

ТЕХНИКА ЯДЕРНОГО
ЭКСПЕРИМЕНТА

УДК 621.384.65

ИССЛЕДОВАНИЕ ПУЧКА ИОНОВ
В УСКОРИТЕЛЯХ-ТАНДЕМАХ С ВАКУУМНОЙ ИЗОЛЯЦИЕЙ

©2025 г. Т. А. Быков^{a,b}, Я. А. Колесников^{a,b}, А. М. Кошкарев^{a,b},
Г. М. Остринов^{a,b}, С. С. Савинов^a, И. М. Щудло^{a,b}, С. Ю. Таскаев^{a,b,*}

^aИнститут ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения

Российской академии наук

Россия, 630090, Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 11

^bНовосибирский государственный университет,

Россия, 630090, Новосибирск, ул. Пирогова, 1

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

Поступила в редакцию 03.02.2024 г.

После доработки 18.03.2025 г.

Принята к публикации 31.03.2025 г.

Для бор-нейтронозахватной терапии – перспективной методики лечения злокачественных опухолей – требуются ускорительные источники нейтронов эпитеплогового диапазона энергий. Одним из востребованных ускорителей заряженных частиц является тандемный электростатический ускоритель оригинальной конструкции, названный со временем ускорителем-танемом с вакуумной изоляцией VITA. В работе представлены результаты измерения фазового портрета пучка ионов, получаемого на экспериментальной установке в Институте ядерной физики СО РАН и на установках для онкологических клиник, отличающихся наличием предускорения. Показаны преимущества и недостатки использования предускорения. Сделаны предложения для улучшения ускорителя-танема с вакуумной изоляцией, требующие экспериментальной проверки.

1. ВВЕДЕНИЕ

Перспективной методикой лечения злокачественных опухолей рассматривается бор-нейтронозахватная терапия (БНЗТ) [1–3], обеспечивающая избирательное уничтожение клеток опухоли путем накопления в них бора и последующего облучения нейтронами. В результате поглощения нейтрона бором происходит ядерная реакция с большим выделением энергии в клетке опухоли, что приводит к ее гибели.

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, названный со

временем ускорителем-тандемом с вакуумной изоляцией VITA, для получения стационарного моноэнергетичного пучка протонов или дейтронов с энергией до 2.3 МэВ, током до 10 мА, оригинальную тонкую литиевую мишень для генерации нейтронов с выходом до $2 \cdot 10^{12} \text{ с}^{-1}$ и ряд систем формирования пучка нейтронов для получения пучка холодных, тепловых, эпитепловых или быстрых нейтронов [3–5]. В настоящее время установка выглядит так, как показано на рис. 1.

Рис. 1. Схема ускорительного источника нейтронов VITA

2. УСКОРИТЕЛЬ-ТАНДЕМ С ВАКУУМНОЙ ИЗОЛЯЦИЕЙ VITA

Ускоритель-тандем с вакуумной изоляцией состоит из вакуумного бака цилиндрической формы диаметром 1.4 м, высотой 2.3 м с отверстиями для ввода и вывода пучка ионов (сбоку) для вакуумной откачки (сверху) и для подключения к высоковольтному источнику питания (снизу) и высоковольтного и пяти промежуточных электродов цилиндрической формы, расположенных соосно с корпусом вакуумного бака (диаметр высоковольтного электрода 600 мм, диаметры промежуточных электродов – 740, 870, 1000, 1130, 1260 мм). В электродах с двух сторон сварены рамки для крепления диафрагм и вставлены диафрагмы с отверстием диаметром обычно 20 мм в тракте ускорения отрицательных ионов и в высоковольтном электроде и 30 мм в тракте ускорения положительных ионов. 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 подается 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 от поверхностно-плазменного источника с пеннинговской геометрией газоразрядной камеры фокусируется соленоидом на входное отверстие ускорителя, создавая на входе в ускоритель расходящийся пучок ионов. Характерный профиль и фазовый портрет пучка отрицательных ионов водорода на расстоянии 57 мм перед входным отверстием представлены на рис. 2; использован измеритель эмиттанса ES-4 (D-Race, Канада). Видно, что пучок близок к идеальному, и сферических 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 в этом месте имеет значение 8–9 мм, сходимость ± 30 мрад, нормализованный эмиттанс от 0.13 мм мрад при токе 0.5 мА

до 0.2 мм мрад при токе 3 мА. Здесь нормализованный эмиттанс $\epsilon_{\text{norm}} = \epsilon_{\text{rms}}\beta\gamma$, где

$$\epsilon_{\text{rms}} = (\det(\sigma_{xx'})^{1/2}), \quad \sigma_{xx'} = \begin{bmatrix} \langle x^2 \rangle & \langle xx' \rangle \\ \langle xx' \rangle & \langle x'^2 \rangle \end{bmatrix}, \quad \langle x^2 \rangle = \frac{1}{N} \sum_1^N x_i^2, \quad \langle x'^2 \rangle = \frac{1}{N} \sum_1^N x_i'^2,$$

$$\langle xx' \rangle = \frac{1}{N} \sum_1^N x_i x_i', \quad \beta = \sqrt{\frac{2E}{mc^2}}, \quad \gamma = \frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}},$$

