

УДК 533.9.74

ИЗМЕРЕНИЯ ГЕНЕРИРУЕМОЙ СВЧ-МОЩНОСТИ И ТЕПЛОВЫХ НАГРУЗОК ПРИ ИСПЫТАНИЯХ ПРОТОТИПОВ ГИРОТРОНОВ ИТЭР НА ИСПЫТАТЕЛЬНОМ СТЕНДЕ

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

В работе дано описание системы измерения тепловых нагрузок на элементы конструкции гиротрона и генерируемой СВЧ-мощности. Представлены результаты измерения тепловых нагрузок, генерируемой СВЧ-мощности и эффективности генерации при испытаниях прототипов гиротронов ИТЭР Везувий-9 и Везувий-10.

Ключевые слова: гиротрон, резонатор, коллектор, тепловая нагрузка, водоохлаждаемая нагрузка, эффективность генерации.

MEASUREMENTS OF GENERATED SHF-POWER AND THERMAL LOADS DURING THE TESTING OF THE ITER PROTOTYPE GYROTRONS AT TESTING FACILITY. V.I. ILIN, A.V. KONOVALOV, V.A. KOCHIN, V.A. MIKHAILICHENKO, A.P. KHVOSTENKO, P.P. KHVOSTENKO. Description of measuring system of thermal loads on the gyrotron construction elements and generated SHF-power is given in paper. The measuring results of thermal loads, generated SHF-power and gyrotron efficiency during the testing of the ITER prototype gyrotrons Vesuvius-9 and Vesuvius-10 are presented.

Key words: gyrotron, resonator, collector, heat load, water-cooling load, gyrotron efficiency.

ВВЕДЕНИЕ

В рамках своих обязательств Россия должна поставить на международный термоядерный реактор ИТЭР восемь гиротронов. Перед поставкой гиротроны должны быть испытаны на экспериментальном стенде, сооружённом в РНЦ «Курчатовский институт», Институте ядерного синтеза (сегодня Институт физики токамаков) в 2001—2007 гг. Одной из задач при проведении испытаний является определение уровня генерируемой СВЧ-мощности, а также тепловых нагрузок на элементы гиротрона. В данной работе приводятся результаты калориметрических измерений уровня генерируемой СВЧ-мощности, а также тепловых нагрузок, поглощённых в коллекторе и резонаторе, полученные в 2009—2010 гг. при испытаниях прототипов гиротронов ИТЭР Везувий-9 (рис. 1, а) и Везувий-10 (рис. 1, б) [1].

