

УДК 533.9.08

КОНЦЕПТУАЛЬНЫЙ ПРОЕКТ ДИАГНОСТИЧЕСКОГО ИНЖЕКТОРА ПУЧКА АТОМОВ ВОДОРОДА ДЛЯ ТОКАМАКА TRT

© 2022 г. В. И. Давыденко^{а, *}, А. А. Иванов^а, Н. В. Ступишин^а^а Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия

*e-mail: V.I.Davydenko@inp.nsk.su

Поступила в редакцию 13.03.2022 г.

После доработки 12.05.2022 г.

Принята к публикации 25.05.2022 г.

Представлен концептуальный проект перезарядного диагностического инжектора пучка атомов водорода для токамака TRT. Инжектор предполагается использовать для измерения параметров плазмы в токамаке методами активной спектроскопии. В ионном источнике диагностического инжектора баллистически сфокусированный ионный пучок будет формироваться прецизионной многоапертурной ионно-оптической системой с четырьмя электродами сферической формы. Плазменный эмиттер создается водородной плазмой из дугового генератора, либо из генератора с индуктивным ВЧ-разрядом, расширяющейся в объем с периферийным мультипольным магнитным полем. Эквивалентный ток инжектируемого в плазму TRT пучка атомов водорода с энергией 60 кэВ составит ~4.5 А. При угловой расходимости пучка ~7 мрад и расстоянии ~9 м от ионного источника до центра плазмы токамака диаметр диагностического пучка в зоне измерений будет иметь величину ~13 см на уровне $1/e$. В течение рабочего импульса токамака TRT может быть инжектировано несколько модулированных импульсов диагностического пучка атомов водорода с длительностью ~1 с.

Ключевые слова: активная спектроскопия плазмы, диагностический инжектор пучка быстрых атомов, токамак TRT

DOI: 10.31857/S0367292122100080

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время ведется проектирование квазистационарного токамака с реакторными технологиями (TRT) [1] с высоким магнитным полем (до 8 Тл). Увеличенное магнитное поле должно обеспечить достижение термоядерных режимов плазмы токамака при достаточно малых размерах установки ($R = 2.15$ м, $a = 0.57$ м). TRT предназначен для работы в квазистационарных режимах с водородной, гелиевой и дейтериевой плазмой со средней плотностью до 2×10^{20} м⁻³ и температурой ~10 кэВ.

Для определения параметров плазмы в TRT будут использованы методы активной спектроскопии на пучках быстрых атомов. Эти методы позволяют измерять ионную температуру, скорости вращения плазмы и концентрацию примесей (диагностика CXRS – Charge eXchange Recombination Spectroscopy), флуктуации плотности плазмы (диагностика BES – Beam Emission Spectroscopy) и профиль магнитного поля тока по динамическому эффекту Штарка (диагностика MSE – Motion Stark Effect). В Институте ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН разрабатывается концептуальный проект диагностического инжекто-

ра быстрых атомов водорода для токамака TRT. Разработка ведется с учетом опыта создания серии перезарядных диагностических инжекторов пучков быстрых атомов для современных установок с магнитным удержанием высокотемпературной плазмы [2, 3]. Наиболее подходящими в качестве прототипов инжектора для TRT являются диагностический инжектор RUDI-X для большого стелларатора W-7X [4] и диагностический инжектор ДИНА-КИ60 [5] для токамака Т-15МД. Пучки быстрых атомов водорода этих инжекторов предназначены для проведения измерений методами активной спектроскопии примесей указанного выше набора физических параметров в плазменном шнуре с радиусом 0.5–0.7 м. Инжекторы формируют сфокусированные пучки быстрых атомов водорода с энергией 60 кэВ и эквивалентным током ~2.3–2.4 А. В ионном источнике диагностического инжектора RUDI-X используется плазменный ВЧ-эмиттер, в ионном источнике инжектора ДИНА-КИ60 – плазменный эмиттер с дуговым генератором плазмы. В диагностическом инжекторе RUDI-X пучок быстрых атомов баллистически фокусируется на расстоянии 6 м, в инжекторе ДИНА-КИ60 – на расстоянии 4 м.