E – энергия заряженной слаборелятивистской частицы, m – ее масса. Площадь эллипса фазового портрета определяется как $S = \pi \epsilon_{xx'}$. Для гауссова распределения пучка часть пучка, включенная в эллипс $n\epsilon$, определяется выражением $k [\%] = 100 \% \cdot (1 - e^{-n/2})$. Так, для $n = 1$ получим $k = 39 \%$, для $n = 2$ имеем $k = 63 \%$, для $n = 4$ величина $k = 86 \%$. Для реальных (не гауссовых) пучков эти значения зависят от формы пучка. Обратим внимание на то, что приводимые ниже значения эмиттанса представлены для $n = 1$.

Рис. 2. Профиль (а) и фазовый портрет (б) пучка отрицательных ионов водорода

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 тандемного 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 с использованием подвижной охлаждаемой диафрагмы и проволочного сканера OWS-30 (D-Pace, Канада) измерен фазовый портрет пучка протонов; характерный пример представлен на рис. 3.

Рис. 3. Фазовый портрет пучка протонов при величине тока 3 мА

В этом месте пучок протонов имеет поперечный размер 10 ± 1 мм, угловую расходимость от ± 0.5 мрад до ± 1.2 мрад, нормализованный эмиттанс равен 0.2 мм мрад. Поперечный профиль пучка протонов в этом месте и в ряде других мест, где проводились его измерения несколькими независимыми методиками, хорошо описывается гауссовым распределением. Такой слабо расходящийся пучок протонов позволяет транспортировать его до литиевой мишени без применения фокусирующих линз, что является несомненным преимуществом (максимальное расстояние транспортировки 10 м, см. рис. 1).

Единственным существенным недостатком такого режима инжекции следует признать нагрев неохлаждаемой диафрагмы первого ускоряющего электрода, сильно зависящий от фокусировки пучка ионов на вход ускорителя и от потенциала высоковольтного электрода. Так, в работе [6] показано, что если силу тока магнитной фокусирующей линзы (соленоида) увеличить на 1.6 % относительно оптимального режима, то пучок протонов будет еще менее расходящимся, практически параллельным, но

существенно больше нагревается диафрагма; если же силу тока линзы уменьшить на 1.6 %, то расходимость пучка увеличится в 1.5 раза. Еще сильнее нагрев диафрагмы и расходимость пучка протонов зависят от потенциала высоковольтного электрода ускорителя, т.е. от энергии протонов. Причина в том, что, если сначала ускоритель проектировался для бор-нейтронозахватной терапии с фиксированной энергией протонов, то потом он стал использоваться для целого ряда других приложений с необходимостью получения пучка протонов или дейтронов с энергией от 0.1 МэВ до 2.3 МэВ.

Реализация такого режима “жесткого” ввода пучка в ускоритель, приводящего к получению слабо расходящегося пучка протонов, эффективно обеспечивается следующим набором диагностических средств: 1) двумя парами видеокамер, направленных на неохлаждаемые входную и выходную диафрагмы первого ускоряющего электрода, изображения с которых обеспечивают контроль положения и размера пучка ионов, а также нагрева диафрагм, 2) термопарами, вставленными в охлаждаемые медные диафрагмы в высокоэнергетическом тракте транспортировки ионов, показания которых обеспечивают контроль положения, размера и расходимости пучка протонов или дейтронов.

Добавим, что обоснование реализации “жесткого” ввода пучка ионов в ускоритель приведено в препринте [7], результаты исследования влияния пространственного заряда на транспортировку пучка отрицательных ионов водорода – в статье [6], результаты измерения фазового портрета пучка отрицательных ионов водорода, пучка протонов и поперечного размера пучка ионов в газовой обдирочной мишени ускорителя – в статье [8], результаты измерения профиля пучка ионов – в статьях [6–9], все результаты исследования обобщены в диссертационной работе [10].

3. УСКОРИТЕЛЬ-ТАНДЕМ С ВАКУУМНОЙ ИЗОЛЯЦИЕЙ VITA-II

В следующих двух ускорительных источниках нейтронов, поставленных в БНЗТ-клинику г. Сямынь (Китай) [11] и в НМИЦ онкологии им. Н.Н. Блохина в Москве, сделаны два существенных изменения.

Во-первых, поверхностно-плазменный источник с пеннинговской геометрией газоразрядной камеры разработки ИЯФ СО РАН заменен на источник компании D-Race (Канада) с объемным образованием отрицательных ионов [12]. Для генерации плазмы в ионном источнике используется дуговой разряд между накаливаемыми танталовыми катодами и стенкой камеры источника, служащей анодом. На стенке газоразрядной камеры имеется мультипольное магнитное поле, создаваемое установленными снаружи постоянными магнитами и служащее для магнитного удержания плазмы. Пучок отрицательных ионов водорода с энергией 30 кэВ, генерируемый этим источником, характеризуется

нормализованным эмиттансом 0.1 мм мрад при токе 1 мА, 0.13 мм мрад при токе 10 мА и 0.16 мм мрад при токе 15 мА (данные производителя оборудования). Проведенные нами измерения подтвердили эти данные.

