

УДК 533.9

ВОЗМОЖНАЯ СХЕМА ИНЖЕКТОРА АТОМАРНОГО ПУЧКА ДЛЯ НАГРЕВА ПЛАЗМЫ И ГЕНЕРАЦИИ ТОКА В ТОКАМАКЕ TRT

© 2021 г. Ю. И. Бельченко^а, А. В. Бурдаков^а, В. И. Давыденко^а, А. И. Горбовский^а,
И. С. Емелев^а, А. А. Иванов^а, А. Л. Санин^а, О. З. Сотников^{а, *}

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

*e-mail: O.Z.Sotnikov@inp.nsk.su

Поступила в редакцию 03.03.2021 г.

После доработки 20.05.2021 г.

Принята к публикации 02.06.2021 г.

Представлена возможная схема инъекции мощных атомарных пучков в разрабатываемом проекте токамака с реакторными технологиями (TRT). В каждый из двух инжекционных портов TRT предлагается установить двухпучковый инжекционный комплекс, состоящий из двух расположенных вертикально друг над другом инжекторов атомарных пучков большой энергии (500 кэВ). Прототип такого инжектора разрабатывается в Институте ядерной физики СО РАН им. Г.И. Будкера (ИЯФ). В каждом из высоковольтных инжекторов ИЯФ предлагается применить раздельное формирование пучка отрицательных ионов водорода, его ускорение с помощью одноапертурной ускорительной трубки и нейтрализацию в эффективном плазменном нейтрализаторе. Мощность каждого двухпучкового комплекса будет на начальном этапе составлять 7 МВт для атомов водорода и ~5.7 МВт для атомов дейтерия. В дальнейшем предполагается довести полную мощность инъекции до 20 МВт за счет повышения энергии и тока пучков в инжекционных комплексах. Обсуждена возможная схема инжекторов пучков быстрых атомов дейтерия с энергией до 200 кэВ на основе положительных ионов для установки TRT.

Ключевые слова: инжектор быстрых нейтралов, источник отрицательных ионов, нейтрализатор ионов

DOI: 10.31857/S0367292121110135

1. ВВЕДЕНИЕ

В Институте ядерной физики СО РАН им. Г.И. Будкера (ИЯФ) ведутся работы по созданию мощного инжектора пучка атомов водорода высокой энергии, основанного на ускорении и последующей нейтрализации отрицательных ионов. Инжектор состоит из многоапертурного высокочастотного источника с генерацией отрицательных ионов на покрытой цезием поверхности плазменного электрода, линии транспортировки пучка от источника к ускорителю ионов с отделением нежелательных сопутствующих частиц, высоковольтного ускорителя с увеличенной апертурой электродов, линии транспортировки ускоренного пучка и мишени для нейтрализации пучка отрицательных ионов.

В разрабатываемом прототипе инжектора ИЯФ, в отличие от традиционного подхода, применено раздельное формирование пучка отрицательных ионов водорода и его ускорение до требуемой энергии с помощью одноапертурного многоэлектродного ускорителя [1]. Для эффективной нейтрализации ускоренного пучка пред-

полагается использовать создаваемую в ИЯФ плазменную мишень [2]. Для дальнейшего увеличения эффективности нейтрализации пучка перспективно использовать фотонную мишень, оригинальная схема которой предложена и активно исследуется в ИЯФ [3]. Данная работа рассматривает возможность применения такой схемы в инжекторе атомарного пучка большой энергии для нагрева плазмы и генерации тока в токамаке TRT [4].

