

## РАЗРАБОТКА ВОЛНОВОДНЫХ НАГРУЗОК МОЩНЫХ СВЧ-УСТРОЙСТВ НА ОСНОВЕ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ

*А. М. Барняков<sup>1</sup>, А. Е. Левичев, И. Л. Пивоваров, С. Л. Самойлов*

Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия

В Институте ядерной физики СО РАН совместно с компанией «Болид» (Новосибирск) были проведены исследования в области создания новых волноводных СВЧ-нагрузок на основе композитного материала для СВЧ и ускорительной техники S-диапазона. Были измерены поглощающие свойства композитного материала, нанесенного на стенки прямоугольного волновода. На основе полученных данных разработан прототип волноводной нагрузки, который испытан при пиковой мощности клистрона до 25 МВт. Приводятся описание устройства, результаты измерений при низком уровне СВЧ-мощности, а также результаты работы испытательного стенда с разработанным прототипом нагрузки и клистроном S-диапазона.

Researches in the field of the development of new waveguide type S-band RF loads based on the composite material were carried out at the Budker Institute of Nuclear Physics jointly with “Bolid” company (Novosibirsk). Absorbing properties of the composite material, which covered the walls of the waveguide, were measured. The load prototype was developed on the basis of achieved data. The prototype was tested at klystron peak RF power up to 25 MW. The design of the prototype, measurements results with low RF power and results of the RF stand operation with load prototype and S-band klystron are discussed.

PACS: 29.20.-c

### ВВЕДЕНИЕ

Для работы ускоряющих структур линейных ускорителей на бегущей волне требуются волноводные СВЧ-нагрузки для поглощения неизрасходованной в ускоряющей структуре СВЧ-мощности. Используемые на инжекционном комплексе ИЯФ нагрузки [1] имеют недостаток — со временем сварные швы поглощающих резонаторов из стали 20Х13 разрушаются, и вода охлаждения сквозь трещины в швах может проникнуть в вакуумную камеру ускорителя и создать аварийную ситуацию.

В качестве благонадежной замены была предложена нагрузка волноводного типа (рис. 1) с поглощающим композитным материалом, разработанным фирмой «Болид» [2], конструкция которой абсолютно исключает попадание охлаждающего дистиллята внутрь вакуумной камеры ускорителя.

---

<sup>1</sup>E-mail: skalpel@inbox.ru

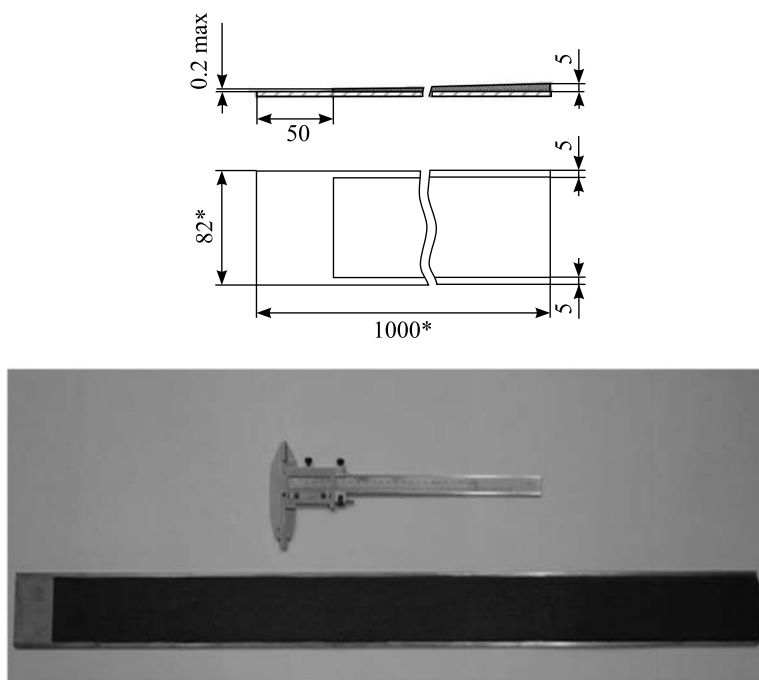


Рис. 1. Медная широкая стенка волновода с покрытием из композитного материала

### КОНСТРУКЦИЯ И ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ

Устройство данной нагрузки представляет собой отрезок волновода сечением  $72 \times 34$  мм и длиной 1000 мм. На широкие стенки волновода напыляется исследуемый композитный материал, толщина покрытия от начала до конца линейно возрастает от 0,2 до 5 мм (рис. 1).

