

**Проявин М.Д.<sup>1</sup>, Денисов Г.Г.<sup>1,2</sup>, Седов А.С.<sup>1</sup>, Куфтин А.Н.<sup>1</sup>,  
Цветков А.И.<sup>1</sup>, Солуянова Е.А.<sup>1,2</sup>, Соколов Е.В.<sup>1,2</sup>, Морозкин М.В.<sup>1</sup>,  
Малыгин В.И.<sup>1</sup>, Тай Е.М.<sup>1,2</sup>, Фокин А.П.<sup>1</sup>, Запевалов В.Е.<sup>1</sup>, Глявин М.Ю.<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Федеральный исследовательский центр

Институт прикладной физики Российской академии наук

<sup>2</sup>ЗАО НПП «Гиком»

## **Результаты первых экспериментов с мощным 250 ГГц гиротроном для нагрева плазмы в перспективных установках УТС (DEMO)**

*Представлены результаты экспериментальных исследований мощного непрерывного гиротрона с рабочей частотой 250 ГГц. В прототипе гиротрона для перспективных установок термоядерного синтеза продемонстрирована реализация мощности 330 кВт в коротком (100 мкс) импульсе с частотой повторения до 10 Гц. Тепловая нагрузка на основные конструкционные элементы позволяет перейти к непрерывному режиму генерации с мощностью до 200 кВт.*

**Ключевые слова:** Гиротрон, терагерц, управляемый термоядерный синтез, DEMO, электронно-циклотронный нагрев плазмы

Развитие современных международных установок управляемого термоядерного синтеза в соответствии с European Fusion Roadmap предполагается в виде трех глобальных этапов. Первым этапом является создание и испытания экспериментального термоядерного реактора ITER. В состав ITER входят 24 гиротрона с частотой генерации 170 ГГц, мощностью в 1 МВт, КПД свыше 50% и рядом дополнительных требований, удовлетворяющими спецификациям плазменного сообщества. Производство этих комплексов разделено между Россией, Японией, Европейским Союзом и Индией, при этом российские гиротронные комплексы приняты международной комиссией и готовы к серийному воспроизводству. Следующим этапом развития установок УТС является демонстрационный источник энергии DEMO – переходное звено между экспериментальной установкой ITER, предназначенной для отработки сложных физических и инженерно-технических задач создания мощных термоядерных реакторов, в которой генерируемое тепло рассеивается в пространство, и коммерческими термоядерными реакторами. Установка DEMO должна стать первым термоядерным реактором, генерирующим электрическую энергию, с тепловой мощностью, превышающей 2 ГВт. В соответствии с планами развития [1], к 2020 году должны быть выполнены концептуальное проектирование реактора и вспомогательных систем, включая систему электронно-циклотронного нагрева плазмы (ECRH), поэтому большинство участников проекта ITER, задействованные в создании систем ECRH уже начали разработку прототипов источников излучения, удовлетворяющих требованиям проекта DEMO.

В процессе работы реактора, максимальная мощность ЭЦР нагрева плазмы должна составлять порядка 50 МВт. В настоящее время существует несколько проектов,

предложенных группами из разных стран, имеющих ЭЦР нагрев и управление током плазмы в качестве основного метода нагрева плазмы, и предполагающих использование гиротронов с частотами генерации свыше 200 ГГц как источников излучения для нагрева [2,3]. Как уже отмечалось, концептуальное проектирование в настоящий момент еще не выполнено, и потому в зависимости от проекта требования к частоте генерации могут существенно отличаться, попадая в диапазон от 200 до 300 ГГц. Одним из перспективных направлений, исследования в котором ведутся сразу несколькими группами ученых, является разработка источников, генерирующих излучение с частотой порядка 230-250 ГГц [2-4], подходящих для поэтапного перехода ITER – DEMO – коммерческие реакторы [5]. В рамках такого подхода, в ИПФ РАН и НПП Гиком был разработан и протестирован прототип гиротрона для перспективных установок УТС с частотой генерации 250 ГГц.

