

ТЕХНИКА ЯДЕРНОГО
ЭКСПЕРИМЕНТА

УДК 621.384.65

ИЗМЕРЕНИЕ ФАЗОВОГО ПОРТРЕТА ПУЧКА ИОНОВ
В УСКОРИТЕЛЕ-ТАНДЕМЕ С ВАКУУМНОЙ ИЗОЛЯЦИЕЙ

© 2022 г. М. И. Бикчурин^{a,b}, Т. А. Быков^{a,b}, Я. А. Колесников^{a,b,*}, А. Н. Макаров^{a,b},
Г. М. Острейнов^{a,b}, С. С. Савинов^{a,b}, С. Ю. Таскаев^{a,b}, И. М. Щудло^{a,b}

^a Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН
Россия, 630090, Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 11

^b Новосибирский государственный университет
Россия, 630090, Новосибирск, ул. Пирогова 2

*e-mail: Ya.A.Kolesnikov@inp.nsk.su

Поступила в редакцию 10.03.2022 г.

После доработки 16.03.2022 г.

Принята к публикации 19.03.2022 г.

Одним из ускорителей заряженных частиц с относительно малой энергией и относительно большим током является ускоритель-тандем с вакуумной изоляцией, предложенный для бор-нейтронозахватной терапии и планируемый к использованию в ряде других приложений, требующих более удаленного размещения нейтроногенерирующей мишени от ускорителя. В работе проведено измерение фазового портрета пучка ионов и его зависимости от тока пучка ионов и силы магнитной линзы, фокусирующей пучок отрицательных ионов водорода на вход ускорителя. Показано, что модернизация магнитной линзы способствовала уменьшению сферической аберрации линзы и улучшила качество пучка отрицательных ионов. Установлено, что эмиттанс пучка ионов растет с увеличением тока и пространственный заряд влияет на фазовый портрет пучка ионов в тракте транспортировки низкой энергии. Для компенсации действия пространственного заряда на фазовый портрет пучка протонов изменяют силу магнитной линзы. Полученные экспериментальные данные свидетельствуют о том, что пучок протонов может быть транспортирован до места планируемого размещения нейтроногенерирующей мишени без добавления фокусирующих элементов.

DOI: 10.31857/S0032816222040164

1. ВВЕДЕНИЕ

В Институте ядерной физики СО РАН предложен и создан тандемный электростатический ускоритель заряженных частиц оригинальной конструкции — ускоритель-тандем с вакуумной изоляцией (Vacuum Insulated Tandem Accelerator — VITA). В ускорителе получают пучок протонов с энергией, которая может варьироваться в пределах 0.6–2.3 МэВ с высокой стабильностью и монохроматичностью 0.1%. Ток пучка варьируется в широком диапазоне, от 1 нА до 10 мА, со стабильностью 0.4%. Ускоритель используют для развития методики бор-нейтронозахватной терапии [1, 2], включая оснащение им источника нейтронов, поставленного в Сямынь (Китай), и источников нейтронов, изготавливаемых для Павии (Италия) и Москвы (Россия). Ускоритель также используют для изучения радиационного блистеринга металла [3, 4], проведения активационного анализа материалов [5], получения фундаментальных знаний о сечении реакций [6] и для других приложений. В ближайшее время установку планируют использовать для радиационного

тестирования материалов быстрыми нейтронами и для отработки методики бор-нейтронозахватной терапии на крупных домашних животных со спонтанными опухолями. Эти исследования требуют размещения нейтроногенерирующей мишени на большем, чем в предыдущих применениях, расстоянии от ускорителя.

Необходимость транспортировки пучка протонов на большие расстояния сделало актуальным измерение фазового портрета пучка протонов, с тем чтобы определить, потребуются ли дополнительные фокусирующие элементы для его транспортировки. Для реализации поставленной задачи необходимо измерить фазовый портрет пучка ионов и изучить его зависимость от тока ионов и силы магнитной линзы, фокусирующей пучок ионов на вход в ускоритель.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Схема установки показана на рис. 1. Стационарный пучок протонов получают в ускорителе-тандеме с вакуумной изоляцией (VITA). Термин

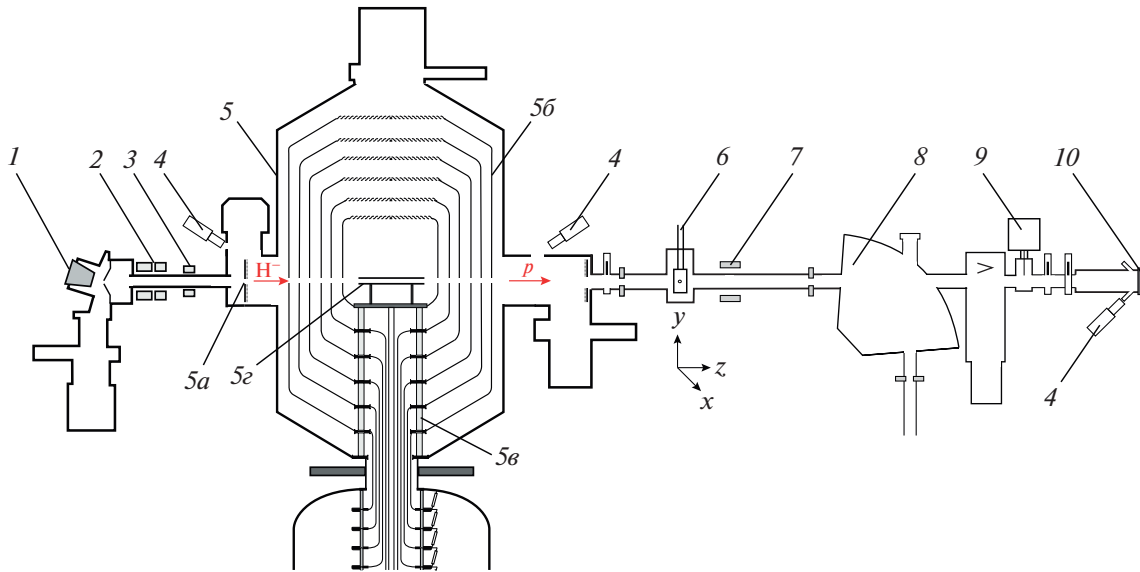


Рис. 1. Схема экспериментальной установки. 1 – источник отрицательных ионов; 2 – магнитная линза; 3 – корректор; 4 – видеокамеры; 5 – ускоритель-тандем с вакуумной изоляцией (5а – входное отверстие, 5б – промежуточные и высоковольтные электроды, 5в – проходной изолятор, 5г – газовая обдирочная мишень); 6 – охлаждаемая диафрагма; 7 – бесконтактный датчик тока; 8 – поворотный магнит; 9 – проволочный сканер; 10 – литиевая мишень.