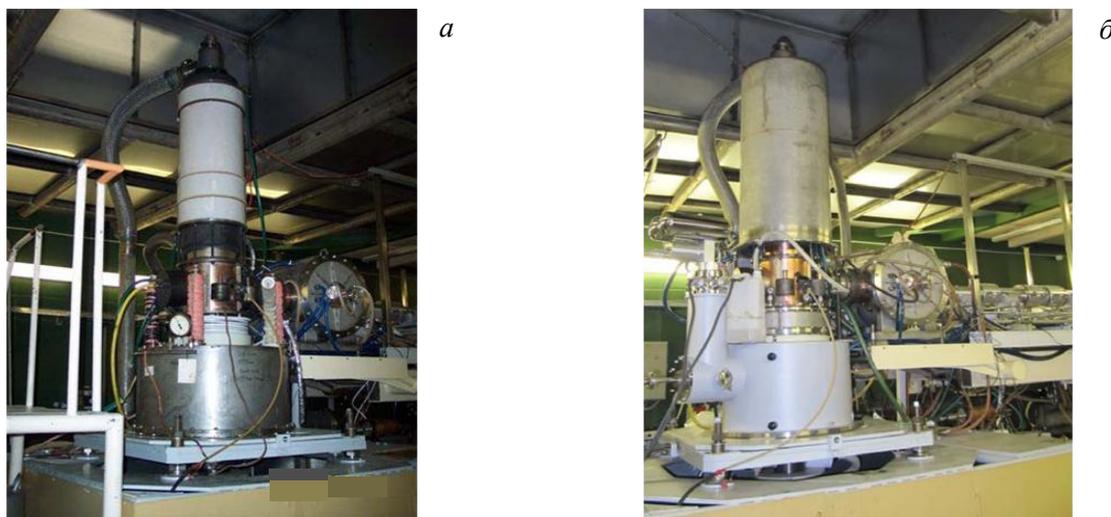


Рис. 1. Гиротроны Везувий-9 (а) и Везувий-10 (б) на испытательном стенде

СИСТЕМА ВОДЯНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА

Система водяного охлаждения обеспечивает съём тепла с элементов конструкции гиротрона и волноводного СВЧ-тракта с водоохлаждаемой нагрузкой. Основными объектами охлаждения являются:

- коллектор гиротрона (расход охлаждающей воды $Q \leq 130 \text{ м}^3/\text{ч}$);
- резонатор ($Q \leq 7 \text{ м}^3/\text{ч}$);
- водоохлаждаемая нагрузка ($Q \leq 70 \text{ м}^3/\text{ч}$);
- элементы конструкции волноводного тракта ($Q \leq 7 \text{ м}^3/\text{ч}$).

На рис. 2, а, б показаны схема и конструкция гиротрона [2]. В системе водяного охлаждения элементов стенда регистрируются температура, давление, расход, а также наличие/отсутствие воды в магистралях охлаждения.

