

УСКОРИТЕЛИ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ ДЛЯ ЯДЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

УДК 621.384.6

ВЫБОР ГЕОМЕТРИИ ПЕТЛИ СВЯЗИ УСТРОЙСТВА ВВОДА МОЩНОСТИ ДЛЯ РЕЗОНАТОРОВ Н-ТИПА

© 2023 г. М. М. Булгачева^а *, М. А. Гусарова^а, М. В. Лалаян^а, Я. В. Шашков^а

^аНациональный Исследовательский Ядерный Университет «МИФИ»,
кафедра Электрофизических установок, Москва, Россия

*E-mail: margaritabulgacheva@gmail.com

Поступила в редакцию 31.07.2022 г.

После доработки 01.08.2022 г.

Принята к публикации 02.08.2022 г.

В работе представлены результаты моделирования различных вариантов конструкции петли связи устройства ввода мощности для резонаторов Н-типа. Исследовано влияние геометрии петли на коэффициент передачи мощности.

Ключевые слова: ускорители заряженных частиц, ввод мощности, петля связи

DOI: 10.56304/S2079562922050104

ВВЕДЕНИЕ

В НИЯУ МИФИ разрабатывается новый линейный ускоритель, который будет применен для инжекции пучка легких ионов. Общая схема линейного ускорителя будет включать два типа источников ионов: ЭЦР-источник для протонов и ионов гелия и лазерный источник для ионов от лития до кислорода. Полученные низкоэнергетичные ионы будут сгруппированы и ускорены до конечной энергии с помощью секции RFQ и ИН-резонаторов, разделенных на две группы по скорости ионов. Все ускоряющие структуры будут работать на частоте 80–85 МГц [1].

Работа посвящена разработке устройства ввода мощности, способного стабильно работать как

при низкой, так и при высокой импульсной мощности без различных паразитных эффектов.

Целью работы является разработка устройства ввода мощности для резонаторов ИН-типа, способного стабильно работать при высоких и низких уровнях мощности. Полученные результаты можно применить для ускоренной разработки устройств ввода мощности и для других типов резонаторов.

РАЗРАБОТКА УСТРОЙСТВА

Модель пятиззорного резонатора ИН-типа, для которого требуется сконструировать ввод мощности, представлена на рис. 1.

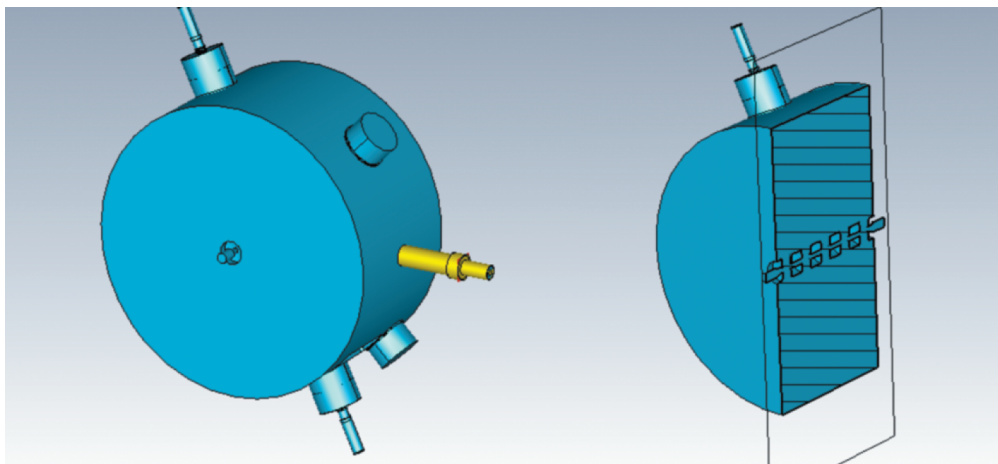


Рис. 1. Геометрия резонатора.

