

УДК 533.9.03

СИСТЕМА СВЕРХВЫСОКОЧАСТОТНОЙ ПРЕДЫОНИЗАЦИИ ТОКАМАКА МИФИСТ-0

© 2023 г. А. И. Алиева^а, А. С. Пришвицын^а, Н. Е. Ефимов^а, С. А. Крат^{а, *}, А. С. Исакова^а,
А. В. Казиев^а, Г. М. Воробьев^а, В. А. Курнаев^а

^аНациональный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, 115409 Россия

*E-mail: SAKrat@mephi.ru

Поступила в редакцию 29.06.2022 г.

После доработки 30.06.2022 г.

Принята к публикации 04.07.2022 г.

Сверхвысокочастотная предыонизация — распространенный метод смягчения условий пробоя газа в токамаках. Цель исследования заключалась в том, чтобы протестировать разработанные системы токамака МИФИСТ-0, а также изучить предварительную предыонизационную плазму. Анализ предплазменного разряда были осуществлен с помощью поясов Роговского, оптической спектроскопии и зондов Ленгмюра. Дополнительно использовалась быстрая ПЗС-камера для регистрации эмиссии во время разряда. Полученные результаты показали, что разряд предварительной плазмы был локализован на определенном расстоянии внутри вакуумной камеры, удовлетворяющем условию существования электронно-циклотронного резонанса. Оцененная плотность плазмы и электронная температура составили $5.5 \cdot 10^{16} \text{ м}^{-3}$ и 8 эВ соответственно.

Ключевые слова: предыонизация, плазма, диагностика плазмы, ЭЦР-пробой, токамак

DOI: 10.56304/S2079562922030022

ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день малые токамаки являются не только исследовательскими установками, но также играют большую роль в качестве учебных устройств [1]. Однако для создания плазмы в подобных тороидальных устройствах часто необходимы дополнительные методы смягчения условий пробоя, в качестве которых выступает предыонизация.

Обычно могут использовать различные типы предыонизации: ввод высокочастотной мощности, электронных пучков, нейтральных пучков [2]. Сверхвысокочастотная (СВЧ) предыонизация, которую иногда называют ассистированным пробоем на электронно-циклотронном резонансе (ЭЦР) или ЭЦР-пробоем, является многообещающим способом, суть которого заключается во введении электромагнитных волн, ускоряющих электроны. Такой способ используется на многих тороидальных установках, например, гиротроны применяются на KSTAR [3], JT-60SA [4], DIII-D [5] для того, чтобы инициировать пробой плазмы. Помимо высокоомощных гиротронов в качестве устройств для ЭЦР-пробоя могут использовать и магнетроны, как это сделано на токамаках KAIST [6], GLAST [7], SUNIST [8], VEST [9], KTM [10] и других установках.

МИФИСТ-0 является малым сферическим токамаком, который разрабатывается на кафедре “Физика плазмы”, НИЯУ МИФИ [11]. Центральный соленоид токамака обладает малым запасом вольт-секунд и не может продолжительно создавать достаточное напряжение на обходе. Для того, чтобы уменьшить напряжение на обходе необходимое для пробоя, был выбран способ предыонизации с помощью сверхвысокочастотных волн, генерируемых магнетроном. Использование такого метода было обосновано его простотой, компактностью и эффективностью. Он позволяет достичь необходимых условий для инициации формирования предварительной плазмы.

В работе была разработана и протестирована система СВЧ-предыонизации токамака МИФИСТ-0, была получена предварительная плазма и изучены ее параметры.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Токамак МИФИСТ-0 характеризуется большим радиусом $R = 25$ см, малым радиусом $a = 13$ см, максимальное магнитное тороидальное поле, которое удалось достичь, составляет $B_t = 0.8$ Тл. Вакуумную камеру токамака откачивали до базового давления $p = 2 \cdot 10^{-7}$ мбар. Схема и фото токамака представлены на рис. 1.

