

УДК 533.9.74

СИСТЕМА ВЫСОКОВАКУУМНОЙ ОТКАЧКИ СТЕНДА ДЛЯ ИСПЫТАНИЙ ГИРОТРОНОВ ИТЭР И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ВАКУУМНЫХ УСЛОВИЙ В ВОЛНОВОДНОМ ТРАКТЕ ПРИ ИСПЫТАНИЯХ ГИРОТРОНОВ

В.И. Ильин, А.В. Коновалов, В.А. Кочин, В.А. Михайличенко, А.П. Хвостенко
(НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия)

В статье даётся описание системы высоковакуумной откачки стенда для испытаний гиротронов ИТЭР. Приводятся результаты исследования вакуумных условий в волноводном тракте при испытаниях прототипов гиротронов ИТЭР Везувий-9 и Везувий-10.

Ключевые слова: гиротрон, волноводный тракт, система высоковакуумной откачки, система сбора данных.

HIGH VACUUM PUMPING SYSTEMS FOR ITER GYROTRONS TESTINGS AND INVESTIGATION RESULTS OF VACUUM CONDITIONS IN WAVEGUIDE TRANSMISSION LINE DURING GYROTRON TESTINGS. V.I. ILIN, A.V. KONOVALOV, V.A. KOCHIN, V.A. MIKHAILICHENKO, A.P. KHVOSTENKO. The description of high vacuum pumping systems for ITER gyrotrons testing is given in paper. The investigation results of vacuum conditions in waveguide transmission line during testing of ITER prototype gyrotrons Vesuvius-9 and Vesuvius-10 are presented.

Key words: gyrotron, waveguide transmission line, vacuum pumping systems, data acquisition systems.

ВВЕДЕНИЕ

Существуют разные способы транспортировки СВЧ-мощности в частотном диапазоне 120—170 ГГц: при атмосферном давлении в волноводном тракте, при наполненном волноводном тракте эле-газом, при давлении в тракте выше атмосферного. Однако эти способы имеют серьёзные технические ограничения. Так, при атмосферном давлении в волноводном тракте может образоваться пробой — так называемый стример (сгусток плазмы), который эффективно поглощает СВЧ-излучение, а при достижении в стримере плотности плазмы, близкой к критической, часть мощности будет отражаться обратно в виде паразитных мод, вследствие чего на стенках волновода и фильтра будет появляться плазма. В результате образования стримера значительная доля СВЧ-мощности будет диссипироваться на поверхности алмазного выходного окна гиротрона, что может приводить к его разрушению, особенно при работе в квазинепрерывном режиме.

Применение эле-газа (SF₆) в указанном диапазоне частот достаточно неэффективно, так как этот газ при разложении, возникающем при микроискрениях в квазиоптических зеркально-волноводных трактах, очень активен, фтор может вступать в реакцию с поверхностью волноводного тракта, а также с медными зеркалами. В результате медь окисляется, вследствие чего растут потери мощности в СВЧ-тракте, также фтор окисляет манжету алмазного окна, что в конечном результате должно привести к образованию вакуумной течи и разгерметизации гиротрона.

Для повышения напряжения пробоя можно увеличить давление в волноводе, в результате чего возрастёт передаваемая СВЧ-мощность, но при этом возрастёт также давление на алмазное окно, что может привести к его разрушению при совместном действии термических и механических нагрузок.

Наиболее эффективным способом передачи СВЧ-мощности является вакуумирование зеркально-волноводного тракта, которое обеспечивается системой вакуумной откачки (СВО). Преимущество данного метода заключается в практическом отсутствии появления электрических пробоев в зеркально-волноводном тракте при давлении $P < 10^{-2}$ Па, снижении механических нагрузок на выходное алмазное окно. Применение СВО позволяет эффективно транспортировать СВЧ-мощность до 1,5 МВт на частотах до 170 ГГц, что является, например, необходимым условием при нагреве плазмы в термоядерных установках.

В 2001—2007 гг. в Институте ядерного синтеза РНЦ «Курчатовский институт» был создан стенд по испытанию гиротронов, которые должна поставить Россия для международного экспериментального реактора ИТЭР. Испытательный стенд оборудован необходимыми для работы в непрерывном режиме высоковольтными источниками питания, системами охлаждения и обеспечения вакуума, вакуумируемым зеркально-волноводным трактом, соединяющим гиротрон с нагрузкой, системой защит и блокировок, технологическими диагностиками, системами сбора, обработки и архивизации экспери-

ментальных данных. Высоковольтная система питания обеспечивает в стационарном режиме (длительность импульса 10 000 с) максимальное напряжение на катоде 84 кВ при максимальной электрической мощности 4,2 МВт.

