

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ФОРМИРОВАНИЯ ПУЧКА ХОЛОДНЫХ НЕЙТРОНОВ ДЛЯ УСКОРИТЕЛЬНОГО ИСТОЧНИКА НЕЙТРОНОВ VITA

*Д. А. Касатов^{а,б}, Я. А. Колесников^{а,б}, В. Д. Коновалова^{а,б,1},
В. В. Поросев^а, Е. О. Соколова^{а,б}, И. М. Щудло^{а,б},
С. Ю. Таскаев^{а,б}*

^а Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия

^б Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

Холодные нейтроны (с энергией 10^{-7} – 10^{-4} эВ) нашли широкое применение во многих областях современной физики. Новая и перспективная область применения низкоэнергетических нейтронов — бор-нейтронозахватная терапия (БНЗТ) онкологических заболеваний. Этот метод основан на поглощении нейтронов бором-10, предварительно накопленным в опухоли, реакции $^{10}\text{B}(n, \alpha)^7\text{Li}$ с последующим вылетом энергетичной α -частицы и атомного ядра лития. Сечение захвата нейтронов бором-10 увеличивается с уменьшением энергии нейтронов. В настоящее время наиболее оптимальной энергией нейтронов для БНЗТ является энергия эпитеплового диапазона (1–30 кэВ). Нейтроны с такой энергией эффективно проникают в ткани человека на глубину 4 см. Доставка холодных нейтронов непосредственно в область злокачественного новообразования позволит увеличить локализацию терапевтической дозы в опухоли, исключить воздействие на здоровые клетки пациента и повысить эффективность БНЗТ в случае как глубоко лежащих злокачественных новообразований, так и находящихся на поверхности. Холодные нейтроны обладают ярко выраженными волновыми свойствами, что позволяет транспортировать их по гибким нейтронводам. Исследования посвящены получению холодных нейтронов на ускорительном источнике нейтронов VITA. Описываются разработанная система формирования пучка (СФП) холодных нейтронов и моделирование прохождения нейтронов через СФП, выполненное с помощью программного обеспечения Geant4. Продемонстрирована возможность генерации холодных нейтронов на ускорительном источнике нейтронов VITA.

Cold neutrons (with energy 10^{-7} – 10^{-4} eV) have found a broad application in many areas of modern physics. A new and perspective application area of low-energy neutrons is the boron–neutron capture therapy (BNCT) of oncological diseases. This method is based on neutron capture by boron-10, previously accumulated in the tumor, of reaction $^{10}\text{B}(n, \alpha)^7\text{Li}$ with the following escape of energetic α particle and lithium atomic nucleus. Delivery of cold neutrons directly to the area of malignant tumor can allow increasing the localization of therapeutic dose in the tumor, exclude the impact on healthy cells of the patient and increase the effectiveness of BNCT both in the case of deep-lying malignant tumors and those on the surface. The research is devoted to the generation of cold neutrons at the accelerator-based epithermal neutron source VITA. The cold neutron beam shaping assembly (BSA) is designed. The simulation of neutron passage through the

¹E-mail: v.konovaloval@g.nsu.ru

BSA performed using the Geant4 software is described. The possibility of generation of cold neutrons at the accelerator-based epithermal neutron source VITA is demonstrated.

PACS: 29.20.–с; 29.27.Ас

ВВЕДЕНИЕ

Бор-нейтронозахватная терапия (БНЗТ) — перспективная методика лечения злокачественных опухолей [1]. Для развития метода БНЗТ предложено использовать холодные нейтроны (с энергией 10^{-7} – 10^{-4} эВ). Они обладают ярко выраженными волновыми свойствами, что даст возможность транспортировать их по гибким нейтронводам непосредственно в область злокачественного новообразования [2]. Ожидается, что применение холодных нейтронов в БНЗТ повысит локализацию терапевтической дозы при облучении нейтронами, расширит область применения БНЗТ и повысит эффективность терапии.

