

МЕТОДЫ НАГРЕВА ПЛАЗМЫ

УДК 533.9.07

МОЩНЫЙ АТОМАРНЫЙ ИНЖЕКТОР С ПЕРЕСТРАИВАЕМОЙ ЭНЕРГИЕЙ ПУЧКА ДЛЯ НАГРЕВА И СТАБИЛИЗАЦИИ ПЛАЗМЫ

© 2021 г. А. В. Бруль^{а,*}, А. Г. Абдрашитов^а, В. Х. Амиров^а, В. П. Белов^а, Р. В. Вахрушев^а,
А. И. Горбовский^а, А. Н. Драничников^а, В. И. Давыденко^а, П. П. Дейчули^а,
Н. П. Дейчули^а, А. С. Донин^а, А. А. Иванов^а, И. А. Иванов^а, В. А. Капитонов^а,
В. В. Колмогоров^а, С. Корепанов^б, В. В. Мишагин^а, В. В. Ращенко^а,
А. В. Сорокин^а, Н. В. Ступишин^а

^а *Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия*

^б *TAE Technologies, CA, USA*

**e-mail: A.V.Brul@inp.nsk.su*

Поступила в редакцию 16.12.2020 г.

После доработки 30.01.2021 г.

Принята к публикации 01.02.2021 г.

Для нагрева и стабилизации плазмы в открытых магнитных ловушках в Институте ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН разработан мощный атомарный инжектор с перестраиваемой энергией пучка. Начальная энергия частиц составляет 15 кэВ с последующим увеличением до 40 кэВ. Мощность нейтрального пучка при этом возрастает с 1.7 МВт до 3.5 МВт. Особенностью инжектора является постоянство ионного тока пучка при значительном изменении ускоряющего напряжения. Инжекторы на базе ионных источников с перестраиваемой энергией используются в экспериментах на открытой ловушке С-2W, США.

Ключевые слова: источник ионов, нейтральный пучок, источник положительных ионов

DOI: 10.31857/S0367292121060044

1. ВВЕДЕНИЕ

Инжекция нейтральных пучков широко используется в термоядерных установках с магнитным удержанием для нагрева и стабилизации плазмы. Развитие исследований в этой области привело к необходимости в системах нейтральной инжекции с перестраиваемой энергией пучка. Так, в экспериментах на установке С-2W (TAE Technologies, USA) [1] сценарий эксперимента предусматривает увеличение магнитного поля по мере увеличения температуры плазмы и соответствующее изменение энергии инжектируемых нейтральных частиц. На С-2W имеется действующая система нейтральной инжекции с постоянной энергией частиц 15 кэВ [2, 3]. В дальнейшем часть ионных источников была модифицирована так, чтобы осуществить переход с начальной энергии 15 кэВ на энергию 40 кэВ во время импульса инжекции при сохранении извлекаемого тока ионного пучка. Мощность нейтрального пучка при этом возрастает с 1.7 МВт до 3.5 МВт с учетом уменьшения примерно в 1.33 раза коэффициента нейтрализации из-за повышения энергии частиц. Длительность импульса пучка составляет 30 мс. Особенностью инжектора является

большая (~150 А) величина извлеченного тока пучка. Настоящая работа посвящена решению задачи оптимального формирования пучка с фиксированной плотностью тока при реализации сценария увеличения энергии в течение рабочего импульса.

2. ОПИСАНИЕ ИНЖЕКТОРА

Модифицированный инжектор [4] предназначен для получения пучка быстрых атомов водорода с энергией от 15 до 40 кэВ и длительностью 30 мс. При этом энергия пучка в этих пределах может меняться по заданному сценарию при сохранении тока водородных ионов из источника. Инжектор схематически показан на рис. 1. Ионный источник формирует сфокусированный пучок ионов водорода с током до 150 А. Сформированный пучок ионов далее перезаряжается в атомы в газовой мишени нейтрализатора. Неперезарядившиеся ионы отклоняются магнитом и попадают в водоохлаждаемый приемник. Для измерения мощности пучка быстрых атомов на выходе инжекторного бака установлен подвижный калориметр. Инжектор с перестраиваемой энергией конструктивно близок к инжектору с посто-