Во-вторых, инжектируемый в ускоритель пучок отрицательных ионов водорода дополнительно предускоряется на энергию 100 кэВ. Первоначально предускорение инжектируемого пучка ионов было предложено для уменьшения потока вторичных заряженных частиц и для этого была сделана ускорительная трубка, но проблема была решена другим способом: улучшением вакуумной откачки, подавлением вторичной эмиссии электронов со стенок вакуумной камеры, облучаемых потоком вторичных положительных ионов, и подавлением проникновения электронов из транспортного канала в ускоритель [13]. Ускорительная трубка была использована в источнике нейтронов для китайской клиники с целью увеличения энергии протонов; подобная ускорительная трубка используется в источнике нейтронов для московской клиники. Таким образом, в обоих ускорительных источниках нейтронов для онкологических клиник реализовано предускорение.

Схема ускорительного источника нейтронов VITA-II для НМИЦ онкологии им. Н.Н. Блохина представлена на рис. 4. Диаметр вакуумного бака ускорителя равен 1.56 м, его высота 2.4 м. Расстояние от выходного отверстия источника отрицательных ионов водорода до центра ускорителя равно 3.23 м, от центра ускорителя до литиевой генерирующей нейтроны мишени составляет 6.66 м.

Рис. 4. Схема ускорительного источника нейтронов VITA-II

Выходящий из источника пучок отрицательных ионов водорода – расходящийся. Вблизи выхода источника размещена линза Эйнцеля с тормозящим потенциалом (входит в комплектацию источника), которая расходящийся пучок ионов фокусирует и делает его близким к параллельному. Далее этот пучок ионов ускоряется в ускорительной трубке и затем магнитной линзой (соленоидом) фокусируется на вход в ускоритель. Перед входной диафрагмой ускорителя размещен измеритель эмиттанса ES-4 (D-Pace, Канада), с помощью которого определен фазовый портрет инжектируемого пучка ионов в разных режимах фокусировки и предускорения. Выяснено, 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. Получено, что с увеличением тока увеличивается размер пучка ионов из-за действия объемного заряда, преимущественно в зоне действия линзы Эйнцеля, где происходит торможение ионов. Характерные фазовые портреты пучка отрицательных ионов водорода представлены на рис. 5.

Рис. 5. Фазовый портрет инжектируемого в ускоритель пучка отрицательных ионов водорода

Поперечный размер пучка ионов в этом месте имеет значение 17–24 мм, сходимост \pm 5–7 мрад, нормализованный эмиттанс от 0.15 до 0.2 мм мрад. Размер и сходимост 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.

На расстоянии 2.17 м от центра ускорителя с использованием подвижной охлаждаемой диафрагмы и проволочного сканера OWS-30 измерен фазовый портрет пучка протонов, характерный пример представлен на рис. 6. В этом месте пучок протонов имеет поперечный размер 15–20 мм, расходимост \pm 3–4 мрад, нормализованный эмиттанс составляет 0.15–0.2 мм мрад.

Рис. 6. Фазовый портрет пучка протонов по горизонтали (а) и вертикали (б).

При смещении диафрагмы по горизонтали или вертикали измерен профиль пучка протонов (рис. 7). Видно, что профиль пучка протонов отличается от формы гауссова распределения. Форма фазового портрета пучка отрицательных ионов водорода, представленная на рис. 5, указывает на наличие сферических aberrаций в ионно-оптическом тракте. Это приводит к тому, что разные части пучка ионов фокусируются на разные расстояния и формируют неоднородный пучок протонов. Транспортировка такого расходящегося пучка протонов до литиевой генерирующей нейтроны мишени требует применения средств его фокусировки, в данном случае пары квадрупольных магнитных линз.

Рис. 7. Профиль пучка протонов по горизонтали (а) и вертикали (б)

Таким образом, использование предускорения дает как положительный, так и отрицательный эффекты. Положительный эффект состоит в том, что энергия протонов увеличена на 100 кВ 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 расходимост 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.

Понятно, что можно улучшить ускорительную трубку, уменьшить сферические aberrации, но вряд ли стоит в дальнейшем применять предускорение, которое зачеркивает главное преимущество тандемных ускорителей – размещение инжектора и мишени под

