
ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ФИЗИКИ / INSTRUMENTS AND METHODS OF EXPERIMENTAL PHYSICS

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.138.23>**ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОТОТИПА ПОЗИЦИОННО-ЧУВСТВИТЕЛЬНОГО ДЕТЕКТОРА НЕЙТРОНОВ НА ОСНОВЕ КРЕМНИЕВЫХ ФОТОУМНОЖИТЕЛЕЙ**

Научная статья

Трунов Д.Н.^{1,*}, Марин В.Н.², Глушкова Т.³, Садыков Р.А.⁴, Алтынбаев Е.В.⁵¹ ORCID : 0000-0002-1966-083X;⁴ ORCID : 0000-0002-3986-0994;⁵ ORCID : 0000-0003-0148-0598;^{1,3} Национальный Исследовательский Центр «Курчатовский институт», Гатчина, Российская Федерация^{1,2,4} Институт Ядерных Исследований Российской Академии Наук, Троицк, Российская Федерация⁵ Санкт-Петербургский Государственный Университет, Санкт-Петербург, Российская Федерация

* Корреспондирующий автор (redmitr[at]yandex.ru)

Аннотация

Разработан недорогой детектор нейтронов на основе кремниевых фотоумножителей и одного слоя сцинтиллятора ZnS(Ag):⁶LiF. Для определения координаты детектор использует всего 4 кремниевых фотоумножителя. В качестве световода использован прозрачный органический световод на основе ПММА. Метод определения координаты, основан на анализе затухания фотонов в объёме пластикового световода. Описана структура подобного типа детекторов. Проведено моделирование оптических параметров позиционно-чувствительных детекторов подобного типа. Определены параметры пространственного разрешения для детекторов 2-х размеров: 50 мм и 100 мм. Получение параметры разрешения составляют 10 мм и 7 мм, соответственно. Предложены методы повышения разрешения подобного типа детекторов, и их возможное использование для регистрации других видов излучения.

Ключевые слова: нейтроны, детектор, дифракция, позиционно-чувствительный детектор, кремниевый фотоумножитель, органический световод.

STUDIES OF A PROTOTYPE POSITION SENSITIVE NEUTRON DETECTOR BASED ON SILICON PHOTOMULTIPLIERS

Research article

Trunov D.N.^{1,*}, Marin V.N.², Glushkova T.³, Sadikov R.A.⁴, Altynbaev E.V.⁵¹ ORCID : 0000-0002-1966-083X;⁴ ORCID : 0000-0002-3986-0994;⁵ ORCID : 0000-0003-0148-0598;^{1,3} National Research Center "Kurchatov Institute", Gatchina, Russian Federation^{1,2,4} Institute for Nuclear Research of the Russian Academy of Sciences, Troitsk, Russian Federation⁵ Saint-Petersburg State University, Saint-Petersburg, Russian Federation

* Corresponding author (redmitr[at]yandex.ru)

Abstract

A low-cost neutron detector based on silicon photomultiplier tubes and a single layer of ZnS(Ag):⁶LiF scintillator has been developed. The detector uses only 4 silicon photomultiplier tubes to determine the coordinate. A transparent PMMA-based organic light guide is used as the light guide. The method of coordinate determination is based on the analysis of photon attenuation in the volume of the plastic light guide. The structure of such type of detectors is described. Modelling of optical parameters of position-sensitive detectors of this type is carried out. The spatial resolution parameters for detectors of 2 sizes: 50 mm and 100 mm are determined. The obtained resolution parameters are 10 mm and 7 mm, respectively. Methods of increasing the resolution of this type of detectors and their possible use for registration of other types of radiation are proposed.

Keywords: neutrons, detector, diffraction, position-sensitive detector, silicon photomultiplier tube, organic light guide.

