

УСКОРИТЕЛЬ-ТАНДЕМ С ВАКУУМНОЙ ИЗОЛЯЦИЕЙ В КАЧЕСТВЕ МОЩНОГО ГЕНЕРАТОРА БЫСТРЫХ НЕЙТРОНОВ

*Д. А. Касатов^{а, б}, Я. А. Колесников^{а, б}, Н. Ш. Сингатулина^{а, б},
Е. О. Соколова^{а, б}, И. М. Щудло^{а, б}, С. Ю. Таскаев^{а, б, в}*

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

^б Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

^в Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия

Источники больших потоков нейтронов требуются для многих научных исследований и технологических применений. Ускорительный источник нейтронов VITA в Институте ядерной физики СО РАН используют как для генерации потока эпитепловых нейтронов с целью развития методики бор-нейтронозахватной терапии, так и для генерации потока быстрых нейтронов с целью радиационного тестирования перспективных материалов. Так, потоком быстрых нейтронов до флюенса $3 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ облучен ряд материалов, разработанных для Большого адронного коллайдера ЛНС, международного экспериментального термоядерного реактора ITER, Института теоретической и экспериментальной физики и для ряда других научных групп, и получены новые знания. В работе приведено описание ускорительного источника нейтронов VITA в качестве мощного генератора быстрых нейтронов и представлены результаты длительного экспериментального захода по генерации быстрых нейтронов. Также отмечены особенности и ограничения использования ускорительного источника нейтронов VITA для генерации мощного потока быстрых нейтронов и обсуждаются предложения по увеличению потока нейтронов с целью его дальнейшего использования как для радиационного тестирования материалов, так и радиационного тестирования оборудования.

High-flux neutron sources are required for many scientific research and technological applications. The VITA accelerating neutron source at the Budker Institute of Nuclear Physics is used both to generate epithermal neutron fluxes for the development of boron–neutron capture therapy and to generate fast neutron fluxes for radiation testing of promising materials. Thus, a number of materials developed for the Large Hadron Collider (LHC), the International Thermonuclear Experimental Reactor (ITER), the Institute of Theoretical and Experimental Physics, and for a number of other scientific groups were irradiated with a fast neutron flux up to a fluence of $3 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-2}$, and new knowledge was obtained. The paper describes the VITA accelerating neutron source as a powerful fast neutron generator and presents the results of a long experimental run on fast neutron generation. The features and limitations of using the VITA accelerating neutron source to generate a powerful fast neutron flux are also noted, and suggestions for increasing the neutron flux are discussed for its further use for radiation testing of materials and equipment.

PACS: 29.25.Dz

ВВЕДЕНИЕ

Нейтроны используются для различных целей. В случае радиационных испытаний материалов необходимо накопить не менее 10^{13} – 10^{14} нейтронов на квадратном сантиметре испытуемого материала, для чего плотность потока нейтронов должна быть не менее 10^8 – 10^9 см $^{-2}$ ·с $^{-1}$. Нейтроны также используются для проведения ядерного легирования кремния, для чего на 1 см 2 материала должно быть накоплено нейтронов 10^{14} – 10^{18} на 1 см $^{-2}$ материала [1], для этого используются ядерные реакторы. Нейтроны также используются для малоуглового рассеяния, дифрактометрии, спектрометрии, рефлектометрии, исследования механических напряжений, магнитной и кристаллической структуры материалов. Для этих целей необходимая плотность потока нейтронов составляет 10^5 – 10^6 см $^{-2}$ ·с $^{-1}$ [2].

Генерация нейтронов на линейных стационарных ускорителях заряженных частиц с энергией порядка единиц–десятков МэВ и током порядка единиц–десятков мА осуществляется в ряде ядерных реакций. Наиболее распространенные нейтроногенерирующие реакции [3] приведены на рис. 1. Среди них по выходу нейтронов выделяется реакция взаимодействия ядра лития с ядром дейтерия $\text{Li}(d, n)$ при энергии налетающего ядра дейтерия более 0,8 МэВ. Выход нейтронов в этой реакции при энергии дейтрона 1 МэВ сопоставим с выходом нейтронов в результате протекания ядерной реакции $\text{Li}(p, n)$. Применение ядерной реакции $\text{Li}(d, n)$ перспективно при генерации потока нейтронов для проведения исследований радиационной стойкости и других свойств при облучении материалов нейтронами.

