

## ИНЖЕКТОР СТАЦИОНАРНОГО ПУЧКА ОТРИЦАТЕЛЬНЫХ ИОНОВ ДЛЯ ТАНДЕМНОГО УСКОРИТЕЛЯ<sup>1</sup>

© 2025 г. А. А. Гмыря<sup>а</sup>, \*, Ю. И. Бельченко<sup>а</sup>, А. Л. Санин<sup>а</sup>,  
С. С. Савинов<sup>а</sup>, С. Ю. Таскаев<sup>а</sup>, И. М. Щудло<sup>а</sup>

<sup>а</sup> *Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук  
Россия, 630090, Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 11*

\* e-mail: anatoliigmyrya@gmail.com

Поступила в редакцию 28.11.2023 г.

После доработки 11.03.2024 г.

Принята к публикации 27.03.2024 г.

Представлены результаты работы нового инжектора стационарного пучка отрицательных ионов водорода, введенного в эксплуатацию в 2022 году на ускорителе-тандале с вакуумной изоляцией в ИЯФ СО РАН. В инжекторе используется поверхностно-плазменный источник с пеннинговским разрядом с массивными термостойкими электродами и внутренней магнитной системой на постоянных магнитах. Системы питания источника обеспечивают обратную связь и автоматизированный контроль работы источника по выбираемому оператором сценарию. Источник позволяет получать стационарные пучки отрицательных ионов водорода с током до 15 мА и энергией до 32 кэВ. В низкоэнергетичном тракте инжектора установлена дополнительная магнитная линза; для уменьшения обдирки пучка отрицательных ионов усилена откачка низкоэнергетичного тракта.

DOI: 10.7868/S3034564225070174

### 1. ВВЕДЕНИЕ

В Институте ядерной физики СО РАН разработан и активно используется ускорительный источник нейтронов для бор-нейтронозахватной терапии (БНЗТ) с ускорением первичного пучка отрицательных ионов в тандале с вакуумной изоляцией (ВИТА) [1]. С 2006 по 2021 г. на тандале успешно работал разработанный в ИЯФ экспериментальный стационарный источник отрицательных ионов поверхностно-плазменного типа, который обеспечивал инжекцию в тандале пучка отрицательных ионов током до 10 мА [2]. В 2022 г. схема инжекции отрицательных ионов в тандале была усовершенствована. В новой схеме инжекции был установлен более мощный поверхностно-плазменный источник (ППИ) с пеннинговским разрядом, позволяющий получать стационарные пучки отрицательных ионов водорода с током до 15 мА и энергией до 32 кэВ [3]. Системы питания ионного источ-

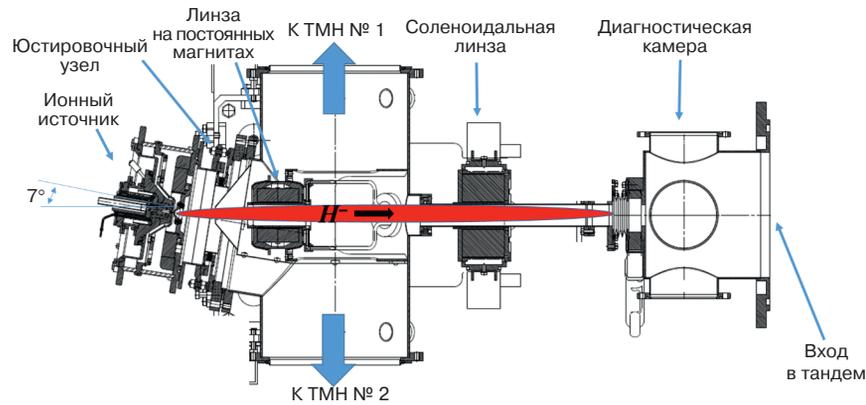
ника обеспечивают обратную связь и автоматизированный контроль работы источника. В низкоэнергетичном тракте инжектора установлена дополнительная магнитная линза для улучшения прохождения пучка через тракт. Улучшена откачка низкоэнергетичного тракта дополнительными насосами для уменьшения обдирки пучка отрицательных ионов.

