

Система ввода СВЧ-излучения гиротронного комплекса токамака Т-15МД на первой стадии работ

И. С. Пименов, В. И. Белоусов, А. А. Борщеговский, М. Ю. Жарков, С. В. Неудачин, И. Н. Рой, Э. Н. Хайрутдинов, Л. Г. Попов, М. В. Агапова, Л. М. Бельнова

В настоящее время в Национальном исследовательском центре «Курчатовский институт» идёт подготовительная стадия работ для первых экспериментов на токамаке Т-15МД. Одним из этапов подготовки является сооружение гиротронного комплекса и конструирование системы ввода СВЧ-мощности для электронно-циклотронного резонансного (ЭЦР) нагрева плазмы. Во время наладочных работ, в связи с пониженным энергопитанием, Т-15МД будет работать с относительно низкими магнитными полями (тороидальное магнитное поле в центре плазмы $B_{tor}(r/a = 0) \approx 1,5$ Тл). Поэтому частота гиротрона выбрана равной 82,6 ГГц при длительности импульса до 30 секунд с выходной мощностью около 1 МВт. Эксперименты предполагается проводить на второй гармонике необыкновенной волны при вводе СВЧ-излучения с внешней стороны вакуумной камеры (резонанс при $B_{tor} \approx 1,5$ Тл). СВЧ-излучение гиротрона поступает к фланцу камеры установки по вакуумному гофрированному волноводу, длиной около 35 м, с внутренним диаметром 63,5 мм. Главной задачей гиротронного комплекса Т-15МД на первой стадии работ является предыонизация рабочего газа. Система ввода позволяет фокусировать волновой пучок, и в области фокусировки плотность мощности в поперечном сечении достигает значений $\sim 0,20 \div 0,25$ МВт/см², что аналогично успешным экспериментам по пробойу на токамаке Т-10. Последнее зеркало системы ввода способно отклонять пучок в тороидальном и полоидальном направлениях в пределах ($\pm 25^\circ$) и (-5°) \div ($+35^\circ$) соответственно. Это придаёт гибкость экспериментам, как по пробойу, так и другим задачам по ЭЦР-нагреву и поддержанию безындукционного тока электронно-циклотронными волнами на квазистационарной стадии разряда. В условиях пробоя на стороне сильного магнитного поля ($B_{tor}(r/a = 0) \approx 1,3$ Тл), электротехническая система Т-15МД позволяет быстро поднять поле в процессе разряда, переместив нагрев в центр.

Ключевые слова: гиротрон, ЭЦР-нагрев, предыонизация, система ввода СВЧ-излучения.

DOI: 10.51368/1996-0948-2022-1-5-11

Пименов Игорь Сергеевич¹, м.н.с.
E-mail: pimenowigor@mail.ru
Белоусов Владимир Иванович², н.с.
Борщеговский Александр Алексеевич¹, с.н.с.
Жарков Михаил Юрьевич³, нач. отдела.
Неудачин Сергей Владимирович¹, в.н.с., к.ф.-м.н.
Рой Игорь Николаевич¹, нач. лаб.
Хайрутдинов Эдуард Наилевич¹, лаборант-исследователь.
Попов Леонид Георгиевич⁴, научный рук. лаб.
Агапова Марина Владимировна⁴, вед. конструктор.
Бельнова Людмила Михайловна⁴, инженер-конструктор 1-й кат.

¹ НИЦ «Курчатовский институт».
Россия, 123182, Москва, пл. Курчатова, 1.
² ИПФ РАН.
Россия, 603950, г. Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46.
³ АО «Красная Звезда».
Россия, 115230, Москва, Электролитный пр-д, 1А.
⁴ ЗАО НПП «ГИКОМ».
Россия, 603950, г. Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46.

Статья поступила в редакцию 10 августа 2021 г.