земляным потенциалом. В следующей версии ускорителя-тандема с вакуумной изоляцией без предускорения предполагается оптимизировать инжекцию, например применением Q-snout линзы [14], оптимизировать ускорительный канал, сделать входную линзу первого ускоряющего электрода охлаждаемой и пр. Отметим, что с осени 2024 г. в ускорителе на площадке ИЯФ СО РАН реализовано охлаждение диафрагм высоковольтного электрода, что улучшило его эксплуатационные качества.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Тандемный электростатический ускоритель оригинальной конструкции, названный со временем ускорителем-тандемом с вакуумной изоляцией ВИТА, широко используется для развития бор-нейтронозахватной терапии, для радиационного тестирования перспективных материалов, для измерения сечения ядерных реакций и для других приложений. В отличие от ускорителя в Институте ядерной физики СО РАН, в ускорителях, поставленных в онкологические клиники, используется предускорение. Измерение фазового портрета пучка ионов этих установок и их сравнение позволили установить преимущества и недостатки использования предускорения. Для улучшения ускорителя-тандема с вакуумной изоляцией сделаны предложения, требующие экспериментальной проверки.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда (грант № 19-72-30005, <https://rscf.ru/project/19-72-30005/>).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Neutron Capture Therapy. Principles and Applications / Eds. W. Sauerwein, A. Wittig, R. Moss, Y. Nakagawa. Springer, 2012. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-31334-9>
2. *Думова М., Таскаев С., Рихтер В., Кулигина Е.* // Cancer Communications. 2020. V. 40. P. 406. <https://doi.org/10.1002/cac2.12089>
3. Advances in Boron Neutron Capture Therapy. Vienna: International Atomic Energy Agency, 2023. ISBN: 978-92-0-132723-9
4. *Таскаев С., Берендеев Е., Бикчурина М. et al.* // Biology. 2021. V. 10. P. 350. <https://doi.org/10.3390/biology10050350>
5. *Таскаев С.Ю.* Ускорительный источник нейтронов ВИТА. Москва: Физматлит, 2024. ISBN: 978-5-9221-1979-5
6. *Быков Т.А., Касатов Д.А., Колесников Я.А. и др.* // ПТЭ. 2018. № 5. С. 90. <https://doi.org/10.1134/S003281621805018X>

7. *Деревянкин Г.Е., Крайнов Г.С., Крючков А.М., Сильвестров Г.И., Таскаев С.Ю., Тиунов М.А.* Препринт ИЯФ 2002-24. Новосибирск, 2002.
8. *Бикчурин М.И., Быков Т.А., Колесников Я.А. и др.* // ПТЭ. 2022. № 4. С. 18. <https://doi.org/10.31857/S0032816222040164>
9. *Колесников Я.А., Остреинов Ю.М., Пономарев П.Д., Савинов С.С., Таскаев С.Ю., Щудло И.М.* // ПТЭ. 2021. № 4. С. 5. <https://doi.org/10.31857/S0032816221040194>
10. *Колесников Я.А.* Исследование и оптимизация транспортировки и ускорения пучка ионов в ускорителе-тандеме с вакуумной изоляцией. Дисс. ... канд. физ.-мат. наук, Новосибирск: ИЯФ СО РАН, 2022. 149 с.
11. Going down in History: China Reaches a New Milestone to Develop an Advanced In-Hospital BNCT Solution for Clinical Use. <https://isnct.net/blog/2023/03/08/newsletter-19/>
12. 10 kW Filament Volume-Cusp. <https://www.d-pace.com/?e=304>
13. *Ivanov A., Kasatov D., Koshkarev A., Makarov A., Ostreinov Yu., Shchudlo I., Sorokin I., Taskaev S.* // JINST. 2016. V. 11. P. 04018. <https://doi.org/10.1088/1748-0221/11/04/P04018>
14. *Ostreinov G, Savinov S., Shchudlo I., Taskaev S.* // ИЕТ. 2024. V. 67. P. S33. <https://doi.org/10.1134/S0020441224701306>

ПОДПИСИ К РИСУНКАМ

Рис. 1. Схема ускорительного источника нейтронов ВИТА: *1* – ускоритель-тандем с вакуумной изоляцией (*1a* – источник отрицательных ионов, *1б* – высоковольтный и промежуточные электроды, *1в* – газовая обдирочная мишень, *1г* – проходной изолятор, *1д* – высоковольтный источник питания), *2* – поворотный магнит, *3* – литиевая генерирующая нейтроны мишень, *4* – система формирования пучка нейтронов. Литиевая мишень размещена в положениях *A*, *B*, *B*, *Г* или *Д*.

Рис. 2. Профиль (**а**) и фазовый портрет (**б**) пучка отрицательных ионов водорода при величине тока 3 мА.

Рис. 3. Фазовый портрет пучка протонов при величине тока 3 мА.

Рис. 4. Схема ускорительного источника нейтронов ВИТА-IIβ: *1* – источник отрицательных ионов водорода с электростатической линзой Эйнцеля, установленный на высоковольтной платформе, *2* – ускорительная трубка, *3* – соленоид, *4* – корректоры, *5* – входная диафрагма ускорителя, *6* – ускоритель-тандем с вакуумной изоляцией, *7* – бесконтактный датчик тока, *8* – квадрупольные линзы, *9* – корректоры, *10* – поворотный магнит (пучок протонов повернут в горизонтальной плоскости), *11* – приемник пучка, *12* – магнитная развертка, *13* – литиевая мишень для генерации нейтронов и система формирования пучка нейтронов, *14* – высоковольтный источник питания ускорителя. Стрелками показано распространение отрицательных ионов водорода (H^-), протонов (p) и нейтронов (n).