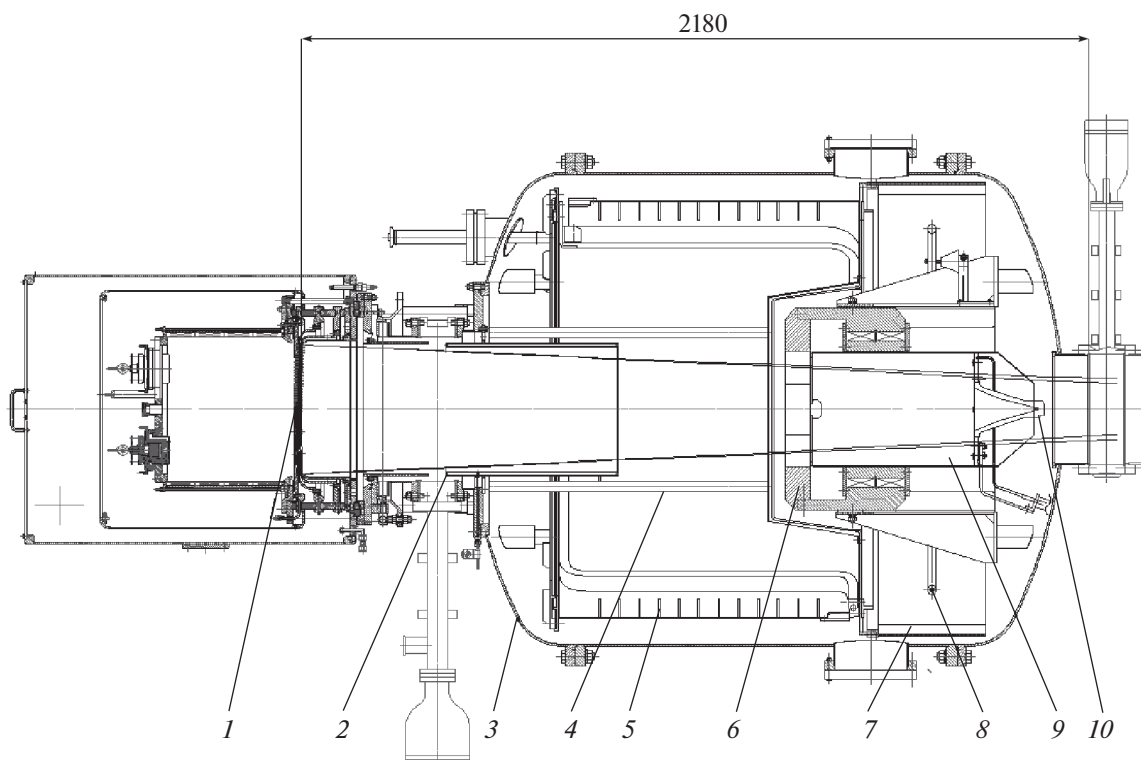


Рис. 1. Общий вид инжектора атомарного пучка. 1 – ионный источник; 2 – нейтрализатор; 3 – вакуумный объем; 4 – стержень дугового распылителя титана; 5 – медный сорбционный лайнер; 6 – отклоняющий магнит; 7 – алюминиевые сорбционные панели; 8 – кольцевой испаритель титана; 9 – приемник отклоненных ионов; 10 – отклоняемый calorиметр нейтрального пучка.

янной энергией [2, 3]. Для изменения энергии пучка в нем был модернизирован ионный источник и ряд элементов инжектора. В частности, потребовалось введение дополнительных средств откачки, поскольку увеличение энергии пучка приводит к увеличению газовой нагрузки в инжекторном баке. Это связано с тем, что с ростом энергии пучка требуется большая подача газа в нейтрализатор из-за уменьшения сечений, определяющих равновесный выход атомов. Кроме того, это приводит к падению выхода атомов из мишени нейтрализатора и, следовательно, к увеличению тока отклоненных непerezарядившихся ионов на приемник и соответствующему росту газоотделения из него. Дифференциальная система откачки инжектора с постоянной энергией [2], основанная на сорбции водорода покрытой титаном поверхностью, обеспечивает скорость откачки $10^5 \text{ л} \cdot \text{с}^{-1}$ при комнатной температуре панелей. Нанесение титана на стенку вакуумной камеры со специальными ребрами для развития поверхности производится с помощью стержневых дуговых распылителей [5].

Для откачки дополнительного количества газа, выделяющегося на приемнике отклоненных ионов и из газовой мишени нейтрализатора, был

введен дополнительный кольцевой распылитель титана. Он размещен на выходе вакуумного объема. Общий вид модифицированной системы вакуумной откачки инжектора показан на рис. 2. В результате модификации, система откачки обеспечивает уровень потерь пучка из-за реионизации, не превышающий 5.3% от мощности инжектируемого нейтрального пучка. Расчетный профиль давления вдоль пучкового тракта при энергии пучка 40 кэВ, полученный при помощи симулятора сверхвысокого вакуума MolFlow+ [6], при включении дополнительного насоса и без него, показан на рис. 3.

Увеличение энергии пучка, помимо модификации системы откачки, потребовало также модификации отклоняющего остаточные ионы магнита. В конструкции отклоняющего магнита [2] применяются постоянные магниты из $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$. Длина полюсов магнита вдоль пучка была увеличена. Одновременно были установлены дополнительные постоянные магниты. При этом модификации приемника пучка не потребовалось, так как его размеры и положение позволяют не выходить за его пределы при увеличении энергии пучка.