© Пименов И. С., Белоусов В. И., Борщеговский А. А., Жарков М. Ю., Неудачин С. В., Рой И. Н., Хайрутдинов Э. Н., Попов Л. Г., Агапова М. В., Бельнова Л. М., 2022

1. Введение

Термоядерные установки с магнитным удержанием плазмы используют различные методы нагрева и генерации безындукционного тока: например инжекция энергичных нейтральных атомов, поддержание тока ВЧ и СВЧ-волнами с частотами около нижнегибридного резонанса, ионно-циклотронного резонанса и электронно-циклотронного резонанса. Если первый метод планируется использовать во время второй фазы работ на установке Т-15МД [1], то второй и третий методы лишь обсуждаются. В первое время токамак Т-15МД оснащается только системой электронно-циклотронного резонансного (ЭЦР) нагрева плазмы. Источниками мощного СВЧ-излучения для этого метода нагрева служат гиротроны. С помощью гиротронных комплексов на установках типа токамак решается широкий спектр задач: нагрев электронной компоненты плазмы, подавление магнитно-гидродинамических (МГД) неустойчивостей [2], предыонизация рабочего газа, генерация безындукционного тока, создание режимов с внутренним транспортным барьером [3].

На первой стадии работ установка Т-15МД будет ограничена в энергопитании. В связи с этим токамак будет работать с относительно низкими магнитными полями. Помимо этого максимальный запас магнитного потока в индукторе составляет 6 (В с). Два последних обстоятельства указывают на то, что пробой газа одним только электрическим полем от центрального индуктора будет затруднён. Исключая возможные риски было принято решение об использовании гиротрона для предыонизации.

Главной целью данной статьи является описание гиротронного комплекса, предназначенного для пробоя газа. Во второй части работы представлено общее описание установки Т-15МД и гиротронного комплекса. Третья часть представляет подробное описание системы ввода СВЧ-излучения. В четвёртой части приведены дополнительные возможности гиротронного комплекса, в конце дано заключение.

2. Гиротронный комплекс установки Т-15МД на первой стадии работ

В настоящее время в Национальном исследовательском центре «Курчатовский ин-

ститут» идёт подготовка к крупным экспериментам с круглой плазмой на установке Т-15МД [1]. Основные параметры установки приведены в таблице.

Таблица

Основные параметры установки токамак Т-15МД

Ток плазмы I_p , МА	2
Аспектное отношение A	2,2
Большой радиус тора R_0 , м	1,48
Малый радиус плазмы a , м	0,67
Вытянутость сечения k_{95}	1,7÷1,9
Треугольность δ_{95}	0,3±0,4
Тороидальное поле на оси плазмы $B_{тор}$, Тл	2
Длительность плато разряда $\Delta t_{плато}$, с	10
Мощность нагрева плазмы $P_{доп}$, МВт	20
Плотность плазмы n_e , 10^{20} м^{-3}	1,4
Суммарный запас потока индуктора $\Delta\psi$, Вб	6

В состав гиротронного комплекса Т-15МД на данный момент входит один гиротрон с рабочей частотой излучения 82,6 ГГц. Подробно о выборе частоты гиротрона для Т-15МД можно ознакомиться в статье [4]. Комплект оборудования гиротрона разработан и изготовлен институтом ИПФ РАН совместно с компанией ЗАО НПП «ГИКОМ» (г. Нижний Новгород). Мощность выходного излучения гиротрона составляет 1 МВт, максимальная длительность импульса 30 с. На выходе из гиротрона установлена система зеркал (MOU – Matching Optical Unit), которая с помощью двух зеркал со специальными профилями формирует выходное излучение гиротрона в виде моды HE_{11} , необходимой для транспортировки по волноводной линии передачи. Помимо перечисленных элементов в состав комплекса входят следующие основные компоненты: система формирования рабочего магнитного поля гиротрона, система водяного охлаждения, световая защита, низковольтное и высоковольтное оборудование. Более подробно о поставленном оборудовании для гиротронного комплекса Т-15МД можно ознакомиться в работе [5].

Для передачи мощного СВЧ-излучения от гиротрона до вакуумной камеры установки служит вакуумированный гофрированный волноводный тракт. Общая длина волноводной линии около 35 м. Внутренний диаметр

волновода 63,5 мм. Рабочей модой круглого гофрированного волновода является гибридная мода HE_{11} .

