

УДК 533.9, 621.039.626, 621.039.643
 DOI: 10.51368/2307-4469-2023-11-5-407-415
 EDN: RMNYHX

PACS: 52.50 Sw, 52.55 Fa



Результаты по вводу СВЧ-излучения от гиротрона в вакуумную камеру токамака T-15МД

И. С. Пименов, А. А. Борщеговский, Э. Р. Ахмедов, С. В. Неудачин,
 В. Н. Новиков, В. Н. Павлов, И. Н. Рой, Н. В. Шапотковский, И. Н. Хромков

Приводятся результаты двух фаз завершающих испытаний (конец 2021 – начало 2023 годов) по подготовке к первым экспериментам с круглой плазмой на установке токамак T-15МД. На этом этапе система СВЧ-нагрева (гиротронный комплекс) установки оснащена одним гиротроном с рабочей частотой 82,6 ГГц и выходной мощностью около 1 МВт. Установлена фокусирующая система ввода СВЧ-излучения, которая может быть использована как для предыонизации рабочего газа, так и для нагрева плазмы. Осуществление СВЧ-пробоя планируется на второй гармонике необыкновенной волны. Испытания, проведённые на гиротронном комплексе T-15МД, включали в себя юстировку вакуумированного зеркально-волноводного тракта, общая длина которого 37 м, и измерения потерь СВЧ-мощности до входа в камеру токамака. Измерения величины мощности гиротрона производились калориметрическим способом, при этом значение коэффициента передачи СВЧ-линии передачи составило величину не меньше 0,9. Осуществлён ввод СВЧ-излучения в камеру T-15МД на уровне мощности 0,95 МВт при длительности импульса 125 мс.

Ключевые слова: гиротрон, ЭЦР-нагрев, волноводный тракт, калориметрические измерения, токамак.

Введение

На экспериментальных термоядерных установках для увеличения энергосодержания плазмы используют, как инжекцию нейтраль-

ных атомов (NBI), так и высокочастотные методы нагрева, основанные на Электронно-Циклотронном и Ионно-Циклотронном Резонансе с соответствующими диапазонами частот (ЭЦР ~ 60÷200 ГГц, ИЦР ~ 10÷100 МГц), а также Нижнегибридный нагрев (НГ ~ 1÷5 ГГц). Все выше перечисленные методы дополнительного нагрева плазмы будут применяться на T-15МД.

Сейчас на T-15МД реализован только ЭЦР-метод нагрева плазмы. В качестве источников мощного СВЧ-излучения ~1 МВт в диапазоне частот Электронно-Циклотронного Резонанса и его гармоник применяются гиротроны, разработанные компанией ЗАО НПП «ГИКОМ» совместно с ИПФ РАН (г. Нижний Новгород) [1]. На текущий период времени гиротронный комплекс токамака T-15МД оснащён одним гиротроном с рабочей частотой излучения 82,6 ГГц [2] и длительностью импульса до 30 с.

Пименов Игорь Сергеевич, м.н.с.
 E-mail: Pimenov_IS@nrcki.ru; nrcki@nrcki.ru
Борщеговский Александр Алексеевич, с.н.с.
 Ахмедов Эмиль Рамазанович, инженер 1-й кат.
 Неудачин Сергей Владимирович, в.н.с., к.ф.-м.н.
 Новиков Владимир Николаевич, гл. специалист.
 Павлов Владимир Николаевич, вед. инженер.
 Рой Игорь Николаевич, нач. лаб.
 Шапотковский Николай Владимирович, с.н.с.
 Хромков Игорь Николаевич, вед. электроник.
 НИЦ «Курчатовский Институт».
 Россия, 123182, Москва, пл. Курчатова, 1.

Статья поступила в редакцию 15.09.2023
 После доработки 2.10.2023
 Принята к публикации 10.10.2023

© Пименов И. С., Борщеговский А. А., Ахмедов Э. Р.,
 Неудачин С. В., Новиков В. Н., Павлов В. Н., Рой И. Н.,
 Шапотковский Н. В., Хромков И. Н., 2023

Установленный гиротрон предназначен как для предыонизации рабочего газа на начальной стадии разряда, так и последующего нагрева электронной компоненты плазмы. СВЧ-пробой и нагрев планируется осуществлять на второй гармонике ЭЦР в X-моду. В настоящее время рассматриваются различные варианты развития гиротронного комплекса (см. один из них в [3]).

Для энергетического пуска Т-15МД, предыонизация с помощью СВЧ-излучения оказывается наиболее актуальной, так как напряжение обхода на токамаке на стадии пуска не будет превышать 6 В из-за ограничения в энергопитании установки, что делает невозможным пробой с помощью одного только индуктора. Расчётное минимальное значение напряжения, необходимого для пробы на Т-15МД составляет около 16 В. (Напряжение обхода на токамаке Т-10 во время индукционного пробы составляло величину 20÷25 В). Эксперименты по СВЧ-пробой проводились, как на зарубежных [4–6], так и на отечественных установках [7–9].