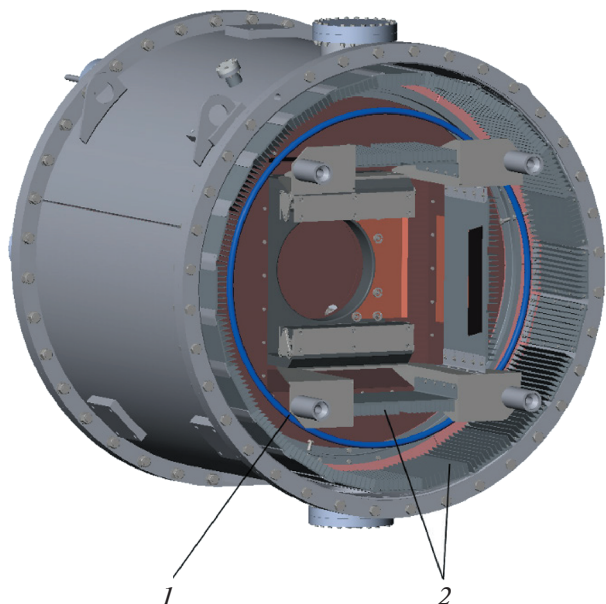


Рис. 2. Вид системы дополнительной вакуумной откачки. 1 – кольцевой испаритель титана; 2 – дополнительные сорбционные панели.

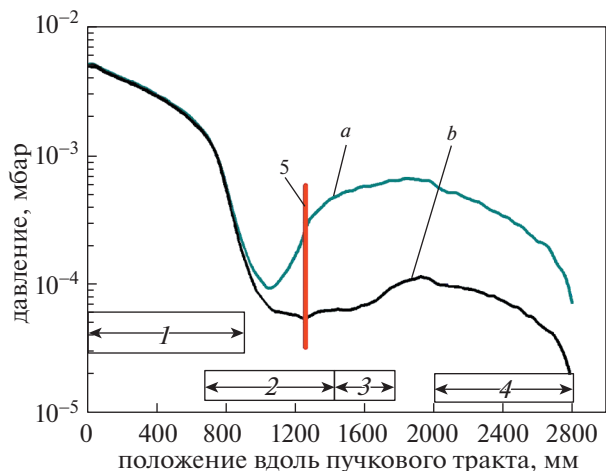


Рис. 3. Профиль давления вдоль пучкового тракта: 1 – нейтрализатор; 2 – сорбционный насос со стержневыми распылителями титана; 3 – дополнительный сорбционный насос с кольцевым испарителем титана; 4 – пучковый тракт на выходе из инжектора; 5 – диафрагма. а) – без дополнительной откачки; б) – с дополнительной откачкой.

3. ИОННЫЙ ИСТОЧНИК ПУЧКА С ПЕРЕСТРАИВАЕМОЙ ЭНЕРГИЕЙ

Общий вид ионного источника показан на рис. 4. Плазменный эмиттер формируется за счет

сложения струй плазмы четырех плазменных генераторов. Это дает необходимый плазменный поток для обеспечения плотности извлекаемого тока ионов более 300 мА/см² из плазменного эмиттера диаметром 360 мм. Генераторы плазмы

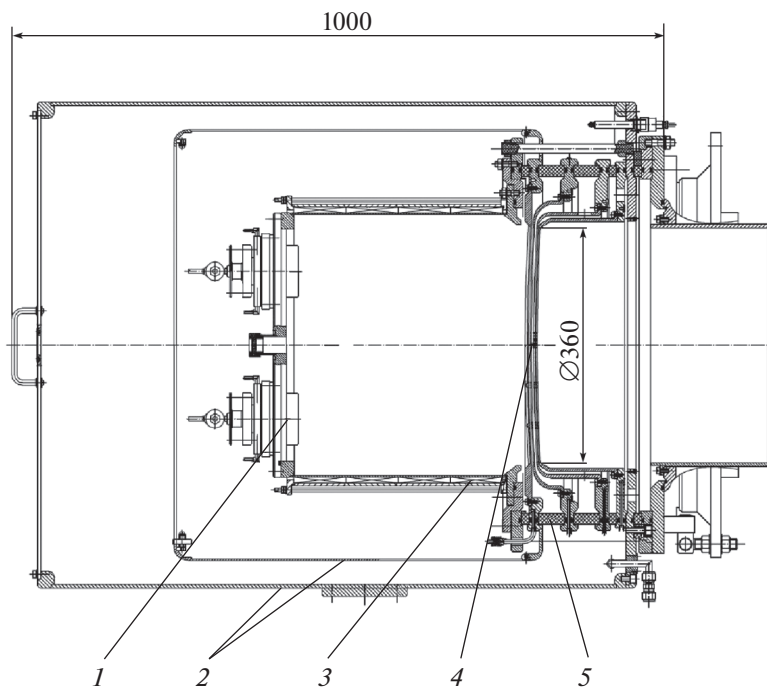


Рис. 4. Схема источника. 1 – дуговой генераторов плазмы; 2 – магнитный и электростатический экраны; 3 – плазменная камера с магнитными стенками; 4 – электроды ИОС; 5 – керамический изолятор.