Сформулируем требования для оптимальной установки для проведения исследований по радиационной стойкости материалов. В первую очередь важен выход нейтронов на установке как величина, обратная к необходимому времени облучения материалов. Важно значение не только максимального выхода нейтронов, но и возможность регулирования этого значения, т. е. регулировка тока и/или энергии пучка на установке. Установка должна быть, желательно, надежной, легко ремонтируемой, компактной и в то же время простой в реализации, недорогой. Это основные кри-

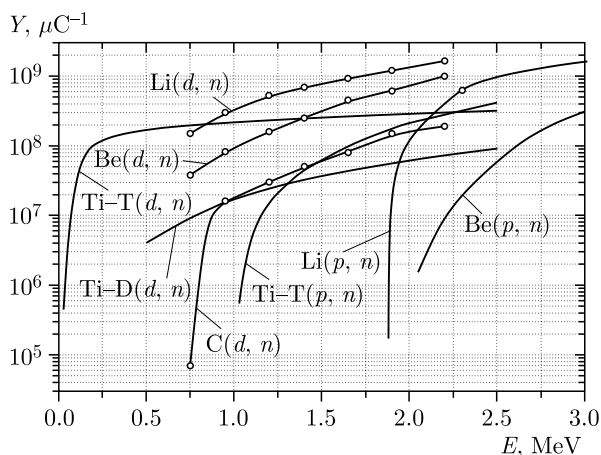


Рис. 1. Выход нейтронов в нейтроногенерирующих реакциях в толстых мишенях

терии, дополнительно можно указать удобство размещения/перестановки образцов и использование конструкционных материалов установки, слабоактивируемых или неактивируемых нейтронным потоком.

1. УСКОРИТЕЛЬ-ТАНДЕМ С ВАКУУМНОЙ ИЗОЛЯЦИЕЙ

Рассмотрим ускоритель-тандем с вакуумной изоляцией — линейный электростатический ускоритель заряженных частиц тандемного типа оригинальной конструкции [4]. Не останавливаясь на технических подробностях, обратимся к параметрам этой установки. Ускоритель-тандем с вакуумной изоляцией рассчитан на получение стационарного пучка протонов или дейтронов с энергией до 2,3 МэВ и током до 10 мА. Оригинальность этого типа ускорителя заключается в том, что вместо классической связки ускорительная трубка — изолятор в нем все изоляторы вынесены за пределы ускоряющих электродов и вместе составляют проходной изолятор, с которого высоковольтные потенциалы передаются на соответствующие ускоряющие электроды. Такая конструкция позволяет разместить ускоряющие электроды наиболее близко друг к другу, уменьшая проблемы с получением необходимого уровня вакуума и с компенсацией эффекта пространственного заряда пучка. Ускоритель отличается относительной простотой конструкции, легкостью обслуживания ионного источника, гибкой регулировкой энергии и тока пучка: энергия регулируется от 0,3 до 2,3 МэВ, ток — от наноампер до 10 мА.

2. УСКОРИТЕЛЬНЫЙ ИСТОЧНИК НЕЙТРОНОВ VITA

Рассмотрим теперь ускорительный источник нейтронов VITA, он показан на рис. 2. Изначально он был предложен в Институте ядерной физики СО РАН для реализации метода бор-нейтронозахватной терапии злокачественных опухолей. В изначальной концепции ускоритель-тандем с вакуумной изоляцией 1 размещен на трех этажах: на верхнем располагаются ускоряющие электроды 1б и обдирочная мишень 1в, на среднем — проходной изолятор 1г, на нижнем — высоковольтный источник питания 1д.

Вначале ускорительный источник нейтронов VITA использовали для проведения исследований в области бор-нейтронозахватной терапии — для получения необходимого выхода нейтронов из тонкой литиевой мишени за счет поднятия максимальных энергии и тока протонного пучка, для испытаний на клеточных культурах, лабораторных и домашних животных, для испытаний препаратов адресной доставки бора. На данный момент установка используется для множества различных применений, где востребована генерация нейтронов с полным выходом до 10^{12} с^{-1} или пучок протонов/дейтронов с плотностью мощности от 1 мкВт/см² до 20 кВт/см².