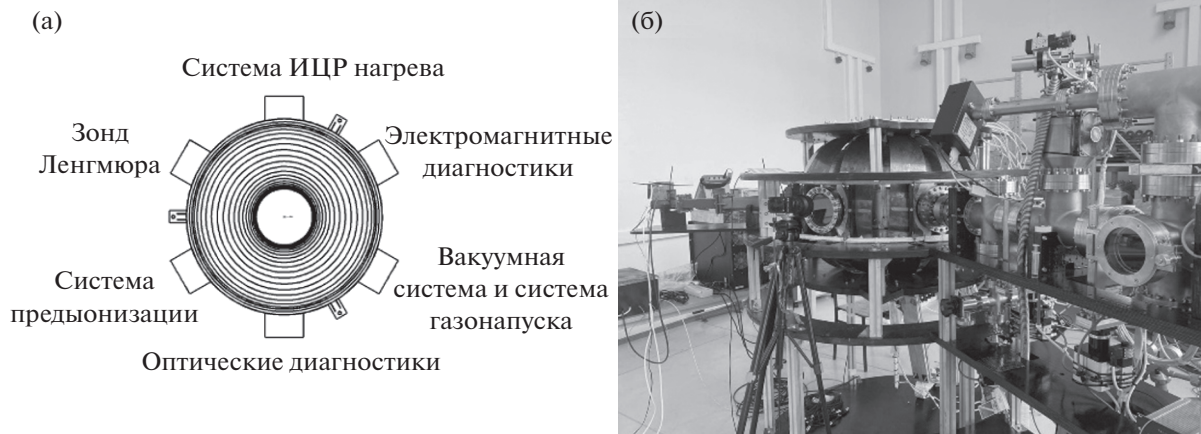


Рис. 1. Токамак МИФИСТ-0: (а) схема основных систем, (б) фото.

Электромагнитная система токамака состоит из системы распределенного воздушного индуктора и катушек тороидального магнитного поля. Тороидальное магнитное поле создается системой конденсаторов с суммарной емкостью $C = 112$ мФ и максимальным напряжением заряда $V = 2$ кВ.

В качестве источника СВЧ-волн был выбран магнетрон с выходной мощностью $P = 1$ кВт, $f = 2.45$ ГГц. Схема питания магнетрона представлена на рис. 2. Она позволяет достичь полной заполненности импульса, и, следовательно, боль-

шей выходной средней мощности по сравнению с коммерчески доступными схемами. Трансформатор Tr_1 используется для нагрева катодной нити накаливания до импульса, в то время как трансформаторы Tr_{1-2} , подключенные в противофазе, и схема удвоения (C_{1-2} , D_{1-4}) используются для достижения более высокого коэффициента заполнения. Конденсатор C_3 ($C = 100$ мкФ и $V = 5$ кВ) используется для сглаживания пульсаций, что приводит к тому, что выходная СВЧ-мощность поддерживается на постоянном уровне в течение заданной продолжительности импульса.

СВЧ-излучение вводится внутрь камеры токамака со стороны низкого магнитного поля. Длительность импульса может достигать нескольких секунд для того, чтобы сглаживающий конденсатор зарядился, а катод магнетрона успел прогреться. В качестве рабочего газа в основном использовался водород, однако некоторые эксперименты проводились с использованием аргона.

Для регистрации СВЧ-сигнала использовалась антенна, в основе которой применялся СВЧ-диод, для регистрации эмиссии плазмы был использован оптический спектрометр (Ocean FX), диапазон которого составлял от 350 до 1000 нм, одновременно с применением быстрой ПЗС-камеры (XIMEA CB013CG LX-X8G3), которая может снимать до 10000 кадров в секунду.

Дополнительно в вакуумной камере был установлен пояс Роговского, расположенный внутри лимитера токамака, для измерения тока и двойной зонд Ленгмюра (рис. 3). Измерения плотности и температуры с помощью зонда проводились в пристеночной области на расстоянии 2 см от внутренней поверхности стенок камеры.

