

**ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ /  
PHYSICAL CHARACTERISTICS AND THEIR STUDY**

Известия высших учебных заведений. Материалы электронной техники. 2023. Т. 26, № 3. С. 248—255.

DOI: 10.17073/1609-3577j.met202308.519

УДК 621.382.8; 615.849.12

**Источник нейтронов для исследования  
биологических объектов сформированный  
из поверхностно соприкасающихся конусов,  
выполненных из борированных сферопластиков**© 2023 г. В. В. Сиксин<sup>1</sup>,✉

<sup>1</sup> *Физический институт имени П.Н. Лебедева Российской академии наук,  
Ленинский просп., д. 53, Москва, 119991, Российская Федерация*

✉ Автор для переписки: 11vypet\_lb\_salo@inbox.ru

**Аннотация.** На медицинском ускорителе «Прометеус» при энергии пучка протонов 225 МэВ был сконструирован источник быстрых и эпитепловых нейтронов, а также проведены измерения дозных профилей нейтронов на выходе нейтронного канала с помощью детектора БДМН–100. Для получения быстрых нейтронов применялась тяжелая мишень NaI. Совместно с исследовательской лабораторией ЦЗЛ АО «Авангард» разработан новый защитный материал от нейтронов с разным процентным соотношением <sup>10</sup>B под названием wikineutron. На его основе формировалась теневая защита, выполненная в виде поверхностно соприкасающихся конусов, конструирующая канал быстрых и эпитепловых нейтронов. Разработанный нейтронный канал может использоваться для проведения медицинских работ по созданию новых радиофармпрепаратов, содержащих бор и другие сильнопоглощающие элементы. Возможно также применение нейтронного источника от ускорителя «Прометеус» для терапии поверхностно расположенных опухолей. Основной целью работы было формирование на основе разработанных нейтронопоглощающих материалов нейтронного канала, который обладает простой конструкцией и может быть применен для борнейтронзахватной и «надэпитепловой» терапии, а также создание на нейтронном канале пучка эпитепловых и надэпитепловых нейтронов для оценки эффективности применения радиофармпрепаратов. Разработанные нейтронопоглощающие материалы позволили создать нейтронный канал эпитепловых и надэпитепловых нейтронов для терапии и разработки радиосенсибилизаторов на основе золота.

**Ключевые слова:** композитный нейтронопоглощающий материал, эпитепловые и надэпитепловые нейтроны, проверка эффективности радиосенсибилизаторов, нейтронный «биологический» канал

**Благодарности:** Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках Соглашения № 075–15–202.

Автор выражает благодарность В.А. Рябову и И.Н. Завестовской за обсуждение аспектов технического решения по проектированию исследовательского канала на нейтронах, для возможностей применения нейтронного канала на ускорителе «Прометеус».

Автор выражает благодарность В.Е. Балакину за обсуждение аспектов технического решения по проектированию исследовательского канала на нейтронах, для биологических экспериментов на ускорителе «Прометеус».

Автор выражает благодарность А.И. Львову за обсуждение испытания электронных компонентов детектора нейтронов камеры МИК на ускорителе «Прометеус» (6 июня 2023 г.) и ускорителе «Пахра» на сеансе в марте 2023 г.

**Для цитирования:** Сиксин В.В. Источник нейтронов для исследования биологических объектов сформированный из поверхностно соприкасающихся конусов, выполненных из борированных сферопластиков. *Известия высших учебных заведений. Материалы электронной техники.* 2023; 26(3): 248—255. <https://doi.org/10.17073/1609-3577j.met202308.519>

## A neutron source for the study of biological objects formed from superficially touching cones made of borated spheroplastics

V. V. Siksin<sup>1</sup>✉

<sup>1</sup> *Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences,  
53 Leninsky Ave., Moscow 119991, Russian Federation*

✉ Corresponding author: [kos@isp.nsc.ru](mailto:kos@isp.nsc.ru)

**Abstract.** At the Prometheus medical accelerator with a proton beam energy of 225 MeV, a source of fast and epithermal neutrons was constructed and measurements of neutron dose profiles at the output of the neutron channel were carried out using the BDMN–100 detector. A heavy NaI target was used to produce fast neutrons. Together with the research laboratory of the Central Laboratory of Avangard JSC, a new protective material against neutrons called wikineutron was developed, with a different percentage of  $^{10}\text{B}$ . This new material has been studied many times at the Prometheus proton accelerator and the Pakhra electron accelerator. Based on the developed new protective materials against neutrons, a shadow protection was formed, made in the form of surface contacting cones, forming a channel of fast and epithermal neutrons. Fast neutrons can be used for remote therapy. Also, a neutron beam can be used to study biological objects and cells. It is also possible to use a neutron source from the Prometheus accelerator for the treatment of superficial tumors. The developed neutron channel can be used for medical work on the creation of new radiopharmaceuticals containing boron and other highly absorbing elements. The developed neutron source is a compact low-power source of therapeutic neutrons, which can be used for the treatment of superficial types of cancer. The main goal of the work was: the formation, based on the developed neutron-absorbing materials, of a neutron channel, which has a simple design and can be used for boron-neutron capture therapy and nadepithermal therapy; creation on the neutron channel of a beam of epithermal neutrons and supra-epithermal neutrons to assess the effectiveness of the use of radiopharmaceuticals. The developed neutron-absorbing materials made it possible to create a neutron channel of epithermal neutrons and supra-epithermal neutrons for therapy and the development of gold-based radiosensitizers.