Одним из таких применений является генерация быстрых нейтронов для радиационного тестирования перспективных материалов для ITER, ЦЕРН и других научных групп. В 2022 г. был проведен длительный экспериментальный заход по генерации быстрых нейтронов. На протяжении 18 рабочих дней быстрые нейтроны генерировались в течение 8 ч. Выход нейтронов на протяжении всего экспериментального захода

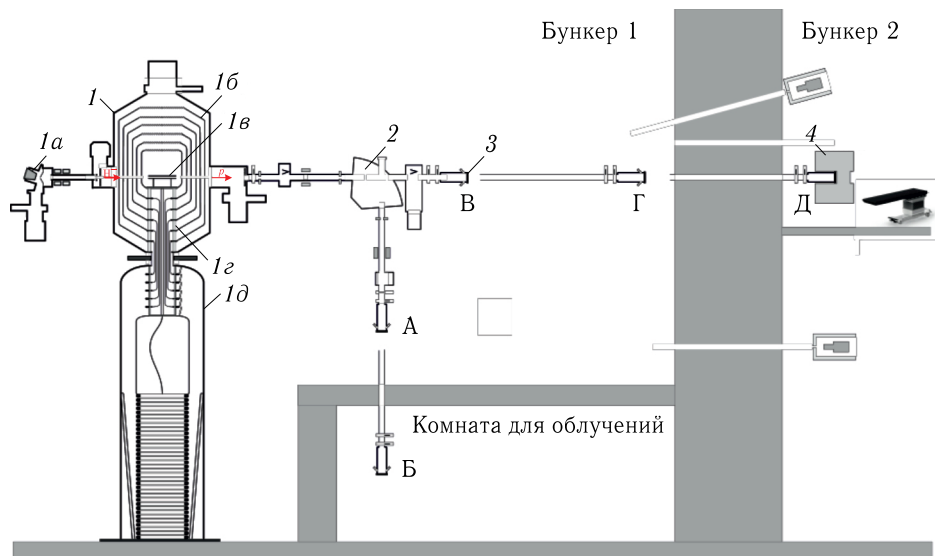


Рис. 2. Схема ускорительного источника нейтронов VITA: 1 — ускоритель-тандем с вакуумной изоляцией (1а — источник отрицательных ионов, 1б — высоковольтный и промежуточные электроды, 1в — газовая обдирочная мишень, 1г — проходной изолятор, 1д — высоковольтный источник питания); 2 — поворотный магнит; 3 — литиевая нейтроногенерирующая мишень; 4 — система формирования пучка нейтронов. Литиевую мишень размещают в положениях А, Б, В, Г или Д

был постоянным с точностью 10 % [5]. В экспериментальном заходе приняли участие группы из разных научных организаций, были облучены следующие материалы:

- бухты оптических кабелей, разработанные в Центре ядерных исследований Сакле (Франция) для работы Большого адронного коллайдера (ЦЕРН) в режиме повышенной светимости;
- полупроводниковые ФЭУ и DC–DC-конверторы для детектора ATLAS Большого адронного коллайдера ЦЕРН;
- алмазный детектор нейтронов для международного экспериментального термоядерного реактора ITER (Кадараш, Франция);
- пластины из карбида бора для ITER (Кадараш, Франция) [6];
- неодимовые магниты для гибридной квадрупольной линзы мощного линака Института теоретической и экспериментальной физики (Москва) [7];
- природные (попигайские) и синтетические алмазы для Института неорганической химии СО РАН (Новосибирск);
- газовые сенсоры на основе фталоцианинов титанила для ЛМИСиСФМ НГУ [8].

В образцах накопилось от $3 \cdot 10^{13}$ до $3 \cdot 10^{14}$ см⁻² нейтронов в зависимости от их размещения.

Однако, несмотря на успешное проведение экспериментального захода, VITA не оптимизирован для проведения мощного дейтронного пучка. Ток пучка дейтронов ограничен 1,5 мА. Ограничение связано с тем, что оптика ионного источника оптимизирована для генерации пучка отрицательных ионов водорода. Энергия пучка

дейтронов ограничена 1,5 МэВ в связи с тем, что источник питания поворотного магнита рассчитан на поворот протонного пучка с энергией 2,3 МэВ.