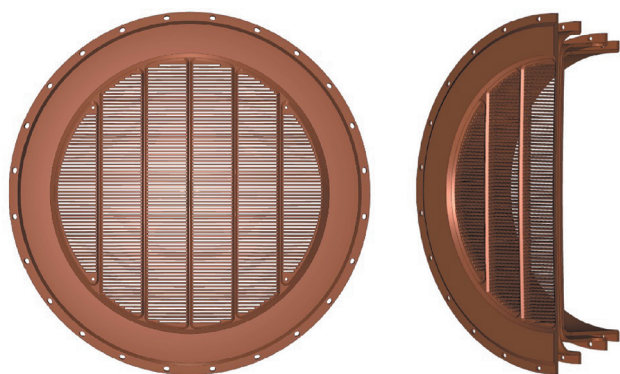


Рис. 5. Расположение щелей на плазменном электроде (слева) и общий вид системы электродов (справа).

расположены симметрично относительно оси пучка. На внешней поверхности вакуумной камеры источника плазмы расположены рядами керамические магниты из $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ с чередующимися направлениями намагниченности. Частичное отражение плазменных струй от “магнитной стенки” позволяет получить плазменный эмиттер с неоднородностью $\sim 10\%$ [2] и увеличить плотность тока ионов. Электроды имеют прозрачность около 42%, что позволяет получить ток ионного пучка до 150 А.

Для формирования пучка с перестраиваемой энергией и сохранением извлекаемого тока использовалась многощелевая 4-электродная ионно-оптическая система (ИОС). Расположение щелей и общий вид системы электродов показаны на рис. 5. В первом ускоряющем зазоре (см. рис. 7) обеспечиваются оптимальные условия для экстракции ионного пучка с энергией 15 кэВ, а требуемое доускорение с перестройкой потенциалов для формирования пучка с энергией 40 кэВ происходит во втором зазоре. Схема подключения источников питания и потенциалы электродов при формировании пучка с энергией 15 и 40 кэВ показаны на рис. 6.

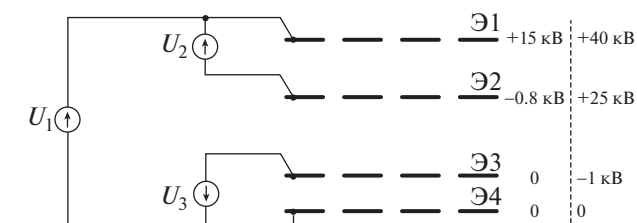


Рис. 6. Схема подключения источников питания к электродам. Э1 – электрод 1 (плазменный); Э2 – электрод 2 (извлекающий); Э3 – электрод 3 (доускоряющий); Э4 – электрод 4 (заземленный).

ИОС представляет из себя набор из четырех вложенных друг в друга электродов с щелевыми отверстиями для формирования пучка. Для фокусировки пучка рабочая поверхность электродов изготовлена в виде сферы. Каждый электрод имеет своей радиус кривизны, так что зазоры между электродами меняются в зависимости от радиуса для компенсации радиальной неоднородности плазменного эмиттера ионов. Фокусное расстояние ИОС составляет 3.5 м. Оптимальная геометрия элементарной ускоряющей ячейки определя-

ется на рис. 5. В первом ускоряющем зазоре (см. рис. 7) обеспечиваются оптимальные условия для экстракции ионного пучка с энергией 15 кэВ, а требуемое доускорение с перестройкой потенциалов для формирования пучка с энергией 40 кэВ происходит во втором зазоре. Схема подключения источников питания и потенциалы электродов при формировании пучка с энергией 15 и 40 кэВ показаны на рис. 6.

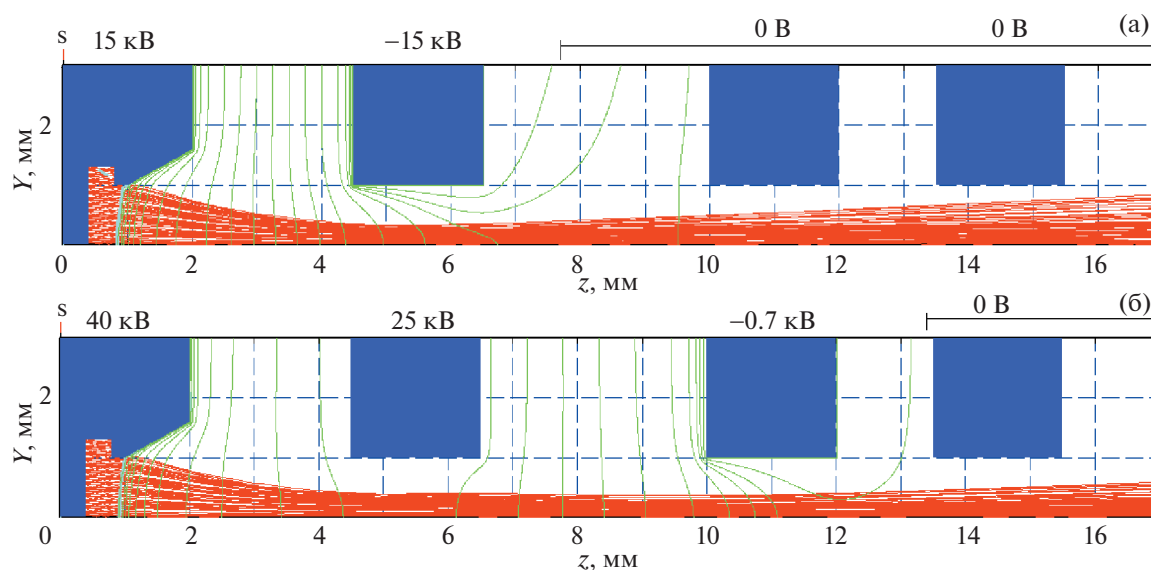


Рис. 7. Траектории ионов и эквипотенциалы электрического поля при формировании пучка с энергией 15 кэВ (а) и 40 кэВ (б).

