

ТЕХНИКА ЯДЕРНОГО
ЭКСПЕРИМЕНТА

УДК 621.384.65

КУЛОНОВСКОЕ РАССЕЯНИЕ ПУЧКА ИОНОВ В ГАЗОВОЙ
ОБДИРОЧНОЙ МИШЕНИ ТАНДЕМНОГО УСКОРИТЕЛЯ
ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ

©2026 г. Т. А. Быков^{a,b}, Я. А. Колесников^{a,b}, С. С. Савинов^{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 10.06.2026

После доработки 30.07.2026

Принята к публикации 26.08.2026

Исследовано влияние кулоновского рассеяния ионов в газовой обдирочной мишени ускорителя-тандема с вакуумной изоляцией на поперечный размер получаемого пучка протонов. Показано, что кулоновское рассеяние ионов увеличивает эмиттанс пучка протонов на величину, сравнимую с эмиттансом инжектируемого пучка ионов. Установлено, что подача отрицательного потенциала на изолированную охлаждаемую входную диафрагму ускорителя обеспечивает фокусировку и сжатие пучка протонов. Указанные экспериментальные данные свидетельствуют о том, что предварительное торможение инжектируемого в ускоритель пучка ионов за счет подачи отрицательного напряжения на входную диафрагму ускорителя можно использовать для сжатия получаемого пучка протонов с целью расширения функциональных возможностей ускорителя и его упрощения за счет отказа от фокусирующих элементов при транспортировке пучка протонов до нейтроногенерирующей мишени.

Ключевые слова: тандемный электростатический ускоритель заряженных частиц, кулоновское рассеяние

1. ВВЕДЕНИЕ

В сильноточных тандемных электростатических ускорителях заряженных частиц для преобразования отрицательных ионов в положительные используются газовые обдирочные мишени. Столкновение заряженных частиц (ионов) с атомными ядрами обдирочного газа ведет не только к обдирке ионов, но и к их кулоновскому (резерфордскому) рассеянию.

Рассеяние ионов увеличивает эмиттанс – фазовый объем пучка ионов, вызывая рост его поперечного размера.

Целью данной работы являются определение влияния кулоновского рассеяния ионов в газовой обдирочной мишени на эмиттанс пучка протонов, получаемого в ускорителе-тандеме с вакуумной изоляцией VITA, и экспериментальная проверка возможности фокусирования пучка протонов за счет подачи отрицательного напряжения на изолированную охлаждаемую входную диафрагму ускорителя.

2. УСКОРИТЕЛЬ-ТАНДЕМ С ВАКУУМНОЙ ИЗОЛЯЦИЕЙ VITA

Ускоритель-тандем с вакуумной изоляцией VITA [1] – это тандемный электростатический ускоритель заряженных частиц оригинальной конструкции, предложенный и созданный для бор-нейтронозахватной терапии (БНЗТ) [2, 3] и используемый не только для БНЗТ, но и для ряда других приложений [4–6]. Ускоритель VITA обеспечивает получение стационарного моноэнергетического пучка протонов или дейтронов с энергией от 100 кэВ до 2.3 МэВ с током до 10 мА. Схема экспериментальной установки с ускорителем VITA и используемым оборудованием приведена на рис. 1.

Рис. 1. Схема экспериментальной установки...

Для данного исследования входная охлаждаемая диафрагма ускорителя I_6 была заменена на подобную, но электрически изолированную от установки. Эта модификация позволила использовать ее как дополнительную фокусирующую линзу Эйнцеля при подаче на нее отрицательный потенциал [7]. Для измерения тока пучка протонов использовался бесконтактный датчик тока NPCT-CF4 (Bergoz, Франция) 2, размещенный на расстоянии 1.6 м от центра ускорителя. За поворотным магнитом 3, не используемым по назначению, на расстоянии 4.08 м от центра ускорителя был установлен подвижный охлаждаемый коллиматор 4 с диаметром отверстий 1, 2 и 5 мм. Вслед за коллиматором была установлена литиевая мишень, электрически изолированная от установки, которая использовалась в качестве глубокого цилиндра Фарадея для измерения тока протонов, прошедших через отверстие коллиматора. Для измерения давления остаточного газа использовалась широкодиапазонная вакуумная лампа Pfeiffer vacuum D-35614 I_e , расположенная в выходном объеме ускорителя.

Газовая обдирочная мишень I_d выполнена в виде охлаждаемой цилиндрической трубки длиной 300 мм с отверстием диаметром 12 мм для подачи обдирочного газа (аргона) посередине трубки. Она установлена внутри высоковольтного электрода ускорителя на проходной изолятор $I_ж$. Подача газа в обдирочную мишень осуществляется следующим

образом. В высоковольтном электроде источника питания 1з размещены 5-литровый баллон аргона с газовым редуктором GCE, электромеханический клапан подачи газа, управляемый источником питания клапана и прецизионный игольчатый натекатель. Между клапаном и накателем расположен буферный объем. Давление газа в буферном объеме определяется частотой открывания клапана, обычно 0.1 Гц. Из буферного объема газ через натекатель поступает в обдирочную мишень по трубке длиной 2 м с внутренним диаметром 4 мм, проложенной внутри проходного изолятора.