Рис. 5. Фазовый портрет инжектируемого в ускоритель пучка отрицательных ионов водорода с величинами тока 5 мА (**а**) и 9 мА (**б**).

Рис. 6. Фазовый портрет пучка протонов по горизонтали (**а**) и вертикали (**б**) при величине тока 3 мА.

Рис. 7. Профиль пучка протонов по горизонтали (**а**) и вертикали (**б**) при величинах тока 2, 3 и 4 мА.

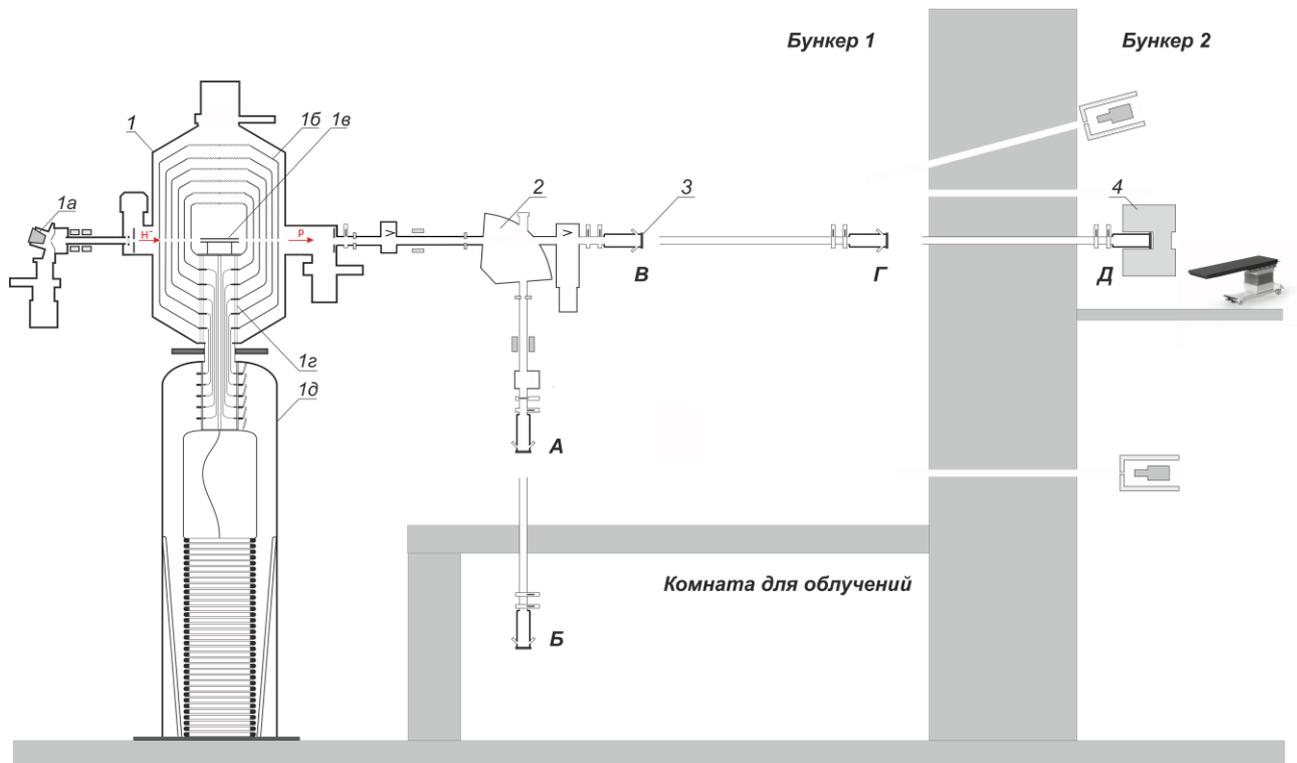


Рис. 1.