“тандемный” означает, что приложенное ускоряющее напряжение используется дважды. Отрицательные ионы водорода инжектируют на вход тандемного ускорителя, ускоряют положительным потенциалом, приложенным к центральному электроду, затем обдирают до положительных ионов и снова ускоряют тем же потенциалом. Ускоритель имеет особую конструкцию, в которой, в отличие от обычных тандемных ускорителей, не используют ускоряющие трубки. Вместо этого применяют вложенные друг в друга промежуточные электроды 5б, закрепленные на проходном изоляторе 5в, как показано на рис. 1. Такая конструкция электродов позволяет обеспечить высокий темп ускорения ионов – до 25 кВ/см, но

электростатическая линза на входе ускорителя получается сильной. По этой причине инжектируемый пучок отрицательных ионов водорода перерефокусирует на входное отверстие 5а ускорителя магнитной линзой 2.

Ранее нами было установлено [7], что на транспортировку пучка отрицательных ионов водорода от источника ионов 1 до ускорителя 5 влияет пространственный заряд и сферическая абберрация магнитной линзы 2, представляющей собой две одинаковые катушки на некотором расстоянии друг от друга. После выяснения данного факта магнитная линза была модернизирована: катушка, ближняя к источнику ионов, усилена и приближена к источнику, вторая катушка

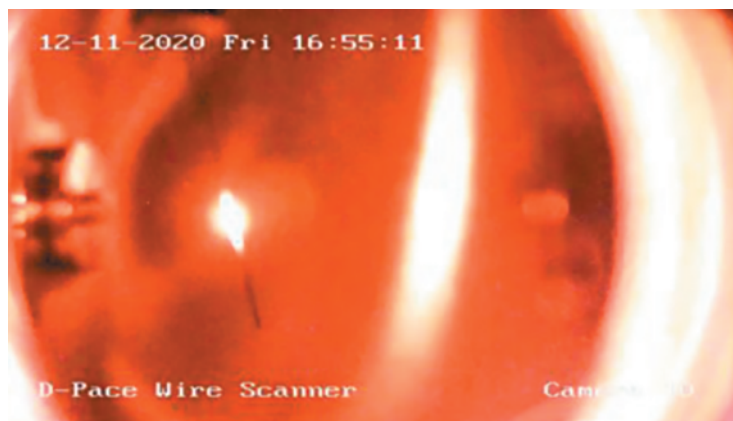


Рис. 2. Фотография проволочки сканера, пересекающей струю протонов при токе пучка протонов 3 мА.

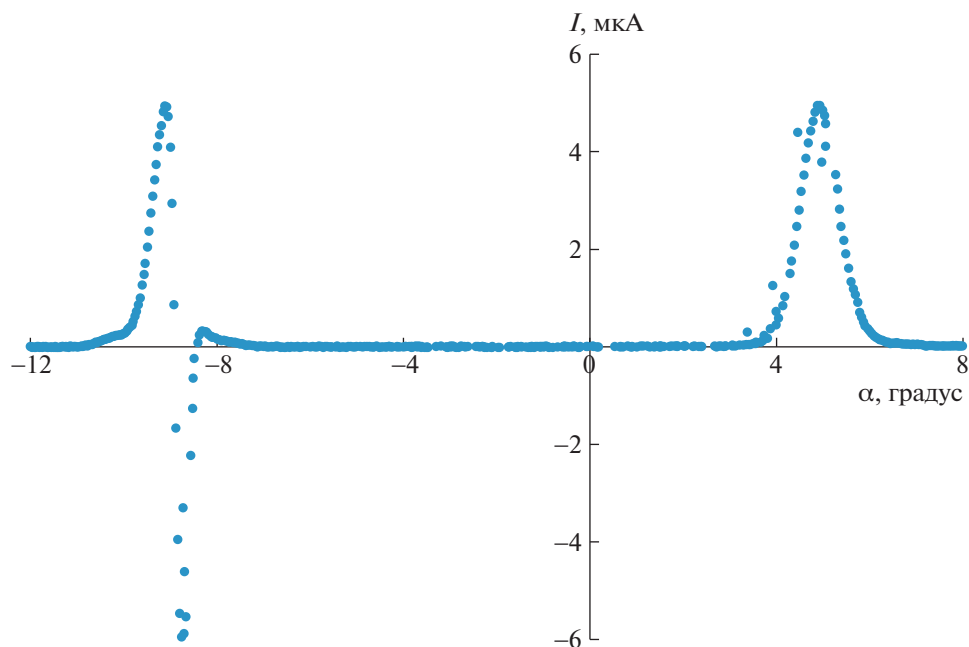


Рис. 3. Оциллограмма сигнала сканера при токе пучка протонов 3 мА.

размещена вплотную к первой. Целью исследования было выяснить, насколько проведенная модернизация уменьшила сферическую aberrацию линзы и улучшила качество пучка ионов.

Если ранее фазовый портрет пучка отрицательных ионов водорода измеряли подвижной диафрагмой и проволочным сканером OWS-30 (D-Pace, Канада) [8], то теперь — измерителем эмиттанса ES-4 (D-Pace, Канада) [9], адекватно подходящим для этой задачи. Измеритель эмиттанса установлен на расстоянии 57 мм перед

входной диафрагмой 5а ускорителя; входная щель сканера равна 0.1 мм; измерения проводили с шагом 0.1 мм и 1 мрад.

Методический прием с подвижной диафрагмой и проволочным сканером использован нами для измерения фазового портрета пучка протонов. В этом методе диафрагмой вырезают часть пучка ионов, и проволочным сканером измеряют его профиль на некотором расстоянии. Набор данных, полученных при сканировании пучка ионов диафрагмой, позволяет восстановить фазовый портрет пучка ионов и определить его эмиттанс.

Охлаждаемая диафрагма б установлена на расстоянии 1.86 м от центра ускорителя. Диафрагма представляет собой медный прямоугольный параллелепипед со сторонами 64×64 мм толщиной 16 мм. В центре диафрагмы просверлено отверстие диаметром 1 мм и с обеих сторон сделанозенкование диаметром 10 мм. Внутри диафрагмы выполнены каналы диаметром 10 мм для ее охлаждения водой. Охлаждающую воду подают в диафрагму и отводят из нее по металлическим трубкам, впаянным в диафрагму. Посредством металлических трубок диафрагма закреплена на 3D подвижном вводе движения TTX100-100-200-YZS (UHV Design), с помощью которого ее можно контролируемо перемещать в плоскости, ортогональной направлению распространения пучка протонов.

Поперечный профиль струи протонов измеряют проволочным сканером OWS-30 (D-Pace, Канада) (9) [8], установленным после поворотного

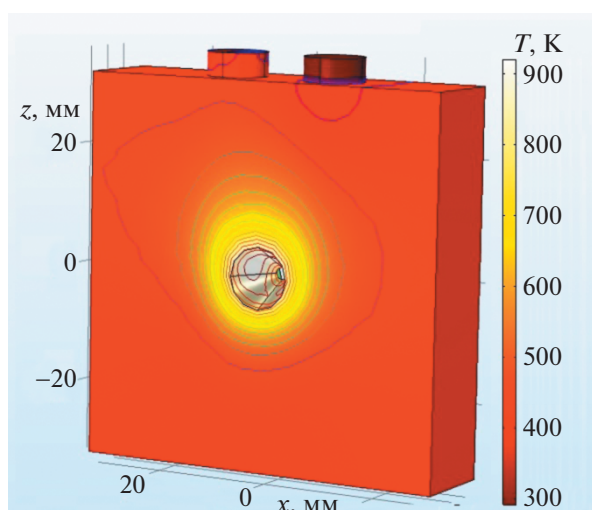


Рис. 4. Моделирование нагрева диафрагмы при ее размещении в центре пучка протонов с током 3 мА.