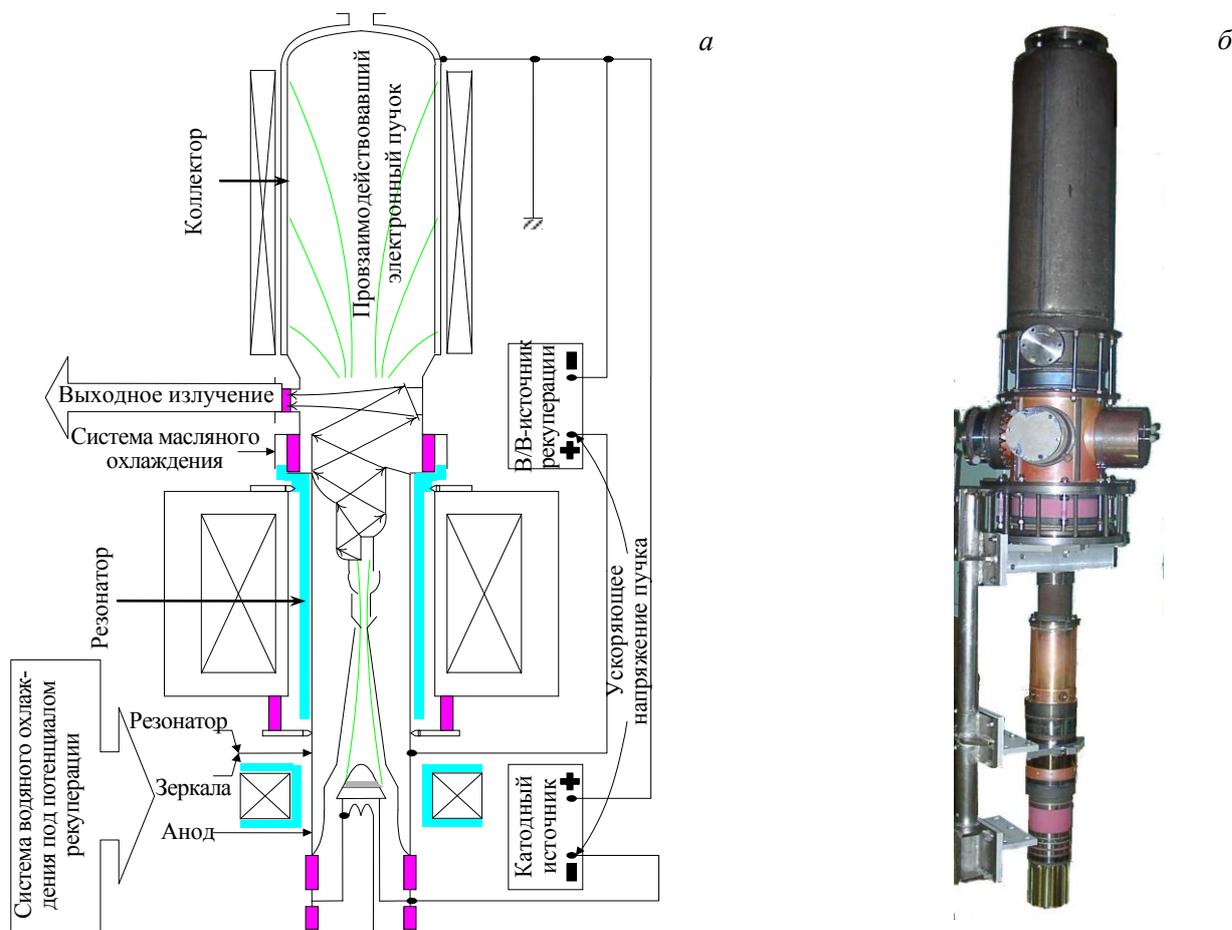


Рис. 2. Схема (а) и конструкция гиротрона (б)

ХАРАКТЕРИСТИКИ ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ДАТЧИКОВ

Датчик давления воды DMP330L: диапазон рабочих давлений 0—1 МПа, максимальное выходное напряжение 10 В (аналоговый выход).

Реле давления S6: диапазон рабочих давлений 0—1 МПа, дискретный выход, настроенный на определённое давление.

Датчик температуры воды ДТС105.50П.В3.80: платиновый термометр сопротивления, диапазон рабочих температур 0—100 °С, работает совместно с устройством визуализации (8 каналов — цифровые) и устройством преобразования сигнала для работы с компьютером (протокол RS-232). Устройство визуализации имеет также релейный выход, настроенный на определённую температуру.

Реле протока — релейный выход.

Датчик расхода воды PC01 — диапазон измерения расхода воды 0—6 м³/ч (2 шт.), 0—66 м³/ч (1 шт.), 0—132 м³/ч (1 шт.). Датчики снабжены устройствами визуализации и аналоговой регистрации. Для подключения к АЦП используется преобразователь тока в напряжение — аналоговый канал, а также имеется релейный выход, настроенный на определённый расход.

Датчики укомплектованы выходными устройствами, которые могут формировать на выходе аналоговые, цифровые (протокол RS-232), а также релейные (дискретные) сигналы, которые используются в системе управления СВЧ-оборудованием. Все датчики (аналоговые, цифровые и дискретные каналы) подключены к системе сбора.

Кроме этого, специальное устройство на основании сигналов с датчиков формирует команды в узел защит и блокировок системы управления СВЧ-оборудованием стенда.

Для иллюстрации на рис. 3, 4 показано расположение датчика температуры, датчиков расхода воды и измерения давления на водяных коммуникациях стенда.