Использование фокусирующей системы ввода СВЧ-излучения на токамаке Т-10, в отличие от экспериментов на других установках, позволяло локализовать пробой в узкой области зоны Электронно-Циклотронного Резонанса (ЭЦР) [9]. Гибкость этой системы, установленной в разных патрубках Т-10, позволяла индивидуально изменять угол ввода ЭЦР-волн для трёх гиротронов. В экспериментах с одновременной со и контр инжекцией 1,5 МВт введённой в плазму СВЧ-мощности от двух гиротронов неожиданно был обнаружен новый тип L-N переходов (скачкообразный переход в режим улучшенного удержания с формированием внутреннего транспортного барьера на электронной температуре) [10, 11].

В работу входят результаты двух этапов испытаний, проходивших в разное время. На основании опыта, полученного в результате первого этапа, проходившего в конце 2021 года, был внесён ряд изменений, которые коснулись опорной конструкции волноводного тракта, высоковольтной системы питания гиротрона, системы быстрых защит, а также системы автоматизации управления гиротроном. Второй этап испытаний проходил в конце 2022 – начале 2023 годов.

Результаты данной работы были представлены на L Международной Звенигородской конференции по физике плазмы и УТС (Звенигород, март 2023 года) [12]. Работа поделена на главы следующим образом: в первой главе дано описание гиротронного стенда с согласующим блоком зеркал и основного высоковольтного источника питания; во второй главе представлен волноводный тракт с системой ввода; в третьей главе приведены результаты калориметрических измерений мощности СВЧ-излучения; четвертая глава посвящена вводу СВЧ-излучения в вакуумную камеру токамака Т-15МД; в конце приведены дискуссии и дано заключение.

1. Гиротронный стенд

На рис. 1 представлен гиротрон с коллекторной магнитной катушкой, установленный в криомагнит. Коллекторная катушка служит для снижения тепловой нагрузки в результате выхода электронного пучка гиротрона на коллектор. Фланец выходного окна, изготовленного из поликристаллического алмаза, соединен с зеркально-волноводным трактом.

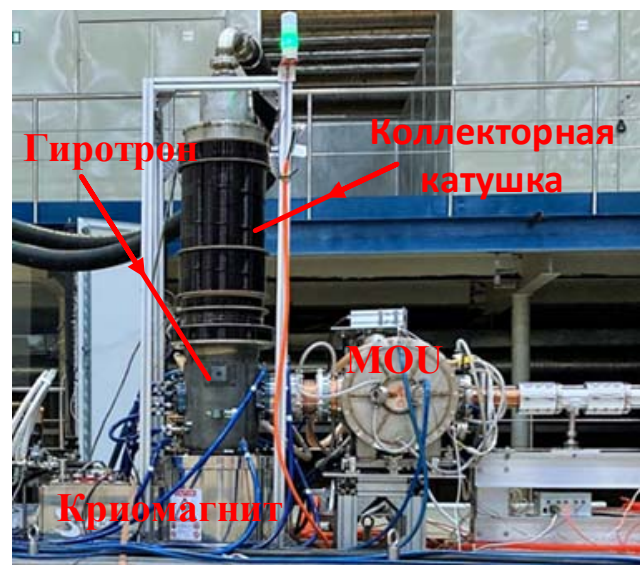


Рис. 1. Гиротрон: рабочая частота СВЧ-излучения 82,6 ГГц, мощность выходного СВЧ-излучения ~1 МВт, максимальная длительность импульса – 30 с

В состав гиротронного стенда, помимо гиротрона, входят:

- Криомагнит с источником питания.

- Катодная и коллекторные магнитные катушки с источниками постоянного и пилообразного тока.

- Система водяного охлаждения.
- Система низковольтного питания накала катода гиротрона.
- Быстрая защита от высоковольтного пробоя в гиротроне.
- Источник высоковольтного питания анода.
- Световая защита от СВЧ-пробоя в передающем тракте.
- Система зеркал, согласующих выходное излучение гиротрона с волноводом.

Требование к криомагниту и источнику питания: распределение магнитного поля соленоида должно удовлетворять техническому заданию завода изготовителя гиротронов. Стабильность источника питания по выходному току: не хуже ± 6 мА/час.

Параметры магнитных (катодной и коллекторной) катушек:

- величина магнитного поля в центре катодной катушки 300 Гс;
- максимальный ток 5 А.

Коллекторная катушка поделена на две секции: с постоянным и переменным током. Значение тока постоянной секции катушки не более 10 А, переменной от 10 до 25 А. При этом длительность нарастания и спада тока 30 мс.

Система водяного охлаждения состоит из двух контуров с проточной дистиллированной водой:

1. Контур охлаждения коллектора гиротрона.

Давление на входе – не более 4,5 атм.

Величина скорости протока не менее $52 \text{ м}^3/\text{час}$.

2. Контур охлаждения согласующего блока зеркал, алмазного окна, внутренних зеркал, резонатора и анода гиротрона.

