

**ПРОЕКТИРОВАНИЕ
И СОЗДАНИЕ НОВОГО ИНЖЕКТОРА
С ПРОСТРАНСТВЕННО-ОДНОРОДНОЙ
КВАДРУПОЛЬНОЙ ФОКУСИРОВКОЙ
ДЛЯ МОДЕРНИЗАЦИИ ЛУ-20**

*М. А. Гусарова^a, В. С. Дюбков^a, С. М. Полозов^{a,1}, А. В. Самошин^a,
Т. В. Кулевой^{a,б}, А. А. Мартынов^{a,б}, А. С. Пластун^{a,б}, В. А. Андреев^б,
С. В. Барабин^б, А. В. Козлов^б, В. А. Кошелев^б, Г. Н. Кропачев^б,
Р. П. Куйбида^б, В. Г. Кузьмичев^б, Д. А. Лякин^б, А. Ю. Орлов^б,
Д. Н. Селезнев^б, А. Л. Ситников^б, Ю. Б. Стасевич^б, В. С. Александров^а,
А. В. Бутенко^а, А. И. Говоров^а, Б. В. Головенский^а, В. В. Кобец^а,
А. Д. Коваленко^а, К. А. Левтеров^а, В. А. Мончинский^а, В. В. Селезнев^а,
А. О. Сидорин^а, Г. В. Трубников^а, К. А. Клыков^в, И. В. Мамаев^в,
М. Ю. Науменко^в, Г. В. Осташков^в*

^a Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва

^б Государственный научный центр «Институт теоретической и экспериментальной физики»
НИЦ «Курчатовский институт», Москва

^а Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

^в Российский федеральный ядерный центр —
Всероссийский научно-исследовательский институт технической физики им. Е. И. Забабахина,
Снежинск, Россия

В настоящее время в ОИЯИ реализуется проект коллайдера тяжелых ионов NICA, а также осуществляется необходимая модернизация нуклотрона. Сотрудниками ОИЯИ, МИФИ и ИТЭФ проводится реконструкция системы инжекции пучков протонов и легких ионов. В статье представлены результаты измерений и настройки электродинамических характеристик резонатора ускорителя с пространственно-однородной квадрупольной фокусировкой и ввода ВЧ-мощности в резонатор.

New NICA heavy ion collider is now under construction at JINR and Nuclotron modernization is also realized. Common team for JINR, MEPHI and ITEP is now realizing the project of proton and light ion injection system reconstruction. New results of RFQ linac resonator testing and measurements and RF power load are discussed in this article.

PACS: 29.17.w; 29.27.Bd

¹E-mail: smpolozov@mephi.ru

ВВЕДЕНИЕ

В рамках создания в ОИЯИ нового коллайдера NICA [1] проводится модернизация системы инъекции пучков протонов и легких ионов. В частности, импульсный высоковольтный инжектор для ускорителя с трубками дрейфа ЛУ-20 планируется заменить на секцию с пространственно-однородной квадрупольной фокусировкой (ПОКФ). Ускоритель с ПОКФ должен обеспечить ускорение ионов с отношением заряда (Z) к массе (A) $0,3 \leq Z/A \leq 0,5$ с током до 20 мА до кинетической энергии 0,156 МэВ/нуклон при коэффициенте токопрохождения не хуже 80%. Фазовая протяженность ступка на выходе ускорителя не должна превышать 90° , а разброс по продольному импульсу — $\pm 4\%$. Результаты моделирования динамики пучка, исследования и оптимизации электродинамических характеристик резонатора, конструктивные решения приведены в работах [2–4].

Рассмотрим результаты создания компонентов ускорителя, а также настройки резонатора и ввода в него ВЧ-мощности.

1. РЕЗОНАТОР УСКОРИТЕЛЯ С ПОКФ

В марте 2015 г. в опытном производстве Всероссийского научно-исследовательского института технической физики им. Е. И. Забабахина (РФЯЦ-ВНИИТФ) было завершено изготовление резонатора ускорителя с ПОКФ, конструктивно состоящего из трех секций.