По этой и другим причинам актуальной задачей стала реализация идеи, опубликованной в статье [9] и защищенной патентом [10]. Идея заключается в том, чтобы разместить высоковольтный источник питания внутри верхней части проходного изолятора ускорителя-тандема, а от нижней части проходного изолятора отказаться. Такая установка, VITAmín, будет располагаться на одном этаже, и ее основой также будет являться ускоритель-тандем с вакуумной изоляцией.

3. УСКОРИТЕЛЬНЫЙ ИСТОЧНИК НЕЙТРОНОВ VITAmín

В разрабатываемом ускорительном источнике нейтронов VITAmín для питания высоковольтным напряжением ускоряющих электродов ускорителя-тандема с вакуумной изоляцией используется симметричный каскадный умножитель Кокрофта–Уолтона. Схема из статьи [9] и модель разрабатываемого компактного ускорителя-тандема с вакуумной изоляцией для установки VITAmín приведены на рис. 3.

Здесь 1, 2 и 3 — промежуточные электроды, высоковольтный электрод и газовая обдирочная мишень идентичны соответствующим элементам на ускорителе-тандеме с вакуумной изоляцией ускорительного источника нейтронов VITA. Различие в проходном изоляторе 4 — на VITAmín присутствует только верхняя часть, в ней все керамические изоляторы идентичны по составу и высоте. 5 — каскадный умножитель Кокрофта–Уолтона, в статье [4] предлагалось использовать по четыре секции на ускоряющий электрод.

На данный момент на 6 ускоряющих электродов ускорителя-тандема с вакуумной изоляцией используются 12 керамических изоляторов высотой 73 мм, между изо-

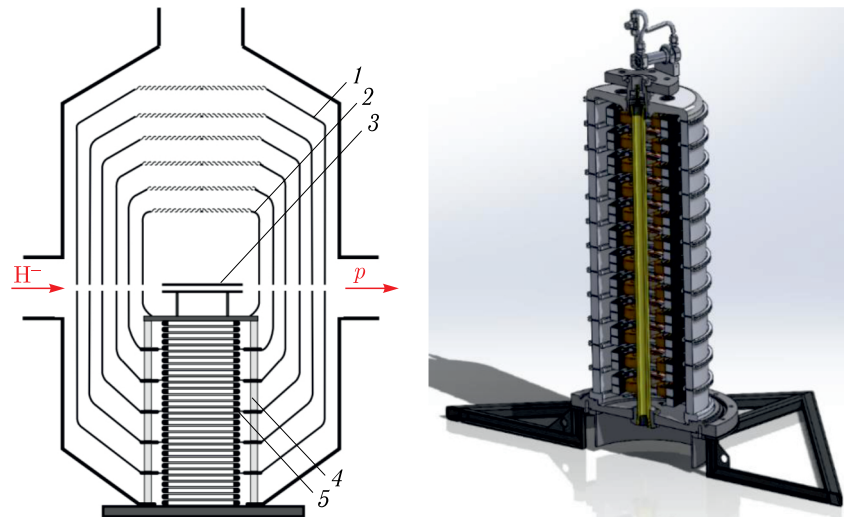


Рис. 3. Схема (слева) и модель (справа) разрабатываемого компактного ускорителя-тандема с вакуумной изоляцией для установки VITAmín

ляторами располагаются электроды, на которые присоединяются секции симметричного каскадного умножителя Кокрофта–Уолтона. Таким образом, имеются 12 секций, конденсаторы UNV-12A и диоды 2CLG50KV-1A в них рассчитаны на максимальное напряжение 50 кВ. На вход в каскадный умножитель будет подаваться напряжение 24 кВ с частотой 75 кГц, для этого используется AC-DC-преобразователь Meanwell SHP-10K-380L и разработанные в ИЯФ СО РАН инвертор и высоковольтный трансформатор. Так, для тока нагрузки в единицах миллиампер теоретическое выходное напряжение составит $U [\text{kВ}] = 2NU_0 - (IN^3) / (3fC) = 2 \cdot 12 \cdot 2,4 \cdot 10^4 - (I \cdot 10^{-3} \cdot 12^3) / (3 \cdot 7,5 \cdot 10^4 \cdot 1,7 \cdot 10^{-9}) = 4,8 \cdot 10^5 - 4,5 \cdot 10^3 I [\text{мА}]$. Таким образом, для тока 10 мА просадка напряжения составит 45 кВ, а максимальное напряжение получится 435 кВ. Энергия пучка, с учетом тандемности ускорителя и энергии инжекции пучка, составит $\sim 900 \text{ кэВ}$. Такой энергии пучка с током 10 мА достаточно для генерации быстрых нейтронов с полным выходом $3 \cdot 10^{12} \text{ с}^{-1}$.