Пучок отрицательных ионов водорода с энергией 26.5 кэВ, получаемый из инжектора 1а, фокусируют соленоидом 1б в отверстие входной диафрагмы ускорителя 1в. На расстоянии 57 мм перед входной диафрагмой пучок ионов имеет поперечный размер 8–9 мм, сходимоссть ± 30 мрад, среднеквадратичный нормализованный эмиттанс от 0.15 мм·мрад при токе 1 мА до 0.2 мм·мрад при токе 3 мА [8, 9]. Среднеквадратичный нормализованный эмиттанс определяется формулой

$$\varepsilon_{\text{norm}} = \varepsilon_{\text{rms}} \beta \gamma,$$

где

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

$$\langle x^2 \rangle = \frac{1}{N} \sum_1^N x_i^2, \quad \langle x'^2 \rangle = \frac{1}{N} \sum_1^N x_i'^2,$$

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

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

Этот режим фокусировки пучка ионов часто применяется при получении пучка протонов с энергией 2.0–2.1 МэВ и током до 3 мА для генерации нейтронов на литиевой мишени с целью проведения исследований по бор-нейтронозахватной терапии. Отметим, что пучок ионов фокусируют не строго в отверстие диафрагмы, а немного внутрь ускорителя, на расстояние около 80 мм (расстояние между охлаждаемой диафрагмой и первым ускоряющим электродом равно 267 мм). В случае фокусировки пучка ионов точно в отверстие диафрагмы пучок протонов получается менее расходящимся, но нежелательно нагревается

неохлаждаемая диафрагма первого (внешнего) электрода ускорителя из-за большого поперечного размера пучка ионов в этом месте.

Оптимальная фокусировка пучка ионов немного внутрь ускорителя обеспечивает перефокусировку пучка ионов в области входной диафрагмы и получение расходящегося пучка ионов в первом ускоряющем зазоре. Такой расходящийся пучок ионов 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 пучок протонов с энергией 2 МэВ имеет поперечный размер 10 ± 1 мм, угловую расходимость от ± 0.5 мрад до ± 1.2 мрад и нормализованный эмиттанс 0.21–0.27 мм·мрад [8, 9].

Сравнивая значения нормализованного эмиттанса инжектируемого пучка отрицательных ионов водорода (0.15–0.20 мм·мрад) и получаемого пучка протонов с энергией 2 МэВ (0.21–0.27 мм·мрад), мы видим увеличение эмиттанса примерно в 1.4 раза. Это означает, что собственно ускоритель дает вклад в увеличение эмиттанса пучка протонов, сопоставимый с эмиттансом пучка ионов, генерируемого инжектором. Кулоновское (резерфордовское) рассеяние ионов на атомных ядрах обдирочного газа, в данном случае аргона, внутри газовой обдирочной мишени может являться причиной такого увеличения эмиттанса пучка протонов.

3. КУЛОНОВСКОЕ РАССЕЙАНИЕ ИОНОВ В ГАЗОВОЙ ОБДИРОЧНОЙ МИШЕНИ

Для оценки рассеяния пучка ионов в газовой обдирочной мишени воспользуемся теорией многократного рассеяния, в частности формулой Хайленда [10, 11]:

$$\theta_{\text{rms}}[\text{рад}] = \frac{13.6}{2 E[\text{МэВ}]} \sqrt{r} [1 + 0.038 \ln(r)],$$

где θ_{rms} – среднеквадратичный угол рассеяния (в одну сторону от оси пучка), E – энергия пучка, $r = X/X_0$ – относительная толщина аргона, X [г/см²] – поверхностная плотность мишени, $X_0 = 19.55$ г/см² – радиационная длина аргона.

В качестве масштаба толщины мишени в расчете использовалась радиационная длина аргона. Обычно эта величина определяется для электромагнитных каскадов, инициируемых электронами и фотонами (это расстояние, на котором энергия электрона за счет тормозного излучения уменьшается в e раз), однако она является фундаментальной характеристикой материала. Через зависимость $X_0 \propto [Z(Z+1)]^{-1}$ радиационная длина определяет плотность

ядер-рассеивателей и, следовательно, интенсивность кулоновского взаимодействия. Относительная толщина мишени $X = \rho A / N_A$, где ρ [см⁻²] – плотность мишени, $A = 39.95$ а.е.м. – атомная масса атома аргона, число Авогадро $N_A = 6.022 \cdot 10^{23}$ моль⁻¹. При линейной плотности аргоновой мишени $2.1 \cdot 10^{16}$ см⁻², используемой для 95-процентной обдирки отрицательных ионов с энергией 1 МэВ [1, 12, 13], получаем $X = 1.4 \cdot 10^{-6}$ г/см², $r = 0.7 \cdot 10^{-7}$ и среднеквадратичный угол многократного кулоновского рассеяния $\theta_{rms} = 0.68$ мрад. После прохождения второго этапа ускорения ионов до энергии 2 МэВ этот угол θ_{rms} уменьшится в $\sqrt{2}$ раз до значения 0.48 мрад. При радиусе пучка протонов, равном 5 мм, геометрический эмиттанс будет равен $\epsilon_{rms} = 2.4$ мм мрад, а нормализованный – $\epsilon_{norm} = \epsilon_{rms} \beta \gamma = 0.16$ мм·мрад, где $\beta = 0.065$ и $\gamma = 1.002$ для протона с энергией 2 МэВ. Видно, что увеличение нормализованного эмиттанса пучка ионов до 0.16 мм·мрад за счет кулоновского рассеяния ионов на атомных ядрах обдирочного газа в точности равно значению нормализованного эмиттанса инжектируемого в ускоритель пучка отрицательных ионов водорода. Таким образом, кулоновское рассеяние ионов на атомных ядрах обдирочного газа объясняет увеличение нормализованного эмиттанса пучка протонов с энергией 2 МэВ в 1.4 раза по сравнению с эмиттансом инжектируемого в ускоритель пучка отрицательных ионов водорода.