**Keywords:** composite neutron-absorbing material, epithermal and supra-epithermal neutrons, testing the effectiveness of radiosensitizers, neutron biological channel

**Acknowledgments:** The work was carried out with financial support from the Ministry of Education and Science of Russia under Agreement No. 075–15–202.

The author expresses gratitude to V.A. Ryabov and I.N. Zavestovskaya for discussing aspects of the technical solution for designing a neutron research channel for the possibility of using a neutron channel at the Prometheus accelerator.

The author expresses gratitude to V.E. Balakin for discussing aspects of the technical solution for designing a neutron research channel for biological experiments at the Prometheus accelerator. The author expresses gratitude to A.I. Lvov for discussing the testing of the electronic components of the neutron detector of the MIK chamber at the Prometheus accelerator (June 6, 2023) and the Pakhra accelerator at a session in March 2023.

**For citation:** Siksin V.V. A neutron source for the study of biological objects formed from superficially touching cones made of borated spheroplastics. *Izvestiya vuzov. Materialy elektronnoi tekhniki = Materials of Electronics Engineering*. 2023; 26(3): 248—255. <https://doi.org/10.17073/1609-3577j.met202308.519>

## Введение

Эпитепловые нейтроны применяются в бор-нейтронозахватной терапии (БНЗТ) [1]. В БНЗТ происходит селективное накопление нерадиоактивных ядер  $^{10}\text{B}$  в опухолевых клетках и поглощение нейтрона ядром  $^{10}\text{B}$ , приводящее к экзотермической реакции  $^{10}\text{B}(n, \alpha)^7\text{Li}$ . В работе предложено, кроме  $^{10}\text{B}$ , добавлять в опухолевые клетки радиосенсибилизаторы с высоким атомным номером, например наночастицы золота [2—5]. Благодаря высокой биологической эффективности положительные результаты получают от применения нейтронной терапии на пучках эпитепловых и надэпитепловых нейтронов с энергией от 0,01 до 0,5 МэВ (диапазон надэпитепловых нейтронов). Результаты лечения онкологических больных эпитепловыми и быстрыми нейтронами с энергией до 50 МэВ частично представлены в работах [6—12]. Применение технологии БНЗТ дает терапевтический эффект (отношение полезной дозы в опухоли к вредной дозе в окружающей ткани) вплоть до 5—6 [13], т.е. на уровне терапевтического эффекта для протонной терапии. В работе [13] рассматривается возможность создания источников с подкритическими сборками (ПКС), которые управляются ускорителями с нейтроноиспускающими мишенями. В связи с этим актуализировалась задача для усовершенствования таких источников.

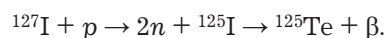
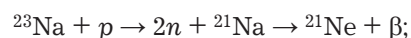
Цель работы — изучение биологической эффективности работы нейтронного канала: измерение угловой зависимости МЭД нейтронов (МЭД — мощность эквивалентной дозы) на выходе канала и разработка ускорительного источника нейтронов, который отличается простой конструкцией и может быть применен для дистанционной терапии, а также «биологических» экспериментов на ускорителе «Прометеус».

## Образцы и методы исследования

В исследовательской лаборатории ЦЗЛ АО «Авангард» совместно с Физическим институтом им. П.Н. Лебедева РАН (ФИАН) были разработаны защитные материалы от нейтронов на основе сферопластиков, которые обладают высокими ко-

эффициентами ослабления для нейтронов и малой массой. Новый защитный материал от нейтронов wikineutron (**wiki**), разработанный и испытанный на ускорителях «Прометеус» и «Пахра», хорошо подходит для формирования нейтронного канала на протонных и фотонных ускорителях. На базе разработанных пяти вариантов композиционных защитных материалов от нейтронов была сконструирована многослойная тeneвая защита, формирующая нейтронный канал. Для конструирования канала были применены такие защитные материалы, как сверхвысокомолекулярный полиэтилен (СВМПЭ) с добавлением карбида бора. Этот полиэтилен содержит карбид бора и компоненты вольфрама, нового материала wiki-1 и wiki-2 на основе боросодержащих сферопластиков и материала ПОВ-40 [14]. Все новые защитные материалы были многократно проверены на ускорителях «Прометеус» и «Пахра». Разработанный нейтронный канал может быть применен на ускорителе «Прометеус» для дистанционной терапии и лечения поверхностно расположенных опухолей. Для конструирования канала применен новый разработанный защитный материал на основе сферопластиков с добавками  $^{10}\text{B}$  — wikineutron. При бомбардировке различных мишеней ускоренными до энергии порядка 225 МэВ протонами образуются направленные преимущественно вперед нейтроны высокой энергии. Быстрые нейтроны могут быть замедлены внутри канала до эпитепловых нейтронов.

