

УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ УСКОРИТЕЛЯ-ТАНДЕМА С ВАКУУМНОЙ ИЗОЛЯЦИЕЙ

Т. А. Быков^{1,2}, Я. А. Колесников^{1,2}, Г. М. Остреинов^{1,2}, С. С. Савинов¹,
И. М. Щудло^{1,2}, С. Ю. Таскаев^{1,2,*}

¹*Институт ядерной физики СО РАН, Новосибирск, Россия*

²*Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия*

*e-mail: taskaev@inp.nsk.su

Аннотация

Перспективной методикой лечения злокачественных опухолей рассматривается бор-нейтронозахватная терапия (БНЗТ), обеспечивающая избирательное уничтожение клеток опухоли. Для этой методики необходимы мощные компактные источники нейтронов эпитеплового диапазона энергий.

В Институте ядерной физики СО РАН предложен, создан и эффективно используется ускорительный источник нейтронов VITA, включающий в себя электростатический тандемный ускоритель заряженных частиц оригинальной конструкции, тонкую литиевую и ряд систем формирования пучка нейтронов. Установку используют для развития БНЗТ, радиационного тестирования материалов и оборудования, измерения сечения ядерных реакций и других приложений. В следующих двух источниках нейтронов VITA-II, поставленных в клинику г. Сямынь (Китай) и в НМИЦ онкологии им. Н.Н. Блохина Минздрава России для лечения больных методом БНЗТ, добавлено предускорение.

В работе приведены результаты измерения фазового портрета и поперечного профиля пучка протонов, получаемого в ускорителях первой и второй версии, отмечены достоинства и недостатки выбранных режимов инжекции и ускорения ионов и делаются предложения об усовершенствовании ускорителя, подкрепленные результатами численного моделирования и частично результатами практической реализации.

ВВЕДЕНИЕ

Для перспективной методики лечения злокачественных опухолей – бор-нейтронозахватной терапии (БНЗТ) [1, 2] – необходимы интенсивные пучки нейтронов эпитеплогового диапазона энергий (0,5 эВ – 10 кэВ), идеально – монохроматические с энергией вблизи 10 кэВ. Наилучшее решение – использовать для генерации нейтронов пороговую реакцию ${}^7\text{Li}(p,n){}^7\text{Be}$ (порог реакции 1,882 МэВ). Из-за быстрого роста сечения реакции вблизи порога до 0,59 б при 2,25 МэВ можно получить требуемый поток нейтронов при энергии протонов 2,3 МэВ. В этом случае энергия генерируемых нейтронов минимальна (сотни килоэлектронвольт), и, используя относительно компактный замедлитель из фторида магния, можно сформировать наиболее монохроматический пучок эпитепловых нейтронов с требуемой плотностью потока выше 5×10^8 нейтронов/(см² с).

Такой ускорительный источник нейтронов предложен и разработан в Институте ядерной физики СО РАН. Его на площадке института длительное время применяют для проведения научных исследований в области БНЗТ и ряда других приложений [3]. Для получения стационарного пучка ионов используют предложенный и разработанный электростатический тандемный ускоритель заряженных частиц оригинальной конструкции, названный со временем ускорителем-тандемом с вакуумной изоляцией (Vacuum Insulated Tandem Accelerator – VITA). В следующих двух источниках нейтронов, поставленных в онкологические клиники для лечения больных злокачественными опухолями методом БНЗТ, в конструкцию ускорителя протонов внесены ряд изменений, в том числе добавлено предускорение инжектируемого пучка отрицательных ионов водорода.

Для измерения фазового портрета мощного пучка протонов предложено и изготовлено устройство, использующее охлаждаемый коллиматор и проволочный сканер [4]. Ее применение позволило измерить фазовый портрет пучка протонов в ускорителях первой и второй версий, определить

преимущества и недостатки каждого ускорителя и предложить решение, направленное на улучшение ускорителя заряженных частиц.

УСКОРИТЕЛЬ VITA

Ускоритель-тандем с вакуумной изоляцией VITA состоит из вакуумного бака цилиндрической формы диаметром 1,4 м, высотой 2,3 м с отверстиями для ввода и вывода пучка ионов, для вакуумной откачки и для подключения к высоковольтному источнику питания и высоковольтного и пяти промежуточных электродов цилиндрической формы, расположенных соосно с корпусом вакуумного бака. В электродах с двух сторон вварены рамки для крепления диафрагм и вставлены диафрагмы. Диафрагмы расположены по диаметру соосно с входным и выходным фланцем ввода и вывода пучка ионов и формируют ускорительный канал. Потенциал на высоковольтный и промежуточные электроды подают от высоковольтного источника питания через проходной изолятор. Внутри высоковольтного электрода соосно с ускорительным каналом установлена газовая обдирочная мишень, предназначенная для конверсии отрицательных ионов в положительные.