Для получения холодных нейтронов обычно используют крупногабаритные исследовательские ядерные реакторы [3, 4]. Для внедрения БНЗТ в клиническую практику в качестве источника нейтронов необходимо использовать более компактные установки — ускорительные источники нейтронов [5]. Генерация холодных нейтронов на ускорительном источнике нейтронов является актуальной задачей и рассматривается в данной статье.

Для того чтобы снизить энергию нейтронов, используют замедлители, т. е. среду, в которой нейтроны теряют свою энергию [6, 7]. В статье описана система формирования пучка холодных нейтронов (СФП) на тяжелой воде в качестве замедлителя для ускорительного источника эпитепловых нейтронов VITA. Представлены и обсуждены результаты исследований замедляющих свойств оргстекла, воды и тяжелой воды, а также представлены результаты моделирования прохождения нейтронов через СФП в среде Geant4, демонстрирующие возможность генерации холодных нейтронов на источнике нейтронов VITA.

1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА И ПОСТАНОВКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Ускорительный источник VITA, использующийся в эксперименте для генерации начального пучка нейтронов, оптимизирован на генерацию нейтронов эпитеплового диапазона энергии [8]. Схема эксперимента представлена на рис. 1, а.

Пучок отрицательных ионов водорода, инжектируемый из источника ионов 1, фокусируется на вход ускорителя 2. Далее пучок отрицательных ионов ускоряется до 1 МэВ, после чего в газовой обдирочной мишени 3, установленной внутри высоковольтного электрода ускорителя, отрицательные ионы с вероятностью 90–95 % теряют два электрона, становятся протонами и затем ускоряются до 2 МэВ. Затем пучок протонов направляется на литиевую мишень 5. Литий был выбран в качестве материала для мишени, так как реакция ${}^7\text{Li}(p, n){}^7\text{Be}$, имеющая максимальный выход и минимальную энергию нейтронов, подходит наилучшим образом для образования пучка нейтронов эпитеплового диапазона энергии [9]. Нейтроны направляются на систему