Для разработки нейтронного канала была применена мишень из кристалла NaI при энергии пучка протонов на ускорителе «Прометеус» — 225 МэВ. Поскольку мишень состоит из двух элементов — Na и I, их атомы взаимодействуют с протонами по различным (своим) реакциям. Атомная масса Na равна 23, элемент сначала превращается в изотоп Na с меньшей атомной массой, а затем распадается на неон Ne с испусканием  $\beta$ -частиц. На нижеприведенной схеме показаны возможные каналы реакции для остаточных ядер кристалла NaI:



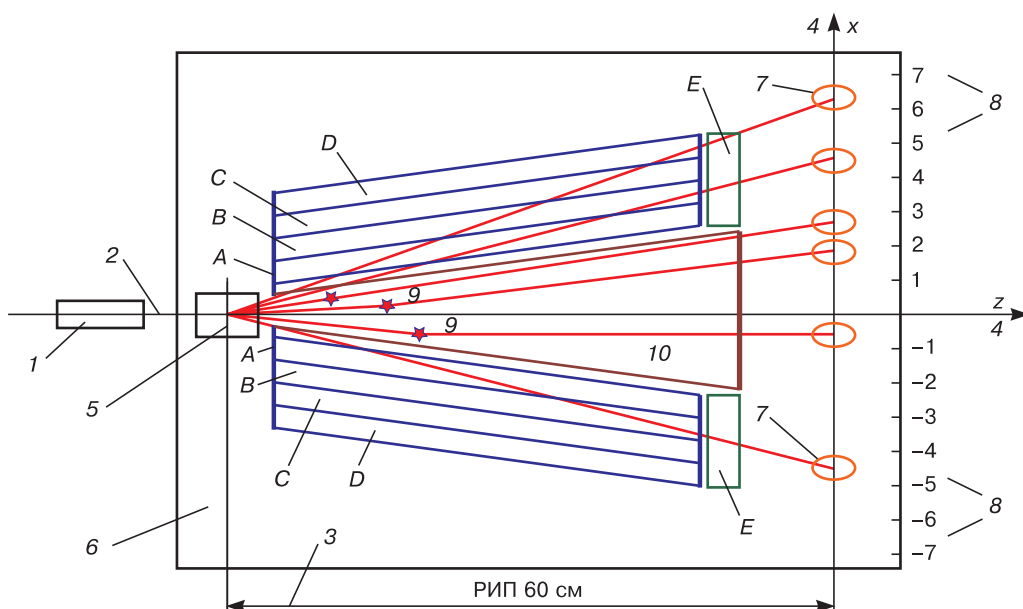


Рис. 1. Схема установки для проведения эксперимента:

1 — ускоритель «Прометеус»; 2 — пучок протонов выведенный из ускорителя; 3 — расстояние от источника до пациента (РИП); 4 — система координат для привязки пучка к оси  $x$ , вдоль которой происходит измерение дозы детектором нейтронов; 5 — мишень из кристалла NaI для образования потока быстрых нейтронов; 6 — рама экспериментальной установки, на которой устанавливалась мишень 5 и детектор нейтронов 7; 8 — позиции детектора по отношению к направлению пучка протонов, которые были определены разметкой, нанесенной на раму; 9 — точки остановки быстрых нейтронов в водном фантоме-замедлителе и дальнейшего их замедления до эпитепловых; 10 — водный фантом для замедления быстрых нейтронов до эпитепловых нейтронов (который можно быстро выдвигать из пучка); A, B, C, D и E — обозначение защитных материалов различного состава, создающих теньевую защиту и формирующих нейтронный пучок в канале

Fig. 1. Scheme of the setup for the experiment:

(1) "Prometheus" accelerator; (2) proton beam extracted from the accelerator; (3) distance from the source to the patient (РИП); (4) coordinate system for linking the beam to the  $x$ -axis, along which the dose is measured by the neutron detector; (5) NaI crystal target for generating a flux of fast neutrons; (6) frame of the experimental setup on which target 5 and neutron detector 7 were installed; (8) detector positions relative to the direction of the proton beam, which were determined by markings on the frame; (9) points of stopping fast neutrons in the water phantom moderator and their further slowing down to epithermal; (10) water phantom for slowing down fast neutrons to epithermal neutrons (which can be quickly pulled out of the beam); A, B, C, D and E is designation of protective materials of various compositions that create shadow protection and form a neutron beam in the channel