Давление и скорость протока выставляются для каждого элемента индивидуально.

Стабильность низковольтного питания накала катода гиротрона: не более 1 % при стабильном сетевом напряжении.

Время срабатывания быстрой защиты гиротрона (замыкание накоротко высоковольтного источника питания со стороны гиротрона): не более 5 мкс.

Параметры высоковольтного источника питания анода:

Номинальное выходное напряжение источника = + 25 кВ, при возможности плавной регулировки в диапазоне 5÷35 кВ. Стабильность не хуже 0,5 % в диапазоне выходных напряжений от 20 до 35 кВ. Максимальный ток не более 100 мА. Максимальная длительность импульса 30 с. Время нарастания (передний фронт) напряжения 30 мкс.

Быстродействие световой защиты: не более 300 нс.

Система согласующих зеркал (MOU – Matching Optical Unit):

Выходное излучение формируется специальным преобразователем мод, встроенным в гиротрон и имеет вид квазигауссова пучка. С помощью двух медных профилированных зеркал СВЧ-излучение преобразуется в гауссов пучок необходимых размеров для прохождения по волноводу с внутренним диаметром 63,5 мм (рис. 2).

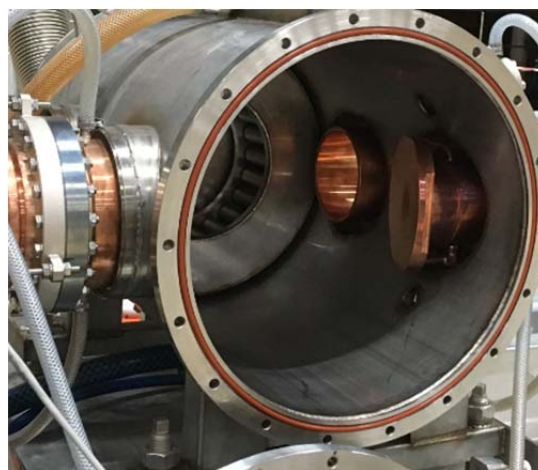


Рис. 2. Система согласующих зеркал гиротрона

Высоковольтное питание гиротрона

Номинальное значение ускоряющего напряжения для электронов, эмитируемых катодом гиротрона, составляет величину 70 кВ. С целью увеличения КПД прибора, а также снижения тепловой нагрузки на коллектор, высоковольтное питание осуществляется двумя источниками: основным (катодным; -45 кВ) и т. н. рекуперационным (анодным; + 25 кВ). Таким образом, электронный пучок гиротрона, замагниченный полем соленоида, входит в резонатор, находящийся под потен-

циалом анода, испытывая ускоряющее напряжение в 70 кВ. Далее, следуя магнитным силовым линиям, электроны, подвергаясь торможению, достигают коллектора, который имеет потенциал «земли». При этом анодный источник работает практически с нулевым током, а нагрузка на коллектор гиротрона в значительной степени ослабевает.

Катодный источник питания

На данном этапе испытаний использовался короткоимпульсный (до 150 мс) высоковольтный Модулятор «Бетон» (ВМБ) – емкостной накопитель с частичным разрядом ёмкости во время рабочего импульса и глубокой отрицательной обратной связью, обеспечивающей высокую стабильность выходного напряжения.

Параметры ВМБ:

- Величина импульсного напряжения $U = -20 \div -70$ кВ, регулируемая с точностью 1 %.
- Максимальный ток в импульсе: 50 А.
- Длительность импульса τ , регулируемая плавно в указанном диапазоне: $0,3 \div 150$ мс.
- Неравномерность и величина спада вершины для импульса с максимальной длительностью меньше 1 %.
- Длительность переднего фронта импульса $\tau_{пф}$ – не более 200 мкс.
- Длительность заднего фронта импульса $\tau_{зф}$ – не более 20 мкс.

Такие характеристики источника необходимы для работы с гиротроном в наладочном режиме, а также при проверке юстировки передающего тракта. ВМБ также использовался в ряде прецизионных экспериментов на токамаке Т-10, требующих быстрого включения ЭЦР-мощности, например, при изучении распространения тепловой волны, вызванной включением одного из гиротронов [13].

2. Волноводный тракт и система ввода СВЧ-излучения в камеру токамака Т-15МД

Волноводный тракт состоит из отрезков гофрированных волноводов длиной 1 м и внутренним диаметром 63,5 мм (рис. 3) и поворотных 90° волноводных уголков. Схема волноводного тракта представлена на рис. 4. На первом уголке изготовлен направленный

ответвитель проходящей мощности. Второй выполнен в виде поляризатора. Рабочей модой круглого сверхразмерного гофрированного волновода является гибридная мода HE_{11} [14], амплитуды электрического и магнитного поля которой вблизи стенки волновода стремятся к нулю из-за запредельных размеров шага гофры (для выбранной длины волны). Вследствие этого омические потери в таком волноводе очень малы. С одной стороны волноводная линия пристыкована к блоку согласующих зеркал гиротронного стенда, с другой к фланцу патрубка токамака, на котором смонтирована система ввода СВЧ-мощности. Длина волноводной линии передачи от гиротрона до установки Т-15МД около 37 м.

