

УДК 533.9, 621.039.626, 621.039.643
 EDN: JDTQZQ

PACS: 52.50 Sw, 52.55 Fa



Первые результаты испытания гиротрона и волноводного тракта установки токамак Т-15МД при большой длительности импульса

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

Приводятся результаты первых совместных испытаний гиротрона и волноводного тракта на большую поглощающую нагрузку в длинном импульсе от высоковольтного источника питания «Виктория». Достигнута длительность импульса 9,4 с. Оцененная мощность СВЧ-излучения составляет величину 0,85 МВт.

Ключевые слова: гиротрон, ЭЦРН, токамак Т-15МД, поглощающая нагрузка, волноводный тракт.

DOI: 10.51368/1996-0948-2024-3-38-43

Введение

До последнего времени самой крупной экспериментальной термоядерной установкой в нашей стране был токамак Т-10 с длительностью разряда 1 с, в котором величина плато тока составляла 0,5 с. В экспериментах по Электронно-Циклотронно Резонансному Нагреву (ЭЦРН) на Т-10 применялись мощные

импульсные генераторы СВЧ-излучения (гиротроны) с максимальной длительностью ~ 500 мс. В большом количестве импульсов, гиротроны СВЧ-комплекса Т-10 работали от модулей источника питания «Виктория» [1, 2] с величиной переднего фронта ~ 10 мс. В некоторых экспериментах, требующих быстрого включения СВЧ-нагрева, для питания одного из гиротронов использовался источник питания «Бетон» с длительностью импульса около 150 мс и передним фронтом 125 мкс [3]. Краткое описание источника «Бетон» дано в работе [4].

Введённый в строй токамак Т-15МД рассчитан на работу с длительными по времени плазменными разрядами, по сравнению с токамаком Т-10. В работе [5] говорится, что максимальная длительность импульса для Т-15МД, в зависимости от рабочего режима установки, может варьироваться. Так, при магнитном поле 1,5 Тл, система охлаждения магнитных катушек установки допускает длительность разряда 20 с. Такая длительность импульса токамака возможна при полном или почти полном замещении индукционного тока безындукционным. Создание безындукцион-

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 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.
Севастьянов Сергей Анатольевич, гл. специалист.
Шапотковский Николай Владимирович, с.н.с.
 НИЦ «Курчатовский Институт».
 Россия, 123182, Москва, пл. Курчатова, 1.

*Статья поступила в редакцию 21.02.2024
 После доработки 26.03.2024
 Принята к публикации 1.04.2024
 Шифр научной специальности: 1.3.9*

© Пименов И. С., Борщеговский А. А., Ахмедов Э. Р., Неудачин С. В., Новиков В. Н., Павлов В. Н., Рой И. Н., Севастьянов С. А., Шапотковский Н. В., 2024

ного тока предполагается одновременным введением нижнегибридных (НГ) волн (комплекс мощностью 4 МВт разрабатывается в настоящий момент) и ЭЦР-волн. Этим объясняется необходимость в большой длительности рабочего импульса гиротронов. Успешные пионерские эксперименты с высокой эффективностью поддержания тока НГ-волнами (введённая мощность около 0,25 МВт) были проведены в Курчатовском институте на сверхпроводящем токамаке Т-7 около 40 лет назад [6].

На данный момент в состав гиротронного комплекса входит один гиротрон с рабочей частотой излучения 82,6 ГГц при выходном уровне СВЧ-мощности ~ 1 МВт и длительности импульса 30 с [4, 7, 8]. Гиротрон разрабатывался и изготовлялся компанией ЗАО НПП ГИКОМ совместно с ИПФ РАН (г. Нижний Новгород). Действующий гиротрон предназначен для предыонизации рабочего газа, а также для нагрева и генерации безындукционного тока на второй гармонике ЭЦР в X-моду (соответствующая величина резонансного магнитного поля 1,48 Тл). Предыонизация с помощью ЭЦР-волн критически важна для старта разряда Т-15МД и ранее успешно применялась на токамаке Т-10 [9, 10]. Система ввода СВЧ-излучения описана ранее в работе [8].

В сравнении с Т-10, где расстояние от гиротрона до входного фланца токамака была ~ 4 м, на Т-15МД длина волноводного тракта составляет величину ~ 37 м. Расположение гиротронов на значительном удалении от токамака необходимо для уменьшения влияния рассеянных магнитных полей установки на топологию магнитных полей соленоидов гиротронного комплекса.