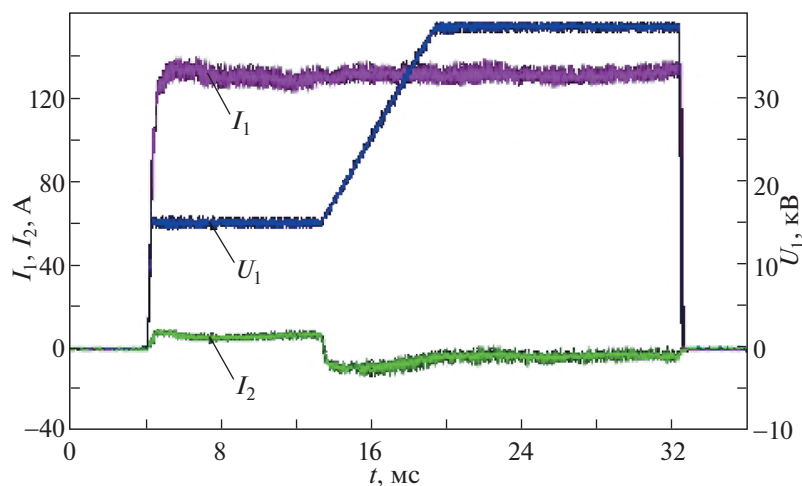


Рис. 8. Осциллограммы тока пучка (I_1), тока электрода 2 (I_2) и напряжения на электроде 1 (U_1) для сценария линейного изменения энергии пучка с 15 до 40 кэВ.

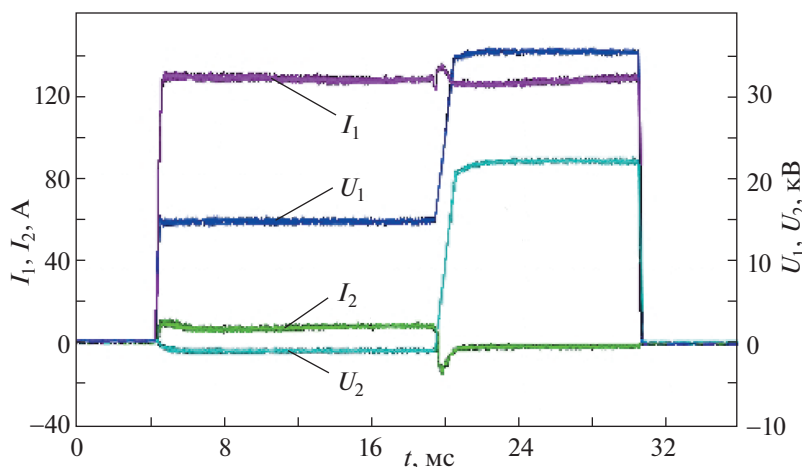


Рис. 9. Осциллограммы тока пучка (I_1), тока электрода 2 (I_2), напряжения на электроде 1 (U_1) и напряжения на электроде 2 (U_2) при быстром переключении энергии пучка с 15 кэВ на 35 кэВ.

лась моделированием при помощи численного кода PBGUNS (Particle Beam GUN Simulation) [7]. Для формирования пучка в элементарной ускоряющей ячейке с угловой расходимостью поперек щелей менее 30 мрад, при выполнении моделирования варьировались геометрия отверстий в плазменном электроде, межэлектродные зазоры и потенциалы электродов. Траектории ионов при формировании пучка с энергией 15 кэВ и 40 кэВ в оптимизированной элементарной ячейке ионно-оптической системы показаны на рис. 7.

4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

На испытательном стенде была достигнута номинальная длительность импульса 30 мс, с пере-

ключением энергии с 15 до 40 кэВ с сохранением тока пучка. Ток пучка в стабильном режиме (без пробоев) с переключением энергии составлял не менее 135 А. Сценарий перехода инжектора от начальной энергии к конечной может быть осуществлен произвольным способом, с плавным и резким фронтом изменения энергии. Пример переключения энергии частиц с 15 кэВ до 40 кэВ при линейном нарастании энергии при токе пучка около 135 А и длительности импульса 29 мс, показан на рис. 8. Сценарий работы ИОС допускает также быстрое переключение потенциалов с 15 на 40 кВ с фронтом ~ 0.3 мс. Осциллограммы тока и напряжения в этом случае показаны на рис. 9. При изменении потенциалов первого и второго электродов для увеличения энергии ча-