Для проведения первой стадии ресурсных испытаний опытного образца штатного гиротрона ИТЭР осенью 2008 г. на стенд был установлен гиротрон Везувий-9 [1] (рис. 1).

СИСТЕМА ВЫСОКОВАКУУМНОЙ ОТКАЧКИ

СВО обеспечивает получение рабочего давления в волноводном тракте (рис. 2) в диапазоне 10^{-3} — 10^{-4} Па. Общий откачиваемый объём стенда составляет $\sim 0,5$ м³. Принципиальная вакуумная схема стенда показана на рис. 3.



Рис. 2. Зеркально-волноводный тракт

Передача СВЧ-мощности (см. рис. 2) от гиротрона через алмазное окно к СВЧ-нагрузке производится по зеркально-волноводному тракту длиной ~ 10 м и диаметром волноводов 100 мм, СВО присоединена к волноводному тракту с одной стороны в месте размещения СВЧ-нагрузки.

В состав СВО входят:

- система предварительной откачки;
- система высоковакуумной откачки;
- система управления.

Система предварительной откачки собрана на базе форвакуумного насоса (ф/насоса) NL1 производительностью 16 л/с и обеспечивает откачку рабочего объёма с атмосферы до давления < 10 Па (давление, необходимое для подключения к рабочему объёму ТМН-а).

Высокий вакуум обеспечивается высоковакуумной ячейкой, собранной на базе ТМН-а (NR) производительностью по азоту 200 л/с и ф/насоса



Рис. 1. Гиротрон Везувий-9 на испытательном стенде

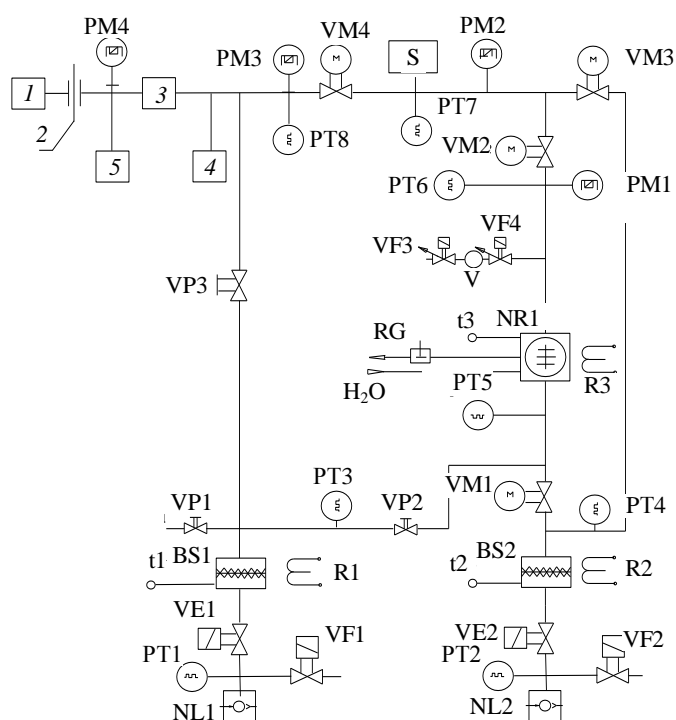


Рис. 3. Принципиальная вакуумная схема стенда: 1 — гиротрон; 2 — алмазное окно; 3 — зеркально-волноводный тракт; 4 — СВЧ-нагрузка; 5 — турбомолекулярный агрегат фирмы Pfeiffer производительностью 210 л/с; NL1, NL2 — механические форвакуумные насосы производительностью 16 и 5 л/с соответственно; NR1 — турбомолекулярный насос (ТМН-01-400 АВ); PT1—PT8 — датчики низкого вакуума типа ПМТ-6-3; VF1, VF2 — нормально открытые, VF3, VF4 — нормально закрытые аварийно-напускные электромагнитные клапаны; VE1, VE2 — аварийные электромагнитные клапаны; BS1, BS2 — сорбционные ловушки (фильтры); VP1—VP3 (Ду63), VP4 (Ду10) — ручные клапаны; VM1—VM4 — регулирующие электромеханические клапаны; PM1—PM4 — высоковакуумные датчики типа ПММ-32-1; S — масс-спектрометр MX-7304A; R1, R2 — нагреватели ловушек BS1 и BS2 соответственно; R3 — нагреватель ТМН-а; t1, t2 — термпарные датчики температуры BS1, BS2 соответственно; t3 — термпарный датчик температуры ТМН-01-400 АВ; V — калиброванный объём