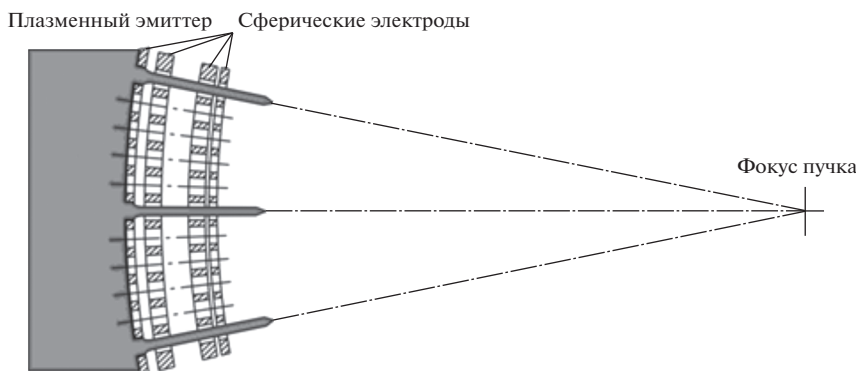


Рис. 1. Схема баллистической фокусировки пучка.

В статье рассмотрен концептуальный проект диагностического инжектора для токамака TRT, с акцентом на выполнение требований, предъявляемых диагностикой CXRS. Обсуждены особенности применения инжектора на токамаке TRT, выбраны расположение и схема инжектора, определены (только для CXRS) основные параметры диагностического пучка, рассмотрены варианты конструкции ионного источника инжектора.

1. ДИАГНОСТИЧЕСКИЕ ИНЖЕКТОРЫ ИНСТИТУТА ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ им. Г.И. БУДКЕРА СО РАН

Особенностью современных диагностических инжекторов Института ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН является использование баллистической фокусировки ионного пучка за счет сферической формы электродов многоапертурной четырехэлектродной ионно-оптической системы. Схема баллистической фокусировки пучка представлена на рис. 1. Эмиссионная плотность тока в ионно-оптической системе выбирается достаточно малой $\sim 110\text{--}130\text{ мА/см}^2$, что в несколько раз меньше эмиссионной плотности тока в ионно-оптических системах мощных инжекторов для нагрева плазмы. Плазменный эмиттер в ионных источниках диагностических инжекторов создается водородной плазмой из дугового генератора, либо из генератора с индуктивным ВЧ-разрядом, расширяющейся в объем с периферийным мультипольным магнитным полем. При сниженной эмиссионной плотности тока зазоры между электродами ионно-оптической системы, соответствующие оптимальному формированию пучка, имеют достаточно большую величину, что приводит к уменьшению аббераций в отдельных ячейках ионно-оптической системы и снижению угловой расходимости отдельных пучков $\delta\alpha$ до $8\text{--}10$ мрад. При фокусировке пучка на расстояние F профиль потока атомов в фокусе выражается как $j(r, F) = I_b \exp(-r^2/(\delta\alpha F)^2)/(\pi\delta\alpha F)^2$, где I_b – полный поток атомов в пучке.

Диагностические инжекторы Института ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН с большой длительностью импульса оборудованы элементами для получения и транспортировки пучка быстрых атомов. Для примера на рис. 2 представлена схема инжектора RUDI для токамака TEXTOR-94 [2]. Слева находится ионный источник, далее – вакуумная камера инжектора с вспомогательными системами, справа показано сечение плазмы в токамаке. Фокус диагностического пучка удален на 4 м от ионного источника и находится вблизи центра плазмы. В вакуумной камере инжектора расположены водоохлаждаемые элементы – нейтрализатор, магнитный сепаратор ионных, приемник отклоненных ионов, подвижный калориметр. Канал нейтрализатора частично заполняется газом, вытекающим из газоразрядной камеры ионного источника, дополнительный напуск осуществляется импульсным газовым клапаном. Магнитный сепаратор и приемник непerezарядившихся ионов установлены внутри вакуумного объема на специальной платформе. Двухступенчатая дифференциальная откачка вакуумного объема производится мощными крионасосами.

