

К 60-ЛЕТИЮ ОБЪЕДИНЁННОГО ИНСТИТУТА ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ (ОИЯИ)

## Экспериментальные и теоретические исследования в ОИЯИ по развитию метода стохастического охлаждения пучков заряженных частиц

А.О. Сидорин, Г.В. Трубников, Н.А. Шурхно

В 2010 г. в Лаборатории физики высоких энергий Объединённого института ядерных исследований (ОИЯИ) началось сооружение на основе сверхпроводящего синхротрона тяжёлых ионов "Нуклотрон" нового ускорительного комплекса NICA (Nuclotron based Ion Collider Facility). Основной экспериментальной установкой комплекса является коллайдер с энергией сталкивающихся пучков тяжёлых ионов от 1 до 4,5 ГэВ на нуклон. Для эффективного набора статистики требуется средняя светимость коллайдера на уровне  $10^{27}$  см<sup>-2</sup> с<sup>-1</sup>. Для того чтобы обеспечить требуемые параметры в коллайдерах с такой энергией, необходимо охлаждение пучков как при накоплении, так и в процессе эксперимента. Представлены результаты исследования возможности применения стохастического охлаждения пучков в новом режиме.

**Ключевые слова:** адронный коллайдер, охлаждение пучков, стохастическое охлаждение

PACS numbers: 25.75.-q, 29.20.db

DOI: 10.3367/UFNr.0186.201603d.0275

### Содержание

1. Введение (275).
  2. Особенности коллайдера NICA. Применение охлаждения при накоплении ионов (276).
  3. Стратегия применения стохастического охлаждения для поддержания светимости в коллайдере низкой энергии (277).
  4. Численное моделирование динамики стохастического охлаждения (280).
  5. Методика экспериментальных исследований процесса стохастического охлаждения на Нуклотроне (280).
  6. Система стохастического охлаждения Нуклотрона (282).
  7. Стендовые испытания и настройка элементов систем стохастического охлаждения (285).
  8. Развитие систем Нуклотрона (286).
  9. Экспериментальные исследования процесса стохастического охлаждения (288).
  10. Заключение (290).
- Список литературы (290).

### 1. Введение

Стохастическое охлаждение было предложено Симоном ван дер Меером в 1968 г. для накопления антипротонов и обеспечения высокой светимости протон-антипротонного коллайдера [1]. Стохастическое охлаждение — это процесс уменьшения амплитуд бетатронных колебаний или энергетического разброса пучка частиц (соответственно, охлаждение поперечной и продольной степеней свободы) с помощью системы широкополосной обратной связи. Общая идея метода такова: в некоторой точке кольца ускорителя измеряется поперечная координата или отклонение энергии частиц от номинального значения с помощью так называемых пикап-электродов. Затем сигнал обрабатывается, усиливается и воспроизводится импульсным корректирующим устройством — кикером, расположенным на некотором расстоянии от пикапа по ходу движения пучка. Время задержки распространения сигнала в передающих кабелях и электронных устройствах подбирается таким образом, чтобы оно оказалось равным времени пролёта частицы с номинальной энергией от пикапа до кикера. Стохастическое охлаждение, наряду с электронным, нашло широкое применение для накопления редких частиц (антипротонов, ионов радиоактивных изотопов и др.) и для поддержания светимости в экспериментах на внутренней мишени.

Однако до последнего времени на коллайдерах высокой энергии стохастическое охлаждение не применялось, с одной стороны, из-за того что требуемый уровень светимости мог быть достигнут и без охлаждения пучков, а с

А.О. Сидорин, Г.В. Трубников, Н.А. Шурхно. Объединённый институт ядерных исследований, Лаборатория физики высоких энергий им. В.И. Векслера и А.М. Балдина, ул. Жолио-Кюри 6, 141980 Дубна, Московская обл., Российская Федерация  
E-mail: sidorin@jinr.ru, trubnikov@jinr.ru, shurkhno@physics.msu.ru

Статья поступила 6 июля 2015 г.,  
после доработки 4 августа 2015 г.

другой — ввиду технических трудностей, связанных с высоким фактором группировки пучка. Впервые охлаждение сгруппированного пучка в адронном коллайдере высокой энергии было реализовано на RHIC (Relativistic Heavy Ion Collider) (Брукхейвенская национальная лаборатория, США), где с 2007 г. по 2012 г. последовательно были введены в эксплуатацию системы охлаждения продольной, вертикальной и горизонтальной степеней свободы [2].

В 2008 г. в Объединённом институте ядерных исследований (ОИЯИ) начал обсуждаться проект тяжелоионного коллайдера с предельно низкой энергией сталкивающихся пучков. Как показал анализ динамики ионов, в установке такого типа охлаждение пучков является необходимым как при их накоплении, так и в процессе эксперимента. Причём для эффективной работы в широком диапазоне энергий необходимы как стохастическое, так и электронное охлаждение. В области разработки и создания систем электронного охлаждения большой опыт накоплен в Институте ядерной физики им. Будкера СО РАН, в ОИЯИ аналогичные разработки в течение многих лет осуществлялись в секторе электронного охлаждения. В то же время опыт создания систем стохастического охлаждения в России практически отсутствует. Для восполнения этого пробела в 2009 г. была начата разработка проекта системы стохастического охлаждения для действующего синхротрона Нуклотрон. В данной статье обсуждаются особенности работы системы стохастического охлаждения в коллайдере низкой энергии и приводятся результаты экспериментальных исследований процесса охлаждения, проведённых в ОИЯИ.

## 2. Особенности коллайдера NICA.

### Применение охлаждения при накоплении ионов

В 2010 г. в Лаборатории физики высоких энергий (ЛФВЭ) ОИЯИ на основе действующего сверхпроводящего синхротрона тяжёлых ионов Нуклотрон было начато сооружение нового ускорительного комплекса NICA (Nuclotron based Ion Collider fAcility) [3]. Проект имеет целью вывести ОИЯИ на лидирующие в мире позиции в области релятивистской ядерной физики и физики спина. Исследования по релятивистской ядерной физике планируется проводить в режиме сталкивающихся пучков тяжёлых ионов с кинетической энергией от 1 до 4,5 ГэВ на нуклон. Для эффективного набора статистики требуется средняя светимость эксперимента на уровне  $10^{27} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ , достижение которого в данном диапазоне энергий является беспрецедентной ускорительной задачей. До начала разработки проекта NICA в мире отсутствовал опыт проектирования адронных коллайдеров с такой низкой энергией при столь высоком уровне светимости.

В коллайдере RHIC сталкиваются ионы золота при кинетической энергии 100 ГэВ на нуклон. Пиковая светимость, которая достигает  $10^{28} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ , ограничена сверху эффектами встречи пучков. Время жизни светимости до ввода в эксплуатацию системы охлаждения ограничивалось возрастанием продольного фазового объёма сгустков и составляло примерно 4 ч. Стохастическое охлаждение в режиме столкновения ядер золота привело к некоторому увеличению времени жизни свети-

мости, интегральная светимость при этом возросла примерно в два раза. При меньшей интенсивности сгустков, например при столкновении ядер урана, применение стохастического охлаждения на RHIC приводит к заметному увеличению как времени жизни, так и пикового значения светимости, в результате интегральная светимость возрастает примерно в пять раз [4].