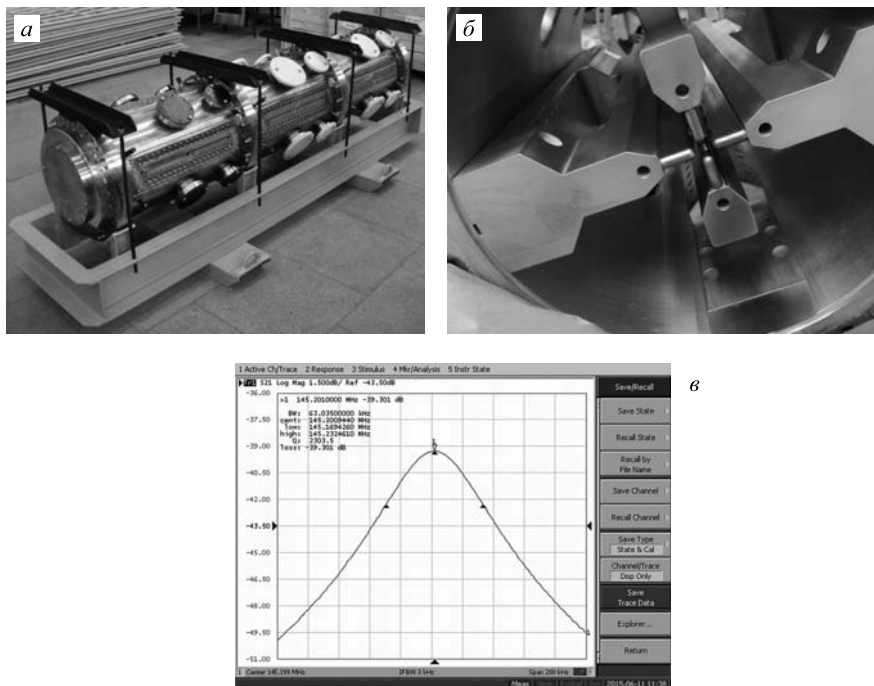


Рис. 1. Резонатор до (а) и после (б) нанесения медного покрытия и амплитудно-частотная характеристика резонатора после полировки электродов (в)

Изготовление резонатора проводилось в два этапа. На первом этапе были изготовлены стальные обечайки резонатора и электроды (рис. 1, *а*). Электроды были установлены и отъюстированы с точностью ± 100 мкм. На втором этапе на внутреннюю поверхность резонатора, а также на поверхность электродов, за исключением их полюсов, было нанесено медное покрытие (рис. 1, *б*). Толщина медного покрытия обечайки варьируется от 40 до 60 мкм, толщина покрытия электродов — 37–40 мкм. Медное покрытие не наносилось на полюса электродов, поскольку величина модуляции электродов в первой секции ускорителя составляет ~ 20 мкм.

Перед транспортировкой резонатора в ИТЭФ, где осуществлялись настройка и испытание резонатора, было проведено измерение его основных ЭДХ. Резонансная частота рабочего вида колебаний резонатора без установки настроечных элементов и петель ввода мощности составляет $f_0 = 144,2$ МГц (рабочая частота ЛУ-20 составляет 145,2 МГц), собственная добротность $Q_0 = 5300$, ближайшая частота паразитной (дипольной) моды колебаний отстоит от частоты рабочего вида колебаний на $\Delta f \approx 10$ МГц.

Для предотвращения окислительных процессов внутри резонатора на время транспортировки в ИТЭФ в резонатор был закачан азот до давления 2 атм.

2. ВЧ-СИСТЕМА

Особенностью системы ВЧ-питания новой секции с ПОКФ [3] является необходимость ее синхронизации с сигналом из резонатора ускорителя ЛУ-20, работающего в режиме самовозбуждения. Структурная схема возбуждения резонатора с ПОКФ представлена на рис. 2, *а*. Опорный высокочастотный сигнал с выхода задающего генератора подается на твердотельный усилитель, с которого поступает на вход стойки предварительного усиления. Стойка предварительного усиления состоит из двух каскадов, включенных последовательно (К1 и К2), делителя мощности ДМ, двух каскадов (К3 и К4), включенных параллельно, и сумматора мощности.