3. Система ввода СВЧ-излучения для предыонизации на T-15МД

Для решения различных экспериментальных задач необходимо иметь возможность вводить СВЧ-излучение под различными тороидальными и полоидальными углами внутри вакуумной камеры установки. Чаще всего применяется квазиоптическая система зеркал, формирующая необходимые параметры вводимого в плазму излучения. Подобного рода системы используются на таких установках, как DIII-D [6], ASDEX Upgrade [7] и KSTAR [8]. Ближайшее к плазме зеркало позволяет отклонять пучок в тороидальном и полоидальном направлениях. Помимо систем ввода излучения с поворотными зеркалами существуют системы ввода, в которых отсутствуют внутрикамерные подвижные элементы. Такого рода системы предпочтительно использовать в токамаке-реакторе, в котором желательно не применять подвижных конструкций внутри вакуумной камеры.

Первоочередной задачей системы ввода СВЧ-излучения во время первых экспериментов на T-15МД является формирование гауссового пучка определённых параметров с целью предыонизации рабочего газа на второй гармонике необыкновенной волны. Под гауссовым пучком понимается пучок с пространственным распределением СВЧ-мощности по радиусу r вида $P_{СВЧ}(r) = P_0 \exp(-r^2 / r_0^2)$, где r_0 – полуширина пучка по уровню ослабления мощности в e ($e \approx 2,718$) раз. Эксперименты по предыонизации (СВЧ-пробой в газе в камере токамака), проводились ранее, как на отечественных [9, 10], так и на зарубежных установках [11]. Эксперименты на T-10 показали, что при увеличении СВЧ-мощности, вводимой в камеру установки, время задержки (между включением гиротрона и вспышкой спектральной линии $D\alpha$) уменьшается и достигает своего минимума [10]. Линия дейтерия $D\alpha$, наблюдаемая в видимом диапазоне, служила индикатором начала пробоя газа на T-10, т. к. ионизация плазмы сопровождается свечением спектральных линий, в том числе

$D\alpha$. В случае T-15МД индикатором пробоя будет служить линия $H\alpha$, поскольку установка будет работать на водороде. Полученные экспериментальные результаты T-10 были использованы для расчёта квазиоптической схемы системы СВЧ-ввода для T-15МД. Фотография системы ввода, установленной на прямоугольном фланце с внутренней (вакуумной) стороны, представлена на рис. 1. Зеркала $m1$ и $m2$ – первое и второе зеркала соответственно на пути распространения пучка при выходе из волновода к плазме. Зеркало $m1$ – неподвижное расфокусирующее, зеркало $m2$ – подвижное фокусирующее. При этом отклонение зеркала $m2$ обеспечивается в двух направлениях с помощью приводов. Данная система позволяет отклонять пучок в тороидальном и полоидальном направлениях в пределах ($\pm 25^\circ$) и $(-5^\circ) \div (+35^\circ)$ соответственно. Возможность изменения направления распространения пучка за счёт отклонения зеркала придаёт гибкость экспериментам, как по пробой, так и другим задачам по ЭЦР-нагреву и поддержанию безындукционного тока электронно-циклотронными волнами на квазистационарной стадии разряда.

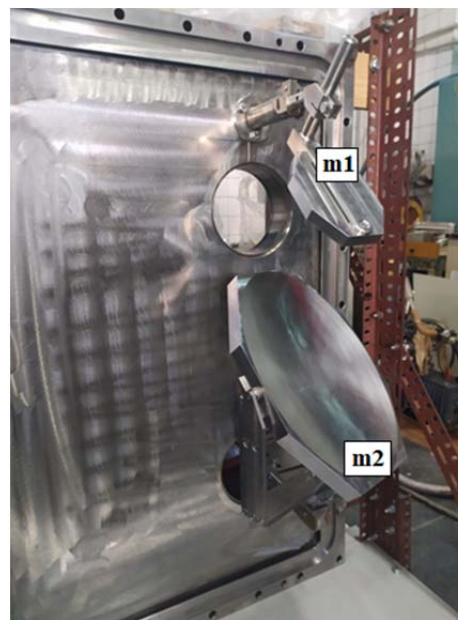


Рис. 1. Общий вид системы СВЧ-ввода, установленной на прямоугольном фланце

Квазиоптическая схема системы СВЧ-ввода рассчитывалась исходя из двух основных условий. Во-первых, как было показано на установке T-10, плотность мощности СВЧ-