СВЧ-мощность поглощается тогда, когда ее частота удовлетворяет условию ЭЦР, как показано в уравнении [12]:

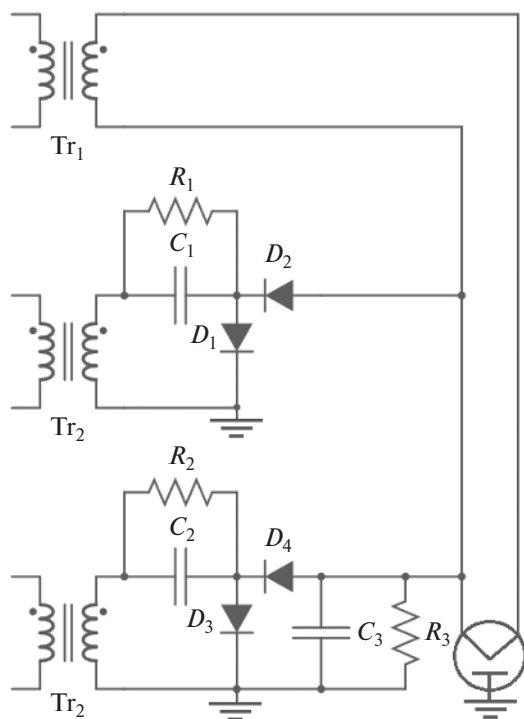


Рис. 2. Модифицированная электрическая схема питания магнетрона.

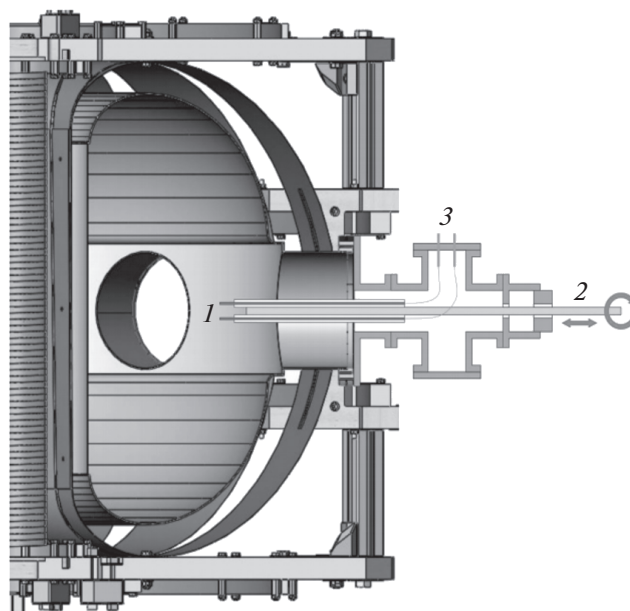


Рис. 3. Схема расположения зонда Ленгмюра внутри камеры токамака: 1 — зонд, 2 — ввод движения, 3 — электрический ввод.

$$f = \frac{\omega}{2\pi} = n \frac{eB_t}{2\pi m_e}, \quad (1)$$

где ω — круговая частота, Гц; n — номер гармоники; e — элементарный заряд, Кл; m_e — масса электрона, кг. Для предыонизации использовалось условие для первой гармоники ЭЦР ($n = 1$). Таким образом, значение тороидального магнитного поля должно достигать $B_{\text{ЭЦР}} = 0.0875$ Тл. В работе поле не превышало 0.4 Тл. Предварительная плазма создавалась на подъеме тороидального поля, когда оно достигало резонансного значения.

