

ИССЛЕДОВАНИЕ КОНВЕРСИОННОЙ ПЛАЗМЕННОЙ МИШЕНИ С МУЛЬТИПОЛЬНЫМ МАГНИТНЫМ ПОЛЕМ

© 2020 г. И. С. Емелев^{а,*}, А. А. Иванов^а

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

*e-mail: I.S.Emelev@inp.nsk.su

Поступила в редакцию 04.03.2019 г.

После доработки 22.06.2019 г.

Принята к публикации 22.08.2019 г.

В ИЯФ им. Г.И. Будкера ведется работа по созданию конверсионной плазменной мишени для инжекторов атомов водорода с энергией 0.5–1 МэВ. В статье описаны результаты экспериментов, проведенных на прототипе плазменной мишени длиной 1 м, предназначенном для нейтрализации пучка с током ~1 А. Плазма в мишени удерживается с помощью мультипольного магнитного поля.

Ключевые слова: плазменная мишень, мультипольная магнитная ловушка, диагностический атомарный пучок, степень ионизации плазмы, время удержания плазмы в ловушке

DOI: 10.31857/S0367292120010060

1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время инжекция пучков быстрых атомов изотопов водорода является одним из важнейших методов поддержания и нагрева плазмы в термоядерных ловушках с магнитным удержанием. Требуемая энергия атомарных пучков составляет ~1 МэВ, а мощность ~10–100 МВт. В ИЯФ СО РАН ведется работа по созданию инжектора атомов водорода с энергией 1 МэВ с током ~10 А [1]. Для нейтрализации ускоренного пучка отрицательных ионов водорода предполагается использовать плазменный нейтрализатор.

Известно, что максимальный выход атомов в плазменной мишени можно получить при использовании в качестве мишени полностью ионизированной водородной (или дейтериевой) плазмы. Для получения максимального выхода атомов линейная толщина мишени должна быть $n_{pl}l \approx 3.7 \times 10^{15} \text{ см}^{-2}$ при энергии инжектируемого пучка 1 МэВ [2]. При разумной длине нейтрализующей мишени (порядка метра), плотность плазмы в мишени должна быть $n_{pl} \geq 10^{13} \text{ см}^{-3}$. Кроме того, для получения максимального выхода атомов необходимо, чтобы примесь нейтральных частиц в плазме была невелика. Для водородной плазменной мишени это условие не слишком жесткое. Так, для степени ионизации 50% выход атомов снижается на ~3.5% от максимального.

Для того чтобы плазменная мишень была пригодной для использования в инжекторах атомов, необходимо прежде всего осуществить стацио-

нарный режим работы мишени. Для этого требуется увеличить эффективность генерации и поддержания плазмы в мишени. Существенным фактором также является поток газа в вакуумную систему инжектора нейтралов, создаваемый мишенью, который также снижается, если плазма в мишени удерживается магнитным полем.

Работы по созданию плазменной нейтрализующей мишени были начаты в 70-х годах после появления работы [3]. В 80-х годах работы по созданию плазменных нейтрализаторов проводились в СССР [2] и США [4, 5]. В [2] исследовалась импульсная струйная плазменная мишень, в которой был получен выход атомов 84.5% при энергии 0.5 МэВ. В начале 90-х годов в США и Великобритании проводились эксперименты на моделях плазменных нейтрализаторов с ВЧ-генерацией плазмы [6, 7]. В 2000-х годах эксперименты по нейтрализации пучков отрицательных ионов водорода проводились в Японии [8, 9]. В Курчатовском институте с 90-х годов разрабатывается плазменная мишень для инжекторов токамака ИТЭР [10, 11]. В США действует установка WiPAL для исследования астрофизических плазменных процессов [12]. В этой установке получена плазма с параметрами, требуемыми для реализации плазменной нейтрализующей мишени.

Нами исследовалась мишень, представляющая собой плазменную ловушку с мультипольными магнитными стенками. Такая мишень может быть использована для нейтрализации пучка отрицательных ионов с током ~1 А.