2. КОНСТРУКЦИЯ ПРОТОТИПА ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ИНЖЕКТОРА ИЯФ

Принципиальная схема ускорительного стенда, используемого в Институте ядерной физики им. Г.И. Будкера для развития этого подхода, приведена на рис. 1. На стенде установлен прототип источника отрицательных ионов водорода, рассчитанный на получение пучка с током до 1.5 А [5]. Из ионного источника первичный пучок с энергией до 120 кэВ направляется в высоковаку-

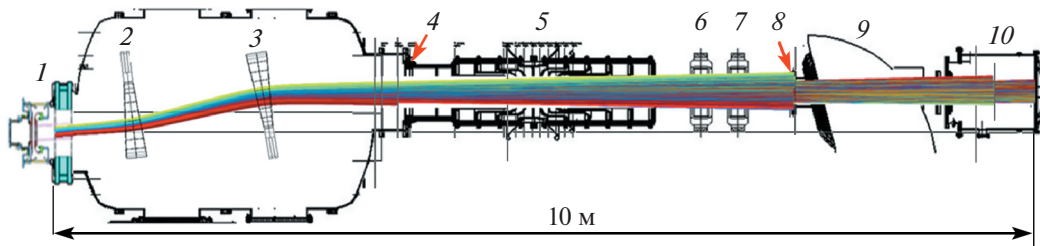


Рис. 1. Принципиальная схема ускорительного стенда: 1 – источник ионов H^- ; 2, 3 – поворотные магниты; 4 – выходной патрубок LEVT; 5 – высоковольтная ускорительная трубка; 6, 7 – квадрупольные магниты; 8 – выходной патрубок линии транспортировки ускоренного пучка; 9 – сепаратор; 10 – калориметр.

умную секцию LEVT (Low Energy Beam Transport) с отклоняющими магнитами (2, 3 на рис. 1), в которой пучок отделяется от сопутствующего газа, потока вторичных атомов, паров цезия и фокусируется на вход высоковольтного одноапертурного ускорителя (5 на рис. 1).

Источник ионов и LEVT-секция с поворотными магнитами находятся на высоковольтной платформе, потенциал которой может изменяться до 880 кВ относительно земли. Ускоренный приложенным потенциалом высокоэнергетичной энергии пучок отрицательных ионов дополнительно фокусируется с помощью пары квадрупольных (6, 7 на рис. 1) и поступает на вход калориметра 10. После квадрупольных линз установлен сепаратор 9, предназначенный для вывода электронов из ионного пучка. В дальнейшем в зоне между квадрупольными ускорительного стенда и магнитным сепаратором предполагается разместить плазменный нейтрализатор, а магнитный сепаратор использовать для очистки пучка нейтронов от ионов [1].

В настоящее время на ускорительном стенде ведутся исследования формирования транспортировки и ускорения ионного пучка. Из прототипа ионного источника получен пучок ионов H^- с током до 1.3 А и энергией до 95 кэВ [5]. Проведена транспортировка полученного пучка через высоковакуумную секцию с отклоняющими магнитами [6]. Испытано доускорение пучка H^- с напряжением на ускорительной трубке 160 кэВ.

Основной задачей первых экспериментов по доускорению пучка были физический пуск и проверка работоспособности систем и элементов ускорительного стенда. В первых экспериментах, были ускорены до энергии более 240 кэВ и проведены на расстояние 10 м к калориметру около 35% ионного пучка с начальной энергией 85 кэВ [7]. Достигнутая величина прохождения пучка через ускорительную трубку и высокоэнергетичный канал транспортировки полностью соответствовала расчетным значениям, полученным с использованием пакета Comsol [8]. Относительно низкая

величина прохождения пучка была обусловлена пониженной, по сравнению с проектной, начальной энергией пучка из источника (85 вместо 120 кэВ), которая существенно влияет на его угловую расходимость и степень обдирки при транспортировке в канале, а также обрезанием начального пучка на входе в ускорительную трубку из-за использования входного окна ускорительной трубки уменьшенного диаметра ($\varnothing 20$ см вместо $\varnothing 26$ см). Как показывает моделирование, при использовании проектных параметров (120 кэВ и $\varnothing 26$ см) должно быть ускорено и проведено к калориметру 100% пучка, подаваемого на вход ускорителя. В 2021 г. предполагается испытать доускорение пучка H^- с напряжением на ускорительной трубке порядка 300 кэВ. Получение пучка быстрых атомов дейтерия на ускорительном стенде инжектора пока не планируется.