Введение

В настоящее время в России происходит развитие и создание современных исследовательских центров, таких как исследовательский реактор ПИК(г. Гатчина) [1], Импульсный нейтронный источник нейтронов «Омега» (г. Протвино) [2] и Проект DARIA [3]. Основную стоимость установок для нейтронных исследований составляют детекторы, особенно основанные на гелий-3. Связано это с ограниченной доступностью и стоимостью газа гелий-3 [4]. Поэтому в настоящее время происходит развитие различных детекторов на основе сцинтиллятора ZnS(Ag):⁶LiF [5], [6]. Связано это с достаточно простой конструкцией, низкой ценой и высокой эффективностью регистрации нейтронов [7].

В современных исследовательских центрах наиболее востребованы позиционно-чувствительные детекторы (ПЧД) [8]. Детекторы используются как для мониторинга нейтронного пучка, так и для дифракционных измерений. Для создания сцинтилляционных детекторов на основе ПЧД получили распространение два метода. Первый метод основан на использовании сцинтиллятора, фотоны с которого снимаются двумя перпендикулярными расположенными массивами спектросмещающих волокон(WLS). Координата, в данном случае, определяется как пересечение WLS волокон, где произошло событие регистрации фотонов [9]. Данные детекторы могут обладать высоким разрешением

1мм, но при этом достаточно дороги и сложны в производстве. Связано это с тем, что необходимо независимо снимать сигнал с каждого волокна, а также наличием большого количества WLS.

Второй способ создания ПЧД детекторов основан на изготовлении матрицы из кремниевых фотоумножителей (SiPM) к активной области которого приклеен сцинтиллятор. Данные детекторы обладают также высоким разрешением, которое зависит от размера кремниевого фотоумножителя (от 1x1мм), но также обладают высокой стоимостью, т.к. требует большого количества кремниевых фотоумножителей [10]. Также для детекторов подобного типа свойственно наличие мертвой зоны. Связано это с тем что светочувствительная часть SiPM, как правило, меньше габаритов самого SiPM.

В данной работе описано создание и тестирование детектора основанного на другом способе определения координаты. Метод заключается в анализе амплитуд сигналов, поступающих с 4 кремниевых фотоумножителей, расположенных в торцах пластикового световода. Детектор, основанный на данном методе, будет обладать достаточно низкой ценой, т.к. для регистрации фотонов требуется всего 4 кремниевых фотоумножителя.

Моделирование

Схема детектора представлена на рисунке 1. Принцип работы детектора основан на оптическом ослаблении света, подробнее описанный в статье [11]. Нейтрон, падающий на сцинтиллятор, конвертируется в фотоны. Фотоны, попадающие в световод, распространяются во всех направлениях, и в зависимости от пройденного пути (L1, L2, L3, L4 на рисунке 1,а) поглощаются. В конечном итоге за счет различного пути по световоду происходит уменьшение количества фотонов, а следовательно будут отличаться амплитуды сигналов, полученных с торцов световода.

Так как для определения параметров нам необходимо учитывать лишь оптическую часть, возможно использовать различные программы для моделирования лишь оптических параметров, вместо более сложных программ для Монте-Карло моделирования учитывающих взаимодействие нейтрона со сцинтиллятором, такие как GEANT4 и др. Для оценки оптических параметров детектора было проведено оптическое моделирование в программе TracePro. Для моделирования была использована оптическая схема представленная на рисунке 1 а. Параметры объема и поверхности модели выбраны такие же, как и в реальном детекторе (рис. 1 б.) В качестве детекторов было смоделировано 2 детектора различных размеров - 100 мм и 50 мм. Толщина световода 5 мм, материал световода ПММА. Покрытие поверхности световода — диффузный отражатель. Параметры использованные при моделировании $t=1$ сек, $\lambda = 460$ нм, количество фотонов $1.6 \cdot 10^5$. Мощность источника в нашем случае составила $6.9 \cdot 10^{-12}$ вт, количество лучей для расчета приняли равным 10 000. Результаты моделирования приведены далее в статье.

