

## СОСТАВ ОБОРУДОВАНИЯ И ПАРАМЕТРЫ КОЛЛАЙДЕРА NICA НА ПЕРИОД ПУСКОНАЛАДОЧНЫХ РАБОТ

*О. С. Козлов, И. Н. Мешков, А. О. Сидорин<sup>1</sup>, Г. В. Трубников*

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

Комплект оборудования в стартовой версии проекта NICA/MPD определен в соответствии со стратегией его поэтапной реализации. На начальном этапе вводятся в действие элементы ускорительного комплекса, обеспечивающие начало работы эксперимента BM@N на выведенном пучке и тестирование элементов детектора MPD при светимости не менее  $5 \cdot 10^{25} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ . В данной статье представлены состав оборудования и стратегия работы коллайдера NICA на период пусконаладочных работ.

Start-up version of the NICA/MPD project is determined in accordance with the strategy of its realization staging. At the initial stage the elements required for BM@N experiment realization using extracted beam and test of MPD elements at the luminosity not less than  $5 \cdot 10^{25} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  will be put into operation. The equipment configuration and strategy of the NICA collider operation during its commissioning are presented in this article.

PACS: 29.20.-c; 29.20.db; 29.20.+r

### ВВЕДЕНИЕ

Целью проекта NICA/MPD (Nuclotron based Ion Collider fAcility and Multi Purpose Detector) является создание ускорительного комплекса, предназначенного для реализации в ОИЯИ программы исследований по физике частиц на передовом мировом уровне. Эксперименты будут проводиться на фиксированных мишенях с использованием пучков нуклотрона при кинетической энергии вплоть до максимальной проектной (4,5 ГэВ/нуклон для Au<sup>79+</sup>) и в режиме сталкивающихся пучков тяжелых ионов с энергией в системе центра масс  $\sqrt{S_{NN}} = 4\text{--}11$  ГэВ/нуклон при средней светимости  $L = 10^{27} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ . Для коллайдерного эксперимента предложен многоцелевой детектор (MPD). Еще одной задачей проекта NICA является проведение экспериментальных исследований по физике спина на сталкивающихся поляризованных пучках протонов и легких ядер. Для достижения этих целей ускорительный комплекс NICA будет включать в себя следующие элементы: инжекционный комплекс, небольшой синхротрон бустер, модернизированный синхротрон нуклотрон и два накопительных кольца коллайдера с двумя точками встречи пучка. Состав и основные параметры элементов ускорительного комплекса приведены в [1, 2].

---

<sup>1</sup>E-mail: sidorin@jinr.ru

Сооружение ускорительного комплекса и реализация его физической программы разделены на следующие этапы:

- развитие ускорительного комплекса и реализации экспериментов на фиксированной мишени;
- сооружение коллайдера и его эксплуатация в режиме с заполнением обоих колец ионами одного и того же типа;
- модернизация секции взаимодействия пучков с целью организовать столкновения пучков ионов разного типа с одной и той же энергией в обоих кольцах (в этом случае магнитная жесткость колец коллайдера различна);
- программа экспериментов по физике спина будет реализована, когда кольца коллайдера будут оборудованы необходимыми устройствами по управлению спиновым движением и диагностикой поляризованных пучков.

В ближайшие 5 лет планируется завершить сооружение ускорительного комплекса и начать пусконаладочные работы на коллайдере при стартовой комплектации оборудования. Комплект оборудования в стартовой версии (СВ-режим) определен в соответствии со стратегией поэтапной реализации проекта NICA/MPD. На начальном этапе вводятся в действие элементы ускорительного комплекса, обеспечивающие работу эксперимента BM@N (Baryonic Matter at Nuclotron) на выведенном пучке и тестирование детектора MPD. Инжекционный комплекс создается в полном объеме. Из состава стартовой версии оборудования бустера вынесена система медленного вывода пучка. В стартовую версию оборудования нуклотрона не включаются устройства по управлению спином поляризованных пучков, обсуждается возможность начала работы с одной из двух ускоряющих станций при темпе роста поля до 0,8 Тл/с. Состав и параметры оборудования коллайдера NICA, а также стратегия его работы на этапе ввода в эксплуатацию приведены в данной статье.