(NL2) производительностью 5 л/с. Для улучшения откачных характеристик ТМН-а предусмотрен прогрев его корпуса до 120 °С внешним нагревателем мощностью 200 Вт. Температура корпуса контролируется датчиком температуры (t_3).

Для предотвращения попадания масла из ф/насосов в объём волноводного тракта в магистрали предварительной откачки и форвакуумной откачки ТМН-а установлены две сорбционные ловушки BS1—BS2. В качестве сорбента используются активированный уголь и окись алюминия. В ловушки встроены нагреватели мощностью 300 Вт, позволяющие регенерировать сорбенты при температуре регенерации 300 °С. Температура ловушек контролируется датчиками температуры t_1 — t_2 . Клапаны VF1, VF2 обеспечивают напуск «атмосферы» в ф/насосы при их остановке. Клапаны ф/насосов VE1, VE2 обеспечивают перекрытие вакуумпроводов при аварийной остановке ф/насоса (в том числе при пропадании напряжения на стенде), препятствуя попаданию «атмосферы» в рабочие объёмы.

Для предотвращения диффузии масла из подшипников ТМН-а в его высоковакуумную часть предусмотрен напуск «атмосферы» в ТМН при его остановке. Напуск производится через клапаны VF3, VF4 и калиброванный объём V.

Время срабатывания затвора VM2 — 40 с, время срабатывания затвора VM4 — 3 с, затвор VM4 используется для аварийного перекрытия вакуумпровода.

Байпасная резервная линия (VM3) может использоваться как для ф/откачки масс-спектрометра (с или без последующей высоковакуумной откачки ТМНом) при закрытом шибере VM4, так и для ф/откачки волноводов (с или без последующей высоковакуумной откачки ТМНом).

Состав остаточного газа в волноводах стенда и отсутствие масла при откачке системы контролируются масс-спектрометром MX 7304A (S). Кроме того, масс-спектрометр используется для анализа остаточных газов в волноводном тракте при транспортировке СВЧ-мощности. Рабочее давление в камере масс-спектрометра $<10^{-3}$ Па.

Измерение величины давления в волноводном тракте производится датчиками высокого РМ- и низкого РТ-давления.

Для предотвращения попадания в вакуумную систему СВЧ-мощности при работе гиротрона (длина волны ~2 мм) откачка подсоединена к волноводам через медную мембрану толщиной 2 мм, диаметром 100 мм, снабжённую 5600 отверстиями диаметром 0,8 мм.

Система управления и сбора данных. Управление вакуумным оборудованием и сбор данных производятся с помощью персонального компьютера с платой ввода/вывода, платой АЦП и приборов сбора данных с аналоговых датчиков.

В состав системы входят:

- исполнительные устройства (силовое пуско-релейное оборудование);
- согласующие устройства (блоки электропитания, слаботочные реле, слаботочная электроника);
- персональный компьютер (Intel Pentium — Core2Duo);
- плата ввода/вывода LA-48 (управление, 48 каналов);
- плата АЦП L-card 783 (регистрация данных, 32 канала);
- промышленные приборы сбора данных аналоговых датчиков низкого и высокого вакуума, температуры и расхода воды (РВТ, ВМБ, ОВЕН УКТ38-Щ4 и РС0-1).

Основные элементы системы управления, за исключением компьютера, размещены в стойке управления. Стойка управления размещается в помещении стенда в непосредственной близости от вакуумного оборудования, компьютер — в пультовой.

На компьютере производится регистрация данных со следующих датчиков:

- датчики низкого вакуума РТ1—РТ8;
- датчики высокого вакуума РМ1—РМ4;
- масс-спектрометр S, сигнал спектра остаточного газа;
- датчики температуры (термопары) t_1 — t_3 .