Для измерения распределения тороидального поля во времени и пространстве были проведены предварительные эксперименты. Ток в тороидальных катушках измерялся дополнительным поясом Роговского. Распределение магнитного поля регистрировали с помощью датчиков Холла. В результате, были получены зависимости распределения магнитного поля от тока в тороидальных катушках.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Зависимость тороидального магнитного поля от тока в тороидальных катушках и радиуса от центральной оси токамака

Для оценки коэффициента пропорциональности между полем и током была измерена эволюция тороидального магнитного поля во времени на различных радиусах токамака, где (1) — наименьший радиус, (7) — наибольший радиус. Ток тороидальном соленоиде достигал ~ 5.3 кА, что намного меньше значений тока при генерации предварительной плазмы. Тем не менее такие токи создавали достаточно низкие магнитные поля, что было необходимо, поскольку датчики Холла обладали низким пределом измерений. Зависимость максимального значения тороидального магнитного поля от представлена в табл. 1.

Таблица 1 показывает, что тороидальное магнитное поле уменьшается при удалении от центральной оси токамака. Поскольку использовались

Таблица 1. Зависимость тороидального магнитного поля от расстояния

	B_1	B_2	B_2	B_4	B_5	B_6	B_7
Радиус от центральной оси токамака, мм	126	148	171	211	244	286	319
Тороидальное магнитное поле, мТл	71.2	60.8	48.0	44.0	34.2	32.9	29.1
Коэффициент пропорциональности, мТл/кА	13.4	11.5	9.1	8.3	6.5	6.2	5.5

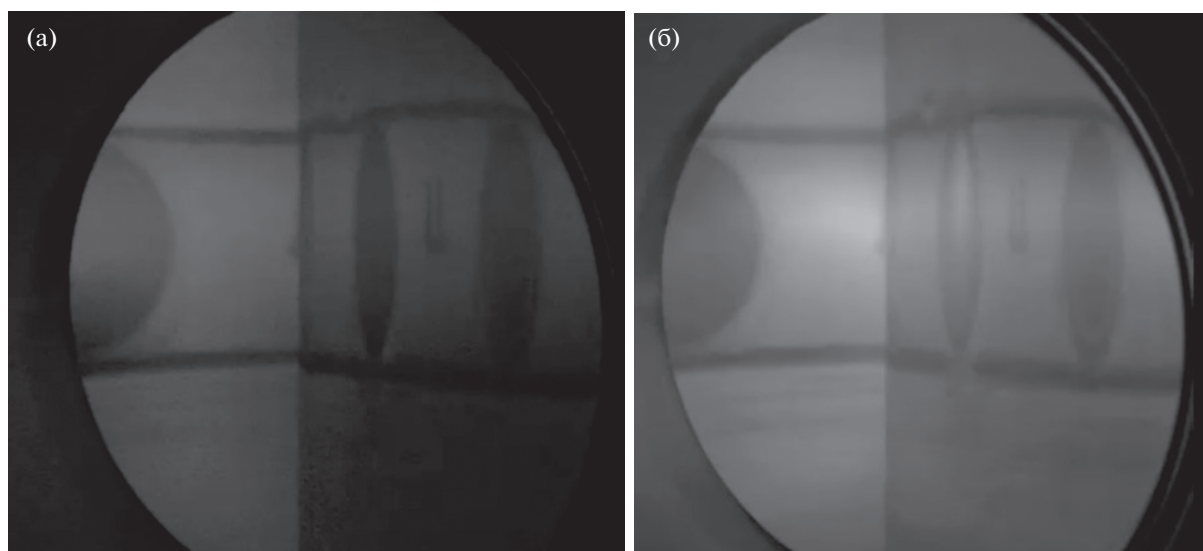


Рис. 4. Фотографии, полученные с помощью ПЗС-камеры: (а) 200 мкс до пробоя и (б) явный ЭЦР-слой. Правая часть фотографии — отражение внешней стенки на полированном внутреннем цилиндре.