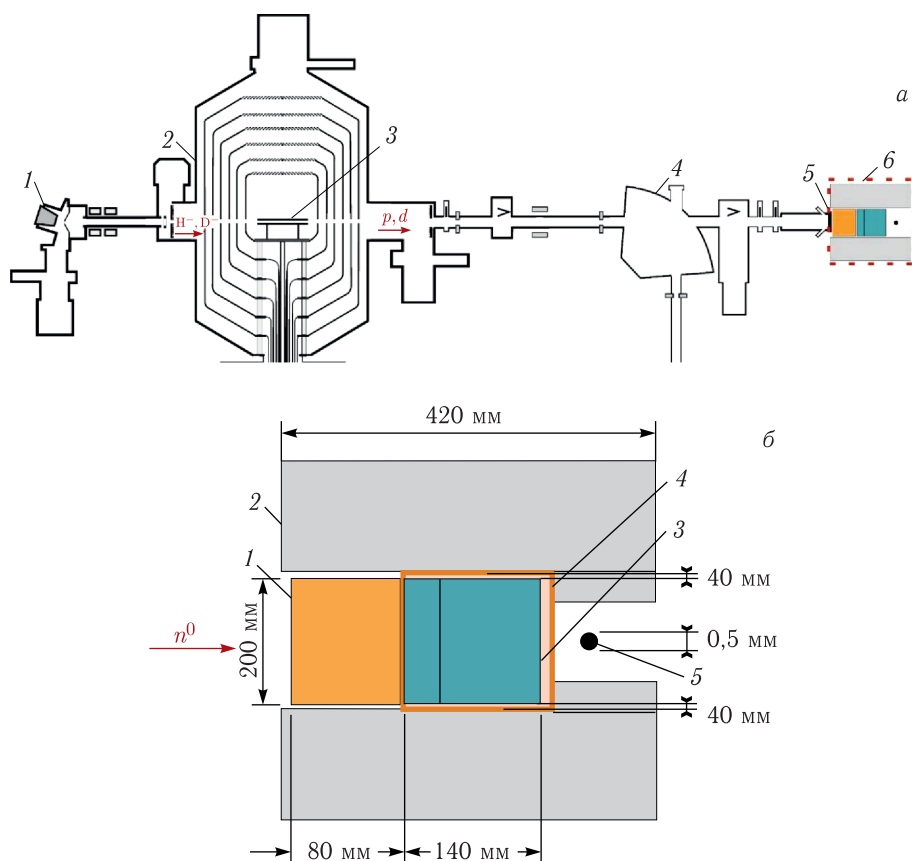


Рис. 1. а) Схема эксперимента: 1 — источник отрицательных ионов водорода; 2 — ускоритель-тандем с вакуумной изоляцией; 3 — обдирочная мишень; 4 — поворотный магнит; 5 — литиевая мишень; 6 — система формирования пучка холодных нейтронов. б) Схема системы формирования пучка холодных нейтронов: 1 — источник нейтронов; 2 — оргстекло; 3 — тяжелая вода; 4 — алюминиевый сосуд; 5 — детектор нейтронов

формирования пучка холодных нейтронов 6. Схема системы формирования пучка холодных нейтронов представлена на рис. 1, б. После прохождения СФП замедленные нейтроны фиксировались обогащенным бором полистирольным сцинтилляционным нейтронным счетчиком (ИФВЭ, Протвино) [10]. Регистрация нейтронов происходит за счет реакции $^{10}\text{B}(n, \alpha)^7\text{Li}$ в пластиковом сцинтилляторе. В ходе реакции образуются α -частицы, которые вызывают сцинтилляционные импульсы, усиливающиеся фотоумножителем. Генерация нейтронов в представленном исследовании происходила при энергии протонного пучка 2,05 МэВ.

Ускорительный источник нейтронов также позволяет генерировать нейтроны в беспороговой реакции $^7\text{Li}(d, n)^8\text{Be}$ [11]. В таком режиме работы источника генерируются нейтроны широкого диапазона значений энергии, включая быстрые нейтроны. Схема генерации нейтронов в данном режиме аналогична основному режиму генерации

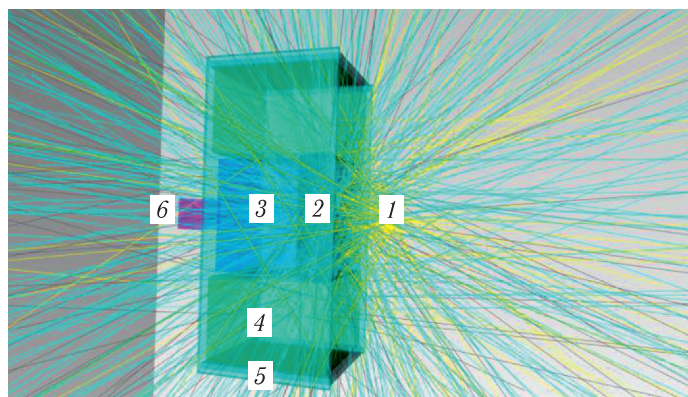


Рис. 2. Геометрия моделирования прохождения нейтронов через систему формирования пучка холодных нейтронов: 1 — источник нейтронов; 2 — оргстекло; 3 — тяжелая вода; 4 — бетон; 5 — свинцовые пластины; 6 — чувствительная область

нейтронов при бомбардировке протонным пучком, отлична лишь тем, что отрицательные ионы дейтерия от источника 1 проходят обдирочную мишень 3 и на выходе из ускорителя-тандема получают дейтроны, которые также направляются на литиевую мишень 5.