Все каскады стойки идентичны и собраны по схеме с общей сеткой на генераторных лампах ГИ-39Б. Сигнал с сумматора подается на вход оконечного лампового каскада на триоде ГИ27АМ, с выхода которого двумя фидерами ВЧ-мощность подводится непосредственно к резонатору. Для обеспечения синхронной работы секции с ПОКФ в составе двухрезонаторной системы был разработан модуль задающего генератора с функциями автоматической регулировки частоты резонатора ПОКФ и динамического захвата частоты и фазы ВЧ-колебаний из резонатора ЛУ-20 (рис. 2, *б*). Механические плунжеры позволяют синхронизировать частоты ПОКФ и ЛУ-20 в пределах 10 % от полосы пропускания резонатора с ПОКФ, а алгоритм захвата обеспечивает синхронизацию частоты и фазы двух систем за время нарастания ВЧ-поля в ЛУ-20. Детальное описание работы ВЧ-генератора приведено в [5].

3. НАСТРОЙКА РЕЗОНАТОРА И ВВОД ВЧ-МОЩНОСТИ

Проведенный в ИТЭФ тест на вакуумную герметичность резонатора выявил наличие течей в местах стыковки секций резонатора между собой, а также в местах установки торцевых фланцев. Рабочее значение остаточного давления $< 1 \cdot 10^{-6}$ мбар обеспечивалось

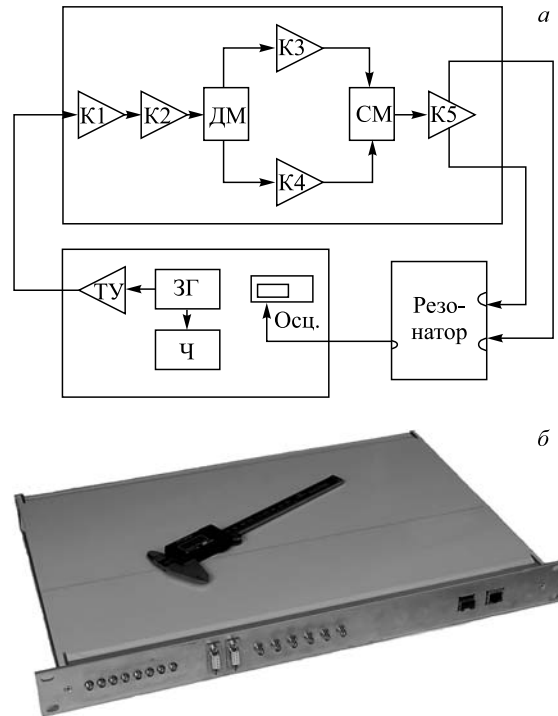


Рис. 2. а) Структурная схема возбуждения резонатора: ЗГ — задающий генератор; ТУ — транзисторный усилитель; Ч — частотомер; Осц. — осциллограф; К1–К4 — усилительные каскады на лампе ГИЗ9Б; К5 — усилительный каскад на лампе ГИ27АМ. б) Задающий генератор