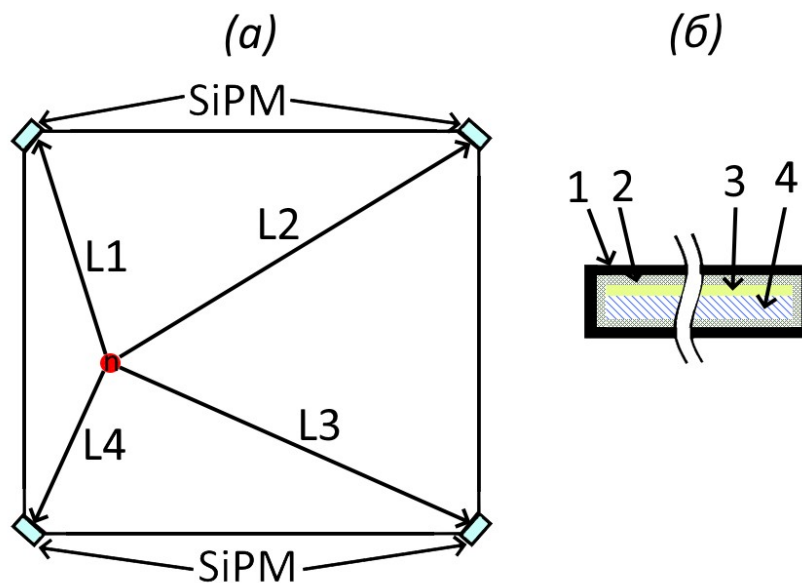


Рисунок 1 - Оптическая схема
(а) - принцип метода ослабления фотонов, (б) - разрез детектора
DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.138.23.1>

Примечание: 1 - внешнее защитное покрытие, 2 - диффузный отражатель, 3 - сцинтиллятор, 4 - световод

Создание детектора

Для тестирования прототипа детектора и проверки возможности определения координаты изготовлено 2 детектора размерами 100x100мм и 50x50мм. В качестве световода использован ПММА толщиной 5 мм и коэффициентом пропускания 92% видимого света. В качестве конвертора нейтронов использован коммерческий сцинтиллятор фирмы Saint-Gobain на основе $ZnS(Ag):^6LiF$ с эффективностью регистрации нейтронов 42%, толщина сцинтиллятора 0.45 мм. Сцинтиллятор приклеивался к световоду клеем типа оптический цемент. В торцах световода размещены кремниевые

фотоумножители NDL EQR10 11-3030D-S. После вклейки световода и сцинтиллятора, весь детектор покрывался диффузно-отражающей краской на основе BaSO_4 с высоким коэффициентом диффузного отражения [12]. После сборки весь детектор покрывался черной непрозрачной термоусадочной трубкой толщиной 1 мм для защиты от внешнего света.

Описание установки для тестирования

Тестирование детектора производилось от источника нейтронов Cf-252. Схема проведения тестирования показана на рисунке 2.

