

ПРОЕКТ ВЫСОКОЧАСТОТНОЙ СИСТЕМЫ КОЛЛАЙДЕРА NICA

*Е. А. Ротов^{а,б}, Ю. А. Бирючевский^а, Е. К. Кенжебулатов^а, В. В. Козлов^а,
А. А. Кондаков^а, С. А. Крутихин^а, Я. Г. Крючков^а, Г. Я. Куркин^а,
А. М. Мальшев^{а,б}, Н. В. Митянина^{а,б}, А. А. Мурасев^а, В. Н. Осипов^{а,б},
В. М. Петров^а, А. М. Пилан^{а,б}, В. В. Тарнецкий^{а,б}, А. Г. Трибендис^{а,б},
К. Н. Чернов^{а,б}, О. И. Бровка^с, А. В. Елисеев^с,
И. Н. Мешков^с, Е. М. Сыресин^с*

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

^б Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

^в Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск, Россия

^с Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

Строящийся в ОИЯИ (Дубна) ускорительный комплекс NICA (Nuclotron-based Ion Collider fAcility) предназначен для проведения экспериментов с ядрами золота $^{197}\text{Au}^{79+}$ при энергии 1–4,5 ГэВ/нуклон. Высоочастотная (ВЧ) система коллайдера должна обеспечить захват инжектируемых из нуклотрона пучков, накопление необходимого числа частиц, их доускорение (при необходимости) и формирование пучков. Для этого в каждом кольце коллайдера применяются три типа ускоряющих станций — барьерная и гармонические. Барьерная станция служит для накопления частиц и может использоваться для их ускорения до энергии эксперимента. Гармонические ВЧ-станции (22-й и 66-й гармоник частоты обращения) нужны для формирования пучков. Приводится описание режимов работы ВЧ-системы и особенностей конструкции станций.

NICA (Nuclotron-based Ion Collider fAcility) is a new accelerator complex being built at the Joint Institute for Nuclear Research (Dubna, Russia) intended for experiments with gold ions $^{197}\text{Au}^{79+}$ at energies of 1–4.5 GeV/u. The RF system has to provide accumulation of the particles, their acceleration (if necessary) and bunch formation. This is realized by 3 types of RF stations installed in each ring — RF barrier bucket and 2 harmonic stations. Barrier bucket station provides accumulation of the particles and may accelerate particles as well. Harmonic RF stations operating at 22nd and 66th harmonics of the revolution frequency are used for bunch formation. The paper describes the RF system operating modes together with the design features of the RF stations.

PACS: 29.20.-c

ВВЕДЕНИЕ

Ускорительный комплекс NICA предназначен для проведения экспериментов с ядрами золота $^{197}\text{Au}^{79+}$ при энергии 1–4,5 ГэВ/нуклон. Средняя проектная светимость коллайдера $10^{27} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$. Комплекс представляет собой каскад ускорителей: инжекционный комплекс, новый сверхпроводящий синхротрон (бустер), существующий сверхпроводящий синхротрон (нуклотрон) и новый коллайдер, состоящий из двух расположенных друг

Таблица 1. Параметры коллайдера NICA

| | |
|---|-------------------------------|
| Периметр, м | 503,04 |
| Критическая энергия (γ) | 7,09 |
| Энергия инжекции, ГэВ/нуклон | 1–4,5 |
| Число частиц в одном инжектируемом сгустке | $1 \cdot 10^9$ |
| Длина инжектируемого сгустка, м | 15–120 |
| Среднеквадратичный разброс по импульсам $\Delta p/p$ инжектируемых частиц (линейная зависимость от энергии) | $(1-3) \cdot 10^{-4}$ |
| Время между двумя последовательными инжекциями при поочередном/одновременном заполнении колец, с | 4/8 |
| Энергия эксперимента, ГэВ/нуклон | 1–4,5 |
| Среднеквадратичный разброс по импульсам $\Delta p/p$ частиц при энергии эксперимента 1/3/4,5 ГэВ/нуклон | $0,55/1,15/1,5 \cdot 10^{-3}$ |
| Частота обращения при энергии 1/3/4,5 ГэВ/нуклон, МГц | 0,522/0,579/0,587 |
| Число сгустков в каждом кольце | 22 |
| Максимальное число частиц в одном сгустке (в каждом кольце) на энергии 1/3/4,5 ГэВ/нуклон | $0,275/2,4/2,2 \cdot 10^9$ |
| Максимальное число частиц в каждом кольце при энергии 1/3/4,5 ГэВ/нуклон | $0,6/5,3/4,8 \cdot 10^{10}$ |
| Число инжекций, необходимое для накопления максимального числа частиц | 7–55 |
| Время накопления максимального числа частиц, с | 56–440 |
| Полное время экспериментального цикла, мин | 5–100 |