Пучок отрицательных ионов водорода или дейтерия получают из поверхностно-плазменного инжектора с пеннинговской геометрией газоразрядной камеры и соленоидом фокусируют на входное отверстие ускорителя, создавая на входе в ускоритель расходящийся пучок ионов. Характерный профиль и фазовый портрет пучка отрицательных ионов водорода, измеренный на расстоянии 57 мм перед входной диафрагмой ускорителя, представлен на Рис. 1а. Видно, что пучок близок к идеальному и сферическим aberrаций практически нет. Его поперечный профиль отличается от гауссова в сторону более однородного в центре из-за действия пространственного заряда при его транспортировке. Характерный поперечный размер пучка ионов имеет значение 8–9 мм, сходимост ± 30 мрад, нормализованный эмиттанс от 0,13 мм мрад при токе 0,5 мА до 0,2 мм мрад при токе 3 мА.

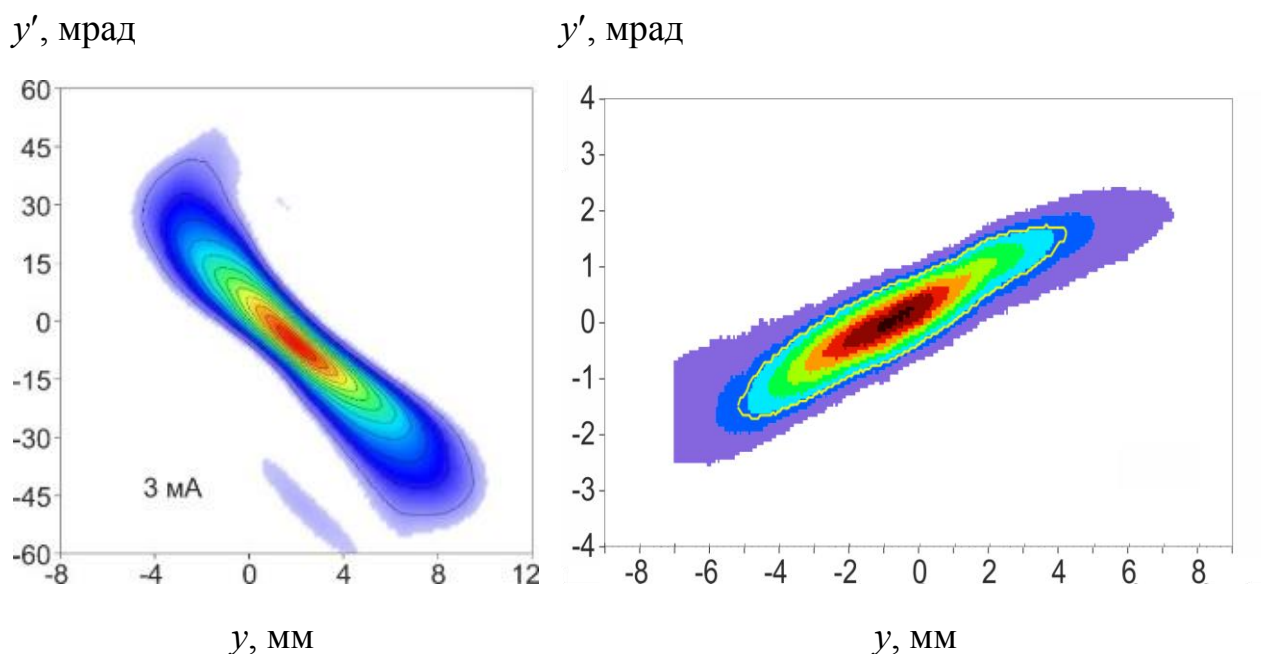


Рисунок 1: Фазовый портрет 3 мА пучка отрицательных ионов водорода, инжектируемого в ускоритель, (а) и пучка протонов (б) в ускорителе ВИТА

Такая фокусировка пучка ионов на входное отверстие ускорителя обеспечивает «жесткий» ввод пучка: в ускоритель попадает сильно расходящийся пучок ионов, который сильной входной электростатической линзой ускорителя фокусируется в практически параллельный пучок диаметром 4–5 мм. В газовой обдирочной мишени tandemного ускорителя отрицательные ионы конвертируются в положительные, которые затем ускоряются электрическим полем и, выходя из ускорителя, слегка расфокусируются выходной электростатической линзой ускорителя. На расстоянии 1,86 м от центра ускорителя измерен фазовый портрет пучка протонов; характерный пример представлен на Рис. 1б. Пучок протонов имеет поперечный размер 10 ± 1 мм, угловую расходимость – от $\pm 0,5$ мрад до $\pm 1,2$ мрад, нормализованный эмиттанс – 0,2 мм мрад. Поперечный профиль пучка протонов хорошо описывается гауссовым распределением. Такой слабо расходящийся пучок протонов позволяет транспортировать его до литиевой мишени без применения фокусирующих линз, что является несомненным преимуществом.