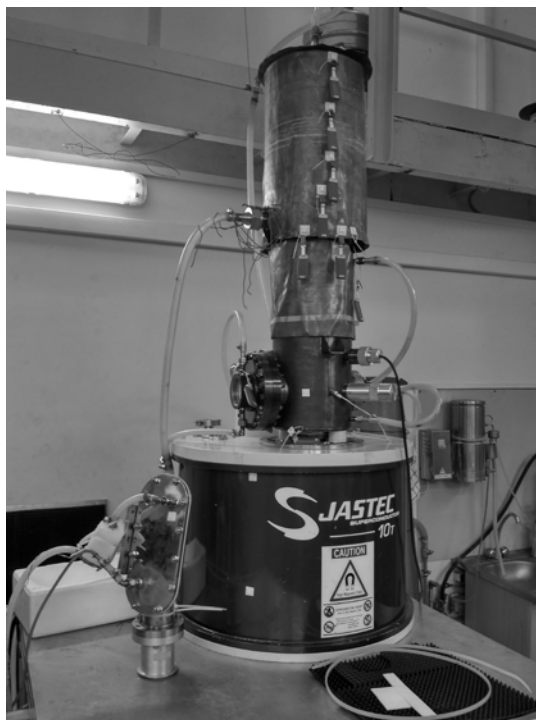


Рис. 1 Общий вид гиротрона в криомагните

Экспериментальное исследование гиротрона проводилось на высокочастотном гиротронном стенде ИПФ РАН, оборудованном сухим криомагнитом JASTEC JM10T100 с теплым отверстием диаметром 100 мм и магнитным полем величиной до 10 Тл. Имеющиеся в наличии источники питания не позволяли провести испытания с системой рекуперации энергии, поэтому коллектор и резонатор гиротрона находились при одинаковом потенциале, соответствующем потенциалу земли. Ускоряющее напряжение величиной до 60 кВ обеспечивалось импульсным источником питания. Характеристики источника питания позволяли реализовать импульсно-периодический режим работы с частотой следования импульсов до 10 Гц, длительностью импульса от 20 до 40 мкс и током электронного пучка до 20 А. Режим непрерывной генерации не мог быть реализован из-за ограничений, обусловленных высоковольтными источниками, хотя условия охлаждения основных конструктивных узлов допускали данную возможность. Для подстройки параметров электронного пучка была изготовлена катодная катушка, позволяющая изменять питч-фактор (отношение вращательной и продольной скоростей электронов) и радиус электронного пучка в резонаторе. Анод, резонатор, квазиоптический преобразователь и коллектор охлаждались проточной водой. В контуре охлаждения резонатора предусмотрена специальная система термостатирования, позволяющая контролировать температуру резонатора, а, следовательно, и частоту генерации.

В ходе исследования гиротрона проведены измерения выходной мощности и эффективности генерации в зависимости от технических параметров системы (интенсивность магнитного поля, напряжение и ток электронного пучка). Выходная мощность более 200 кВт достигнута при ускоряющем напряжении  $U_0 = 55$  кВ, токе электронного пучка 12.5 А и магнитном поле  $B_0 = 9.605$  Тл с КПД генерации 30%, что согласуется с результатами расчетов, проведенных на этапе разработки и проектирования гиротрона. Варьирование мощности при сохранении режима устойчивой одномодовой генерации в широких пределах (0.1-1) может быть достигнуто при изменении магнитного поля и/или параметров электронного пучка.

Вывод мощности осуществляется в виде гауссового пучка с содержанием примесей не более нескольких (2-3) процентов.

Снижение тепловой нагрузки на резонатор при работе в импульсном режиме позволило испытать гиротрон с параметрами, превышающими номинальные расчетные значения. При увеличении тока электронного пучка удалось достичь мощности 330 кВт при токе пучка  $I_b = 20$  А и ускоряющем напряжении 55 кВ.

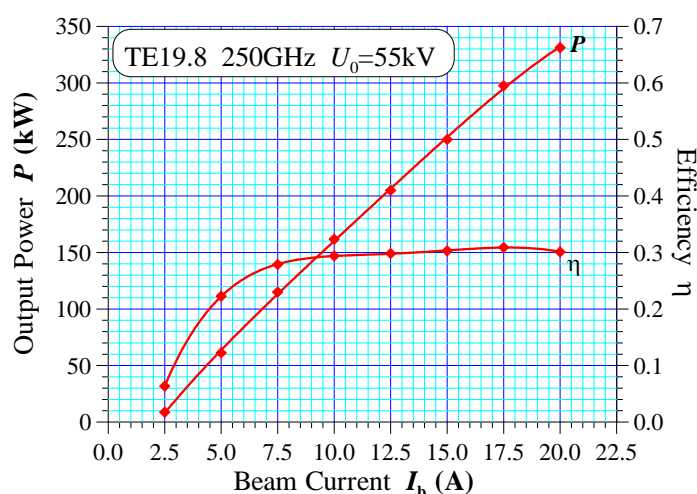


Рис. 2. Зависимости выходной мощности и КПД от тока электронного пучка при ускоряющем напряжении 55 кВ

Проведенные экспериментальные исследования позволяют рассчитывать на успешную реализацию непрерывного гиротрона мегаваттного уровня мощности для перспективных установок УТС. Создание подобных приборов сопряжено с прогрессом в развитии современных криомагнитных систем, обеспечивающих необходимые интенсивности и объем магнитного поля в пространстве взаимодействия электронного потока и рабочего колебания мощных гиротронов.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант 14-12-00887.

#### Библиографический список

1. G. Federici et al., "Overview of EU DEMO design and R&D activities," *Fusion Eng. Des.*, vol. 89, no. 7–8, pp. 882–889, Oct. 2014.
2. J. Jelonck et al., "Design considerations for future DEMO gyrotrons: A review on related gyrotron activities within EUROfusion," *Fusion Eng. Des.*, vol. 123, pp. 241–246, Nov. 2017.
3. K. Sakamoto et al., "Development of Sub-Terahertz Gyrotron for DEMO," in *The 6th International Workshop on Far-Infrared Technologies (IW-FIRT 2017)*, 2017.
4. Денисов Г.Г., Глявин М.Ю., Седов А.С., Фокин А.П., Цветков А.И., Солюянова Е.А., Соколов Е.В., Куфтин А.Н., Морозкин М.М., Малыгин В.И., Тай Е.М., Морозкин М.В., Проявин М.Д., Запечалов В.Е. Экспериментальное исследование 250ГГц/300 кВт гиротрона для нагрева плазмы в перспективных установках УТС (DEMO). Материалы XVII Международной зимней школы-семинара по радиофизике и электронике сверхвысоких частот Саратов, 5-10 февраля 2018, стр.77
5. H. Zohm, W. Biel, E. Fable, R. Kemp, F. Träuble, and R. Wenninger, "Where to locate DEMO in a one-step-to-an-FPP strategy," in *43rd EPS Conference on Plasma Physics*, 2016.