СВЧ-мощность, падая в нагрузку, равномерно поглощается в объеме композитного материала. Относительная диэлектрическая проницаемость материала 30, тангенс угла диэлектрических потерь 0,15.

### ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Для расчета характеристик нагрузки использовалась CST Studio [3]. На рис. 2 показано распределение плотности поглощаемой мощности в композитном материале. Значение падающей мощности 1 кВт, рабочая частота 2856 МГц.

### ИЗМЕРЕНИЯ

Был изготовлен прототип нагрузки на высокую импульсную мощность. На рис. 3 показан результат измерений коэффициента стоячей волны по напряжению (КСВн) в диапа-

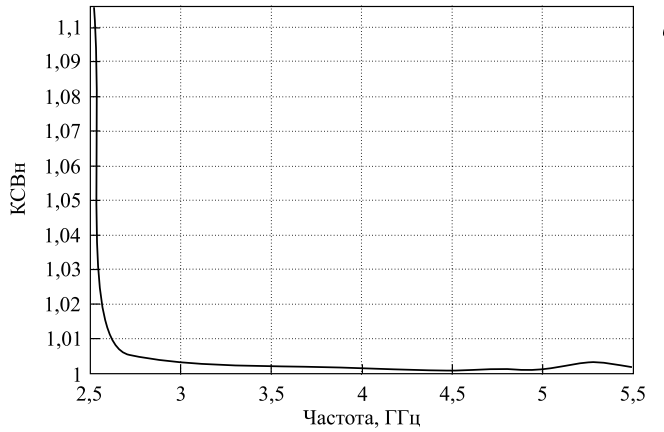
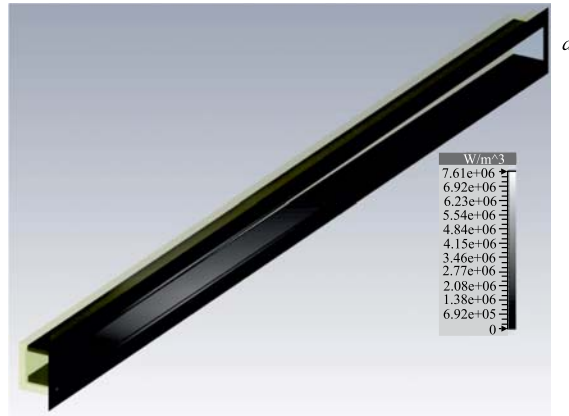


Рис. 2. Распределение плотности мощности в поглощающем материале нагрузки (а) и зависимость КСВн от частоты (б)

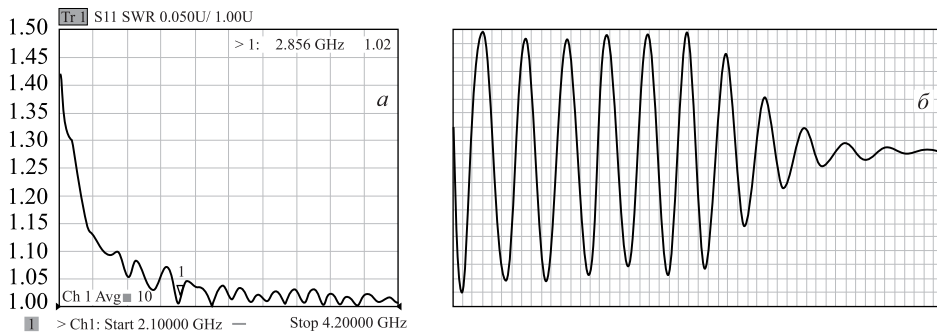


Рис. 3. Зависимость измеренного КСВн нагрузки от частоты (а) и измерение распределения амплитуды электрического поля вдоль нагрузки через коэффициент отражения методом возмущающего тела (б)

зоне частот и результат измерения распределения амплитуды электрического поля вдоль нагрузки через коэффициент отражения методом возмущающего тела [4].