2. ВЫБОР ПАРАМЕТРОВ ДИАГНОСТИЧЕСКОГО ИНЖЕКТОРА ДЛЯ ТОКАМАКА TRT

Плазма токамака TRT имеет достаточно высокую плотность, что приводит к заметному ослаблению диагностического пучка. В статье [6] проведено полномасштабное моделирование диагностики CXRS с учетом приведенных далее параметров диагностического пучка и ослабления пучка в плазме и показано, что диагностика будет хорошо работать на диагностическом пучке токамака TRT с энергией 60 кэВ в плазме со средней плотностью $n_e = 1 \times 10^{20}\text{ м}^{-3}$. При $n_e = 2 \times 10^{20}\text{ м}^{-3}$ измерения в центре плазмы будут возможны, но при такой плотности увеличится погрешность измерений.

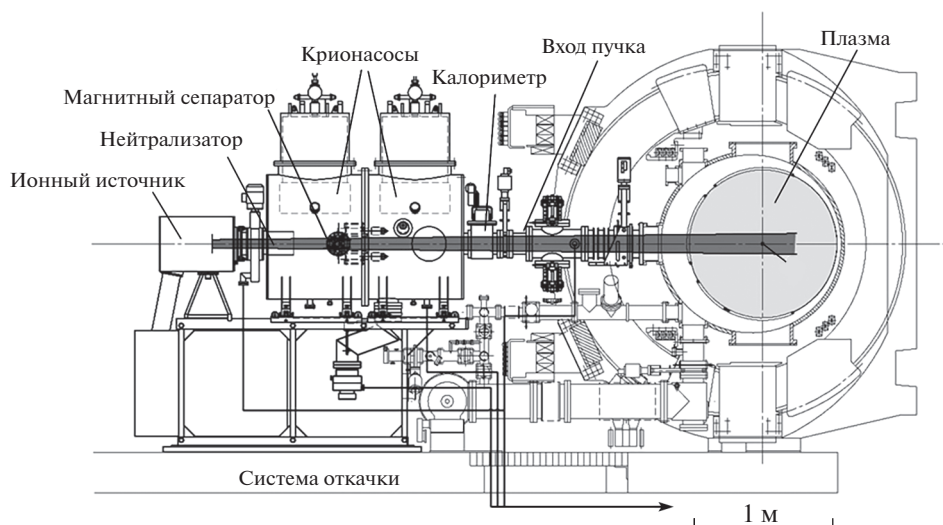


Рис. 2. Диагностический инжектор RUDI на токамаке TEXTOR-94.

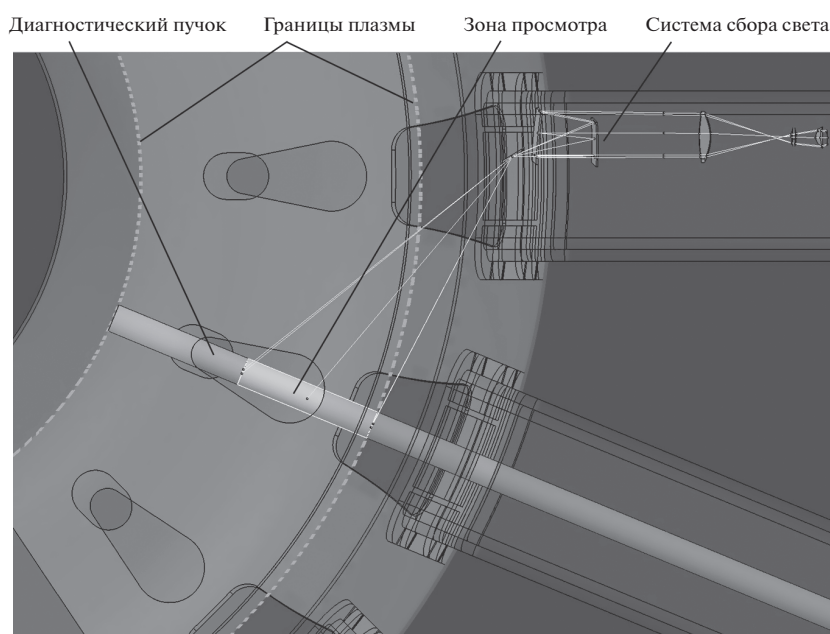


Рис. 3. Схема активной спектроскопии плазмы в камере токамака TRT (вид сверху).

