

СТОХАСТИЧЕСКОЕ ОХЛАЖДЕНИЕ В СТАРТОВОЙ И ОСНОВНОЙ КОНФИГУРАЦИИ ОБОРУДОВАНИЯ КОЛЛАЙДЕРА NICA

И. В. Горельшев^{а, б, 1}, А. О. Сидорин^{а, б}, Г. В. Трубников^{а, б}

^а Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

^б Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

Система стохастического охлаждения (ССО) — один из ключевых элементов ускорительно-коллайдерного комплекса NICA. В работе проведено исследование зависимости светимости от β -функции в точке встречи, дано обоснование основных параметров системы и определен состав оборудования для стартового и основного режимов работы коллайдера.

The stochastic cooling system is one of the crucial elements of the NICA project. In the course of the paper the luminosity dependence on β function in the interaction point is investigated, the foundation of the main parameters and a list of equipment for the stochastic cooling system in the start-up and project modes of collider operation are given.

PACS: 29.20.-c; 29.20.db; 29.90.+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 и в режиме сталкивающихся пучков тяжелых ионов с энергией в системе центра масс $\sqrt{s_{NN}} = 4\text{--}11$ ГэВ/нуклон при средней светимости $L = 10^{27}$ см⁻² · с⁻¹.

В ближайшие три года планируется завершить сооружение ускорительного комплекса и начать пусконаладочные работы на коллайдере при стартовой конфигурации оборудования. Комплект оборудования в стартовой версии 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. Состав и параметры оборудования коллайдера NICA, а также стратегия его работы на этапе ввода в эксплуатацию приведены в [1].

¹E-mail: ivan_v_gorelyshev@mail.ru

Накопление пучка и формирование сгустков длиной 0,6 м, необходимой для эффективной работы МРД в полной версии, будет осуществляться с помощью трех высокочастотных систем — системы, формирующей так называемое «барьерное» напряжение, используемой для накопления пучка; системы, создающей синусоидальное напряжение на 22-й гармонике частоты обращения и используемой для предварительной группировки пучка и получения сгустков длиной 1,2 м; затем включающейся системы, работающей на 66-й гармонике и производящей окончательное сжатие сгустков. В стартовой конфигурации планируется проводить столкновения при среднеквадратичной длине сгустка $\sim 1,2$ м, что допустимо при стартовой конфигурации оборудования МРД. При этом можно обойтись без третьей ВЧ-системы и снизить величину полного напряжения второй системы до 50 кВ (вместо 100 кВ в полной версии). Применение охлаждения продольной степени свободы необходимо как минимум для накопления и группировки пучка. При этом достичь требуемой пиковой светимости можно и без применения охлаждения поперечных степеней свободы. Ожидаемый поперечный эмиттанс пучка на выходе нуклотрона составляет от $0,1\pi$ 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.

Система стохастического охлаждения (ССО) применяется в диапазоне энергий ионов от 3 до 4,5 ГэВ/нуклон для трех степеней свободы в основной конфигурации и только для продольной в стартовой. Применение системы с полосой 2–4 ГГц, принятой для основной конфигурации [2], позволяет в стартовой конфигурации стабилизировать светимость на требуемом для тестирования элементов МРД уровне $5 \cdot 10^{25}$ см⁻² · с⁻¹.

Недавние исследования [3, 4] показали, что для увеличения динамической апертуры коллайдера может потребоваться увеличение β -функции в точке встречи по сравнению с проектной величиной 35 см. В данной статье приводятся результаты исследования светимости в зависимости от β -функции в точке встречи, обоснование выбора метода охлаждения продольной степени свободы для стартовой и основной конфигураций, стратегия стабилизации светимости в стартовой конфигурации, рассматриваются вопросы технической реализации системы.

ЗАВИСИМОСТЬ СВИТИМОСТИ ОТ β -ФУНКЦИИ В ТОЧКЕ ВСТРЕЧИ

Критерием успешной работы системы охлаждения является обеспечение характерного времени охлаждения пучка, меньшего, чем время его нагрева, вызванного различными процессами. Основным процессом нагрева пучка в коллайдере NICA является кулоновское внутривидовое рассеяние (ВВР) частиц большого одноименного заряда. Нахождение пучка в термодинамическом равновесии, что соответствует равенству темпов нагрева от ВВР по трем степеням свободы, накладывает наименьшие требования на ССО в основной конфигурации коллайдера.