излучения в области пробоя должна превышать пороговое значение $0,20 \text{ МВт/см}^2$ с целью уменьшения времени задержки пробоя [10]. Во-вторых, область пробоя рабочего газа должна располагаться на стороне сильного магнитного поля. Первое условие накладывает ограничения на максимальные дифракционные потери. Второе условие в основном определяет фокусное расстояние зеркала $m2$. Так, для тороидального магнитного поля в центре плазмы $B_{\text{тор}}(r/a=0) = 1,3 \text{ Тл}$ (где r – текущий радиус плазмы), зона резонанса смещена в сторону сильного магнитного поля на расстояние $\approx 18 \text{ см}$. Квазиоптическая схема системы ввода для Т-15МД [12] представлена на рис. 2. В верхней левой части рис. 2 указаны габариты зеркал $m1$ и $m2$, все размеры указаны в мм.

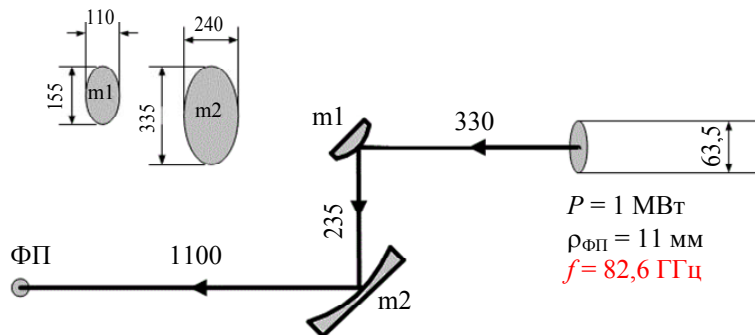


Рис. 2. Квазиоптическая схема (все размеры указаны в мм)

Поскольку на выходе волновода излучение имеет структуру, близкую к гауссовому распределению (содержание волны с гауссовым распределением поля в собственной волне HE_{11} гофрированного волновода составляет около 98 %), то можно считать, что на выходе волновода сформирован гауссов пучок с плоским фазовым фронтом и полушириной 14,5 мм (исходя из диаметра волновода). Дальнейшее поведение волнового пучка и расчёт параметров зеркал системы СВЧ-ввода могут быть осуществлены в соответствии с законами квазиоптики. При этом, если целью является сильная фокусировка, то основным ограничением для её достижения как правило являются габариты фокусирующего зеркала. Это вытекает из формулы, описывающей изменение полуширины гауссового пучка при распространении его от места фокусировки (фокальное пятно) до фокусирующего зеркала [13]:

$$a_b^2 = a_0^2 + L^2 / (ka_0)^2$$

здесь k – волновое число, a_0 – полуширина волнового пучка в месте фокусировки, a_b – полуширина волнового пучка на фокусирующем зеркале, L – расстояние от фокусирующего зеркала до фокального пятна.

Видно, что с увеличением расстояния L от места фокусировки полуширина пучка a_b , а следовательно, и габариты фокусирующего зеркала быстро увеличиваются. При этом, от размеров фокусирующего зеркала зависят и дифракционные потери, которые при увеличении зеркал сводятся к минимуму. Если допустить уровень дифракционных потерь на фокусирующем зеркале не более 2 %, то при максимально возможных габаритах фокусирующего зеркала (с учётом конструктивных особенностей патрубка Т-15МД), может быть

достигнута плотность мощности в области фокусировки пучка около $0,25 \text{ МВт/см}^2$ при полуширине пучка равной 11 мм и величине вводимой мощности около 850 кВт. Напомним, что плотность мощности $0,20 \text{ МВт/см}^2$ была достаточна для успешного пробоя в Т-10 [10].

4. Дополнительные возможности гиротронного комплекса и дальнейшие планы его развития

В силу того, что гиротрон способен генерировать СВЧ-мощность с длительностью импульсов до 30 с, а время подъёма тока в плазме токамака составляет 1–2 с, возможно поэтапное использование гиротрона, как для СВЧ-пробоя, так и для нагрева плазмы на стационарной стадии разряда. Напомним, что частота гиротрона 82,6 ГГц соответствует магнитному полю 1,5 Тл. При необходимости, в начале разряда пробой будет происходить на стороне сильного поля (внутренняя область вакуумной камеры) при центральном магнит-