Параллельно ведутся работы по сооружению более мощного 9 А, 120-кэВного источника отрицательных ионов водорода, компоновка которого показана на рис. 2. Источник включает в себя четыре ВЧ-драйвера с проектной мощностью 40 кВт каждый (1 на рис. 2), расширительную камеру с периферийным магнитным полем (2 на рис. 2) и ионно-оптическую систему (ИОС) (3 на рис. 2), обеспечивающую вытягивание и ускорение ионного пучка. Генерация отрицательных ионов осуществляется на первом, плазменном, электроде ИОС за счет интенсивной конверсии потока быстрых атомов и ионов из плазмы на его поверхности, покрытой слоем цезия оптимальной толщины.

С помощью периферийных постоянных магнитов вблизи плазменного электрода, параллельно его поверхности, создается дипольное магнитное поле (“магнитный фильтр”). Применение магнитного фильтра ограничивает перенос быстрых электронов из зоны разряда, эффективно снижая их температуру и плотность вблизи плазменного электрода. Для дополнительного снижения потока электронов, вытягиваемых из источника вместе с отрицательными ионами, на

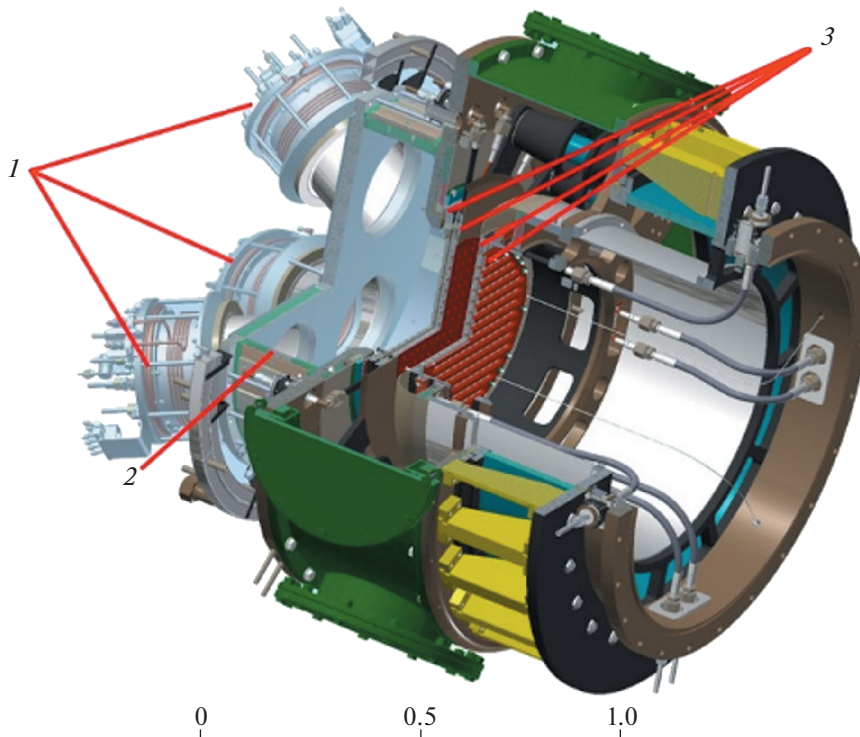


Рис. 2. Многоамперный источник ионов H^- : 1 – четыре ВЧ-драйвера; 2 – расширительная камера; 3 – электроды ИОС.

плазменный электрод подается положительный относительно стенок расширительной камеры потенциал величиной до 40 В, который уменьшает концентрацию электронов в приэлектродной плазме, при этом квазинейтральность поддерживается за счет повышенной концентрации отрицательных ионов (ОИ) вблизи плазменного электрода. Для нанесения цезия на плазменный электрод предполагается использовать цезиевые системы, состоящие из внешних цезиевых печек и нагреваемой распределительной галереи, подающей пары цезия непосредственно на эмиссионную поверхность плазменного электрода. Ионный источник должен обеспечить среднюю эмиссионную плотность вытягиваемого пучка более 30 mA/cm^2 в области диаметром 35 см, что позволит обеспечить формирование пучка отрицательных ионов водорода с током 9 А.