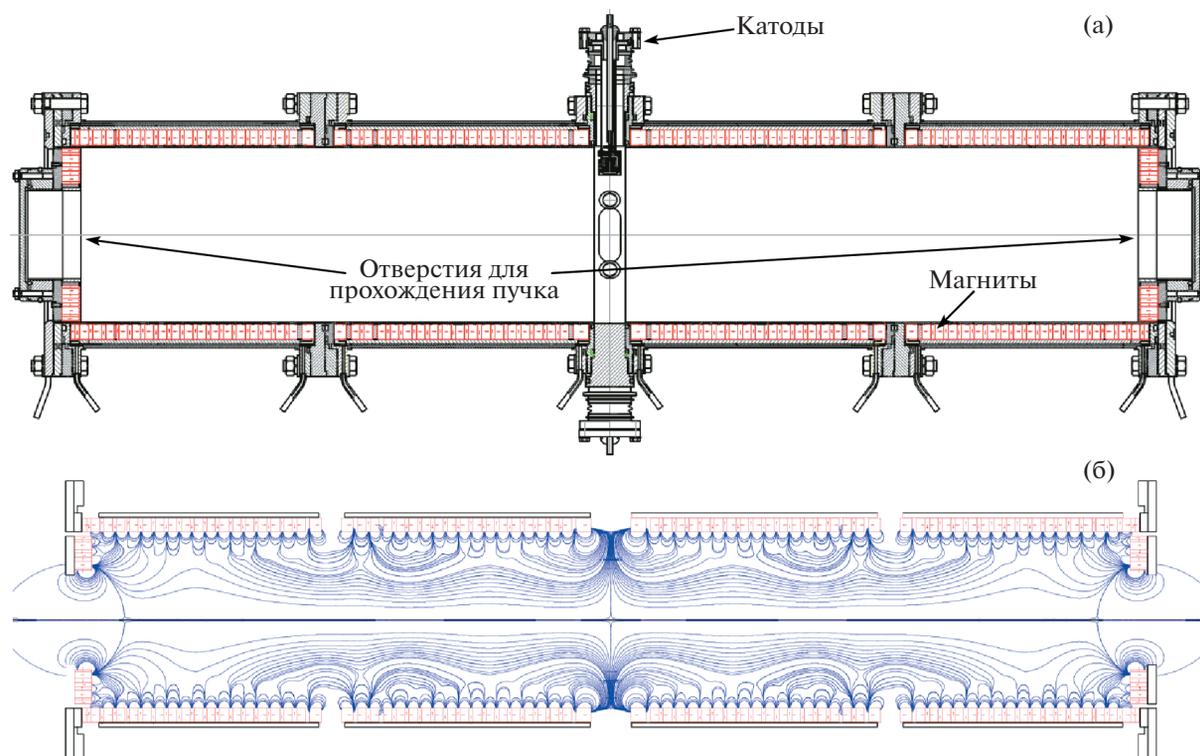


Рис. 1. а) – Схема плазменной ловушки-мишени; б) – магнитное поле мишени (показаны железный магнитопровод, положение магнитов и силовые линии магнитного поля).

2. ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Ловушка представляет собой цилиндрическую камеру длиной 120 см и диаметром 20 см. В торцах цилиндра расположены отверстия диаметром 10 см, которые предназначены для прохождения нейтрализуемого пучка. Ловушка состоит из двух частей, зеркально симметричных относительно центрального сечения. Плазма генерируется ионизацией газа электронами, эмитируемыми катодами, расположенными в центральном сечении ловушки. Используется 6 катодов в виде таблеток из LaV_6 с косвенным подогревом, расположенных равномерно по окружности на некотором расстоянии от области прохождения нейтрализуемого пучка. Общий вид ловушки и геометрия магнитного поля в ней показаны на рис. 1.

Магнитное поле формируется в ловушке постоянными магнитами, устанавливаемыми вплотную на тонкостенную вакуумную камеру, и железным ярмом. Магниты с одним направлением намагниченности сгруппированы в сборку, имеющую форму кольца. Кольца из магнитов устанавливаются на цилиндрическую вакуумную камеру таким образом, чтобы направления намагниченности колец последовательно чередовались. Таким образом, внутри вакуумной камеры вблизи стенки формируется сильное мультипольное осесимметричное магнитное поле. Величина

магнитного поля на стенке вакуумной камеры имеет величину ~ 7 кГс. Такая геометрия магнитного поля обеспечивает МГД-устойчивость плазмы в ловушке.

В центральной области каждой из половин ловушки формируется продольное магнитное поле величиной ~ 100 Гс. В отверстиях в торцах ловушки формируется магнитное поле, направленное противоположно по отношению к магнитному полю в центральной части соответствующей половины ловушки. Это обратное магнитное поле должно эффективно ограничивать уход частиц плазмы в торцевые отверстия за счет сохранения частицами обобщенного момента импульса в осесимметричном магнитном поле [13, 14]. Проведено моделирование траектории частиц нейтрализуемого пучка при прохождении через ловушку. Магнитное поле ловушки действует на пучок как слабая фокусирующая линза.

Исследование плазменной мишени проводилось на установке, схематически показанной на рис. 2. С каждой стороны к ловушке присоединяются объемы, через которые идет откачка газа и устанавливается диагностическое оборудование. Питание разряда могло осуществляться от двух различных систем питания. Одна из них позволяла получать импульсы длительностью до 1 с и мощностью 55 кВт. Другая, на основе формирующей

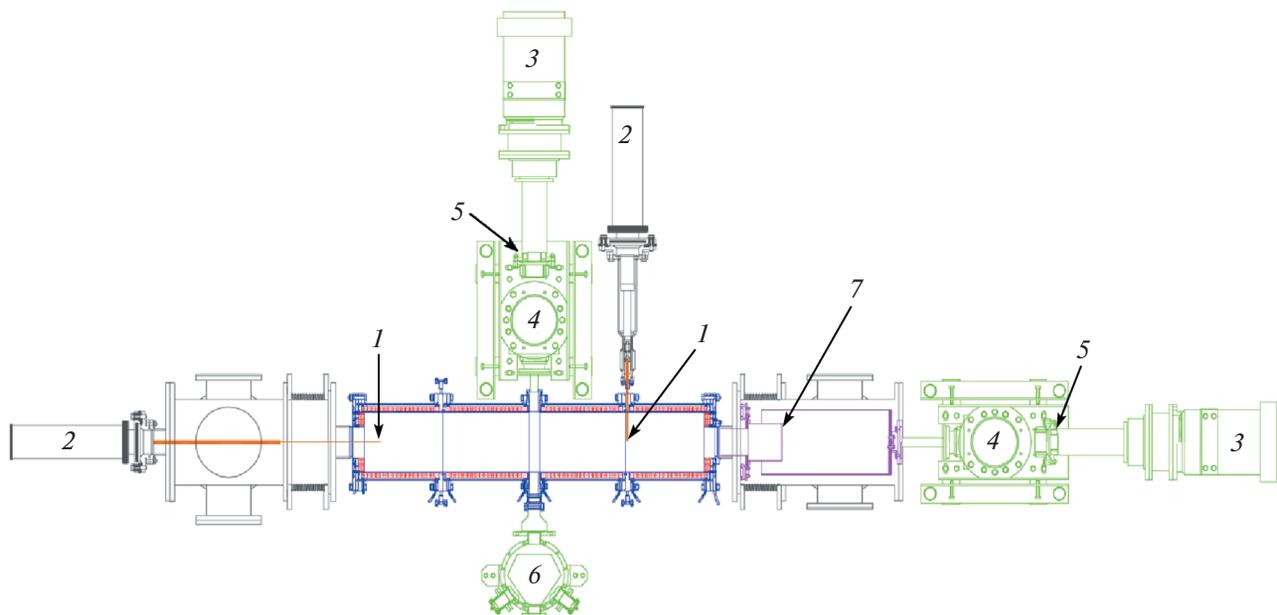


Рис. 2. Схема установки: 1 – зонды; 2 – подвижка зонда; 3 – инжектор атомарного пучка Дина-4; 4 – дополнительный вакуумный объем; 5 – место установки дополнительного электромагнита; 6 – анализатор пучка; 7 – измеритель потока.