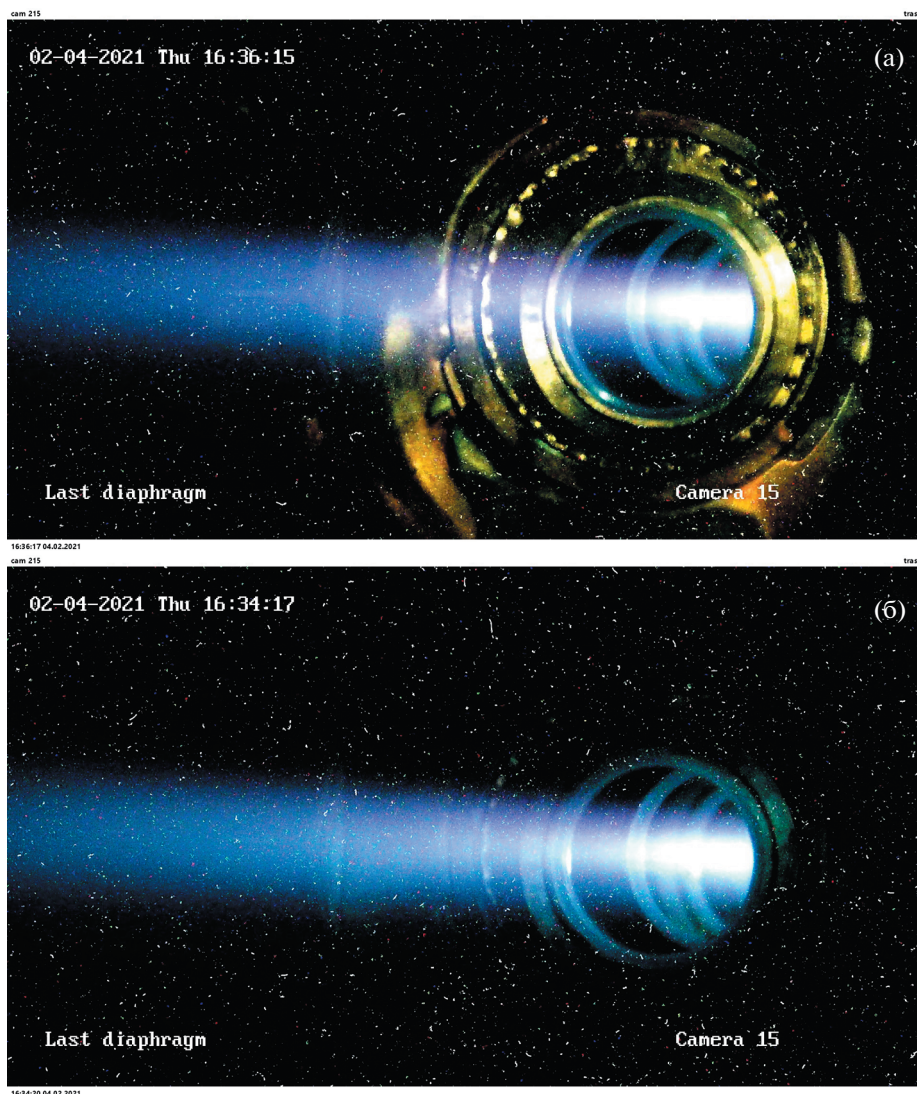


Рис. 5. Фотография выходной диафрагмы внешнего электрода ускорителя при направлении пучка протонов с током 3 мА в центр охлаждаемой диафрагмы (а) и в точку, расположенную на расстоянии 2 мм от центра, (б).

магнита на расстоянии 3.11 м от диафрагмы б. Сканер состоит из двух вольфрамовых проволочек диаметром 0.5 мм и длиной 49 мм, закрепленных на общем стержне, который отклонен на угол 13.5° от оси, пересекающей центр пучка ионов. При измерении стержень поворачивается до угла -13.5° и возвращается обратно. Ось вращения стержня расположена на расстоянии 190 мм от центра пучка ионов. При пересечении центра струи протонов каждая из проволочек наклонена под углом 45° к плоскости фланца сканера. Поскольку сканер размещен под углом 45° к горизонтали, то одна из проволочек пересекает пучок протонов вертикально, другая — горизонтально. При движении стержня измеряется ток, попадающий на эту проволочку, и угол отклонения стержня. Полученные значения при диаметре струи меньше 30 мм позволяют с пространствен-

ным разрешением 0.1 мм восстановить поперечный профиль струи протонов.

Для корректного измерения тока протонов была проведена модернизация: перед сканером и после него на расстоянии 50 мм было установлено по металлическому кольцу с внутренним диаметром 60 мм, каждое из которых находилось под отрицательным потенциалом 300 В для подавления вторичной эмиссии электронов с проволочек сканера.

Характерные значения тока на проволочку сканера составили 10^{-6} А, погрешность пикоамперметра — 10^{-10} А. Поскольку имеются две проволочки, которые пересекают центр струи под углами, отличающимися на 90° , и одновременно не могут находиться в струе, проводимые сканером измерения позволяют получить профили струи

Таблица 1. Результаты измерений фазового портрета пучка отрицательных ионов водорода с энергией 22 кэВ

Ток, мА	y, мм	y', мрад	ϵ_{norm} , мм · мрад
0.44	3.92	31.8	0.13
0.7	4.31	31	0.14
0.85	4.36	30.5	0.14
1	4.45	30.1	0.15
1.5	4.40	26.9	0.17
2	4.54	25.7	0.18
3	4.59	29.5	0.20

Таблица 2. Результаты измерений фазового портрета пучка протонов

Ток, мА	y, мм	y', мрад	ϵ_{norm} , мм · мрад
0.5	4.2	0.38	0.21
1	5.6	0.56	0.27
2	6.1	1.2	0.24
3	5.2	1.6	0.21

протонов в двух перпендикулярных направлениях в плоскости, ортогональной пучку. Размещение оси сканера под углом 45° к осям x и y позволяет восстановить фазовый портрет пучка в пространстве координат и углов распространения (x, x') и (y, y') .

В документации к проволочному сканеру указано, что максимальная энергия измеряемого пучка должна быть не более 1 МэВ, а плотность мощности пучка – не более 1 Вт/мм². Нами сканер использован в режиме, не предусмотренном изготовителем, а именно при большей энергии и большей плотности мощности. Установлено, что сканер обеспечивает достоверные измерения с требуемым пространственным разрешением при энергии протонов 2 МэВ и токе до 3 мА. При токе 3 мА, как видно на рис. 2, проволочка сканера, пересекающая струю протонов, нагревается до такой степени, что инициирует пробой в вакуумном промежутке между разогретой проволочкой и металлическими кольцами под отрицательным потенциалом 300 В. На рис. 3 приведена осциллограмма сигнала сканера, согласно которой, при обратном проходе проволочки сквозь струю протонов сигнал вместо положительного стал отрицательным из-за образования плазмы и закорачивания промежутка между проволочкой сканера и кольцом под отрицательным потенциалом.

