

РАЗВИТИЕ УСКОРИТЕЛЬНОГО ИСТОЧНИКА НЕЙТРОНОВ VITA

*М. И. Бикчурина^{а,б}, Т. А. Быков^{а,б}, Г. Д. Верховод^{а,б}, В. С. Дегтярев^а,
Д. А. Касатов^{а,б}, А. А. Кащеев^а, Я. А. Колесников^{а,б},
В. Д. Коновалова^{а,б}, А. М. Кошкарёв^{а,б}, А. С. Кузнецов^{а,б},
Г. М. Остреинов^{а,б}, С. С. Савинов^{а,б}, Н. Ш. Сингатулина^{а,б},
Е. А. Соколова^{а,б}, А. Е. Солдатов^а, И. Н. Сорокин^{а,б}, Т. В. Шейн^{а,б},
А. А. Шуклина^{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

В Институте ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН предложен, разработан и функционирует ускорительный источник нейтронов VITA, включающий в себя электростатический тандемный ускоритель заряженных частиц оригинальной конструкции (ускоритель-тандем с вакуумной изоляцией), литиевую нейтроногенерирующую мишень и ряд систем формирования пучка нейтронов. Установка обеспечивает получение стационарного пучка протонов или дейтронов с энергией до 2,3 МэВ, с током до 10 мА, генерацию мощного потока нейтронов и формирование пучка нейтронов различного энергетического диапазона: от холодных до быстрых. Установка активно используется для развития бор-нейтронозахватной терапии злокачественных опухолей (БНЗТ), радиационного тестирования перспективных материалов, измерения сечения ядерных реакций и ряда других приложений. Вторая версия ускорительного источника нейтронов VITA-II отличается наличием предускорения для увеличения энергии протонов, использованием объемного источника отрицательных ионов водорода вместо поверхностно-плазменного для увеличения тока пучка протонов и уменьшением высоты установки за счет модернизации высоковольтного источника питания и его подключения к ускорителю. Ускорительный источник нейтронов VITA-II α поставлен в клинику БНЗТ в Сямынь (Китай) для лечения больных методом БНЗТ. Второй ускорительный источник нейтронов VITA-II β изготовлен для оснащения им НМИЦ онкологии им. Н. Н. Блохина в Москве с целью проведения клинических испытаний методики БНЗТ в Российской Федерации с 2025 г. На основании полученного опыта ведется разработка третьей версии ускорительного источника нейтронов VITA-III и компактного ускорительного источника нейтронов VITAmín. Представляются и обсуждаются конструкции источников нейтронов, их особенности, параметры, а также области применения.

The Budker Institute of Nuclear Physics has proposed, developed and is operating an accelerator-based neutron source VITA, which includes an electrostatic tandem accelerator of charged particles of an original design (a tandem accelerator with vacuum insulation), a lithium neutron-generating target and a set of neutron beam shaping assemblies. The facility ensures the production of the continuous beam of protons or deuterons with an energy of up to 2.3 MeV, with a current of up to 10 mA, the generation of a powerful neutron flux and the formation of a beam of neutrons of various energy ranges, from cold to fast. The facility is actively used for the development of boron neutron capture therapy (BNCT) of malignant tumors, radiation testing of promising materials, measuring the cross section of nuclear reactions and a number of other applications. The second

version of the accelerator-based neutron source VITA-II is distinguished by the presence of pre-acceleration to increase the proton energy, the use of a volumetric source of negative hydrogen ions instead of a surface plasma source to increase the proton beam current, and a decrease in the height of the facility due to the modernization of the high-voltage power supply and its connection to the accelerator. The accelerator-based neutron source VITA-II α was delivered to the BNCT clinic in Xiamen (China) for the treatment of patients with the BNCT method. The second accelerator neutron source VITA-II β was manufactured to equip the Blokhin National Medical Research Center of Oncology in Moscow with the purpose of conducting clinical trials of the BNCT technique in the Russian Federation starting in 2025. Based on the experience gained, the third version of the accelerator-based neutron source VITA-III and the compact accelerator-based neutron source VITamin are being developed. The paper presents and discusses the design of the neutron sources, their features, parameters and applicability.