Важным результатом, полученным ранее в ходе испытаний введённого в строй гиротрона, являются коротко-импульсные измерения генерируемой мощности излучения в конце

волноводного тракта с помощью калориметрической нагрузки при работе от модулятора «Бетон» (0,95 МВт при длительности импульса 125 мс) [4].

В данной работе представлены первые совместные испытания гиротрона и волноводного тракта при большой длительности импульса ~ 10 с. Основное питание подавалось от длинно-импульсного высоковольтного источника питания «Виктория». В эксперименте была использована поглощающая нагрузка, разработанная в ЗАО НПП ГИКОМ, для работы в непрерывном режиме при уровне входящей мощности ~ 1 МВт. Данная нагрузка не предназначена для проведения калориметрических измерений мощности.

Работа поделена на главы следующим образом: в первой части говорится об устройстве источника питания «Виктория»; во второй части приводятся результаты совместных испытаний гиротрона и волноводного тракта на поглощающую нагрузку; в конце дано заключение. Данная работа описывает результаты доклада [11], который будет представлен на LI Звенигородской конференции по физике плазмы и УТС (март 2024 г.).

Описание высоковольтного источника питания «Виктория»

«Виктория» – высоковольтный источник постоянного напряжения. Работа источника основана на преобразовании тиристорными блоками с обратной связью напряжения, подводящегося от внешней электрической подстанции. Амплитуда напряжения холостого хода трёхфазной сети от внешней подстанции составляет 1200 В. В простом приближении «Виктория» является повышающим преобразователем постоянного напряжения с промежуточным звеном повышенной частоты, состоящим из пяти основных элементов (см. табл. 1).

Таблица 1

№	Название элемента	Назначение
1	ТПА	Тиристорный преобразовательный агрегат. Источник тока накопителя
2	ИН	Индуктивный накопитель. Питание сглаженным током последующего инвертора
3	АИ (ШФИ – Шкаф Формирования Импульсов)	Автономный инвертор тока. Преобразование тока в трёхфазное квази-синусоидальное напряжение повышенной частоты в пределах от 1 до 4 кГц
4	КВТМИ	Трёхфазный повышающий трансформатор и высоковольтный диодный мост
5	БСВ	Блок сложения высоковольтный. Выходной фильтр

У данного источника большой диапазон регулировки выходного напряжения с возможностью изменения полярности, что позволяет использовать «Викторию» не только для питания гиротронов, но и для других систем дополнительного нагрева (инжектора нейтральных атомов). Параметры источника питания «Виктория» приведены в таблице 2.

Таблица 2

Параметр	Значение
Величина переднего фронта, τ_1	~ 10 мс
Величина заднего фронта, τ_2	3 мс
Максимальная длительность импульса	10 с
Стабильность выходного напряжения	2 %
Диапазон выходного напряжения	-(30÷75) кВ
Максимальный ток нагрузки	40 А

В отличие от коротко-импульсного модулятора «Бетон», где передний фронт составляет величину ~ 125 мкс, у «Виктории» передний фронт значительно затянут.

Задний фронт может быть сформирован принудительным образом и соответствует времени срабатывания быстрой защиты (< 5 мкс) [4], что позволило исследовать распространение импульса охлаждения [2, 3] и получить новые результаты об изменении ко-

эффициента электронной теплопроводности в процессе формирования внутреннего транспортного барьера.

Совместные испытания гиротрона и волноводного тракта на поглощающую нагрузку при большой длительности импульса

На рисунке 1а представлена схема подключения поглощающей нагрузки к волноводному тракту, которая осуществляется с помощью волноводного переключателя. Суммарная длина волноводного тракта до нагрузки, включая 4 поворотных уголка (см. рис. 1б), равна 36,5 м и практически совпадает с расстоянием от гиротрона до входного фланца токамака. Внешний вид установленной поглощающей нагрузки показан на рисунке 2.

Нагрузка охлаждается протоком дистиллированной воды (36 м³/час) при максимально допустимом давлении 2 атм.

Внутренний объём нагрузки герметично соединён с волноводным трактом. Среднее давление во всём тракте составляло величину $p = 5 \times 10^{-6}$ Торр.

Временной ход основных параметров гиротрона при длительности импульса $t_{\text{имп}} = 9,4$ сек отображён на рисунке 3.