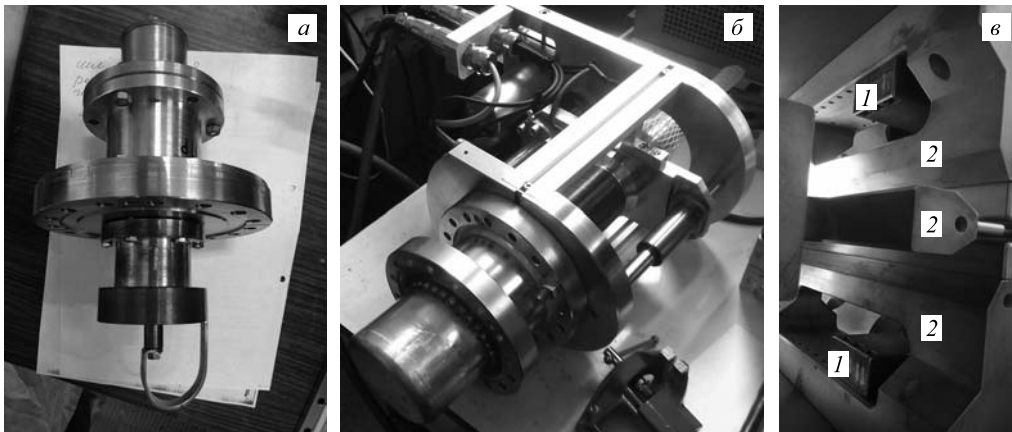


Рис. 3. Петля ввода мощности (а); плунжер системы АРЧ (б); накладки на электрод (1 — накладка; 2 — электрод), используемые для подстройки частоты (в)

вакуумной прокладкой из витонитового шнура с диаметром сечения 2 мм, устанавливаемого над контактной прокладкой из медной проволоки. После того, как в резонаторе было достигнуто давление $8 \cdot 10^{-7}$ мбар, был проведен пробный ввод ВЧ-мощности. Для ввода ВЧ-мощности во вторую секцию резонатора были установлены две петли (рис. 3, а) и два плунжера системы АРЧ (рис. 3, б). Плунжеры АРЧ были выдвинуты на середину своего хода (полный ход составляет 80 мм). Резонансная частота составила $f_0 = 144,33$ МГц. При вводе ВЧ-мощности было обнаружено, что ВЧ-пробой внутри структуры не позволяют ввести в резонатор более 200 кВт ($\sim 60\%$ от требуемого для ускорения ионов с $Z/A = 0,3$ уровня).

Было выявлено, что ВЧ-пробой возникают между электродами, т. е. в месте максимальной напряженности электрического поля. На основании этого был сделан вывод, что основной причиной является шероховатость поверхности полюсов электродов и ее недостаточная чистота. Была проведена полировка полюсов электродов, после чего ввод мощности возобновился.

Так как измеренный диапазон перестройки резонансной частоты резонатора с помощью плунжеров системы АРЧ (между крайними положениями плунжеров) составил $\Delta f = 420$ кГц, для настройки резонатора на требуемую частоту 145,2 МГц (рис. 1, в) при выставленных в середину рабочего хода плунжерах АРЧ были установлены накладки в окна связи электродов (рис. 3, в). В каждую секцию устанавливаются по две накладки на

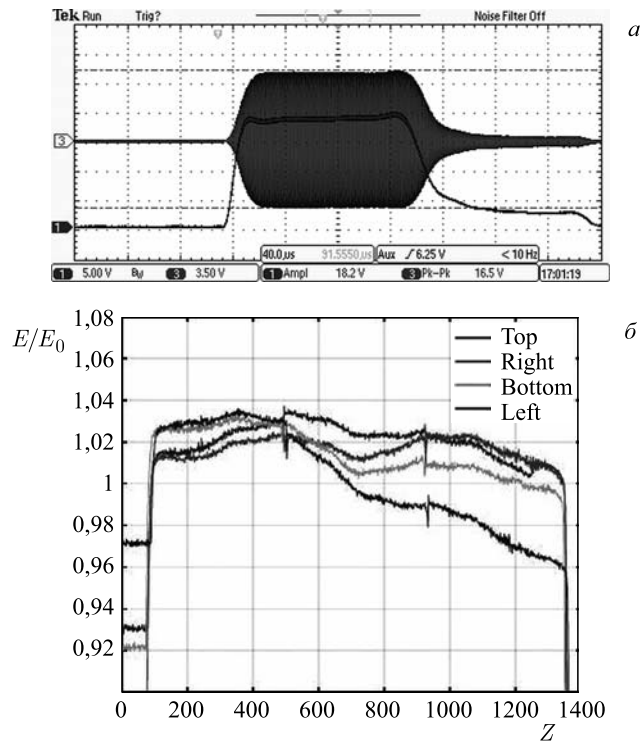


Рис. 4. Измеренное распределение электрического поля в квадрантах резонатора (а) и осциллограммы ВЧ-сигнала из резонатора и импульса анодного напряжения генератора ВЧ (б)

противоположные электроды. Для обеспечения надежного контакта между накладкой и ножкой электрода на нижней плоскости накладки по периметру устанавливается медная трубка диаметром 2 мм. Накладки крепятся к электродам с помощью шести болтов, вытянутая форма отверстий под болты позволяет регулировать воздействие накладок на резонансную частоту путем перемещения последних вдоль электродов.