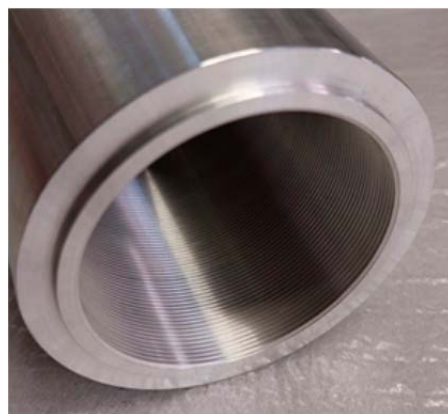


Рис. 3. Гофрированный волновод с внутренним диаметром 63,5 мм

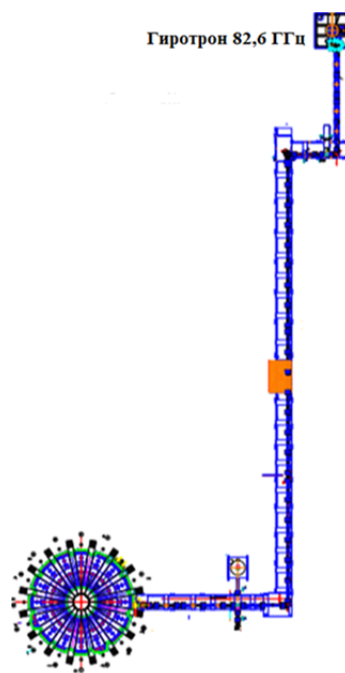


Рис. 4. Схема волноводного тракта. Общая длина линии СВЧ-передачи около 37 м

На конечном участке волноводного тракта установлены диэлектрическая и механическая развязки (рис. 5). Диэлектрическая вставка обеспечивает гальваническую развязку между волноводом (а также гиротроном) и камерой токамака.

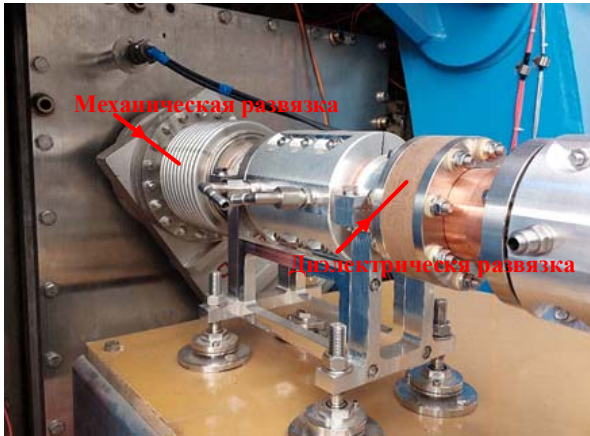


Рис. 5. Конечный участок волноводного тракта. Механическая и диэлектрическая развязки

Механическая развязка служит для компенсации взаимных перемещений волновода и стенок вакуумной камеры, а также для погашения вибраций во время работы установки. При прогреве вакуумной камеры взаимные перемещения могут достигать значений до 15 мм.

Поскольку внутренний объем волновода соединен с вакуумным объемом установки, перед токамаком располагается вакуумный затвор, который открывается при совместной работе с гиротроном. Для откачки волноводного тракта используются две вакуумные ячейки, в каждую из которых входят форвакуумный и турбомолекулярный насосы. Величина давления в тракте поддерживается в среднем на уровне 5×10^{-6} Торр.

На рис. 6 представлена фотография установленной системы ввода СВЧ-мощности [15], сделанная изнутри вакуумной камеры токамака. Для данной системы была произведена внутрикамерная калибровка полоидальных и тороидальных углов ввода СВЧ-излучения, которая производилась с помощью лазера, установленного соосно в центре конечной части волноводного тракта. Прохождение крайних траекторий оси СВЧ-пучка схематично представлены на рис. 7–8. Асимметрия по полоидальному углу связана с

устройством системы ввода. Асимметрия по тороидальному углу вызвана расположением зеркал на фланце установки (см. рис. 6).