Единственным существенным недостатком такого режима инжекции следует признать нагрев неохлаждаемой диафрагмы первого ускоряющего электрода, ограничивающий работу с большим током.

УСКОРИТЕЛЬ VITA-II

В следующих двух источниках нейтронов, поставленных в БНЗТ клинику г. Сямынь (Китай) и в НМИЦ онкологии им. Н.Н. Блохина Минздрава России, сделаны два изменения: i) поверхностно-плазменный инжектор с пеннинговской геометрией газоразрядной камеры разработки ИЯФ СО РАН заменен на инжектор компании D-Race (Канада) с объемным образованием отрицательных ионов, ii) инжектируемый в ускоритель пучок отрицательных ионов водорода дополнительно предускоряют на 100 кэВ.

Выходящий из инжектора пучок отрицательных ионов водорода расходящийся. Вблизи инжектора размещена линза Эйнцеля с тормозящим потенциалом, которая расходящийся пучок ионов фокусирует и делает его близким к параллельному. Далее этот пучок ионов ускоряют в ускорительной трубке и затем магнитной линзой (соленоидом) фокусируют на вход в ускоритель. Измерение фазового портрета инжектируемого пучка ионов в разных режимах фокусировки и предускорения позволило установить, что фокусировка линзой Эйнцеля и магнитной линзой не изменяет значение эмиттанса пучка ионов, в то время как предускорение увеличивает нормализованный эмиттанс в 1,5 раза. Характерный фазовый портрет инжектируемого пучка отрицательных ионов водорода представлен на Рис. 2а. Поперечный размер пучка ионов имеет значение 17–24 мм, сходимост $\pm 5\text{--}7$ мрад, нормализованный эмиттанс от 0,15 до 0,2 мм мрад. Размер и сходимость указывают на то, что пучок ионов фокусируют на расстояние 1,3–3 м, т.е. в ускоритель инжектируется слабо сходящийся пучок. Сильная входная электростатическая линза еще сильнее фокусирует пучок ионов, приводя к его перефокусировке внутри ускорителя. На выходе из ускорителя выходная электростатическая линзы делает пучок еще более расходящимся.