шей линии, имела длительность импульсов 1 мс с мощностью до 250 кВт.

Большая часть описанных экспериментов проводилась с использованием импульсной системы питания с длительностью работы 1 мс. Напряжение разряда составляло 200–300 В, ток разряда до 800 А. Использование коротко-импульсной системы питания позволяет быстро (за время ~5 мкс) отключать напряжение с разрядного промежутка. При этом по прямому наблюдению распада плазмы может быть определено время жизни плазмы в ловушке. С использованием длинно-импульсной системы питания получен разряд длительностью 1 с. Напряжение разряда в этом случае 300 В, ток разряда до 180 А. Рабочий газ (водород) напускался в центр ловушки импульсным клапаном с длительностью 1–10 мс (для коротких импульсов) и 1 с (для длинных импульсов).

3. МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ

На установке имеется ряд диагностик для измерения параметров плазмы и степени ионизации плазмы в ловушке. Плотность плазмы и электронная температура измерялись при помощи зондов. На установке предусмотрен продольный зонд, который вводится в ловушку вдоль оси в одно из торцевых отверстий, и поперечные зонды, вводимые в ловушку поперек оси (рис. 2).

Плотность плазмы и степень ионизации определялась при зондировании плазмы диагностическим атомарным пучком диагностического ин-

жектора [15]. Длительность диагностического пучка атомов с энергией 5–18 кэВ и током ~1 А составляла 100 мкс. В вакуумном объеме диагностического инжектора установлен электромагнит (5), который позволял отклонить заряженные фракции пучка для получения пучка атомов водорода. Начальный пучок, состоящий из атомов водорода, проходя через плазму в ловушке, частично перезаряжается и попадает в магнитный анализатор. Пучок разделяется в анализаторе на три составляющие: атомы, протоны и отрицательные ионы водорода. Заряженные составляющие пучка регистрируются в анализаторе цилиндрами Фарадея. Атомарная составляющая регистрируется при помощи вторично-эмиссионного датчика.

Предусмотрено две постановки эксперимента. В первой из них плазма зондируется атомарным пучком вдоль установки, через отверстия, предназначенные для прохождения нейтрализованного пучка отрицательных ионов водорода. В этой постановке эксперимента определяются линейная плотность плазмы и степень ионизации, усредненная по длине ловушки. Во второй постановке эксперимента диагностический инжектор и анализатор пристыковывались в центре ловушки с противоположных сторон. При этом измерялась линейная плотность плазмы и степень ионизации в центре ловушки, усредненная по диаметру.

Полный поток плазмы, вытекающий в выходное отверстие, измерялся плазмодриемником, на который подавалось напряжение смещения для отталкивания электронов плазмы. Плазмодрием-

ник конструктивно состоит из двух цилиндров, вставленных друг в друга с большим радиальным зазором. Такая конструкция не снижает газовой проводимости выходного отверстия и позволяет измерять поток плазмы, не изменяя газовых условий в выходном отверстии.

4. ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ДИАГНОСТИЧЕСКОГО ПУЧКА С ПЛАЗМОЙ И ГАЗОМ В МИШЕНИ

Для создания плазмы в ловушку заранее напускался газ, а затем поджигался разряд. Для интерпретации результатов измерений диагностическим пучком необходимо рассмотреть взаимодействие диагностического пучка с мишенью, представляющей собой смесь газа и плазмы. Нами была разработана программа, позволяющая рассчитывать состав пучка при одновременном взаимодействии пучка с газом и плазмой в мишени. Расчет взаимодействия пучка со смесью газа и плазмы проводился численным решением системы уравнений

$$\begin{aligned} \frac{\partial N^0(l)}{\partial l} &= n_{gas} \left[\sum_{j=i,p} N^j \sigma_{j0} - \sum_{j=i,p} N^0 \sigma_{oj} \right] + \\ &+ n_{pl} \left[\sum_{j=i,p} N^j \sigma_{j0}^p - \sum_{j=i,p} N^0 \sigma_{oj}^p \right], \\ \frac{\partial N^p(l)}{\partial l} &= n_{gas} \left[\sum_{j=i,0} N^j \sigma_{jp} - \sum_{j=i,0} N^p \sigma_{pj} \right] + \\ &+ n_{pl} \left[\sum_{j=i,0} N^j \sigma_{jp}^p - \sum_{j=i,0} N^p \sigma_{pj}^p \right], \\ \frac{\partial N^i(l)}{\partial l} &= n_{gas} \left[\sum_{j=0,p} N^j \sigma_{ji} - \sum_{j=0,p} N^i \sigma_{ij} \right] + \\ &+ n_{pl} \left[\sum_{j=0,p} N^j \sigma_{ji}^p - \sum_{j=0,p} N^i \sigma_{ij}^p \right]. \end{aligned} \quad (1)$$

Здесь n_{gas} – плотность газа в мишени; n_{pl} – плотность плазмы в мишени; $N^0(l)$, $N^p(l)$, $N^i(l)$ – доли частиц пучка в состоянии атома, протона и отрицательного иона после прохождения мишени длиной l ; σ_{12} – сечение процесса, в результате которого частица пучка переходит из состояния 1 в состояние 2. Индексами 0, p , i обозначены величины, относящиеся к атомам, протонам и отрицательным ионам соответственно.

Из расчета можно получить величины фракций пучка в зависимости от линейной плотности газа и плазмы. В расчете предполагалось, что плазма состоит из протонов и электронов, а газ состоит из молекул H_2 . В водородной плазме ионы могут находиться в состояниях H^+ , H_2^+ , H_3^+ .