## 1. СТАРТОВАЯ ВЕРСИЯ ОБОРУДОВАНИЯ КОЛЛАЙДЕРА

Основными задачами коллайдера на период пусконаладочных работ являются оптимизация динамики частиц, отработка процедур накопления пучков, формирования сгустков и сведения пучков в точке встречи и исследования эволюции светимости во времени. Для тестирования подсистем MPD необходимо обеспечить величину пиковой светимости не менее  $5 \cdot 10^{25} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ . Стартовая конфигурация оборудования MPD позволяет работать со сгустками, имеющими среднеквадратичную длину до 1,2 м (вместо 0,6 м в полной версии). Диапазон энергии ионов на начальном этапе работы коллайдера выбран от 3,0 до 4,5 ГэВ/нуклон, который, с одной стороны, хорошо освоен на нуклотроне, а с другой стороны, позволяет предъявлять наиболее мягкие требования к системе охлаждения пучков.

Стартовая версия коллайдера включает в себя минимальный набор оборудования, необходимый для решения этих задач. Соответственно, за рамки стартовой версии вынесена система электронного охлаждения, так как диапазон энергий, при которых планируется ее использование, находится ниже 3 ГэВ/нуклон. Приемлемое в стартовой версии увеличение длины сгустка и снижение величины светимости приводит к снижению пикового тока пучка примерно на порядок, что допускает возможность работы без системы

обратных связей, предназначенной для подавления когерентных неустойчивостей. Во избежание развития наиболее опасной неустойчивости «голова–хвост» предусматривается работа коллайдера при малом и отрицательном значении хроматичности, а моды этой неустойчивости высокого порядка будут подавлены с помощью введения семейства оккупольных линз. Накопление пучка и формирование сгустков длиной 0,6 м в полной версии будет осуществляться с помощью трех высокочастотных систем: система, формирующая так называемое «барьерное» напряжение (ВЧ-1), используется для накопления пучка, система, создающая синусоидальное напряжение на 22-й гармонике частоты обращения (ВЧ-2), используется для предварительной группировки пучка и получения сгустков длиной 1,2 м, после чего включается система, работающая на 66-й гармонике (ВЧ-3), и производится окончательное сжатие сгустков. В стартовой версии можно обойтись без системы ВЧ-3 и снизить величину полного напряжения, создаваемого системой ВЧ-2, до 50 кВ (вместо 100 кВ в полной версии). Накопление и группировка пучка невозможны без применения охлаждения для продольной степени свободы. Ожидаемый поперечный эмиттанс пучка на выходе из нуклотрона составляет от 0,1 до  $0,3\pi$  мм · мрад. Максимальный проектный эмиттанс сгустков в коллайдере может достигать величины 1,1 $\pi$  мм · мрад, поэтому при небольшом времени накопления можно допустить рост эмиттанса и достичь требуемой пиковой светимости без применения охлаждения поперечных степеней свободы.

Таким образом, состав оборудования коллайдера NICA в стартовой версии (СВ) следующий.

ВЧ-система состоит из двух систем в каждом кольце:

ВЧ-1 («барьерное» напряжение)	1 резонатор/кольцо, 1-я гармоника
ВЧ-2 (гармоническое напряжение)	2 резонатора/кольцо, 22-я гармоника
Амплитуда напряжения ВЧ-2 (макс.), кВ	50
Стохастическое охлаждение:	
продольное	1 канал/кольцо
поперечное	Отсутствует
Электронное охлаждение	Отсутствует
Система обратных связей	Отсутствует.

В СВ-версии коллайдера обеспечиваются следующие основные параметры (см. таблицу).

Параметр	Значение
Диапазон энергии ионов, ГэВ/нуклон	3–4,5
Среднеквадратичная длина сгустка, см	120
Эмиттанс сгустка на выходе из нуклотрона, $\pi$ мм · мрад	0,1–0,3
Эмиттанс сгустка в коллайдере, $\pi$ мм · мрад	0,5–1,1
Число сгустков в кольце	22
Число ионов в сгустке	$5-7 \cdot 10^8$
Пиковая светимость, $\text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$	$5 \cdot 10^{25}$
Период повторения циклов инжекции, с	4
Число ионов за цикл	$1 \cdot 10^9$
Полное число циклов инжекции	30
Длительность накопления, с	120

## 2. ПИКОВАЯ СВЕТИМОСТЬ КОЛЛАЙДЕРА В СТАРТОВОЙ ВЕРСИИ

СВ-режим работы комплекса предполагает генерацию и ускорение ионов в инжекционной цепочке «Крион-N» (источник ионов электронно-струнного типа)–НЦас (линейный ускоритель тяжелых ионов)–бустер–нуклотрон с последующей инжекцией в коллайдер при энергии эксперимента, выбранной в диапазоне СВ, и накоплением в коллайдере с использованием ВЧ-1 и продольного стохастического охлаждения. Время накопления до полной интенсивности около 2 мин. За это время эмиттанс распущенного пучка возрастает незначительно.