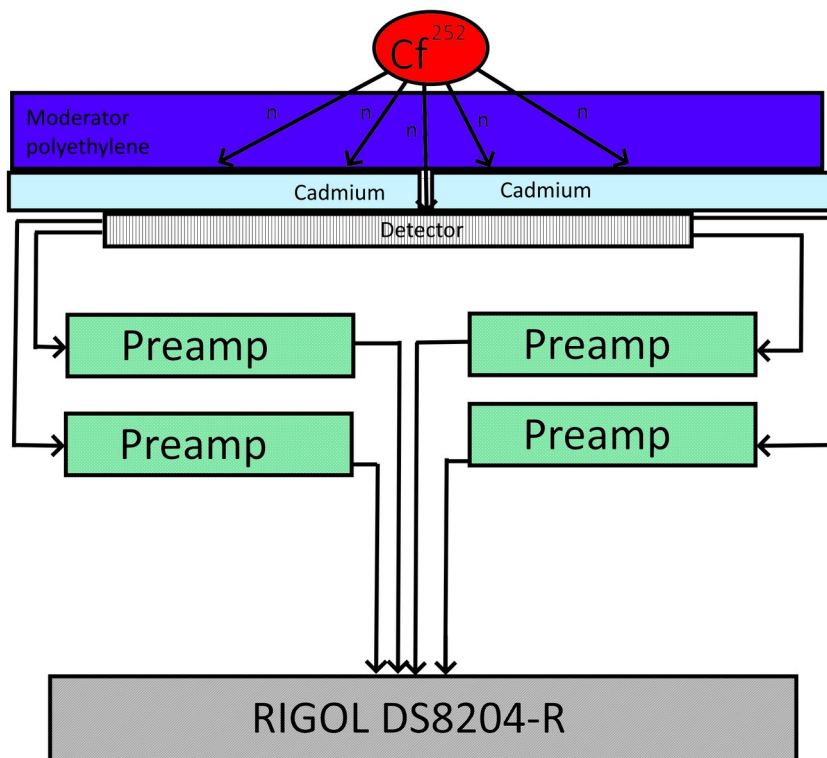


Рисунок 2 - Схема проведения эксперимента
DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.138.23.2>

Перед детектором располагалась пластина из кадмия толщиной 1.5 мм, в которой вырезано отверстие диаметром 2 мм. Перед листом кадмия располагался блок полиэтилена (замедлитель) толщиной 100 мм и источник нейтронов Cf-252. Замедлитель служит для термализации нейтронного спектра Cf-252, и уменьшению времени набора статистики, так как эффективность регистрации сцинтиллятора падает с увеличением энергии нейтрона. Кадмий, в свою очередь, служит для защиты от нейтронов объема детектора.

Каждый кремниевый фотоумножитель подключается к независимому предусилителю. В качестве предусилителя используется интегрирующий усилитель с $K=1$ мкс, максимальная нагрузка кремниевого фотоумножителя 1 МГц [13]. Сигналы с предусилителей регистрируются осциллографом RIGOL DS8204-R, который сохранял форму импульсов для дальнейшего анализа.

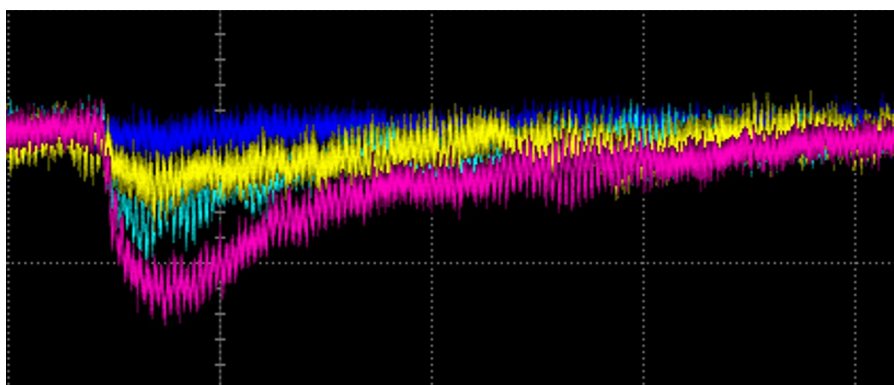


Рисунок 3 - Пример формы импульсов, получаемых с предусилителей
DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.138.23.3>

Диапазон амплитуды, получаемых с кремниевых фотоумножителей от событий регистрации нейтрона, составляет 20-500 мВ. Темновой шум порядка 7 мВ. Для первоначальной оценки параметров работы детекторов, было проведено измерение при перемещении детектора по диагонали относительно отверстия в кадмии с примерно равным шагом и 500 измерений на 1 точку.

Результаты тестирования

На рисунке 4 показано сравнение отношения амплитуд двух противоположных кремниевых фотоумножителей и сравнение их с модельными данными.

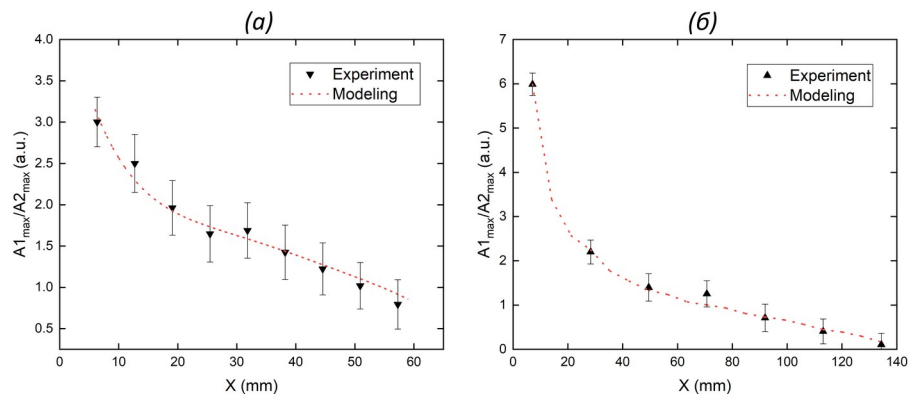


Рисунок 4 - Сравнение экспериментальных спектров и модельных с двух противоположных кремниевых фотоумножителей