### 2. КОНСТРУКЦИЯ ИНЖЕКТОРА

Общая схема нового инжектора представлена на рис. 1. Основными компонентами инжектора являются источник отрицательных ионов, пристыкованный с помощью юстировочного узла к камере с дифференциальной откачкой, внутри которой установлена первая линза на постоянных магнитах.

Камера с дифференциальной откачкой и линзой пристыкована к низкоэнергетичному тракту тандала, содержащему внешнюю регули-

<sup>1</sup> Материалы 28-й конференции по ускорителям заряженных частиц “RuPAC’23”, г. Новосибирск.



**Рис. 1.** Схема инжектора на тандеме БНЗТ. Ионный источник, камера с дифференциальной откачкой и линзой на постоянных магнитах, канал транспортировки ЛЕВТ с соленоидальной линзой. На входе в тандем установлена диагностическая камера. Красными линиями показаны траектории ионного пучка с энергией 32 кэВ при транспортировке от источника токов на вход ускорителя (расчеты COMSOL).

руемую соленоидальную линзу, которая дополнительно фокусирует ионный пучок. За соленоидальной линзой установлена пара корректоров для регулирования угла вхождения пучка в тандем (на рис. 1 не показаны). Для дифференциальной откачки выходящего из источника водорода применяется конус из нержавеющей стали с входной апертурой диаметром 40 мм, который разделяет две ступени откачки, на каждую из которых поставлен турбомолекулярный насос со скоростью откачки по водороду 2200 л/с. При стационарном напуске водорода со скоростью примерно  $0.1 \text{ л} \cdot \text{Торр}/\text{с}$  насосы поддерживают вакуум около  $2.2 \cdot 10^{-5} \text{ Торр}$  в первой, примыкающей к источнику ступени, и около  $10^{-5} \text{ Торр}$  в транспортной камере ЛЕВТ. На вход тандема поставлен дополнительный турбомолекулярный насос со скоростью откачки 2000 л/с. В качестве диагностик пучка используются установленные в диагностическую камеру осциллирующий проволочный сканер и измеритель эмиттанса компании DPace. Красными линиями на рис. 1 показаны траектории ионов пучка с энергией 32 кэВ при движении от источника ионов на вход ускорителя (расчеты COMSOL).

### 3. ИСТОЧНИК ОТРИЦАТЕЛЬНЫХ ИОНОВ

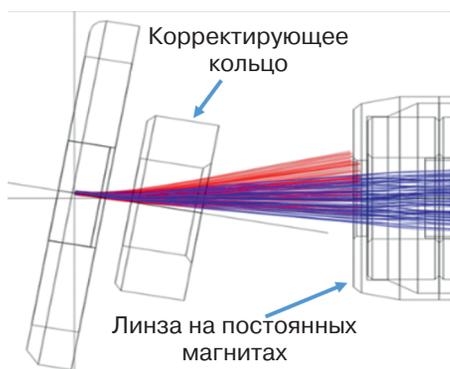
По сравнению с первоначальным вариантом источника [1], работавшего на тандеме в 2006–2021 гг. в новом инжекторе установлен источник с массивными термостойкими электродами газоразрядной камеры и ионно-оптической системы (ИОС) для вытягивания и формирования пучка. Для формирования магнитного поля применяется расположенная в вакууме внутренняя маг-

нитная система на постоянных магнитах [3]. Для увеличения интенсивности генерации ионов магнитное поле источника в области пеннинговского разряда было усилено, для чего были установлены дополнительные постоянные магниты из NdFeB. В новом инжекторе ось источника ионов расположена почти горизонтально (под углом  $7^\circ$  к горизонтали), тогда как ось цезиевой печи (на рис. 1 не показана) ориентирована почти вертикально. В газовой системе источника используется двухканальная система подачи водорода: для поджигания пеннинговского разряда сделана импульсная повышенная подача водорода, а после поджига стационарный разряд поддерживается при пониженной подаче.

