

ЭКСПЕРИМЕНТЫ ПО ПОВЫШЕНИЮ ПАРАМЕТРОВ VITA ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ БНЗТ

*Д. А. Касатов, Я. А. Колесников, А. М. Кошкарев, А. С. Кузнецов,
А. Н. Макаров, Е. А. Соколова, И. Н. Сорокин¹,
Т. В. Сычева, С. Ю. Таскаев, И. М. Щудло*

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

В Институте ядерной физики им. Г. И. Будкера для развития бор-нейтронозахватной терапии (БНЗТ) создан источник эпитепловых нейтронов на основе ускорителя-тандема с вакуумной изоляцией (VITA) и литиевой мишени. На ускорителе получен стационарный протонный пучок с энергией 2 МэВ и током 1,6 мА. Для проведения БНЗТ планируется увеличить параметры пучка до 2,3 МэВ и 3 мА. Представлены экспериментальные результаты, и предложены способы увеличения параметров протонного пучка.

The accelerator-based epithermal neutron source based on tandem accelerator with vacuum insulation and lithium target was created in the Budker Institute of Nuclear Physics for development of Boron Neutron Capture Therapy (BNCT). The stationary proton beam with 2 MeV energy and 1.6 mA current has been obtained. To carry out BNCT it is necessary to increase beam parameters to 2.3 MeV and 3 mA. The ways to increase the parameters of a proton beam are offered and discussed in this paper. Results of the experiments are presented.

PACS: 29.25.Dz; 29.27.-a

ВВЕДЕНИЕ

В ИЯФ СО РАН для бор-нейтронозахватной терапии (БНЗТ) злокачественных опухолей [1] был предложен [2] и сооружен экспериментальный образец источника эпитепловых нейтронов на основе оригинального ускорителя-тандема с вакуумной изоляцией (рис. 1).

Выходящий из ионного источника 1 пучок отрицательных ионов водорода с энергией 23 кэВ и током до 5 мА поворачивается в магнитном поле на угол 15° , фокусируется парой магнитных линз 2, инжектируется в ускоритель и ускоряется в нем до 1 МВ. В газовой (аргоновой) обдирочной мишени 7, установленной внутри высоковольтного электрода 5, отрицательные ионы водорода превращаются в протоны, которые затем тем же потенциалом 1 МВ ускоряются до энергии 2 МэВ. Потенциал на высоковольтный

¹E-mail: I.N.Sorokin@inp.nsk.su

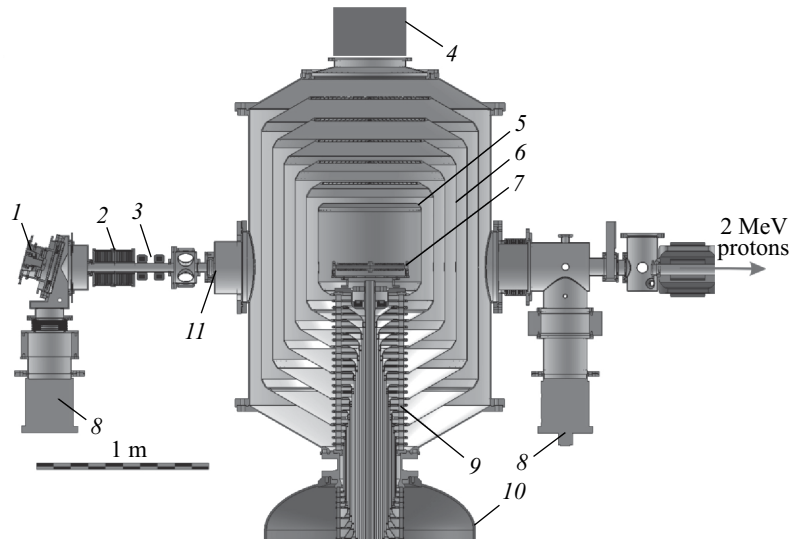


Рис. 1. Ускоритель-тандем с вакуумной изоляцией: 1 — источник отрицательных ионов водорода; 2 — магнитные линзы; 3 — корректоры; 4 — криогенный насос; 5 — высоковольтный электрод; 6 — промежуточные электроды; 7 — газовая обдирочная мишень; 8 — турбомолекулярный насос; 9 — проходной изолятор; 10 — высоковольтный источник питания; 11 — место размещения диафрагмы или детектора

электрод 5 и пять промежуточных электродов ускорителя 6 подается от высоковольтного источника напряжения 10 через проходной изолятор 9, в котором установлен омический делитель. Откачка газа осуществляется турбомолекулярными насосами 8, установленными у источника ионов и на выходе ускорителя, и криогенным насосом 4 через жалюзи электродов. На ускорителе получен стационарный протонный пучок с энергией 2 МэВ и током 1,6 мА с высокой монохроматичностью по энергии 0,1 % и стабильностью по току 0,5 % [3]. При сбросе пучка на литиевую мишень осуществлена генерация нейтронов [4] и проведено исследование влияния нейтронного излучения на клеточные культуры [5]. Для проведения терапии необходимо увеличить напряжение до 1,15 МВ и ток протонного пучка как минимум до 3 мА.