Токамак TRT имеет достаточно длинные патрубки, поэтому расстояние от инжектора до центра плазмы составляет около 9 м. При таком расстоянии и угловой расходимости пучка ~ 7 мрад диаметр пучка (на уровне $1/e$) в центре плазмы TRT будет равен ~ 13 см. Диаметр диагностического пучка в плазме TRT превышает диаметр пучка диагностического инжектора ДИНА-КИ60 в плазме токамака T15-МД. Увеличение диаметра пучка при сохранении потока атомов приведет к уменьшению интегральной линейной плотности диагностического пучка вдоль линии наблюдения. Для повышения линейной плотности следует увеличить поток быстрых атомов, поэтому в

диагностическом пучке TRT эквивалентный ток атомов водорода с энергией 60 кэВ увеличен до 4.5 А. Полный ток водородных ионов из ионного источника инжектора при составе пучка по току ионов $H^+ : H_2^+ : H_3^+ = 85\% : 10\% : 5\%$ будет иметь величину 12 А.

На рис. 3 показана схема активной спектроскопии плазмы в камере токамака TRT (вид сверху). Диагностический пучок атомов водорода инжектируется в плазму через экваториальный радиальный патрубок. Диагностический пучок и оптическая система сбора света расположены в экваториальной плоскости плазмы. Зона просмотра оптической системы находится между

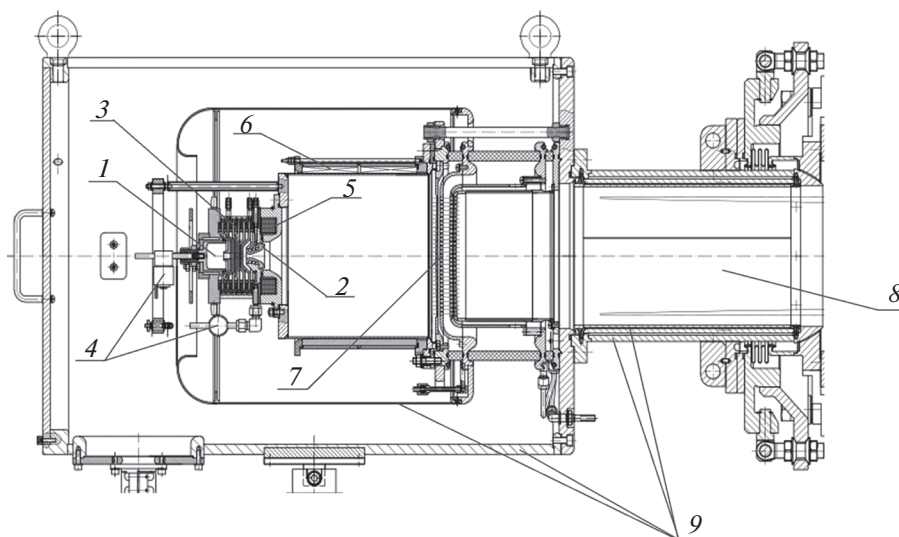


Рис. 4. Ионный источник диагностического инжектора ДИНА-КИ60. 1 – молибденовый катод, 2 – анод, 3 – разрядный канал, 4 – газовый клапан, 5 – соленоид, 6 – экспандер с периферийным магнитным полем, 7 – многоапертурная четырехэлектродная ионно-оптическая система, 8 – нейтрализатор, 9 – магнитные экраны.

входом пучка в плазму и центром плазмы. Оптическая система сбора света расположена внутри соседнего радиального экваториального патрубка. Пространственное разрешение по радиусу для выбранной схемы активной спектроскопии составляет ~1–5 см [6].

