

15;14

## Получение протонного пучка с током 5 мА в ускорителе-тандеме с вакуумной изоляцией

© А.А. Иванов<sup>1,2</sup>, Д.А. Касатов<sup>1</sup>, А.М. Кошкарев<sup>2</sup>,  
А.Н. Макаров<sup>1</sup>, Ю.М. Остреинов<sup>1</sup>, И.Н. Сорокин<sup>1</sup>,  
С.Ю. Таскаев<sup>1,2</sup>, И.М. Щудло<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Институт ядерной физики СО РАН, Новосибирск

<sup>2</sup> Новосибирский государственный университет

E-mail: taskaev@inp.nsk.su

Поступило в Редакцию 27 января 2016 г.

Подавление паразитных потоков электронов и образующихся в ускорительном тракте положительных ионов в ускорителе-тандеме с вакуумной изоляцией позволило увеличить ускоряемый ток протонного пучка с энергией 2 МэВ более чем в 3 раза — с 1.6 до 5 мА. Описаны детали проведенной модернизации ускорителя и представлены экспериментальные результаты исследований подавления вторичных потоков заряженных частиц и измерения характеристик ускоренного протонного пучка с повышенным током.

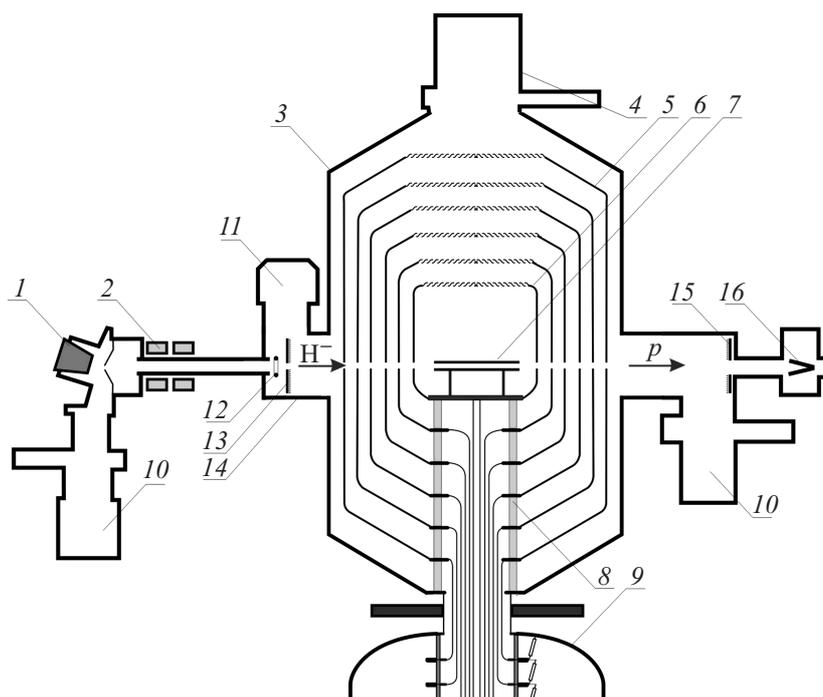
В настоящее время бор-нейтронозахватная терапия (БНЗТ) [1] рассматривается как перспективная методика лечения злокачественных опухолей. Для широкого внедрения методики в клиническую практику требуются компактные источники тепловых нейтронов на основе ускорителя заряженных частиц с энергией протонов 2–3 МэВ и током не менее 3 мА. Для решения этой задачи в ИЯФ СО РАН предложен и создан новый тип ускорителя заряженных частиц — ускоритель-танDEM с вакуумной изоляцией, отличающийся быстрым темпом ускорения

ионов и удаленностью изолятора от ускорительного канала [2]. После уменьшения темнового тока до приемлемого уровня [3], оптимизации ввода в ускоритель пучка отрицательных ионов водорода [4] и оптимизации их обдирки в газовой обдирочной мишени [5] ток протонного пучка был увеличен с начальных значений в районе  $140 \mu\text{A}$  [6] до величины  $1.6 \text{ mA}$  [7], стабильной более 1 h. При выяснении причин ограничения тока в канале ускорения отрицательных ионов водорода обнаружен и измерен значительный по величине поток сопутствующих электронов и встречный поток положительных ионов, образующихся в ускорительном канале и обдирочной мишени [8]. Для подавления этих потоков заряженных частиц предложено реализовать ряд идей, новых для ускорителей заряженных частиц.