## ИСПЫТАНИЯ

Низкая средняя мощность позволила значительно упростить конструкцию и использовать воздушное охлаждение устройства. Испытания проходили на стенде, основанном на клистроне 5045 [5]. Длительность импульса 3,5 мкс, частота повторений 0,3 Гц. Достигнутая импульсная мощность за время испытаний составила 25 МВт. Средняя мощность, рассеиваемая в нагрузке, при этом составила около 60 Вт. Испытательный стенд нагрузки показан на рис. 4.

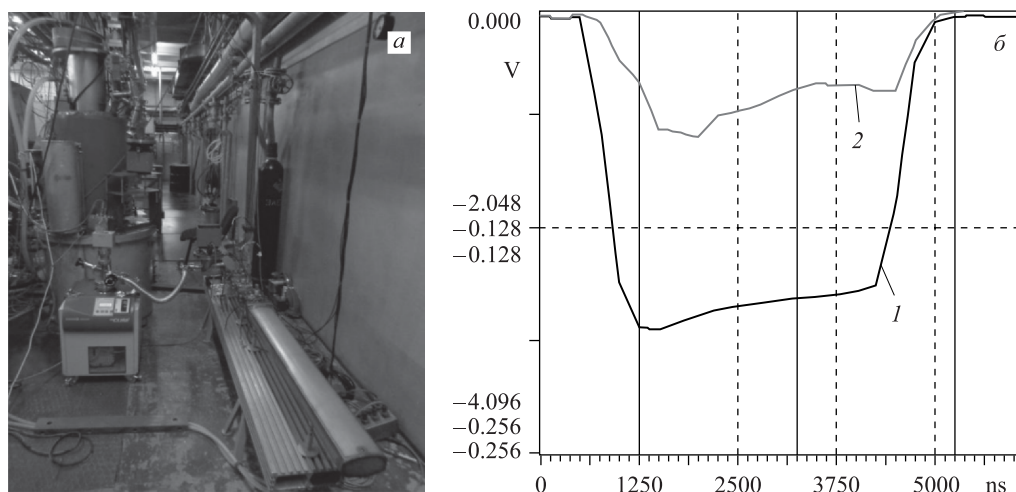


Рис. 4. Испытательный стенд (а) и осциллограммы основных сигналов (б): 1 — падающий с клистрона в нагрузку; 2 — отраженный от нагрузки

Также на рис. 4 приведены огибающие сигналов с направленных ответвителей. Ослабление отраженного сигнала по отношению к падающему 21 дБ. Уровень вакуума в тракте после длительной тренировки составлял 56 мкА по значению тока в магнито-разрядном насосе, при подаче импульса СВЧ-мощности 25 МВт ток насоса поднимался до 700 мкА.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные испытания предварительно показали возможное использование композитного материала фирмы «Болид» в вакуумных мощных СВЧ-устройствах типа волноводных нагрузок в режиме низкой частоты повторения импульса. В дальнейших планах — создать прототип нагрузки с водяным охлаждением и провести испытания на высокую среднюю мощность (более 1 кВт).

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 14-50-00080) с использованием уникальной научной установки «Комплекс ВЭПП-4–ВЭПП-2000», получившей финансовую поддержку государства в лице Минобрнауки России (уникальный идентификатор проекта RFMEFI61917X0008).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Барняков А. М.* Резонаторная сверхвысокочастотная нагрузка // ПТЭ. 2010. № 3. С. 72–75 (*Barnyakov A. M.* A Cavity Microwave Load // Instr. Exp. Tech. 2010. V. 53, No. 3. P. 385–388).
2. <http://pnpbolid.com>
3. <https://www.cst.com>
4. *Валитов Р. А., Сretenский В. Н.* Радиоизмерения на сверхвысоких частотах. М.: Воениздат, 1958.
5. Физический проект комплекса ВЭПП-5. Новосибирск: ИЯФ СО РАН, 1995.