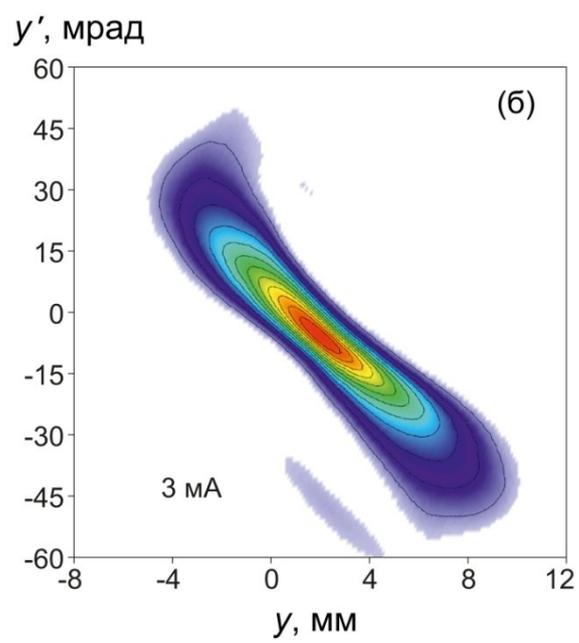
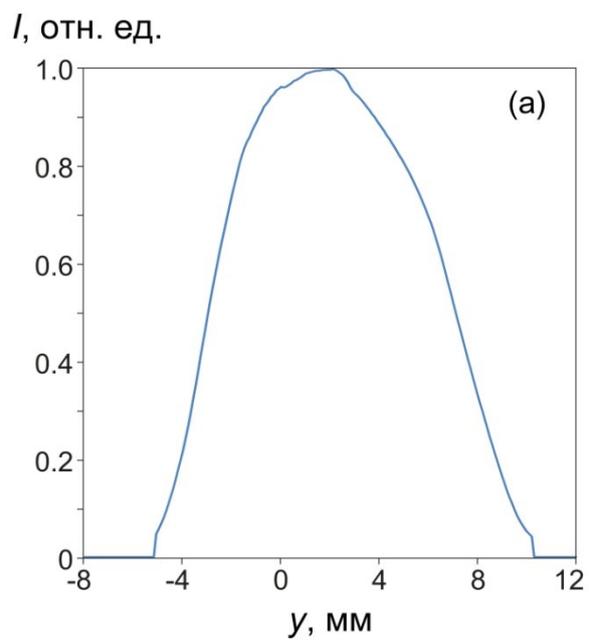


Рис. 2.

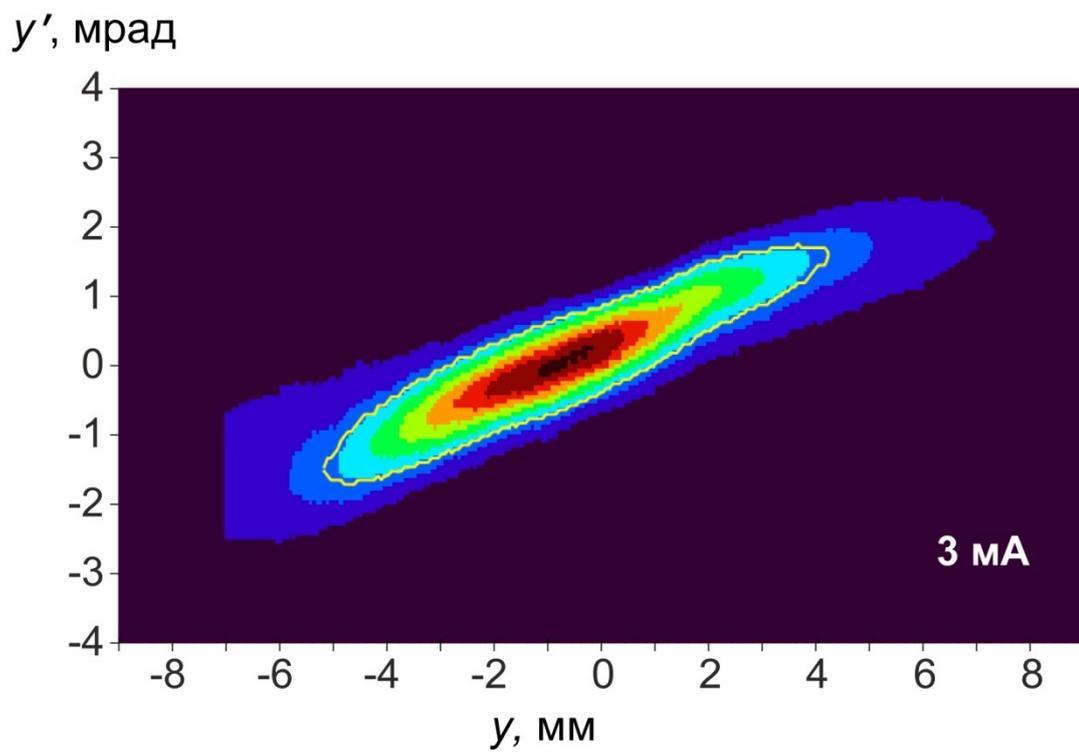


Рис. 3.