Генерация пучков отрицательных ионов дейтерия из подобных многоапертурных источников [9, 10] осложнена усилением распыления цезия из покрытия на поверхности плазменного электрода при переводе источника на разряд в дейтерий.

Поддержание устойчивого цезиевого покрытия на плазменном электроде в этом случае может быть достигнуто бомбардировкой электрода низкоэнергетичными ионами цезия [11]. Для генерации пучков отрицательных ионов дейтерия в опи-

сываемом источнике ИЯФ предлагается усилить интенсивность облучения плазменного эмиттера ионами цезия за счет его дополнительной подачи в объем ВЧ-драйверов источника (рис. 2). В этом случае распыляемый со стенок ВЧ-драйвера цезий быстро ионизируется разрядом, а его перенос к плазменному электроду обеспечивается перепадом потенциала, создаваемым в плазме между зоной драйвера и плазменным электродом [12]. Для достижения устойчивой работы ионного источника при формировании дейтериевого пучка потребуется соответствующая модификация водородного прототипа и дополнительные эксперименты по оптимизации его параметров.

В рамках работ по инжектору нейтралов был разработан и на отдельном стенде исследован плазменный нейтрализатор с периферийным мультипольным магнитным полем и инверсными пробками на торцах [2]. В экспериментах получена необходимая для обдирки отрицательных ионов толщина плазменной мишени.

3. ВОЗМОЖНАЯ СХЕМА ИНЖЕКТОРА НА ОСНОВЕ ОТРИЦАТЕЛЬНЫХ ИОНОВ ДЛЯ TRT

На основе проведенных в ИЯФ работ предлагается следующая схема инжекции нейтральных пучков с энергией 500 кэВ в TRT, показанная на

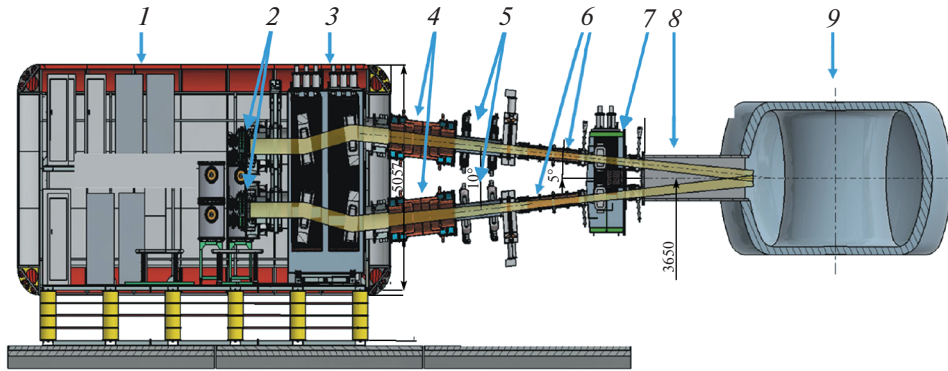


Рис. 3. Схема инъекции нейтральных пучков в TRT (вид сбоку): 1 – высоковольтная платформа; 2 – источники H^- ; 3 – бак LEVT; 4 – ускорительные трубки; 5 – квадрупольные магниты; 6 – нейтрализаторы; 7 – сепаратор; 8 – патрубок TRT; 9 – TRT.