1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Для необходимого увеличения энергии протонного пучка на ускорителе осуществлен подъем напряжения до 1,15 МВ (рис. 2, а), сопровождаемый пробоями. По уменьшению остаточного давления (P , рис. 2, б), темнового тока ($I_{\text{темн}}$, рис. 2, в) и мощности дозы рентгеновского излучения (D , рис. 2, г) видно, что идет процесс тренировки, который требует времени для выхода на режим без пробоев.

Повышение напряжения до 1,15 МВ приводит к повышению напряженности электрического поля на высоковольтных элементах проходного изолятора на 15 %, что провоцирует пробой по поверхности отдельных изоляторов и потерю высоковольтной прочности

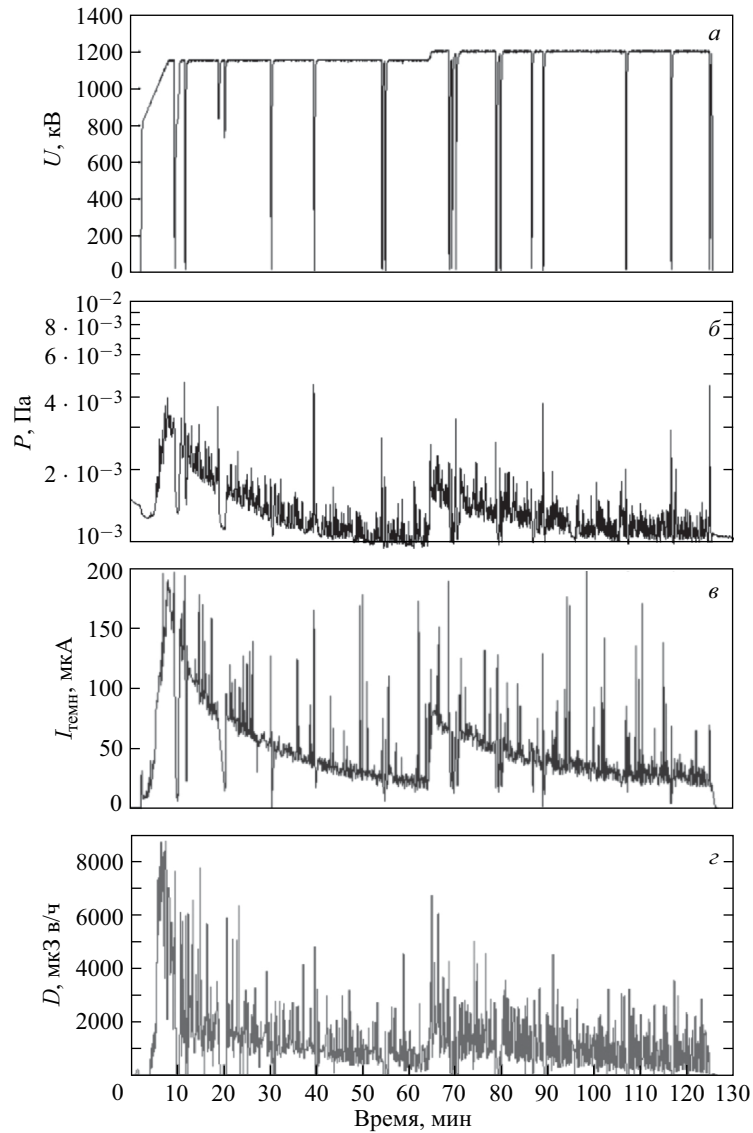


Рис. 2. Подъем напряжения на ускорителе-тандеме

ускорителя. Путь решения данной проблемы состоит в изменении геометрии поверхности изоляторов.

Исследования изоляторов (рис. 3) с различной геометрией наружной поверхности [6] показали, что ребристая поверхность с радиусами ребер и впадин в диапазоне от 0,5 до 1 мм обеспечивает увеличение электрической прочности до 100 % по сравнению с гладкой поверхностью (3 на рис. 3). Разработанная технология обработки неорганических изоляторов позволяет реализовать ребристую геометрию поверхности.