### 4. ТРАНСПОРТИРОВКА ИОННОГО ПУЧКА НА ВХОД ТАНДЕМА

Для проводки выходящего из источника пучка с энергией 30 кэВ на вход тандема использовалась вакуумная линия, состоящая из камеры с дифференциальной откачкой и пристыкованным к ней низкоэнергетичным трактом, содержащим внешнюю регулируемую соленоидальную линзу и корректоры (рис. 1). Магнитное поле источника и поле первой линзы ЛЕВТ формировалось с помощью постоянных магнитов, а оптимальное прохождение ионного пучка через рассеянное поле источника регулировалось за счет установки на выходе источника стального корректирующего кольца, ослабляющего магнитное поле (см. рис. 2).

Расчеты магнитного поля в источнике и линзе на постоянных магнитах, а также прохождение ионного пучка через низкоэнергетичный тракт

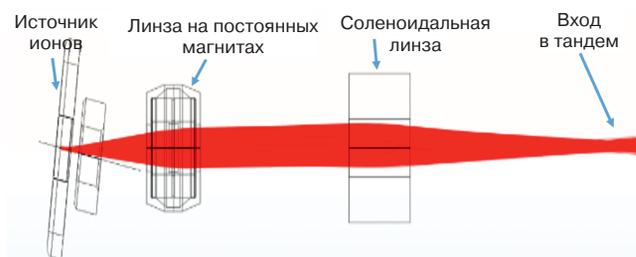


**Рис. 2.** Влияние корректирующего магнитное поле кольца на поворот пучка с энергией 30 кэВ перед входом в первую линзу. Красные линии – траектории без корректирующего магнитного кольца, синие линии – траектории с кольцом оптимальной толщины (угол поворота пучка  $7^\circ$ ).

LEBT проводились с помощью кода COMSOL. Влияние корректирующего кольца на расчетные траектории ионного пучка на участке от источника до входа в линзу на постоянных магнитах показано на рис. 2. В отсутствие корректирующего кольца ионный пучок отклоняется на больший угол и не попадает в апертуру магнитной линзы (красные линии на рис. 2). При установке корректирующего кольца оптимальной толщины (определенной расчетами в COMSOL) периферийное магнитное поле источника убывает быстрее и обеспечивает необходимый угол поворота пучка  $7^\circ$ , а сам ионный пучок полностью пролетает через магнитную линзу (синие линии на рис. 2).

Для фокусировки пучка на вход в низкоэнергетичный тракт LEBT в камере дифференциальной откачки источника была установлена линза, состоящая из двух NdFeB-колец, намагниченных параллельно центральной оси. Магнитное поле колец направлено навстречу друг другу. Магнитный поток колец собирается внешним ярмом, выполненным из магнитомягкой стали. Максимальное продольное магнитное поле на оси линзы равно 0.3 Тл, а минимальный размер пучка с энергией 32 кэВ достигается на расстоянии 700 мм от центра линзы. Внутри колец вставлена охлаждаемая водой трубка с внутренним диаметром 50 мм.

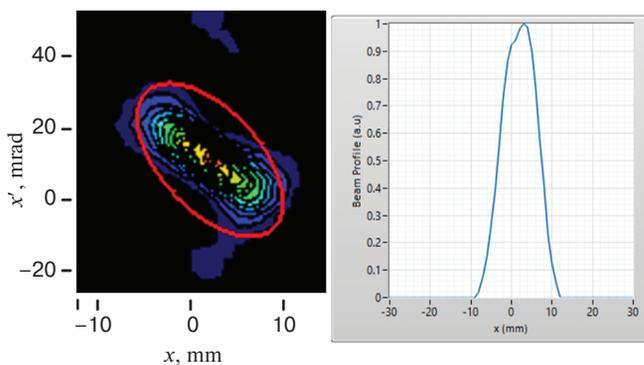
Результаты расчетов транспортировки пучка с энергией 32 кэВ через LEBT с фокусировкой первой линзой (на постоянных магнитах) и соленоидальной линзой LEBT показаны на рис. 3. Как видно на рисунке, ионный пучок хорошо проходит через LEBT и фокусируется на вход в тандем.