В расчетах характерных времен ВВР, проводимых в программе ВЕТАСОЛ [5], соответствующий аксептансу горизонтальный эмиттанс $1,1\pi$ мм · мрад был фиксированным, а вертикальный эмиттанс и продольный разброс по импульсу подбирались из условия термодинамического равновесия. Сравнились структуры при $\beta^* = 35, 60$ и 100 см. В каждой структуре градиенты линз в прямолинейных секциях настраивались так, чтобы сохранить проектное положение рабочей точки и согласование с арками. Интенсивность сгустка подбиралась так, чтобы в рабочем диапазоне энергий не превысить допустимый

Таблица 1. Энергия и интенсивность при достижении проектной светимости коллайдера

Параметр	β^* , м		
	0,35	0,60	1,00
E , ГэВ/нуклон	3,00	3,20	3,40
N , 10^9	2,30	2,85	3,25

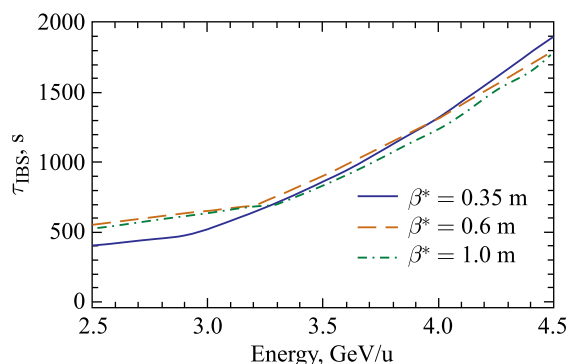


Рис. 1. Характерные времена нагрева пучка из-за эффекта ВПР в зависимости от энергии

сдвиг частоты бетатронных колебаний, принятый равным 0,05. При этом проектная светимость $L = 10^{27} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ для большего значения β^* достигается при более высокой энергии и большей интенсивности (табл. 1). Времена нагрева пучка в проекционном диапазоне энергий ССО (рис. 1) для трех структур заметно не отличаются и составляют 500–1800 с.

ВЫБОР МЕТОДА ОХЛАЖДЕНИЯ ПРОДОЛЬНОЙ СТЕПЕНИ СВОБОДЫ

Для продольного охлаждения сравнивались возможности трех методов: времяпролетного метода (ToF), метода фильтра (Filter) и метода Палмера (Palmer) [6]. При выборе конкретного метода продольного охлаждения учитывались два требования: 1) оптимальный темп охлаждения должен превышать темп нагрева от ВПР; 2) во избежание потерь частиц так называемый «аксептанс» охлаждения должен превышать полуразмах сепаратрисы по импульсу. Аксептанс охлаждения — максимальное относительное отклонение по импульсу, при котором возможно охлаждение. Расчеты динамики продольного стохастического охлаждения, проведенные с помощью моделирования эволюции функции распределения частиц посредством решения уравнения Фоккера–Планка [7], показали, что времяпролетный метод не обеспечивает необходимого темпа охлаждения, а аксептанс метода фильтра не превышает полуразмах сепаратрисы при энергиях ниже 3,9 ГэВ/нуклон (рис. 2). Таким образом, единственным методом продольного охлаждения, удовлетворяющим всем требованиям, является метод Палмера и он был выбран для основной версии коллайдера.

Из-за нелинейности силы трения «ядро» функции распределения частиц охлаждается быстрее, чем ее «хвосты», и распределение становится отличным от нормального. В этом случае темп изменения среднеквадратичного разброса не всегда является адекватным

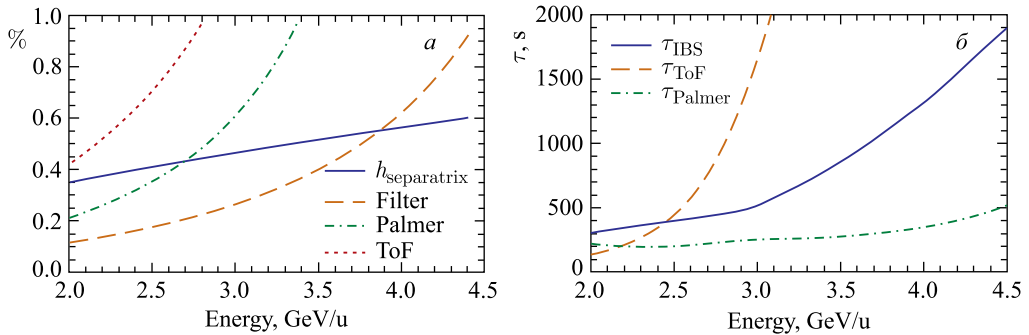


Рис. 2. Зависимости от энергии: а) аксептансов различных методов продольного охлаждения; б) характерных времен охлаждения в сравнении с темпом ВПР