Важным вопросом является транспортировка диагностического пучка через длинный инжекционный патрубок. При прохождении интенсивного пучка быстрых атомов через длинный патрубок может произойти запираение пучка [7]. Достаточно сильное магнитное поле в области патрубка отклоняет образующиеся в результате обдирки ионы на стенку. Бомбардировка стенки патрубка быстрыми ионами приводит к выделению сорбированного газа, что увеличивает его плотность в патрубке и вызывает дальнейший рост ионизации пучка. Такой процесс является лавинообразным и критический эквивалентный ток пучка, при превышении которого происходит развитие лавины в патрубке выражается следующим образом: $I_{crit} \approx C_{eff}/(\gamma L \sigma_{01})$, где C_{eff} – эффективная газовая проводимость тракта, γ – коэффициент десорбции газа, σ_{01} – сечение обдирки быстрых атомов водорода. Для прямоугольного инжекционного патрубка TRT с внутренним сечением 60 см × 100 см и длиной 420 см при коэффициенте десорбции $\gamma \approx 3$, соответствующему тракту без специальной обработки стенок, критический эквивалентный ток пучка для адсорбированного водорода оценивается величиной ~110 А. Эта величина существенно больше потока атомов в диагностическом пучке, но, следует учесть, что на стенках патрубка могут адсорбироваться дейтерий и более тяжелые газы.

3. ВАРИАНТЫ ИОННОГО ИСТОЧНИКА ДИАГНОСТИЧЕСКОГО ИНЖЕКТОРА

Схема ионного источника диагностического инжектора ДИНА-КИ60 показана на рис. 4. Плазменный эмиттер в ионном источнике создается струей водородной плазмы из дугового генератора, расширяющейся в объем с периферийным мультипольным магнитным полем. Баллистически сфокусированный ионный пучок формируется многоапертурной четырехэлектродной ионно-оптической системой. Сформированный пучок водородных ионов имеет ток 6 А, энергию 60 кэВ, угловую расходимость 8.5 мрад, фокусное расстояние 4 м. Этот источник можно модифицировать для диагностического инжектора TRT. Для повышения тока пучка из источника эмиссионный диаметр должен быть увеличен до 18 см, что потребует увеличения диаметров плазменного эмиттера и ионно-оптической системы.

Формирование пучка будет производиться многоапертурной четырехэлектродной ионно-оптической системой с круглыми апертурами. Оптимизированный расчетный вариант отдельной ячейки ионно-оптической ячейки с квазипирсовскими фасками на плазменном электроде показан на рис. 5. При оптимальной плотности тока водородных ионов 120 мА/см² угловая расходимость отдельного пучка составляет 6.5 мрад. При использовании щелевых апертур вместо круглых отверстий можно снизить угловую расходимость в направлении вдоль щелей, поскольку aberrации вдоль щелей отсутствуют и расходимость определяется только температурой ионов плазменного эмиттера. При замене в диагностическом инжекторе RUDI круглых апертур на щелевые угловая расходимость вдоль щелей снизи-

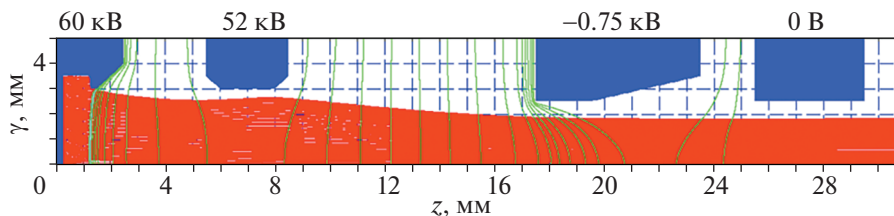


Рис. 5. Траектории ионов в оптимизированном варианте ионно-оптической системы.