Программа управления и сбора данных. Программа состоит из трёх частей: программы управления, программы сбора, программы создания и представления базы данных (архивация) и реализуется двумя экранами: экраном управления и экраном сбора.

На экране управления (рис. 4) размещаются вакуумная принципиальная схема с обозначением элементов, таблица параметров системы водоснабжения и панель графиков.

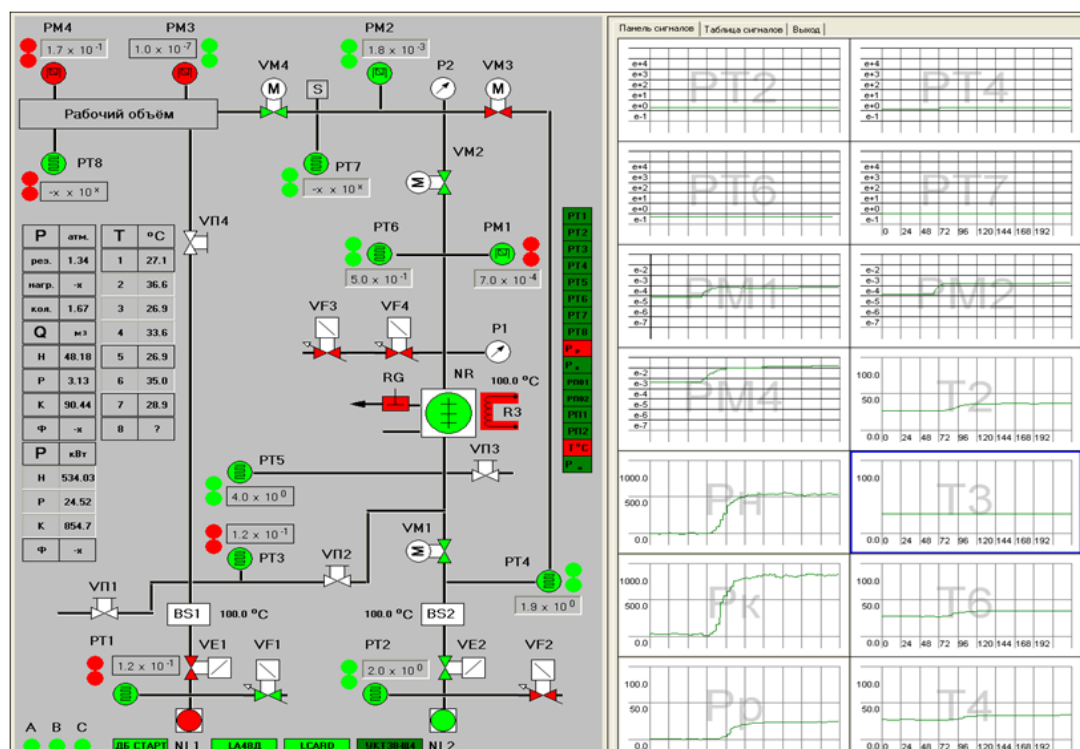


Рис. 4. Экран управления СВО

На панели графиков одновременно представлены в два ряда четырнадцать ячеек для графиков параметров. На панели графиков можно размещать графики любых датчиков системы, представленных на принципиальной схеме и в таблице параметров системы, в любой последовательности, осуществляя выбор по выделенному датчику на панели управления. График сигнала масс-спектрометра занимает две нижние ячейки панели графиков. На вертикальной оси графиков указаны значения параметра (давление, температура и т.д.), на горизонтальной — выбранный интервал времени эксперимента. Для показаний датчиков вакуумной системы, кроме графика, на вакуумной схеме рядом с каждым датчиком индицируется численное значение параметра.

Интерфейс сбора позволяет просматривать данные со всех 32 каналов платы АЦП (L-card) с любой разверткой, в реальном времени, одновременно в одном или нескольких окнах, выводить данные до 32 каналов в одном окне, сохранять выводимые данные в архив, просматривать архив. Представление данных — графическое с возможностью определять координаты точек графика, изменения масштаба (развертки) просмотра в реальном времени. На экране отображаются графическое поле, настроечная и рабочая панели. Настроечная панель позволяет устанавливать режимы работы платы АЦП, в том числе устанавливать количество активных каналов (по которым идет сбор), частоты опроса по каждому каналу, диапазон регистрируемого напряжения для каждого канала (0,6, 1,25, 2,5 и 5 В). В частности, с помощью интерфейса сбора в реальном времени с заданной разверткой осуществляет просмотр данных масс-спектрометра. При этом синхронизация производится программным методом по сигналу с генератора пилы, подаваемого на один из каналов АЦП.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ