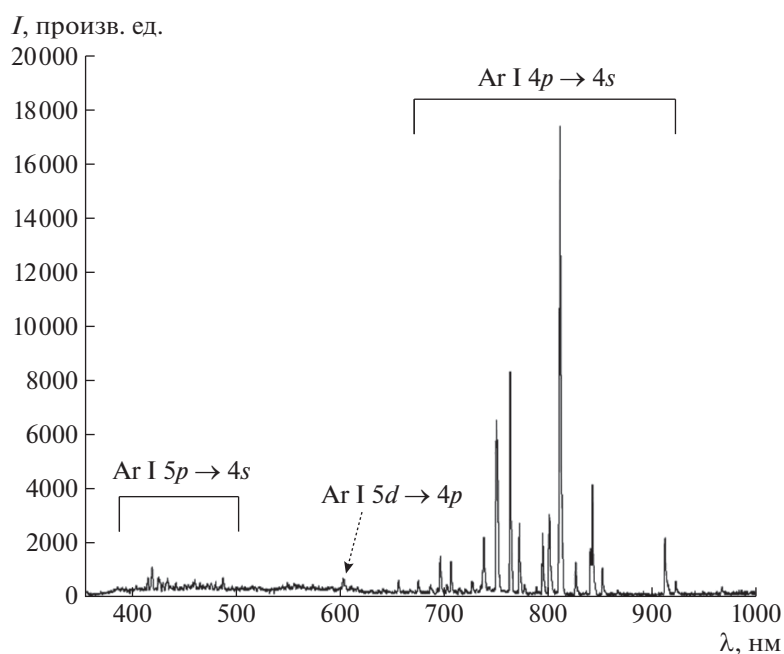


Рис. 5. Эмиссионный спектр в диапазоне от 350 до 1000 нм.

низкие токи, уровень поля не превышал 71.2 мТл. Дополнительно был произведен расчет коэффициентов пропорциональности между током в тороидальных катушках и магнитным полем, что позволило оценить значения поля в последующих экспериментах, поскольку использование датчиков Холла во время разрядов было невозможно.

Аргон

Первые газовые разряды были получены при использовании аргона. Серия предварительных экспериментов проводилась для того, чтобы протестировать системы токамака. Также такие эксперименты верифицировали точность оцененных коэффициентов пропорциональности и выбранных параметров ЭЦР-пробоя.

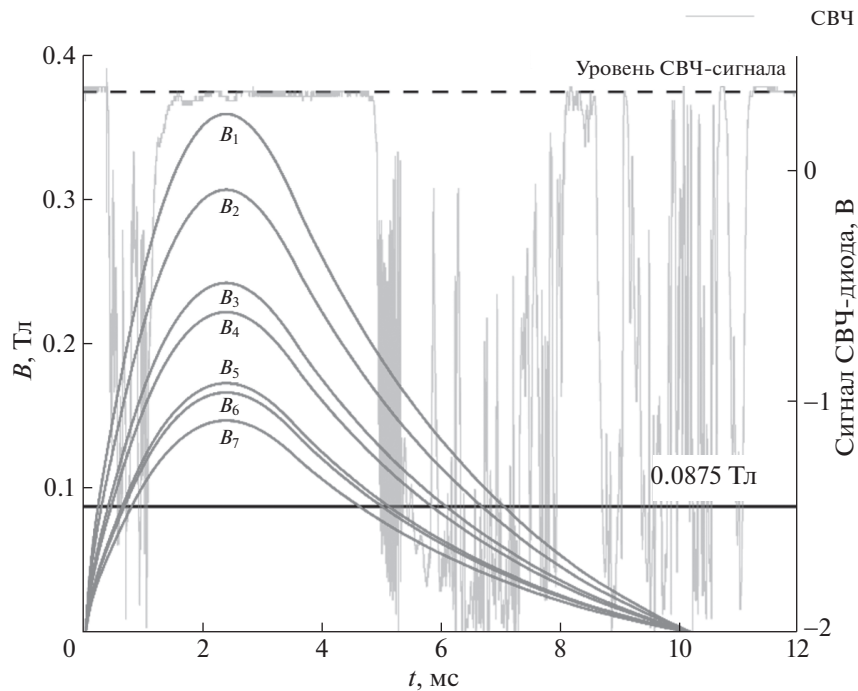


Рис. 6. Временная эволюция тороидального магнитного поля и характерное поглощение СВЧ-мощности во время ЭЦР-пробоя.