Таблица 2. ВЧ-станции коллайдера (одного кольца)

| Станция | Назначение | Форма напряжения | Частота, МГц | Σ напряжение, кВ |
|---------|---------------------------|------------------|---------------|-------------------------|
| ВЧ1 | Накопление Доускорение | Движ. барьеры | 0,522–0,587 | ± 5 |
| | | Меандры | | $\pm (0,27-0,33)$ |
| ВЧ2 | Формирование сгустков | 22-я гармоника | 11,484–12,914 | 100 |
| ВЧ3 | | 66-я гармоника | 34,452–38,742 | 1 000 |

над другим сверхпроводящих колец [1]. Параметры коллайдера (выборочно) приведены в табл. 1.

ВЧ-система коллайдера обеспечивает накопление инжектируемых из нуклотрона частиц, их доускорение (в случае инжекции не при энергии эксперимента) и формирование в каждом кольце 22 сгустков с заданными параметрами. Для этого применяются три типа ускоряющих станций (табл. 2). Частота станций перестраивается в зависимости от энергии. Работа станций происходит по алгоритму, описанному ниже. Рабочий вакуум не хуже 10^{-11} Торр.

АЛГОРИТМ РАБОТЫ ВЧ-СИСТЕМЫ КОЛЛАЙДЕРА

Инжектируемые из нуклотрона сгустки частиц накапливаются в коллайдере с помощью барьерных станций (ВЧ1). Накопление осуществляется методом барьерных напряжений [2]. На ускоряющем зазоре станции создается периодическая последовательность

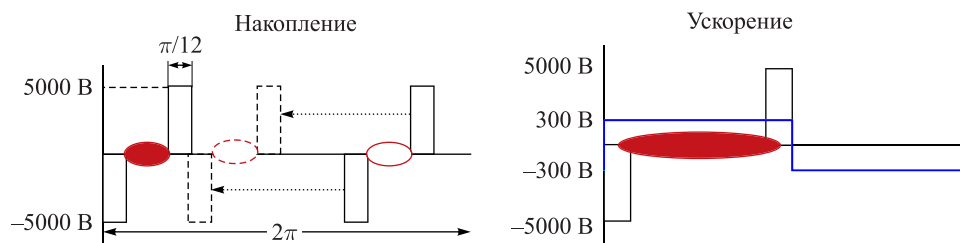


Рис. 1. Принцип работы ВЧ1: темный овал — зона накопления, светлый овал — зона инжекции

ускоряющих и тормозящих импульсов напряжений (барьеров) амплитудой 5 кВ. Барьеры задают зоны накопления и инжекции. После очередной инжекции из нуклотрона при соответствующем манипулировании барьерами новая порция частиц добавляется к уже накопленным (так называемый RF stacking) и освобождается место для следующей инжекции. При необходимости доускорения накопленных частиц ВЧ1 генерирует ускоряющее напряжение — меандр $\pm(270-330)$ В, а барьеры обеспечивают расположение частиц в его положительной области. Ускорение происходит одновременно с подъемом магнитного поля. Рис. 1 иллюстрирует принцип работы ВЧ1.

После накопления достаточного числа частиц и их доускорения станции ВЧ1 выключаются. Частицы равномерно заполняют весь периметр кольца. Затем включаются станции ВЧ2, работающие на частоте 22-й гармоники частоты обращения. Напряжение на станциях ВЧ2 возрастает с начального значения, близкого к 0, до 100 кВ. Формируются 22 ступки. Процесс сопровождается электронным или стохастическим охлаждением. Общее время подъема напряжения ~ 100 с до тех пор, пока ступка не окажется в состоянии «поместиться» в сепаратрису 66-й гармоники (ВЧ3). В этот момент происходит перезахват ступки из ВЧ2 в ВЧ3 (ВЧ2 и ВЧ3 работают одновременно).