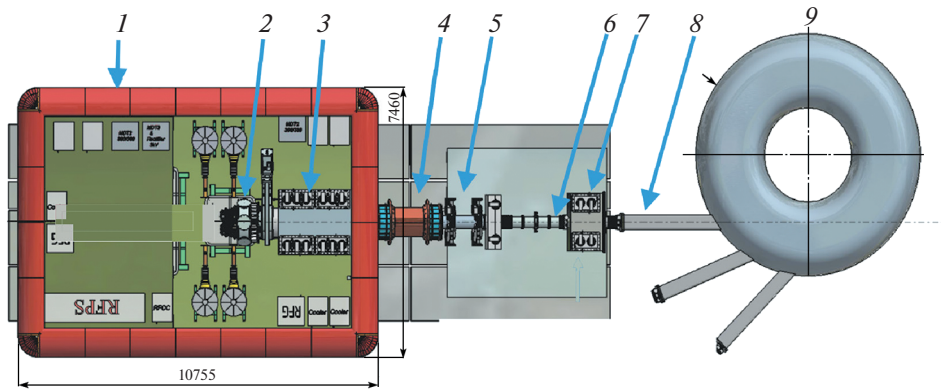


Рис. 4. Схема инъекции нейтральных пучков в TRT (вид сверху): 1 – высоковольтная платформа; 2 – источники H^- ; 3 – бак LEVT; 4 – ускорительные трубки; 5 – квадрупольные магниты; 6 – нейтрализаторы; 7 – сепаратор; 8 – патрубок TRT; 9 – TRT.

рис. 3–5. В каждый инжекционный порт, как показано на рисунках, предлагается инъекция двух пучков быстрых атомов приблизительно круглого сечения. Источники отрицательных ионов (2 на рис. 3 и 4) пристыкованы к вакуумному объему LEVT (3 на рис. 3 и 4) для очистки, поворота и транспортировки пучков.

Ускорительные трубки и нейтрализаторы пучковых линий расположены друг над другом (рис. 3), и работают независимо. Каждая из пучковых линий (ускоритель, квадруполь и плазменная мишень) наклонены под углом 5° к горизонтали. На выходе из инжектора каждый из атомарных пучков направлен вдоль оси ускорителя и фокусируется на входе в плазму токамака. Диаметр каждого из инжектируемых пучков нейтралов на входе в патрубок TRT около 30 см, по вертикали расстояние между центрами пучков – 60 см. Планируемый ток пучка на выходе из каж-

дого ионного источника до 9 А для атомов водорода и до 7.5 А для дейтерия. При 90% эффективности транспортировки пучка через вакуумный объем LEVT и 85% эффективности нейтрализации мощность инъекции двух пучков нейтралов в каждый порт составит ~ 7 МВт (водород) и ~ 5.7 МВт (дейтерий).

Более детально возможная схема двухпучкового тракта одного из инжекторов нейтралов показана на рис. 5. Ионные источники разнесены по высоте на 140 см, и присоединены к танку очистки и транспортировки пучка шиберами ДУ 800 мм. Танк LEVT откачивается четырьмя крионасосами с суммарной скоростью откачки по водороду $2000 \text{ м}^3/\text{с}$. Каждый из пучков отрицательных ионов поворачивается с помощью широкоапертурных дипольных магнитов и фокусируется на вход соответствующей одноапертурной уско-