В работе описаны детали проведенной модернизации ускорителя и представлены экспериментальные результаты по подавлению паразитных потоков заряженных частиц и по увеличению тока протонного пучка.

Схема ускорителя-тандема с вакуумной изоляцией представлена на рис. 1. Выходящий из источника 1 пучок отрицательных ионов водорода с энергией  $23 \text{ keV}$  и током до  $6 \text{ mA}$  поворачивается в магнитном поле на угол  $15^\circ$ , фокусируется парой магнитных линз 2, инжектируется в ускоритель и ускоряется в нем до энергии  $1 \text{ MeV}$ . В газовой (аргоновой) обдирочной мишени 7, установленной внутри высоковольтного электрода 6, отрицательные ионы водорода превращаются в протоны, которые тем же потенциалом  $1 \text{ MV}$  доускоряются до энергии  $2 \text{ MeV}$ . Потенциал на высоковольтный 6 и пять промежуточных электродов ускорителя 5 подается от высоковольтного источника напряжения (секционированного выпрямителя) 9 (большая часть не показана) через проходной изолятор 8, в котором установлен омический делитель. Откачка газа осуществляется турбомолекулярными насосами 10, установленными у источника ионов и на выходе ускорителя, а также криогенным насосом 4 через жалюзи в высоковольтных электродах.

Модернизация ускорителя заключалась в следующем. Входной вакуумный объем 14 был увеличен в длину. Внутри его установлена охлаждаемая металлическая диафрагма 13 с отверстием диаметром  $20 \text{ mm}$  с возможностью перемещения для центрирования относительно оси пучка. Диафрагма должна уменьшить поток газа и ультрафиолетового излучения из источника отрицательных ионов водорода в ускорительный канал. На верхний фланец входного вакуумного объема



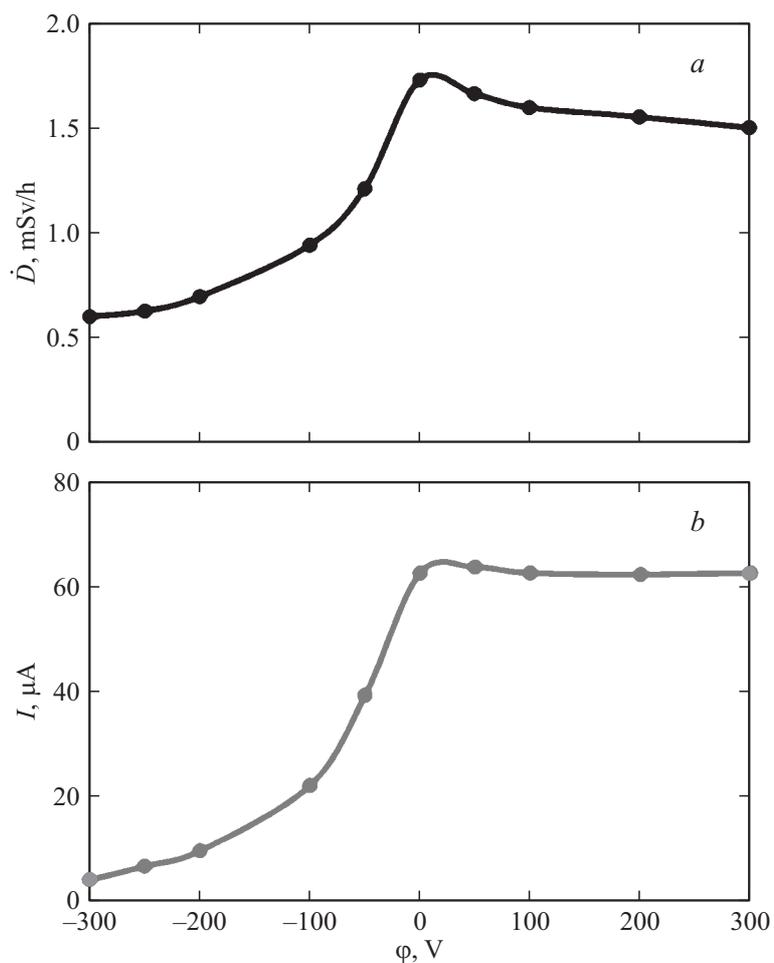
**Рис. 1.** Ускоритель-тандем с вакуумной изоляцией: 1 — источник отрицательных ионов водорода, 2 — магнитные линзы, 3 — ускоритель, 4 — криогенный насос, 5 — промежуточные электроды, 6 — высоковольтный электрод, 7 — газовая обдирочная мишень, 8 — проходной изолятор, 9 — высоковольтный источник питания, 10 — турбомолекулярный насос, 11 — криогенный насос, 12 — кольцо, 13 — металлическая охлаждаемая диафрагма и торцевой детектор с сеткой, 14 — входной вакуумный объем, 15 — торцевой детектор с сеткой, 16 — цилиндр Фарадея. Стрелками показано направление движения пучка отрицательных ионов водорода ( $H^-$ ) и протонов ( $p$ ).