Таблица 2. Отношение характерных времен нагрева пучка от ВПР и стохастического охлаждения для структур с разными значениями β^* ($E = 3$ ГэВ/нуклон)

Отношение времен нагрева пучка	$\beta^* = 0,35$ м	$\beta^* = 0,6$ м	$\beta^* = 1,0$ м
$\tau_{\text{IBS}}/\tau_{\text{Cool RMS}}$	2,034	2,543	2,464
$\tau_{\text{IBS}}/\tau_{\text{Cool FWHM}}$	5,110	5,584	5,302

параметром оценки эволюции распределения. Поэтому при сравнении темпов нагрева и охлаждения помимо эволюции среднеквадратичного разброса рассматривалось изменение полуширины распределения на полувысоте. Данные сравнения приведены в табл. 2.

Времена нагрева от ВПР в 2–5 раз превышают соответствующие времена охлаждения при любой из рассмотренных β -функций в точке встречи. Таким образом, выбранный для основной конфигурации коллайдера метод продольного охлаждения Палмера обеспечивает необходимый технический запас.

СТРАТЕГИЯ СТАБИЛИЗАЦИИ СВЕТИМОСТИ В СТАРТОВОЙ КОНФИГУРАЦИИ

Из-за снижения напряжения до 50 кВ в стартовой версии в режиме столкновений уменьшается продольный разброс по импульсу в сгустке, согласованном с ВЧ-системой. При этом температура продольной степени свободы будет намного меньше температуры поперечных степеней свободы. ВПР приводит к охлаждению поперечных степеней свободы из-за релаксации сгустка. Поэтому для стабилизации шестимерного фазового объема достаточно применения охлаждения только продольной степени свободы.

Обеспечить круглый пучок, необходимый для эксперимента, можно при наличии связи между поперечными степенями свободы. При этом $\varepsilon_x = \varepsilon_y$, а темпы ВПР можно считать одинаковыми и равными полусумме темпов для несвязанного движения. В расчетах ВПР соотношение между продольным и поперечными эмиттантами подбиралось таким образом, чтобы темпы нагрева в поперечном направлении были равны нулю. При увеличении энергии поперечные эмиттансы (рис. 3, а), соответствующие этому условию, возрастают и при определенной энергии достигают величины $1,1\pi$ мм · мрад, максимально допустимой аксептансом. Ниже этой энергии продольный разброс по импульсу (рис. 3, б) соответствует среднеквадратичной длине согласованного сгустка 120 см. Выше этой энергии для удовлетворения условию отсутствия роста поперечного эмиттанта необходимо

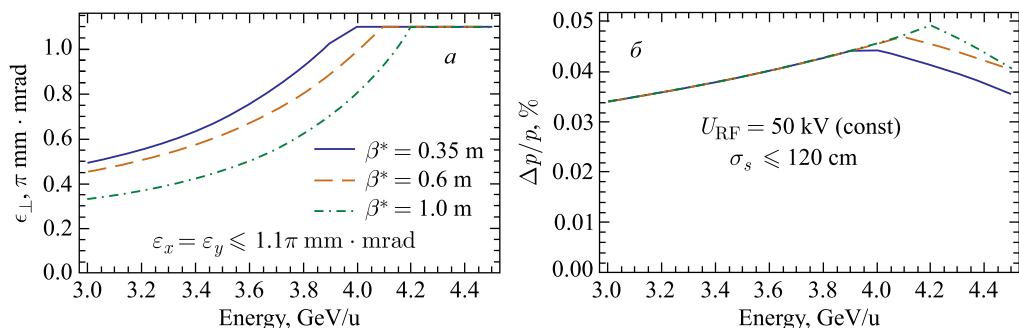


Рис. 3. Поперечный эмиттанс (а) и продольный разброс по импульсу (б) в зависимости от энергии для структур с разными значениями β^* в стартовой версии коллайдера

