

РАЗРАБОТКА УСТРОЙСТВА ВВОДА МОЩНОСТИ ДЛЯ РЕЗОНАТОРОВ ИИ-ТИПА

*М. М. Булгачева¹, Я. В. Шапков, А. А. Горчаков,
М. А. Гусарова, М. В. Лалаян*

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва

Рассмотрен вопрос электрической прочности устройства ввода мощности, предназначенного для резонаторов ИИ-типа нового линейного ускорителя легких ионов, разрабатываемого в НИЯУ «МИФИ». Исследовано влияние параметров разбиения сеткой при моделировании электромагнитных полей на точность расчета значений напряженности электрического поля на поверхности петли связи. Исследовано влияние радиуса скругления торцов петли на величину напряженности электрического поля. Определены значения напряженности поля на поверхности петли связи при рабочем значении передаваемой мощности.

The electrical strength of the power plugin device designed for ИИ-type resonators of a new linear light-ion accelerator developed at the National Research Nuclear University “MEPhI” is discussed. The influence of the meshing effect due to electromagnetic fields simulation on the calculation accuracy of the values of the electric field strength on the surface of the coupling loop is studied. The influence of the ends rounding radius of the loop on the magnitude of the electric field strength has also been studied. The values of the field strength on the surface of the coupling loop are determined at the operating value of the transmitted power.

PACS: 29.90.–с

ВВЕДЕНИЕ

В НИЯУ «МИФИ» разрабатывается новый линейный ускоритель инжекционного комплекса легких ионов. Низкоэнергетичные ионы будут сгруппированы и ускорены до конечной энергии с помощью секции RFQ и резонаторов ИИ-типа [1, 2]. На рис. 1 представлены конструкции резонатора ИИ-типа (а) и устройства ввода мощности (б) [3]. Ввод мощности располагается под углом 45° по отношению к плоскости пилонов.

КРИТЕРИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ

Величина ускоряющего поля $E_z \max$, которую реально можно получить в ускоряющей структуре, ограничена предельно допустимыми значениями электрического E_p и магнитного H_p полей на поверхности резонатора и его элементов (устройства

¹E-mail: margaritabulgacheva@gmail.com

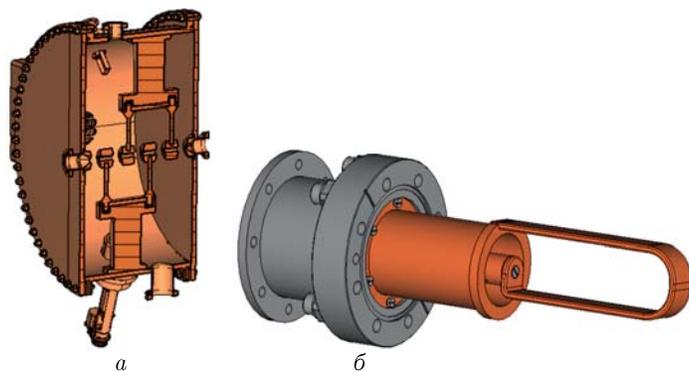


Рис. 1. Конструкция резонатора ИН-типа (а) и устройства ввода мощности (б)

подстройки частоты, измерительные антенны, устройства ввода мощности и т. п.). Высокие значения напряженности электрического поля на поверхности структуры приводят к возникновению темновых токов и пробоям при высоком напряжении. Магнитное поле вызывает протекание токов по поверхности структуры и ее нагрев. Нагрев может вызывать тепловую деградацию материала структуры, и в этом случае ограничение на величину ускоряющего градиента будет определяться максимально возможным магнитным полем.

Существуют различные подходы к определению максимального электрического поля на поверхности структуры [4–6]. Значительное влияние на величину максимального электрического поля в структуре оказывает длительность импульса и частота. При оценке величин предельного электрического поля на поверхности для структур до 1,5 ГГц для длинных импульсов используют критерий Килпатрика [7, 8], показывающий связь величины предельного поля на поверхности структуры без возникновения пробоев и частоты структуры. Графически данная зависимость представлена на рис. 2. При работе структур в импульсном режиме с короткой длиной импульса вводится поправочный коэффициент b , который лежит в диапазоне от 1 до 2. При длине импульса менее 1 мс значение коэффициента максимально: $b = 2$. При очень коротких импульсах, менее 1 мкс, зависимость величины максимального электрического поля на поверхности соответствует выражению $E_p \approx f^{1/2}/t^{1/4}$, где f (МГц) = $1,64E_K^2 \exp(-8,5E_K)$, $E = bE_K$.

Для рассматриваемого резонатора, согласно критерию Килпатрика, предельно допустимая величина поля на поверхности структуры составляет 10 МВ/м. С учетом заметного влияния длительности импульса на величину напряженности, при которой возникает пробой, его значение можно считать равным 10 МВ/м при длительностях импульса более 1 мс и 20 МВ/м при длительностях импульса менее 1 мс.