Рис. 6. Система ввода СВЧ-излучения, установленная внутри вакуумной камеры Т-15МД

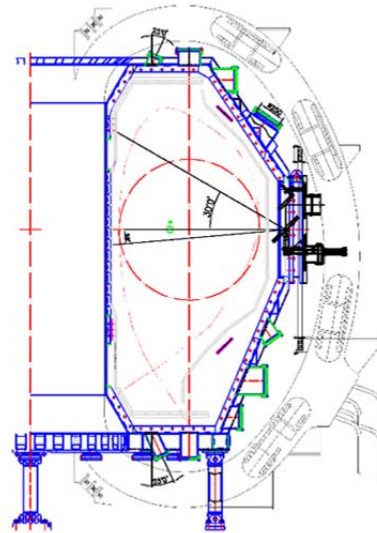


Рис. 7. Полоидальное сечение токамака Т-15МД

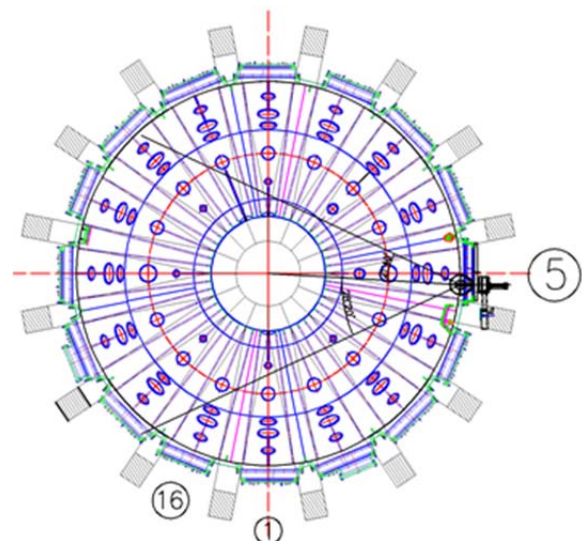


Рис. 8. Экваториальное сечение токамака Т-15МД

3. Калориметрические измерения мощности СВЧ-излучения. Коэффициент передачи

Волноводный тракт оснащен двумя волноводными переключателями, расположенными после первого и последнего поворотных уголков, которые с помощью механических приводов могут, при необходимости, вдвигать зеркало в волновод, отводя СВЧ-излучение из волноводного тракта в поглощающую нагрузку. Таким образом, можно оценить мощность излучения в начале и в конце передающей линии (рис. 9–10). Более того, в конце линии передачи смонтирована поглощающая нагрузка с водяным охлаждением, позволяющая принимать 1 МВт мощности при длительности импульса гиротрона в 30 с.

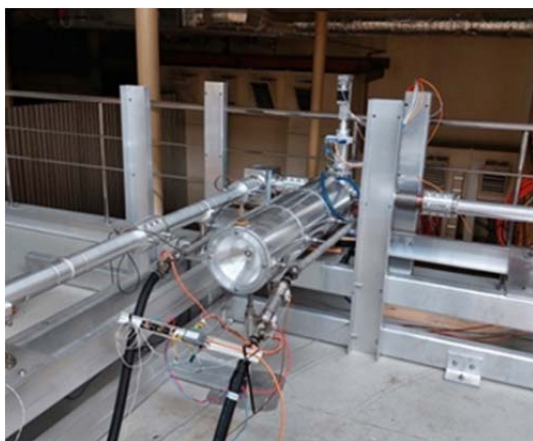


Рис. 9. Калориметрическая нагрузка, расположенная вблизи гиротрона



Рис. 10. Калориметрическая нагрузка в зале Т-15МД

До проведения калориметрических измерений была проведена механическая юстировка волноводного тракта, которая заключалась в тщательной проверке как прямолинейности участков, расположенных между поворотными

уголками, так и перпендикулярности поворотов.

Юстировка излучения, выходящего из гиротрона в МОУ, осуществляется заводом изготовителем гиротрона. Проверка юстировки ввода СВЧ-излучения в волновод на выходе блока согласующих зеркал, после сборки, осуществлялась с помощью фокусирующей тефлоновой линзы, определяющей соосность СВЧ-пучка с волноводом (при длительности импульса ВМБ = 250 мкс). Местоположение пучка на выходе блока зеркал контролировалось посредством жидкого кристалла с поглотителем (при длительности = 400 мкс). На рис. 11 показан отпечаток СВЧ-пучка на жидкокристаллической мишени с расстояния ~ 1 м от отворачивающего зеркала в конце линии передачи, которую качественно можно считать вполне удовлетворительной. При плохой юстировке форма пучка становится либо неровной, либо пучок вообще «рассыпается».

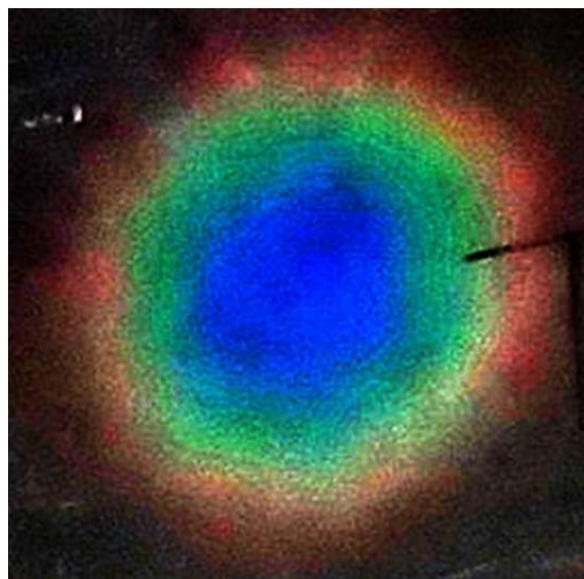


Рис. 11. След от пучка гиротрона на выходе из волновода на жидком кристалле

Калориметрическая нагрузка рассчитана на короткую длительность импульса гиротрона; не более 150 мс при уровне мощности СВЧ-излучения ~ 1 МВт. Измерительная калориметрическая нагрузка изображена на рис. 9, 10. На стороне, противоположной ее входу, установлено рассеивающее зеркало, которое равномерно распределяет гауссовый СВЧ-пучок по внутренней стенке цилиндра, где расположена намотанная тефлоновая трубка с проточной дистиллированной водой.