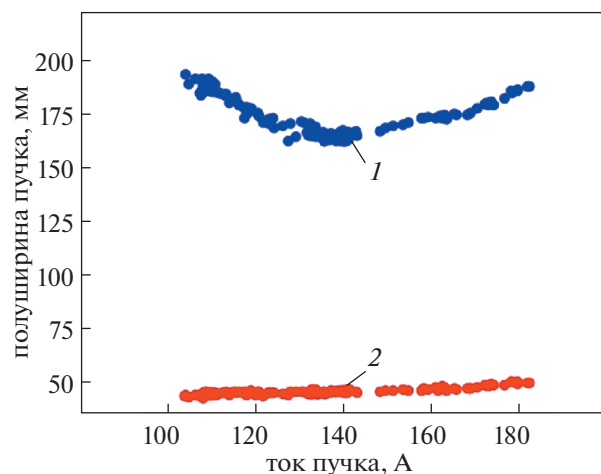


Рис. 10. Зависимость полуширины пучка с энергией 15 кэВ от тока ионов на уровне $1/e$: 1 – поперек щелей; 2 – вдоль щелей.

стиц ток питания электрода 2 меняет знак, как показано на рис. 8, 9, то есть ток течет против направления эдс источника питания электрода 2. Положительный ток питания до переключения обуславливается потерями части пучка на краях отверстий в электроде 2 и ионами вторичной плазмы на выходе из ИОС. После переключения ионы вторичной плазмы не попадают на электрод 2, а электроны, образовавшиеся во втором ускоряющем промежутке, попадают на электрод 2.

Относительные профили потока атомов пучка измерялись набором вторично-эмиссионных датчиков на расстоянии 4.1 м от ИОС. При формировании пучка с энергией 15 кэВ полуширина пучка на уровне $1/e$ поперек щелей составляет 163 мм и вдоль щелей менее 50 мм в оптимуме по току. Зависимость полуширины пучка вдоль и поперек щелей от величины извлекаемого тока ионов показана на рис. 10. При формировании пучка с энергией 35 кэВ минимальная полуширина пучка поперек щелей составила 173 мм (см. рис. 11). При переключении энергии пучка с 15 кэВ на 25 кэВ угловая расходимость пучка поперек щелей увеличивается при сохранении разности потенциалов между первым и вторым электродом (см. рис. 10, 12). Этот эффект удалось компенсировать изменением разности потенциалов между первым и вторым электродом во время перестройки энергии пучка. Зависимости полуширины пучка поперек щелей от тока при разных напряжениях между первым и вторым электродом при формировании пучка с энергиями 25 кэВ показаны на рис. 12.

Состав пучка определялся с помощью оптической диагностики. Наблюдались линии излучения H_α частиц с разной энергией, сдвинутые из-за эффекта Доплера. Измерения производились

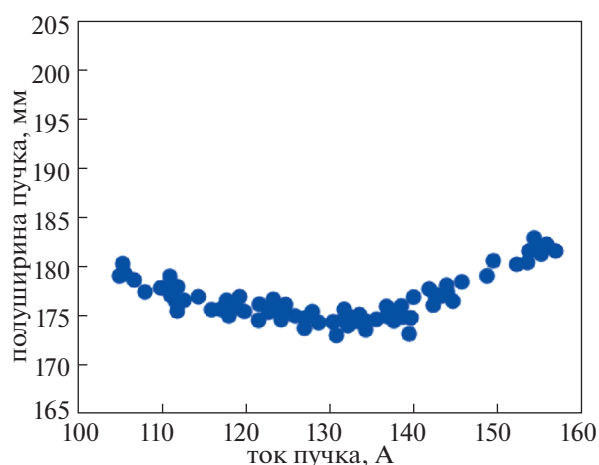


Рис. 11. Зависимость полуширины пучка поперек щелей от тока ионов для энергии 35 кэВ.

навстречу пучку под углом 5 градусов. Спектры пучка, измеренные при формировании пучка с энергией 15 и 30 кэВ, показаны на рис. 13. Состав пучка с учетом изменения коэффициентов нейтрализации в газовой мишени в процессе переключения энергии не изменился (см. рис. 13). Спектр пучка, измеренный в импульсе с быстрым переключением энергии, показан на рис. 14. На рисунке представлены линии, соответствующие молекулярным фракциям пучка с энергией 15 кэВ и 35 кэВ. Из-за конечного быстродействия системы измерений сигналов спектрометра, при быстром переключении энергии пучка спектр не размывается и представляет собой два набора независимых доплеровских линий. Это позволяет измерять состав в течение одного импульса ин-

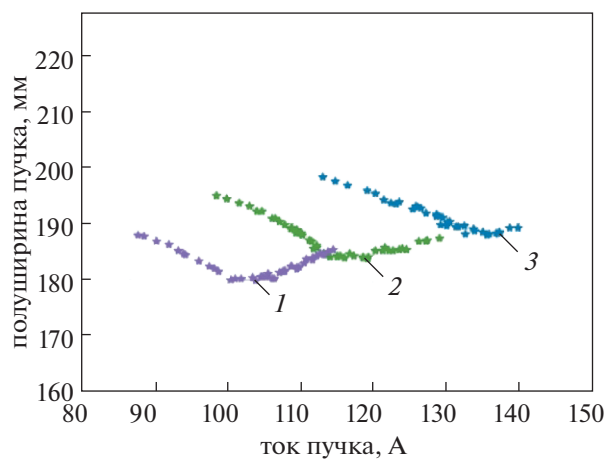


Рис. 12. Зависимость полуширины пучка поперек щелей от тока при потенциале плазменного электрода 25 кВ и разных значениях потенциала второго электрода. 1 – 13.2 кВ; 2 – 14.0 кВ; 3 – 15.0 кВ.