Стоит обратить внимание на то, что увеличение нормализованного эмиттанса пучка ионов за счет кулоновского рассеяния ионов на атомных ядрах обдирочного газа зависит от энергии ионов E как $1/\sqrt{E}$. Так, при энергии пучка протонов 0.5 МэВ увеличение нормализованного эмиттанса пучка ионов за счет рассеяния будет в 2 раза больше, а именно, $\epsilon_{norm} = 0.32$ мм·мрад, и этот процесс рассеяния будет приводить к большему росту поперечного размера пучка протонов.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

Для демонстрации влияния газовой обдирочной мишени на эмиттанс пучка протонов проведен следующий эксперимент. На некоторое время путем закрывания клапана была прекращена подача аргона в газовую обдирочную мишень. Давление аргона внутри газовой обдирочной мишени падало, превращение отрицательных ионов водорода в протоны замедлялось, и ток пучка протонов уменьшался. После этого подача аргона в газовую обдирочную мишень возобновлялась с частотой 0.1 Гц. На рис. 2 видно, как при возобновлении подачи аргона путем открывания клапана в момент времени 15:26:00 давление газа в ускорителе стало расти и через 5 мин вышло на стационарный уровень.

Видно, что открывание клапана приводит к резкому росту давления газа и последующему плавному снижению. Флуктуации давления газа характеризуются величиной $\pm 5\%$.

Рис. 2. Временная зависимость давления остаточного газа в ускорителе...

Такой режим подачи аргона с частотой 0.1 Гц приводит к 95-процентной обдирке отрицательных ионов водорода для получения протонов с флуктуацией $\pm 0.5\%$ [13]. Так же, как и давление газа, ведет себя ток пучка протонов: резкий подъем на 1% и плавное снижение. Зная, что линейная плотность аргона $2.1 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ ведет к 95-процентной обдирке, а плотность $3.0 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ – к 99-процентной [1, 12], определим, что флуктуации тока пучка протонов $\pm 0.5\%$ вызваны 5-процентной флуктуацией линейной плотности аргона в газовой обдирочной мишени. Следовательно, временное поведение давления аргона внутри газовой обдирочной мишени хорошо коррелирует с временным поведением измеряемого давления остаточного газа.

В момент времени 15:34:47 прекратилась подача аргона в газовую обдирочную мишень и давление газа стало плавно уменьшаться.

На рис. 3 приведена временная зависимость тока пучка протонов с энергией 1.25 МэВ, измеряемого бесконтактным датчиком тока (уточнение приведено ниже). Видно, что с началом подачи аргона измеряемый ток возрастает, выходит на плато и падает после прекращения подачи аргона. Временное поведение тока коррелирует с давлением: так же резко возрастает с увеличением давления газа и затем плавно убывает.

Некоторое плавное уменьшение тока во временном интервале от 15:28:00 до 15:31:30 с переходным процессом, начавшимся в 15:30:00, объясняется изменением режима работы инжектора. В качестве инжектора используется пеннинговский поверхностно-плазменный источник отрицательных ионов с полыми катодами и с подачей цезия. Его работа определяется рядом поверхностно-плазменных явлений, требует постоянного контроля и вмешательства оператора и поэтому крайне сложно получить пучок ионов в течение длительного времени с неизменными характеристиками. Вместе с тем наблюдаемое изменение режима работы инжектора не сказывается на интерпретации полученных результатов.

Рис. 3. Временная зависимость тока, измеряемого бесконтактным датчиком тока...

Отдельно необходимо отметить следующее. При рабочем режиме подачи газа 95% отрицательных ионов водорода конвертируются в протоны, а 5% – в нейтралы (атомы водорода). Этот поток нейтралов почти параллельным пучком сопровождает пучок протонов, но не регистрируется бесконтактным датчиком тока. Поток нейтралов используется для определения и контроля эффективности преобразования газовой

обдирочной мишени [13] в режиме реального времени путем измерения этого потока вторично-эмиссионным датчиком в случае поворота пучка протонов вниз поворотным магнитом. В данном эксперименте при выключении подачи аргона и уменьшении его плотности в газовой обдирочной мишени часть отрицательных ионов водорода не будет обдираться и будет сопровождать пучок протонов, приводя к уменьшению величины тока, регистрируемого бесконтактным датчиком тока. В частности, в момент времени 15:44:33 измеряемая величина тока равна нулю, но ток протонов не равен нулю – он равен току пучка отрицательных ионов водорода с энергией 26.5 кэВ, проходящего через апертуру датчика тока.

На рис. 4 приведена временная зависимость тока пучка протонов, проходящего через отверстие коллиматора диаметром 1 мм и измеряемого электрически изолированным мишенным узлом литиевой мишени как глубоким цилиндром Фарадея. В данном случае отверстие коллиматора расположено на оси в области максимальной плотности тока пучка протонов.

Рис. 4. Временная зависимость тока пучка протонов, проходящего через отверстие коллиматора

Для объяснения временного поведения тока пучка протонов, проходящих через отверстие коллиматора, удобно представить его вместе с током пучка протонов, измеряемого бесконтактным датчиком тока (рис. 5).