ном поле токамака 1,2 Тл. Увеличение B_{tor} с 1,2 до 1,5 Тл позволяет переместить нагрев в центр плазмы. Нелинейный код DINA позволяет моделировать сценарий разряда с момента пробоя, создания круглой конфигурации поперечного размера плазмы на начальной стадии разряда и дальнейший переход к вытянутой диверторной конфигурации (см. детали и ссылки в [1]). Ранее результаты расчётов были проверены сравнением с экспериментальными результатами токамака TCV [14]. Сценарии разряда для T-15МД с постоянным во времени B_{tor} приведены в [1, 15]. Расчёты, с использованием кода DINA, проведённые для данной статьи, показали, что во время одного плазменного импульса есть возможность увеличить тороидальное поле с 1,2 до 1,5 Тл за время около 300 мс, при этом переместив нагрев плазмы в центр. Пример данного сценария изображён на рис. 3. В качестве базовых параметров кода DINA была использована электротехническая модель токамака T-15МД, полученная на основе данных, указанных в работе [1].

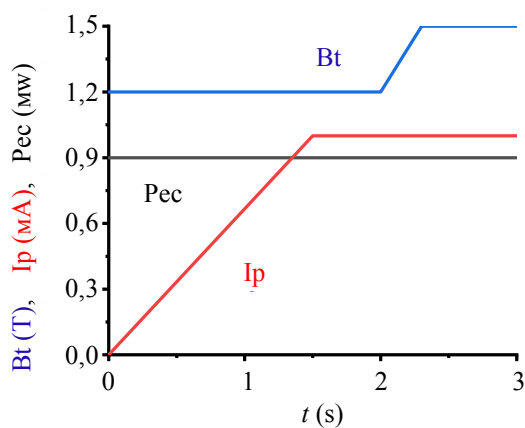


Рис. 3. Пример сценария разряда при пробое на внутренней стороне камеры и смещении области резонанса в центр плазменного шнура при подъеме B_{tor} (черный – мощность гиротрона, красный – эволюция тока плазмы во время разряда, синий – временная эволюция тороидального магнитного поля)

Дополнительными возможностями развития гиротронного комплекса является нагрев плазмы на третьей гармонике необыкновенной волны. Более подробно об этом можно ознакомиться в работе [16].

В дальнейшем, при проведении экспериментов с вытянутой диверторной конфигурацией поперечного размера плазмы система ввода должна удовлетворять различным сце-

нариям ЭЦР-нагрева. Габариты зеркал системы СВЧ-ввода должны позволять размещение до 4-х подобных систем в пределах экваториального патрубка T-15МД. Отдельная конструкция потребуется для размещения системы ввода в верхнем патрубке установки. Новая система должна сочетать возможность быстрого (за сотые доли секунды) и точного (не хуже $0,5^\circ$) контролируемого изменения угла направления ввода СВЧ-излучения в плазму (при подавлении МГД-неустойчивостей) со стойкостью к термическим и механическим нагрузкам, возникающим в квазиоптической системе, как при увеличении длительности импульса вплоть до 30 секунд, так и при возможном большом срыве плазменного шнура.

5. Заключение

Описан гиротронный комплекс и система ввода СВЧ-излучения первого этапа работы установки T-15МД. Первостепенной задачей при конструировании системы ввода СВЧ-излучения является оптимизация параметров пучка для предыонизации рабочего газа. Исходя из конструктивных особенностей патрубка удалось получить максимальную плотность мощности в области фокусировки $\sim 0,25$ МВт/см². Основываясь на результатах, полученных на установке T-10 [10], такая плотность мощности позволяет надеяться на формирование успешного пробоя газа и на установке T-15МД.

Показано, что при необходимости СВЧ-пробоя на внутреннем обводе вакуумной камеры установки ($B_{tor}(r/a = 0) = 1,2 \div 1,3$ Тл), электротехническая система T-15МД позволяет быстро увеличить тороидальное магнитное поле в процессе разряда (например, за несколько сотен мс с 1,3 до 1,5 Тл при длине импульса 5–10 с), переместив область СВЧ-нагрева плазмы в центр.

Авторы статьи признательны Баринову М. А. за конструирование системы ввода СВЧ-излучения, применявшейся на токамаке T-10, что облегчило создание системы ввода, описанной выше. Также авторы благодарят Кислова А. Я. за полезные дискуссии и ценные замечания.