В режиме столкновений тяжёлых ионов на Большом адронном коллайдере (Large Hadron Collider, LHC) (ЦЕРН, Швейцария) максимальная кинетическая энергия ядер свинца составляет примерно 3,7 ТэВ на нуклон. Средняя проектная светимость, составляющая  $10^{27} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ , ограничена не возможностями ускорителя, а предельно достижимым темпом счёта событий в детекторе. Время жизни светимости определяется потерями частиц из-за резонансов бетатронных колебаний высокого порядка, и благодаря оптимальному выбору рабочей точки оно может быть доведено до 10 ч. В текущей конфигурации LHC охлаждение пучков не производится, однако успешное применение стохастического охлаждения на RHIC стимулировало разработку аналогичной системы для охлаждения тяжёлых ионов и на LHC [5].

В обоих действующих коллайдерах тяжёлых ионов сдвиг частот бетатронных колебаний под влиянием собственного поля сгустка пренебрежимо мал, при этом светимость не зависит от периметра ускорителя и она может быть увеличена за счёт увеличения числа сталкивающихся сгустков. Накопление частиц в коллайдерах осуществляется посредством заполнения орбиты в результате последовательной инжекции сгустков (или пучков сгустков), подготовленных в инжекционной цепочке. При этом активные методы формирования фазового объёма инжектированного пучка в самом коллайдере не применяются. Поперечный эмиттанс пучка (из-за кинематического уменьшения при ускорении) при энергии эксперимента на несколько порядков меньше акцептанса коллайдера.

При кинетической энергии пучка в несколько ГэВ на нуклон основным эффектом, ограничивающим достижимую светимость эксперимента на встречных пучках, является сдвиг частот бетатронных колебаний под влиянием собственного поля сгустка. Величина сдвига частоты пропорциональна периметру ускорителя, соответственно, при одном и том же предельном сдвиге частот светимость обратно пропорциональна квадрату периметра. Так, на RHIC при реализации программы по сканированию в диапазоне низких энергий светимость из-за ограничения по сдвигу частоты составляет примерно  $10^{25} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ . Периметр RHIC равен приблизительно 3,8 км, следовательно, только за счёт уменьшения примерно на порядок периметра коллайдера можно ожидать увеличения светимости до уровня  $10^{27} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ .

В ходе разработки концептуального проекта коллайдера NICA было показано, что при параметрах инжектируемых сгустков, аналогичных таковым на RHIC (а инжекционная цепочка NICA по составу и по ожидаемым параметрам близка к инжекционной цепочке RHIC), и периметре установки примерно 250 м можно достичь пиковой светимости на уровне  $10^{27} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$  при сохранении той же схемы накопления сгустков [6]. Однако при этом время жизни светимости ограничено эффектом возрастания продольного фазового объёма из-за внутривидового рассеяния (ВВР) — оно составляет от 10 до 100 с. Соответственно, достижение проек-

ной величины средней светимости невозможно без охлаждения пучков в ходе эксперимента. При этом из-за высокой пиковой линейной плотности частиц в коротких сгустках применение системы стохастического охлаждения с технически реалистичными параметрами представляется проблематичным.

Столь малое время жизни светимости в данном режиме обусловлено двумя факторами. Во-первых, при фиксированной интенсивности сгустка, что предполагается такой схемой накопления, аксептанс коллайдера используется не полностью. Во-вторых, сгусток, подготовленный в инжекционной цепочке, далёк от термодинамического равновесия между поперечными и продольными степенями свободы. Вследствие этого темп нагрева определяется в основном перераспределением энергии между продольными и поперечными колебаниями.

Детальный учёт размеров технологического оборудования, которое необходимо разместить в коллайдере для проведения эксперимента, показал, что минимальный периметр установки должен составлять примерно 500 м. При этом стандартные подходы к накоплению и формированию сгустков в коллайдере в принципе не способны обеспечить требуемый уровень светимости.

Для повышения светимости необходимо оптимизировать параметры сгустка исходя из возможностей структуры коллайдера, а не из возможностей инжекционной цепочки. При этом требуется гибкая схема накопления пучка в коллайдере, позволяющая формировать сгустки с любыми требуемыми параметрами. Наиболее универсальной является схема накопления, с успехом использовавшаяся в накопителе Recycler (Национальная лаборатория им. Э. Ферми, США) для формирования пучка антипротонов, инжектируемого в коллайдер Тэватрон. Она основана на применении так называемой барьерной высокочастотной системы. При этом накапливаемый пучок занимает примерно половину периметра ускорителя и к нему последовательно добавляются новые порции частиц. Процесс проводится одновременно с охлаждением накопленного пучка. На накопителе Recycler применялись одновременно и стохастическое, и электронное охлаждение [7]. После накопления требуемой интенсивности происходит формирование необходимого количества сгустков.

Аналогичная схема была предложена для накопления тяжёлых ионов в HESR (High Energy Storage Ring) (проект FAIR (Facility for Antiproton and Ion Research), Дармштадт, Германия) [8]. Возможность применения такой схемы для коллайдера NICA теоретически исследована в [9], а принципиальная возможность её реализации с использованием стохастического охлаждения экспериментально подтверждена на накопителе ESR (Experimental Storage Ring) Центра по изучению тяжёлых ионов им. Гельмгольца (GSI) (Дармштадт) [10].

### 3. Стратегия применения стохастического охлаждения для поддержания светимости в коллайдере низкой энергии

Применение стохастического охлаждения представляется целесообразным также в коллайдерном эксперименте с тяжёлыми ионами, так как оно не приводит к дополнительным потерям частиц и формированию плотного ядра пучка, образование которого может провоцировать развитие различных неустойчивостей

пучка. При этом режим работы системы охлаждения отличается от всех использовавшихся ранее на действующих установках.

Требуются системы охлаждения пучков с высоким фактором группировки, отличающиеся от систем охлаждения, применяемых в накопителях низких энергий. При реалистичных технических характеристиках системы в коллайдере NICA можно ожидать характерных времён охлаждения около 1000 с. Соответственно, параметры структуры коллайдера и параметры сгустков должны быть выбраны таким образом, чтобы характерные времена возрастания эмиттанса из-за ВПР были не менее указанной величины. Для решения этой задачи было исследовано несколько оптических структур, и был найден вариант, оптимальный с точки зрения темпа ВПР [11]. Соотношение поперечного и продольного фазовых объёмов сгустков выбиралось близким к таковому при термодинамическом равновесии, чтобы избежать быстрых процессов, связанных с релаксацией сгустка.