Рис. 5. Временная зависимость тока пучка протонов, проходящего через отверстие коллиматора (1), и тока пучка протонов, измеряемого бесконтактным датчиком тока (2)

Стоит обратить внимание на то, что если при увеличении линейной плотности аргона (в течение 1 мин с момента времени 15:26:00) временное поведение тока пучка протонов, прошедших через отверстие, коррелирует с временным поведением тока пучка протонов и давлением газа (быстрый рост и плавное снижение), то на плато это поведение в точности обратное: быстрый спад и плавный рост. Этот эффект логично объясняется тем, что при резком увеличении давления аргона резко увеличивается рассеяние ионов, увеличивается поперечный размер пучка протонов и резко падает плотность пучка протонов на оси пучка. Последующее плавное уменьшение плотности аргона в газовой обдирочной мишени ведет к уменьшению кулоновского рассеяния ионов и к плавному росту плотности тока пучка протонов на оси.

Обсудим амплитуду тока пучка протонов, проходящего через отверстие коллиматора. Вначале при росте плотности аргона в обдирочной мишени видно, что ток растет быстрее, чем растет ток пучка протонов. Аналогично ведет себя ток и при прекращении подачи аргона

в газовую обдирочную мишень. Видно, что после выключения подачи аргона ток продолжает расти почти в течение 2 мин и только потом начинает уменьшаться. Полный ток пучка протонов остается постоянным примерно в течение 1 мин и потом начинает уменьшаться. По сравнению с плато к моменту времени 15:37:00 ток, проходящий через отверстие, вырос в 1.33 раза при том, что полный ток пучка протонов уменьшился на 6%. Такое относительное увеличение плотности тока в 1.4 раза может объясняться тем, что из-за низкого давления аргона внутри газовой обдирочной мишени кулоновское рассеяние ионов на аргоне стало пренебрежимо мало, и поперечный размер пучка протонов уменьшился из-за уменьшения эмиттанса пучка протонов вплоть до эмиттанса инжектируемого пучка отрицательных ионов водорода.

Исследования проведены при энергии протонов от 0.5 до 2 МэВ с шагом 0.25 МэВ и при использовании коллиматора с отверстиями диаметром 1, 2 и 5 мм. Установлено, и это логично, что флуктуации тока пучка протонов, прошедшего через отверстие, растут с уменьшением энергии протонов и падают с увеличением диаметра отверстия.

Определим эффективный диаметр пучка протонов как $D = d \sqrt{I/j}$, где d – диаметр отверстия коллиматора, I – полный ток пучка протонов, измеряемый бесконтактным датчиком тока, j – ток части пучка протонов, прошедшего через отверстие коллиматора. На рис. 6 представлена зависимость эффективного диаметра пучка протонов D от величины отрицательного потенциала ϕ , подаваемого на входную охлаждаемую диафрагму ускорителя для ряда значений энергии пучка протонов – от 0.5 до 2 МэВ с шагом 0.25 МэВ.

Рис. 6. Зависимость эффективного диаметра пучка протонов D от величины отрицательного потенциала ϕ , подаваемого на входную охлаждаемую диафрагму ускорителя...

Видно, что подача отрицательного потенциала на входную охлаждаемую диафрагму ускорителя обеспечивает эффективную фокусировку пучка ионов при энергии до 1 МэВ. Дело в том, что ионно-оптический тракт ускорителя оптимизирован на получение пучка протонов с энергией 2 МэВ. При меньшей энергии, например 0.5 МэВ, входная электростатическая линза ускорителя не обладает достаточной силой из-за в 4 раза меньшего потенциала для того, чтобы сфокусировать инжектируемый пучок отрицательных ионов водорода и провести его через ускорительный тракт без потерь. Значительная часть пучка ионов гибнет на торце охлаждаемой газовой обдирочной мишени. Прошедший через обдирочную мишень и далее ускоренный пучок ионов занимает фактически всю апертуру канала транспортировки пучка.

В данном случае изолированную охлаждаемую диафрагму можно рассматривать как одиночную линзу Эйнцеля и подача на нее потенциала приводит к фокусировке пучка.

Видно, что при энергии протонов 0.5 МэВ подача на нее потенциала -15 кВ сжимает пучок протонов на расстоянии 4.08 м от центра ускорителя с 5.4 до 2.7 см, при энергии протонов 0.75 МэВ подача потенциала -10 кВ сжимает пучок с 5.2 до 2.3 см, при энергии протонов 1 МэВ подача потенциала -7.5 кВ сжимает пучок с 2.3 до 1.9 см. При дальнейшем увеличении энергии протонов подача потенциала на диафрагму хоть и приводит к фокусировке пучка в ускорителе, как видно на рис. 7, но не ведет к уменьшению поперечного размера получаемого пучка протонов.

Рис. 7. Изображение пучка отрицательных ионов водорода, входящего в неохлаждаемую диафрагму первого ускоряющего электрода...

Модернизация ускорителя путем подачи отрицательного потенциала на входную охлаждаемую диафрагму ускорителя, предварительно электрически изолированную, была проведена для экспериментальной проверки идеи о том, как улучшить фокусировку пучка протонов [7]. Экспериментальная проверка показала, что подачей потенциала на диафрагму действительно удастся существенно сжать пучок протонов, но только при энергии менее 1 МэВ. При большей энергии эффекта нет.