Вакуумные испытания волноводного тракта. После монтажа волноводов и вакуумной системы при откачке были получены следующие результаты: давление над ТМН по датчику РМ1 $\sim 5 \cdot 10^{-4}$ Па, давление на дальнем конце волновода по датчику РМ4 $\sim 5 \cdot 10^{-3}$ Па; натекание из «атмосферы» составило $\sim 2 \cdot 10^{-5}$ м³·Па/с. После подачи воды в магистрали охлаждения стенда давление в рабочем объеме увеличилось примерно на порядок и определяющей массой в спектре остаточного газа стала 18-я мас-

са (H_2O) (рис. 5). После нахождения течи, которая была обнаружена в водяной охлаждающей системе, смотрящей в вакуумный объём, и последующего её устранения натекание в рабочий объём составило $\sim 5 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3 \cdot \text{Па}/\text{с}$, а величина давления P1 и P2 — 10^{-4} и $\sim 10^{-3}$ Па соответственно. Спектр остаточного газа в объёме показан на рис. 5.

Результаты исследования вакуумных условий в волноводном тракте при испытаниях гиротрона Везувий-9. Для проверки работоспособности гиротрона в импульсах длительностью до 400 с и, одновременно, тренировки и обезгаживания волноводного тракта был специально подобран тестовый режим работы гиротрона с выходной мощностью ~ 450 кВт и длительностью ~ 20 мс. В этом режиме постепенное удлинение рабочего импульса проводилось таким образом, чтобы не допускать слишком серьёзного ухудшения вакуума в тракте вследствие высвобождения абсорбированных его поверхностями газов. На рис. 6 показано изменение давления в тракте в процессе увеличения длительности импульса в один из первых дней проведения испытаний. На рис. 7 показана динамика изменения давления в тракте для серии из нескольких импульсов длительностью 2 с. Увеличение давления в тракте во всех импульсах было примерно одинаковым и составляло 4—5 раз первоначального. На рис. 8 показан масс-спектр в вакуумно-волноводном тракте после серии импульсов с длительностью ≥ 1 с. На спектре видно, что в процессе работы пики азота и кислорода возросли, что связано с появлением микротечи в тракте.

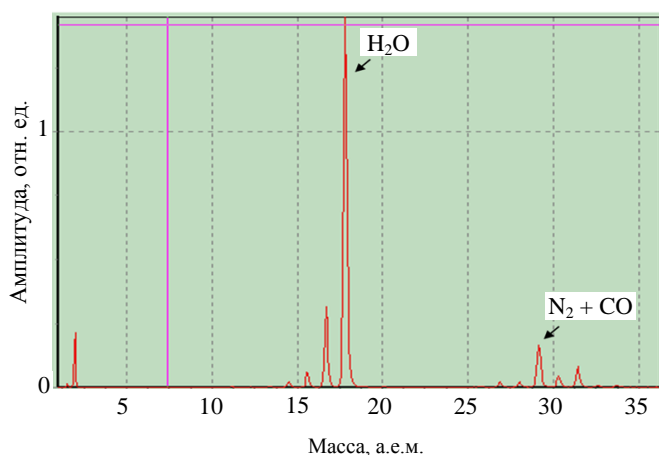


Рис. 5. Масс-спектр в вакуумно-волноводном тракте

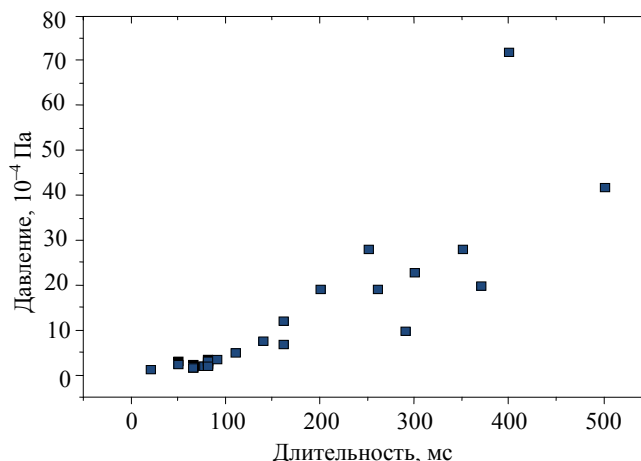


Рис. 6. График зависимости изменения давления в тракте от длительности импульса гиротрона при мощности 450 кВт