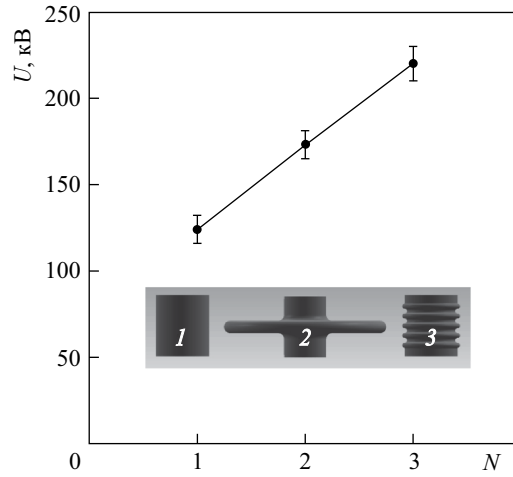


Рис. 3. Зависимость напряжения пробоя от варианта поверхности изолятора: 1 — гладкая; 2 — с одним ребром; 3 — ребристая

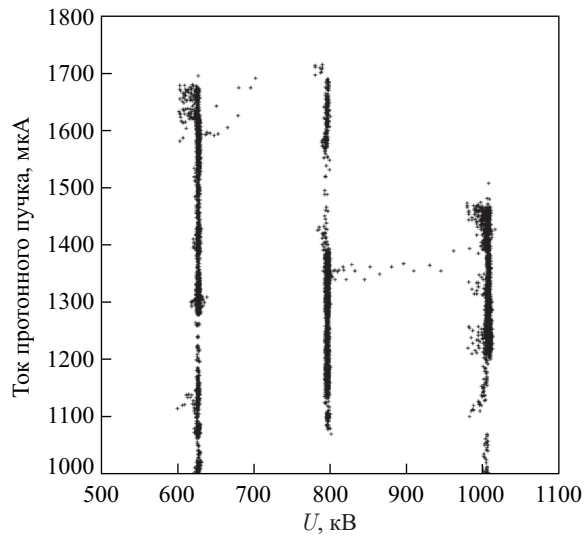


Рис. 4. Зависимость тока протонного пучка от напряжения при изменении тока инжекции отрицательных ионов водорода

Для выяснения причин пробоев проведены эксперименты по получению на ускорителе максимального тока протонного пучка при различных напряжениях путем плавного увеличения инжектируемого тока отрицательных ионов водорода до возникновения пробоев (рис. 4). Видно, что при напряжении 1 МВ максимальный ток протонов имеет величину 1,5 мА, при 625 кВ — 1,67 мА. Поскольку максимальный ток протонов практически не зависит от энергии, маловероятно, что причина пробоев связана с высоковольтной прочностью вакуумных ускоряющих зазоров.

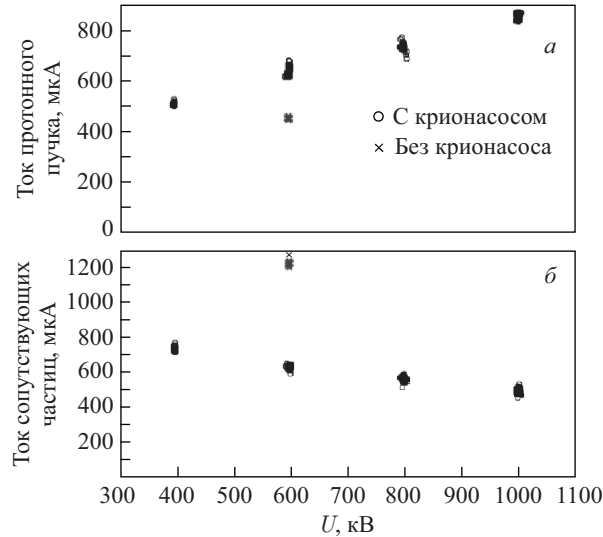


Рис. 5. Зависимость тока протонного пучка (а) и тока сопутствующих частиц (б) от напряжения на ускорителе-тандеме

В следующем эксперименте при неизменном токе инъекции отрицательных ионов водорода измерили зависимость тока протонного пучка и тока сопутствующих заряженных частиц [7] от напряжения, подаваемого на высоковольтный электрод (рис. 5).

