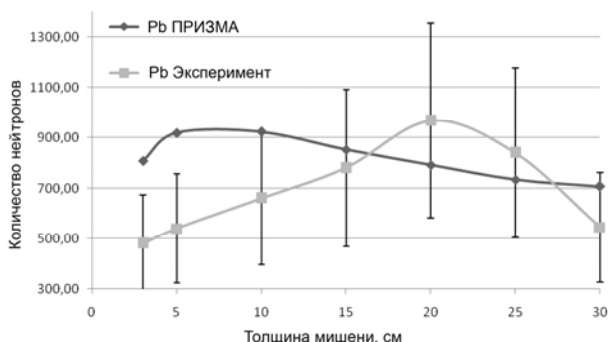


Рис. 10. Сравнение показаний детектора при расчете и эксперименте

Предложена концепция импульсного фотонейтронного источника на базе линейного индукционного ускорителя ЛИУ-20, рассмотрены два варианта конверсионных мишеней.

Смоделирован фотонейтронный выход в программе ПРИЗМА для электрофизической установки БИМ234.3000М.

Проведены эксперименты на электрофизических установках и апробация методик измерения.

Определены эффективные толщины конверсионных мишеней.

Определены экспериментальные значения количества нейтронов на выходе из мишеней из различных материалов на разных установках РФЯЦ-ВНИИТФ.

Максимальная плотность потока нейтронов для ЛИУ-20 составила  $4,5 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$  за импульс, в непосредственной близости от мишени –  $2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ .

В будущем планируется проведение экспериментов по определению нейтронного спектра, создание эффективной фотонейтронной мишени и проведение экспериментов радиоэлектронной аппаратуры на радиационную стойкость.

1. Импульсные ядерные реакторы РФЯЦ-ВНИИТФ. Ред. Лукин А. В. Снежинск: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ», 2002. С. 608.

2. Афанасьев В. Н. Экспериментальная база установок РФЯЦ-ВНИИТФ для радиационных исследований и испытаний изделий электронной техники. В. Н. Афанасьев, В. Б. Братчиков, А. М. Гафаров / ВАНТ. Сер: Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру. 2008. Вып. 2. С. 121–125.

3. Логачев П. В., Бак П. А., Старостенко Д. А. Линейный индукционный ускоритель ЛИУ-20. Отчет ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ», 2012.

4. Руководство по эксплуатации РУ БИМ234.3000М. Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2010.

5. Кандиев Я. З., Лобанова Л. В., Лукин Г. В., Модестов Д. Г. Моделирование взаимодействия фотонов с веществом, реализованное в комплексе программ ПРИЗМА. Отчет ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ», 2006.

6. Сычёв Б. С. Сечения взаимодействий высокоэнергетических адронов с атомными ядрами. М: Московский радиотехнический институт, 1999.