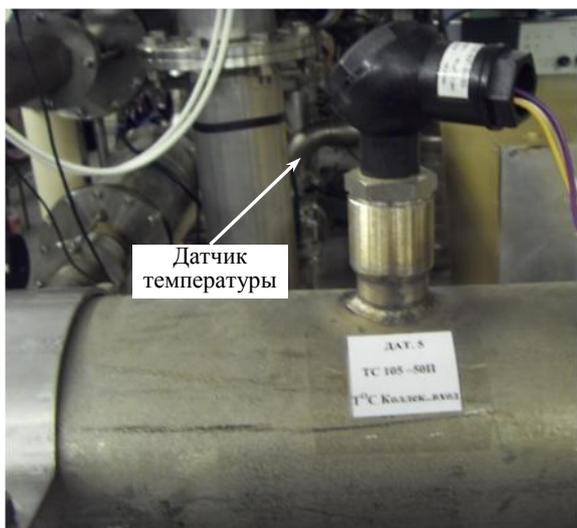


Рис. 3. Датчик температуры воды на входе в коллектор

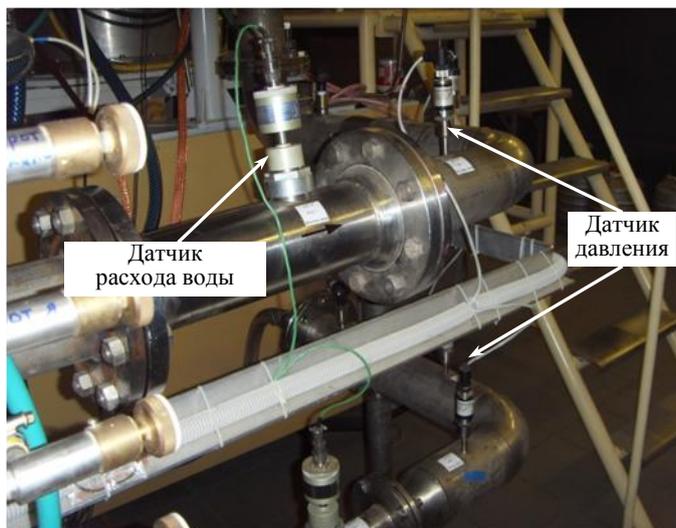


Рис. 4. Датчики расхода воды и давления на водяных коммуникациях

Сбор и архивизация экспериментальных данных проводились с помощью персонального компьютера с платой ввода/вывода, платой АЦП и приборов сбора данных с аналоговых датчиков.

На компьютере проводились сбор и архивизация данных со следующих датчиков:

- датчики температуры T1—T7;
- датчики давления — 3 шт.;
- реле давления — 3 шт.;
- реле протока — 4 шт.;
- датчики расхода воды — 4 шт.

Кроме того, в режиме реального времени на экране монитора выводились значения средних тепловых мощностей, поглощенных в коллекторе, резонаторе и водоохлаждаемой нагрузке, рассчитываемые калориметрическим методом по показаниям датчиков температуры и расхода воды. Средняя тепловая мощность вычислялась по формуле

$$P_{\text{ср}} = cm(T_{\text{вых}} - T_{\text{вх}}) \text{ Вт}, \tag{1}$$

где c — теплоёмкость воды ~ 4200 Дж/(кг·град); m — расход воды, кг/с (л/с); $T_{\text{вх}}$ и $T_{\text{вых}}$ — входная и выходная температура воды, °C.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Измерения величин тепловых мощностей калориметрическим методом начали проводиться с весны 2009 г. сначала при испытаниях прототипа гиротрона ИТЭР Везувий-9, а затем — Везувий-10.

Временные характеристики параметров системы охлаждения коллектора показаны на рис. 5, резонатора — на рис. 6, водоохлаждаемой нагрузки — на рис. 7 при испытаниях гиротрона Везувий-9. Длительность импульса составила 400 с.

Как видно на рисунках, время выхода на стационар, т.е. когда показания выходной температуры воды достигают более 95% своего установившегося значения, составляет примерно 60 с.

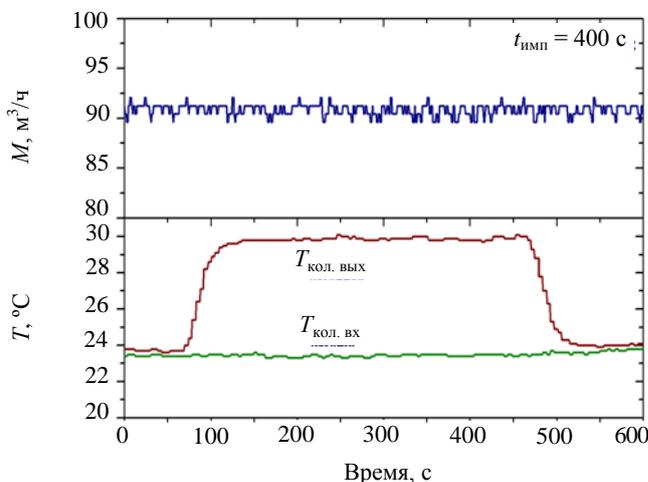


Рис. 5. Поведение во времени расхода, температуры входа и выхода воды в коллекторе