По окончании накопления пучок распускается на всю орбиту коллайдера и производится формирование 22 сгустков в каждом кольце с помощью ВЧ-2. Эта процедура выполняется так же, как и в основном варианте работы коллайдера. Отличие состоит только в меньшем количестве ионов в сгустке. Численное моделирование показывает, что сгустки длиной 1,2 м могут быть сформированы при адиабатическом подъеме напряжения ВЧ-2 до 50 кВ в сопровождении продольного стохастического охлаждения. Относительный разброс ионов по импульсу (рис. 1) не превышает при этом  $6 \cdot 10^{-4}$ .

Благодаря столь малому импульсному разбросу для продольного стохастического охлаждения может быть использован метод фильтра (вместо метода Палмера, который обладает большим аксептансом и принят для основного режима работы). Метод фильтра обеспечивает более высокий темп охлаждения, и, кроме того, он уже реализован на нуклотроне и применяется для исследований процесса охлаждения как распущенного, так и сгруппированного пучков. Характеристики, полученные к настоящему времени в экспериментах, близки к требуемым для СВ-режима работы коллайдера.

При горизонтальном и вертикальном эмиттансах, равных  $1,1\pi$  мм·мрад (что соответствует максимально допустимому заполнению аксептанса), пиковая светимость  $5 \cdot 10^{25}$  см<sup>-2</sup>·с<sup>-1</sup> достигается при примерно  $7 \cdot 10^8$  ионов в сгустке. Максимальный сдвиг частот бетатронных колебаний ионов из-за собственного поля сгустка имеет место при минимальной энергии СВ-диапазона и составляет примерно 0,01. Сдвиг частот из-за влияния поля встречного сгустка еще на порядок меньше. Поэтому эффектами пространственного заряда в первом приближении можно пренебречь. Максимальная интенсивность сгустка может быть ограничена развитием продольной микроволновой неустойчивости, так как порог ее развития пропорционален квадрату разброса по импульсу.

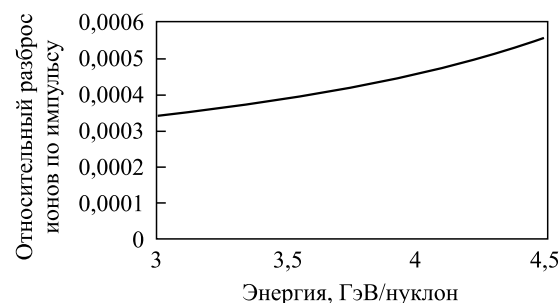


Рис. 1. Зависимость среднеквадратичного значения относительного разброса ионов сгустка по импульсу от энергии при длине сгустка 1,2 м и амплитуде ВЧ-напряжения 50 кВ

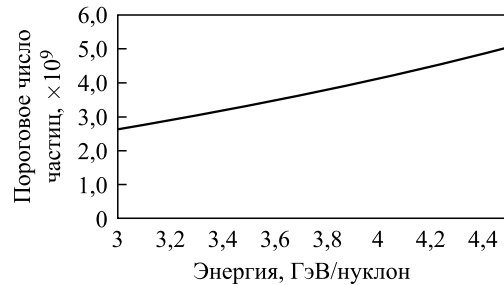


Рис. 2. Зависимость от энергии порогового числа ионов в сгустке, соответствующего развитию микроволновой неустойчивости, рассчитанного на основе критерия Кайла–Шнеля

Тем не менее по оценкам пороговое число ионов в сгустке в три-семь раз больше требуемого (рис. 2).

Таким образом, при использовании охлаждения только продольной степени свободы можно уверенно рассчитывать на обеспечение накопления и группировки пучка, необходимых для получения пиковой светимости на уровне  $5 \cdot 10^{25} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ . Характер эволюции светимости во времени (как следствие — среднее значение светимости) будет определяться совместным действием охлаждения продольной степени свободы и внутрипучкового рассеяния.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Kekelidze V. et al.* NICA Project at JINR // Part. Nucl. 2012. V. 9, No. 4–5(174–175). P. 521–526.
2. Passport of the NICA Accelerator Complex. Functional Requirement Specification. Project NICA/MPD / Ed. by I. Meshkov, G. Trubnikov, A. Sidorin. Dubna: JINR, 2015.