Видно, что при росте напряжения с 400 кВ до 1 МВ ток протонного пучка увеличивается с 500 до 850 мкА, в то время как ток сопутствующих частиц уменьшается с 750 до 500 мкА. При напряжении 600 кВ были ухудшены вакуумные условия путем отсечки откачки криогенным насосом (объем продолжал откачиваться турбомолекулярным насосом) и ток протонного пучка уменьшился на треть, в то время как ток сопутствующих частиц увеличился в два раза. Все эти результаты указывают на недостаточно хорошие вакуумные условия, особенно в начальной части ускорения инжектируемого ионного пучка. Для улучшения вакуумных условий и подавления потока сопутствующих заряженных частиц осуществляется модернизация входного узла ускорителя: устанавливаются охлаждаемая диафрагма, выполняющая роль вакуумного сопротивления, дополнительный криогенный насос и сетка для подавления вторичной эмиссии со стенок вакуумной камеры.

Для улучшения качества терапевтического пучка нейтронов осуществлена модернизация нейтроногенерирующей мишени и системы формирования пучка нейтронов. По сравнению с ранее разработанной мишенью [8] новая сделана максимально тонкой, чтобы позволить сформировать лучший по качеству пучок нейтронов, и подложка мишени, на которую напыляется тонкий слой лития, сделана из тантала, обладающего максимальной стойкостью к блистерингу и обеспечивающего минимальную мощность гамма-излучения при поглощении в нем протонов [9]. В системе формирования пучка нейтронов впервые применены составной замедлитель (вблизи мишени — фторид магния, а на выходе — фторид алюминия) и составной отражатель (графит — в передней полусфере и свинец — в задней), что позволило увеличить как мощность поглощенной дозы в опухоли, так и терапевтическое отношение.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ИЯФ СО РАН для развития методики БНЗТ создан источник эпитепловых нейтронов на основе ускорителя-тандема с вакуумной изоляцией и литиевой нейтроногенерирующей мишени. В результате проведенных экспериментов достигнуто напряжение 1,15 МВ и выяснены пути увеличения высоковольтной прочности ускорителя. Определены причины ограничения тока протонного пучка, и предложена модернизация входного узла ускорителя для увеличения тока протонного пучка с 1,6 до 3 мА. Разработана нейтроногенерирующая мишень с напылением литиевого слоя на охлаждаемую тонкую танталовую подложку и система формирования пучка нейтронов. Реализация модификации ускорителя с целью увеличения тока протонного пучка и использование новой нейтроногенерирующей мишени с системой формирования пучка позволит сформировать пучок эпитепловых нейтронов, в максимальной степени отвечающий требованиям БНЗТ.

Научные исследования проведены при финансовой поддержке Российской Федерации в лице Минобрнауки России (уникальный идентификатор прикладных научных исследований — RFMEFI60414X0066).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Neutron and Capture Therapy: Principles and Applications / Eds: W.Sauerwein et al. Springer, 2012. 533 p.
2. *Bayanov B. et al.* Accelerator Based Neutron Source for the Neutron-Capture and Fast Neutron Therapy at Hospital // Nucl. Instr. Meth. A. 1998. V. 413. P. 397–426.
3. *Kasatov D. et al.* Proton Beam of 2 MeV 1.6 mA on a Tandem Accelerator with Vacuum Insulation // JINST. 2014. V. 9. P. 12016.
4. *Кузнецов А. С. и др.* Первые эксперименты по регистрации нейтронов на ускорительном источнике для бор-нейтронозахватной терапии // Письма в ЖЭТФ. 2009. Т. 35, вып. 8. С. 1–6.
5. *Мостович Л. А. и др.* Влияние эпитепловых нейтронов на жизнеспособность опухолевых клеток глиобластомы *in vitro* // Бюл. экспериментальной биологии и медицины. 2011. Т. 151. С. 229–235.
6. *Крючков А. М., Сорокин И. Н., Широков В. В.* Работы по исследованию и созданию ускорительных трубок высоковольтных ускорителей заряженных частиц. Препринт ИЯФ 94-54. Новосибирск, 1994. 40 с.
7. *Касатов Д. А. и др.* Регистрация тока, сопутствующего ионному пучку в ускорителе-тандеме с вакуумной изоляцией // Письма в ЖЭТФ. 2015. Т. 41, вып. 3. С. 74–80.
8. *Bayanov B., Belov V., Taskaev S.* Neutron Producing Target for Accelerator Based Neutron Capture Therapy // J. Phys. 2006. V. 41. P. 460–465.
9. *Касатов Д. А. и др.* Излучение при поглощении протонов с энергией 2 МэВ в различных материалах // ЯФ. 2015. Т. 78, № 11. С. 963–969.