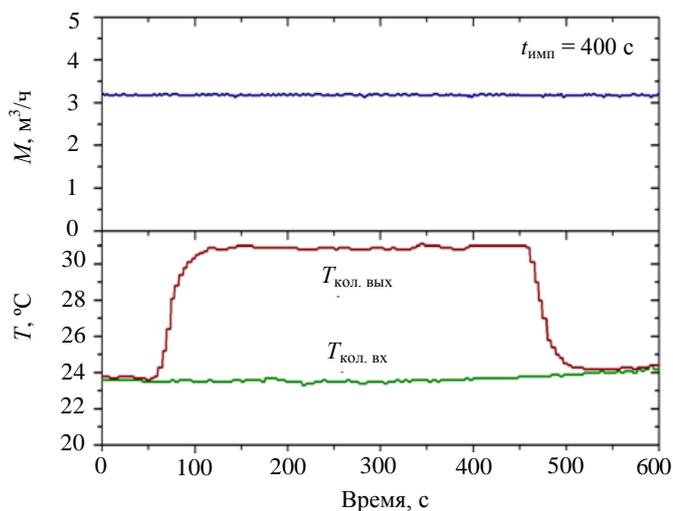


Рис. 6. Поведение во времени расхода, температуры входа и выхода воды в резонаторе

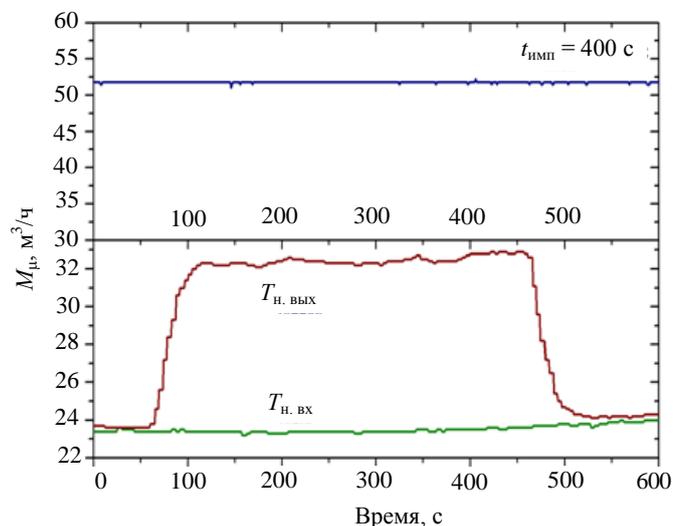


Рис. 7. Поведение во времени расхода, температуры входа и выхода воды в водоохлаждаемой нагрузке

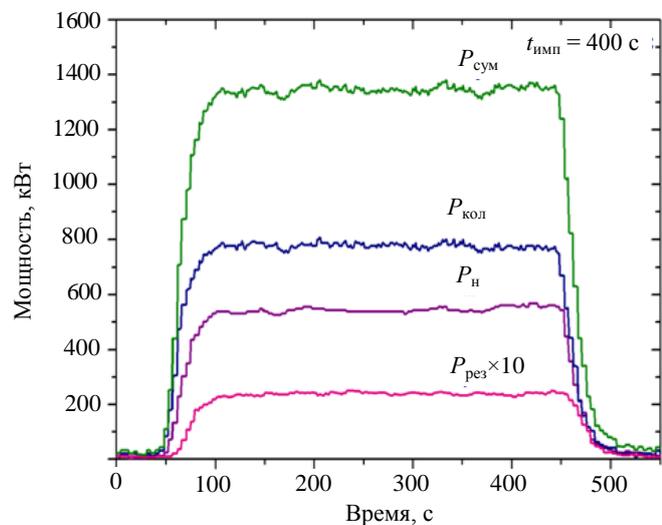


Рис. 8. Поведение во времени средних величин тепловых мощностей, поглощённых в резонаторе, коллекторе и водоохлаждаемой нагрузке, а также суммарной мощности

На рис. 8 показаны изменения во времени значений средних тепловых мощностей, поглощённых в коллекторе, резонаторе и водопоглощающей нагрузке, рассчитанные по формуле (1), а также средней суммарной тепловой мощности. Погрешность измерения тепловых мощностей составляла несколько процентов (не более 3—5%).