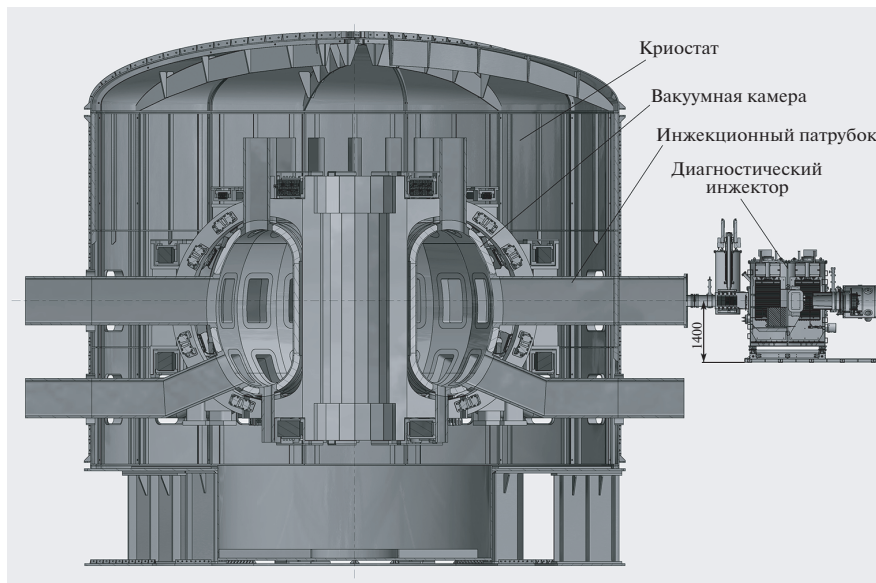


Рис. 6. Расположение диагностического инжектора на TRT.

лась на 20% [8]. Сужение диагностического пучка в направлении вдоль щелей повысит интенсивность активного сигнала из плазмы TRT.

Элементы разрядного канала дугового генератора подвергаются эрозии и примерно через год требуют замены. Для повышения ресурса плазменного эмиттера целесообразно вместо дугового генератора использовать индуктивный ВЧ-драйвер. В работе [9] представлен плазменный эмиттер с ВЧ-драйвером и расширителем. В этом эмиттере внутри эмиссионного диаметра 16 см плотность тока водородных ионов составляет 120 mA/cm^2 , содержание протонов на уровне 80%.

Суммарная длительность импульса пучка 10 с в основном ограничена ростом температуры электродов ионно-оптической системы. Электроды ионно-оптической системы не имеют каналов для интенсивного водяного охлаждения и охлаждение электродов происходит инерционным способом. Во время формирования пучка прирост температуры электродов ограничивается теплоемкостью электродов, после окончания формирования пучка, тепло с электродов передается на водоохлаждаемые держатели. Такой способ охлаждения ограничивает суммарную длительность модулированных с коэффициентом заполнения 0.5 импульса за

время импульса TRT величиной 10 с. Отметим, что такая длительность модулированного импульса пучка была экспериментально получена на диагностическом инжекторе RUDI с плазменным эмиттером на основе дугового генератора.

В дуговом генераторе плазмы анод и катод интенсивно охлаждаются водой, температура диафрагм разрядного канала ограничивается теплоемкостью и периферийным водяным охлаждением. В плазменном эмиттере на основе ВЧ-разряда антенна, стенки камеры и фарадеевский экран имеют водяное охлаждение. В настоящее время разработаны и экспериментально испытаны плазменные эмиттеры с длительностью импульса 20 с.

4. РАСПОЛОЖЕНИЕ ДИАГНОСТИЧЕСКОГО ИНЖЕКТОРА НА TRT

На рис. 6 показано расположение диагностического инжектора на TRT. Диагностический инжектор присоединен к экваториальному радиальному патрубку TRT. Вид вакуумной камеры диагностического инжектора с системой откачки и элементами пучкового тракта на рисунке взят от недавно разработанного в Институте ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН 80 кэВ, 1 МВт инжектора сфокусированного пучка быстрых

Таблица 1. Основные параметры диагностического инжектора TRT

Энергия атомов	60 кэВ
Рабочий газ	Водород
Ток ионов из источника	12 А
Состав пучка по току ионов H^+ , H_2^+ , H_3^+ из ионного источника с дуговым генератором плазмы, %	85:10:5
Эквивалентный ток пучка атомов водорода с энергией 60 кэВ	4.5 А
Угловая расходимость пучка (круглые апертуры)	7 мрад
Фокусное расстояние	9 м
Диаметр пучка в центре плазмы TRT на уровне 1/е	13 см
Диаметр пучка на входе в плазму TRT на уровне 1/е	12 см
Начальный диаметр ионного пучка	18 см
Модуляция (внешняя)	5–50 Гц
Суммарная длительность импульсов пучка в импульсе TRT	до 10 с

атомов дейтерия для нагрева плазмы. Предполагается, что разработанная в дальнейшем конструкция вакуумной камеры диагностического инжектора для TRT с системой откачки и элементами пучкового тракта будет близка к соответствующей конструкции этого инжектора для нагрева плазмы.