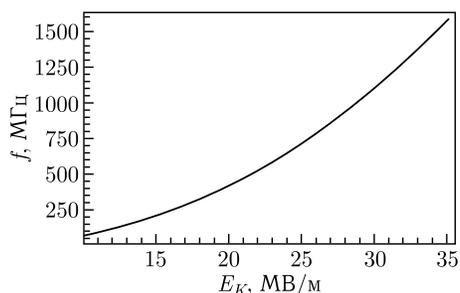


Рис. 2. Зависимость предельного электрического поля на поверхности для структур до 1,5 ГГц для импульсов с $t_i > 1$ мс

Для структур ИН-типа максимальные значения напряженности электрического поля на поверхности приходится на область дрейфовых трубок. Однако важно исключить также возникновение локальных увеличений напряженности в других областях элементов резонатора. Для решения этой задачи было получено распределение электрического поля на поверхности петли устройства ввода мощности и проведены оценки значения напряженности при различных уровнях передаваемой мощности.

АНАЛИЗ ТОЧНОСТИ РАСЧЕТА НАПРЯЖЕННОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ НА ПОВЕРХНОСТИ ПЕТЛИ СВЯЗИ

На первом этапе расчетов было проведено исследование влияния параметров разбиения сетки при моделировании ЭМ-полей на точность расчета значений напряженности электрического поля на поверхности петли связи. На рис. 3 приведены примеры

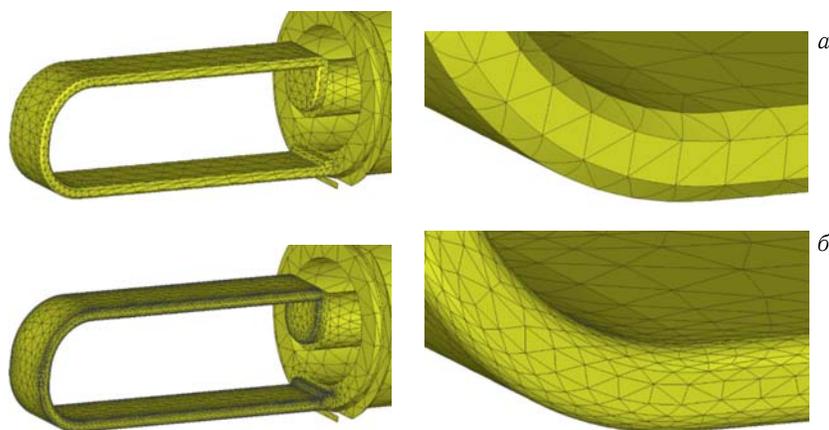


Рис. 3. Сетка в области петли: а) 5 элементов сетки на длину максимальной грани; б) 55 элементов на длину максимальной грани

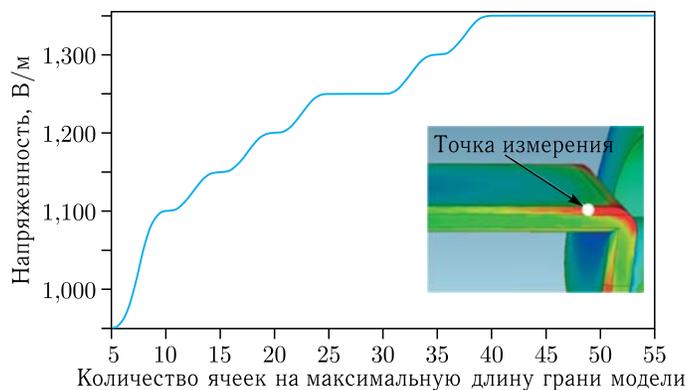


Рис. 4. Зависимость максимальной напряженности электрического поля на торцах петли от параметров сетки на мощности 0,5 Вт

для различной плотности разбиения. Получено распределение электрического поля на поверхности петли связи и зависимость напряженности поля в области петли связи от числа элементов сетки (рис. 4) при мощности питания 0,5 Вт.

Показано, что электрическое поле распределено неравномерно по поверхности петли. Сходимость расчетов наблюдается при значениях выше 40 элементов сетки на длину максимальной грани модели. Дальнейшие расчеты проводились с сеткой из более 55 ячеек на длину максимальной грани. Также показано, что при недостаточной плотности разбиения сетки погрешность расчетной величины напряженности электрического поля на поверхности петли может составлять порядка 30 %.

ВЛИЯНИЕ РАДИУСА СКРУГЛЕНИЯ ПЕТЛИ СВЯЗИ НА ВЕЛИЧИНУ НАПРЯЖЕННОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ НА ПОВЕРХНОСТИ

Проведено исследование влияния радиуса скругления петли связи устройства ввода мощности на величину напряженности электрического поля на поверхности петли. Получена зависимость напряженности электрического поля на поверхности петли связи от радиуса скругления торцов петли при мощности питания 0,5 Вт (рис. 5).