Важной задачей для генерации холодных нейтронов на ускорительном источнике нейтронов VITA является выбор ядерной реакции начального пучка нейтронов. Для этого было выполнено моделирование прохождения нейтронов через СФП в среде Geant4 для случаев генерации нейтронов в ядерных реакциях ${}^7\text{Li}(p, n){}^7\text{Be}$ и ${}^7\text{Li}(d, n){}^8\text{Be}$. Схема моделирования показана на рис. 2. Геометрия моделирования была описана следующим образом: от источника нейтроны направлялись (в соответствии с заданным угловым распределением) на систему формирования пучка холодных нейтронов. Система замедления состояла из оргстекла, тяжелой воды, свинцовых пластин, бетона. После прохождения системы замедления нейтроны попадали в чувствительную область, в которой происходил сбор информации об их энергии и накопление гистограмм. Физика процессов, происходящих при прохождении нейтронов через СФП, была описана пакетом G4NeutronHP [12, 13]. Источник нейтронов в моделировании отвечает реальному спектру нейтронов, генерируемых на ускорительном источнике нейтронов VITA. Спектр генерируемых в реакции ${}^7\text{Li}(p, n){}^7\text{Be}$ нейтронов был заранее получен путем моделирования в среде Geant4 [14]. Спектр нейтронов, рождаемых в реакции ${}^7\text{Li}(d, n){}^8\text{Be}$, был получен экспериментально с использованием спектрометра UNSD-15 ранее.

Схема эксперимента представлена на рис. 3. В качестве замедлителей использовались пластины из оргстекла $(\text{C}_5\text{O}_2\text{H}_8)_n$ (плотность $1,18 \text{ г/см}^3$, диаметр 10 мм, толщина 12 мм) и сосуды объемами 2079 и 4620 см^3 (2,079 и 4,620 л), наполняемые обыкновенной или тяжелой водой комнатной или криогенной (73 К) температуры [15–17]. Элементы системы были расположены следующим образом: сразу после литиевой мишени 1 располагали пластины из оргстекла 3, за ними сосуды с водой/тяжелой водой 4. В каждом испытании толщину замедления нейтронов изменяли посредством

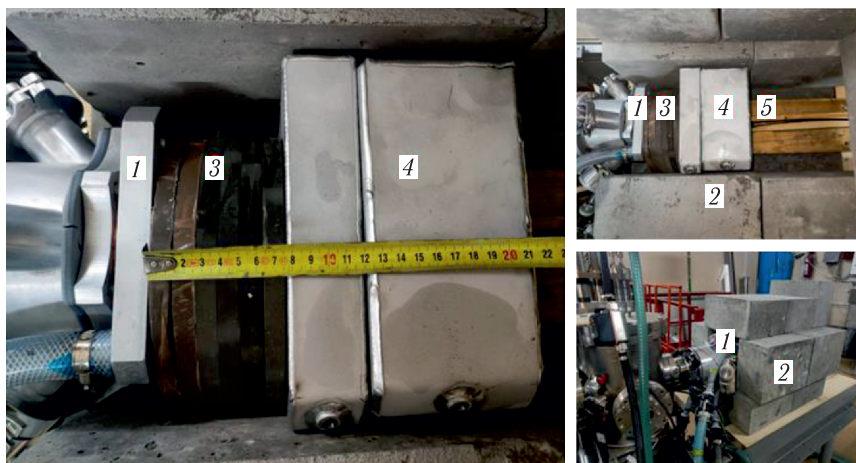


Рис. 3. Схема эксперимента: 1 — литиевая мишень; 2 — бетонные блоки, обогащенные бором; 3 — пластины оргстекла; 4 — замедлитель из воды/тяжелой воды; 5 — детектор нейтронов

удаления пластин из оргстекла или сосудов с водой. По периметру замедляющей части в качестве отражателей и элементов радиационной защиты использовали бетонные блоки 2. Измерения проводились по 90 с, с двукратным повторением. В результатах указаны усредненные показания детектора. Так, в ходе серии экспериментов были получены зависимости количества замедленных после термализации нейтронов от длины замедлителя.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В результате моделирования прохождения нейтронов через СФП холодных нейтронов был получен спектр замедленных нейтронов, показанный на рис. 4. При общем количестве нейтронов 10^8 большинство из них, на уровне 10^5 , имеют энергию от 0 до 0,001 эВ. Моделирование показало эффективность выбранных для системы материалов и возможность получения с ее помощью холодных нейтронов.