Предварительная плазма, полученная с помощью магнетрона, формировала яркое плазменное кольцо. Как показано на рис. 4, эмиссия ЭЦР слоя возникала около внутренней стенки токамака. Она наблюдалась первые 200 мкс до формиро-

вания слоя, когда тороидальное поле не удовлетворяло резонансным условиям.

Эмиссионный спектр разряда показан на рис. 5. На нем представлены многочисленные линии Ar I. Переходы из $4p$ в $4s$ состоянию в основном пред-

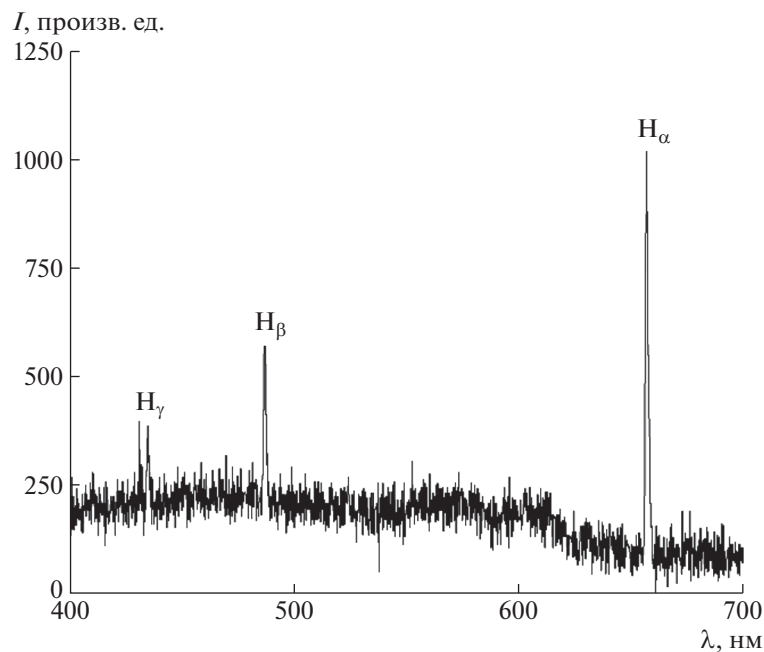


Рис. 7. Эмиссионный спектр предварительной водородной плазмы.

ставлены набором линий в диапазоне от 650 до 1000 нм. Переходы из $5p$ в $4s$ состояния эмиссия наблюдаются в области длина волн от 400 до 500 нм. Переход между $5d$ и $4p$ состоянием соответствует длине волны 603.2 нм.

Плотность такой плазмы была оценена с помощью двойного зонда Ленгмюра и составила $n_e \sim 5.5 \cdot 10^{16} \text{ м}^{-3}$, в то время как ее электронная температура $T_e \sim 8 \text{ эВ}$. Плавающий потенциал составлял 18 В.

Водород

Рассматриваемая серия экспериментов проводилась с использованием водорода. Предварительная плазма была получена, а ЭЦР — слой возник на определенном расстоянии внутри вакуумной камеры. Как можно видеть на рис. 6, сигнал СВЧ-диода резко снижался относительно постоянного уровня, когда тороидальное поле достигало резонансного значения 0.0875 Тл. Рабочее поле составляло приблизительно 0.35 Тл.

Поглощение СВЧ-мощности и предварительная плазма должны существовать на заданном расстоянии внутри вакуумной камеры, когда тороидальное магнитное поле равно $B_{\text{ЭЦР}}$. Таким образом, существует два промежутка времени, когда рассматриваемое поглощение наблюдается: на стадии подъема магнитного поля и на стадии спада. Заметно, что при подъеме оно наблюдается только после того, как поле достигло условий ЭЦР в пространстве между радиусами, соответствующих B_2 и B_3 , в то время как на спаде поглощение может быть заметно только после прохождения радиуса, соответствующего B_6 . Это объясняется тем, что расположенный внутри разрядной камеры лимитер ограничивает возможность формирования тороидальной плазмы на радиусах B_1 или B_7 .