Ионный источник и нейтрализатор должны быть заэкранированы от рассеянного магнитного поля TRT. В области инжектора магнитное поле от токамака TRT в основном создается током в плазме и полоидальными катушками. Это поле имеет вертикальное направление и его напряженность составляет 15–30 мТл. Такое магнитное поле может быть заэкранировано двойными магнитными экранами. Внешний экран стальной, внутренний – из отожженного пермаллоя.

В табл. 1 представлены основные параметры диагностического инжектора для токамака TRT.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленный концептуальный проект диагностического инжектора сфокусированного пучка атомов водорода для токамака TRT представляется вполне реализуемым. Дальнейшая работа по проекту инжектора может состоять в уточнении параметров диагностического пучка для измерений по динамическому эффекту Штарка, детальной разработке ионного источника, оптимизации и проектированию элементов инжектора, выборе систем питания и контроля, проведении экспериментальных исследований по формированию и транспортировке пучка. Для повышения плотности тока пучка в зоне измерений следует рассмотреть возможность уменьшения расстояния между ионным источником инжектора и плазмой токамака TRT.

Авторы выражают благодарность А.В. Брулю за проведение расчетов ячейки ионно-оптической системы и С.Н. Тугаринову за полезные обсуждения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Красильников А.В., Коновалов С.В., Бондарчук Э.Н., Мазуль И.В., Родин И.Ю., Минеев А.Б., Кузьмин Е.Г., Кавин А.А., Карпов Д.А., Леонов В.М., Хайрутдинов Р.Р., Кукушкин А.С., Портнов Д.В., Иванов А.А., Бельченко Ю.И., Денисов Г.Г. // Физика плазмы. 2021. Т. 47. С. 970. <https://doi.org/10.31857/S0367292121110196>
2. 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., Сорokin 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>
3. Davydenko V.I., Ivanov A.A. // Rev. Sci. Instrum. 2004. V. 75. P. 1809. <https://doi.org/10.1063/1.1699461>
4. Davydenko V., Deichuli P., Ivanov A., Stupishin N., Kapitonov V., Kolmogorov A., Ivanov I., Sorokin A., Shikhovtsev I. // AIP Conf. Proc. 2016. V. 1771. 030025. <https://doi.org/10.1063/1.4964181>
5. Stupishin N.V., Deichuli P.P., Ivanov A.A., Abdrashitov A.G., Abdrashitov G.F., Rashenko V.V., Zubarev P.V., Gorbovsky A.I., Mishagin V.V., Kapitonov V.A., Krupin V.A., and Tilin G.N. // AIP Conf. Proc. 2016. V. 1771. 050012. DOI:10.1063/1.4964206
6. Серов С.В., Тугаринов С.Н., Серов В.В., Крупин В.А., Земцов И.А., Красильников А.В., Кузьмин Н.В., Павлова Г.С., Науменко Н.Н. // Физика плазмы. 2022. Т. 48. № 8. С.
7. Riviere A.C. and Sheffield J. // Nucl. Fusion. 1975. V. 15. P. 944. <https://doi.org/10.1088/0029-5515/15/5/024>
8. Listopad A., Coenen J., Davydenko V., Ivanov A., Mishagin V., Savkin V., Schweer B., Shul'zhenko G., Uhlemann R. // Rev. Sci. Instrum. 2012. V. 83. 02B707. DOI: 10.1063/1.3669794
9. Shikhovtsev I.V., Averbukh I.I., Ivanov A.A., Mishagin V.V., Podyminogin A.A. // Fusion Engineering and Design. 2007. V. 82. P. 1282. <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2007.04.048>