**Рис. 3.** Расчетные траектории ионного пучка с энергией 32 кэВ при транспортировке от источника на вход тандема.

## 5. ЭМИТТАНС ПУЧКА

Измерение эмиттанса пучка проводилось с помощью коммерческого измерителя эмиттанса фирмы D-Pace [4]. На рис. 4 представлены фазовый  $XX'$ -портрет и  $X$ -профиль пучка отрицательных ионов водорода с током 7 мА и энергией 28 кэВ, измеренного на расстоянии 1200 мм от выхода из источника. За счет фокусировки соленоидальной линзой пучок сходится и на фазовой плоскости  $XX'$  имеет средний угол наклона  $+10.8$  мрад. В обозначенной красным эллипсом области расчетный нормализованный RMS-эмиттанс имеет величину 0.26 мм·мрад. По координате  $X$  пучок имеет колоколообразную форму и на полувысоте (FWHM) полную ширину 11 мм.



**Рис. 4.**  $XX'$ -портрет на фазовой плоскости и  $X$ -профиль ионного пучка.

## 6. ЗАПУСК И РАБОТА ИНЖЕКТОРА НА ТАНДЕМЕ

Инжектор отрицательных ионов был установлен на тандеме ускорительного источника нейтронов для БНЗТ в ИЯФ СО РАН (рис. 5).

С февраля 2022 г. по июль 2023 г инжектор отработал 176 смен, с интегральной наработкой 844 часов. При запуске инжектора на вход тан-

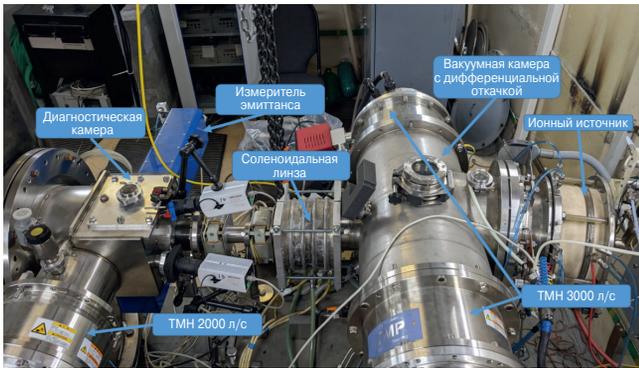


Рис. 5. Инжектор отрицательных ионов на тандеме БНЗТ.

дема был проведен ионный пучок с током 4.5 мА и энергией 28 кэВ, протонный ток на выходе из тандема составлял 2.3 мА, а ток на литиевой мишени – до 1.9 мА. После оптимизации источника с введением дополнительного охлаждения катода и поворота цезиевой печки источника в вертикальное положение ток протонов на выходе из тандема был увеличен до 3.4 мА, на литиевой мишени – до 2.9 мА, что было достаточно для проведения экспериментов на установке БНЗТ в 2023 г.

## 7. ПОЛУЧЕНИЕ ПУЧКА ОТРИЦАТЕЛЬНЫХ ИОНОВ ДЕЙТЕРИЯ

Для проведения экспериментов по генерации нейтронов в реакции ионов дейтерия с литием  $D^+ + Li$  рабочий газ источника был заменен на дейтерий, а источник был перенастроен на работу с дейтериевым пучком. Специальная оптимизация ионного источника в работе с дейтерием не проводилась.