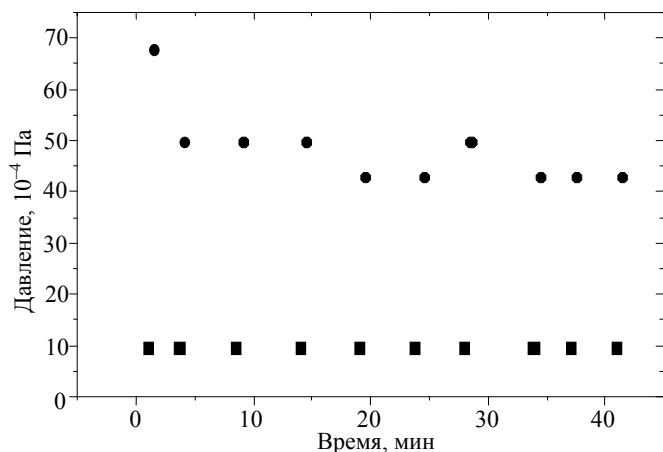


Рис. 7. Динамика изменения давления в тракте для серии из нескольких импульсов длительностью 2 с: величина давления в тракте до (■) и во время импульса (●)

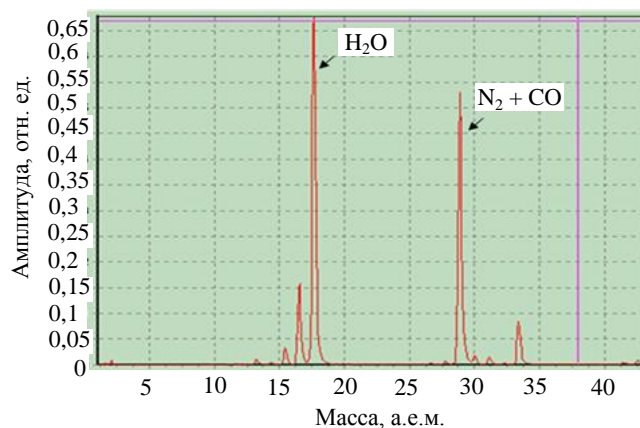


Рис. 8. Масс-спектр в вакуумно-волноводном тракте

Целью следующего цикла испытаний гиротрона Везувий-9 было получение импульса длительностью 800 с, мощностью до 800 кВт. При подготовке этой серии испытаний с целью получения более равномерного распределения давления по длине волноводного тракта к нему со стороны гиротрона был подключён ещё один ТМН производительностью 210 л/с (турбомолекулярный агрегат фирмы Pfeiffer с мембранным ф/насосом производительностью $\sim 0,7$ л/с; позиция 5 на рис. 3).

Постепенное наращивание мощности и длительности импульса сопровождалось повышением давления в тракте, которое в ряде случаев приводило к возникновению электрических пробоев и срабатыванию защиты. На рис. 9 приведена серия импульсов мощностью ~ 700 кВт и длительностью ~ 200 с, в которых резкое повышение давления в тракте с $1 \cdot 10^{-4}$ до $(2-7)10^{-2}$ Па приводило к срабатыванию световой защиты и отключению гиротрона, что свидетельствовало о зажигании плазменного разряда в волноводе.

Микротечь, образовавшаяся в конструкции тракта при первых испытаниях, в процессе дальнейшей работы увеличивалась в размере. Изменение давления в волноводном тракте в процессе импульса было характерным для трещины, раскрытие которой происходило под воздействием тепловых напряжений. На рис. 10 показано изменение давления в тракте во время и после прохождения импульса. Наблюдалось повторное увеличение давления в тракте спустя примерно 60 с после окончания импульса. В конечном итоге возникавшие в конструкции термонапряжения в процессе работы гиротрона привели к полной разгерметизации тракта (рис. 11) и остановке испытаний. Типичный масс-спектр остаточного газа для этой серии испытаний показан на рис. 12. Анализ масс-спектров показал наличие пиков в области шестидесятых а.е.м.