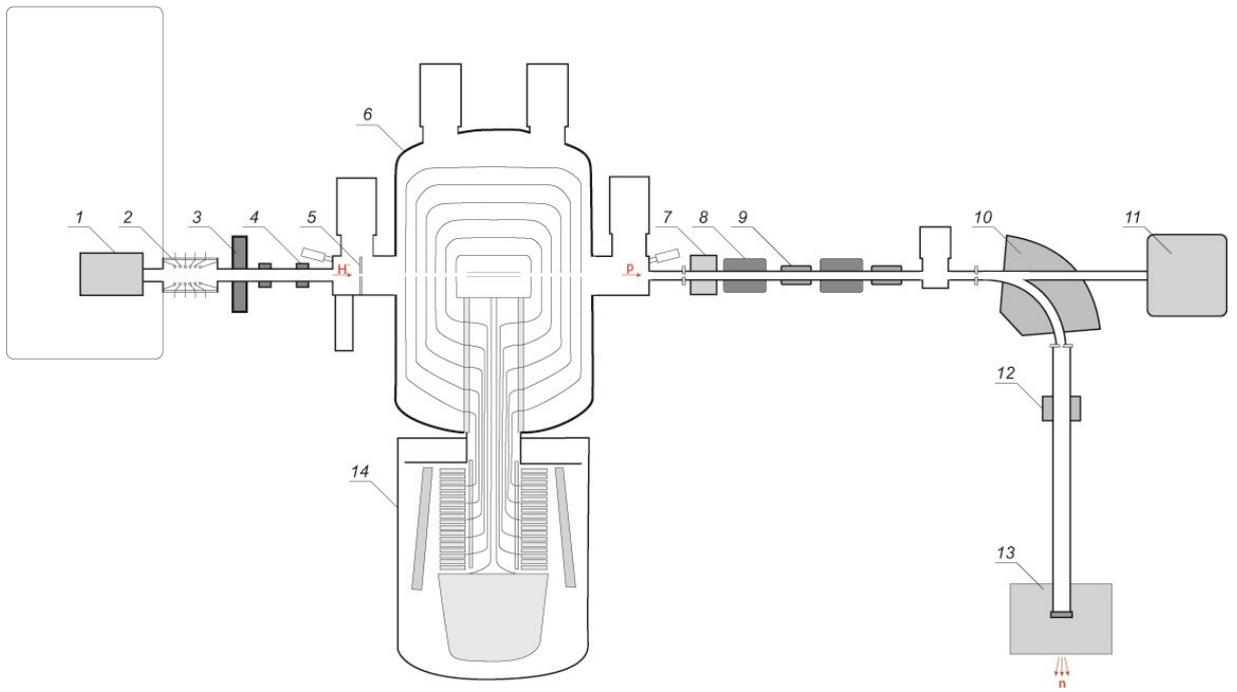


Рис. 4.

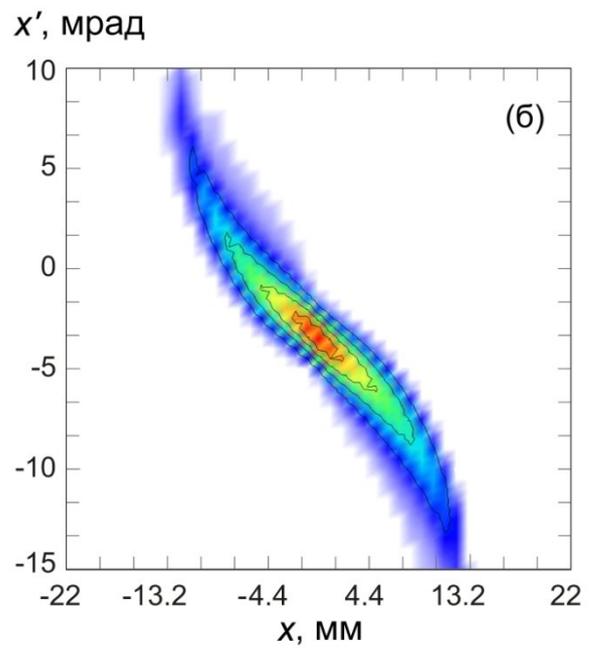
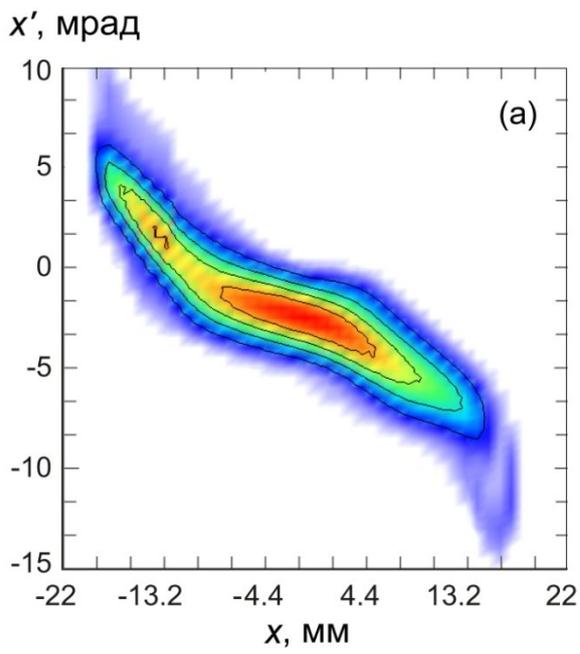


Рис. 5.