На каскадном умножителе напряжения были проведены предварительные эксперименты, показавшие работоспособность предложенной конструкции. Сейчас происходит процесс отладки и введение в эксплуатацию полумостового инвертора и высоковольтного трансформатора.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В Институте ядерной физики СО РАН предложен и разработан ускоритель-тандем с вакуумной изоляцией. На его основе создан ускорительный источник нейтронов VITA, его активно используют в течение десятилетия для развития методики бор-нейтронозахватной терапии злокачественных опухолей, для радиационного тестирования перспективных материалов, для измерения сечения ядерных реакций и для ряда других приложений. На ускорительном источнике нейтронов VITA был проведен длительный экспериментальный заход по генерации быстрых нейтронов для исследования радиационной стойкости перспективных материалов. Этот заход показал высокую надежность разработанного ускорительного источника нейтронов VITA, но также показал и его некоторые недостатки при генерации мощного потока быстрых нейтронов. На основе имеющегося опыта создается новый мощный компактный ускорительный источник нейтронов VITAmip — с одной стороны, его основой все также является ускоритель-тандем с вакуумной изоляцией, с другой стороны, проходной изолятор и источник питания для ускорения претерпели значительные изменения. Показано, что на создаваемом ускорительном источнике нейтронов возможен полный выход нейтронов до $3 \cdot 10^{12} \text{ с}^{-1}$.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 19-72-30005).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Neutron Transmutation Doping of Silicon at Research Reactors. Vienna, Intern. Atomic Energy Agency, 2012. P. 98.
2. <https://flnp.jinr.int/ru/glavnaya/ustanovki/ibr-2>

3. *Lee C., Zhou X.-L.* Thick Target Neutron Yields for the ${}^7\text{Li}(p,n){}^7\text{Be}$ Reaction near Threshold // *Nucl. Instr. Meth. B.* 1999. V. 152, No. 1. P. 1.
4. *Таскаев С. Ю.* Ускорительный источник нейтронов VITA. М.: Физматлит, 2024. 248 с.
5. *Kolesnikov I. A., Kasatov D. A., Singatulina N. S., Shchudlo I. M., Sokolova E. O., Taskaev S. Y.* Generation of a High-Yield Fast Neutron Flux on the Accelerator Based Neutron Source VITA // *IEEE 25th Intern. Conf. of Young Professionals in Electron Devices and Materials (EDM)*, Altai, Russia, 2024. P. 960–963.
6. *Shoshin A., Burdakov A., Ivantsivskiy M., Polosatkin S., Semenov A., Sulyaev Yu., Zaitsev E., Polozova P., Taskaev S., Kasatov D., Shchudlo I., Bikchurina M.* Test Results of Boron Carbide Ceramics for ITER Port Protection // *Fusion Engin. Design.* 2021. V. 168, No. 112426.
7. *Kilmetova I., Kozlov A., Kropachev G., Kulevoy T., Liakin D., Sergeeva O., Skachkov V., Stasevich Yu.* Hybrid Quadrupole Lens for the Focusing Channel of the DARIA Complex // *J. Surf. Invest.: X-Ray, Synchrotron Neutron Tech.* 2023. V. 17. P. 772–777.
8. *Dyusenova S., Klyamer D., Sukhikh A., Shchudlo I., Taskaev S., Basova T., Gromilov S.* Influence of Magnetic Field on the Structure and Sensor Properties of Thin Titanyl Phthalocyanine Layers // *J. Struct. Chem.* 2023. V. 64, No. 3. P. 337–346.
9. *Sorokin I., Taskaev S.* A New Concept of a Vacuum Insulation Tandem Accelerator // *Appl. Radiat. Isotopes.* 2015. No. 106.
10. Patent for the invention No. 2653840. Vacuum Insulated Tandem Accelerator / Taskaev S., Sorokin I. 2018.

Получено 28 октября 2024 г.