PACS: 29.25.Dz

ВВЕДЕНИЕ

В качестве перспективной методики лечения злокачественных опухолей рассматривается бор-нейтронозахватная терапия (БНЗТ) [1], обеспечивающая избирательное уничтожение клеток опухоли за счет накопления в них нерадиоактивных атомных ядер бора-10 и последующего облучения нейтронами. В результате поглощения нейтрона ядром бора происходит ядерная реакция $^{10}\text{B}(n, \alpha)^7\text{Li}$ с большим выделением энергии в клетке, что приводит к ее гибели. Для БНЗТ требуется интенсивный пучок эпитепловых нейтронов, оптимально в области энергий от 1 до 10 кэВ. Наилучшим решением считается реакция $^7\text{Li}(p, n)^7\text{Be}$ при энергии протонов в области 2,5 МэВ — вблизи порога реакции. В этом случае излучаемые нейтроны имеют минимальную энергию ($\sim 100\text{--}400$ кэВ) и замедлителем можно сформировать терапевтический пучок нейтронов с минимальным вкладом быстрых и медленных нейтронов. Такой источник нейтронов, содержащий ряд новых решений, предложен и реализован в Институте ядерной физики им. Г. И. Будкера (ИЯФ) СО РАН и эффективно используется для проведения научных исследований и клинических испытаний методики. В данной работе приводится описание изготовленных ускорительных источников нейтронов VITA, а также предложения по его усовершенствованию.

1. УСКОРИТЕЛЬНЫЙ ИСТОЧНИК НЕЙТРОНОВ VITA

Ускорительный источник нейтронов VITA [2, 3] включает в себя ускоритель-тандем с вакуумной изоляцией для получения стационарного пучка протонов или дейтронов с энергией до 2,3 МэВ и током до 10 мА, литиевую мишень для генерации нейтронов и ряд систем формирования пучка для получения пучка нейтронов различного энергетического диапазона: от холодных до быстрых. Схема установки на площадке ИЯФ СО РАН представлена на рис. 1. Установка оснащена современным диагностическим оборудованием, включая γ -, α - и нейтронные спектрометры и дозиметры, что обеспечивает проведение научных исследований в различных областях знания.

Ускоритель-тандем с вакуумной изоляцией — это линейный электростатический ускоритель заряженных частиц тандемного типа оригинальной конструкции. В характеристике ускорителя термин «линейный» означает, что пучок ионов однократно проходит ускоряющие промежутки. Термин «электростатический» означает, что постоянное электрическое поле совершает работу над частицей, т. е. увеличивает ее

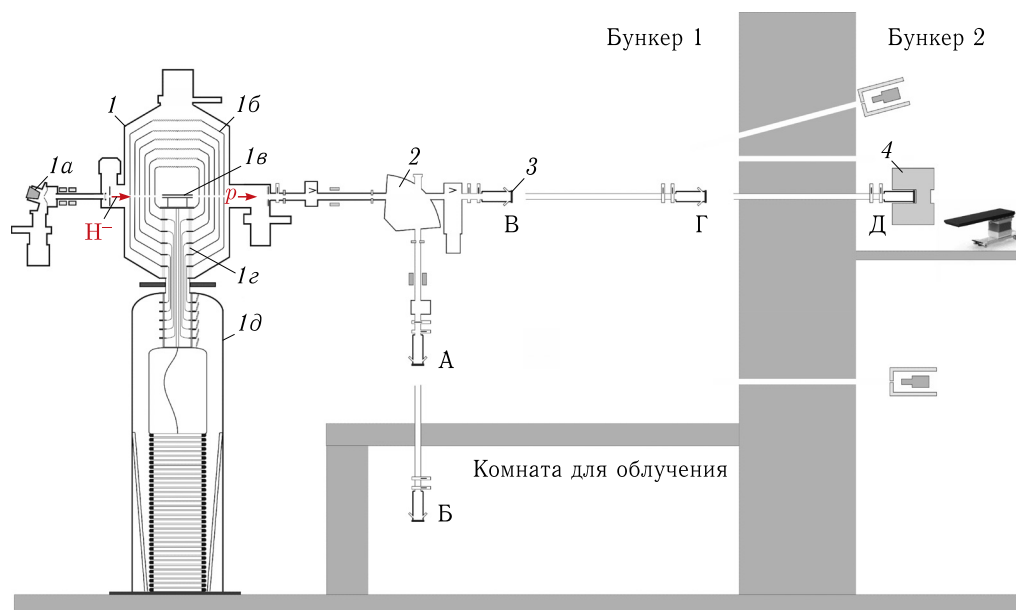


Рис. 1. Схема ускорительного источника нейтронов VITA: 1 — ускоритель-тандем с вакуумной изоляцией (1а — источник отрицательных ионов; 1б — высоковольтный и промежуточные электроды; 1в — газовая обдирочная мишень; 1г — проходной изолятор; 1д — высоковольтный источник питания); 2 — поворотный магнит;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

энергию. Термин «тандемный» означает, что ускоряющее напряжение постоянного тока используют дважды. Отрицательные ионы ускоряют положительным потенциалом, приложенным к центральному высоковольтному электроду. Внутри него отрицательные ионы конвертируют в положительные, которые вновь ускоряют тем же потенциалом. Ключевым преимуществом концепции тандемного ускорения является снижение необходимого ускоряющего напряжения наполовину, что значительно упрощает электростатическую изоляцию и уменьшает его размер. Ускоритель-тандем с вакуумной изоляцией имеет специфическую конструкцию, в которой не используют ускорительные трубки, в отличие от обычных тандемных ускорителей. Вместо них используют вложенные промежуточные электроды цилиндрической формы (1б на рис. 1), закрепленные на единственном проходном изоляторе (1г на рис. 1). Преимуществом такого расположения является удаление керамических частей проходного изолятора от ионного пучка для увеличения высоковольтной прочности ускоряющих промежутков и для получения большого тока ионного пучка.