Относительные доли компонент различных ионов в плазме зависят от величины $n\tau$ (где τ – время жизни плазмы). Как будет показано далее, время жизни плазмы в наших условиях $\tau \approx 50$ мкс, $n \approx 1 \times 10^{13}$ см⁻³. При этих условиях относительные доли компонент ионов H_2^+ и H_3^+ много меньше доли ионов H^+ [16].

4.1. Инжекция диагностического пучка вдоль оси установки

В случае инжекции атомарного пучка вдоль ловушки длина мишени равна 120 см. Расчетные зависимости доли атомов (в процентах от тока инжектируемого пучка) от плотности плазмы (n_{pl}) и степени ионизации $t = n_{pl}/(n_{pl} + n_{gas})$ приведены на рис. 3а. Степень ионизации $t = 0$ соответствует инжекции атомарного пучка в газ, а степень ионизации $t = 1$ соответствует инжекции атомарного пучка в полностью ионизованную плазму. Из ослабления атомарного пучка не полностью ионизованной плазмой можно определить нижний порог на степень ионизации плазмы для случая, когда плотность плазмы $n_{pl} \geq 2 \times 10^{12}$ см⁻³. В таком случае доля атомов в прошедшем пучке $N^0 < 85\%$, эта область показана на рис. 3 серым фоном.

Также мы в состоянии определить минимально возможную плотность плазмы. Для данной величины ослабления атомарного пучка плотность плазмы не может быть меньше, чем вычисленная для случая полной ионизации. Определенный таким образом нижний порог плотности плазмы может сильно отличаться от действительной плотности плазмы, если степень ионизации сильно отличается от 1.

Степень ионизации плазмы можно определить и другим способом. При инжекции атомарного пучка в не полностью ионизованную плазму образуются отрицательные ионы. Образование отрицательных ионов происходит при взаимодействии атомов пучка с молекулами газа, а разрушение отрицательных ионов происходит преимущественно при взаимодействии их с частицами плазмы вследствие разницы в величинах сечений разрушения отрицательного иона водорода. На рис. 3б показана рассчитанная доля отрицательных ионов как функция плотности плазмы и степени ионизации для случая инжекции пучка атомов водорода в не полностью ионизованную плазму. Доля отрицательных ионов достигает своего равновесного значения при плотности плазмы $n_{pl} \leq 1 \times 10^{12}$ см⁻³ (для длины мише-

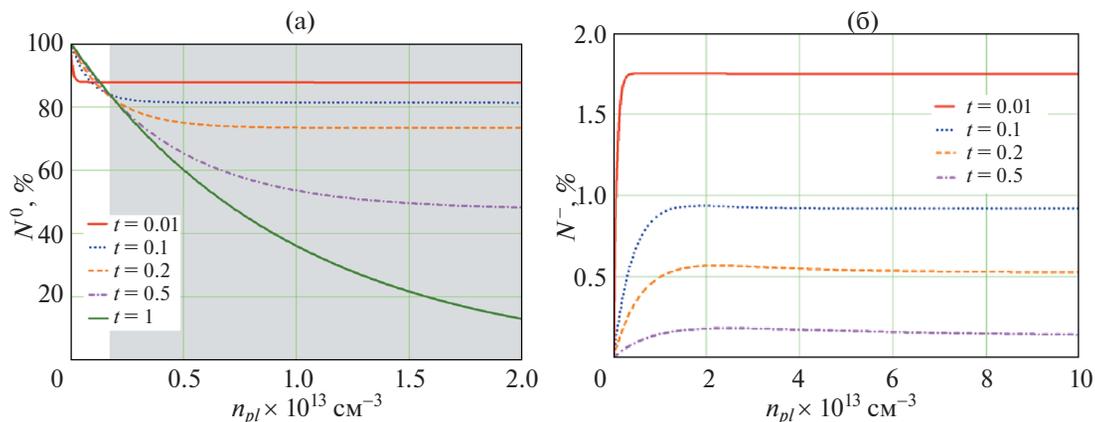


Рис. 3. Доля частиц пучка в состоянии атома (а) и в состоянии отрицательного иона (б) при инъекции диагностического пучка вдоль оси ловушки.

ни 120 см) и очень чувствительна к степени ионизации плазмы. В интересующем нас диапазоне значений плотности плазмы доля частиц пучка в состоянии отрицательного иона слабо зависит от плотности плазмы.

4.2. Инжекция диагностического пучка поперек оси установки

В случае инъекции пучка поперек оси ловушки качественная зависимость доли атомов от плотности плазмы и степени ионизации не изменяется, но интересующие нас плотности плазмы лежат в другой области на графике. Для того чтобы выход атомов в интересующем нас диапазоне плотностей плазмы был более чувствителен к степени ионизации плазмы, энергия диагностического пучка была снижена до 5 кэВ. Расчетные за-

висимости доли атомов (в процентах от тока инжектируемого пучка) от плотности плазмы n_{pl} и степени ионизации t при инъекции атомарного пучка приведены на рис. 4. В этом случае по ослаблению атомарного пучка может быть определен нижний порог плотности плазмы, как и в случае зондирования плазмы вдоль оси установки. Степень ионизации плазмы может быть определена, если плотность плазмы, усредненная по диаметру ловушки, известна из зондовых измерений.

5. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Основная часть экспериментов проведена с использованием короткоимпульсной системы питания. На первом этапе мощность разряда не превышала 180 кВт, при этом были проведены измерения степени ионизации при инъекции вдоль и поперек оси установки. После модернизации системы питания мощность разряда удалось поднять до 220 кВт, при этом степень ионизации определялась при инъекции пучка поперек оси установки. Характерные сигналы напряжения и тока разряда показаны на рис. 5. Питание разряда в этом случае осуществляется от формирующей линии, поэтому после подачи напряжения на разрядный промежуток появляется выброс напряжения на разряде величиной до 1 кВ. Через несколько сотен микросекунд (после заполнения плазмой ловушки) ток разряда нарастает до постоянного значения, напряжение разряда также стабилизируется. Все измерения были проведены в момент времени 1 мс после начала разряда.