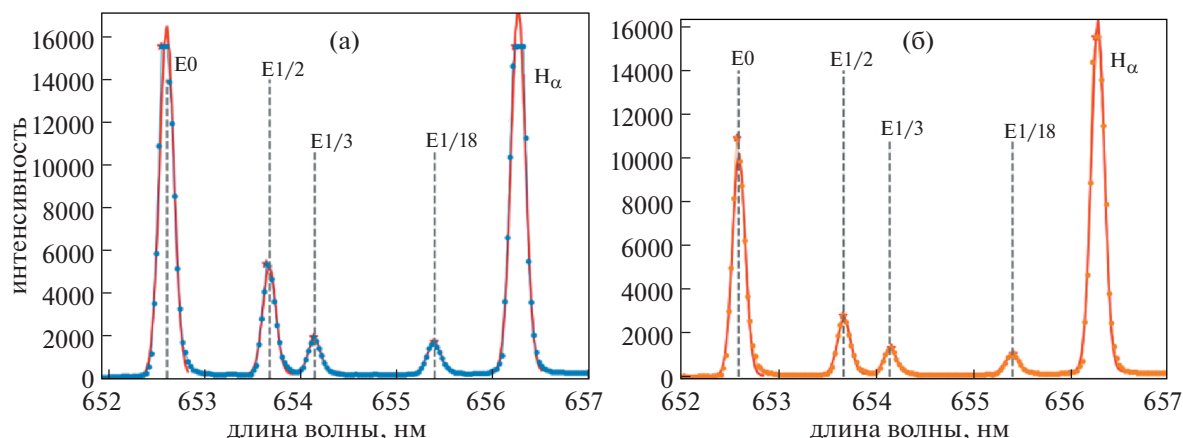


Рис. 13. Спектр излучения линии H_{α} пучка атомов водорода для энергии 15 кэВ (а) и 30 кэВ (б).

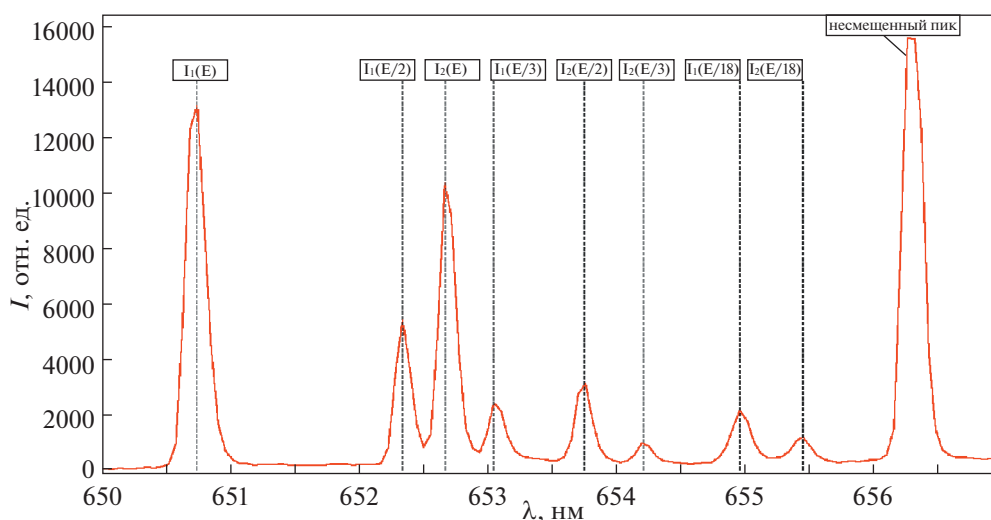


Рис. 14. Спектр излучения линии H_{α} пучка при энергии 15 кэВ (I_2) на 35 кэВ (I_1). Быстрое переключение энергии.

жектора. Проведенные измерения показали, что ток ионов полной энергии в пучке составляет более 85%.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработан ионный источник с перестраиваемой с 15 до 40 кэВ энергией при постоянном токе пучка. Для формирования пучка ионов водорода используется многощелевая 4-электродная ионно-оптическая система с баллистической фокусировкой. Ионные источники с перестраиваемой энергией используются в системе мощной атомарной инжекции установки С-2W (США) [1, 8] для нагрева и поддержания тока в плазме. Это позволяет проводить эксперименты, направленные на увеличение плотности и температуры

плазмы одновременно с ростом магнитного поля установки.