Литиевая мишень (3 на рис. 1) представляет собой медный диск, на одну из сторон которого термическим способом в вакууме напыляют тонким слоем чистый литий кристаллической плотности. С обратной стороны медного диска сделаны спиралевидные каналы для охлаждения водой. К обратной стороне медного диска прижимают плоский алюминиевый диск с отверстиями для подачи и отвода охлаждающей воды.

Литиевая мишень — часть мишенного узла, включающего в себя алюминиевую трубу, шиббер и патрубки с окнами для диагностического оборудования или для наблюдения за состоянием поверхности литиевого слоя мишени. Литиевая мишень обеспечивает длительную стабильную генерацию нейтронов без деградации выхода.

Для получения пучка нейтронов различного энергетического диапазона используют системы формирования пучка нейтронов (4 на рис. 1) с замедлителем из тяжелой воды при криогенной температуре, из оргстекла или кристаллов фторида магния. Также для получения пучка нейтронов исключительно эпитеплового диапазона энергий или моноэнергетического пучка нейтронов используют кинематическую коллимацию.

На установке получены следующие научные результаты в области развития методики бор-нейтронозахватной терапии: а) изучено влияние нейтронного излучения на выживаемость клеточных культур и лабораторных животных; б) проведено лечение домашних кошек и собак со спонтанными опухолями; в) разработан малогабаритный детектор с литьевым полистирольным сцинтиллятором для измерения борной дозы и дозы γ -излучения в воздухе и в водном фантоме; г) предложен и реализован метод измерения суммы дозы быстрых нейтронов и азотной дозы, получивший название «клеточный дозиметр»; д) реализован метод мгновенной γ -спектрометрии для *in situ* измерения борной дозы; е) разработан детектор потока эпитепловых нейтронов, использующий реакцию $^{71}\text{Ga}(n, \gamma)^{72}\text{Ga}$; ж) впервые показано, что реализуема литий-нейтронозахватная терапия, обеспечивающая 100%-е выделение энергии ядерной реакции в клетках опухоли.

Также на установке получены следующие важные научные результаты в других областях знания: а) изучен процесс образования блистеров на поверхности металлов при имплантации протонов и его влияние на выход нейтронов из тонкого литиевого слоя, нанесенного на поверхность металла; б) потоком тепловых нейтронов определена активация образцов керамики карбида бора, изготовленных четырьмя производителями для международного экспериментального термоядерного реактора ИТЭР; в) потоком быстрых нейтронов изменены плотность и прочность образцов керамики карбида бора и стали; г) изучена зависимость прозрачности оптического волокна от флюенса быстрых нейтронов для их использования в планируемой работе Большого адронного коллайдера ЦЕРН в режиме высокой светимости; д) предложена и реализована методика измерения толщины лития по регистрации интенсивности излучения фотонов, испускаемых при неупругом рассеянии протона на атомном ядре лития; е) измерены выход частиц в двух ядерных реакциях и сечение 20 ядерных реакций. Последнее позволяет: а) достоверно определить дозу ионизирующего излучения при проведении БНЗТ; б) определить зависимость энергетического спектра нейтронов от энергии дейтронов в самой продуктивной реакции $\text{Li}(d, n)$, имеющей семь каналов генерации быстрых нейтронов; в) оценить перспективность реализации безнейтронной термоядерной энергетики в реакции $^{11}\text{B}(p, \alpha)\alpha$.