### Конструирование нейтронного канала и схема проведения эксперимента на ускорителе «Прометеус»

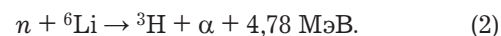
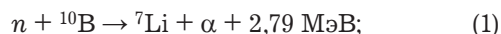
Нейтронный канал конструировался на ускорителе «Прометеус» из четырех усеченных, вложенных друг в друга конусов, сформированных из четырех различных защитных материалов и обечайки с выходным отверстием. Для формирования канала были применены защитные материалы: 1) СВМПЭ с добавлением карбида бора (этот материал будет в дальнейшем обозначен как B); 2) СВМПЭ, содержащий карбид бора и компоненты вольфрама, — A; 3) материал wiki-2 (это материал с добавлением компонентов  $^{10}\text{B}$  20 % — C); 4) материал wiki-1 (это материал с добавлением  $^{10}\text{B}$  10 % — D). Обечайкой с выходным отверстием был ПОВ-40 (обозначен как E-обечайка), исследованный в работе [14]. На рис. 1 приведена схема установки по формированию нейтронного канала, состоящая из пяти защитных материалов, условно обозначенных как A, B, C, D и E. Тестирование канала было проведено на ускорителе «Прометеус» на протонном пучке с энергией 225 МэВ, который

взаимодействовал с мишенью NaI, и в направлении вперед вылетали «мгновенные» нейтроны, регистрируемые установленным на выходе из канала нейтронным детектором БДМН-100.

Интенсивность пучка протонов за импульс ускорителя составляла  $8,5 \cdot 10^8$  протонов за импульс, время между импульсами — 2 с, выпуск ускорителя — 150 мс.

### Устройство нейтронного детектора

Блок детектирования нейтронов основан на регистрации вторичных частиц, образующихся в результате взаимодействия нейтронов с атомными ядрами [15]. Для регистрации тепловых нейтронов пригодны ядерные реакции с вылетом заряженных частиц:



Регистрация нейтронов осуществляется по реакции (2).

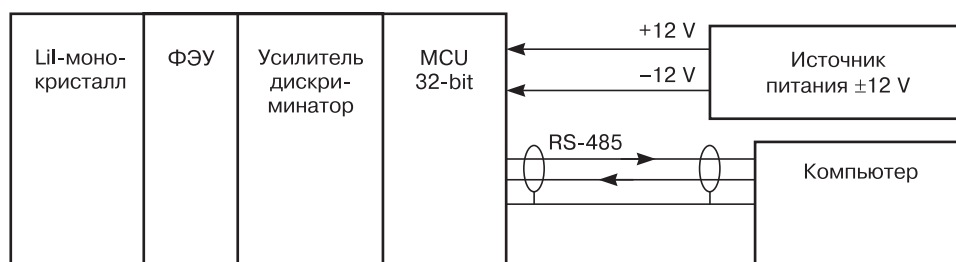


Рис. 2. Устройство детектора нейтронов БДМН–100 (вариант применявшийся в эксперименте автора)

Fig. 2. The device of the BDMN–100 neutron detector (the version used in the author's experiment)

Для регистрации нейтронов применялся детектор БДМН–100, разработанный на НПП «Доза». В блок детектирования БДМН–100 входила плата с микроконтроллером MCU и устройством передачи данных на базе интерфейса RS–485 с протоколом обмена Modbus. Из комнаты для пациента (канал), где находилась экспериментальная установка (см. рис. 1), детектор, размещенный в шаровом замедлителе, передавал в пультовую по линии связи информацию на компьютер. Информация представлялась в виде дозы МЭД/180 с в ЗвТ или, что эквивалентно, в виде амбиентной дозы за установленное оператором время 180 с.

На рис. 2 представлено устройство детекторного блока, который применялся в нашем эксперименте. Детектор состоит также из усилителя дискриминатора, 32–битного микроконтроллера MCU и передатчика сигналов с MCU по четырем кабелям в пультовую ускорителя на компьютер. По двум кабелям из пультовой на детекторный блок подавалось питание  $\pm 12$  В. Детектор состоит из сцинтиллятора диаметром 20 мм, толщиной 4 мм, кремниевого фотоумножителя и встроенного делителя напряжения (см. рис. 2).