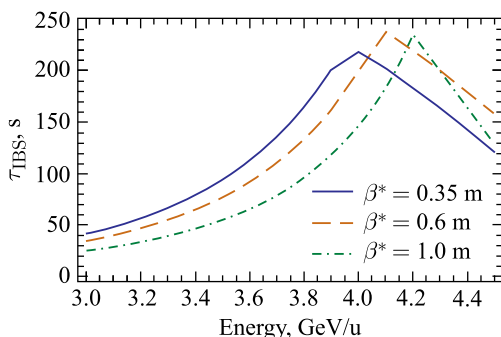


Рис. 4. Зависимость характерных времен нагрева от ВПР от энергии

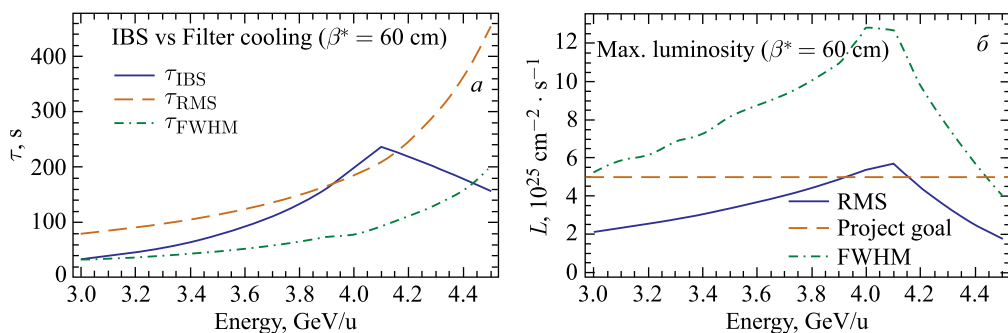


Рис. 5. Зависимости от энергии: а) характерных времен стохастического охлаждения (τ_{RMS} , τ_{FWHM}) и нагрева от ВПР (τ_{IBS}) при светимости $5 \cdot 10^{25} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{c}^{-1}$; б) светимости при интенсивности, соответствующей равенству темпов нагрева и охлаждения

уменьшать продольный разброс по импульсу и, соответственно, длину сгустка. На рис. 4 приведены характерные времена продольного нагрева от ВПР, рассчитанные для интенсивности, соответствующей светимости $5 \cdot 10^{25} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{c}^{-1}$.

Из-за меньшего разброса по импульсу все три метода охлаждения обеспечивают необходимый акцептанс. Для обеспечения более высокого темпа охлаждения в качестве

рабочего метода для стартовой версии был выбран метод фильтра. Кроме того, данный метод был успешно протестирован на нуклотроне [2]. Расчеты показывают, что система может обеспечить необходимый темп охлаждения для ядра распределения для всех рассмотренных значений β^* (на рис. 5 в качестве примера приведены результаты для $\beta^* = 60$ см). Для анализа эволюции хвостов функции распределения требуется численное моделирование с детальным рассмотрением совместного действия ВПР и стохастического охлаждения.

ТЕХНИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ

В качестве пикапов/кикеров выбраны кольцевые структуры с щелевой связью, разработанные в FZ Jülich [8]. На каждом кольце по азимуту располагаются восемь электродов. В качестве базовой структуры выбрана сборка, состоящая из 16 колец (рис. 6, а). Сигналы с каждого азимутального направления складываются суммирующими платами. Преимуществом таких структур является высокий импеданс, а также возможность их использования как для продольного, так и для поперечного охлаждения.

Длина пикапа выбрана минимальной, что обеспечивает его проектные характеристики [8], и составляет две базовые структуры. При оптимальном темпе охлаждения мощность, подводимая к кикеру, не превышает 270 Вт. Одна базовая структура кикера может рассеивать до 100 Вт [8]. Принято, что кикер состоит из четырех таких структур, это обеспечивает необходимый технический запас. Питание кикера будет осуществляться 30-Вт усилителями: по одному усилителю на каждую пару азимутальных направлений одной базовой структуры (схема на рис. 6, б).

Результаты расчетов для оптимального усиления с учетом потерь в оборудовании приведены в табл. 3. Проектный коэффициент усиления выбран с запасом и составляет 140 дБ.

На рис. 7 приведена схема расположения пикапов, кикеров, а также трех каналов ССО. Для используемого в стартовой конфигурации метода фильтра пикап и кикер необходимо расположить в местах коллайдера с отсутствием дисперсии, что соответствует каналу 1. Также взаимное расположение пикапа и кикера в канале 1 обеспечивает равенство нулю частичного слип-фактора при определенной энергии из рабочего диапазона и, как следствие, уменьшение нежелательного перемешивания. В основной версии для охлаждения методом Палмера требуется наличие дисперсии в точке расположения пикапа, и в этом случае для продольного охлаждения будет использован канал 2, а для поперечного охлаждения — каналы 1 и 1'. Длина орбиты коллайдера от пикапа до