5.1. Результаты зондовых измерений

Параметры плазмы, измеренные зондом в центре ловушки на оси, приведены на рис. 6. На рис. 6а показана плотность плазмы в зависимости

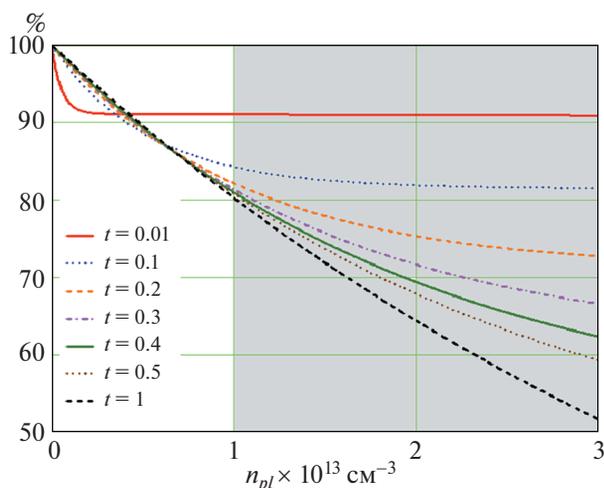


Рис. 4. Доля частиц пучка в состоянии атома при инъекции диагностического пучка поперек оси ловушки.

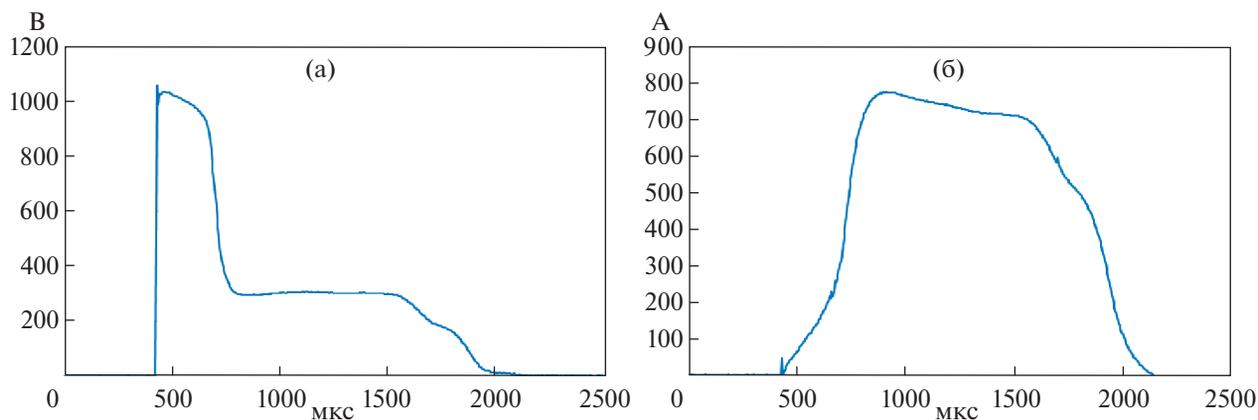


Рис. 5. а) – Напряжение разряда, б) – ток разряда при использовании коротко импульсной системы питания.

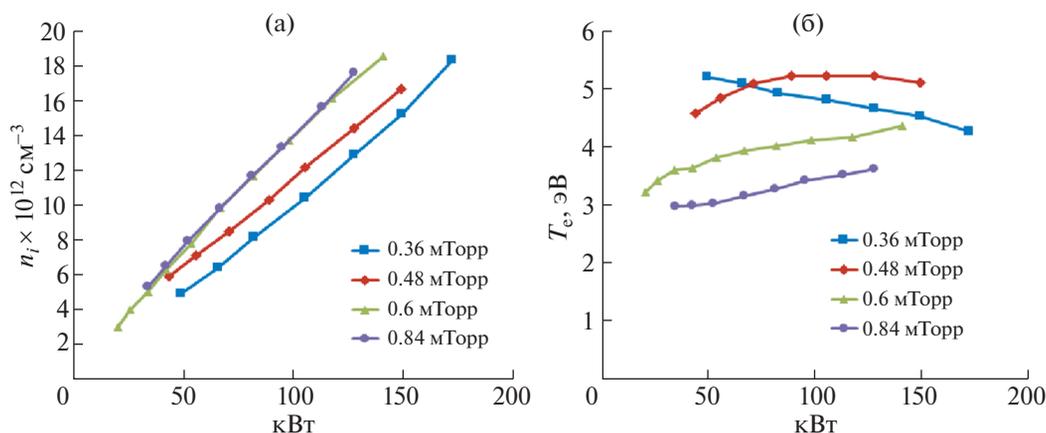


Рис. 6. Зависимость параметров плазмы от мощности разряда: а) – плотность плазмы; б) – электронная температура в зависимости от мощности разряда.

от мощности, вводимой в разряд. Приведены значения для нескольких плотностей газа перед разрядом. Плотность плазмы линейно зависит от вводимой мощности. При мощности ~ 150 кВт в ловушке достигается плотность плазмы $n_i \sim 2 \times 10^{13} \text{ см}^{-3}$.

На рис. 6б показаны зависимости электронной температуры от мощности, вводимой в разряд, при различных давлениях газа перед разрядом. Электронная температура увеличивается при уменьшении плотности газа перед разрядом до величины ~ 0.5 мТорр. При дальнейшем уменьшении плотности напускаемого газа изменяется режим разряда. При этом напряжение разряда значительно увеличивается, а ток разряда уменьшается. Наибольшая степень ионизации плазмы получена при давлении напускаемого газа $0.5\text{--}0.6$ мТорр. Электронная температура в центре ловушки в этом случае составляет $T_e \approx 4\text{--}5$ эВ.