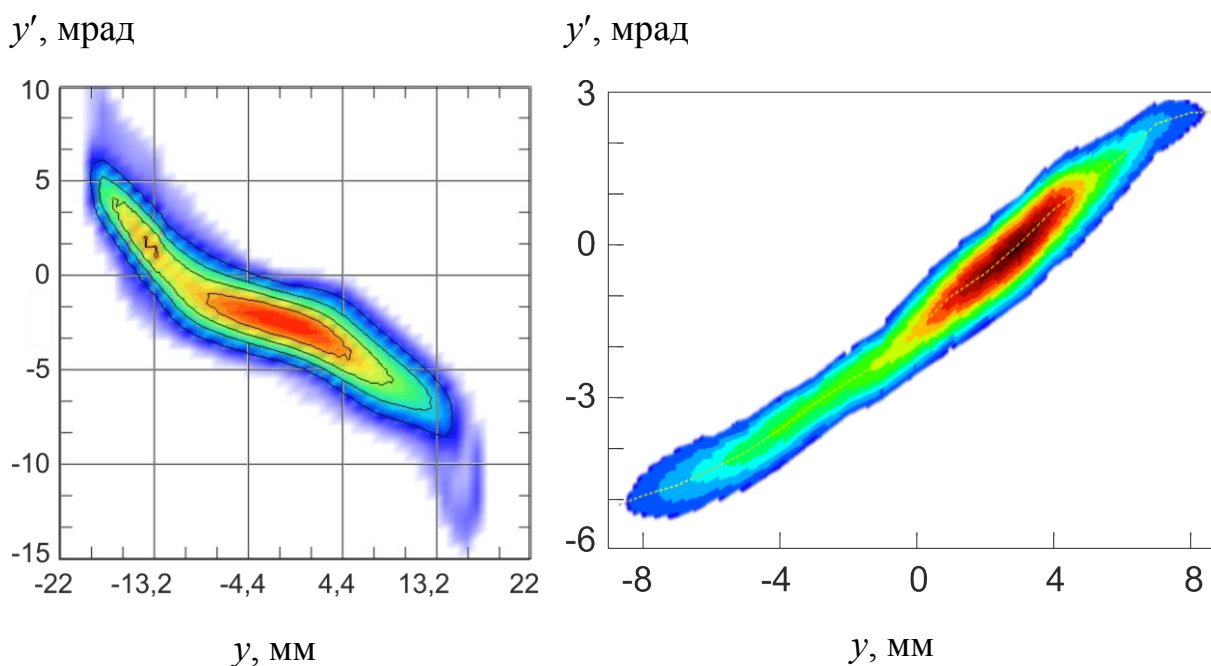


Рисунок 2: Фазовый портрет 3 мА пучка отрицательных ионов водорода, инжектируемого в ускоритель, (а) и пучка протонов (б) в ускорителе ВИТА-II

На расстоянии 2,17 м от центра ускорителя измерен фазовый портрет пучка протонов; характерный пример представлен на Рис. 2б. Пучок протонов имеет поперечный размер 15–20 мм, расхожимость ± 3 –4 мрад, нормализованный эмиттанс – 0,15–0,2 мм мрад.

Таким образом, использование предускорения дает как положительный, так и отрицательный эффект. Положительный эффект состоит в том, что энергия протонов увеличена на 100 кэВ и не происходит нагрева неохлаждаемых диафрагм ускорителя из-за меньшего размера пучка ионов в ускорителе, особенно вначале. Отрицательный эффект состоит в том, что ухудшилось качество получаемого пучка протонов: он стал больше в размере, его расхожимость стала больше и он стал неоднородным. Получение такого пучка усложняет установку, поскольку для его транспортировки требуются средства фокусировки. Также усложняет установку само использование предускорения – требуются высоковольтная платформа и развязывающий трансформатор.

УСКОРИТЕЛЬ VITA-III

Одним из основных предложений по усовершенствованию ускорителя является замедление инжектируемого в него ионного пучка. Это достигается путем изоляции входной диафрагмы ускорителя VITA и подачи на нее отрицательного потенциала.

На Рис. 3 показаны огибающие ионного пучка при его транспортировке и ускорении, полученные с помощью численного моделирования без учета влияния пространственного заряда. В координате $z = 0$ задан ионный пучок радиусом 5 мм под углом, обеспечивающим его фокусировку во входную охлаждаемую диафрагму ускорителя ($z = 127$ мм, положение *A*).