ЛИТЕРАТУРА

1. Хвостенко П. П., Анашкин И. О., Бондарчук Э. Н. и др. // ВАНТ. Сер. Терм. синтез. 2019. Т. 42. Вып. 1. С. 15.
2. Kislov D. A. // Nucl. Fusion. 2007. V. 47. P. S590.
3. Borschevskiy A., Neudatchin S., Pimenov I. et al. // EPJ Web of Conferences. 2019. Vol. 203. P. 02004. <https://doi.org/10.1051/epjconf/201920302004>
4. Курнева Н. А., Кислов Д. А., Рой И. Н. // ВАНТ. Сер. Терм. синтез. 2020. Т. 43. Вып. 1. С. 64.
5. Денисов Г. Г., Малыгин В. И., Цветков А. И. и др. // Известия вузов. Радиофизика. 2020. Т. LXIII. № 5–6. С. 369.
6. Kolemen E., Welander A. S., La Haye R. J. et al. // Nucl. Fusion. 2014. Vol. 54. P. 073020.
7. Wagner D., Grunwald G., Leuterer F. et al. // Nucl. Fusion. 2008. Vol. 48. P. 054006.
8. Kim S. G., Jeong M., Han J. W. et al. // EPJ Web of Conferences. 2017. Vol. 157. P. 03022.
9. Kirneva N. A., Shelukhin D. A., Borschevskiy A. A. et al. / 34th EPS Conference on Plasma Phys. (Warsaw, 2007). Vol. 31F. P. 1.164.
10. Borshchegovskiy A., Dremin M., Il'in V., Kirneva N. et al. // EPJ Web of Conferences. 2012. Vol. 32. P. 02004. <https://doi.org/10.1051/epjconf/20123202004>
11. Stober J., Jackson G. L., Ascasibar E. et al. // Nucl. Fusion. 2011. Vol. 51. P. 083031.
12. Пименов И. С., Белоусов В. И. и др. / Сборник тезисов докладов XLVII Международной Звенигородской конференции по физике плазмы и УТС (Звенигород, 2020). С. 88.
13. Маркузе Д. Оптические волноводы. – М.: Изд-во «МИР», 1974.
14. Khayrutdinov R. R., Lister J. B., Lukash V. E., Wainwright J. P. // Plasma Phys. Control. Fusion. 2001. Vol. 43. P. 321.
15. Дубров М. Л., Лукаш В. Э., Хайрутдинов Р. Р. и др. // ВАНТ. Сер. Терм. синтез. 2017. Т. 40. Вып. 1. С. 56.
16. Курнева Н. А., Борщеговский А. А., Кюянов А. Ю. и др. // ВАНТ. Сер. Терм. синтез. 2021. Т. 44. Вып. 3. С. 24.

PACS: 52.50 Sw, 52.55 Fa

HF-launcher system of the gyrotron set-up of the T-15MD tokamak on the first stage operation

I. S. Pimenov¹, V. I. Belousov², A. A. Borschevskiy¹, M. Y. Zharkov³, S. V. Neudatchin¹, I. N. Roy¹, E. N. Khayrutdinov¹, L. G. Popov⁴, M. V. Agapova⁴, and L. M. Belnova⁴

¹ NRC “Kurchatov Institute”

1 Akademika Kurchatova pl., Moscow, 123182, Russia
E-mail: pimenowigor@mail.ru

² IAP RAS

46 Ulyanov st., Nizhny Novgorod, 603950, Russia

³ Joint Stock Company (JSC) “Red Star”

1A Elektrolitniy proezd, Moscow, 115230, Russia

⁴ GYCOM Ltd.