Перед началом экспериментов ожидалось, что при получении холодных нейтронов детектором будет фиксироваться большее количество нейтронов, чем в случае работы с тепловыми или быстрыми нейтронами. Это связано с тем, что сечение захвата нейтрона бором увеличивается с уменьшением энергии нейтрона. В ходе исследований гипотеза подтвердилась, действительно, при оптимальном объеме замедлителя фиксировалось увеличение количества зарегистрированных борным детектором нейтронов. Так была проведена первичная оптимизация геометрических параметров замедляющих элементов СФП холодных нейтронов.

На рис. 5 показана полученная в ходе эксперимента зависимость количества регистрируемых детектором нейтронов от длины замедления на оргстекле. До отметки в 36 мм количество регистрируемых нейтронов растет, что говорит о более эффективном захвате нейтронов бором и, соответственно, их термализации.

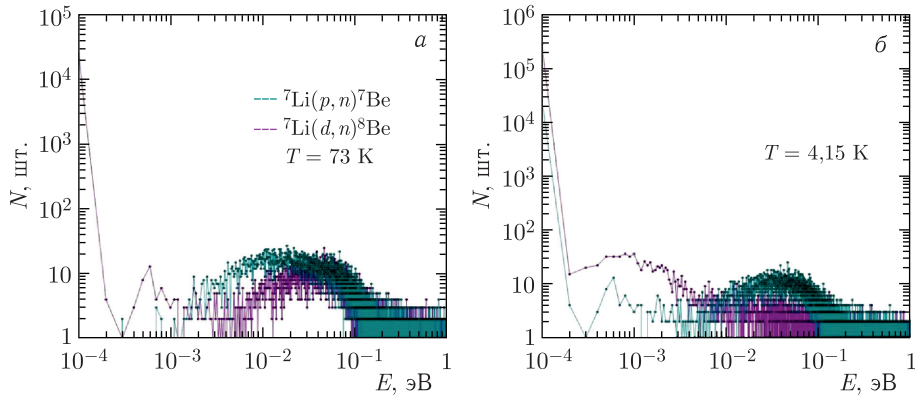


Рис. 4. Спектр нейтронов, полученный при моделировании с параметрами: а) замедлитель из тяжелой воды 150 мм при температуре 73 К, количество частиц — 10^8 шт.; б) замедлитель из тяжелой воды 150 мм при температуре 4,15 К, количество частиц — 10^8 шт.

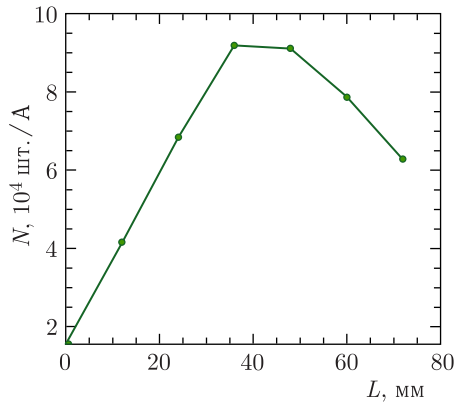


Рис. 5. Зависимость количества регистрируемых нейтронов от длины замедления на оргстекле при комнатной температуре

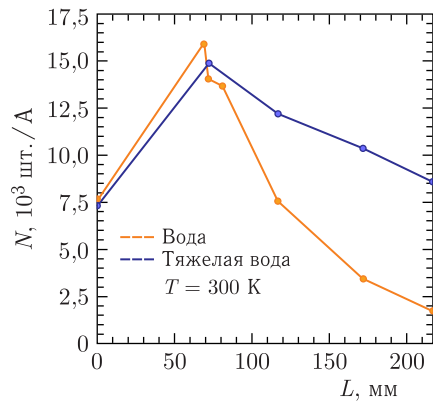


Рис. 6. Зависимость количества регистрируемых нейтронов от длины замедления на воде и тяжелой воде при комнатной температуре