На входе и выходе водяного контура нагрузки установлены термодатчики, с которых берется разностный сигнал, пропорциональный разности температур. Принцип калориметрических измерений мощности СВЧ-излучения заключается в сравнении интегралов $\int_{t_1}^{t_2} \Delta U(t) dt$, полученных от калибровочного нагревательного источника, расположенного на входе воды в нагрузку, и от импульса гиротрона, где $\Delta U(t)$ – разностный сигнал с термодатчиков. При этом температура и скорость протока воды на входе должны поддерживаться постоянными во времени. Точность калориметрических измерений обычно составляет величину 10 %.

На гиротронном комплексе Т-15МД калибровочный источник включается на время $t = 100$ с при мощности подогрева ≈ 600 Вт. На рис. 12 представлены характерные кривые, полученные в ходе калориметрических измерений. Осциллограмма основных рабочих параметров гиротронного импульса приведена на рис. 13. В результате многократных измерений мощность, измеренная в начале передающей линии, составила величину ≈ 950 кВт, что соответствует паспортному значению выходной мощности гиротрона. С подобной нагрузкой была проведена серия измерений в конце волноводного тракта. В итоге измеренный коэффициент передачи мощности составил величину не меньше 0,9.

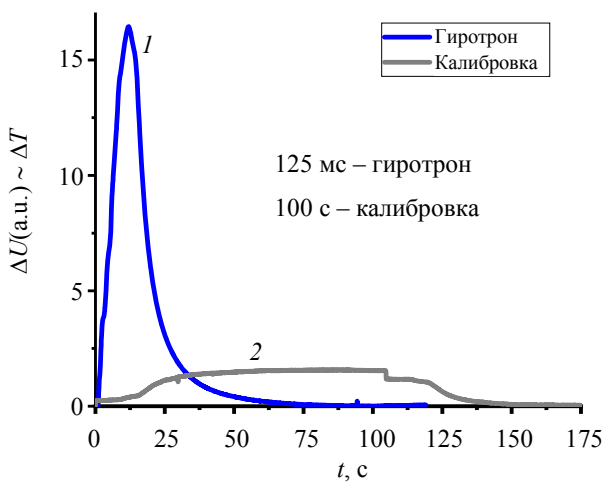


Рис. 12. Сигналы с термодатчиков: длительность импульса гиротрона 125 мс, $P_{свч} = 950$ кВт (синяя кривая); калибровка: $t = 100$ с, $P_{калибровки} \approx 600$ Вт (серая кривая)

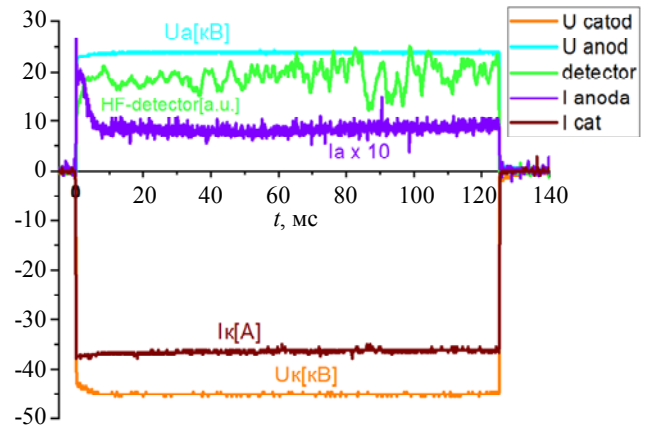


Рис. 13. Осциллограмма импульса гиротрона длительностью 125 мс при вводе СВЧ-излучения в измерительную нагрузку. $U_k = -46$ кВ, $U_a = +24$ кВ, $I_k = 36,5$ А, к.п.д. = $P_{свч}/U_k I_k = 0,57$

4. Ввод СВЧ-излучения гиротрона в вакуумную камеру токамака Т-15МД

Проведена серия импульсов в откачанную камеру токамака Т-15МД при номинальном значении мощности гиротрона 950 кВт и длительности СВЧ-импульса 125 мс. Ввод излучения производился при различных тороидальных углах β_{tor} и нулевом полоидальном (экваториальный ввод). В работе гиротрона, при тороидальном угле ввода вблизи 0° (поперечный ввод), практически с самого начала импульса, наблюдался срыв генерации, что свидетельствует о значительной доли отражённой мощности, поступающей по волноводному тракту обратно в гиротрон. В плазменных разрядах, при наличии поглощения, этот эффект должен исчезнуть.

