

## ГРУППИРУЮЩИЙ РЕЗОНАТОР-БАНЧЕР ИОННОГО УСКОРИТЕЛЯ-ИНЖЕКТОРА СИНХРОТРОННОГО КОМПЛЕКСА

*И. Р. Калиева<sup>a, 1</sup>, Я. М. Абакумов<sup>a</sup>*

<sup>a</sup> Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ,  
Москва, 15409, Россия

Представлены результаты разработки конструкции группирующего резонатора-банчера, предназначенного для линейного ускорителя протонов и легких ионов с отношением заряда к массе  $A/Z$  от 1 до 3,5 и энергией пучка 7,5 МэВ/нуклон, разрабатываемого в НИЯУ МИФИ и предназначенного для научного и прикладного применения. Приведены результаты моделирования электродинамических, тепловых и механических процессов.

The paper presents the development results of the design of a buncher for a linear accelerator of protons and light ions with a charge-to-mass ratio  $A/Z$  from 1 to 3.5 and a beam energy of 7.5 MeV/nucleon, developed at NRNU MEPhI and intended for scientific and applied purposes. The results of modeling electrodynamic, thermal and mechanical processes are given.

PACS: 29.27.Ac; 29.20.dk

### ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в НИЯУ МИФИ ведется разработка линейного ускорителя-инжектора протонов и легких ионов (отношение заряда к массе  $A/Z$  от 1 до 3,5) ЛУ1 для «Синхротронного комплекса испытательного (СКИ)», создаваемого в РФЯЦ-ВНИИЭФ [1, 2]. Данный комплекс предназначается для обеспечения в лабораторных условиях полного цикла моделирования воздействия излучения на электронную компонентную базу.

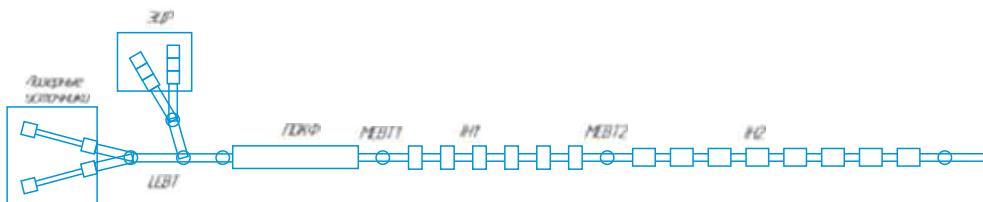


Рис. 1. Схема ускорителя ЛУ1

---

<sup>1</sup>E-mail: kir003@campus.mephi.ru

В состав ускорителя ЛУ1 (рис. 1) входят два типа источников ионов: ЭЦР для протонов и пучка ионов Не и лазерный источник ионов для ионов от Li до O. Ускорение частиц до энергии 0,8 МэВ/нуклон обеспечивается структурой с пространственно-однородной квадрупольной фокусировкой (ПОКФ), от энергии 0,8 до 7,5 МэВ в резонаторах IH-типа.

Канал транспортировки пучка средней энергии (МЕВТ1) предполагает использование резонатора-банчера для группировки пучков перед резонаторами IH1. Рабочая частота резонатора  $f = 81,25$  МГц, относительная скорость  $\beta = 0,0411$  с, напряжение  $V$  до 75 кВ [1]. Режим работы резонатора импульсный: длительность импульса  $\tau_i = 350$  мкс, частота повторения импульсов  $\nu = 1$  Гц.

## 1. КОНСТРУКЦИЯ РЕЗОНАТОРА

Для обеспечения заданных характеристик была выбрана геометрия на основе четвертьволновой коаксиальной линии (рис. 2) [1]. Корпус резонатора предполагается стальным с медным покрытием толщиной не менее 50 мкм, разделенным на две части, что связано с технологическими процессами нанесения медного покрытия на внутреннюю поверхность. Устройство ввода мощности и измерительная антенна расположены в верхней части резонатора. Подстройку частоты в рабочем режиме предполагается обеспечивать двумя плунжерами, расположенными в плоскости оси пролета пучка перпендикулярно трубкам дрейфа. Подстройка частоты на этапе изготовления возможна с использованием подстроичного элемента на трубке дрейфа. Центральный проводник из бескислородной меди должен иметь коническую форму для снижения вероятности развития мультипакторного разряда между центральным проводником и корпусом [3]. Трубки дрейфа должны иметь скругления для снижения напряженности поля на поверхности и предотвращения возникновения высокочастотного пробоя. Теплоотвод от центрального проводника должен обеспечивать смещение трубы дрейфа при высокочастотном нагреве не более чем на 50 мкм, что определяется требованиями динамики частиц.