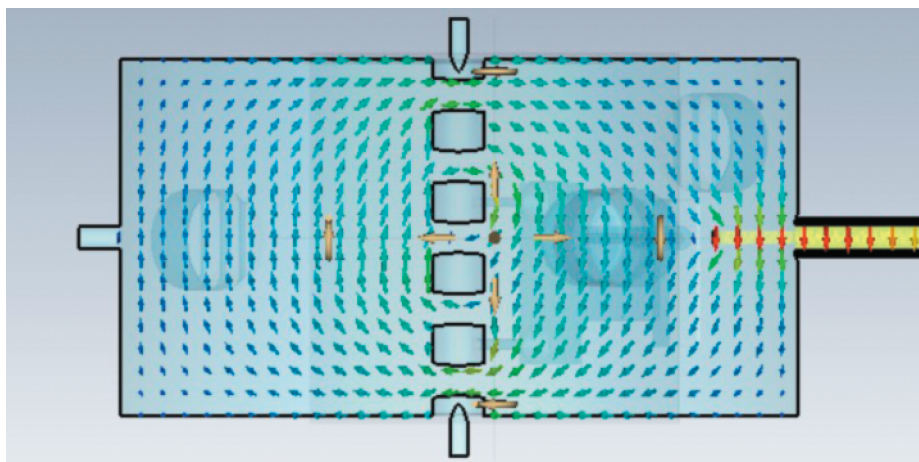


Рис. 2. Ориентация петли ввода мощности.

Рабочая частота устройств лежит в диапазоне от 80 до 85 МГц.

В качестве возбуждающего устройства необходимо использовать петлю ввода мощности, при этом расположив ее с учетом направления линий магнитного поля (рис. 2) [2].

В работе рассмотрено два варианта геометрии петли ввода мощности (рис. 3): цилиндрическая (с круглым поперечным сечением) и плоская (с прямоугольным поперечным сечением). Устройство ввода мощности ориентировано с учетом направления линий магнитного поля.

Обе петли были настроены на единичный коэффициент связи, так как при заданной конфигурации петли ввода мощности невозможно получить необходимое значение S_{11} для протонов и для ионов, изменяя только глубину погружения.

Рассмотрено влияние геометрических параметров петли связи на эффективность передачи энергии. Была получена зависимость отражения (параметра S_{11}) от длины петли для двух вариантов конструкции устройства ввода мощности. Графики полученных зависимостей представлены на рис. 4. Красный график — для плоской петли с прямоугольным поперечным сечением, синий — для цилиндрической петли.

Как видно из графика, для достижения необходимого коэффициента связи прямоугольная петля должна иметь длину примерно 82 мм, а цилиндрическая — 100 мм.

Также было исследовано влияние формы петли на величину поверхностного тока. На рис. 5 представлены результаты расчетов поверхностного тока для петли с прямоугольным поперечным сечением.

Из расчетов следует, что в местах перегиба прямоугольной петли наблюдаются локальные

скачки тока до 4 А/м. Для устранения этого эффекта в дальнейшем сделано скругление большего радиуса.

Исследование влияния типа крепления на распределение электромагнитных полей и мультипакторный разряд

После конструкторской оценки сложности крепления петли выбор был сделан в пользу плоской петли с прямоугольным поперечным сечением. Также было добавлено скругление для устранения локальных скачков тока. Далее в работе рассмотрены два варианта крепления петли ввода мощности (рис. 6): 1 вариант представляет собой крепление к внешней стороне коаксиала, при этом также есть внешний цилиндр — “стакан”; 2 вариант включает в себя внешний цилиндр и плоскую площадку в виде диска, к которой крепится конец петли.

Между внешней поверхностью коаксиала и внутренней поверхностью внешнего цилиндра в обоих вариантах конструкции возникает узкий длинный зазор шириной 5 мм. В узком длинном зазоре особую опасность представляет мультипакторный разряд. Необходимо определить, на какое расстояние проникает поле в этот зазор. Как видно из рис. 7, поле довольно быстро затухает. Но так как работать устройство будет на более высоких уровнях мощности, то это значение будет существенно выше. Например, на уровне мощности 50 кВт напряжение в зазоре будет составлять 18 кВ/м, а при 150 кВт уже 30 кВ/м. Таким образом, необходимо минимизировать проникновение поля в зазор с помощью изменения конструкции.