Поперечными зондами было измерено распределение параметров плазмы по радиусу. На рис. 7 показаны профили плотности плазмы и электронной температуры, измеренные зондами в центральном сечении ловушки и на расстоянии $1/4$ длины ловушки от центра. Радиус вакуумной камеры равен 10 см. Плотность плазмы максимальна в центре ловушки и спадает с расстоянием от оси приблизительно линейно. Плотность плазмы на удалении от центра ловушки имеет в ~ 2 раза меньшую величину и небольшую неоднородность ($\sim 15\%$) в области прохождения нейтрализуемого пучка ($r = 5$ см). Электронная температура на удалении от центра ловушки имеет значительно большую величину и достигает 7 эВ.

Время жизни плазмы в ловушке было измерено при быстром отключении напряжения питания разряда. При таком отключении плотность плазмы экспоненциально уменьшается с характерным временем 45 мкс.

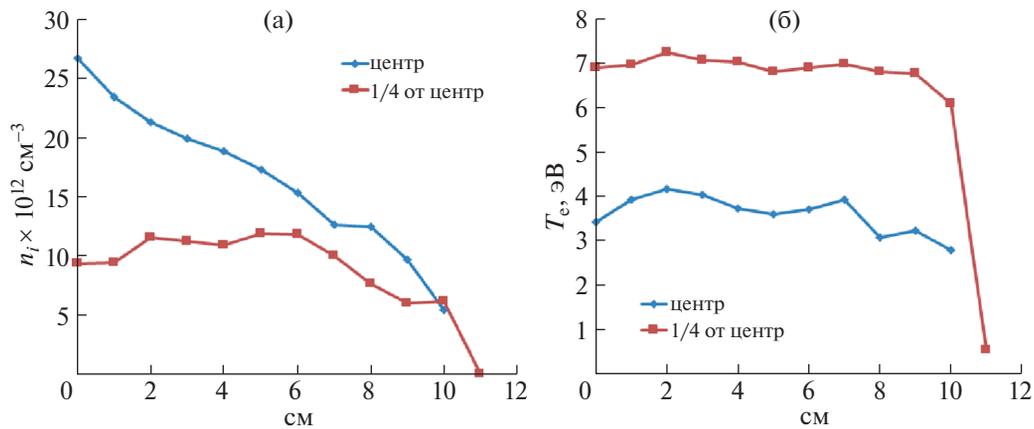


Рис. 7. Распределения по радиусу при мощности разряда 220 кВт: а) — плотность плазмы; б) — электронная температура.

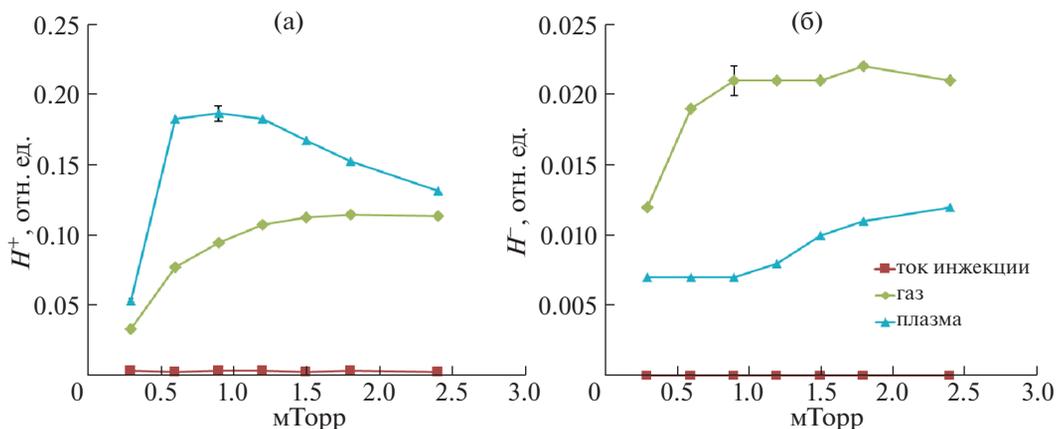


Рис. 8. а) — Ток протонов; б) — ток отрицательных ионов.

5.2. Измерение параметров плазмы диагностическим пучком при зондировании вдоль установки

При зондировании плазмы в ловушке вдоль оси установки мощность разряда не превышала 180 кВт. Сигналы, полученные при инжекции атомарного пучка в плазму, в зависимости от давления газа перед разрядом приведены на рис. 8. Кривые, обозначенные маркером “ток инжекции”, обозначают токи фракций пучка, полученные в случае, когда в ловушку не напускается газ и не поджигается разряд. В этом случае пучок, инжектируемый в ловушку, состоит из атомов, токи протонов и отрицательных ионов равны нулю. При инжекции атомарного пучка в газ в соответствии с расчетом ток атомов уменьшается, появляются токи протонов и отрицательных ионов.

При инжекции атомарного пучка в не полностью ионизованную плазму токи атомов и отрицательных ионов снижаются (в сравнении со случаем инжекции атомарного пучка в газ), а ток

протонов увеличивается в соответствии с расчетом. Как следует из зондовых измерений, плотность плазмы слабо меняется при увеличении давления газа в ловушке перед разрядом в области давлений >1 мТорр. При этом давлении газа ток протонов достигает максимума. При дальнейшем увеличении напуска газа ток протонов начинает снижаться, ток отрицательных ионов начинает увеличиваться. Это происходит вследствие уменьшения степени ионизации плазмы при сохранении плотности плазмы неизменной (согласно измерениям зондом). Максимальное увеличение тока протонов и уменьшение тока отрицательных ионов (в сравнении со случаем инжекции атомарного пучка в газ) свидетельствует о достижении максимальной степени ионизации плазмы. Максимальная степень ионизации плазмы достигается при давлениях газа 0.5–1 мТорр. Из отношения токов протонов для случаев инжекции в газ и плазму можно определить

степень ионизации плазмы. Она составляет $15 \pm 5\%$ для этих условий.