через шибер ДУ 250 установлен дополнительный криогенный насос On-Board 10 (СТИ-Cryogenics, США) 11 со скоростью откачки аргона 2500 l/s, водорода — 5000 l/s, который должен улучшить вакуумные условия как в тракте транспортировки пучка, так и в ускорительном канале. Между выходом тракта транспортировки пучка и охлаждаемой

диафрагмой установлено металлическое кольцо *12*, подача отрицательного потенциала на которое должна приводить к запиранию потока электронов, сопутствующих пучку отрицательных ионов водорода. Поверхность охлаждаемой диафрагмы *13* со стороны ускорителя покрыта сеткой из танталовой проволоки для запирания вторичных электронов, возникающих при облучении положительными ионами стенок вакуумной камеры. Между сеткой и диафрагмой размещен изолированный металлический диск для измерения тока. Также сеткой с диском *15* покрыта поверхность вакуумной камеры на выходе из ускорителя.

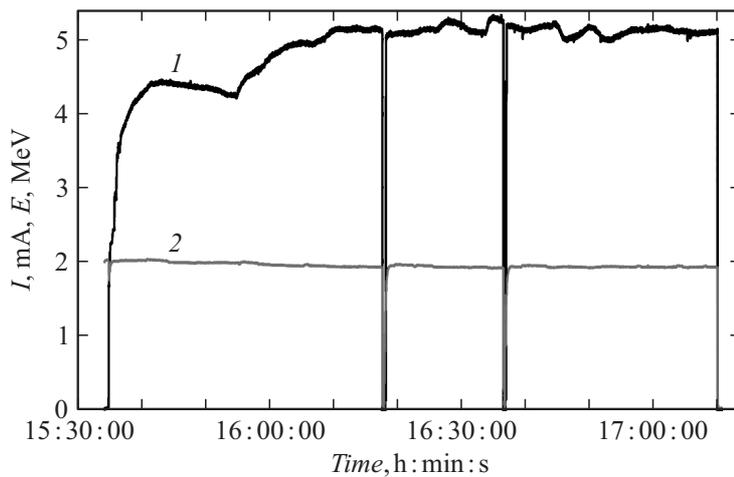
На рис. 2, *a* видно, что подача потенциала на сетку на входе в ускоритель значительно уменьшает мощность дозы тормозного излучения, причиной которого является поглощение в металле электронов, ускоренных до 1 MeV [9]. Представленная на рис. 2, *b* ВАХ торцевого детектора (диска с сеткой) на входе в ускоритель указывает, что коэффициент вторичной эмиссии электронов под действием образующихся положительных ионов имеет величину порядка 10 (высокое значение коэффициента вторичной эмиссии электронов характерно для многоэлектронных ионов и атомов с энергией более 100 keV [10]). В результате установки диафрагмы, криогенного насоса, кольца и сеток достигнуто значительное уменьшение паразитных потоков заряженных частиц. В частности, поток электронов, ускоряемых до полного напряжения, уменьшен в 20 раз до величины порядка 0.5% от тока ионного пучка. При этом вклад от напуска аргона в обдирочную мишень в этот ток уменьшен с 80 до 30%.