Также к ограничению тока пучка протонов в 3 мА приводит сильный нагрев охлаждаемой диафрагмы, снижающий электрическую прочность ускорителя из-за усиленной эмиссии электронов с ее поверхности. Так, при токе пучка протонов 3 мА и размещении диафрагмы в центре пучка область зонковки, как показывает проведенное моделирование в программе Comsol Multiphysics, нагревается до 900 К (рис. 4) и, как фонарик, освещает выходную диафрагму ускорителя (рис. 5).

Заканчивая описание эксперимента, укажем, что положение и размер пучка ионов в ускорителе контролируют парами видеокамер (4 на рис. 1), смотрящих на входную и выходную диафрагмы внешнего ускоряющего электрода. Ток пучка протонов измеряют бесконтактным датчиком тока NPCT (Bergoz, France) (7 на рис. 1). Пучок протонов принимают на литиевую мишень (10 на рис. 1), используя ее как цилиндр Фарадея для измерения тока пучка протонов и для контроля положения и размера пучка на поверхности лития по люминесценции, регистрируемой видеокамерой 4 [10].

Заметим, что обычно положение и размер пучка перед входным отверстием ускорителя контролируют проволочным сканером. Этот контроль важен для оптимального ускорения ионов и дальнейшей транспортировки пучка протонов, но в данном исследовании эту диагностику не применяли, потому что либо вместо проволочного сканера был установлен измеритель эмиттанса, либо проволочный сканер был использован для измерения фазового портрета пучка протонов.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Фазовый портрет пучка отрицательных ионов водорода нами измерен ранее с применением диафрагмы и проволочного сканера и результаты опубликованы в работе [7]. На фазовом портрете пучка ионов было отчетливо видно влияние сферической аберрации магнитной линзы, и нормализованный эмиттанс был определен как 1.7 мм · мрад (здесь под этим значением понималась площадь эллипса, внутри которой сосредоточено 2/3 тока пучка ионов).

Уточним понятие “эмиттанс” для однозначного понимания полученных результатов. Этот термин используется для описания размера пучка в фазовых пространствах (x, x') или (y, y') .

Эмиттанс в фазовом пространстве (x, x') определяется как $\epsilon_{xx'} = \epsilon_{\text{rms}} = (\det(\sigma_{xx'}))^{1/2}$, где $\sigma_{xx'} = \begin{bmatrix} \langle x^2 \rangle & \langle xx' \rangle \\ \langle xx' \rangle & \langle x'^2 \rangle \end{bmatrix}$; $\langle x^2 \rangle = \frac{1}{N} \sum_1^N x_i^2$; $\langle x'^2 \rangle = \frac{1}{N} \sum_1^N x_i'^2$;

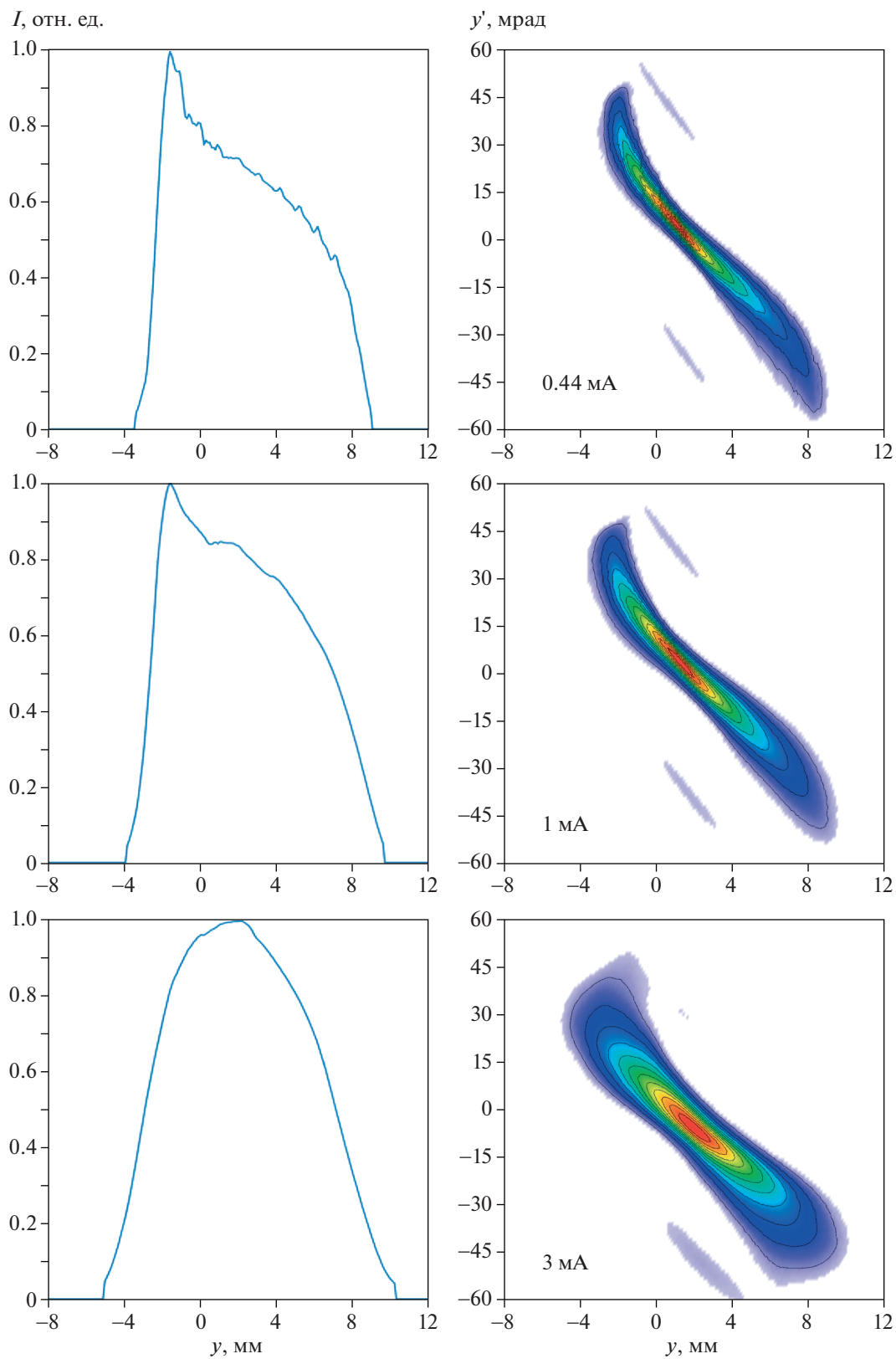


Рис. 6. Профиль (слева) и фазовый портрет (справа) пучка отрицательных ионов водорода, инжектируемых в ускоритель, при разных значениях тока (значения тока приведены в левом нижнем углу на фазовом портрете пучка).