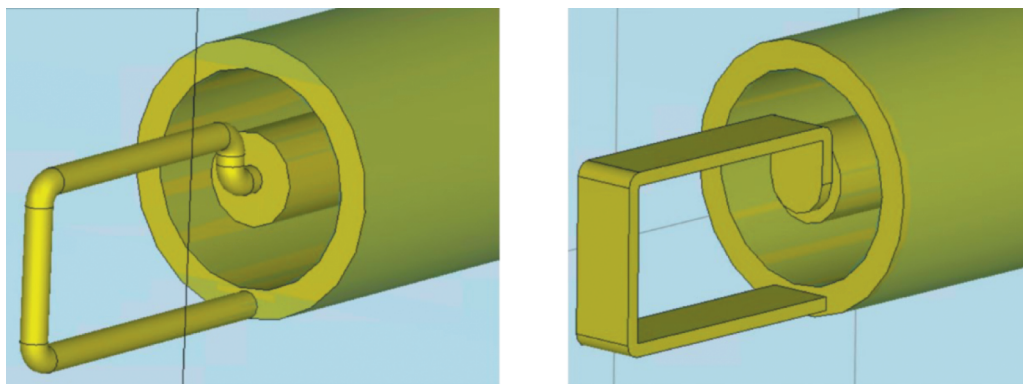


Рис. 3. Два варианта геометрии петли ввода мощности.

На рис. 7 представлены результаты моделирования напряженности электрического поля в зазоре на уровне мощности 150 кВт. В первом варианте поле проникает в зазор на большее расстояние, а его напряженность превышает 30 кВ/м. Исходя из соображений электрической прочности, вариант с “площадкой” оказался более предпочтительным, чем вариант со “стаканом”.

Далее было рассчитано значение электрического поля, при котором возникает опасность возникновения мультипакторного разряда в узком длинном зазоре. Потенциально опасные области отмечены на рис. 8.

Проведен аналитический расчет пороговых уровней напряженности электрического поля, при которых возможно развитие мультипакторного разряда в зазоре [3, 4].

$$V = Ed = (d^2(2\pi f)^2 m) / ((2n - 1)\pi e),$$

где V — напряжение на зазоре, E — напряженность поля в зазоре, d — длина зазора, m — масса электрона, e — заряд электрона, n — порядок мультипакторного разряда.

Величина пороговых уровней напряженности электрического поля, при которых возникает мультипакторный разряд в зазоре на частоте 81 МГц: при зазоре 1 мм — 471 В/м, при 2 мм — 943 В/м, при 3 мм — 1415 В/м, при 5 мм — 2358 В/м.

В области 1 зазор имеет ширину 5 мм, в области 2 — от 4 до 5 мм, в области 3 — от 1 до 3 мм. Далее найдем мощность, при которой произойдет мультипакторный разряд. Как следует из рассчитанных значений напряженности электрического поля, это уровень мощности от 1 до 5 кВт.

В результате расчетов выяснилось, что при мощности до 5.3 кВт в структуре возникнет мультипакторный разряд, и на этом уровне мощности работа невозможна.

Исследование электрической прочности на торцах петли

Для определения возможности возникновения высокочастотного пробоя исследовано распределение электрического и магнитного поля на торцах петли при одинаковых параметрах сетки при численных расчетах.

На рис. 9 представлены результаты расчета электромагнитных полей на уровне импульсной мощности 150 кВт и средней мощности 150 кВт.

Максимально достижимое электрическое поле в резонаторах ограничивается пределом Килпатрика. Экспериментально полученная зависимость частоты от максимальной напряженности электрического поля описывается выражением:

$$f = 1.64(E/E_0)^2 \exp(-8.5E_0/E),$$

где E — максимальная напряженность (предел Килпатрика) в МВ/м, $E_0 = 1$ МВ/м, f — частота.

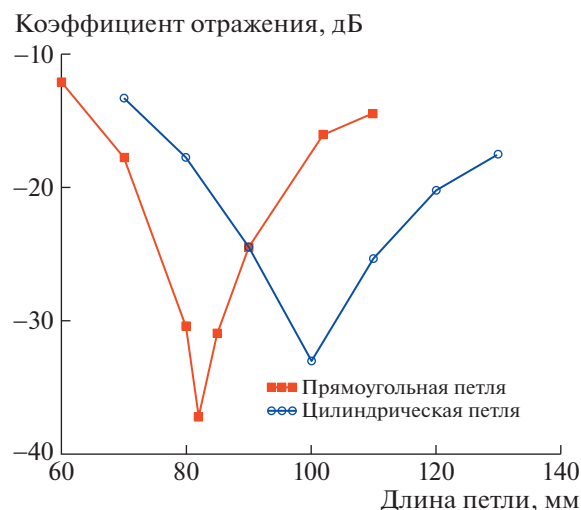


Рис. 4. Зависимость коэффициента отражения от длины петли.