Подавление паразитных потоков заряженных частиц в ускорителе позволило улучшить устойчивость работы ускорителя к пробоям по полному напряжению и значительно увеличить ток протонного пучка — с 1.6 до 5 мА. На рис. 3 представлены осциллограммы тока и энергии протонного пучка, полученные в одном из заходов. Измеренный цилиндром Фарадея (*16* на рис. 1) ток протонного пучка в течение одного часа превышает 5 мА, имеет среднее значение  $5.12 \pm 0.06$  мА, максимальное 5.327 мА. Заметим, что флуктуации тока обусловлены нестабильной работой источника отрицательных ионов водорода на предельных параметрах. При токе протонного пучка 3 и 4 мА был реализован режим работы в течение одного часа со стабильностью тока 0.5% и без пробоев по высокому напряжению. На рис. 3 видно, что при токе более 5 мА произошло два пробоя, после которых восстановление тока до прежних параметров происходит за 35 с, что



**Рис. 2.** Зависимость мощности дозы гамма-излучения  $D$  (a) и тока на торцевой детектор, установленный на входе в ускоритель, от потенциала сетки  $\phi$  (b).

приемлемо. При работе с большим током пучка происходила подсадка напряжения высоковольтного источника питания, и энергия протонов с 2 MeV при токе 4 мА уменьшалась до  $1.93 \pm 0.01$  MeV при 5 мА.



**Рис. 3.** Оциллограмма тока  $I$  (1) и энергии  $E$  (2) протонного пучка.

Данный эффект может быть устранен модификацией источника питания, например добавлением дополнительной секции выпрямителя.

Получение стационарного протонного пучка с током 5 мА фактически решило проблему источников нейтронов для БНЗТ — при сбросе этого пучка на литиевую мишень обеспечивается требуемая плотность потока эпитепловых нейтронов. Имеющиеся ускорители — ускоритель КГ-2.5 типа Кокрофта–Уолтона в Обнинске [11], динамитрон в Бирмингеме (Англия) [12], циклотрон в KURRI (Япония) [13] — обеспечивают получение протонного пучка с током около 1 мА, что недостаточно. В 2014 г. сообщалось о 3-мА протонном пучке в электростатическом ускорителе прямого действия Hyperion (GT Advanced Technologies, США) [14], но результат не был отражен в трудах конференции. Возможно, требуемый ток может быть в ближайшее время получен еще в трех разрабатываемых для БНЗТ ускорителях: в радиочастотном линаке компании Hitachi для Национального онкологического центра в Токио [15], в динамитроне компании IBA (Бельгия) для Университета Нагойя [16] и в радиочастотном линаке компании Mitsubishi для Университета Цукубы [17].

Ускоритель-тандем с вакуумной изоляцией может быть также использован для создания систем оперативного обнаружения взрывчатых и наркотических веществ [18], калибровки детекторов слабозаимодействующих частиц темной материи [19] и других приложений.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 14-32-00006) при поддержке Института ядерной физики СО РАН.