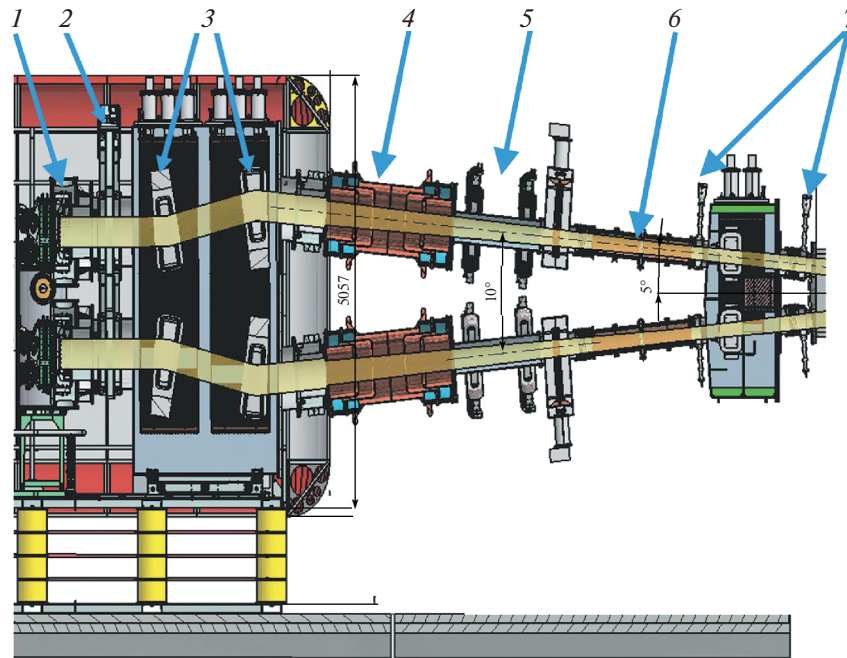


Рис. 5. Схема двухпучкового тракта одного из инжекторов нейтралов в TRT (вид сбоку): 1 – источники ионов H^- ; 2 – шиберы ДУ800; 3 – магниты LEVT; 4 – ускорительные трубки; 5 – квадрупольные магниты; 6 – плазменные нейтрализаторы; 7 – шиберы ДУ350.

рительной трубки. Диаметр каждого из пучков на входе ускорителя 45 см. Для фокусировки пучка на вход плазменной мишени предлагается использовать две квадрупольные линзы.

При использовании газовой обдирочной мишени с эффективностью обдирки 55–60% суммарная мощность двухпучковой инжекции в каждый порт может достигать ~5 МВт (водород) и ~4 МВт (дейтерий). По-видимому, при этом может быть обеспечен запуск и начальная фаза экспериментов на установке TRT. В дальнейшем, увеличение мощности инжекции модуля может быть достигнуто, например, за счет повышения энергии пучка до 700 кэВ. Это потребует некоторого увеличения габаритов ускорительной трубки и тракта пучка высокой энергии. По результатам испытаний полномасштабного ионного источника можно запланировать его модификацию с увеличением тока ионного пучка до 13–14 А, что в свою очередь может повлечь за собой определенное увеличение габаритов пучкового тракта.

4. ИНЖЕКТОР НА ОСНОВЕ ПОЛОЖИТЕЛЬНЫХ ИОНОВ ДЛЯ TRT

Недостаток мощности в рассматриваемой схеме инжектора можно также отчасти компенсировать использованием для нагрева плазмы дополнительных инжекторов на основе положительных ионов. Расстояние от края плазмы до

прицельного радиуса инжекции при выбранном угле инжекции 63° составляет 195 см. При нормальном угле инжекции это расстояние уменьшется до 84 см. Вследствие сокращения расстояния до оси плазмы при нормальной инжекции энергия пучков быстрых атомов дейтерия может быть снижена до 150–200 кэВ. При плотности плазмы 10^{14} см^{-3} и температуре 10 кэВ эффективные сечения ионизации инжектированных атомов дейтерия с энергией 150 и 200 кэВ составляют 2.5×10^{-16} и $1.9 \times 10^{-16} \text{ см}^2$ соответственно [12]. Следовательно, при средней по хорде плотности плазмы 10^{14} см^{-3} можно ожидать, что оси достигнут ~20% частиц пучка.

Пучки быстрых атомов дейтерия с энергией 150–200 кэВ могут быть получены не только в инжекторах на пучках отрицательных ионов, но и в перезарядных инжекторах с использованием начального пучка положительных ионов. Перезарядные инжекторы быстрых атомов дейтерия с энергией до 80–100 кэВ широко применяются для инжекции в большие токамаки. Повышение энергии инжекции до 150–200 кэВ потребует увеличения напуска газа в нейтрализатор, поскольку сечение перезарядки снижается. Кроме того, равновесный выход атомов в нейтрализаторе при такой энергии уменьшается до 20–30%. Для получения эквивалентного тока пучка быстрых атомов 20–30А потребуются ионный источник с током ионов дейтерия ~100 А. Плазменный эмит-