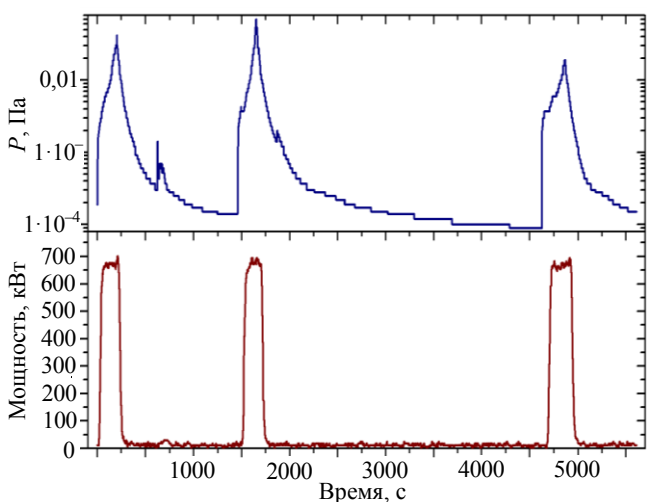


Рис. 9. Изменение давления в тракте при импульсах гиротрона мощностью ~ 700 кВт

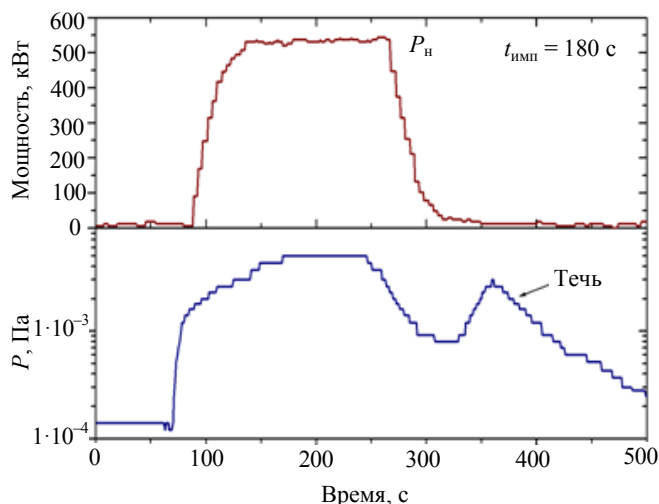


Рис. 10. Изменение во времени давления в тракте во время и после прохождения импульса гиротрона мощностью ~ 550 кВт

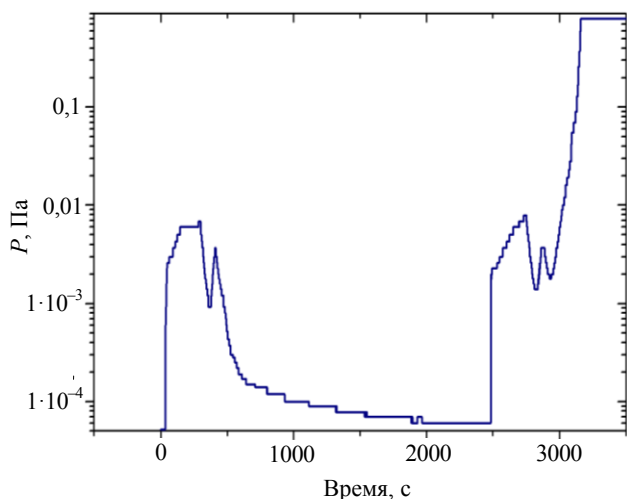


Рис. 11. Изменение давления в тракте при прохождении двух последовательных импульсов гиротрона, приведших к разгерметизации тракта

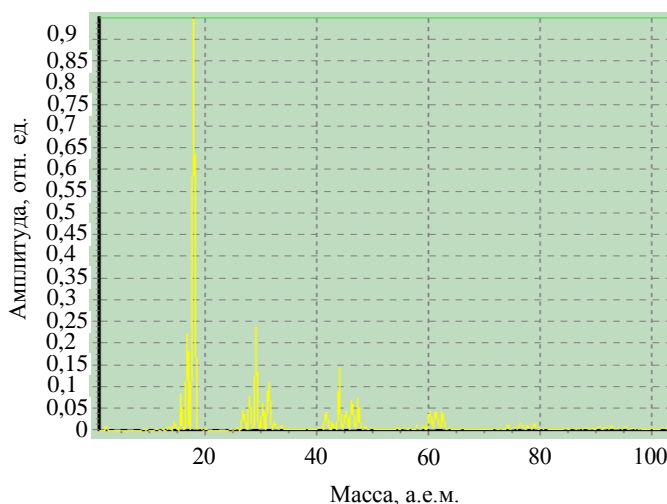


Рис. 12. Типичный масс-спектр остаточного газа в тракте при прохождении импульса гиротрона