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.138.23.4>

Примечание: (а) - 50 мм, (б) - 100 мм

Из экспериментальных данных можно сделать вывод, что полученные значения совпадают с модельными данными. Это означает что смоделированной оптической части достаточно для определения основных параметров детекторов и предложенный метод позволяет определять координату в двухмерном ПЧД детекторе.

Из результатов оценки разрешения по координате для 50 мм детектора составляет около 10 мм, для 100 мм детектора около 7 мм. Разница в разрешении связана с большей площадью световода, в котором происходит более сильное затухание света, и, следовательно, более сильное различие амплитуд сигналов на торцах детектора. Так же в погрешности определения разрешения влияет размер отверстия в кадмии и точность его позиционирования относительно световода.

Так как метод определения координаты зависит от затухания фотонов в объеме и при отражении от поверхностей, варьируя коэффициент пропускания световода и параметры диффузно-отражающей поверхности возможно провести оптимизацию параметров затухания фотонов и улучшить координатное разрешение при различных размерах детектора.

В данной работе разрешение оценивалось только по разнице амплитуд двух противоположных кремниевых фотоумножителей. Анализ координаты при использовании оставшихся 2 кремниевых фотоумножителей не проводилась. Для получения пространственной координаты, требуется анализ 4 сигналов получаемых с кремниевых фотоумножителей. Это в свою очередь требует точной изначальной калибровку детектора по множеству точек для получения зависимостей амплитуд от координаты. В дальнейшем планируется провести данные измерения, и улучшить параметры определения координаты.

Заключение

Разработан дешевый позиционно-чувствительный детектор нейтронов, в котором использован новый метод определения координаты, основанный на анализе амплитуд сигналов, полученных с торцов световода.

Показано, что данный метод может быть реализован в реальном детекторе. Оптимизацией параметров диффузного покрытия и световода возможно улучшить пространственное разрешение.

Детектор обладает достаточно высокой загрузочной способностью, средней эффективностью и средним разрешением. В подобных типах детекторов затухание фотонов носит постоянный характер и планируется разработать метод определения координаты используя методы искусственного интеллекта для анализа отражений и более точного определения координаты.

Данный метод можно использовать не только в детекторах нейтронов, а в зависимости от сцинтиллятора его возможно использовать для детектирования других типов излучений.

Финансирование

Результаты получены при финансовой поддержке Российской Федерации в лице Министерства науки и высшего образования, соглашение №075–10-2021-115 от 13 октября 2021 г. (внутренний номер 15. СИН.21.0021).

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Funding

The results were obtained with the financial support of the Russian Federation represented by the Ministry of Science and Higher Education, agreement No. 075–10-2021-115 dated October 13, 2021 (internal number 15. SIN.21.0021).