Степень ионизации плазмы можно определить по ослаблению тока отрицательных ионов в сравнении со случаем инжекции атомарного пучка в газ. Ослабление тока отрицательных ионов в 3 раза означает, что степень ионизации плазмы в ловушке достигает $t \approx 17 \pm 8\%$ (см. рис. 3б). Измерение фракций инжектируемого пучка позволяет определять минимальную плотность плазмы в ловушке. Для полученного увеличения тока протонов (уменьшения тока атомов) минимальная оценка на плотность плазмы составляет $n_{pl} \approx 3 \times 10^{12} \text{ см}^{-3}$. Эта величина значительно меньше измеренной зондом и, вероятно, не соответствует реальной плотности плазмы вследствие того, что такие измерения позволяют определить только нижний порог плотности плазмы. Если степень ионизации плазмы далека от 100%, значения плотности плазмы, получаемые из ослабления атомарного пучка, сильно занижены (см. рис. 3а).

5.3. Измерение параметров плазмы диагностическим пучком при зондировании поперек установки

Зондирование плазмы поперек оси ловушки проводилось пучком атомов водорода. Степень ионизации плазмы в центре ловушки, определенная по ослаблению атомарного пучка, находилась в согласии с величиной степени ионизации, определенной при инжекции пучка вдоль оси установки, и составляла $\sim 15\%$ при одинаковых условиях разряда. Следует заметить, что вследствие значительного уменьшения длины взаимодействия пучка с плазмой точность определения величины степени ионизации значительно уменьшилась. При средней плотности плазмы $\overline{n_{pl}} \sim 1.5 \times 10^{13} \text{ см}^{-3}$ графики для степеней ионизации $< 20\%$ на рис. 4а расположены близко друг к другу.

После модернизации системы питания разряда мощность, вводимая в плазму, увеличилась до 220 кВт. Это позволило увеличить плотность плазмы, и точность определения степени ионизации значительно возросла. Степень ионизации в центре ловушки для этих режимов составляла $50\%_{-5\%}^{+30\%}$. Степень ионизации рассчитывалась из известного (по зондовым измерениям) распределения плотности плазмы вдоль линии инжекции пучка и расчетной зависимости ослабления атомарного пучка (см. рис. 4).

5.4. Поток плазмы в торцевое отверстие

Поток плазмы, вытекающей в торцевое отверстие, измерялся при помощи плазмоприемника,

описанного в п. 3. Ток насыщения на плазмоприемник при плотности плазмы в ловушке $n_{pl} \approx 1.6 \times 10^{13} \text{ см}^{-3}$ составляет $I_h \approx 8 \text{ А}$.

Можно оценить эффективное уменьшение площади истечения плазмы при использовании инверсного магнитного поля. Площадь торцевого отверстия $S_h = 78.5 \text{ см}^2$. В случае, если удержания в торцевом отверстии нет, плазма вытекает в отверстие со скоростью ионного звука. В этом случае ток в отверстие был бы равен

$$I_{h_max} = jS_h = en_{pl}v_s S_h \approx 260 \text{ А}. \quad (2)$$

Измеренный в эксперименте ток оказался в ~ 30 раз меньше. Это можно интерпретировать как уменьшение во столько же раз эффективной площади истечения плазмы. В этом случае она оказывается равной $\sim 2.5 \text{ см}^2$.

6. ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ УДЕРЖАНИЯ ПЛАЗМЫ В МУЛЬТИПОЛЬНОЙ МАГНИТНОЙ ЛОВУШКЕ

Эффективность удержания плазмы в ловушке можно оценить, определив время удержания плазмы в ней. В ловушке описанной геометрии плазма может теряться по трем каналам: вытекание плазмы сквозь мультипольное магнитное поле на стенку камеры, потеря плазмы на катодах, вытекание плазмы в отверстия, предназначенные для прохождения пучка. Скорость потери плазмы в каждый из каналов удобно характеризовать эффективной площадью потерь, подразумевая при этом, что плазма вытекает сквозь эту эффективную площадь со скоростью, близкой к ионно-звуковой.

Процесс взаимодействия плазмы с мультипольным магнитным полем достаточно хорошо исследован (см, например, [17]). Вытекание плазмы сквозь такое магнитное поле происходит в "щели", образуемой сходящимися силовыми линиями магнитного поля. Ширина таких щелей определяется гибридным ларморовским радиусом $d_{sl} = 2\sqrt{r_e r_i}$ [17]. Подставляя в эту формулу величину магнитного поля на поверхности камеры ($B_w = 7 \text{ кГс}$) и параметры плазмы $T_e = 5 \text{ эВ}$, $T_i = 0.5 \text{ эВ}$, получим ширину щели $d_{sl} = 0.06 \text{ мм}$. Эффективная площадь потерь на стенку вакуумной камеры равна

$$S_1 = N2\pi r d_{sl} = 30 \text{ см}^2, \quad (3)$$

здесь N – количество щелей, r – радиус вакуумной камеры.

Катоды находятся в плазме, и плазма может теряться непосредственно на них. В описанной ловушке полная площадь катодов имеет величину $S_2 = 160 \text{ см}^2$. Таким образом, в описываемой ло-

вушке потери на катоды играют существенную роль в общем удержании плазмы.

Измерения потока плазмы в торцевые отверстия показывают, что эффективная площадь потерь плазмы в эти отверстия равна $S_3 = 5 \text{ см}^2$. Площадь потерь в торцевые отверстия мала по сравнению с потерями по другим каналам.