Измерение распределения электрического поля в квадрантах ускорителя (рис. 4, а) показало, что неравномерность распределения поля по всей длине резонатора составляет не более $\pm 2\%$.

Резонатор был поставлен на круглосуточную откачку, и по достижении давления $8 \cdot 10^{-7}$ мбар начата ВЧ-тренировка внутренней поверхности резонатора, которая продолжалась в течение двух недель. К концу второй недели был достигнут требуемый уровень вводимой ВЧ-мощности (рис. 4, б) ≈ 340 кВт, что соответствует напряженности электрического поля, необходимой для ускорения ионов с $Z/A = 0,3$. К завершению этапа ВЧ-тренировки остаточное давление в резонаторе составило $3,8 \cdot 10^{-7}$ мбар.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе работ по реконструкции системы инжекции протонов и легких ионов в ускорительный комплекс «Нуклотрон–НИСА» ускоряющий резонатор секции с ПОКФ (рис. 5) был смонтирован, настроен на рабочую частоту и откачан до необходимого вакуума. В резонатор введена требуемая для ускорения ионов с $Z/A = 0,3$ ВЧ-мощность около 340 кВт. В настоящее время резонатор и системы ВЧ-питания готовятся к транспортировке в ОИЯИ.

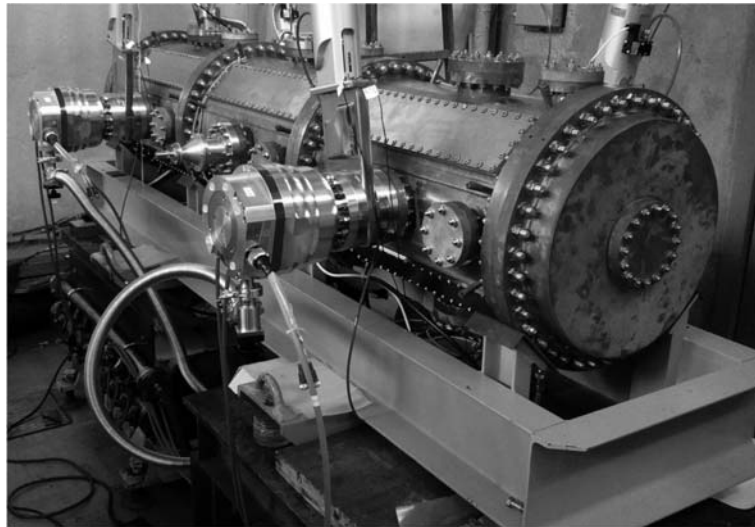


Рис. 5. Резонатор ускорителя с ПОКФ со смонтированным на нем вакуумным, высокочастотным и измерительным оборудованием

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Trubnikov G. V. et al.* NICA Project at JINR // Proc. of IPAC'2013. P. 1343–1345.
2. *Butenko A. V. et al.* Development of the NICA Injection Facility // Ibid. P. 3915–3917.
3. *Andreev V. A. et al.* Reconstruction of Light and Polarized Ion Beam Injection System of JINR Nuclotron-NICA Accelerator Complex // Problems of At. Science and Technology. Ser.: Nucl. Phys. Investigations. 2013. V. 6, No. 88. P. 8–12.
4. *Butenko A. V. et al.* Development of NICA Injection Complex // Proc. of IPAC'2014. P. 2103–2105.
5. *Liakin D., Barabin S., Orlov A.* Digital Signal Processing Algorithms for LINAC Low-Level RF Systems // Proc. of RuPAC'2014. P. 392–394.