Conflict of Interest

None declared.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

Список литературы / References

1. Ковальчук М.В. Исследовательский реактор ПИК / М.В. Ковальчук, С.Л. Смольский, К.А. Коноплев // Кристаллография. — 2021. — 2. — с. 184-190. DOI: 10.31857/S0023476121020053.
2. Ковальчук М.В. Импульсный нейтронный источник на основе испарительно-скалывающей реакции на базе протонного синхротрона У-1.5 / М.В. Ковальчук, Н.Е. Тюрин, С.В. Иванов, А.П. Солдатов // Кристаллография. — 2022. — 5. — с. 795-800. DOI: 10.31857/S0023476122050101.
3. Кулевой Т.В. Компактный источник нейтронов DARIA / Т.В. Кулевой // Лазерные, плазменные исследования и технологии – ЛаПлаз-2023: Сборник научных трудов IX Международной конференции; — Москва: Национальный исследовательский ядерный университет "МИФИ", 2023. — с. 276.
4. Niechcial J Operational Costs of He3 Separation Using the Superfluidity of He4 / J Niechcial, P Banat, W Kempinski, Z Trybula // Energies. — 2020. — 13. DOI: 10.3390/en13226134.
5. Stoykov Alexey Evaluation of a ZnS: 6 LiF Based Scintillation Neutron Detector at High Counting Rates / Alexey Stoykov, Jean-Baptiste Mosset, Malte Hildebrandt // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. — 2018. — 936. DOI: 10.1016/j.nima.2018.10.183.
6. Kolesnikov S.V. Characteristics of ZnS(Ag) + 6LiF Scintillator-Based Detector Used as a Neutron Dosimeter / S.V. Kolesnikov, A.P. Denisenko, E.V. Ryabeva // At Energy. — 2023. — 133. — p. 212-216. DOI: 10.1007/s10512-023-00998-1.
7. Pino F. Study of the Thermal Neutron Detector ZnS(Ag)/LiF Response Using Digital Pulse Processing. Journal of Instrumentation / F. Pino, L. Stevanato, D. Cester, G. Nebbia // Journal of Instrumentation. — 2015. — 10. DOI: 10.1088/1748-0221/10/08/T08005.
8. Stefanescu I. Neutron Detectors for the ESS Diffractometers / I. Stefanescu, M. Christensen, J. Fenske, R. Hall-Wilton // Journal of Instrumentation. — 2017. — 12. DOI: 10.1088/1748-0221/12/01/P01019.
9. Bravar U. Design and Testing of a Position-Sensitive Plastic Scintillator Detector for Fast Neutron Imaging / U. Bravar, P. Bruillard, E. Fickiger, J. Macri // IEEE Transactions on Nuclear Science. — 2007. — 53. DOI: 10.1109/TNS.2006.886046.
10. Kumar S. Performance of a Position-Sensitive Neutron Scintillation Detector Based on Silicon Photomultipliers / S. Kumar, M. Herzkamp, C. Degenhardt, J. Seemann // IEEE Transactions on Nuclear Science. — 2020. — 67. DOI: 10.1109/TNS.2020.2988474.
11. Трунов Д.Н. Моделирование оптических параметров сцинтилляционных позиционно-чувствительных детекторов с органическим световодом / Д.Н. Трунов, В.Н. Марин, Р.А. Садыков, Т.И. Глушкова // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. — 2023. — 4. — с. 71-76. DOI: 10.31857/S1028096023040209.
12. Xiangyu Li. Remarkable Daytime Sub-ambient Radiative Cooling in BaSO4 Nanoparticle Films and Paints / Li Xiangyu & Peoples, Joseph & Yao, Peiyan & Ruan, Xiulin. — 2020.
13. Марин В.Н. Кольцевой детектор нейтронов для времяпролетного дифрактометра, состоящий из линейных сцинтилляционных детекторов на основе кремниевых фотоумножителей / В.Н. Марин, Р.А. Садыков, Д.Н. Трунов, В.С. Литвин // Приборы и техника эксперимента. — 2018. — 1. — с. 5-12. DOI: 10.7868/S003281621801007X.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Koval'chuk M.V. Issledovatel'skij reaktor PIK [PIK Research Reactor] / M.V. Koval'chuk, S.L. Smol'skij, K.A. Konoplev // Crystallography Reports. — 2021. — 2. — p. 184-190. DOI: 10.31857/S0023476121020053. [in Russian]
2. Koval'chuk M.V. Impul'snyj nejtronnyj istochnik na osnove isparitel'no-skalyvajushej reaktsii na baze protonnogo sinhrotrona U-1.5 [Pulsed Neutron Source Based on the Evaporation-cleavage Reaction Based on the U-1.5 Proton Synchrotron] / M.V. Koval'chuk, N.E. Tjurin, S.V. Ivanov, A.P. Soldatov // Crystallography Reports. — 2022. — 5. — p. 795-800. DOI: 10.31857/S0023476122050101. [in Russian]
3. Kulevoj T.V. Kompaktnyj istochnik nejtronov DARIA [Compact Neutron Source DARIA] / T.V. Kulevoj // Lazernye, plazmennye issledovaniya i tekhnologii – LaPlaz-2023: Sbornik nauchnyh trudov IX Mezhdunarodnoj konferencii [Laser, Plasma Research and Technology – LaPlaz-2023: Collection of scientific papers of the IX International Conference]; — Moscow: National Research Nuclear University "MIFI", 2023. — p. 276. [in Russian]
4. Niechcial J Operational Costs of He3 Separation Using the Superfluidity of He4 / J Niechcial, P Banat, W Kempinski, Z Trybula // Energies. — 2020. — 13. DOI: 10.3390/en13226134.