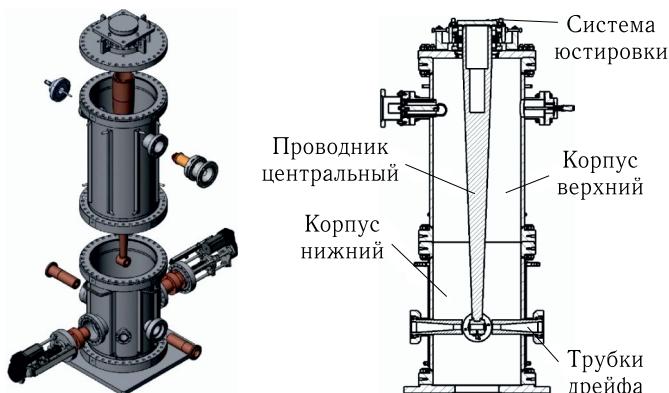


Рис. 2. Конструкция группирующего резонатора-банчера на основе четвертьволновой коаксиальной линии

## 2. МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИХ, ТЕПЛОВЫХ И МЕХАНИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Для выбранной геометрии резонатора были проведены расчеты длины ускоряющего зазора, учитывающие значение относительной скорости частиц и провисание поля в трубки дрейфа. Длина ускоряющего зазора составила 26 мм. Диаметр и скругление трубок дрейфа определялось ограничением на величину предельно допустимого значения напряженности электрического поля на поверхности  $E_p$  без возникновения высокочастотного пробоя (критерий Килпатрика [4]). Согласно критерию Килпатрика, в непрерывном режиме пиковое поле на поверхности резонатора на частоте 81,25 МГц не должно превышать величину  $E_K = 10,5 \text{ МВ/м}$ . Для импульсного режима работы с длительностью импульса менее 1 мс вводится поправочный коэффициент  $k$  (1–2), повышающий предельно допустимое значение напряженности поля на поверхности.

С учетом вышеуказанных требований были определены размеры резонатора, форма трубок дрейфа, построена модель резонатора и проведены расчеты основных электродинамических характеристик (ЭДХ):  $f$  — частота;  $Q$  — добротность;  $R_{sh}$  — шунтовое сопротивление;  $P$  — мощность потерь в стенах резонатора;  $E_p$  — значение напряженности электрического поля на поверхности при максимальном рабочем напряжении.

На рис. 3 представлены полученные распределения электрического и магнитного полей в резонаторе при максимальном напряжении 75 кВ. Результаты расчета ЭДХ приведены в табл. 1. Распределение поля на оси пролета пучка  $E_z(z)$  показано на рис. 4.

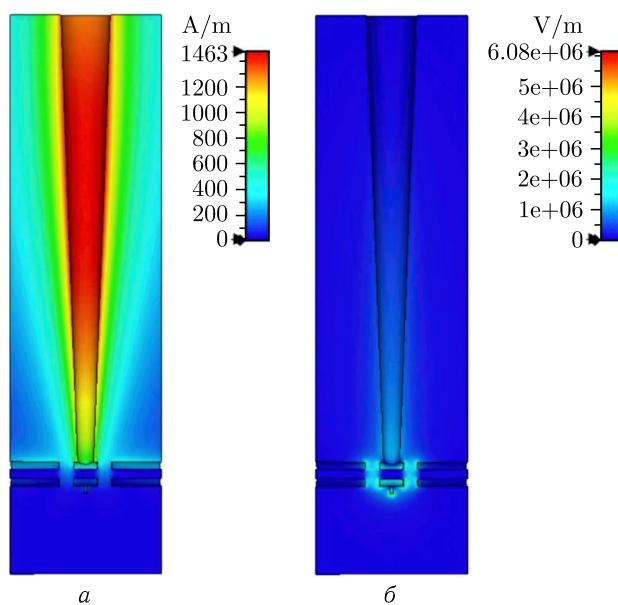
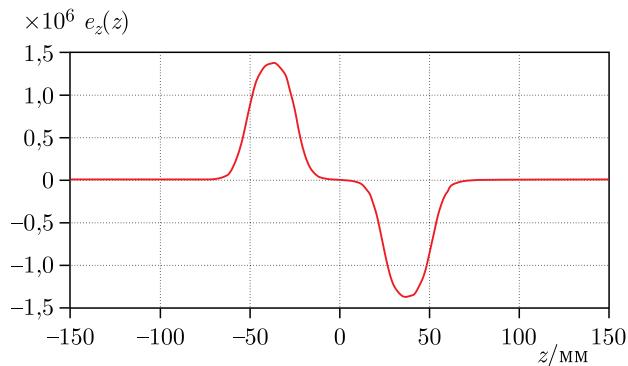


Рис. 3. Распределение магнитного (а) и электрического (б) полей в резонаторе при напряжении 75 кВ

Таблица 1. Электродинамические характеристики группирующего резонатора-банчера

Параметр	Значение
$f$ , МГц	81,25
$Q$	10 500
$R_{\text{ш}}$ , МОм	8,8
$P^*$ , кВт	48,8
$E_p$ , МВ/м	6,1

\* При 1 Дж запасенной энергии.