Время удержания плазмы в ловушке можно оценить по формуле

$$\tau \approx \frac{V}{v_s (S_1 + S_2 + S_3)} \approx 35 \text{ мкс}, \quad (4)$$

где $V (\approx 16 \times 10^3 \text{ см}^3)$ – объем плазмы, v_s – скорость ионного звука. Время удержания, оцененное таким образом, близко полученному в эксперименте, – 45 мкс.

Полученная в эксперименте степень ионизации плазмы $50\%_{-5\%}^{+30\%}$, вероятно, ограничена потоком нейтралов со стенок вакуумной камеры в плазму. При увеличении электронной температуры в диапазоне 3–10 эВ длина пробега атома водорода в плазме с плотностью $n_{pl} \sim 1 \times 10^{13} \text{ см}^{-3}$ становится сравнимой с поперечными размерами плазмы. Таким образом, увеличение электронной температуры (до величины ~ 10 эВ) является критическим фактором для увеличения степени ионизации плазмы.

7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Экспериментально исследована плазменная мишень на основе мультипольной магнитной ловушки, предназначенная для нейтрализации пучка отрицательных ионов с током $\sim 1 \text{ А}$. При мощности $\sim 220 \text{ кВт}$ в ловушке достигается плотность плазмы $n_{pl} = 2 \times 10^{13} \text{ см}^{-3}$. По перезарядке диагностического атомарного пучка определена степень ионизации плазмы. Она составляет $50\%_{-5\%}^{+30\%}$.

Проведены эксперименты по генерации плазмы в режиме длинных импульсов. При длительности импульса 1 с плотность плазмы в ловушке достигает $n_{pl} \sim 1 \times 10^{13} \text{ см}^{-3}$ при мощности разряда 55 кВт. Основным ограничением при переходе к стационарному режиму работы нейтрализатора может быть разрушение катодов. В ряде экспериментов показано что LaB_6 катоды могут работать в плазме с требуемыми параметрами длительное время [12, 18, 19].

В экспериментах показано, что поток плазмы в отверстия для прохождения нейтрализуемого пучка может быть значительно уменьшен при формировании в отверстиях магнитных пробок с обратным (по отношению к направлению в центральной части ловушки) направлением магнитного поля.

Эксперименты показали, что плазменная мишень для нейтрализации пучка отрицательных ионов с энергиями 0.5–1 МэВ может быть реализована на основе предложенной схемы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ivanov A.A., Abdrashitov G.F., Anashin V.V., Belchenko Yu.I., Burdakov A.V., Davydenko V.I., Deichuli P.P., Dimov G.I., Dranichnikov A.N., Kapitonov V.A., Kolmogorov V.V., Kondakov A.A., Popov S.S., Sanin A.L., Shikhovtsev I.V., Sorokin A.V., Stupishin N.V., Tiunov M.A., Belov V.P., Gorbovsky A.I., Kobets V.V., Binderbauer M., Putvinski S., Smirnov A., Sevier L.* // AIP Conf. Proc. 2013. V. 1515. P. 197.
2. *Димов Г.И., Иванов А.А., Росляков Г.В.* // Физика плазмы. 1980. Т. 6. С. 933.
3. *Димов Г.И.* Препринт ИЯФ СО АН № 304. Новосибирск, 1969.
4. *Hershcovitch A.I., Kovarik V.J.* // Rev. Sci. Instr. 1983. V. 54. P. 328.
5. *Hershcovitch A.I., Johnson B.M., Kovarik V.J., Meron M., Jones K.W., Prelec K., Grisham L.R.* // AIP Conf. Proc. 1984. V. 111. P. 561.
6. *Trow J.R., Moses K.J.* // AIP Conf. Proc. 1987. V. 158. P. 651.
7. *Lea L.M., Schneider S.B., Holmes A.J.T.* // AIP Conf. Proc. 1992. V. 287. P. 817.
8. *Tanaka M.Y.* // Rev. Sci. Instr. 1998. V. 69. P. 980.
9. *Hanada M., Kashiwagi M., Inoue T., Watanabe K., Imai T.* // Rev. Sci. Instr. 2004. V. 75. P. 5.
10. *Kulygin V.M., Skovoroda A.A., Zhil'tsov V.A.* // Plasma Devices and Operations. 1998. V. 6. P. 135.
11. *Kulygin V.M., Dlougach E.D., Gorbunov E.P., Klimenko E.Yu., Mehed'kin A.A., Moskalenko I.V., Panasenkov A.A., Pustovoi Yu. M., Skovoroda A.A., Smirnov V.A., Zhil'tsov V.A., Zubarev V.F.* // Nucl. Fusion. 2001. V. 41. P. 355.
12. *Forest C.B., Flanagan K., Brookhart M., Clark M., Cooper C.M., Désangles V., Egedal J., Endrizzi D., Khalzov I.V., Li H., Miesch M., Milhone J., Nornberg M., Olson J., Peterson E., Roesler F., Schekochihin A., Schmitz O., Siller R., Spitkovsky A., Stemo A., Wallace J., Weisberg D., Zweibel E.* // J. Plasma Phys. 2015. V. 81. 345810501.
13. *Dimov G.I., Ivanov A.V.* // Trans. Fusion Sci. Technol. 2013. V. 63. № 1Т. P. 111.
14. *Димов Г.И., Емелев И.С.* // ЖТФ. 2014. Т. 84. С. 27.
15. *Давыденко В.И., Морозов И.И., Росляков Г.В.* Препринт ИЯФ СО АН № 80-118. Новосибирск, 1980
16. *Барнетт К., Харрисон М.* Прикладная физика атомных столкновений. Плазма. М.: Энергоатомиздат, 1987.
17. *Leung K.N., Hershkovitz N., MacKenzie K.R.* // Phys. Fluids. 1976. V. 19. P. 1045.
18. *Давыденко В.И., Иванов А.А., Шульженко Г.И.* // Физика плазмы. 2015. Т. 41. С. 1004.
19. *Kreter A.* // Fusion Sci. Technol. 2011. V. 59. № 1Т. P. 51.