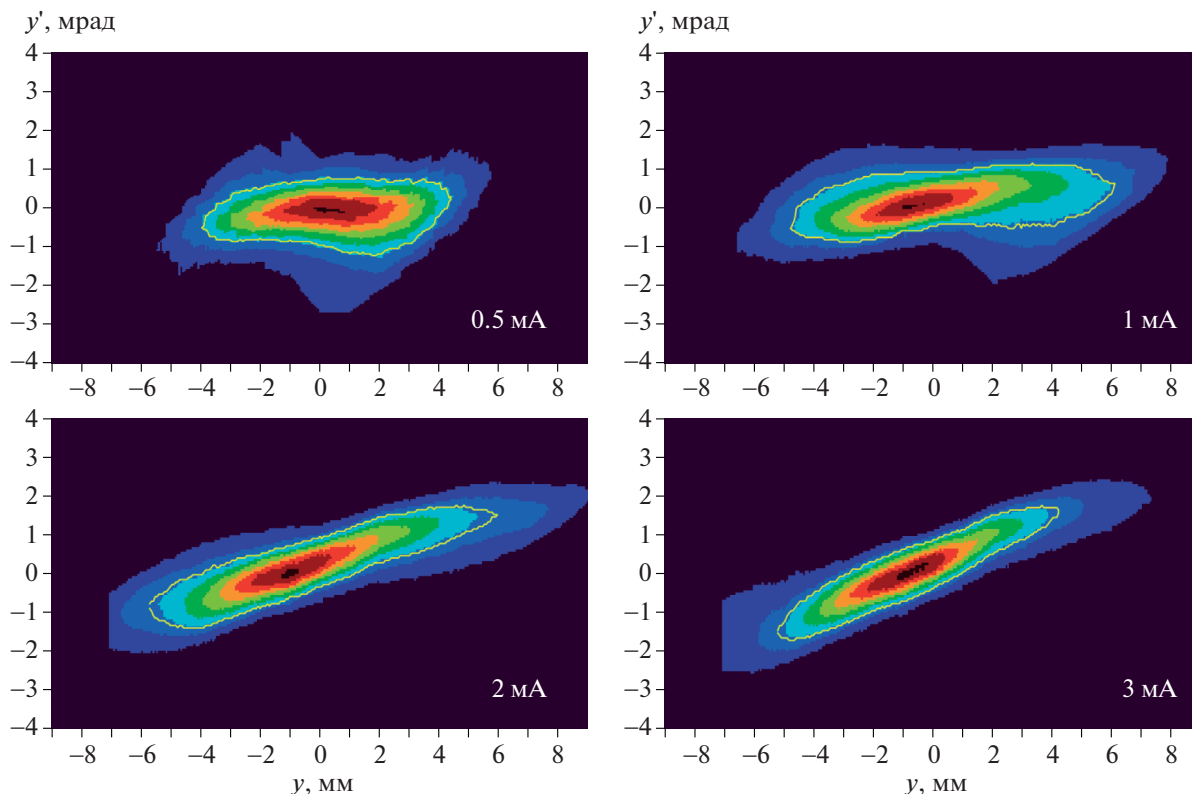


Рис. 7. Фазовый портрет пучка протонов (y, y') при значениях тока 0.5, 1, 2 и 3 мА (цифры в правом нижнем углу).

$\langle xx' \rangle = \frac{1}{N} \sum_1^N x_i x_i'$. Площадь эллипса фазового портрета определяется как $S = \pi \epsilon_{xx'}$.

Эмиттанс конечного пучка с равномерным распределением заряда в фазовом пространстве хорошо определен. Однако, поскольку плотность заряда большинства реальных пучков редко бывает равномерной, эмиттанс реального пучка должен быть связан с долей частиц, включенных в идеализированный эллипс пучка.

Поскольку эмиттанс зависит от импульса частиц, то для удобства используют нормализованный эмиттанс $\epsilon_{\text{ном}}$, получаемый умножением эмиттанса ϵ на релятивистские факторы β и γ :

Таблица 3. Результаты измерений фазового портрета пучка протонов при изменении режима фокусировки

Режим фокусировки	$y, \text{мм}$	$y', \text{мрад}$	$\epsilon_{\text{ном}}, \text{мм} \cdot \text{мрад}$
Слабый	6.0	1.7	0.20
Оптимальный	5.4	1.2	0.22
Сильный	4.6	0.9	0.21

$\epsilon_{\text{ном}} = \epsilon_{\text{rms}} \beta \gamma$, где $\beta = \sqrt{\frac{2E}{mc^2}}$ и $\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}}$, E – энергия заряженной слабoreлятивистской частицы, m – ее масса. Так, для протонов с энергией 2 МэВ факторы $\beta = 0.065$, $\gamma = 1.002$.

Для гауссова распределения пучка часть пучка, включенная в $n\epsilon$ эллипс, определяется выражением: $k [\%] = 100\% \cdot (1 - e^{-n/2})$. Так, для $n = 1$ получим $k = 39\%$, для $n = 2 - k = 63\%$, для $n = 4 - k = 86\%$. Для реальных (не гауссовых) пучков эти значения зависят от формы пучка.

Обратим внимание на то, что приводимые ниже значения эмиттанса представлены именно для $n = 1$, хотя ранее эмиттанс пучка отрицательных ионов водорода и эмиттанс пучка протонов определяли из площади эллипса $S = 2\pi\epsilon$, чья граница включает в себя примерно 2/3 пучка.

3.1. Измерение фазового портрета пучка отрицательных ионов водорода, инжектируемых в ускоритель

С использованием измерителя эмиттанса ES-4 измерен фазовый портрет пучка отрицательных ионов водорода с энергией 22 кэВ, инжектируемого в ускоритель, при нескольких значениях то-