5. Дискуссии

Во время испытаний гиротронного комплекса возник ряд проблем, затруднявших дальнейшую работу:

5.1. Тренировка волноводного тракта

Несмотря на высокий класс точности изготовления элементов волноводной линии и тщательность сборки, на любом участке линии передачи встречаются различного рода неоднородности (микроострия, окисные пленки, пылинки и т. п.), которые мешают прохождению СВЧ-мощности. Для устранения этой проблемы проводится тренировка волно-

водного тракта, которая заключается в постепенном увеличении мощности и длительности гиротронного импульса. В результате прохождения СВЧ-излучения по волноводу происходит как тепловыделение на отдельных участках (омический нагрев; зависит от выделяющейся энергии), так и искрение микроострий (непосредственное воздействие электрического поля волны; зависит от мощности). Оба этих явления приводят к сильному газовой выделению и СВЧ-пробоем в волноводе. В следствие этого возникает отраженная мощность, которая поступает в гиротрон. Это приводит к срыву генерации и к электрическому пробоем в гиротроне.

5.2. Воздушный пробой в высоковольтном отсеке гиротрона

Электрический пробой происходит в наиболее напряженном, с точки зрения высоковольтного напряжения, месте гиротрона, а именно между катодом и анодом. Этот пробой может «перекинуться» на воздух через катодный изолятор. В результате по земляным шинам протекают токи большой величины (до $\sim 1\div 10$ кА). Во время таких пробоев контроллер системы автоматизации управления гиротроном входит в режим длительного ожидания (зависание), что приводит к потере управления гиротронным комплексом. Решение этой проблемы видится только в осуществлении полной гальванической развязки между гиротроном и контроллером посредством оптической связи.

Заключение

Введён в эксплуатацию гиротронный стенд с рабочей частотой излучения 82,6 ГГц и мощностью выходного СВЧ-излучения ~ 950 кВт. Измеренный калориметрическим способом, коэффициент передачи волноводного тракта является величиной не меньше 0,9. Длительность импульса при совместной работе с Т-15МД составила 125 мс при длине импульса, ограниченной возможностями временно используемого источника питания гиротрона.

Данная работа выполнена в рамках
Государственного задания НИЦ «Курчатовский
институт».

ЛИТЕРАТУРА

1. Денисов Г. Г., Малыгин В. И., Цветков А. И. и др. / Известия вузов. Радиофизика. 2020. Т. LXIII. № 5–6. С. 369.
2. Курнева Н. А., Кислов Д. А., Рой И. Н. / ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез. 2020. Т. 43. Вып. 1. С. 64–74.
3. Курнева Н. А., Борщеговский А. А., Куянов А. Ю. и др. / ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез. 2021. Т. 44. Вып. 3. С. 24–36.
4. Jackson G. L., Humphreys D. A., Hyatt A. W. et al. / Nucl. Fusion. 2011. Vol. 51. P. 083015.
5. Stober J., Jackson G. L., Ascasibar E. et al. / Nucl. Fusion. 2011. Vol. 51. P. 083031.
6. Bae Y. S., Jeong J. H., Park S. I. et al. / Nucl. Fusion. 2008. Vol. 49. P. 022001.
7. Shchepetov S. V., Tereshchenko M. A., Vasilkov D. G., Kholnov Yu. V. / Plasma Phys. Control Fusion. 2018. Vol. 60. P. 125003.
8. Kirneva N. A., Shelukhin D. A., Borschegovskiy A. A. et al. / 34th EPS Conference on Plasma Phys. Warsaw, 2–6 July 2007 ECA. Vol. 31F. P. 1.164.
9. Borshchegovskiy A., Dremın M., Il'in V., Kirneva N. et al. / EPJ Web of Conferences. 2012. Vol. 32. P. 02004.
10. Borschegovskiy A., Neudatchin S., Pimenov I. et al. / EPJ Web of Conferences. 2019. Vol. 203. P. 02004. <https://doi.org/10.1051/epjconf/201920302004>
11. Neudatchin S. V., Borschegovskiy A. A., Pimenov I. S., Zemtsov I. A. 2020 Proc. 28-th Fusion Energy Conference (virtual Conf. 2021) EX/P4-2.
12. Пименов И. С., Борщеговский А. А., Новиков В. Н. и др. / L Международная (Звенигородская) конференция по физике плазмы и УТС. – Звенигород, 20–24 марта 2023. С. 112. doi: 10.34854/ICPAF.2023.50.2023.1.1.068, <http://www.fpl.gpi.ru/Zvenigorod/L/Sbornik-2023.pdf>
13. Neudatchin S. V., Kislov A. Ya., Krupin V. A., Ly-senko S. E., Pavlov Yu. D., Syshkov A. V., Borshagovskii A. A., Chistyakov V. V., Ilin V. I., Pterskii V. V., Poznyak V. I., Roi I. N. / Nucl. Fusion. 2003. Vol. 43. P. 1405–1410.
14. Clarricoats P. J. B. et al. / PROC. IEE. 1975. Vol. 122. № 11.
15. 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. / Прикладная физика. 2022. № 1. С. 5–11.