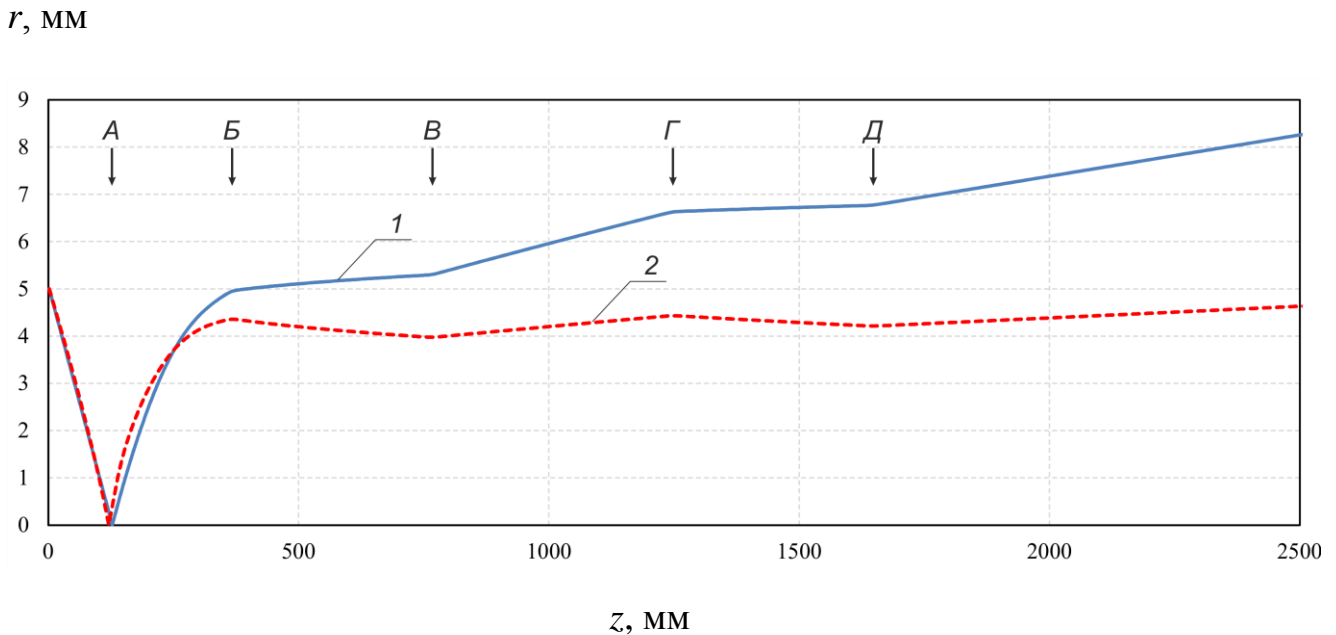


Рисунок 3: Огибающие ионного пучка при его фокусировке во входную охлаждаемую диафрагму ускорителя: 1 – при потенциале диафрагмы 0 В, 2 – при потенциале диафрагмы -20 кВ. Стрелками отмечены положения входной охлаждаемой диафрагмы (*A*), неохлаждаемых диафрагм первого электрода (*B* и *Д*), диафрагм высоковольтного электрода (*В* и *Г*)

Кривая 1 показывает смоделированную огибающую ионного пучка при потенциале диафрагмы 0 и потенциале ускорителя 1 МВ. Расходящийся в ускорителе ионный пучок фокусируется сильной входной электростатической

линзой ускорителя на неохлаждаемую диафрагму первого промежуточного электрода ($z = 367$ мм, положение B). Затем пучок ускоряется до высоковольтного электрода, на входе которого он расфокусируется за счет электрического поля, проникающего в высоковольтный электрод ($z = 767$ мм, положение B). Отрицательные ионы водорода преобразуются в протоны в газовой обдирочной мишени, расположенной внутри высоковольтного электрода. Выходящий из высоковольтного электрода протонный пучок фокусируется электростатической линзой в области диафрагмы высоковольтного электрода ($z = 1247$ мм, положение Γ), затем ускоряется и расфокусируется на выходе выходной электростатической линзой ускорителя ($z = 1647$ мм, положение Γ).

Кривая 2 показывает моделируемую огибающую ионного пучка при подаче напряжения -20 кВ на входную диафрагму ускорителя. Видно, что не только уменьшился размер ионного пучка в области неохлаждаемой диафрагмы первого ускоряющего электрода, но и протонный пучок стал параллельным. Такой протонный пучок можно транспортировать без использования фокусирующих элементов, что упрощает и повышает надёжность установки.

Второе предложение по усовершенствованию ускорителя состоит в уменьшении размеров газовой обдирочной мишени и, как следствие, в уменьшении размеров ускорителя. Газовая обдирочная мишень, установленная внутри высоковольтного электрода, выполнена в виде охлаждаемой медной трубки длиной 400 мм с отверстием диаметром 16 мм с напуском аргона в середине. Нами изготовлена обдирочная мишень длиной 300 мм с отверстием диаметром 12 мм, и она установлена в ускоритель VITA год тому назад. Также изменены диафрагмы высоковольтного электрода: они сделаны охлаждаемые. Никаких негативных изменений в режиме работы установки не произошло, поэтому более компактную обдирочную мишень с охлаждаемыми диафрагмами высоковольтного электрода можно использовать в новой версии ускорителя.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С использованием разработанного устройства измерен фазовый портрет пучка протонов в ускорителе VITA и в ускорителе VITA-II, отличающегося добавлением предускорения. Сравнение результатов позволило определить преимущества и недостатки использования предускорения и сделать предложения по улучшению ускорителя: использовать предторможение вместо предускорения и использовать более компактную газовую обдирочную мишень с охлаждением диафрагм высоковольтного электрода.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

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

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ.

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Advances in Boron Neutron Capture Therapy. International Atomic Energy Agency, Vienna, Austria, 2023, 416 p.
- [2] W. Sauerwein, A. Wittig, R. Moss, Y. Nakagawa, K. Ono (Editors). Neutron Capture Therapy: Principles and Applications. Second Edition. Springer, 2025, 806 p.
- [3] С.Ю. Таскаев. Ускорительный источник нейтронов VITA. М.: Физматлит, 2024, 248 с.
- [4] Я.А. Колесников, С.Ю. Таскаев, С.С. Савинов, Т.А. Быков. Устройство для измерения фазового портрета мощного стационарного пучка. Патент на изобретение № 2839258 от 28.04.2025.