На рис. 7 показан полученный эмиссионный спектр водородной предварительной плазмы. Заметна линия H_α ($\lambda = 656.28 \text{ нм}$), H_β ($\lambda = 486.13 \text{ нм}$), и H_γ ($\lambda = 433.75 \text{ нм}$).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На токамаке МИФИСТ-0 были проведены предварительные эксперименты при использова-

нии 2.45 ГГц предыонизации. Рассмотренный метод позволил получить ЭЦР-разряд на первой гармонике циклотронного резонанса. Изменения сигнала СВЧ-диода коррелировали с резонансным значением магнитного тороидального поля и возникшей эмиссией газа. Плотность предварительной плазмы составляла приблизительно $5.5 \cdot 10^{16} \text{ м}^{-3}$. Оцененная электронная температура составляла примерно 8 эВ. Были получены характерные эмиссионные спектры предварительной плазмы в аргоне и водороде. Тем не менее для достижения условий пробоя плазмы, необходимо учитывать полоидальные поля, создаваемые системой распределенного воздушного индуктора токамака. Дальнейшие исследования будут направлены на улучшения условий пробоя.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа была выполнена при поддержке АО "Наука и инновации" (номер договора 313/1755-Д от 20.09.2019).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ/REFERENCES

1. Regan S.P., et al. // Nucl. Fusion. 2005. V. 45 (10). P. S245.
2. Gryaznevich M., Shevchenko V., Sykes A. // Nucl. Fusion. 2006. V. 46 (8). P. S573.
3. Bae Y.S., et al. // Nucl. Fusion. 2008. V. 49 (2). P. 022001.
4. Kobayashi T., et al. // EPJ Web Conf. 2015. V. 87. P. 04008.
5. Lohr J., et al. // Fusion Sci. Technol. 2005. V. 48 (2). P. 1226.
6. Choe W., et al. // Rev. Sci. Instrum. 2000. V. 71 (7). P. 2728.
7. Khan R., et al. // Fusion Eng. Des. 2018. V. 126. P. 10.
8. Yexi H., et al. // Plasma Sci. Technol. 2006. V. 8 (1). P. 84.
9. Jo J.G., et al. // Phys. Plasmas. 2017. V. 24 (1). P. 012103.
10. Chektybayev B. // Fusion Eng. Des. 2021. V. 163. P. 112167.
11. Kurnaev V.A., et al. // Phys. At. Nucl. 2019. V. 82. P. 1329.
12. Yu Y., et al. // AIP Adv. 2018. V. 8 (9). P. 095015.

Microwave Preionization System of the MEPhIST-0 Tokamak

A. I. Alieva¹, A. S. Prishvitsyn¹, N. E. Efimov¹, S. A. Krat^{1,*}, A. S. Isakova¹, A. V. Kaziev¹, G. M. Vorobyov¹, and V. A. Kurnaev¹

¹National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, 115409 Russia

*e-mail: SAKrat@mephi.ru

Received June 29, 2022; revised June 30, 2022; accepted July 4, 2022

Abstract—Microwave preionization is a common technique used for electron-cyclotron resonance assisted plasma start-up in spherical tokamaks. The aim of the study is to test features of the developed MEPhIST to-

tokamak preionization system. The study explores the preliminary preionization plasma. The gas discharge parameters were measured using Rogowski coils, optical spectroscopy, and Langmuir probes. Additionally, CCD – camera captured the emission evolution during discharge. The results obtained demonstrate that the plasma discharge was localized in the discharge vessel. The calculated plasma density and electron temperature were $5.5 \times 10^{16} \text{ m}^{-3}$ and 8 eV, respectively. The study enables a better understanding of the preionization process in the MEPhIST-0.

Keywords: preionization, plasma, plasma diagnostics, ECR-assisted start-up, tokamak