При одной и той же светимости минимальный темп ВПР соответствует максимальному фазовому объёму сгустка, поэтому необходимо обеспечить максимально возможный аксептанс ускорителя. Посредством выбора апертуры вакуумной камеры и использования системы коррекции поперечный аксептанс коллайдера NICA доведён до 40  $\pi$  мм мрад при аксептансе по относительному импульсному разбросу около 1 %. При этом среднеквадратичный эмиттанс пучка с учётом технического запаса может составлять до 1,1  $\pi$  мм мрад, а среднеквадратичный относительный импульсный разброс — до  $1,5 \times 10^{-3}$ . При максимальном использовании аксептанса характерные времена ВПР на максимальной энергии (4,5 ГэВ на нуклон) составляют свыше 2000 с (см. таблицу) [12].

**Таблица.** Параметры пучка и оценки светимости коллайдера при столкновении ионов золота\*

| Параметр  | Значение           |                   |                   |
|---|--------------------|-------------------|-------------------|
| Периметр кольца, м  | 503,04             |                   |                   |
| Число сгустков  | 22                 |                   |                   |
| Среднеквадратичная длина сгустка, м   | 0,6                |                   |                   |
| Бета-функция в точке встречи, м   | 0,35               |                   |                   |
| Аксептанс кольца  | 40 $\pi$ мм мрад   |                   |                   |
| Продольный аксептанс, $\Delta p/p$  | $\pm 0,01$         |                   |                   |
| Критический гамма-фактор $\gamma_{cr}$  | 7,091              |                   |                   |
| Энергия ионов, ГэВ на нуклон  | 1,0                | 3,0               | 4,5               |
| Число ионов в сгустке   | $2,75 \times 10^8$ | $2,4 \times 10^9$ | $2,2 \times 10^9$ |
| Среднеквадратичный разброс по импульсу, $10^{-3}$   | 0,62               | 1,25              | 1,65              |
| Среднеквадратичный горизонтальный/вертикальный эмиттанс пучка, ненормализованный, $\pi$ мм мрад | 1,1/1,01           | 1,1/0,89          | 1,1/0,76          |
| Светимость, $10^{27}$ см <sup>-2</sup> с <sup>-1</sup>  | 0,011              | 1                 | 1                 |
| Характерные времена ВПР, с  | 186                | 702               | 2540              |

\* Предельно допустимый суммарный сдвиг частоты бетатронных колебаний, вызванный собственным полем сгустка и полем встречного сгустка в точках взаимодействия, принят равным 0,05.

Возможность работы стохастического охлаждения пучка с высоким фактором группировки (близким к требуемому в проекте NICA) была продемонстрирована на RHIC. Однако, в отличие от RHIC, коллайдер NICA будет работать при энергиях, близких к критической. В этих условиях эффективность охлаждения существенно зависит от энергии пучка. Поэтому для проведения сканирования по энергии необходимо удовлетворить дополнительным требованиям как к структуре коллайдера, так и к размещению элементов системы на его периметре.

Суть этих дополнительных требований можно проиллюстрировать на простых аналитических оценках. Система стохастического охлаждения представляет собой широкополосную систему обратной связи. Сигнал от пучка, измеренный специальным устройством — пикапом, обрабатывается, усиливается и с соответствующей задержкой передаётся на кикер — устройство, воздействующее на пучок. При оптимальном коэффициенте усиления системы (и при пренебрежении собственным шумом усилителя) темп стохастического охлаждения для всех трёх степеней свободы можно оценить по широко известной формуле [13]:

$$\frac{1}{\tau} = \frac{W}{N_{\text{eq}}} \frac{(1 - 1/M_{\text{pk}}^2)^2}{M_{\text{kp}}}, \quad (1)$$

где  $W = f_{\text{max}} - f_{\text{min}}$  — ширина полосы пропускания системы обратной связи,  $N_{\text{eq}}$  — эквивалентное число частиц,  $M_{\text{pk}}$  и  $M_{\text{kp}}$  — факторы перемешивания частиц при их движении от пикапа к кикеру и от кикера к пикапу соответственно.

Для сгруппированного пучка эквивалентное число частиц  $N_{\text{eq}}$  вычисляется исходя из формулы для фактора группировки:

$$N_{\text{eq}} = N \frac{C}{\sqrt{2\pi}\sigma_s}, \quad (2)$$

где  $N$  — число частиц в сгустке,  $C$  — периметр кольца,  $\sigma_s$  — среднеквадратичная длина сгустка. Для уменьшения времени охлаждения желательно иметь как можно более широкую полосу пропускания системы  $W$ , однако ширина полосы ограничена не только техническими возможностями мощной электроники, но и параметрами ускорителя и разбросом по импульсу в охлаждаемом пучке. Время пролёта частицы от пикапа до кикера увеличивается (или уменьшается), если её импульс отличается от номинального значения. Если разница между временами пролёта частицы и прохождения сигнала через радиотехническую линию становится больше длительности импульса, приложенного к кикеру, то охлаждение перестаёт работать. Фактор нежелательного перемешивания частиц при их пролёте от пикапа к кикеру

$$M_{\text{pk}} = \frac{1}{2(f_{\text{max}} + f_{\text{min}}) \eta_{\text{pk}} T_{\text{pk}} \Delta p/p} \quad (3)$$

определяет предел верхней частоты  $f_{\text{max}}$  полосы системы, которая может быть оценена как

$$f_{\text{max}} \leq \frac{1}{2\eta_{\text{pk}} T_{\text{pk}} \Delta p/p}. \quad (4)$$

Фактор "полезного" перемешивания частиц при пролёте от кикера к пикапу может быть рассчитан следующим образом:

$$M_{\text{kp}} = \frac{1}{2(f_{\text{max}} - f_{\text{min}}) \eta_{\text{kp}} T_{\text{kp}} \Delta p/p}, \quad (5)$$

и в идеальном случае он должен быть максимальным — близким к единице. Здесь  $\eta_{\text{pk}}$ ,  $\eta_{\text{kp}}$ ,  $T_{\text{pk}}$ ,  $T_{\text{kp}}$  — частичные слип-факторы и времена пролёта от пикапа к кикеру и от кикера к пикапу соответственно. Обычно при оценке характерного темпа охлаждения вместо разброса по импульсу может быть взято его среднеквадратичное значение  $\sigma_p$ :  $\Delta p/p \sim 2\sigma_p$ .

В накопителе, имеющем форму, близкую к окружности, частичные слип-факторы близки между собой и они определяются энергией частиц и критической энергией накопителя:

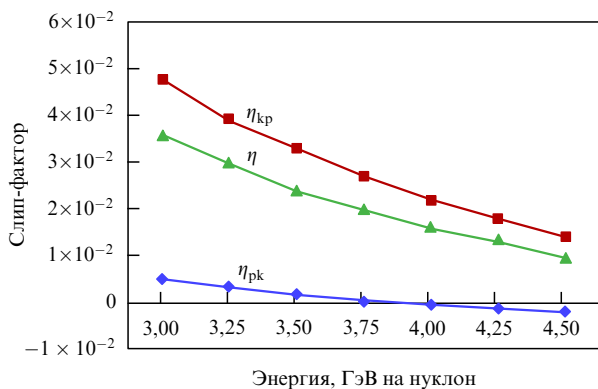
$$\eta_{\text{pk}} = \eta_{\text{kp}} = \frac{1}{\gamma^2} - \frac{1}{\gamma_{\text{tr}}^2}. \quad (6)$$

Так, в коллайдерах высокой энергии, в которых  $\gamma \gg \gamma_{\text{tr}}$ , для обеспечения эффективной работы стохастического охлаждения достаточно выбрать оптимальное значение критической энергии. При этом эффективность охлаждения практически не зависит от энергии частиц. В коллайдере низкой энергии уменьшение энергии приводит к быстрому возрастанию слип-фактора и, как следствие, к снижению допустимой верхней частоты системы и эффективности охлаждения.