Измеренные значения суммарной тепловой мощности сравнивались с суммарной электрической мощностью $P_{эл}$, рассчитываемой по формуле

$$P_{эл} = U_k I_k + U_{рек} I_{рек} \text{ Вт}, \quad (2)$$

где U_k и I_k — напряжение и ток катода; $U_{рек}$ и $I_{рек}$ — напряжение и ток рекуперационного источника.

Электрическая мощность, вычисленная по формуле (2) для импульса длительностью 400 с, составила примерно 1290 кВт (напряжение и ток катода соответственно 49 кВ и 26 А, напряжение и ток рекуперационного источника соответственно 25 кВ и 0,55 А), что с точностью 5% соответствует средней тепловой мощности, измеренной калориметрическим методом, — 1350—1360 кВт (см. рис. 8).

Эффективность работы гиротрона (к.п.д.) вычислялась по формуле

$$\text{к.п.д.} = P_n / P_{сум}, \quad (3)$$

где $P_{сум}$ — сумма мощностей, выделившихся в нагрузку P_n , коллекторе $P_{кол}$ и резонаторе $P_{рез}$.

В качестве примера на рис. 9 показана временная зависимость величины эффективности работы гиротрона Везувий-9, которая составила примерно 40% (длительность импульса 400 с).

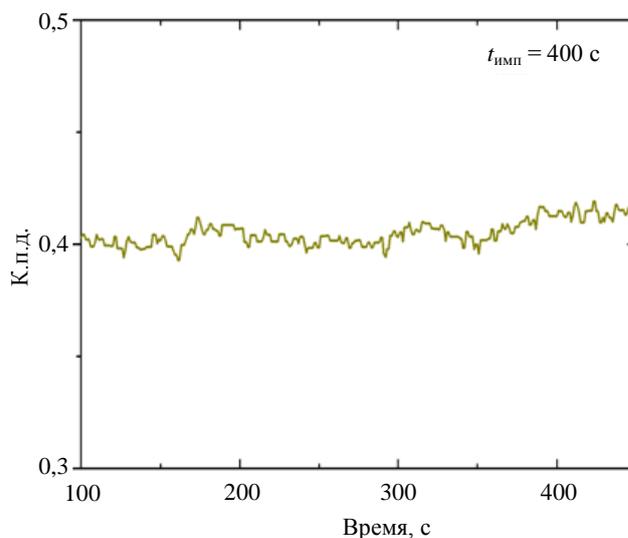


Рис. 9. Временная зависимость к.п.д. гиротрона Везувий-9

Необходимо отметить, что расчётная суммарная величина тепловой мощности $P_{\text{сум}}$ не включает в себя тепловые мощности, которые выделяются в алмазном окне, блоке согласующей оптики (МОУ) и конструкции волноводного тракта. Суммарный уровень этих тепловыделений не превышает 2—3% от $P_{\text{сум}}$. В процессе испытаний гиротронов Везувий-9 и Везувий-10 с весны 2009 г. по декабрь 2010 г. было зарегистрировано более 500 импульсов, отличавшихся как по длительности, так и по уровню генерируемой СВЧ-мощности. При испытаниях гиротрона Везувий-9 максимальная достигнутая длительность импульса составила 800 с при уровне генерируемой СВЧ-мощности 540—550 кВт. Эффективность генерации составила ~40%. На рис. 10 показаны временные характеристики тепловых мощностей для импульса длительностью 688 с.

Лучшим достигнутым результатом при испытаниях гиротрона Везувий-10 стало получение импульсов длительностью 1000 с (рис. 11) при уровне генерируемой СВЧ-мощности 750 кВт и эффективности генерации 50%.