При работе инжектора с увеличением энергии в пучковом тракте требуется более интенсивная вакуумная откачка. С ростом энергии происходит уменьшение равновесного выхода атомов в газовой мишени нейтрализатора пучка, что приводит к соответствующему росту газоотделения в приемнике остаточных ионов. Кроме того, требуется также повышенный напуск газа в нейтрализатор для обеспечения близкого к равновесному выходу атомов. Для откачки дополнительного газа в инжекторе на выходе пучка установлен вспомогательный геттерный насос с кольцевым дуговым распылителем титана. Кроме того, увеличение энергии пучка потребовало модификации отклоняющих остаточные ионы магнита. Остальные

системы, расположенные в вакуумном объеме инжектора, не изменились.

Разработанный инжектор атомарного пучка при максимальной энергии частиц (40к эВ) позволяет получить мощность атомарного пучка более 3 МВт. Таким образом, он является самым мощным в линейке инжекторов, разработанных до настоящего времени в ИЯФ им. Г.И. Будкера СО РАН [9].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Gota H., Binderbauer M.W., Tajima T., Putvinski S., Tuszewski M., Dettrick S., Garate E., Korepanov S., Smirnov A., Thompson M.C., Trask E., Yang X., Schmitz L., Lin Z., Ivanov A.A., Asai T., Alfrey I., Andow R., Beall M., Bolte N., Bui D.Q., Cappello M., Ceccherini F., Clary R., Cheung A.H., Conroy K., Deng B.H., Douglass J., Dunaevsky A., Feng P., Fulton D., Galeotti L., Granstedt E., Griswold M., Gupta D., Gupta S., Hubbard K., Isakov I., Kinley J.S., Knapp K., Magee R., Matvienko V., Mendoza R., Mok Y., Necas A., Primavera S., Onofri M., Osin D., Rath N., Roche T., Romero J., Schindler T., Schroeder J.H., Sevier L., Sheftman D., Sibley A., Song Y., Steinhauer L.C., Valentine T., Van Drie A.D., Walters J.K., Waggoner W., Yushmanov P., Zhai K. and the TAE Team // Nucl. Fusion. 2017. V. 57. 116021. <https://doi.org/10.1088/1741-4326/aa7d7b>
2. Deichuli P., Davydenko V., Ivanov A., Korepanov S., Mishagin V., Smirnov A., Sorokin A., Stupishin N. // Rev. Sci. Instrum. 2015. V. 86. 113509. <https://doi.org/10.1063/1.4936292>
3. Сорокин А.В., Давыденко В.И., Дейчули П.П., Иванов А.А. // ЖТФ. 2016. Т. 86. Вып. 7. С. 46.
4. Deichuli P., Abdrashitov A., Dranichnikov A., Davydenko V., Ivanov A., Kolmogorov V., Kapitonov V., Mishagin V., Brul A., Deichuli N., Raschenko V., Sorokin A., Stupishin N., Vakhrushev R. // Abstracts. Plasma Physics and Technology. 2018. V. 5. № 1.
5. Sorokin A., Ivanov A., Deichuli P., Dranichnikov A., Van Drie A., Korepanov S. // AIP Conf. Proc. 2016. V. 1771. 030026. <https://doi.org/10.1063/1.4964182>
6. Ady M., Kersevan R. // 10th Int. Particle Accelerator Conf., Melbourne, Australia, 2019. <https://doi.org/10.18429/JACoW-IPAC2019-TUPMP037>.
7. Boers J.E. // J. Vacuum Sci. Technol. 1973. V. 10. P. 1120. <https://doi.org/10.1116/1.1318483>
8. Binderbauer M.W., Tajima T., Steinhauer L.C., Garate E., Tuszewski M., Schmitz L., Guo H.Y., Smirnov A., Gota H., Barnes D., Deng B.H., Thompson M.C., Trask E., Yang X., Putvinski S., Rostoker N., Andow R., Aefsky S., Bolte N., Bui D.Q., Ceccherini F., Clary R., Cheung A.H., Conroy K.D., Dettrick S.A., Douglass J.D., Feng P., Galeotti L., Giammanco F., Granstedt E., Gupta D., Gupta S., Ivanov A.A., Kinley J.S., Knapp K., Korepanov S., Hollins M., Magee R., Mendoza R., Mok Y., Necas A., Primavera S., Onofri M., Osin D., Rath N., Roche T., Romero J., Schroeder J.H., Sevier L., Sibley A., Song Y., Van Drie A.D., Walters J.K., Waggoner W., Yushmanov P., Zhai K. and TAE Team // Phys. Plasmas. 2015. V. 22. 056110. <https://doi.org/10.1063/1.4920950>
9. Бельченко Ю.И., Давыденко В.И., Дейчули П.П., Емелев И.С., Иванов А.А., Колмогоров В.В., Константинов С.Г., Краснов А.А., Попов С.С., Санин А.Л., Сорокин А.В., Ступишин Н.В., Шиховцев И.В., Колмогоров А.В., Атлуханов М.Г., Абдрашитов Г.Ф., Драничников А.Н., Капитонов В.А., Кондаков А.А. // УФН. 2018. Т. 188 (6). С. 595. <https://doi.org/10.3367/UFNe.2018.02.038305>