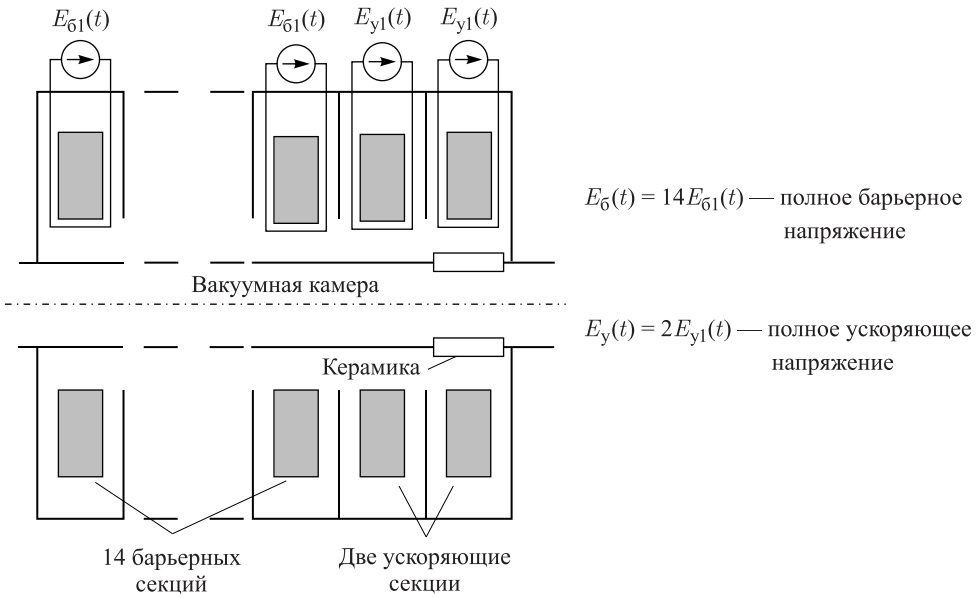
Все станции имеют механические короткозамыкатели (КЗ) ускоряющих зазоров. В те периоды времени, когда в соответствии с алгоритмом работы ВЧ-системы станции выключены, их ускоряющие зазоры замкнуты (закорочены) и пучок «видит» гладкую камеру, а не резонансную полость.

Перед включением станции ВЧ2 и ВЧ3 (с закороченными зазорами) настраиваются посередине между 22/23-й и 66/67-й гармониками частоты обращения соответственно. Расстроенные резонаторы слабо взаимодействуют с пучком. После размыкания зазора адиабатический подъем напряжения происходит синхронно с настройкой станций на рабочие частоты.

СТАНЦИИ ВЧ1

Станция ВЧ1 — индукционный ускоритель. Ускоритель состоит из набора секций, надетых снаружи на вакуумную камеру (круглую трубу внутренним диаметром 100 мм), в разрыв которой впаян цилиндрический керамический изолятор. Разрыв вакуумной камеры образует ускоряющий зазор. Концептуальная схема барьерной станции приведена на рис. 2.

Секция выполнена на основе кольца из аморфного кобальтового сплава АМЕТ-84КХСР производства ПАО «Ашинский металлургический завод» [3]. Этот сплав характеризуется высокой относительной магнитной проницаемостью (десятки тысяч на малых



$$E_{\delta}(t) = 14E_{\delta 1}(t) \text{ — полное барьерное напряжение}$$

$$E_y(t) = 2E_{y1}(t) \text{ — полное ускоряющее напряжение}$$

Рис. 2. Концептуальная схема барьерной станции

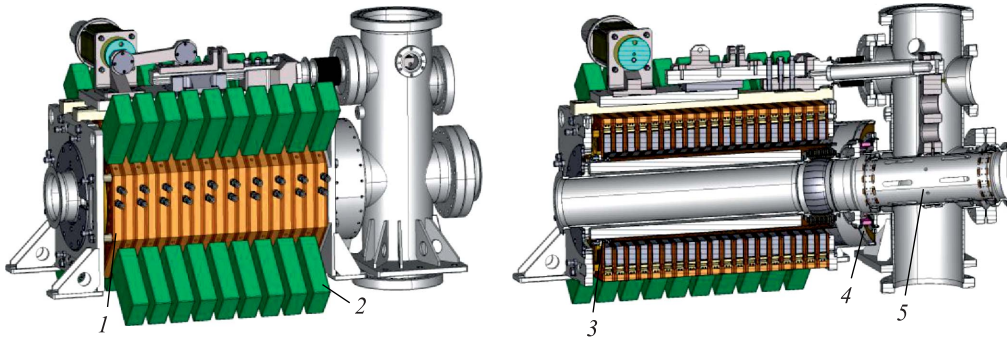


Рис. 3. Станция ВЧ1: 1 — секция с кольцом аморфного сплава в медном корпусе с водяным охлаждением; 2 — формирователь импульсов; 3 — нагреватель с термоизоляцией для обезгаживающего прогрева; 4 — керамический изолятор; 5 — короткозамыкатель ускоряющего зазора

частотах, ~ 600 на 10 МГц). На каждую секцию устанавливаются два формирователя импульсов на основе ключевой транзисторной сборки Microsemi DRF1400, генерирующие последовательности импульсов E_1 и E_2 . Длительность барьерных импульсов $20\text{--}80$ нс. Длительность фронтов ≤ 10 нс. В процессе работы в кольце выделяется до $1,2$ кВт тепловой мощности. Поэтому кольца помещены в медный корпус с водяным охлаждением. На рис. 3 показан внешний вид барьерной станции и ее разрез.