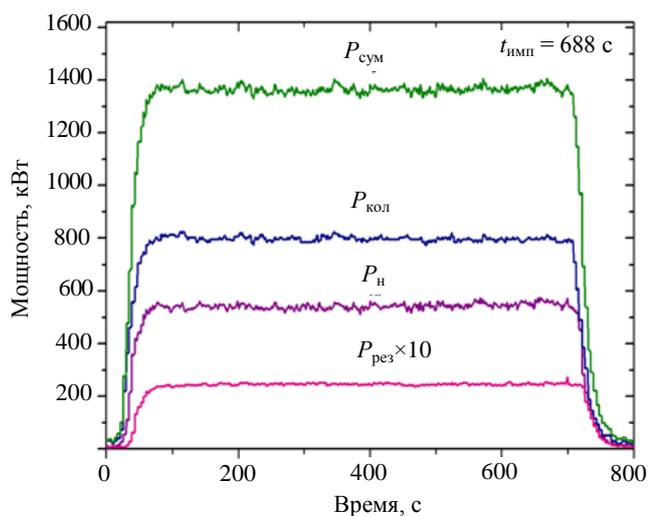


Рис. 10. Поведение во времени средних величин тепловых мощностей, поглощённых в резонаторе, коллекторе и водоохлаждаемой нагрузке, а также суммарной мощности для импульса длительностью 688 с при испытаниях гиротрона Везувий-9

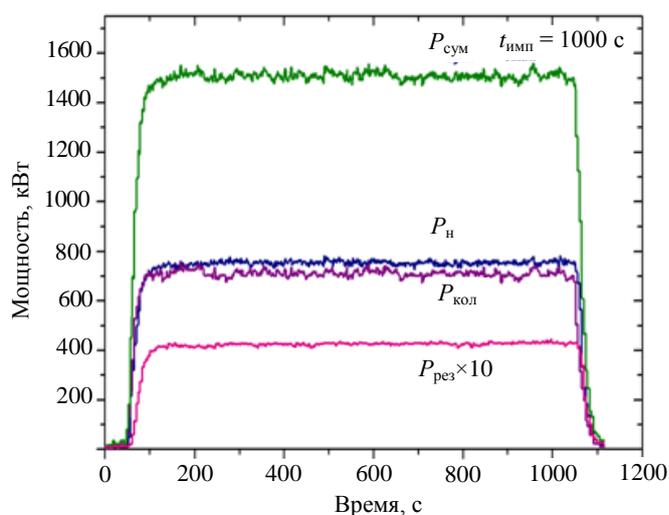


Рис. 11. Поведение во времени средних величин тепловых мощностей поглощённых в резонаторе, коллекторе и водоохлаждаемой нагрузке, а также суммарной мощности для импульса длительностью 1000 с при испытаниях гиротрона Везувий-10

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На стенде для испытаний гиротронов ИТЭР создана система измерения калориметрическим методом тепловых мощностей, выделившихся в коллекторе и резонаторе гиротрона, а также в водоохлаждаемой нагрузке. Погрешность измерений составила не хуже 5%. Были получены данные по уровню и эффективности генерируемой СВЧ-мощности при испытаниях прототипов гиротронов ИТЭР Везувий-9 и Везувий-10. Созданная система регистрации и архивизации данных продемонстрировала свою надёжную работоспособность.

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., Daejeon, Korea, 11—16 October, 2010.
2. Denisov G.G., Chirkov A.V., Belousov V.I. et al. Millimeter wave multi-mode transmission line components. — J. of Infrared Millimeter, and Terahertz Waves, 2011, vol. 32, pp. 343—357.

AUTHORS

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

Kononov 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.

Khvostenko P.P. NRC “Kurchatov Institute”, pl. Kurchatova 1, 123182 Moscow, Russia; pphv@nfi.kiae.ru.

Received 4 April 2011

Problems of Atomic Science and Technology
Ser. Thermonuclear Fusion, 2011, issue 2, pp. 53—57.