Рис. 4. График распределения компоненты электрического поля  $E_z(z)$  вдоль оси пролета пучка

Для выбора оптимальных размеров элементов системы подстройки частоты проведено исследование влияния их геометрических размеров и положения на резонансную частоту группирователя. На рис. 5 приведены полученные графики зависимости частоты резонатора от диаметра и глубины погружения боковых плунжеров. На рис. 6 — графики зависимости частоты резонатора от диаметра и длины элемента подстройки частоты на центральной трубке дрейфа.

Проведены расчеты распределения температуры и механических смещений из-за высокочастотного нагрева. Результаты расчетов представлены в табл. 2 и на рис. 7.

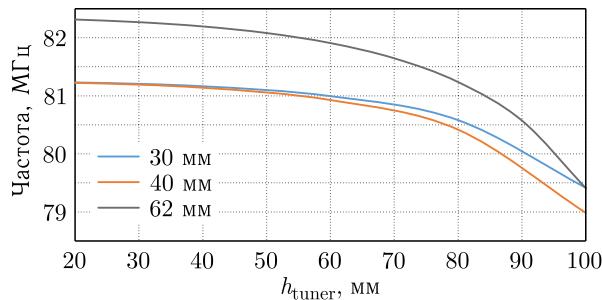


Рис. 5. Зависимость частоты резонатора от глубины погружения двух боковых плунжеров диаметром 30, 40 и 62 мм

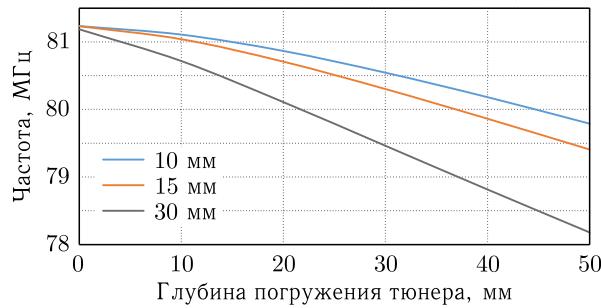


Рис. 6. Зависимость частоты резонатора от длины элемента подстройки частоты на центральной трубке дрейфа диаметром 10, 15 и 30 мм

**Таблица 2. Сводная таблица значений нагрева резонатора, механических смещений из-за ВЧ-нагрева и смещений рабочей частоты**

Параметр	Значение
$V_{\max}$ , кВ	75
$t_{\text{ВЧ}}$ , мкс	350
$\nu$ , Гц	1
$\Delta T$ , К	2,24
$\Delta x$ , мкм	27,8

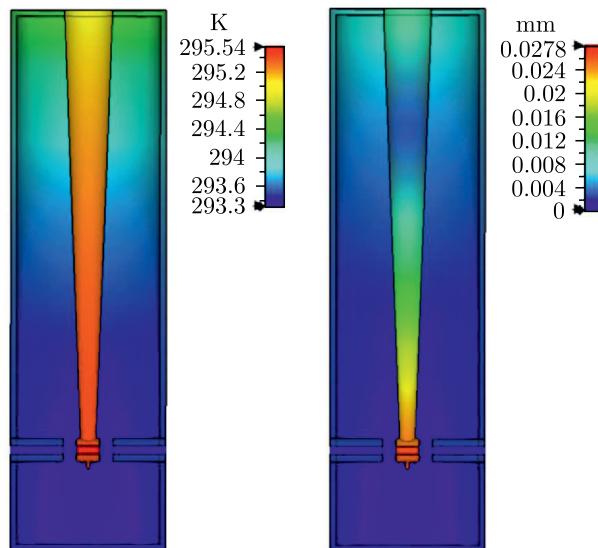


Рис. 7. Распределение температуры и механических смещений из-за высокочастотного нагрева в резонаторе при рабочем напряжении 75 кВ

Показано, что нагрев центрального проводника при частоте повторения 1 Гц приводит к смещению трубы дрейфа относительно оси пролетного канала не более чем на 30 мкм, что является допустимым. Охлаждения центрального проводника не требуется.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана конструкция резонатора-банчера, предназначенного для группировки частиц в канале транспортировки МЕВТ1 линейного ускорителя ионов. Резонатор рассчитан на работу при напряжениях до 75 кВ в импульсном режиме с частотой повторения 1 Гц и длительностью импульса 350 мкс.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Polozov S.M. et al.* The Conceptual Design of the 7.5 MeV/u Light Ion Injector // Proc. RuPAC2021. 2021. V. TUB07. P. 51–54.
2. Российский федеральный ядерный центр — Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики. <https://www.vniief.ru/>.
3. *Гусарова М.А., Каминский В.И., Лалаян М.Б., Собенин Н.П.* Мультипакторный разряд в сверхвысокочастотных узлах и элементах ускорителей заряженных частиц. М., 2011.
4. *Wangler T.P.* RF Linear Accelerators. WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA. Weinheim, 2008.

Получено 28 октября 2024 г.