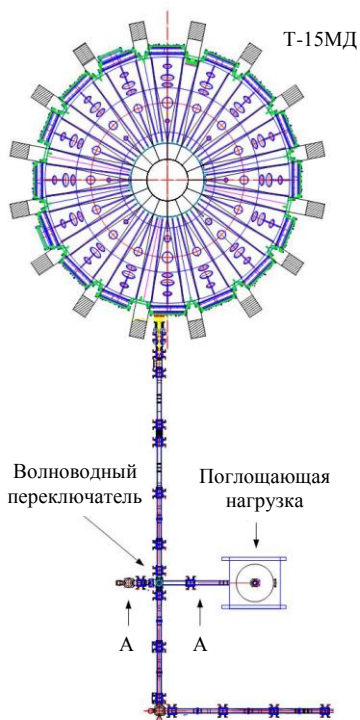


Рис. 1а. Оконечная часть волноводного тракта. Вид сверху

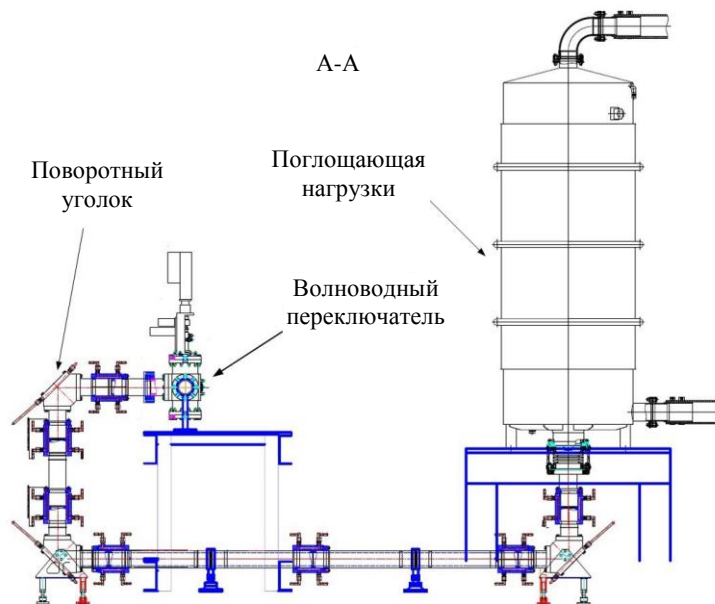


Рис. 1б. Подвод СВЧ-мощности к поглощающей нагрузке. Вид сбоку



Рис. 2. Поглощающая нагрузка в зале Т-15МД

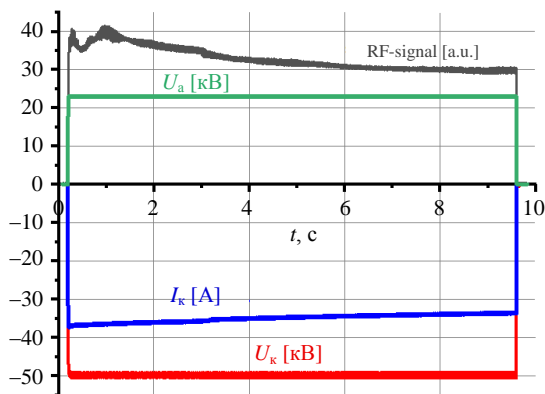


Рис. 3. $U_k = -50$ кВ, $U_a = 23$ кВ, $I_k = 37 \pm 34$ А

При работе в длинном импульсе, с целью увеличения стабильности работы, к.п.д. гиротрона был незначительно снижен по сравнению с коротко-импульсными испытаниями [4] и составил величину 0,55 при выходной мощности ~ 0,95 МВт. В таком режиме работы выходная мощность гиротрона практически не изменяется при падении тока катода на 3 А, которое вызвано переходными процессами, связанными со слабым остыванием катода. Из рисунка 3 видно, что за время

$t_{имп} \sim 9$ сек ток в гиротроне выходит практически на стационар. Изменение уровня «RF-signal» обусловлено изменением фазы на выходе направленного ответвителя в следствие слабого изменения частоты выходного излучения $\Delta f \sim 100$ МГц. Максимально достигнутая длительность импульса составила 9,4 сек и обуславливалась техническим ограничением программного средства управления записью аналоговых сигналов (напряжение и ток катодного и анодного источников). После

окончания испытаний эта техническая неполадка была устранена.

Для оценки поглощённой в нагрузке СВЧ-мощности использовался разностный сигнал с датчиков температуры воды на выходе и входе нагрузки (см. рис. 4).