Проведенное исследование позволило понять, что кулоновское рассеяние ионов на атомных ядрах аргона в газовой обдирочной мишени увеличивает эмиттанс пучка протонов и ограничивает его сжатие. Вместе с тем, получаемый пучок протонов диаметром 2 см на расстоянии 4.08 м достаточен для ряда приложений, в том числе для генерации нейтронов из литиевой мишени диаметром 92 мм с целью проведения бор-нейтронозахватной терапии. Так, в ускорительном источнике нейтронов VITA-II в НМИЦ онкологии им. Н.Н. Блохина Минздрава России в Москве расстояние от центра ускорителя до литиевой мишени составляет 6.66 м, в этой установке используется дополнительная развертка пучка протонов по поверхности литиевой мишени. В разрабатываемом ускорительном источнике нейтронов следующего поколения мы планируем размещать литиевую мишень еще ближе к ускорителю и также использовать дополнительную развертку пучка протонов по поверхности мишени. В настоящее время мы приступили к разработке компактной тонкой вращающейся литиевой мишени с поперечным размером пучка протонов 2.5 см для рассмотрения возможности создания нейтрон-электронного коллайдера [14]. Для решения этой задачи также пригоден пучок протонов, получаемый в ускорителе-тандеме с вакуумной изоляцией VITA.

Стоит обратить внимание на то, что подача отрицательного потенциала на входную охлаждаемую диафрагму ускорителя позволяет эффективно сжимать пучок протонов с энергией ниже 1 МэВ. Ранее на ускорителе VITA для измерения сечений ядерных реакций

[15–18] был получен пучок протонов или дейтронов с низкой энергией (вплоть до 0.1 МэВ) с током, низким по величине, но достаточным для этих исследований. Подача потенциала на входную диафрагму ускорителя расширяет его функциональные возможности, поскольку это позволяет получать сильноточный пучок протонов или дейтронов при низкой энергии, например, для имплантации ионов или других приложений.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В сильноточных тандемных электростатических ускорителях заряженных частиц используются газовые обдирочные мишени для преобразования отрицательных ионов в положительные. В Институте ядерной физики СО РАН предложен, разработан и активно используется для различных приложений ускоритель-тандем с вакуумной изоляцией VITA, обеспечивающий получение стационарного моноэнергетического пучка протонов или дейтронов с энергией от 100 кэВ до 2.3 МэВ с током до 10 мА. В результате проведенного исследования установлено, что кулоновское (резерфордовское) рассеяние ионов на атомных ядрах обдирочного газа увеличивает нормализованный эмиттанс пучка протонов на величину, сравнимую с величиной нормализованного эмиттанса пучка отрицательных ионов водорода, инжектируемого в ускоритель. Установлено, что подача отрицательного потенциала на входную охлаждаемую диафрагму ускорителя позволяет эффективно сжать пучок протонов с энергией ниже 1 МэВ и практически не влияет на его размер с энергией выше 1 МэВ. Подача потенциала на входную диафрагму ускорителя расширяет функциональные возможности ускорителя, поскольку это позволяет получать сильноточный пучок протонов не только с энергией в районе 2 МэВ, но и при меньшей энергии.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда (грант № 26-12-00020).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Таскаев С.Ю.* Ускорительный источник нейтронов VITA, Москва: Физматлит, 2024. ISBN: 978-5-9221-1979-5
2. Neutron Capture Therapy. Principles and Applications. Second Edition. Eds. W. Sauerwein, A. Wittig, R. Moss, Y. Nakagawa, K. Ono. Springer, 2025. ISBN: 978-3-031-82590-3. <https://doi.org/10.1007/978-3-031-82591-0>
3. *A. Mansoor, A. Diego, A. Saverio et al.* Advances in Boron Neutron Capture Therapy. IAEA, Vienna, Austria. 2023. ISBN: 978-92-0-132723-9

4. Taskaev S., Berendeev E., Bikchurina M. et al. *Cancers*. 2026. V. 18. P. 1886. <https://doi.org/10.3390/cancers18121886>
5. Бикчурина М.И., Быков Т.А., Верховод Г.Д. и др. ПТЭ. 2025. № 8 (S). С. 145. <https://doi.org/10.7868/S3034564225080245>
[Bikchurina M., Bykov T., Verkhovod G., et al. *Instrum. Exp. Tech.* 2024. V. 67. Suppl. 2. P. S305. <https://doi.org/10.1134/S0020441224701707>]
6. Kolesnikov Ya., Bikchurina M., Bykov T. et al. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B*. 2026. V. 571. P. 165968. <https://doi.org/10.1016/j.nimb.2025.165968>
7. Bykov T., Kolesnikov Ya., Koshkarev A. et al. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A*. 2025. V. 1077. Art. no. 170587. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2025.170587>
8. Бикчурина М.И., Быков Т.А., Колесников Я.А., М., Макаров А.Н., Остреинов Г.М., Савинов С.С., Таскаев С.Ю., Щудло И.М. ПТЭ. 2022. № 4. С. 18. <https://doi.org/10.31857/S0032816222040164>
9. Колесников Я.А. Исследование и оптимизация транспортировки и ускорения пучка ионов в ускорителе-тандеме с вакуумной изоляцией. Дис. ... канд. физ.-мат. наук, Институт ядерной физики СО РАН, Новосибирск. 2022. 149 с.
10. Eyges L. *Phys. Rev.* 1948. V. 74. P. 1534. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.74.1534>
11. Highland V.L. *Nucl. Instr. Meth.* 1975. V. 129. P. 497. [https://doi.org/10.1016/0029-554X\(75\)90743-0](https://doi.org/10.1016/0029-554X(75)90743-0)
12. Деревянкин Г.Е., Димов Г.И., Долгушин В.М. и др. Перезарядная мишень 40 Ма 2 МэВ ускорителя–тандема. Препринт ИЯФ 2001-23, Новосибирск, 2001.
13. Колесников Я.А., Кошкарев А.М., Таскаев С.Ю., Щудло И.М. ПТЭ. 2020. № 3. С. 25. <https://doi.org/10.31857/S0032816220040060>
14. Bogomyagkov A., Druzhinin V., Levichev E., Milstein A., Okunev I., Taskaev S. *Nucl. Phys. B*. 2025. V. 1012. P. 116833. <https://doi.org/10.1016/j.nuclphysb.2025.116833>
15. Taskaev S., Bikchurina M., Bykov T. et al. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B*. 2024. V. 554. P. 165460. <https://doi.org/10.1016/j.nimb.2024.165460>
16. Taskaev S., Besmeltsev V., Bikchurina M. et al. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B*. 2024. V. 555. P. 165490. <https://doi.org/10.1016/j.nimb.2024.165490>
17. Taskaev S., Besmeltsev V., Bikchurina M. et al. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B*. 2024. V. 557. P. 165527. <https://doi.org/10.1016/j.nimb.2024.165527>