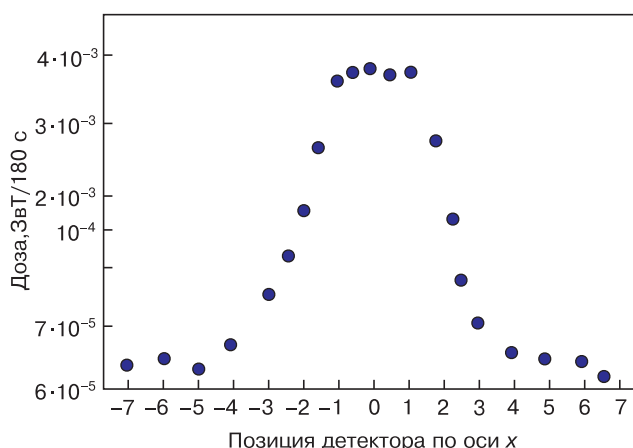
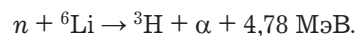


Рис. 3. Профиль дозы МЭД быстрых нейтронов, выходящих из канала, относительно перемещения детектора вдоль оси x при энергии пучка протонов из ускорителя 225 МэВ. Коэффициент ослабления на «крыльях» канала составляет не менее 71,4

Fig. 3. Dose profile of the equivalent dose rate of fast neutrons emerging from the channel relative to the movement of the detector along the x axis at a proton beam energy from the accelerator of 225 MeV. The attenuation coefficient on the "wings" of the channel is at least 71.4

Сцинтиллятор в детекторном блоке, приведенном на рис. 2, собран из монокристалла LiI, который имеет большое сечение захвата для эпитепловых и быстрых нейтронов. На плате в детекторном блоке установлен усилитель–дискриминатор и микроконтроллер MCU. В MCU происходит обработка и преобразование измеренной информации, поступающей в виде последовательности статистически распределенных нормализованных импульсов с ФЭУ (фотоэлектронный умножитель) в информацию о МЭД нейтронного излучения.

Эффективность применяемого детектора БДМН–100 для регистрации нейтронов на несколько порядков выше, чем фотонов. Детектор регистрирует только несколько процентов пролетающих через него фотонов и более 90 % пролетающих через него нейтронов. Для эпитепловых нейтронов пригодны ядерные реакции с вылетом заряженных частиц. В нашем случае регистрация эпитепловых нейтронов осуществляется по реакции:



Продукты реакции —  $\alpha$ -частицы — вызывают в сцинтилляторе детекторного блока импульсы сцинтилляции длительностью около 50 нс, регистрируемые ФЭУ. Блок детектирования (который вставляется в шар–замедлитель) состоит из монокристалла LiI, сигнал с которого снимается ФЭУ, усилителя дискриминатора и микроконтроллера (MCU 32-bit). По дуплексной связи RS–485 информация с блока детектирования передавалась по кабелям из комнаты пациента, где проводился эксперимент, в пультовую на компьютер оператора. Информация на компьютере представлялась в виде амбиентной дозы за установленное оператором время 180 с.

### Результаты измерения профиля быстрых и эпитепловых нейтронов на выходе из канала, сформированного на ускорителе «Прометеус»

На ускорителе «Прометеус» были измерены мощности дозы быстрых нейтронов, вылетающих под небольшими углами из мишени NaI от выведенных из ускорителя протонов с энергией 225 МэВ.



В данной работе пучок протонов направлялся на тяжелую мишень из NaI толщиной 5 см и диаметром 7 см и образовывал поток нейтронов, который регистрировался детектором нейтронов, и определялась детекторным блоком БДМН-100 мощность дозы МЭД в изучаемой точке на оси  $x$  (см. рис. 1). Набор дозы МЭД за 180 с детектором БДМН-100 назывался экспозицией за 1 RUN. Нейтронный детектор передвигался для каждой экспозиции вдоль оси  $x$  и устанавливался в определенное положение (позицию). Разметка между соседними позициями составляла 4 см. Для каждой позиции набиралась статистика RUN достаточная для измерения дозы с точностью 10 %. Эти результаты измерений МЭД вдоль оси  $x$  приведены на рис. 3. На рис. 3 представлены результаты измерения профиля нейтронного пучка на выходе из канала при 225 МэВ, когда водный фантом-замедлитель был выдвинут из пучка и детектор регистрировал только быстрые нейтроны. Оператор на компьютере задавал для детекторного блока экспозицию равную 180 с. Далее осуществлялся набор следующей экспозиции дозы для данной позиции относительно оси  $x$  и переход на следующую позицию.

В сеансе на ускорителе «Прометеус», состоявшемся 6 июня 2023 г., были проведены измерения угловой зависимости МЭД быстрых нейтронов при перемещении детектора вдоль оси  $x$  для позиций, начиная от «поз = -7» до «поз = +7». Результаты измерений МЭД вдоль оси  $x$  приведены на рис. 3. Из рис. 3 видно, что доза (поток быстрых нейтронов) в 71,4 раза выше, чем поток на крыльях канала за биологической защитой.