Для транспортировки более тяжелых отрицательных ионов дейтерия через рассеянное магнитное поле источника и низкоэнергетичный тракт ЛЕВТ энергия отрицательных ионов дейтерия была понижена до 14 кэВ, для чего было вдвое уменьшено напряжение ускоряющего электрода. Расчетные траектории удовлетворительного прохождения пучка ионов дейтерия

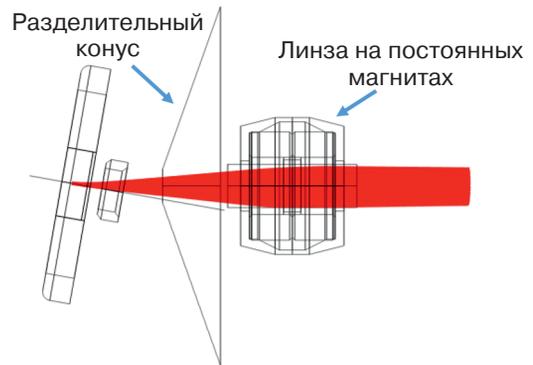


Рис. 6. Расчетные траектории прохождения пучка ионов дейтерия с энергией 14 кэВ через разделительный конус дифференциальной откачки и через линзу на постоянных магнитах.

с пониженной до 14 кэВ энергией через разделительный конус дифференциальной откачки и линзу показаны на рис. 6.

В табл. 1 представлено сравнение режимов ионного источника при работе при водороде и дейтерии в рабочих циклах 2023 г.

Как показано в табл. 1, проведенный на литиевую мишень ток ускоренных протонов на мишени при работе с дейтерием был в 1.3 раза ниже, чем при работе с водородом, что хорошо соответствует наблюдавшемуся ранее изотопическому эффекту по генерации пучка ионов водорода и дейтерия в импульсном пеннинговском ППИ [5]. Максимальный ток отрицательных ионов дейтерия на входе в тандем был равен 3 мА, а ток протонов на литиевой мишени достигал 1.5 мА. В цикле ежедневных экспериментов источник стабильно работал на дейтерии по 6–8 часов в день.

## 8. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Создан и запущен модернизированный инжектор отрицательных ионов для тандемного ускорителя. Получен и ускорен в тандеме сфокусированный пучок отрицательных ионов водорода и дейтерия; отлажена работа ионного источника по сценариям от ПК. В моде с малой

Таблица 1. Сравнение режимов работы ионного источника

Тип газа	Разряд			Параметры ИОС				На мишени
	$U_d$ , В	$I_d$ , А	Поток газа, отн.ед.	$U_1$ , кВ	$U_2$ , кВ	$I_1$ , мА	$I_2$ , мА	$I_r$ , мА
Дейтерий	87	6	97	1.3	13	15	3	0.96
Водород	90	6	104	1.3	27	9	5	1.25

подачей цезия получены пучки отрицательных ионов водорода и дейтерия с током 7–8 мА и 3 мА соответственно.

#### ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда (грант № 19-72-30005).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ivanov A.A., Sanin A., Belchenko Yu. et al.* // AIP Conference Proceedings. 2021. V. 2373. P. 070002. <https://doi.org/10.1063/5.0057441>.
2. *Sanin A., Belchenko Yu., Gusev I. et al.* // AIP Conference Proceedings. 2018. V. 2052. P. 050012. <https://doi.org/10.1063/1.5083766>.
3. *Belchenko Y.I., Gorbovsky A., Ivanov A. et al.* // AIP Conference Proceedings. 2013. V. 1515. № 1. P. 448. <https://doi.org/10.1063/1.4792815>.
4. *Bykov T.A., Kasatov D.A., Kolesnikov Ia. A. et al.* // Instruments and Experimental Techniques. 2018. T. 61. № 5. С. 713. <https://doi.org/10.1134/S0020441218050159>.
5. *Belchenko Y.I., Kupriyanov A.S.* // AIP Conference Proceedings. American Institute of Physics. 1992. V. 287. № 1. P. 255. <https://doi.org/10.1063/1.44788>.