18. Мещанинов С.А., Красильников А.В., Родионов Н.Б. et al. Ядерная физика. 2024. Т. 87. № 6. С. 531. <https://elibrary.ru/item.asp?id=80337740>

ПОДПИСИ К РИСУНКАМ

- Рис. 1.** Схема экспериментальной установки: 1 – ускоритель-тандем с вакуумной изоляцией (1а – инжектор отрицательных ионов, 1б – соленоид, 1в – входная изолированная охлаждаемая диафрагма, 1г – высоковольтный и промежуточные электроды, 1д – газовая обдирочная мишень, 1е – вакуумная лампа, 1ж – проходной изолятор, 1з – высоковольтный источник питания), 2 – бесконтактный датчик тока, 3 – поворотный магнит, 4 – подвижный охлаждаемый коллиматор, 5 – литиевая мишень. Стрелками показано распространение отрицательных ионов водорода (H^-) и протонов (P)
- Рис. 2.** Временная зависимость давления остаточного газа в ускорителе
- Рис. 3.** Временная зависимость тока, измеряемого бесконтактным датчиком тока
- Рис. 4.** Временная зависимость тока пучка протонов, проходящего через отверстие коллиматора
- Рис. 5.** Временная зависимость тока пучка протонов, проходящего через отверстие коллиматора (1), и тока пучка протонов, измеряемого бесконтактным датчиком тока (2)
- Рис. 6.** Зависимость эффективного диаметра пучка протонов D от величины отрицательного потенциала ϕ , подаваемого на входную охлаждаемую диафрагму ускорителя для ряда значений энергии пучка протонов (значения энергии протонов в МэВ приведены рядом с кривыми)
- Рис. 7.** Изображение пучка отрицательных ионов водорода, входящего в неохлаждаемую диафрагму первого ускоряющего электрода, при потенциале входной охлаждаемой диафрагмы ускорителя -1 кВ (а) и -25 кВ (б). В данном случае получен пучок протонов с энергией 1.5 МэВ

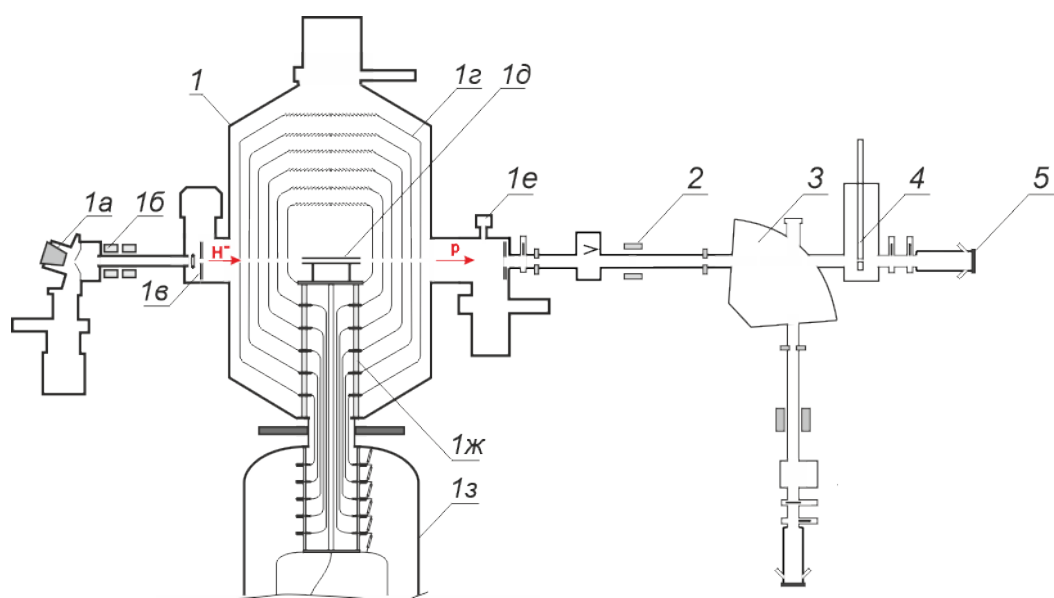


Рис. 1.