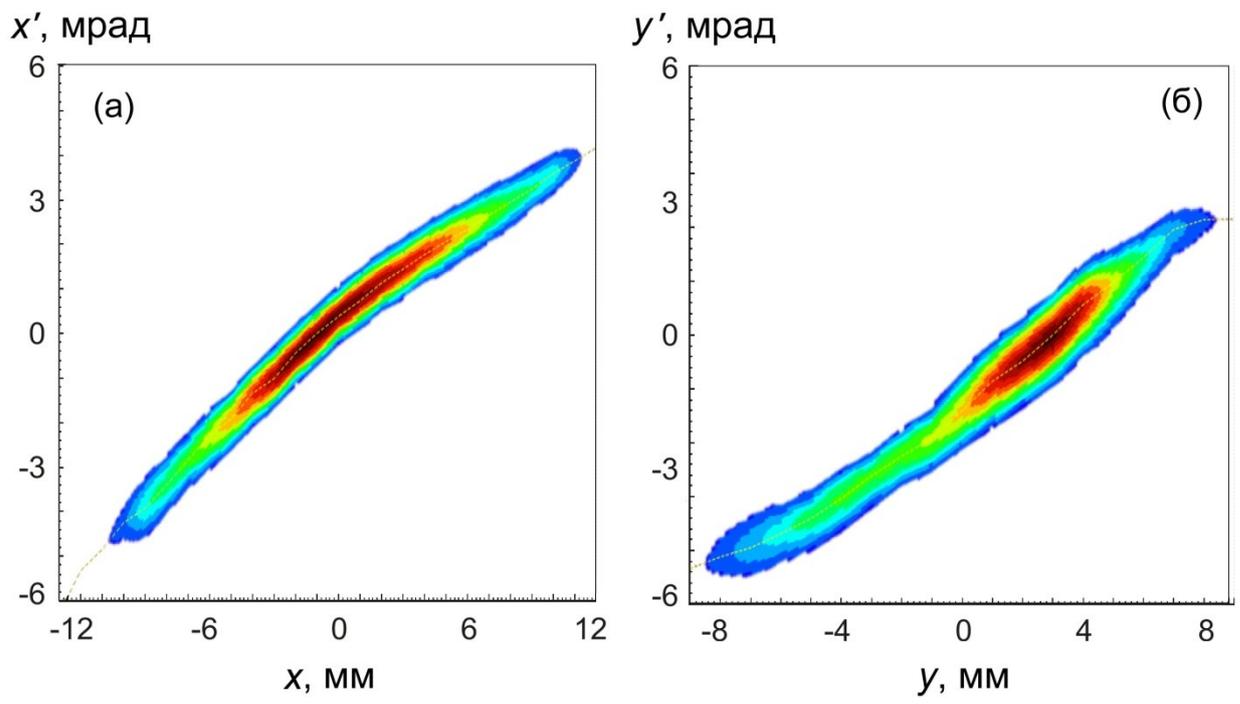


Рис. 6.

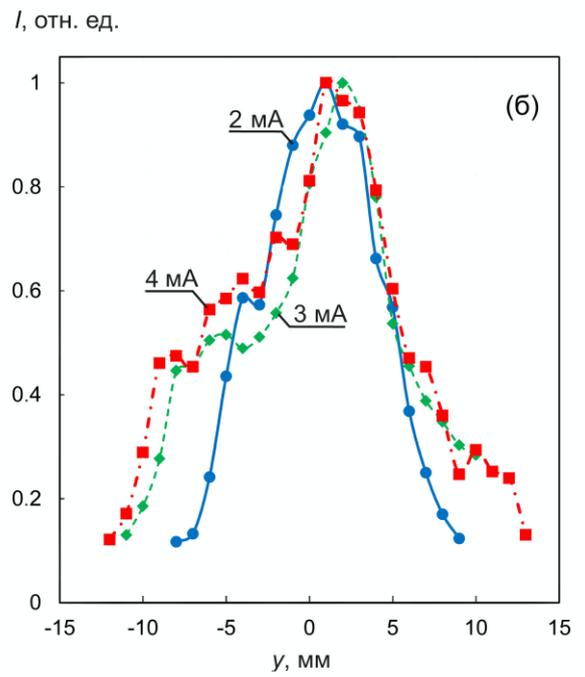
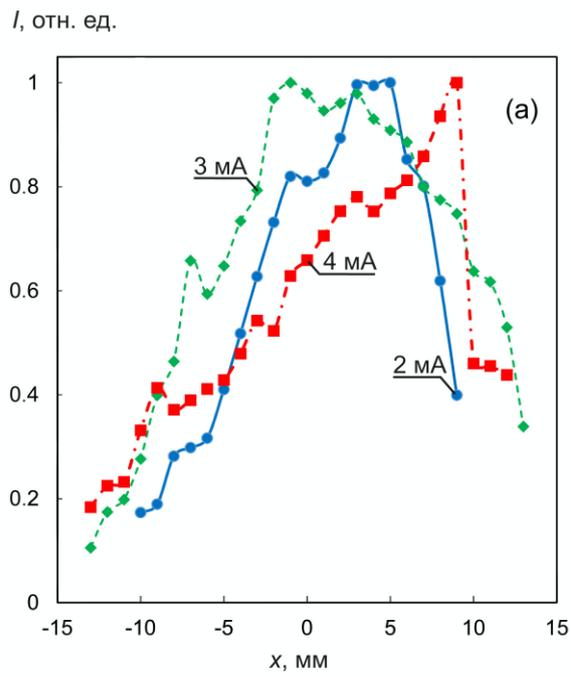


Рис. 7.