В качестве одного из решений этой проблемы в ходе разработки проекта NICA была исследована возможность работы коллайдера с перестройкой критической энергии [11]. Однако такой режим не позволяет обеспечить во всём требуемом диапазоне энергий большую величину акцептанса.

Другое решение основано на учёте конкретной геометрии орбиты коллайдера и специфики динамики продольного движения частиц. В проекте NICA предусмотрено столкновение пучков в двух точках встречи, при этом естественная форма кольца с минимальным периметром является рейстреком: две поворотные секции соединены друг с другом двумя прямолинейными секциями, в которых находятся точки встречи. В диапазоне энергий, превышающих примерно 3 ГэВ на нуклон, характер продольного движения частиц в поворотных и прямолинейных секциях различен. Так, у частицы с импульсом, бóльшим равновесного, время пролёта поворотной секции оказывается меньшим, чем у равновесной частицы, а в прямолинейной секции неравновесная частица "догоняет" равновесную. Выбрав положение пикапа на входе поворотной секции, можно найти такое положение для кикера в последующей прямолинейной секции, что время пролёта от пикапа до кикера при некоторой выбранной энергии не будет зависеть от импульса частицы. Таким образом можно обеспечить эффективность работы стохастического охлаждения в достаточно широком диапазоне энергий.

Для выбранной оптической структуры коллайдера оптимизация расстановки оборудования системы стохастического охлаждения позволяет обеспечить эффективное стохастическое охлаждение пучка в диапазоне энергий от 3 до 4,5 ГэВ на нуклон [12]. Например, расположение пикапа и кикера для охлаждения продольной



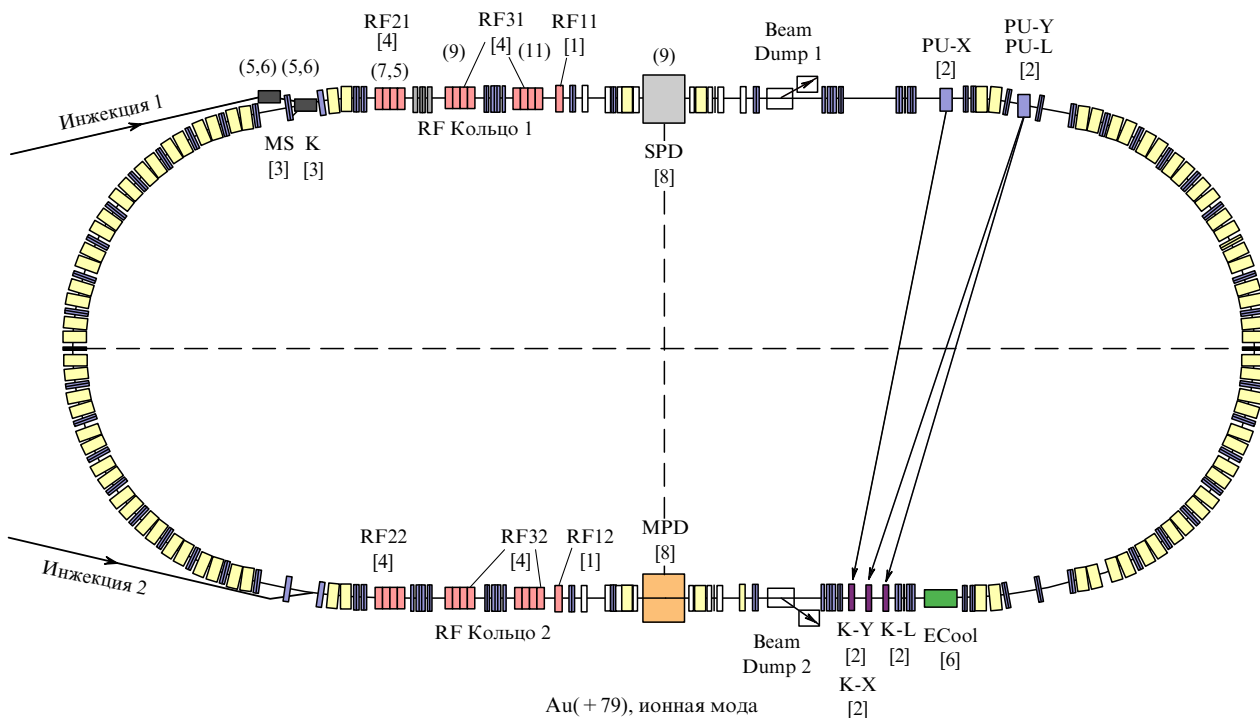
**Рис. 1.** Расчётные зависимости от энергии полного слип-фактора ( $\eta$ ), частичного слип-фактора между пикапом и кикером ( $\eta_{рк}$ ), а также частичного слип-фактора между кикером и пикапом ( $\eta_{кр}$ ).

степени свободы выбрано таким образом, чтобы при максимальной энергии (4,5 ГэВ на нуклон) частичный слип-фактор между пикапом и кикером имел небольшое отрицательное значение,  $\eta_{рк} = -2 \times 10^{-3}$ , а при минимальной энергии (3 ГэВ на нуклон) — небольшое положительное значение,  $\eta_{рк} = 5 \times 10^{-3}$  (рис. 1). В этом случае нам удаётся практически полностью подавить нежелательное перемешивание частиц во всём диапазоне энергий и, напротив, усилить полезное перемешивание частиц при пролёте между кикером и пикапом. Возможность использования подобного режима работы стохастического охлаждения неоднократно обсуждалась и ранее (например, при проектировании накопителей для пучков короткоживущих ионов радиоактивных изото-

пов, для которых требуется предельно высокий темп охлаждения). Однако ни одно из предложений не было доведено до технического проекта в связи с трудностями по обеспечению требуемой величины акцептанса накопителя. Диапазон энергий ионов и геометрия кольца коллайдера NICA оказались наиболее подходящими для реализации этой красивой идеи.

При выбранном взаимном расположении пикапа и кикера условие (4) даёт оценку для приемлемого значения верхней полосы частот системы 20 ГГц (с учётом того, что разброс по импульсу равен динамической продольной апертуре кольца  $\pm 0,01$ ). Это фактически означает, что для рассматриваемой оптической структуры выбор полосы частот системы ограничен только техническими возможностями. В нашем конкретном случае для обеспечения светимости на уровне  $10^{27} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$  число ионов в сгустке должно достигать  $2,3 \times 10^9$ , что соответствует эффективному числу ионов  $8 \times 10^{11}$ . Легко оценить, что, для того чтобы обеспечить характерные времена охлаждения, в два раза меньшие (чтобы иметь технический резерв) характерных времён нагрева за счёт ВПР, может быть выбрана ширина полосы частот системы стохастического охлаждения 2–4 ГГц. Это соответствует хорошо освоенному в мировой практике диапазону, не представляющему серьёзных радиотехнических трудностей.