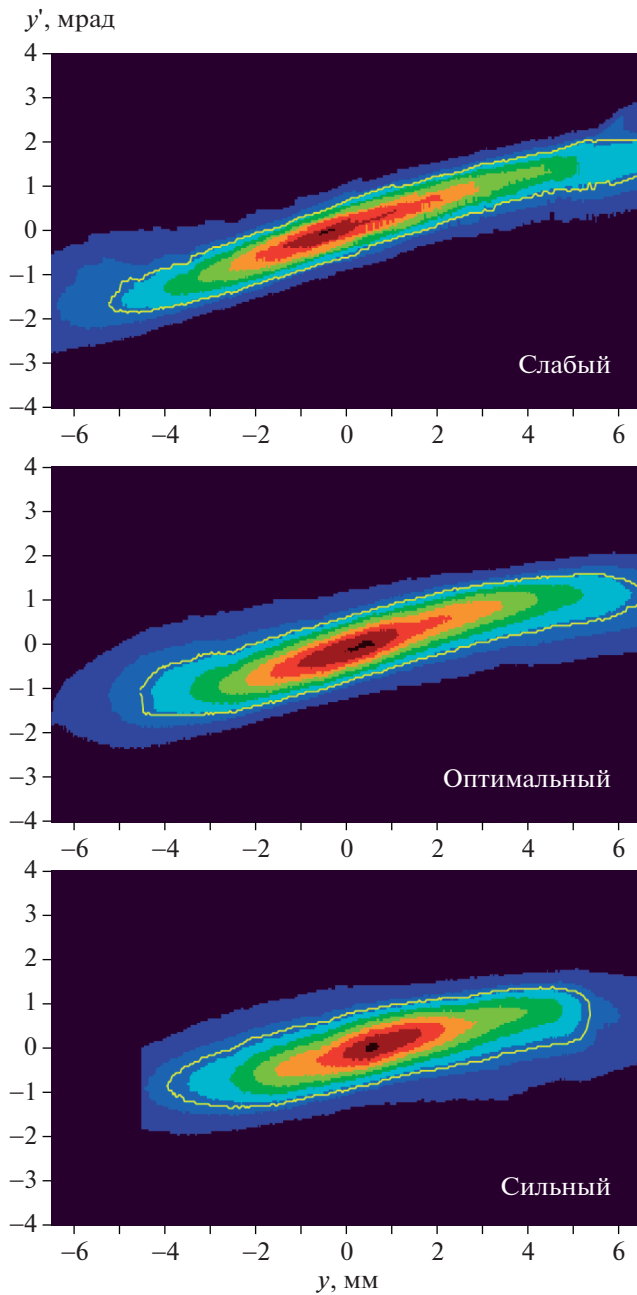


Рис. 8. Фазовый портрет пучка протонов с током 2 мА при слабом, оптимальном и сильном режимах фокусировки магнитной линзы.

ка. Результаты измерений представлены на рис. 6 и в табл. 1.

Видно, что с ростом тока увеличиваются эмиттанс пучка ионов и размер пучка. Первое обусловлено изменением заряда в источнике ионов, второе — действием пространственного заряда при транспортировке ионов от источника ионов до ускорителя.

Сравнивая полученные результаты с представленными в работе [7], заключаем, что модерниза-

ция магнитной линзы сделала пучок больше похожим на эллипс. Также нормализованный эмиттанс пучка ионов уменьшился на 25% (с 0.27 до 0.20 мм мрад), что может быть связано с оптимизацией генерации ионов.

3.2. Измерение фазового портрета пучка протонов, получаемого в ускорителе

Фазовый портрет пучка протонов измерен с применением охлаждаемой диафрагмы, сканирующей пучок с шагом 1 мм, и проволочного сканера OWS-30, измеряющего профиль прошедшей через диафрагму струи протонов.

Измерения фазового портрета пучка протонов в пространстве координат и углов распространения (x, x') и (y, y') выполнены при токах 0.5, 1, 2 и 3 мА, энергии 2000 ± 2 кэВ. На рис. 7 представлены результаты измерения фазового портрета пучка протонов в пространстве (y, y') , схожие результаты получены и в пространстве (x, x') . В табл. 2 представлены характеристики эллипса и эмиттанта фазового портрета пучка протонов.

Обсудим фазовый портрет пучка протонов, анализируя рис. 7 и табл. 2. Рисунок 7 демонстрирует, как с увеличением тока изменяется портрет. Если при токе 0.5 мА пучок практически параллельный и имеет поперечный размер $y = 4.2$ мм, то с ростом тока увеличивается его размер и он становится расходящимся. Так, при токе 3 мА пучок характеризуется расходимостью $y' = 1.6$ мрад и имеет поперечный размер $y = 5.2$ мм. Такое поведение объясняется действием пространственного заряда в тракте транспортировки пучка отрицательных ионов водорода: при повышении тока увеличивается действие пространственного заряда, ионы приобретают дополнительный поперечный импульс и пучок становится шире.

Обратим внимание на то, что при промежуточных значениях тока, 1 и 2 мА, пучок протонов шире и его эмиттанс больше. Это связано с тем, что пучок отрицательных ионов водорода в данном случае вводят в ускоритель не по оси, а чуть выше или ниже, и сильная входная электростатическая линза ускорителя расщепляет пучок ионов. На рис. 7 этот эффект особенно заметен при токе 1 мА: эллипс как бы перетягивается по середине. Именно по этой причине особое внимание при инъекции пучка отрицательных ионов водорода в ускоритель уделяют контролю положения пучка ионов, используя в штатном режиме проволочный сканер. В данном случае проволочный сканер использован для измерения фазового портрета пучка протонов, и положение пучка отрицательных ионов водорода им не контролировали.

Также обратим внимание на то, что при токе 3 мА нормализованный эмиттанс инжектируемого

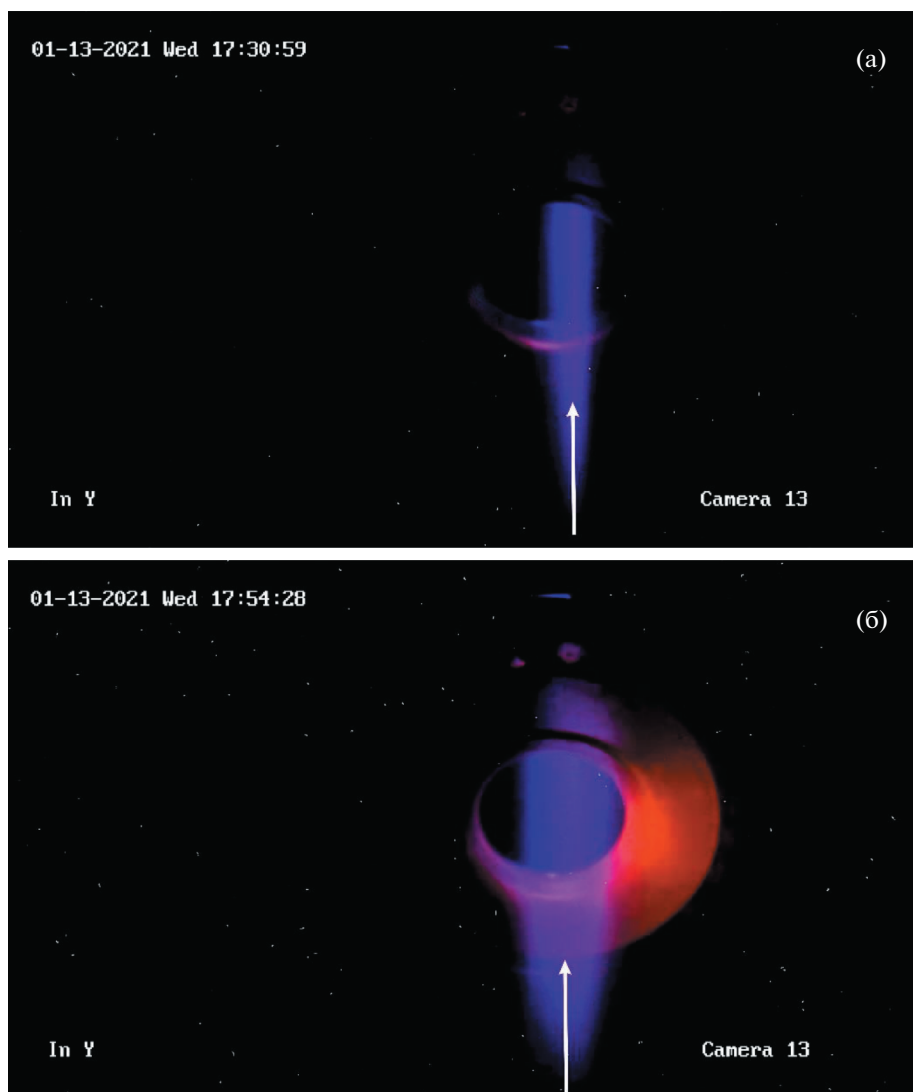


Рис. 9. Изображение входной диафрагмы внешнего ускоряющего электрода в оптимальном (а) и сильном (б) режимах фокусировки. Стрелка указывает на ускоряемый пучок отрицательных ионов водорода.