В ходе исследований было установлено, что для предзамедляющей части СФП холодных нейтронов можно эффективно использовать 36 мм оргстекла или 45 мм воды при комнатной температуре. Зависимость, показанная на рис. 6, отражает процесс замедления уже термализованных на оргстекле нейтронов: первая точка отвечает количеству задетектированных нейтронов, прошедших от литевой мишени без замедлителя. Вторая точка отражает количество нейтронов, прошедших через 72 мм оргстекла. Следующие точки показывают замедление термализованных нейтронов при использовании замедлителя из воды или тяжелой воды при комнатной температуре.

Показано, что в качестве холодного замедлителя для СФП холодных нейтронов оптимальным замедлителем является тяжелая вода при криогенной температуре в резервуаре длиной более 145 мм. На рис. 7 показана зависимость, аналогичная зависимости, отраженной на рис. 6, но при криогенной температуре. В результате

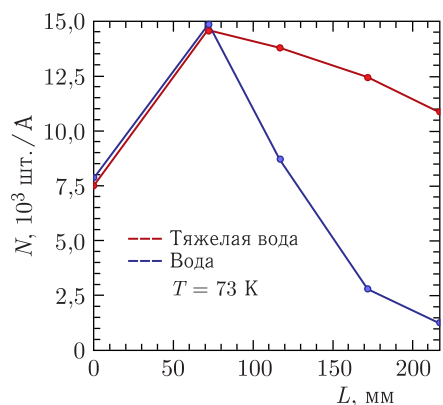


Рис. 7. Зависимость количества регистрируемых нейтронов от длины замедлителя на воде и тяжелой воде при криогенной температуре

замедления термализованных нейтронов на 145 мм теплого замедлителя было потеряно 89% нейтронов от начального потока на замедлителе из воды и 48% из тяжелой воды. В случае холодного замедлителя — 84% на замедлителе из воды и 26% из тяжелой воды. Плавный спад количества регистрируемых нейтронов при увеличении длины замедлителя из тяжелой воды говорит о том, что тяжелая вода почти не поглощает нейтроны.

В дальнейших исследованиях планируется продолжить оптимизацию параметров элементов СФП холодных нейтронов и провести эксперименты по получению холодных нейтронов при генерации начального пучка нейтронов в ядерной реакции ${}^7\text{Li}(d, n){}^8\text{Be}$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Описана предложенная и разработанная система формирования пучка холодных нейтронов для ускорительного источника нейтронов с вакуумной изоляцией VITA. В качестве основных элементов системы рассматриваются: предзамедлитель для термализации нейтронов, холодный замедлитель, отражатели, элементы, ограничивающие прохождение γ -квантов от системы. Обсуждены результаты моделирования в среде разработки Geant4, посвященные замедлению нейтронов в СФП. Согласно результатам моделирования показана возможность получения холодных нейтронов на ускорительном источнике нейтронов VITA с СФП. В ходе экспериментов, направленных на получение холодных нейтронов, подтверждена гипотеза о том, что тяжелая вода при температуре 73 К является оптимальным замедлителем нейтронов для дальнейших испытаний. Экспериментально установлены геометрические параметры замедляющих элементов СФП холодных нейтронов: 36 мм оргстекла или 45 мм воды при комнатной температуре для предзамедляющей части и более 145 мм тяжелой воды при криогенной температуре для холодного замедлителя.

Исследование выполнено за счет Российского научного фонда, грант № 19-72-30005, <https://rscf.ru/project/19-72-30005/>.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ahmed M., Alberti D., Altieri S. et al. Advances in Boron Neutron Capture Therapy. International Atomic Energy Agency. Vienna, 2023. 416 p.
2. Khidirov I., Jin Xinzhe. Neutron Diffraction. Principles, Instrumentation and Application. Ibaraki, Japan, 2013. 79 p.
3. Clark D.D., Ouellet C.G., Berg J.S. On the Design of a Cold Neutron Source // Nucl. Sci. Engin. 2017. P. 445–454.