5. Stoykov Alexey Evaluation of a ZnS: 6 LiF Based Scintillation Neutron Detector at High Counting Rates / Alexey Stoykov, Jean-Baptiste Mosset, Malte Hildebrandt // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. — 2018. — 936. DOI: 10.1016/j.nima.2018.10.183.
6. Kolesnikov S.V. Characteristics of ZnS(Ag) + 6LiF Scintillator-Based Detector Used as a Neutron Dosimeter / S.V. Kolesnikov, A.P. Denisenko, E.V. Ryabeva // At Energy. — 2023. — 133. — p. 212-216. DOI: 10.1007/s10512-023-00998-1.
7. Pino F. Study of the Thermal Neutron Detector ZnS(Ag)/LiF Response Using Digital Pulse Processing. Journal of Instrumentation / F. Pino, L. Stevanato, D. Cester, G. Nebbia // Journal of Instrumentation. — 2015. — 10. DOI: 10.1088/1748-0221/10/08/T08005.
8. Stefanescu I. Neutron Detectors for the ESS Diffractometers / I. Stefanescu, M. Christensen, J. Fenske, R. Hall-Wilton // Journal of Instrumentation. — 2017. — 12. DOI: 10.1088/1748-0221/12/01/P01019.
9. Bravar U. Design and Testing of a Position-Sensitive Plastic Scintillator Detector for Fast Neutron Imaging / U. Bravar, P. Bruillard, E. Flckiger, J. Macri // IEEE Transactions on Nuclear Science. — 2007. — 53. DOI: 10.1109/TNS.2006.886046.
10. Kumar S. Performance of a Position-Sensitive Neutron Scintillation Detector Based on Silicon Photomultipliers / S. Kumar, M. Herzkamp, C. Degenhardt, J. Seemann // IEEE Transactions on Nuclear Science. — 2020. — 67. DOI: 10.1109/TNS.2020.2988474.
11. Trunov D.N. Modelirovanie opticheskikh parametrov stsintilljatsionnyh pozitsionno-chuvstvitel'nyh detektorov s organicheskim svetovodom [Modeling of Optical Parameters of Scintillation Position-sensitive Detectors with Organic Light Guide] / D.N. Trunov, V.N. Marin, R.A. Sadykov, T.I. Glushkova // Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques. — 2023. — 4. — p. 71-76. DOI: 10.31857/S1028096023040209. [in Russian]
12. Xiangyu Li. Remarkable Daytime Sub-ambient Radiative Cooling in BaSO4 Nanoparticle Films and Paints / Li Xiangyu & Peoples, Joseph & Yao, Peiyan & Ruan, Xiulin. — 2020.
13. Marin V.N. Kol'tsevoj detektor nejtronov dlja vremjaproletnogo difraktometra, sostojaschij iz linejnyh stsintilljatsionnyh detektorov na osnove kremnievyh fotoumnozhitel'ej [A Ring Neutron Detector for a Time-of-flight Diffractometer Based on Linear Scintillation Detectors with Silicon Photomultipliers] / V.N. Marin, R.A. Sadykov, D.N. Trunov, V.S. Litvin // Instruments and Experimental Techniques. — 2018. — 1. — p. 5-12. DOI: 10.7868/S003281621801007X. [in Russian]