пучка отрицательных ионов водорода практически равен эмиттансу пучка протонов. Такое поведение при токе 3 мА объясняется тем, что режим работы при таком токе часто используют и он оптимизирован.

Так как на транспортировку пучка протонов пространственный заряд не влияет [11], оценим размер пучка протонов на поверхности литиевой мишени, которую планируется установить в соседнем бункере на расстоянии 10.7 м от центра ускорителя. Для оценки сверху рассмотрим наиболее расходящийся пучок, получаемый при 3 мА. На расстоянии 1.86 м от центра ускорителя размер пучка $y = 5.2$ мм и расходимость $y' = 1.6$ мрад. Значит, на расстоянии 10.7 м от центра ускорителя размер пучка будет равен 19 мм. Этот размер

меньше радиуса литиевой мишени, который равен 50 мм, следовательно, транспортировка пучка протонов может быть осуществлена до мишени без применения дополнительных фокусирующих элементов.

Теперь изучим влияние силы магнитной линзы на пучок протонов. Измерим фазовый портрет пучка протонов при стандартно используемой силе магнитной линзы (назовем этот режим “оптимальный”), а также при уменьшении или увеличении тока в катушках линзы на 1.6% (назовем эти режимы соответственно “слабый” и “сильный”). На рис. 8 представлены результаты измерения фазового портрета пучка протонов при токе 2 мА, а табл. 3 – его характеристики.

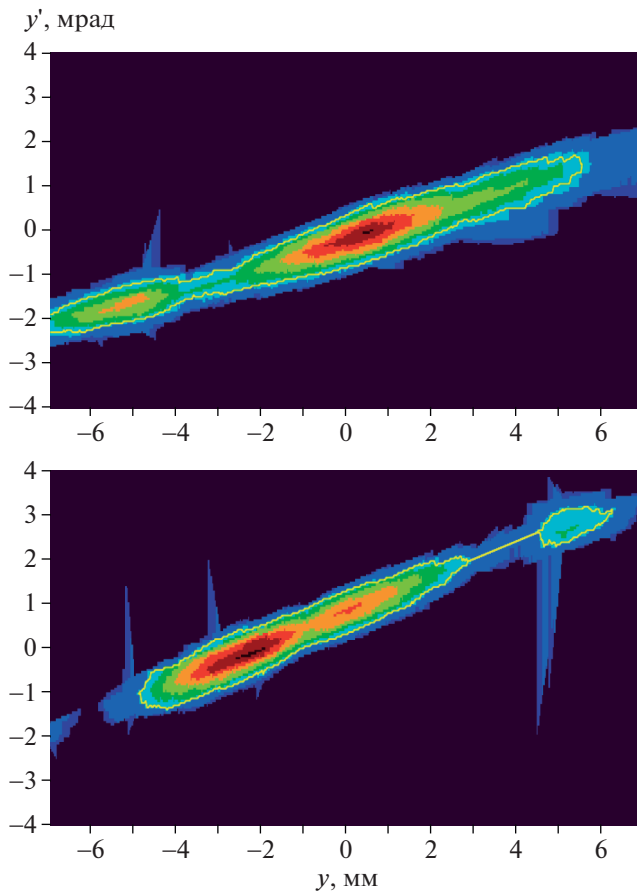


Рис. 10. Фазовые портреты потока нейтралов при токе 2 мА пучка протонов с энергией 2 МэВ в разных режимах фокусировки.

Как видно, при переходе режима фокусировки от слабого к сильному уменьшается и размер пучка, и его угловое расхождение. Кажется, что сильный режим фокусировки лучше, чем оптимальный. Однако, как видно на рис. 9, в сильном режиме фокусировки входная диафрагма внешнего ускоряющего электрода нагревается до уровня, не пригодного для постоянной работы.

3.3. Измерение фазового портрета сопутствующего потока нейтралов

Обычно в газовую обдирочную мишень ускорителя напускают такой поток аргона, чтобы обеспечить перезарядку 95% отрицательных ионов в положительные. Это означает, что получаемому пучку протонов сопутствует поток нейтралов с эквивалентным током, составляющим 5% от тока пучка протонов.

Измерения фазового портрета сопутствующего потока нейтралов выполнены следующим образом. Во-первых, поворотным магнитом отклоним вниз пучок протонов. Во-вторых, на металлические кольца, установленные возле проволочного сканера, подадим не отрицательное, а положительное напряжение. Это позволит вытягивать вторичные электроны, выбиваемые с проволоки сканера под действием нейтралов с энергией 1 МэВ, и измерять ток нейтралов. Конечно, величина этого тока меньше тока протонов, но вполне достаточна для построения фазового портрета потока нейтралов. Примеры фазового портрета сопутствующего потока нейтралов при пучке протонов с

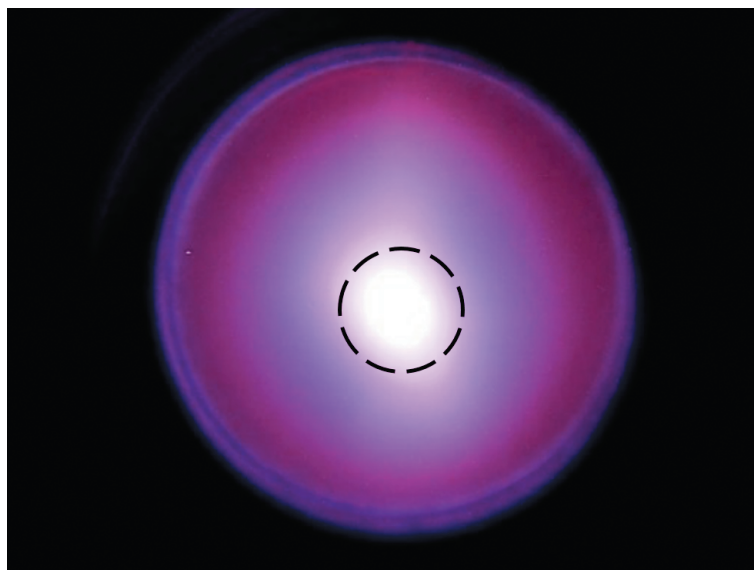


Рис. 11. Изображение с видекамеры, подключенной к телескопу, смотрящему через медное охлаждаемое зеркало на газовую обдирочную мишень. Штриховой линией обозначен диаметр 5 мм, диаметр трубки обдирочной мишени 16 мм.