Эксперимент подтвердил также большой выход нейтронов на тяжелой мишени NaI. Исследование показало, что данный прототип канала ослабляет с помощью своей биологической защиты летящие не в направлении изучаемого биологического объекта нейтроны приблизительно в 72 раза. Коэффициент биологической защиты можно представить как отношение дозы быстрых нейтронов, летящих из выходного отверстия канала по оси  $z$  к дозе на крыльях распределения (см. рис. 3):

$$K = \text{doza}(0 + -2 \text{ «поз.»}) / \text{doza}(-7 \text{ «поз.»}) = 5 \cdot 10^{-3} / 7 \cdot 10^{-5} = 500/7 = 71,42.$$

На рис. 4 представлены результаты измерения профиля нейтронного пучка на выходе из канала при 225 МэВ, когда водный фантом 10 (см. рис. 1) находился внутри канала и измерялся профиль эпитепловых нейтронов.

При создании ускорительного источника нейтронов для нейтронзахватной терапии необходимо уменьшить на выходе из канала (см. рис. 1) примесь быстрых нейтронов и увеличить процентное

содержание эпитепловых нейтронов. Это было одной из целей данной работы. Также одной из задач работы [16] было уменьшение в нейтронном пучке процентного содержания высокоэнергетичных нейтронов и увеличение процентного содержания эпитепловых нейтронов. В работе [16] был разработан ускорительный источник нейтронов для нейтронзахватной терапии, где так же, как и в нашей работе, оценивается примесь быстрых нейтронов в результирующем пучке эпитепловых нейтронов. На рис. 5 приводятся расчеты из работы [16], где приводится оценочная кривая для нашего источника эпитепловых нейтронов — кривая 3. На рисунке

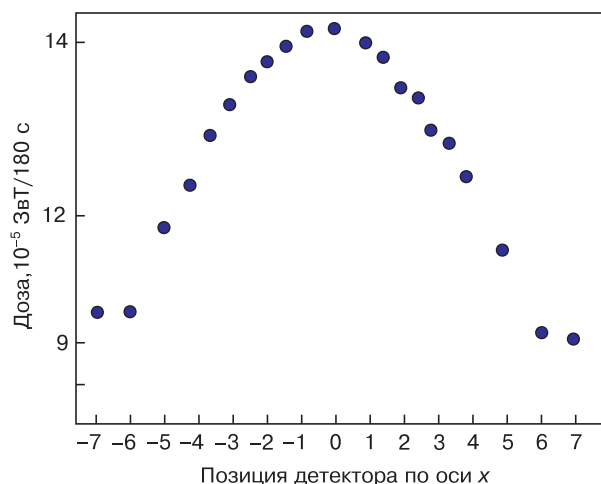


Рис. 4. Профиль дозы МЭД эпитепловых нейтронов на выходе из канала при энергии 225 МэВ относительно перемещения детектора вдоль оси  $x$

Fig. 4. Power profile of the equivalent dose of epithermal neutrons at the exit from the channel at an energy of 225 MeV relative to the movement of the detector along the  $x$  axis

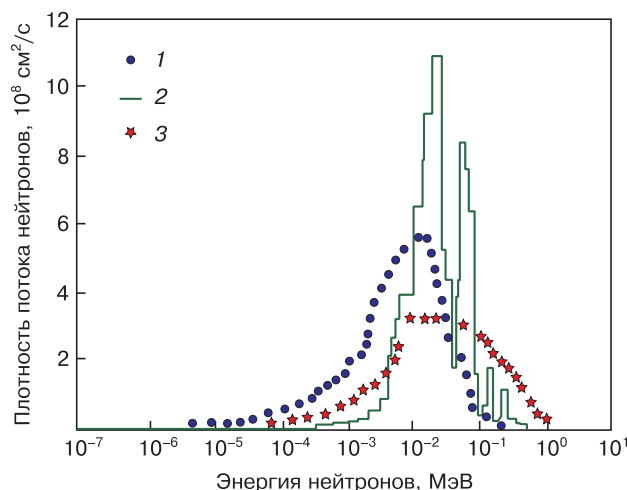


Рис. 5. Энергетический спектр нейтронов на выходе из канала [16]: 1 — выход нейтронов из замедлителя  $\text{MgF}_2$ ; 2 — расчетная кривая из работы [16]; 3 — расчетная кривая для эксперимента, сделанная для геометрии согласно рис. 1

Fig. 5. Energy spectrum of neutrons at the exit from the channel [16]: (1) neutron output from the  $\text{MgF}_2$  moderator; (2) calculated curve from [16]; (3) calculated curve for the experiment, made for the geometry according to Fig. 1

графически представлены расчетные кривые, сделанные в работе [16], а также расчетная кривая для геометрии нашего эксперимента согласно рис. 1. На рис. 5 приведен спектр эпитепловых нейтронов на выходе из замедлителя 10, который в нашем случае заполняет внутреннюю часть канала (см. рис. 1). Для нашего эксперимента, как видно из кривой 3 на рис. 5, примесь быстрых нейтронов невелика.