46 Ulyanov st., Nizhny Novgorod, 603950, Russia

Received August 10, 2021

At the current time, the preparatory stage of work for experiments on T-15MD tokamak is underway at the National Research Center «Kurchatov Institute». Important step in this stage is building-up of the gyrotron set-up and assembling of HF-launcher for electron cyclotron resonance (ECR) heating plasma. During commissioning works, due to the reduced power supply, the T-15MD will operate with relatively low magnetic fields (toroidal magnetic field in the center of the plasma $B_{tor}(r/a = 0) \approx 1.5$ T). Therefore, the gyrotron frequency is selected to be 82.6 GHz. The output power of the gyrotron is 1 MW with 30 s maximum pulse length. The experiments are supposed to be carried out on the second harmonic of an extraordinary wave when microwave radiation is introduced from the outside of the vacuum chamber (resonance

at $B_{tor} \approx 1.5$ T). The HF-power is transported from gyrotron to the tokamak via evacuated 35 m long corrugated waveguide with inner diameter 63.5 mm.

The main task of the T-15MD gyrotron complex at the first stage operation is the breakdown of the working gas. The input system allows focusing the wave beam, and in the focusing area the power density in the cross section reaches values $\sim 0.20\text{--}0.25$ MW/cm², which is similar to that of in the successful breakdown experiments on the T-10 tokamak. The last mirror of the HF-launcher system is capable of deflecting the beam in the toroidal and poloidal directions within ($\pm 25^\circ$) and (-5°)÷($+35^\circ$) subsequently. This gives flexibility to experiments, both on breakdown and to other tasks of ECR heating and maintenance of current drive by electron-cyclotron waves at the quasi-stationary stage of discharge.

Under breakdown conditions on the side of a strong magnetic field ($B_{tor}(r/a = 0) = 1.3$ T), electrical system of T-15MD allows to raise the magnetic field during discharge, moving the heating to the center.

Keywords: gyrotron, ECRH, breakdown, HF-launcher.

DOI: 10.51368/1996-0948-2022-1-5-11

REFERENCES

1. P. P. Khvostenko, I. O. Anashkin, E. N. Bondarchuk et al., VANT. Ser. Term. Syntez **42** (1), 15 (2019) [in Russian].
2. D. A. Kislov, Nucl. Fusion **47**, S590 (2007).
3. A. Borschegovskiy, S. Neudatchin, I. Pimenov et al., EPJ Web of Conferences **203**, 02004 (2019) <https://doi.org/10.1051/epjconf/201920302004>
4. N. A. Kirneva, D. A. Kislov, and I. N. Roy, VANT. Ser. Term. Syntez **43** (1), 64 (2020) [in Russian].
5. G. G. Denisov, V. I. Malygin, A. I. Tsvetkov et al., Izvestiya vuzov. Radiofizika **LXIII** (5–6), 369 (2020).
6. E. Kolemen, A. S. Welander, R. J. La Haye et al., Nucl. Fusion **54**, 073020 (2014).
7. D. Wagner, G. Grunwald, F. Leuterer et al., Nucl. Fusion **48**, 054006 (2008).
8. S. G. Kim, M. Jeong, J. W. Han et al., EPJ Web of Conferences **157**, 03022 (2017).
9. N. A. Kirneva, D. A. Shelukhin, A. A. Borschegovskiy et al., in *Proc. 34th EPS Conference on Plasma Phys.* (Warsaw, 2007), p. 1.164.
10. A. Borshchegovskiy, M. Dremin, V. Il'in, N. Kirneva et al., EPJ Web of Conferences **32**, 02004 (2012) <https://doi.org/10.1051/epjconf/20123202004>
11. J. Stober, G. L. Jackson, E. Ascasibar et al., Nucl. Fusion **51** (2011) 083031 (2011).
12. I. S. Pimenov, V. I. Belousov, A. A. Borschegovskiy et al., in *Proc. Collection of abstracts of the XLVII Zvenigorod International Conference on Plasma Physics and Controlled Fusion* (Zvenigorod, 2020), p. 88.
13. D. Marcuse, *Light Transmission Optics* (New York / Cincinnati / Toronto / London, Van Nostrand Reinhold Company, 1972).
14. R. R. Khayrutdinov, J. B. Lister, V. E. Lukash, and J. P. Wainwright, Plasma Phys. Control. Fusion **43**, 321 (2001).
15. M. L. Dubrov, V. E. Lukash, R. R. Khayrutdinov et al., VANT. Ser. Term. Syntez **40** (1), 56 (2017) [in Russian].
16. N. A. Kirneva, A. A. Borschegovskiy, A. Yu. Kuanov et al., VANT. Ser. Term. Syntez **44** (3), 24 (2021) [in Russian].