С учётом геометрических ограничений и дополнительных требований по набегу фазы колебаний, накладываемых на системы поперечного охлаждения, в рамках технического проекта коллайдера NICA было определено оптимальное взаимное размещение элементов систем стохастического охлаждения для всех трёх степеней свободы (рис. 2 [12]).



**Рис. 2.** Схема размещения оборудования на периметре коллайдера NICA. RF — элементы высокочастотной системы. MS и K — магнитный септум и кикер системы инжекции пучка. MPD — многоцелевой детектор, SPD — детектор для исследования физики спина. Beam Dump — система эвакуации пучка. PU-X, PU-Y, PU-L — горизонтальный, вертикальный и продольный пикапы системы стохастического охлаждения, K-X, K-Y, K-L — соответствующие кикеры. ECool — секция электронного охлаждения.

В диапазоне энергий ниже 3 ГэВ на нуклон для обеспечения максимального уровня светимости было решено использовать систему электронного охлаждения.

#### 4. Численное моделирование динамики стохастического охлаждения

Требования к параметрам системы стохастического охлаждения и характеристикам отдельных устройств, входящих в её состав, определялись исходя из результатов численного моделирования динамики пучка в накопителе. Специализированные компьютерные программы общего доступа по расчётам систем стохастического охлаждения отсутствуют, поэтому для разработки технического проекта системы охлаждения коллайдера NICA был создан компьютерный код для моделирования эволюции функции распределения частиц посредством решения уравнения Фоккера – Планка.

Например, анализ процесса охлаждения продольной степени свободы пучка проводится с помощью численного моделирования эволюции во времени функции распределения частиц по энергии  $\Psi(E, t) = dN/dE$ . Основные факторы, определяющие эффективность охлаждения, могут быть описаны как "дрейфовый",  $F(E) = f_0 \Delta E_c$ , и "диффузионный",  $D(E, t) = 1/2 f_0 \langle \Delta E_{ic}^2 \rangle$ , члены уравнения Фоккера – Планка:

$$\frac{\partial \Psi(E, t)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial E} \left( F(E) \Psi(E, t) - D(E, t) \frac{\partial \Psi(E, t)}{\partial E} \right) = 0, \quad (7)$$

где  $\Delta E_c(E)$  — полезная часть энергии сигнала коррекции за оборот,  $\Delta E_{ic}$  — часть энергии, связанная с некогерентными шумовыми эффектами,  $f_0$  — частота обращения частицы.

Дрейфовый член, или сила трения, описывает охлаждение одиночной частицы, а диффузионный — все эффекты, приводящие к "нагреву" пучка. В разработанном коде диффузионный член учитывает дробовый шум пучка и тепловые шумы радиотехнических элементов системы.

Коэффициенты уравнения Фоккера – Планка выводятся через параметры радиотехнических элементов системы последовательным перемножением соответствующих передаточных функций [14, 15]. При моделировании процесса охлаждения предусмотрена возможность использовать как теоретические выражения для передаточных функций, так и результаты измерения передаточных функций, полученные на стенде.

Надёжность разработанного кода была проверена сравнением результатов расчётов с результатами, полученными с помощью аналогичных программ, разработанных в ЦЕРНе, в Юлихском исследовательском центре (нем. Forschungszentrum Jülich GmbH — FZJ) (Германия) и GSI, при использовании одних и тех же моделей радиотехнических элементов системы.

С помощью разработанного кода были определены оптимальный состав и требуемые характеристики элементов системы охлаждения коллайдера NICA. Рабочая полоса частот системы была выбрана от 2 до 4 ГГц. В качестве пикапа и кикера было решено использовать системы кольцевых электродов (slot-couplers), разработанные в FZJ для системы охлаждения накопителя HESR (High-Energy Storage Ring), как имеющие наилучшие характеристики в требуемом диапазоне частот [16]. Мак-

симальная выходная мощность основного усилителя для обеспечения требуемых вре́мен охлаждения не превышает 1 кВт. Полный комплект оборудования включает в себя шесть каналов охлаждения (для трёх степеней свободы в каждом из двух колец коллайдера); полная стоимость создания системы с учётом необходимых экспериментальных стендов и опытно-конструкторских работ по отдельным элементам оценивается в несколько миллионов долларов.

Система стохастического охлаждения принципиально важна для получения проектной светимости коллайдера NICA. Отметим, что в России опыт создания и эксплуатации подобных систем практически отсутствует (после пионерских исследований по охлаждению протонов на накопителе НАП-М (*Накопитель антипротонов-модель*) в Институте ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН [17] работы по стохастическому охлаждению не проводились в течение уже более 30 лет), а особенности режимов использования разрабатываемой системы не позволяют непосредственно применить опыт зарубежных научных центров. Поэтому для отработки основных технических решений, положенных в основу системы охлаждения коллайдера NICA, и тестирования созданного программного кода была предложена методика экспериментальных исследований процесса стохастического охлаждения [15, 18] на действующем синхротроне Нуклотрон (ОИЯИ).

#### 5. Методика экспериментальных исследований процесса стохастического охлаждения на Нуклотроне

Нуклотрон — сверхпроводящий синхротрон с периметром 251,5 м и магнитной жёсткостью до 45 Тл м — эксплуатируется в ЛФВЭ ОИЯИ начиная с 1993 г. Нуклотрон предназначен для ускорения тяжёлых многозарядных ионов с энергией до 6 ГэВ на нуклон (для отношения заряда к массе  $z/A = 1/2$ ), пучков протонов и поляризованных пучков дейтронов. Магнитная структура состоит из восьми суперпериодов, каждый из которых содержит три регулярных периода типа ФОДО и один период без дипольных магнитов (большой прямолинейный промежуток). Регулярный период включает в себя фокусирующую (Ф) и дефокусирующую (Д) квадрупольные линзы, четыре дипольных магнита и два малых свободных промежутка, предназначенных для размещения мультипольных корректоров и устройств диагностики пучка. Большие прямолинейные промежутки используются для размещения устройств ввода и вывода пучка, высокочастотных (ВЧ) ускоряющих станций, устройств диагностики и т.п. К моменту начала разработки системы стохастического охлаждения на периметре кольца имелось несколько свободных промежутков внутри магнитно-криостатной системы и существовала возможность размещения оборудования в единственном большом прямолинейном промежутке (седьмом по ходу пучка начиная от точки инъекции), вакуумная камера в котором имеет комнатную температуру.