### Заключение

Основные результаты проведенных исследований состоят в следующем:

1. Удалось сконструировать из новых нейтронопоглощающих материалов простой и компактный источник эпитепловых нейтронов для

нейтронозахватной терапии и создания новых радиосенсибилизаторов.

2. Экспериментально изучены возможности получения пучка быстрых нейтронов на ускорителе «Прометеус» и измерены профили МЭД быстрого и эпитепловых нейтронного излучения на выходе из канала.

3. Измерено угловое распределение МЭД быстрых нейтронов на выходе из канала в месте расположения детектора под различными углами по отношению к направлению падения пучка на мишень.

4. Работа показала возможность применения новых защитных материалов, в том числе и wikineutron для создания канала на ускорителе «Прометеус» для терапии быстрыми нейтронами.

### Библиографический список

1. Заиди Л., Кашаева Е.А., Лежнин С.И., Малышкин Г.Н., Самарин С.И., Сычева Т.В., Таскаев С.Ю., Фролов С.А. Система формирования пучка нейтронов для бор-нейтронозахватной терапии. *Ядерная физика*. 2017; 80(1): 63—69. <https://doi.org/10.7868/S0044002717010160>
2. Butterworth K.T., McMahon S.J., Currell F.J., Prise K.M. Physical basis and biological mechanisms of gold nanoparticle radiosensitization. *Nanoscale*. 2012; 4(16): 4830—4838. <https://doi.org/10.1039/c2nr31227a>
3. Hubbell J.H., Seltzer S.M. Tables of x-ray mass attenuation coefficients and mass energy-absorption coefficients 1 keV to 20 MeV for elements Z = 1 to 92 and 48 additional substances of dosimetry interest. Radiation Physics Division, PML, NIST; 1996. <https://dx.doi.org/10.18434/T4D01F>
4. Cui L., Her S., Borst G.R., Bristow R.G., Jaffray D.A., Allen Ch. Radiosensitization by gold nanoparticles: will they ever make it to the clinic? *Radiotherapy and Oncology*. 2017; 124(3): 344—356. <https://doi.org/10.1016/j.radonc.2017.07.007>
5. Gerosa C., Crisponi G., Nurchi V.M., Saba L., Caprai R., Cau F., Faa G., Van Eyken P., Scartozzi M., Floris G., Fanni D. Gold nanoparticles: a new golden era in oncology? *Pharmaceuticals*. 2020; 13(8): 192. <https://doi.org/10.3390/ph13080192>
6. Dan Jones T.L., Fast neutron therapy. <https://www.canberra.edu.au/irps/bulletin/1996-2005/docs/15-2.pdf>
7. Быстрые нейтроны в онкологии. Под ред. Л.И. Мусабаевой. Томск: Издательство научно-технической литературы; 2000. 188 с.
8. Мусабаева Л.И., Головков В.М. Терапия быстрыми нейтронами в онкологии. *Сибирский онкологический журнал*. 2015; (2): 88—94.

9. Пат. (РФ) № 2009914832. МПК А61N5/10, G01N23/05, G21K1/02. Борисов Г.И., Ерак Д.Ю. Устройство для терапии онкологических заболеваний. Заявл.: 28.12.2009; опубл.: 27.07.2011. <https://www.freepatent.ru/patents/2424832>

10. Иванов В.К. Возможности и перспективы математического моделирования при лучевой терапии. *Медицинская радиология*. 1985; 30(3): 67.

11. Магдон Е. Относительная биологическая активность нейтронов с энергией 6,2 мэВ. *Медицинская радиология*. 1977; 22(10): 40—42.

12. Борисов Г.И., Кумахов М.А., Кондратенко Р.И. Расчетные оценки возможности реализации инвазивной нейтронно-захватной терапии с использованием капиллярных нейтронно-оптических систем. *Российский био-терапевтический журнал*. 2006; (1): 34.

13. Кураченко Ю.А., Казанский Ю.А., Матусевич Е.С. Подкритические системы для нейтрон-захватной терапии. *Известия вузов. Ядерная энергетика*. 2008; (3): 47—56.

14. Малютин Е.В., Сиксин В.В., Шемяков А.Е., Щеголев И.Ю. Защитные свойства материала ПОВ-40 в условиях облучения вторичными нейтронами и гамма-квантами. *Медицинская физика*. 2019; 4(84): 75—79.

15. Широков М., Юдин Н.П. Ядерная физика. М.: Наука; 1980. 728 с.

16. Кононов О.Е. Источники нейтронов на базе ускорителей для задач нейтронной и нейтронозахватной терапии. Автореф. дисс ...канд. физ.-мат. наук; 2010. 106 с.