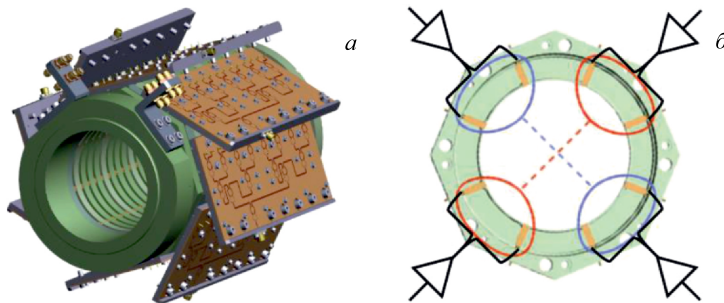


Рис. 6. а) Конструкция пикапа; б) одно кольцо пикапа и схема питания

Таблица 3. Необходимые коэффициенты усиления

Коэффициенты усиления	Конфигурация (метод продольного охлаждения)	
	Стартовая (фильтра)	Основная (Палмера)
Оптимальное усиление, дБ	69	91
Потери мощности в оборудовании, дБ	67	37
Полное усиление, дБ	136	128

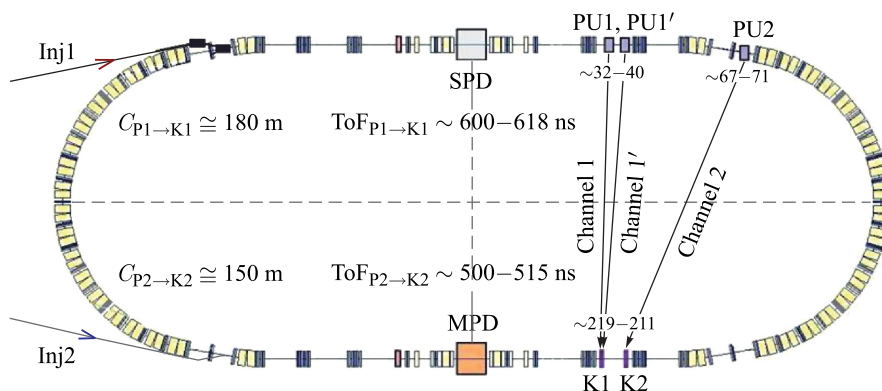


Рис. 7. Схема размещения каналов ССО для одного кольца коллайдера

кикера, соответствующая длине канала 1, составляет примерно 180 м, время пролета пучка в рабочем интервале энергий 600–618 нс. Для канала 2 длина орбиты — около 150 м, время пролета пучка — 500–515 нс. Суммарная электрическая задержка необходимого оборудования не превышает 470 нс, следовательно, по всем каналам имеется необходимый запас по задержке сигнала.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенный проект системы стохастического охлаждения обеспечивает необходимую светимость как для стартового, так и для основного режима работы коллайдера. Проектная светимость в основной версии $10^{27} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ для большего значения β^* достигается при более высокой энергии и большей интенсивности. В качестве рабочего метода продольного охлаждения для стартовой версии выбран метод фильтра, для основной версии — метод Палмера.

Авторы выражают благодарность Н. А. Шурхно, Р. Штассену, В. А. Лебеву за оказанную помощь, ценные обсуждения и рекомендации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сидорин А. О. и др. Состав оборудования и параметры коллайдера NICA на период пусконаладочных работ // Письма в ЭЧАЯ. 2016. Т. 13, № 7. С. 1456–1460.
2. Сидорин А. О., Трубников Г. В., Шурхно Н. А. Экспериментальные и теоретические исследования в ОИЯИ по развитию метода стохастического охлаждения пучков заряженных частиц // УФН. 2016. Т. 186, № 3. С. 275–291.

3. *Kozlov O. et al.* NICA Collider Lattice Optimization // RuPAC'16, Saint Petersburg, Russia, 2016. P. 166–168.
4. *Glukhov S.A., Levichev E.B.* Dynamic Aperture Optimization of the NICA Collider // Ibid. P. 169–171.
5. *Sidorin A. et al.* // Nucl. Instr. Meth. A. 2006. V. 558. P. 325;
BETACOOOL code: <http://betacool.jinr.ru>.
6. Accelerator Physics at the Tevatron Collider / Eds.: V. Lebedev, V. Shiltsev. Particle Acceleration and Detection. New York: Springer-Verlag, 2014 (Detection).
7. *Katayama T., Tokuda N.* Fokker–Planck Approach to Stochastic Momentum Cooling with a Notch Filter // Part. Accel. 1987. V. 21. P. 99–120.
8. *Stassen R. et al.* Recent Developments for the HESR Stochastic Cooling System // COOL'07, Bad Kreuznach, Germany, 2007. P. 191.