В кикере системы стохастического охлаждения выделяется достаточно большая тепловая мощность, в связи с чем его необходимо размещать в "тёплом" промежутке. При этом для размещения пикапа оптимальным является третий промежуток, расположенный диамет-



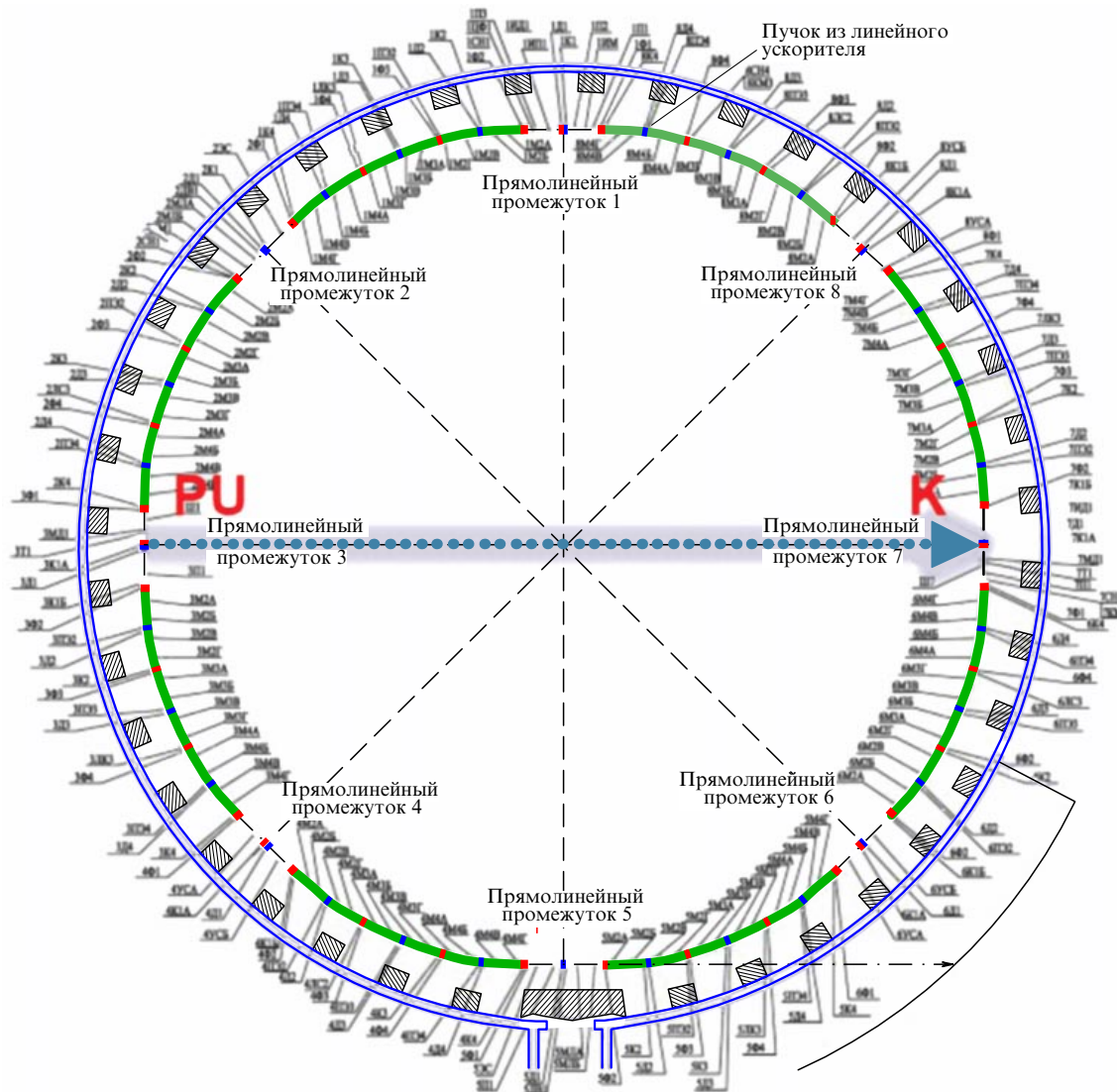


Рис. 3. Схема кольца Нуклотрона (оптическая структура) с предлагаемым расположением элементов системы охлаждения пикап-станции и кикера.

рально противоположно seventhому (рис. 3). Этот промежуток находится при криогенной температуре (от 4 до 15 К), что позволяет уменьшить мощность теплового шума, создаваемого пикапом. Лоренц-фактор, соответствующий критической энергии Нуклотрона при обычно используемой рабочей точке, составляет примерно 9,16. Максимальный относительный разброс по импульсу ускоренного пучка не превышает  $10^{-3}$  (что примерно соответствует вертикальному размаху сепаратрисы при ускорении). При верхней частоте полосы пропускания, равной 4 ГГц, условие (4) выполняется при энергиях выше примерно 2,5 ГэВ на нуклон. Время охлаждения, рассчитанное по формуле (1), имеет пологий минимум в диапазоне энергий 3–4 ГэВ на нуклон.

Таким образом, параметры Нуклотрона и имеющиеся возможности для размещения в нём оборудования позволяют создать систему стохастического охлаждения пучка с характеристиками, близкими к требуемым проектом NICA.

Время, доступное для охлаждения распущенного пучка, определяется возможностями системы электропитания магнитов и линз Нуклотрона. Длительность циркуляции сгруппированного пучка, кроме того, определяется

тепловым режимом ускоряющих ВЧ-станций при квазинепрерывной работе. К моменту начала разработки системы стохастического охлаждения опыт работы Нуклотрона с длительностью плато магнитного поля более 10 с отсутствовал. Поэтому в программе создания системы стохастического охлаждения было предусмотрено проведение мер по обеспечению режима длительной циркуляции пучка, необходимого для настройки элементов системы.

В случае охлаждения продольной степени свободы времяпролётным методом и методом режекторного фильтра не предъявляется никаких дополнительных требований к оптической структуре кольца. Для охлаждения продольной степени свободы методом Палмера необходимо наличие дисперсии в точке расположения пикапа. В Нуклотроне дисперсия присутствует практически во всех точках кольца, достигая максимума в центре длинного прямолинейного промежутка. При разных настройках ускорителя величина дисперсии может составлять от 2 до 4 м, что представляется разумным для тестирования системы.

При охлаждении поперечных степеней свободы необходимо дополнительно обеспечить оптимальный набег фазы бетатронных колебаний на участке кольца от пикапа до кикера. Пикап и кикер в соответствующих суперпериодах расположены по разные стороны от квадрупольной линзы, благодаря чему требуемый набег фазы в поперечной плоскости может быть достигнут при значении соответствующего бетатронного числа несколько ниже 7,5. Возможность ускорения пучка в окрестности такой рабочей точки была продемонстрирована на Нуклотроне экспериментально. Оптимальная настройка в каждой из поперечных плоскостей требует развития системы электропитания Нуклотрона с целью обеспечения независимого изменения тока в цепях фокусирующих и дефокусирующих линз.

Пикап и кикер, выбранные для проекта NICA (рис. 4), обладают необходимой универсальностью для тестирования различных методов охлаждения: это сборка из 16 колец с внутренней апертурой 90 мм. Каждое кольцо структуры имеет восемь короткозамкнутых позолоченных электродов, размещённых равномерно по азимуту (рис. 5) [19].