СТАНЦИИ ВЧ2

Станция ВЧ2 — вакуумный коаксиальный резонатор, укороченный емкостью. Частота резонатора перестраивается (в зависимости от энергии эксперимента) в пределах

11,484–12,914 МГц. Рабочая частота перестраивается четырьмя емкостными тюнерами. Дискретность настройки должна быть ~ 200 Гц. Это соответствует перемещению емкостных тюнеров на 1,1 мм с точностью позиционирования 0,13 мкм. Для обеспечения таких перемещений используется комбинированный привод, суммирующий грубое перемещение шаговым двигателем и прецизионное перемещение пьезоэлектрическим актуатором. Суммарное напряжение станций ВЧ2 100 кВ. Предполагается установка четырех станций в каждое кольцо. Для питания станций будут использованы полупроводниковые усилители.

СТАНЦИИ ВЧ3

Станция ВЧ3 — вакуумный коаксиальный резонатор, укороченный емкостью (аналогично ВЧ2). Частота резонатора перестраивается (в зависимости от энергии эксперимента) в пределах 34,452–38,742 МГц. Суммарное напряжение станций ВЧ3 до 1000 кВ. Для станций ВЧ2 и ВЧ3 использованы общие конструкторско-технологические решения. На рис. 4 показана конструкция станций.

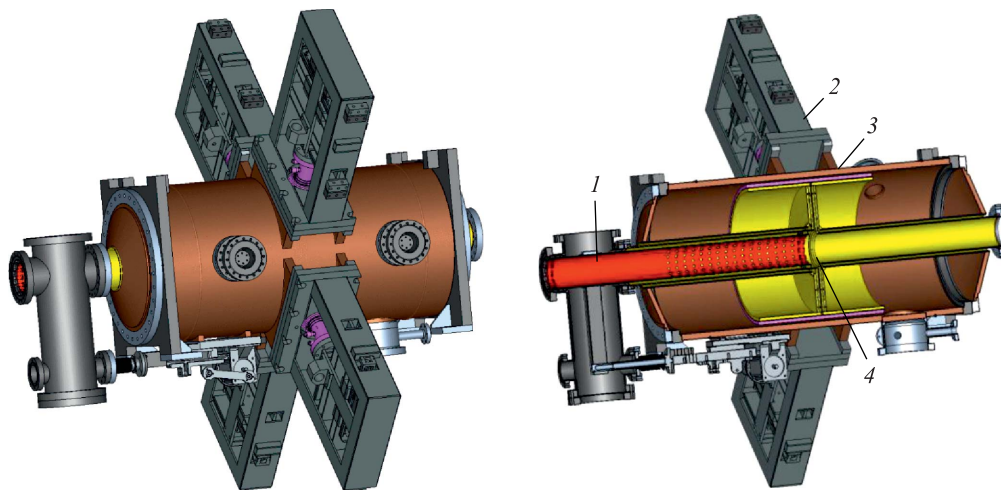


Рис. 4. Конструкция гармонических станций ВЧ2 и ВЧ3: 1 — замыкатель ускоряющего зазора; 2 — механизм перемещения тюнера; 3 — тюнер; 4 — ускоряющий зазор

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изготовлены и успешно испытаны прототипы отдельных узлов станций (секция ВЧ1, короткозамыкатель, тюнер). Две станции ВЧ1 переданы в производство ИЯФ. Испытания станций ВЧ1 в ОИЯИ планируются в декабре 2018 г. Завершается подготовка договора на производство в ИЯФ полномасштабного прототипа станции ВЧ2. Продолжается оптимизация параметров системы ВЧ3.

Работа финансируется за счет вноса Российской Федерации в ОИЯИ в соответствии с Соглашением от 02.06.2016 между Правительством РФ и международной межправительственной организацией Объединенным институтом ядерных исследований о создании и эксплуатации комплекса сверхпроводящих колец на встречных пучках тяжелых ионов NICA, подписанным на основании распоряжения Правительства РФ от 27.04.2016 г. № 783-р.

Часть исследований выполнена за счет гранта Российского научного фонда (проект № 14-50-00080).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Технический проект ускорительного комплекса NICA / Под общ. ред. И. Н. Мешкова, Г. В. Трубникова. Дубна: ОИЯИ, 2015.
2. Мешков И. Н. Метод барьерных напряжений в циклических ускорителях // ЭЧАЯ. 2014. Т. 45, вып. 2. С. 769.
3. <http://www.amet.ru>