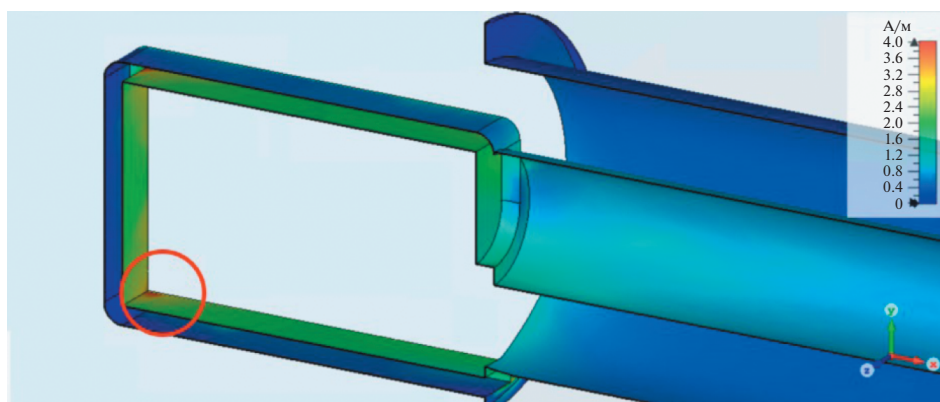


Рис. 5. Результат моделирования поверхностного тока.

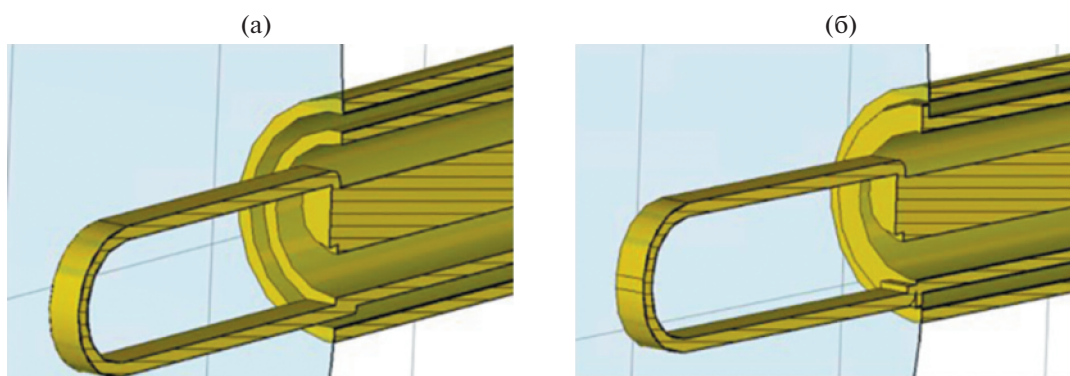


Рис. 6. Варианты крепления петли: (а) “стакан”, (б) “площадка”.

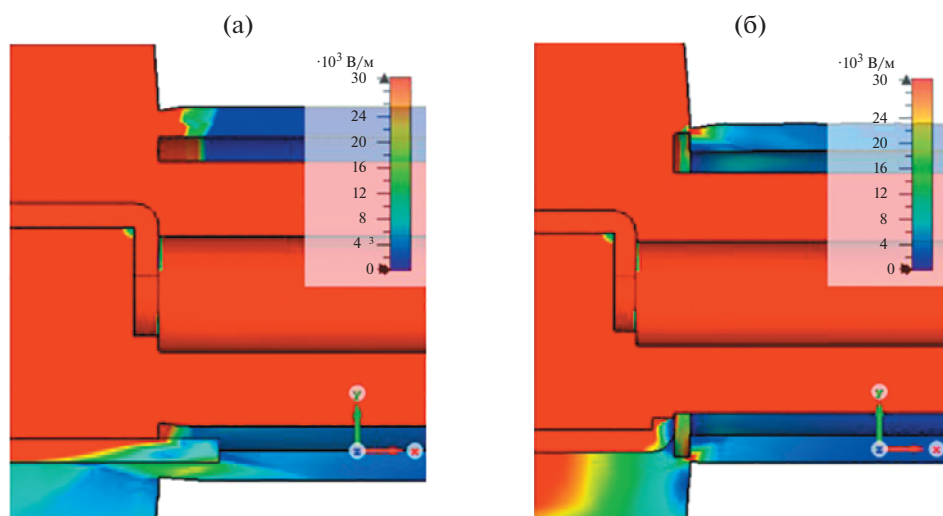


Рис. 7. Напряженность электрического поля на 150 кВт: (а) “стакан”, (б) “площадка”.