Сигналы с электродов, расположенных под одним азимутом на разных кольцах, собираются соединительными платами, которые имеют точно настроенные за-

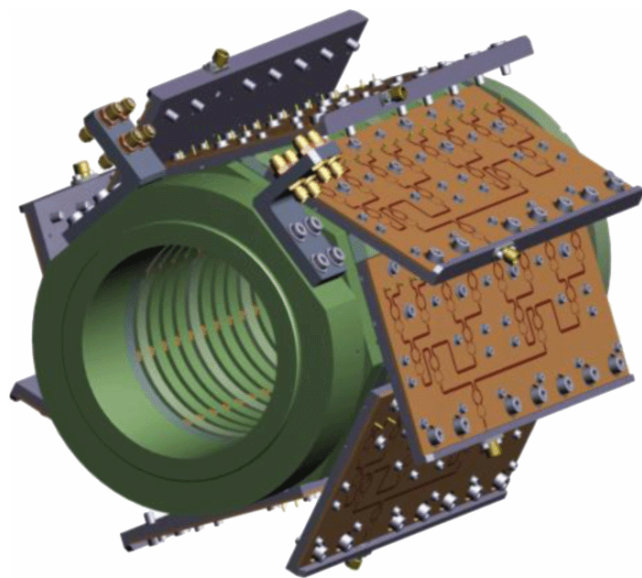


Рис. 4. Конструкция пикапа/кикера.

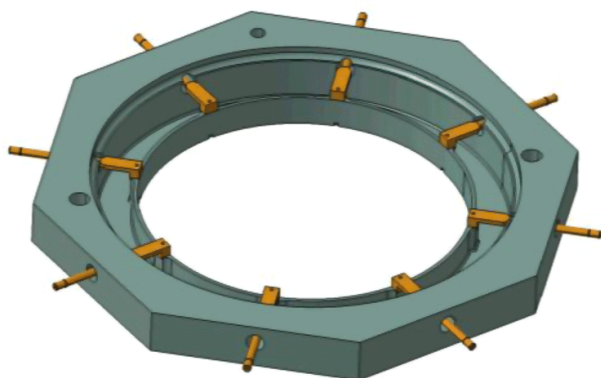


Рис. 5. Одно из 16 колец пикапа.

держки для разных колец, для того чтобы сигнал в плате распространялся синхронно с пучком. Таким образом, структура имеет восемь выходов, сигналы с которых можно вывести из вакуумной камеры (или криостата) и затем комбинировать для получения сигнала от пучка, соответствующего продольной, вертикальной или горизонтальной степени свободы.

Такая особенность конструкции позволяет без замены установленных на кольце элементов осуществить последовательное тестирование всех известных методов охлаждения, начиная с наиболее простых и переходя к более сложным по мере развития соответствующих систем Нуклотрона.

Для исследований на первом этапе работы был выбран метод режекторного фильтра для охлаждения продольной степени свободы [15]. Данный метод достаточно прост с точки зрения технической реализации. При этом не предъявляется жёстких требований к выбору рабочей точки Нуклотрона. Кроме того, метод фильтра в большей степени подходит для охлаждения сгруппированного пучка, так как при его применении из сигнала с пикапа "вырезается" пик, соответствующий когерентному движению частиц.

## 6. Система стохастического охлаждения Нуклотрона

Первоначально структура системы стохастического охлаждения Нуклотрона была разработана для реализации охлаждения продольной степени свободы методом режекторного фильтра (так называемого гребенчатого фильтра (notch filter)) [14, 15, 19]. Этот метод заключается в следующем: в цепь обратной связи (рис. 6), передающую сигнал от пикапа к кикеру, включается радиотехнический фильтр, который "вырезает" из основного сигнала гармоники частоты обращения равновесной частицы и инвертирует фазу сигнала. В результате сигнал коррекции не воздействует на равновесные частицы, но в то же время доускоряет медленные частицы и замедляет быстрые, т.е. уменьшает разброс по продольной компоненте импульса.

Кроме сигнала, наведённого на пикапе равновесной частицей, в нём присутствуют сигналы, наведённые другими частицами пучка. Этот некогерентный эффект, зависящий от мощности дробового шума пучка (шоттки-шума), приводит к диффузионному увеличению разброса по импульсу. Причиной ещё одного источника "нагрева" пучка, связанного с работой системы охлаждения, являются тепловые шумы элементов радиотехнического тракта, приложенные к кикеру.

Полная схема канала охлаждения для Нуклотрона показана на рис. 7. Для охлаждения продольной степени

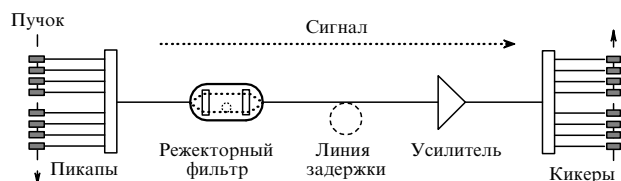


Рис. 6. Схема передачи сигнала от пикапа к кикеру, включающая в себя периодический режекторный фильтр, усилитель и линию задержки.



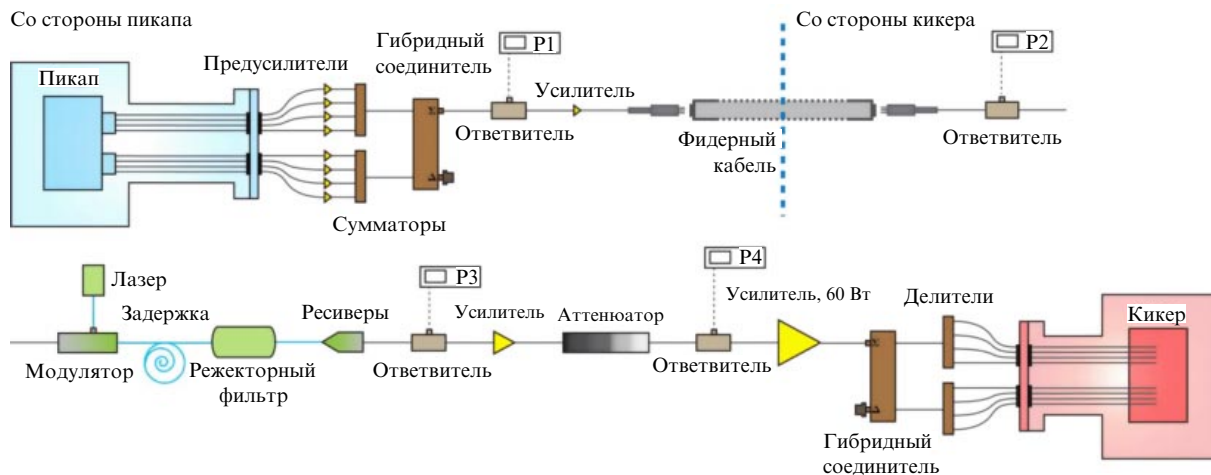


Рис. 7. Схема канала продольного стохастического охлаждения для Нуклотрона. P1–P4 — места подсоединения диагностической аппаратуры: в позициях P1–P3 находятся векторные анализаторы спектра, в позиции P4 — сетевой анализатор.