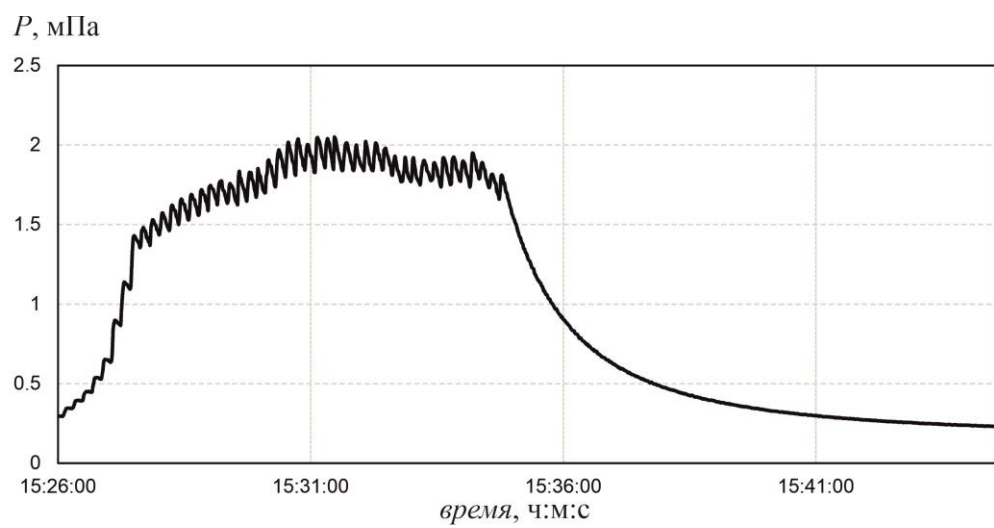


Рис. 2

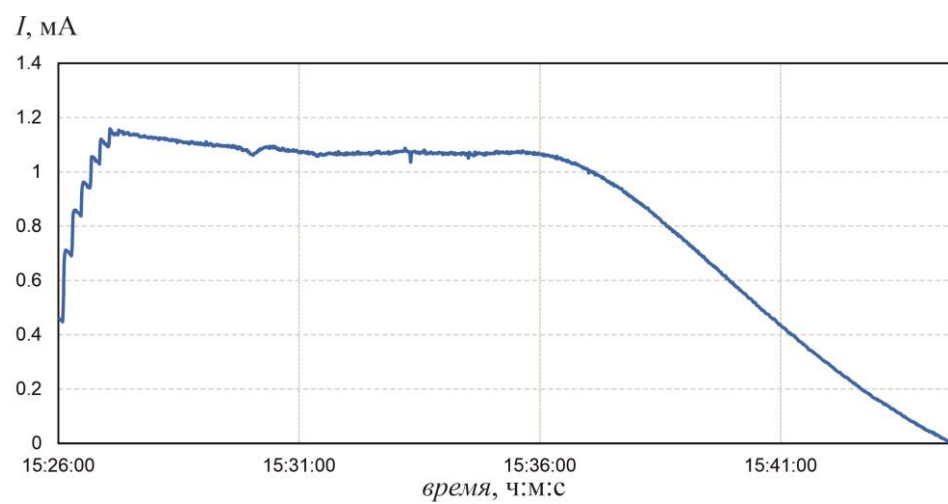


Рис. 3.

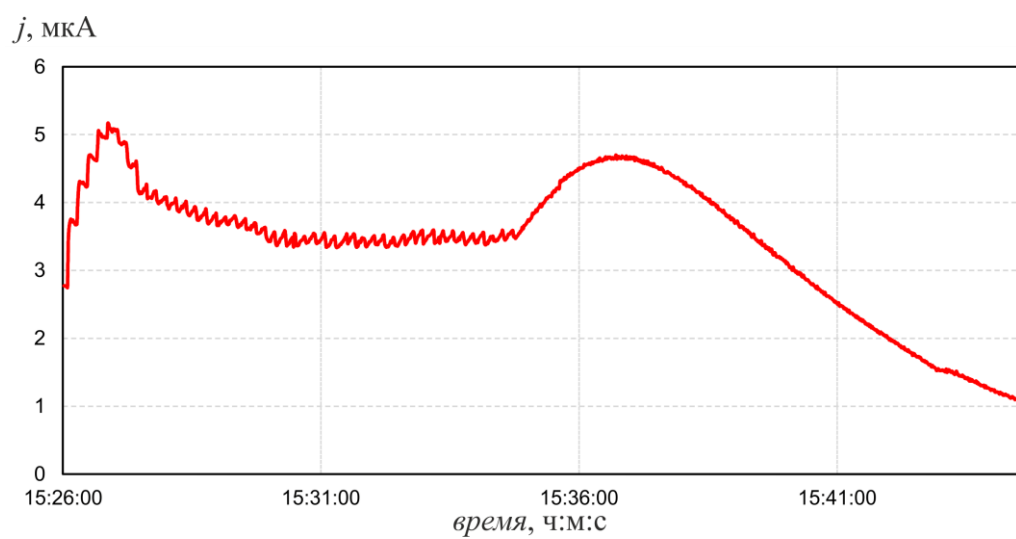


Рис. 4.