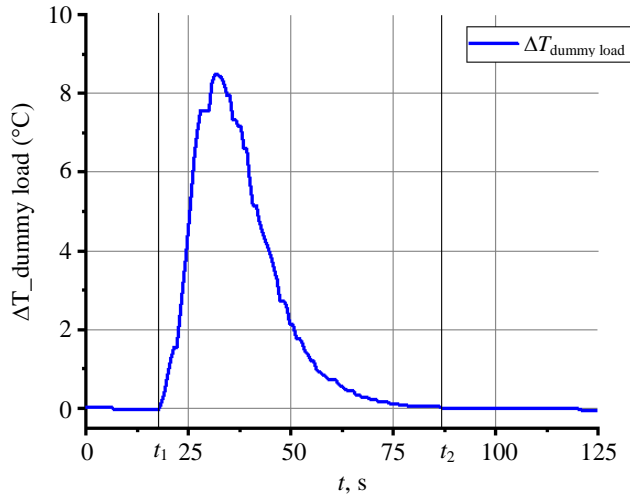


Рис. 4. Разностный сигнал температуры воды при $t_{имп} = 9,4$ сек

Мощность поглощённого СВЧ-излучения P_{HF} определяется из энергии, поглощённой водой $P_{water}t_{pulse}$ (см. формулу 1), и энергии, рассеянной в нагрузке $P_{load}t_{pulse}$ (см. формулу 2).

$$P_{water} = q \times \rho \times c \left(\frac{\int_{t_1}^{t_2} (T_{outlet}(t) - T_{inlet}(t)) dt}{t_{pulse}} \right) \quad (1)$$

$$P_{load} = m_{load} \times c_{st.steel} \left(\frac{\int_{t_1}^{t_2} (T_{outlet}(t) - T_{inlet}(t)) dt}{(t_2 - t_1) \times t_{pulse}} \right) \quad (2)$$

где $q = 36 \text{ м}^3/\text{час}$ – скорость протока воды, ρ – плотность воды, c – теплоёмкость дистиллированной воды, $m_{load} = 350 \text{ кг}$ – масса нагрузки, $c_{st.steel}$ – теплоёмкость нержавеющей стали, $T_{выход}$ – температура воды на выходе из нагрузки, $T_{вход}$ – температура воды на входе в нагрузку, t_{pulse} – длительность импульса гиротрона, $(t_2 - t_1)$ – время измерений.

$$P_{HF} = P_{water} + P_{load} \approx 800 \text{ кВт} + 50 \text{ кВт} = 850 \text{ кВт}.$$

При выходной мощности гиротрона 0,95 МВт и измеренного коэффициента передачи тракта $\sim 0,9$ [4], мощность, дошедшая до нагрузки, должна составлять величину $P_{гир} \times 0,9 = 0,855 \text{ МВт}$.

Оценка поглощённой мощности проводилась при разных значениях длительности импульса гиротрона по мере тренировки СВЧ-тракта и нагрузки. Результаты измерений повторялись с хорошей точностью.

Заключение

Измерения температуры элементов зеркально-волноводного тракта и конструкции поглощающей нагрузки, проведённые с помощью тепловизора в паузе между импульсами, не выявили каких-либо областей перегрева.

В ходе совместных испытаний гиротрона и волноводного тракта была достигнута длительность импульса 9,4 с на поглощающую нагрузку, расположенную вблизи установки. Длина волноводного тракта до поглощающей нагрузки практически соответствовала расстоянию до входного фланца токамака (37 м). Основное питание на гиротрон подавалось от высоковольтного источника питания «Виктория». Мощность СВЧ-излучения на входе в поглощающую нагрузку составляет примерно 0,85 МВт, что соответствует измеренным ранее потерям в линии передач.

К моменту отправки статьи в редакцию, в происходящих в настоящий момент экспериментах длительность работы гиротрона в плазму Т-15МД достигла 2 с. Более подробно результаты текущей компании будут доложены в приглашенном докладе [12] на LI Звенигородской конференции по физике плазмы.

Работа выполнена в рамках Государственного задания НИЦ «Курчатовский институт».

ЛИТЕРАТУРА

1. Аликаев В. В., Борщеговский А. А., Верников В. А. и др. / Физика плазмы. 2000. Т. 26. № 11. С. 979–992.
2. Neudatchin S., Inagaki S., Itoh K. et al. / J. Plasma and Fus. Res. Series. 2004. Vol. 6. P. 134.