The first results on the injection of the HF-radiation from the gyrotron into the vacuum chamber of the T-15MD tokamak

I. S. Pimenov, A. A. Borschevskiy, E. R. Akhmedov, S. V. Neudatchin, V. N. Novikov, V. N. Pavlov, I. N. Roy, N. V. Shapotkovsky and I. N. Khromkov

NRC “Kurchatov Institute”
1 Akademika Kurchatova pl., Moscow, 123182, Russia
E-mail: Pimenov_IS@nrcki.ru

Received 15.09.2023; revised 2.10.2023; accepted 10.10.2023

This paper presents the results of two phases of the final tests (end of 2021 – beginning of 2023) in preparation for the first experiments with circular plasma on T-15MD tokamak. At this stage the HF-heating system (gyrotron set-up) of the tokamak is equipped with one gyrotron with an operating frequency of 82.6 GHz and an output power of about 1 MW. A focusing HF-launcher has been installed, which can be used both for breakdown the working gas and for heating the plasma. The implementation of the breakdown is planned on the second harmonic in extraordinary mode (X-mode). The tests carried out on the gyrotron set-up included the adjustment of the evacuated mirror-waveguide transmission line, the total length of which is 37 m and measurements of HF-power losses before entering to the tokamak vacuum chamber. Measurements of the gyrotron power was done by calorimetric method while the value of the waveguide transmission coefficient was not less than 0.9.

Keywords: gyrotron, ECR heating, waveguide path, calorimetric measurements, tokamak.

DOI: 10.51368/2307-4469-2023-11-5-407-415

REFERENCES

1. Denisov G. G., Malygin V. I., Tsvetkov A. I. et al., *Izvestiya vuzov. Radiofizika* **LXIII** (5–6), 369 (2020).
2. Kirneva N. A., Kislov D. A. and Roy I. N., *VANT. Ser. Term. Syntez* **43** (1), 64 (2020) [in Russian].
3. Kirneva N. A., Borschevskii A. A., Kuanov A. Yu. et al., *VANT. Ser. Term. Syntez* **44** (1), 24–36 (2021).
4. Jackson G. L., Humphreys D. A., Hyatt A. W. et al., *Nucl. Fusion* **51**, 083015 (2011).
5. Stober J., Jackson G. L., Ascasibar E. et al., *Nucl. Fusion* **51**, 083031 (2011).
6. Bae Y. S., Jeong J. H., Park S. I. et al., *Nucl. Fusion* **49**, 022001 (2008).
7. Shchepetov S. V., Tereshchenko M. A., Vasilkov D. G. and Kholnov Yu. V., *Plasma Phys. Control Fusion* **60**, 125003 (2018).
8. Kirneva N. A., Shelukhin D. A., Borschevskiy A. A. et al. *Proc. 34th EPS Conference on Plasma Phys. Warsaw, 2–6 July 2007 ECA. Vol. 31F. P. 1.164.*
9. Borschevskiy A., Dreminev M., Il'in V., Kirneva N. et al., *EPJ Web of Conferences* **32**, 02004 (2012).
10. Neudatchin S. V., Borschevskiy A. A., Pimenov I. S., Zemtsov I. A., 2020 *Proc. 28-th Fusion Energy Conference (virtual Conf. 2021) EX/P4-2*
11. Borschevskiy A., Neudatchin S., Pimenov I. et al., *EPJ Web of Conferences* **203**, 02004 (2019) <https://doi.org/10.1051/epjconf/201920302004>
12. Pimenov I. S., Borschevskiy A. A., Novikov V. N. et al., *L International Zvenigorod Conference on Plasma Physics and Controlled Fusion, ICPAF-2023 March 20–24, 2023*, p. 112. doi: 10.34854/ICPAF.2023.50.2023.1.1.068, <http://www.fpl.gpi.ru/Zvenigorod/L/Sbornik-2023.pdf>
13. Neudatchin S. V., Kislov A. Ya., Krupin V. A., Lysenko S. E., Pavlov Yu. D., Syshkov A. V., Borschevskii A. A., Chistyakov V. V., Ilin V. I., Piterskii V. V., Poznyak V. I. and Roi I. N., *Nucl. Fusion* **43**, 1405–1410 (2003).
14. Clarricoats P. J. B. et al., *PROC. IEE* **122** (11) (1975).
15. Pimenov I. S., Belousov V. I., Borschevskiy A. A., Zharkov M. Y., Neudatchin S. V., Roy I. N., Khayrutdinov E. N., Popov L. G., Agapova M. V. and Belnova L. M., *Applied Physics*, № 1, 5–11 (2022) [in Russian].