Демонтаж конструкции измерительной нагрузки показал наличие в районе сварного подсоединения отражателя СВЧ-мощности большое количество медных капель, образовавшихся в результате расплавления кромки массивного медного ввода СВЧ-мощности в объём измерительной нагрузки. Последующие вакуумные испытания позволили обнаружить трещину в сварном шве конструкции отражателя мощности.

Доработка конструкции измерительной нагрузки и модификации гиротрона Везувий-10 позволила в ноябре 2010 г. получить импульсы длительностью 1000 с с уровнем генерируемой СВЧ-мощности 800 кВт (рис. 13). Давление в тракте во время прохождения импульса менялось слабо и составляло по показанию датчика РМ2 $3 \cdot 10^{-4}$ Па.

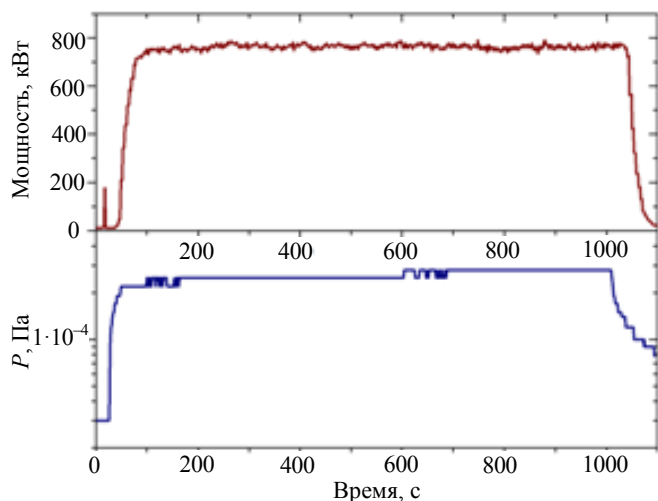


Рис. 13. Изменение во времени давления в тракте при прохождении импульса гиротрона Везувий-10 мощностью ~ 800 кВт

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Созданная система высоковакуумной откачки стенда для испытаний штатных гиротронов ИТЭР продемонстрировала свою полную работоспособность в процессе высокочастотных испытаний в диапазоне рабочих давлений в волноводном тракте $P < 5 \cdot 10^{-3}$ Па.

Результаты испытаний гиротронов Везувий-9 и Везувий-10 показали возможность надёжной транспортировки СВЧ-мощности до 1 МВт от гиротрона к измерительной нагрузке по вакуумному волноводному тракту, что в перспективе должно значительно сократить время вывода гиротрона в режим длинного импульса ($t > 1000$ с).

REFERENCES

1. **Litvak A.G., Denisov G.G., Myasnikov V.E., Tai E.M., Azizov E.A., Ilin V.I.** Development in Russia of Megawatt Power Gyrotrons for Fusion. — In: Proc.of 23rd IAEA Fusion Energy Conf. Daejon, Korea, 11—16 October, 2010.

AUTHORS

Ilin V.I. NRC “Kurchatov Institute”, pl. Kurchatova 1, 123182 Moscow, Russia; ilin@nfi.kiae.ru.

Konovalev A.V. NRC “Kurchatov Institute”, pl. Kurchatova 1, 123182 Moscow, Russia.

Kochin V.A. NRC “Kurchatov Institute”, pl. Kurchatova 1, 123182 Moscow, Russia.

Mikhailichenko V.A. NRC “Kurchatov Institute”, pl. Kurchatova 1, 123182 Moscow, Russia.

Khvostenko A.P. NRC “Kurchatov Institute”, pl. Kurchatova 1, 123182 Moscow, Russia; sashadigital@mail.ru.

Received 4 April 2011

Problems of Atomic Science and Technology
Ser. Thermonuclear Fusion, 2011, issue 2, pp. 58—64.