3. Neudatchin S. V., Kislov A. Ya., Krupin V. A. et al. / Nucl. Fusion. 2003. Vol. 43. P. 1405–1410.
4. Пименов И. С., Борщеговский А. А., Ахмедов Э. Р. и др. / Успехи прикладной физики. 2023. Т. 11. № 5. С. 407–415.
5. Хвостенко П. П., Анашкин И. О., Бондарчук Э. Н. и др. / ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез / 2019. Т. 42. Вып. 1. С. 15–38.
6. Аликаев В. В., Гвоздилов Ю. В., Дятлов В. и др. / Физика плазмы. 1985. Т. 11. Вып. 1. С. 53.
7. Денисов Г. Г., Малыгин В. И., Цветков А. И. и др. / Известия вузов. Радиофизика. 2020. Т. LXIII (5–6). С. 369.
8. Пименов И. С., Белоусов В. И., Борщеговский А. А. и др. / Прикладная физика. 2022. № 1. С. 5–11.
9. Kirneva N. A., Shelukhin D. A., Borschevskiy A. A. et al. / 34th EPS Conference on Plasma Phys. Warsaw, 2–6 July 2007 ECA Vol. 31F. P. 1.164.
10. Borshchegovskiy A., Dremin M., Il'in V. et al. / EPJ Web of Conferences. 2012. Vol. 32. P. 02004.
11. Пименов И. С., Борщеговский А. А., Ахмедов Э. Р. и др. / LI Звенигородская конференция по физике плазмы и УТС. – Звенигород, 2024.
12. Анашкин И. О., Андреев В. Ф., Асадулин Г. М. и др. / LI Звенигородская конференция по физике плазмы и УТС. – Звенигород, 2024.

PACS: 52.50 Sw, 52.55 Fa

The first test results of the gyrotron and waveguide path of the T-15MD tokamak in a long-pulse operation

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

NRC “Kurchatov Institute”

1 Akademika Kurchatova pl., Moscow, 123182, Russia

Received 21.02.2024; revised 26.03.2024; accepted 1.04.2024

The T-15MD tokamak is equipped with a gyrotron set-up, which currently includes one gyrotron with an operating output frequency of 82.6 GHz and a power of 1 MW. The length of the waveguide path from the gyrotron to the tokamak is 37 m. A significant result obtained earlier was the measurement of HF-radiation power using a small calorimetry load (0.95 MW at a pulse duration of 125 ms). This paper presents the results of the first joint tests of a gyrotron and a waveguide path for a dummy load in a long pulse operation from a high-voltage power supply "Victoria". A pulse duration of 9.4 s was achieved. The estimated microwave radiation power is 0.85 MW.

Keywords: gyrotron, T-15MD tokamak, dummy load, waveguide path.

REFERENCES

1. Alikaev V. V., Borschevskiy A. A., Vershkov V. A. et al, Plasma Physics **26** (11), 979–992 (2000).
2. Neudatchin S., Inagaki S. and Itoh K., J. Plasma and Fus. Res. Series **6**, 134 (2004).
3. Neudatchin S. V., Kislov A. Ya., Krupin V. A. et al, Nucl. Fusion **43**, 1405–1410 (2003).
4. Pimenov I. S., Borschevskiy A. A., Akhmedov E. R. et al., Usp. Prikl. Fiz. (Advanced in Applied Physics) **11** (5), 407–415 (2023) [in Russian].
5. Khvostenko P. P., Anashkin I. O., Bondarchuk E. N. et al., VANT, Ser. Term. Syntez **42** (1), 15–38 (2019) [in Russian].
6. Alikaev V. V., Gvozdikov J. V., Dytlov V. et al., Plasma Physics **11** (1), 53 (1985).
7. Denisov G. G., Malygin V. I., Tsvetkov A. I. et al., Izvestia vuzov, Radiofizika **LXIII** (5–6), 369 (2020).
8. Pimenov I. S., Belousov V. I., Borschevskiy A. A. et al., Applied Physics, № 1, 5–11 (2022) [in Russian].
9. Kirneva N. A., Shelukhin D. A., Borschevskiy A. A. et al., 34th EPS Conference on Plasma Phys. Warsaw, 2–6 July 2007 ECA **31F**, 1.164 (2007).
10. Borshchegovskiy A., Dremin M., Il'in V. et al., EPJ Web of Conferences **32**, 02004 (2012).
11. Pimenov I. S., Borschevskiy A. A., Akhmedov E. R. et al. 51 Zvenigorod International Conference on Plasma Physics and Controlled Fusion. Zvenigorod, 2024.
12. Anashkin I. O., Andreev V. F., Asadulin G. M. et al. LI Zvenigorod International Conference on Plasma Physics and Controlled Fusion. Zvenigorod, 2024.