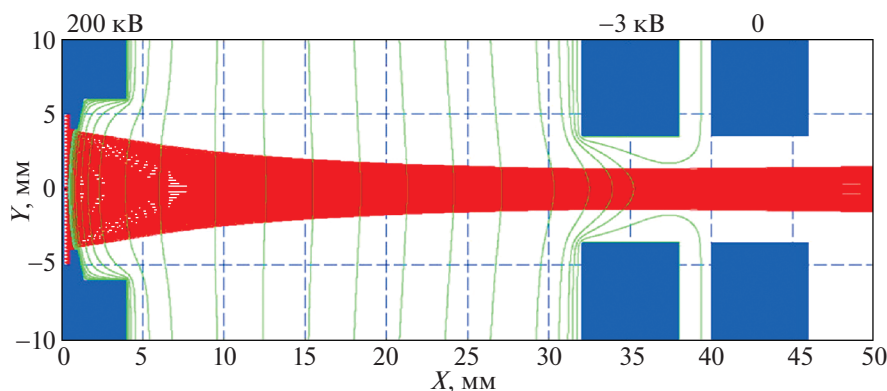


Рис. 6. Эквипотенциалы и траектории ионов дейтерия в отдельной ячейке ионно-оптической системы ионного источника (расчет PBGuns).

тер такого ионного источника может создаваться ВЧ-драйверами, для формирования ионного пучка может быть использована трехэлектродная многоселевая ионно-оптическая система.

На рис. 6 показан полученный в результате численной оптимизации с использованием кода PBGUNS [14] вариант отдельной ячейки ионно-оптической системы источника. При энергии пучка ионов дейтерия 200 кэВ эмиссионная плотность тока в ячейке составляет 220 мА/см², угловая расходимость сформированного пучка в направлении поперек щелей имеет величину ~7 мрад. Ток пучка непerezарядившихся в нейтраллизаторе инжектора ионов составит 70–80 А. Эти ионы отклоняются поворотным магнитом и принимаются интенсивно охлаждаемыми приемниками. Таким образом, повышение энергии инжекции в перезарядных инжекторах потребует использования ионного источника с током до 100 А, повышения скорости откачки и разработки приемников мощных пучков отклоненных ионов, но является вполне достижимым.

Через нормальный инжекционный порт токамака TRT могут быть введены два пучка быстрых атомов дейтерия с энергией 150–200 кэВ с суммарной мощностью до 10 МВт. Хотя нормальная инжекция таких пучков дейтерия не поддерживает ток в токамаке, но обеспечивает ввод мощности и ионов дейтерия в центральную область плазмы токамака.

Следует отметить, что в настоящее время перезарядные инжекторы пучков атомов дейтерия с повышенной энергией также рассматриваются и для наклонной инжекции в компактные токамаки с термоядерными параметрами плазмы. В работе [15] выполнен анализ схемы и параметров инжектора пучка быстрых атомов дейтерия с энергией 140 кэВ и мощностью 3.5 МВт для термоядерного источника нейтронов на основе сферического токамака FNS-ST.

5. О ВОЗМОЖНОСТИ РАБОТЫ С ТРИТИЕМ

Была рассмотрена возможность работы инжекторов установки TRT на тритии и, возможно, на смеси дейтерий-тритий. Основные изменения в конструкции инжектора для работы с тритием должны быть связаны с выполнением требований, по обеспечению радиационной безопасности. Эти требования при работе с тритием регламентируются соответствующими документами [16–18], и должны касаться, прежде всего, систем напуска газа в ионный источник и дегазации всех элементов инжектора. Особенное внимание при этом должно быть уделено разработке систем безопасности и регламентов для работы с крионасосами, на которых конденсируется большое количество трития в рабочем цикле инжектора, а также приемниками остаточных ионов. В системе газонапуска должно быть предусмотрено хранение необходимого количества трития, например, в виде растворенного газа в металле, системы регулировки давления и длительности импульса газа, а также три барьера защиты от попадания трития в атмосферу. В процессе дальнейшей работы над проектом инжекционной системы TRT необходимо будет использовать существующий положительный опыт создания тритиевых систем для экспериментальных установок УТС [19, 20].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ivanov A.A., Abdrashitov G., Anashin V., Belchenko Yu., Burdakov A., Davydenko V., Deichuli P., Dimov G., Dranichnikov A., Kapitonov V., Kolmogorov V., Kondakov A., Sanin A., Shikhovtsev I., Stupishin N., Sorokin A., Popov S., Tiunov M., Belov V., Gorbovsky A., Kobets V., Binderbaue M., Putvinski S., Smirnov A., Sevier L. // Rev. Sci. Instrum. 2014. V. 85. P. 02B102.
2. Емелев И.С., Иванов А.А. // Физика плазмы. 2020. Т. 46. С. 1.