2. УСКОРИТЕЛЬНЫЙ ИСТОЧНИК НЕЙТРОНОВ VITA-II

По заказу компании Neuboron Medtech Ltd. (Китай) разработана и изготовлена вторая версия ускорительного источника нейтронов VITA. Она отличается наличием предускорения для увеличения энергии пучка протонов, использованием источника отрицательных ионов водорода компании D-Pace (Канада) с объемной генерацией



Рис. 2. Ускорительный источник нейтронов VITA-II α на площадке ИЯФ СО РАН перед отправкой в Китай

ионов вместо поверхностно-плазменного источника ИЯФ СО РАН для стабильной генерации ионов в течение длительного времени и более компактным размещением высоковольтного источника питания [4]. Эта установка (рис. 2), получившая название VITA-II α , поставлена во вновь созданный центр БНЗТ при клинике в Сямыне (Китай). После вывода установки на проектные параметры и проведения исследований с клеточными культурами и лабораторными животными в центре БНЗТ с 9 октября 2022 г. осуществлено лечение 28 пациентов с большими опухолями шеи и головы и с глиобластомой в рамках клинических испытаний, инициированных компанией Neuboron Medtech Ltd. Затем после регистрации разработанного ими препарата адресной доставки бора и получения сертификата, подтверждающего соответствие установки стандартам безопасности и эффективности, с 22 мая 2024 г. приступили к лечению больных в рамках клинических испытаний фазы I, инициированных государством. Китай стал второй страной в мире после Японии, внедряющей методику БНЗТ в клиническую практику.

Вторая подобная установка, получившая название VITA-II β , изготовлена для НМИЦ онкологии им. Н. Н. Блохина Минздрава России с целью проведения клинических испытаний в нашей стране и последующего лечения больных. Россия имеет шанс стать четвертой страной в мире, внедрившей методику БНЗТ в клиническую практику.

3. УСКОРИТЕЛЬНЫЙ ИСТОЧНИК НЕЙТРОНОВ VITA-III

В настоящее время разрабатывается третья версия ускорительного источника нейтронов VITA для оснащения им ФМБЦ им. А. И. Бурназяна ФМБА России и других онкологических клиник. Опыт, полученный при эксплуатации предыдущих установок, диктует необходимость внесения двух изменений. Во-первых, следует отказаться от предускорения, приводящего не только к усложнению установки и к увеличению ее размера, но и к ухудшению фазового портрета пучка ионов. Во-вторых, следует использовать источник отрицательных ионов водорода с объемной генерацией ионов:

он проще в эксплуатации и для получения требуемого тока пучка ионов достаточно установить несколько параметров в стойке управления. Такой инжектор VITA изготовлен, и его тестирование будет проведено в ближайшее время. Также в ускорительном источнике нейтронов VITA произведена замена газовой обдирочной мишени на подобную с отверстием меньшего диаметра и меньшей длины. И если ее использование будет приемлемым, то можно будет уменьшить размер высоковольтного электрода и всего ускорителя.

4. УСКОРИТЕЛЬНЫЙ ИСТОЧНИК НЕЙТРОНОВ VITAmIn

Высоту ускорительного источника нейтронов VITA можно существенно снизить, если разместить высоковольтный источник питания внутри верхней вакуумной части проходного изолятора и исключить нижнюю газовую часть проходного изолятора [5]. Такое решение с симметричным каскадным генератором Кокрофта–Уолтона в качестве высоковольтного источника питания реализуется. Даже если не будет получено требуемое для БНЗТ напряжение, такую установку с пучком дейтерия можно использовать как мощный источник быстрых нейтронов для различных приложений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ИЯФ СО РАН предложен и разработан ускорительный источник нейтронов VITA. Первую версию источника нейтронов в течение десятилетия активно используют для развития методики бор-нейтронозахватной терапии злокачественных опухолей, для радиационного тестирования перспективных материалов, для измерения сечения ядерных реакций и ряда других приложений. Вторую версию источника нейтронов используют в Китае для проведения клинических испытаний методики БНЗТ и с 2025 г. предполагают использовать для проведения клинических испытаний в Российской Федерации. Третью версию источника нейтронов разрабатывают для последнего оснащения им онкологических клиник с целью широкого внедрения методики в клиническую практику. Еще одну версию источника нейтронов разрабатывают в качестве мощного компактного источника быстрых нейтронов.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Advances in Boron Neutron Capture Therapy. International Atomic Energy Agency. Vienna, 2023. 416 p.
2. Таскаев С. Ю. Разработка ускорительного источника эпитепловых нейтронов для бор-нейтронозахватной терапии // ЭЧАЯ. 2019. Т. 50, вып. 5. С. 657–669.
3. Таскаев С. Ю. Ускорительный источник нейтронов VITA. М.: Физматлит, 2024. 248 с.
4. Домаров Е. В., Иванов А. А., Куксанов Н. К., Салимов Р. А., Сорокин И. Н., Таскаев С. Ю., Черепков В. Г. Высоковольтный секционированный выпрямитель для компактного ускорителя-тандема с вакуумной изоляцией // ПТЭ. 2017. № 1. С. 77–81.
5. Sorokin I., Taskaev S. A New Concept of a Vacuum Insulation Tandem Accelerator // Appl. Radiat. Isotopes. 2015. V. 106. P. 101–103.

Получено 28 октября 2024 г.