## Список литературы

- [1] *Neutron Capture Therapy. Principles and Applications* / Eds: W. Sauerwein, A. Wittig, R. Moss, Y. Nakagawa. Springer, 2012. 553 p.
- [2] *Bayanov B.F., Belov V.P. et al. // Nuclear Instr. Methods Res. A.* 1998. V. 413. N 2–3. P. 397–426.
- [3] *Алейник В.И., Иванов А.А., Кузнецов А.С., Сорокин И.Н., Таскаев С.Ю. // ПТЭ.* 2013. № 5. С. 5–13.
- [4] *Алейник В.И., Башкирцев А.Г., Кузнецов А.С., Макаров А.Н., Сорокин И.Н., Таскаев С.Ю., Тиунов М.А., Щудло И.М. // Докл. Академии наук высшей школы РФ.* 2013. Т. 20. № 1. С. 47–55.
- [5] *Алейник В.И., Кузнецов А.С., Сорокин И.Н., Таскаев С.Ю., Тиунов М.А., Щудло И.М. // Научный вестник Новосибирского государственного технического университета.* 2013. Т. 50. В. 1. С. 83–92.
- [6] *Кузнецов А.С., Малышкин Г.Н., Макаров А.Н., Сорокин И.Н., Суляев Ю.С., Таскаев С.Ю. // Письма в ЖТФ.* 2009. Т. 35. В. 8. С. 1–6.
- [7] *Kasatov D., Kuznetsov A., Makarov A., Shchudlo I., Sorokin I., Taskaev S. // JINST.* 2014. V. 9. P. 12016.
- [8] *Касатов Д.А., Макаров А.Н., Таскаев С.Ю., Щудло И.М. // Письма в ЖТФ.* 2015. Т. 41. В. 3. С. 74–80.
- [9] *Shchudlo I., Kasatov D., Makarov A., Taskaev S. // Proc. RUPAC.* 2014. Obninsk, Russia, 6–10 October 2014. P. 116–117.
- [10] *Рахимов Р.Р., Козинский О.В. // Известия Академии наук СССР. Сер. Физика.* 1962. Т. 26. С. 1398–1402.
- [11] *Альбертинский Б.И., Курицына И.В., Николаев О.Ф., Овчинников О.Б. // ПТЭ.* 1971. № 3. С. 43–46.
- [12] *Phoenix B., Green S., Scott M., Edgecock T. // Appl. Radiat. Isotopes.* 2015. V. 106. P. 49–52.
- [13] *Tanaka H., Sakurai Y., Suzuki M. et al. // Appl. Radiat. Isotopes.* 2009. V. 67. Iss. 7–8. P. S258–S261.

- [14] *Smick T., Ryding G., Farrell P.* et al. // Book of abstracts of 16<sup>th</sup> ICNCT. Helsinki, Finland, June 14–19, 2014. P. 138–139.
- [15] *Abe Y., Fuse M., Fujii R.* et al. // Book of abstracts of 15<sup>th</sup> ICNCT. Tsukuba, Japan, 10–14 September, 2012. P. 109–110.
- [16] *Tsuchida K., Kiyonagi Y., Uritani A.* et al. // Book of abstracts of 16<sup>th</sup> ICNCT, Helsinki, Finland, June 14–19, 2014. P. 206.
- [17] *Kumada H., Matsumura A., Sakurai A.* et al. // *Appl. Radiat. Isotopes*. 2014. V. 88. P. 211–215.
- [18] *Kuznetsov A., Belchenko Yu., Burdakov A., Davydenko V., Donin A., Ivanov A., Konstantinov S., Krivenko A., Kudryavtsev A., Mekler K., Sanin A., Sorokin I., Sulyaev Yu., Taskaev S., Shirokov V., Eidelman Yu.* // *Nuclear Instrum. Methods A*. 2009. V. 606. P. 238–242.
- [19] *Макаров А.Н., Таскаев С.Ю.* // *Письма в ЖЭТФ*. 2013. Т. 97. В. 12. С. 769–771.