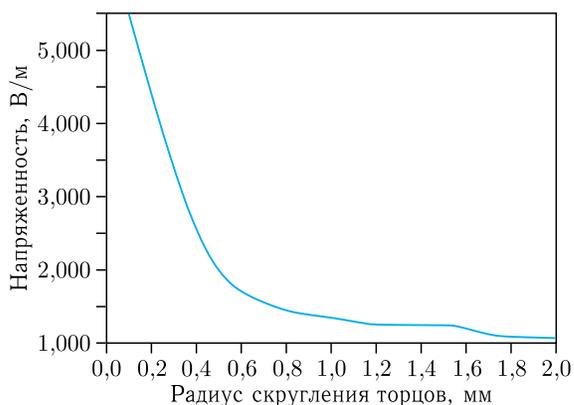


Рис. 5. Зависимость максимальной напряженности электрического поля на торцах петли от радиуса скругления на 0,5-Вт мощности

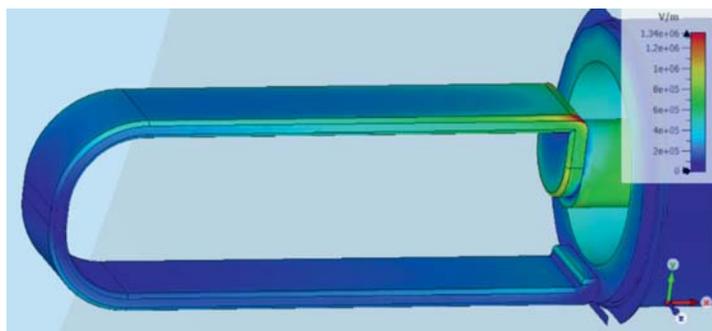


Рис. 6. Максимальная напряженность электрического поля на 150 кВт

Показано, что при радиусах скругления менее 0,5 мм величина напряженности электрического поля на поверхности может увеличиваться более чем в 5 раз.

Пиковое значение мощности для разрабатываемого устройства составляет 150 кВт. Рабочая частота резонатора 80 МГц. Значение предельно допустимой величины напряженности поля на поверхности согласно критерию Килпатрика составляет от 10 до 20 МВ/м при длительностях импульса более 1 мс и менее 1 мс соответственно. Проведена нормировка электрического поля в рабочем диапазоне мощности. На рис. 6 показано полученное распределение напряженности электрического поля на поверхности петли со скруглением торцов 1 мм на мощности 150 кВт.

Максимальное значение напряженности составило 1,34 МВ/м, что существенно меньше рассчитанного предела Килпатрика. Соответственно, в рабочем диапазоне мощности высокочастотный разряд не будет представлять опасности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные результаты показывают, что для рассматриваемого резонатора И-типа при размещении устройства ввода мощности под углом 45° по отношению к плоскости пилонов при значении пиковой мощности 150 кВт величина напряженности электрического поля на поверхности петли связи с радиусом скругления 1 мм не превышает предела Килпатрика.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Polozov S. M. et al.* The Conceptual Design of the 7.5 MeV/u Light Ion Injector // Proc. of the 27th Russ. Part. Accel. Conf. (RuPAC'21), Alushta, Russia, Sept. 26 – Oct. 1, 2021. P. 51–54.
2. *Gorchakov A. A., Gusarova M. A., Lalayan M. V., Toporkov S. E.* Development of IH-Type Accelerating Structures // Phys. At. Nucl. 2021. V. 84, 12. P. 2018–2021.
3. *Булгачева М. М., Гусарова М. А.* Выбор геометрии петли связи устройства ввода мощности для резонаторов И-типа // Тр. конф. «Лазерные, плазменные исслед. и технологии (ЛаПлаз-2022)», Москва, 22–25 марта 2022 г. С. 315.
4. *Wangler T. P.* RF Linear Accelerators. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA. Weinheim, 2008.
5. *Palmer R. B.* Prospects for High-Energy e^+e^- Linear Colliders // Annu. Rev. Nucl. Part. Sci. 1990. V. 40. P. 568.
6. *Wang J. W.* RF Properties of Periodic Accelerating Structures for Linear Colliders. Ph.D. Thesis. Stanford Linear Accel. Center. Stanford, 1989. P. 56.
7. *Kilpatrick W. D.* Criterion for Vacuum Sparking Designed to Include Both rf and dc // Rev. Sci. Instrum. 1957. VCRL-2321.
8. *Boyd T. J.* Kilpatrick's Criterion. Los Alamos Group AT-1 Report AT-1:82-28. 1982.

Получено 18 ноября 2022 г.