4. *Кониц П. И.* Нейтроноводная система реактора ПИК. Дис. . . канд. физ.-мат. наук. Гатчина, 2020. 118 с.
5. *Taskaev S. Y.* Development of an Accelerator-Based Epithermal Neutron Source for Boron Neutron Capture Therapy // *Phys. Part. Nucl.* 2019. V. 50, No. 5. P. 569–575.
6. *Mocko M., Daemen L. L., Hartl M. A., Huegle Th., Muhrer G.* Experimental Study of Potential Neutron Moderator Materials. USA, Los Alamos // *Nucl. Instr. Meth. A.* 2010. V. 624. P. 173–179.
7. *Брюханова Ю. А., Дашков И. Д., Дьячков И. С., Каплун С. В., Кэбин Э. И., Ланской Д. Е., Рогатнев С. С., Сидоров С. В., Третьякова Т. Ю., Федоров Н. А., Фурсова Н. Ю., Чашин С. М., Шоркин Р. А.* Нейтрон. М.: КДУ, 2021. 156 с.
8. *Колесников Я. А., Сорокин И. Н., Таскаев С. Ю.* // ПТЭ. 2020. № 6. С. 17.
9. *Вуков Т., Goloshevskii N., Gromilov S., Kasatov D., Kolesnikov Ia., Koshkarev A., Makarov A., Ruktuev A., Shchudlo I., Sokolova E., Taskaev S.* // *Nucl. Instr. Meth. B.* 2020. V. 481. P. 62.
10. *Porosev V., Savinov G.* Evaluation of Boron-Enriched Plastic Scintillator for Thermal Neutron Detection // *J. Instrum.* 2019. V. 14. P. P06003.
11. *Касатов Д. А., Кошкарев А. М., Макаров А. Н., Остреинов Г. М., Таскаев С. Ю., Щудло И. М.* Источник быстрых нейтронов на основе ускорителя-тандема с вакуумной изоляцией и литиевой мишени // ПТЭ. 2020. № 5. С. 5–9.
12. *Geant4 Collab.* Book for Application Developers. 2022. 479 p.
13. *Geant4 Collab.* Physics Reference Manual. 2022. 458 p.
14. *Вуков Т. А., Kasatov D. A., Koshkarev A. M., Makarov A. N., Leonov V. V., Porosev V. V., Savinov G. A., Savinov S. S., Shchudlo I. M., Taskaev S. Yu., Verkhovod G. D.* Evaluation of Depth-Dose Profiles in a Water Phantom at the BNCT Facility at BINP // *J. Instrum.* 2021. V. 16. P. P10016.
15. *Куликов С. А., Шабалин Е. П.* Сравнение эффективности материалов холодных замедлителей нейтронов для реактора ИБР-2М. Сообщ. ОИЯИ Р17-2005-222. Дубна, 2005. 11 с.
16. *Магомедбеков Э. П., Баранов С. В., Белкин Д. Ю., Розенкевич М. Б., Растунова И. Л.* Тяжелая вода — свойства, получение и применение в ядерной отрасли // Сб. докл. Пятой Междунар. конф. и Девятой Междунар. шк. молодых ученых и специалистов им. А. А. Курдюмова «Взаимодействие изотопов водорода с конструкционными материалами» (IHISM'14 JUNIOR), Саров, Россия, 7–11 июля 2014 г. 2015. С. 39–56.
17. *Митюхляев В. А.* Создание источников холодных нейтронов и ультрахолодных нейтронов для нейтронных исследований. Дис. . . канд. физ.-мат. наук. Санкт-Петербург, 2010. 171 с.

Получено 15 сентября 2023 г.