### References

1. Zaidi L., Kashaeva E.A., Malyshkin G.N., Samarina S.I., Frolov S.A., Lezhnin S.I., Taskaev S.Y., Sycheva T.V. Neutron-beam-shaping assembly for boron neutron-capture therapy. *Physics of Atomic Nuclei*. 2017; 80(1): 60—66. <https://doi.org/10.1134/S106377881701015X>
2. Butterworth K.T., McMahon S.J., Currell F.J., Prise K.M. Physical basis and biological mechanisms of gold nanoparticle radiosensitization. *Nanoscale*. 2012; 4(16): 4830—4838. <https://doi.org/10.1039/c2nr31227a>

3. Hubbell J.H., Seltzer S.M. Tables of x-ray mass attenuation coefficients and mass energy-absorption coefficients 1 keV to 20 MeV for elements Z = 1 to 92 and 48 additional substances of dosimetry interest. Radiation Physics Division, PML, NIST; 1996. <https://dx.doi.org/10.18434/T4D01F>

4. Cui L., Her S., Borst G.R., Bristow R.G., Jaffray D.A., Allen Ch. Radiosensitization by gold nanoparticles: will they

ever make it to the clinic? *Radiotherapy and Oncology*. 2017; 124(3): 344—356. <https://doi.org/10.1016/j.radonc.2017.07.007>

5. Gerosa C., Crisponi G., Nurchi V.M., Saba L., Caprai R., Cau F., Faa G., Van Eyken P., Scartozzi M., Floris G., Fanni D. Gold nanoparticles: a new golden era in oncology? *Pharmaceuticals*. 2020; 13(8): 192. <https://doi.org/10.3390/ph13080192>

6. Dan Jones T.L., Fast neutron therapy. <http://www.canberra.edu.au/IRPS/archives/vol15no2/mempap.html>

6. Dan Jones T.L., Fast neutron therapy. <https://www.canberra.edu.au/irps/bulletin/1996-2005/docs/15-2.pdf>

7. Musabaeva L.I. (ed.). Fast neutrons in oncology. Tomsk: Izdatel'stvo nauchno-tekhnicheskoi literatury; 2000. 188 p. (In Russ.)

8. Musabaeva L.I., Golovkov V.M. Fast neutron therapy for cancer patients. *Sibirskij onkologičeskij žurnal*. 2015; (2): 88—94. (In Russ.)

9. Pat. (RU) No 2009914832. IPC A61N5/10, G01N23/05, G21K1/02. Borisov G.I., Erak D.Yu. Device for the treatment of oncological diseases. Appl.: 12.2.2009; publ.: 07.27.2011. (In Russ.). <https://www.freepatent.ru/patents/2424832>

10. Ivanov V.K. Possibilities and prospects of mathematical modeling in radiation therapy. *Meditinskaya radiologiya = The Medical Radiology*. 1985; 30(3): 67. (In Russ.)

11. Magdon E. Relative biological activity of neutrons with an energy of 6.2 meV. *Meditinskaya radiologiya = The Medical Radiology*. 1977; 22(10): 40—42. (In Russ.)

12. Borisov G.I., Kumakhov M.A., Kondratenko R.I. Calculation estimates of the possibility of implementing invasive neutron capture therapy using capillary neutron-optical systems. *Rossiiskii bioterapevticheskii zhurnal = Russian Journal of Biotherapy*. 2006; (1): 34. (In Russ.)

13. Kurachenko Yu.A., Kazansky Yu.A., Matusevich Eu.S. Subcritical systems for neutron capture therapy. *Izvestiya vuzov. Yadernaya energetika*. 2008; (3): 47—56. (In Russ.)

14. Malutin E.V., Siksın V.V., Shemyakov A.E., Sgegolev I.Ju. Protective properties of the POV-40 material under conditions of irradiation with secondary neutrons and gamma rays. *Medical Physics*. 2019; (4(84)): 75—79. (In Russ.)

15. Shirokov M., Yudin N.P. Nuclear physics. Moscow: Nauka; 1980. 728 p. (In Russ.)

16. Kononov O.E. Neutron sources based on accelerators for neutron and neutron capture therapy problems. Summary Diss. Cand. Sci. (Phys.–Math.); 2010. 106 p. (In Russ.)

#### Информация об авторе / Information about the author

**Сиксин Виктор Валентинович** — канд. физ.–мат. наук, старший научный сотрудник, Физический институт имени П.Н. Лебедева Российской академии наук, Ленинский просп., д. 53, стр. 4, Москва, 119991, Российская Федерация; e-mail: 11vvpel\_lb\_salo@inbox.ru

**Viktor V. Siksın** — Cand. Sci. (Phys.–Math.), Senior Researcher, Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences, 53 Leninsky Ave., Moscow 119991, Russian Federation; e-mail: 11vvpel\_lb\_salo@inbox.ru

Поступила в редакцию 14.08.2023; поступила после доработки 20.09.2023; принята к публикации 30.09.2023

Received 14 August 2023; Revised 20 September 2023; Accepted 30 September 2023

\* \* \*