энергией 2 МэВ и током 2 мА представлены на рис. 10.

Определено, что размер потока нейтралов составляет 6–6.5 мм, его расходимость 1.9–2.4 мрад. Видно, что размер и расходимость потока нейтралов больше, чем размер и расходимость пучка протонов. Дело в том, что поток нейтралов с энергией 1 МэВ формируется в газовой обдирочной мишени ускорителя из 1-мегаэлектронвольтовых отрицательных ионов водорода, потерявших при обдирке только один электрон. Большая же часть отрицательных ионов водорода теряет оба электрона и формирует пучок протонов с энергией 1 МэВ. Внутри газовой обдирочной мишени фазовые портреты потока нейтралов с энергией 1 МэВ и пучка протонов с энергией 1 МэВ должны быть подобны. Но, если нейтралы распространяются далее прямолинейно, то на протоны действует электрическое поле, ускоряя их в продольном направлении, фокусируя в области диафрагмы высоковольтного электрода и дефокусируя в области выходного отверстия ускорителя. Действием электрического поля объясняется различие фазовых портретов потока нейтралов и пучка протонов.

Поскольку нейтралы распространяются прямолинейно, то, зная характеристики потока нейтралов на расстоянии 1.86 м от центра ускорителя, оценим размер потока нейтралов внутри газовой обдирочной мишени, размещаемой в центре ускорителя. Получим, что размер потока нейтралов в обдирочной мишени составляет 2–2.5 мм. Таким же должен быть размер пучка ионов в обдирочной мишени. Полученное значение хорошо согласуется с размером свечения радиусом 2 мм, регистрируемого длиннофокусным телескопом Celestron Ultima 80-45, установленным вместо литевой мишени (10 на рис. 1) и направленным через охлаждаемое медное зеркало на газовую обдирочную мишень вдоль ее оси. На рис. 11 представлено полученное телескопом изображение.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Описанный в работе электростатический ускоритель-тандем с вакуумной изоляцией характеризуется оригинальной конструкцией и предназначен для развития методики бор-нейтронозахватной терапии и ряда других приложений.

Измерен фазовый портрет пучка ионов в трех местах: на входе в ускоритель, внутри обдирочной мишени ускорителя и на выходе из ускорителя. Изучена зависимость пучка от тока ионов и от силы магнитной линзы, фокусирующей пучок отрицательных ионов водорода на вход в ускоритель.

Установлено следующее.

– Модернизация магнитной линзы, фокусирующей пучок отрицательных ионов водорода на вход в ускоритель, обеспечила уменьшение сферической aberrации линзы.

– С увеличением тока отрицательных ионов водорода, вытягиваемых из источника ионов, растет эмиттанс пучка ионов: от $\epsilon_{\text{ном}} = 0.13 \text{ мм} \cdot \text{мрад}$ при 0.44 мА до $\epsilon_{\text{ном}} = 0.20 \text{ мм} \cdot \text{мрад}$ при 3 мА.

– С увеличением тока отрицательных ионов водорода растет поперечный размер пучка ионов, инжектируемого в ускоритель, за счет действия пространственного заряда при транспортировке ионов от источника ионов до ускорителя. Показано, что влияние пространственного заряда на последующее ускорение ионов можно компенсировать изменением силы магнитной линзы, фокусирующей пучок ионов на вход ускорителя.

– Внутри газовой обдирочной мишени пучок ионов имеет диаметр 4 мм и его расходимость составляет ± 2 мрад.

– На выходе из ускорителя пучок протонов при оптимальной фокусировке имеет диаметр 10 ± 1 мм, расходимость ± 1.5 мрад, эмиттанс $\epsilon_{\text{ном}} = 0.2 \text{ мм} \cdot \text{мрад}$. Такой пучок может быть доставлен на расстояние 10.7 м до литевой мишени диаметром 100 мм без применения дополнительных фокусирующих элементов.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 19-72-30005). Авторы благодарят компанию D-Pace (Канада) за хорошо изготовленные проволочный сканер и измеритель эмиттанса, использованные при проведении данного исследования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Taskaev S., Berendeev E., Bikchurina M., Bykov T., Kasatov D., Kolesnikov I., Koshkarev A., Makarov A., Ostreinov G., Porosev V., Savinov S., Shchudlo I., Sokolova E., Sorokin I., Sycheva T., Verkhovod G. // *Biology*. 2021. V. 10. Iss. 5. № 350. <https://doi.org/10.3390/biology10050350>
2. Dymova M., Dmitrieva M., Kuligina E., Richter V., Savinov S., Shchudlo I., Sycheva T., Taskaeva I., Taskaev S. // *Radiation Research*. 2021. V. 196. Iss. 2. P. 192. <https://doi.org/10.1667/RADE-21-00015.1>
3. Badrutdinov A., Bykov T., Gromilov S., Higashi Y., Kasatov D., Kolesnikov I., Koshkarev A., Makarov A., Miyazawa T., Shchudlo I., Sokolova E., Sugawara H., Taskaev S. // *Metals*. 2017. V. 7. Iss. 12. № 558. <https://doi.org/10.3390/met7120558>
4. Bykov T., Goloshevskii N., Gromilov S., Kasatov D., Kolesnikov I., Koshkarev A., Makarov A., Ruktuev A., Shchudlo I., Sokolova E., Taskaev S. // *Nucl. Instrum. and Methods in Physics Research B*. 2020. V. 481.

- P. 62.
<https://doi.org/10.1016/j.nimb.2020.08.010>
5. *Shoshin A., Burdakov A., Ivantsivskiy M., Polosatkin S., Semenov A., Sulyaev Yu., Zaitsev E., Polozova P., Taskaev S., Kasatov D., Shchudlo I., Bikchurina M.* // Fusion Engineering and Design. 2021. V. 168. 112426.
<https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2021.112426>
6. *Taskaev S., Bykov T., Kasatov D., Kolesnikov Ia., Koshkarev A., Makarov A., Savinov S., Shchudlo I., Sokolova E.* // Nucl. Instrum. and Methods in Physics Research. B. 2021. V. 502. P. 85.
<https://doi.org/10.1016/j.nimb.2021.06.010>
7. *Bykov T., Kasatov D., Kolesnikov Ia., Koshkarev A., Makarov A., Ostreinov Yu., Sokolova E., Sorokin I., Taskaev S., Shchudlo I.* // Instruments and Experimental Techniques. 2018. V. 61. № 5. P. 713.
<https://doi.org/10.1134/S0020441218050159>
8. <https://www.d-pace.com/?e=70>
9. <https://www.d-pace.com/?e=2>
10. *Makarov A., Sokolova E., Taskaev S.* // Instruments and Experimental Techniques. 2021. V. 64. № 1. P. 24.
<https://doi.org/10.1134/S0020441220060184>
11. *Bykov T., Kasatov D., Kolesnikov Ia., Koshkarev A., Makarov A., Ostreinov G., Sokolova E., Taskaev S., Shchudlo I.* // Technical Physics. 2021. V. 66. № 1. P. 98.
<https://doi.org/10.1134/S1063784221010047>