3. *Popov S., Atluhanov M.G., Burdakov A.V., Ivanov A.A., Kolmogorov A.V., Ushkova M.Yu.* // AIP Conf. Proc. 2017. V. 1869. P. 050005.
4. *Krasilnikov A.V., Konovalov S.V., Bondarchuk E.N., Mazul I.V., Rodin I.Yu., Mineev A.B., Kuzmin E.G., Kavin A.A., Karpov D.A., Leonov V.M., Khayrutdinov R.R., Kukushkin A.S., Portnov D.V.* // Plasma Phys. Repts. This issue.
5. *Belchenko Yu., Deichuli P., Ivanov A.A., Sanin A., Sotnikov O.* // AIP Conf. Proc. 2018. V. 2011. P. 080002.
6. *Belchenko Yu., Ivanov A.A., Sanin A., Sotnikov O.* // AIP Confer. Proc. 2017. V. 1869(1). P. 030005.
7. *Sotnikov O., Sanin A., Belchenko Yu., Ivanov A.A., Abdrashitov G., Belavsky A., Gorbovsky A., Donin A., Deichuli P., Dranichnikov A., Kondakov A., Shikhovtsev I.* // AIP Conf. Proc. 2021 (to be published).
8. COMSOL Multiphysics® v. 5.4. www.comsol.com. COMSOL AB, Stockholm, Sweden.
9. *Wunderlich D., Riedl R., Mario I., Mimo A., Fantz U., Heinemann B., Kraus W.* // Rev. Sci. Instruments. 2019. V. 90. P. 113304.
10. *Ikeda K., Tsumori K., Nagaoka K., Nakano H., Kisaki M., Fujiwara Y., Kamio S., Haba Y., Masaki S., Osakabe M.* // Rev. Sci. Instruments. 2019. V. 90. P. 113322.
11. *Tampa G.S., Carr W.E., Seidl M.* // Appl. Phys. Lett. 1986. V. 48. P. 1048.
12. *McNeely P., Dudin S.V., Christ-Koch S., Fantz U., and the NNBI Team* // Plasma Sources Sci. Technol. 2009. V. 18. P. 014011.
13. *Janev R.K., Boley C.D., Post D.E.* // Nuclear Fusion. 1989. V. 29. P. 2125.
14. *Boers J.E.* // J. Vacuum Sci. Technology. 1973. V. 10. P. 1120.
15. *Panasenkov A.A., Ananyev S.S., Dlougach E.D., Kutev B.V.* // 4th Internat. Conf. Fusion-Fission sub-critical systems for waste management and safety. November 25–27, 2020. Moscow, Russia. Book of Abstracts. 2020. P. 25.
16. Нормы радиационной безопасности НРБ-99/2009 // Санитарные правила и нормы СанПиН 2.6.12523-09
17. Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности (ОСПОРБ-99/2010) // Санитарные правила и нормативы СП 2.6.1.2612-10
18. Радиационная безопасность при работе с тритием и его соединениями (СП РБ-РТС-04) // Санитарные правила СП 2.6.1.05-04.
19. *Юхимчук А.А., Виноградов Ю.И., Голубков А.Н., Гришечкин С.К., Дёмин А.М., Дёмин Д.Л., Перевозчиков В.В., Родин А.М., Тер-Акопян Г.М., Харитонов В.М.* // ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез. 2013. Т. 36. Вып. 3. С. 26.
20. *Jones T.T.C., Bickley A.J., Challis C.D., Ciric D., Cox S.J., de Esch H.P.L., Falter H.-D., Godden D.J., Martin D., Stork D., Svensson S.L., Watson M.J., Young D.* // Fusion Engineering Design. 1999. V. 47. P. 205.