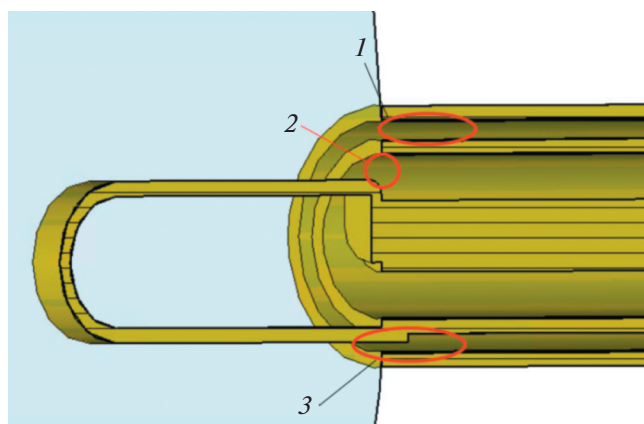


Рис. 8. Области возможного возникновения мультипакторного разряда.

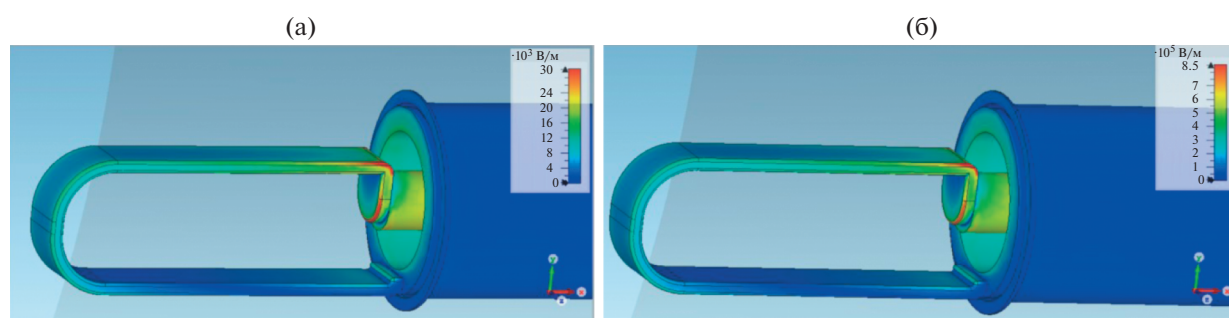


Рис. 9. Электрическое поле: (а) импульсный режим (30 кВ/м), (б) непрерывный режим (850 кВ/м).

Таким образом, на частоте 81 МГц предел Килпатрика равен 57 МВ/м. Сравнивая результат с максимальной напряженностью электрического поля, полученной при численном моделировании, можно сделать вывод, что предел Килпатрика не достигается и следовательно высокочастотный пробой не представляет опасности ни в импульсном, ни в непрерывном режиме.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в работе был выбран оптимальный вариант геометрии петли связи устройства ввода мощности для резонаторов Н-типа. Также рассмотрены варианты крепления и рассчитано, на какую глубину проникает электриче-

ское поле в зазор. Вычислен уровень мощности, на котором возникает мультипакторный разряд. Рассчитан предел Килпатрика.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ/REFERENCES

1. *Položov S.M. et al.* // Proc. Russian Particle Conf. (RuPAC'21). 2021. P. 51.
2. *Dôme G.* // Proc. CERN Accelerator School: RF Engineering for Particle Accelerators. CERN 92-03. 1991. Vol. 1. P. 1.
3. *Padamsee H., Knobloch J., Hays T.* RF Superconductivity for Accelerators. 1998. New York: Wiley.
4. *Булгачева М.М., Гусарова М.А.* // Ядерная физика и инжиниринг. 2022. Т. 13 (4). С. 331. [*Bulgacheva M.M., Gusarova M.A.* // Phys. At. Nucl. 2021. V. 84 (12). P. 1973].

Geometry Selection of the Power Coupling Loop for H-type Cavities

M. M. Bulgacheva¹, *, M. A. Gusarova¹, M. V. Lalayan¹, and Ya. V. Shashkov¹

¹National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, 115409 Russia

*e-mail: margaritabulgacheva@gmail.com

Received July 31, 2022; revised August 1, 2022; accepted August 2, 2022

Abstract—This paper considers H-type cavity power coupling loop design issues and provides the results of the modeling. The dependence of the coupling coefficient on the loop geometry is established.

Keywords: particle accelerators, power coupler, coupling loop