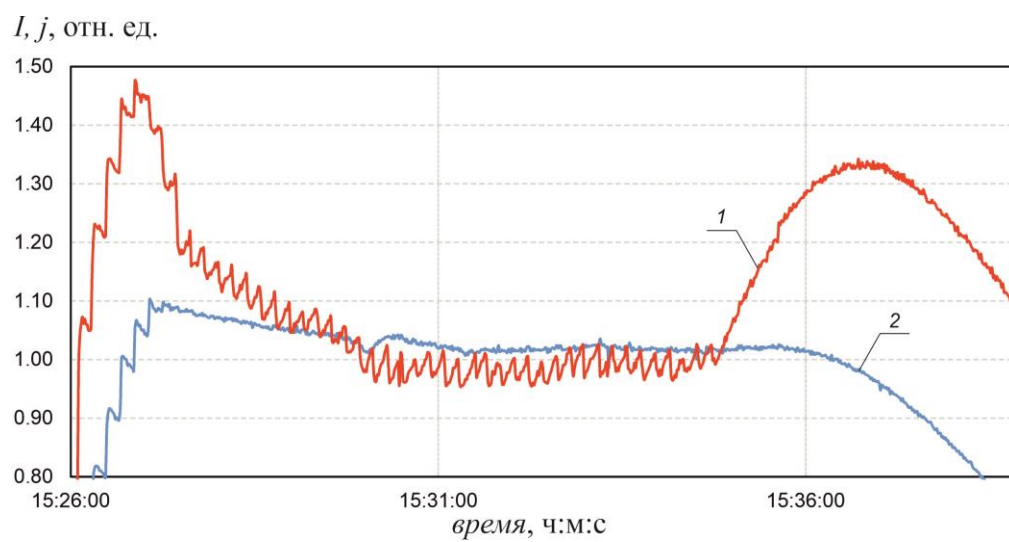


Рис. 5.

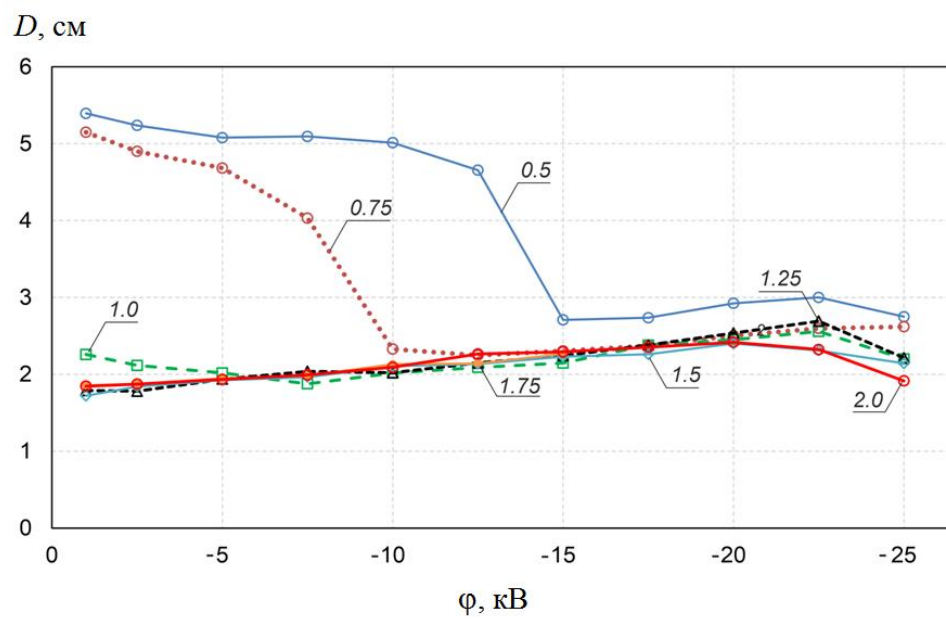
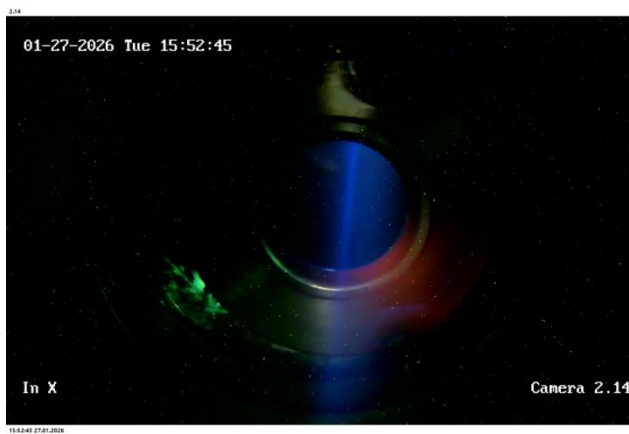
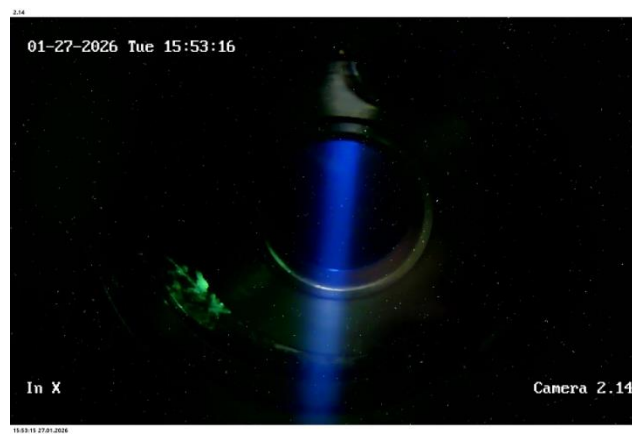


Рис. 6.



(a)



(b)

Рис. 7.