свободы необходимо, чтобы сигнал с пикапа был пропорциональным полному току. Поэтому восемь сигналов с пластин пикапа после предварительных усилителей объединяются в один с помощью сверхвысокочастотных (СВЧ) сумматоров и гибридного соединителя. Для диагностики радиотехнической линии и наблюдения эффекта охлаждения в схему на разных участках включены ответвители, которые отделяют небольшую часть от основного сигнала для измерений с помощью сетевого анализатора. К первому ответвителю (P1 на рис. 7) стационарно подключается анализатор спектра для наблюдения дробового шума пучка (шоттки-шума), по которому и оценивается эффект охлаждения.

После ответвителя сигнал ещё раз усиливается (предварительный усилитель на 34 дБ) и с помощью фидерного кабеля передаётся по туннелю к диаметрально противоположной точке кольца Нуклотрона, в которой расположен резекторный фильтр с оптической задержкой. После оптической задержки и прохождения резекторного фильтра сигнал, для того чтобы компенсировать потери, ещё раз усиливается. Подстройка усиления всей системы осуществляется следующим далее переменным аттенуатором, после прохождения которого сигнал попадает в основной усилитель с выходной мощностью до 60 Вт. Затем с помощью гибридного соединителя и делителей сигнал коррекции разделяется на восемь частей и, наконец, создаёт напряжение на пластинах

кикера, которое корректирует разброс частиц пучка по импульсу.

Оригинальной особенностью данной схемы является реализация системы задержки на оптическом кабеле. Эта система имеет ряд преимуществ по сравнению с системой задержки на коаксиальном кабеле: устройство получается гораздо более компактным, а настройка становится очень точной и простой. Данная система задержки состоит из набора оптоволоконных кабелей разной длины, для точной подстройки задержки используется прецизионная переменная задержка в диапазоне 0–560 пс.

Схема резекторного фильтра была разработана на основе оптической линии задержки (показанной в правой части рис. 8). Принцип работы этого фильтра следующий: луч лазера модулируется входным ВЧ-сигналом с пикапа и затем разделяется пополам делителем. В длинной ветви фильтра установлена задержка, примерно равная периоду обращения, и дополнительная прецизионная регулируемая задержка (0–330 пс) для более тонкой подстройки. В короткой ветви фильтра установлен регулируемый аттенуатор для выравнивания амплитуды сигналов. Далее оптический сигнал в каждом плече преобразуется обратно в высокочастотный с помощью ресиверов. Полученные сигналы вычитаются гибридным соединителем. При точном равенстве амплитуд вычитаемых сигналов амплитуда сигнала на выходе гибридного соединителя зависит от частоты  $f$  как  $\sin(\pi f T_0)$ , где  $T_0$  —



Рис. 8. Схема оптической задержки и резекторного фильтра.

временная задержка в длинной ветви фильтра. Она обращается в нуль при частотах, кратных  $1/T_0$ , а при переходе амплитуды через нуль фаза сигнала скачком изменяется на  $\pi$ . Качество фильтра определяется характеристиками аттенуатора в короткой ветви фильтра и дисперсией сигнала в длинной. Перед делителем установлена система оптической задержки, которая регулирует полное время прохождения сигнала по цепи обратной связи.

Пикап и кикер для системы стохастического охлаждения Нуклотрона были изготовлены в Юлихском исследовательском центре.

В период 2009–2011 гг. была проведена конструкторская разработка вариантов размещения радиотехнической структуры пикап-станции на Нуклотроне. При

проектировании были учтены криогенные требования к магнитно-криостатной системе, рассчитаны теплопритоки и выбрана оптимальная конфигурация охлаждения вакуумной камеры на участке размещения пикап-станции двухфазным гелием из прямого гелиевого коллектора Нуклотрона. Для пикап-станции были разработаны и изготовлены специальные высоковакуумный кожух и криостат (рис. 9 и 10).

Восемь выходных сигналов с соединительных плат пикапа выводятся из криостата с помощью специального СВЧ-кабеля с малыми потерями через два высоковакуумных фланца с вваренными в проходной керамической изолятор разъёмами типа SMA (SubMiniature version A), по четыре на каждый фланец. Конструкции криостата и вакуумного кожуха позволяют разместить

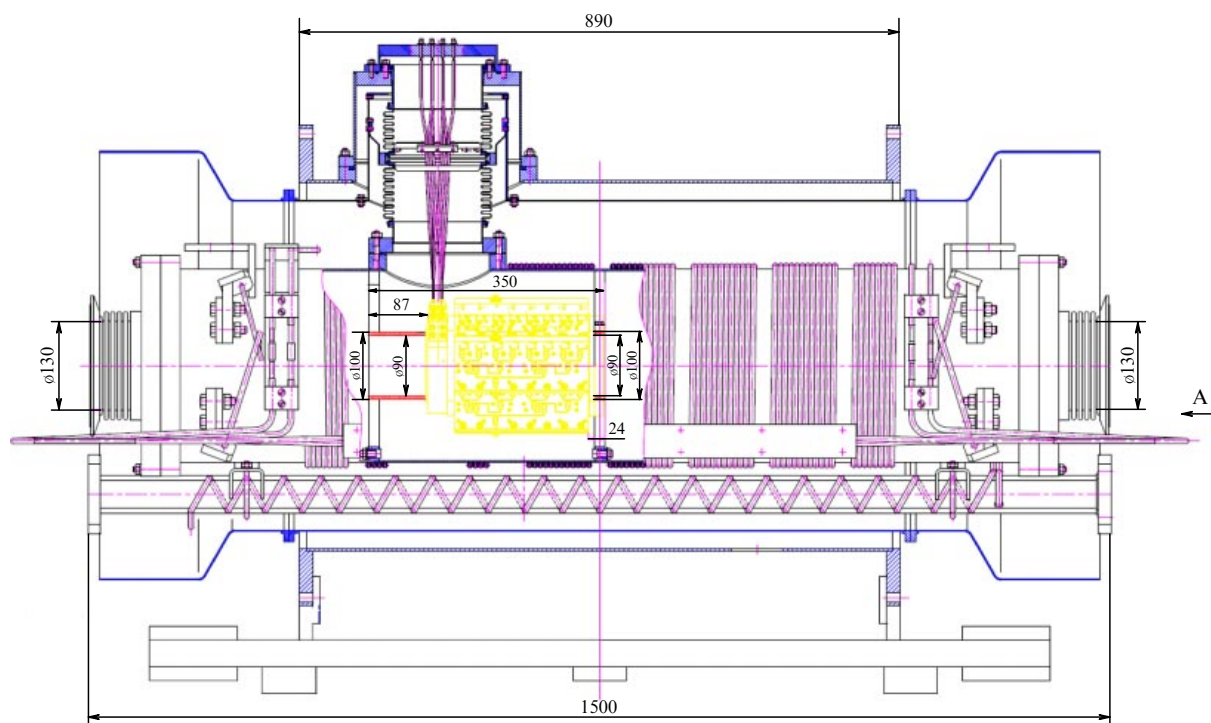


Рис. 9. Конструкция криостата для размещения пикап-станции в магнитно-криостатной системе (МКС) Нуклотрона.

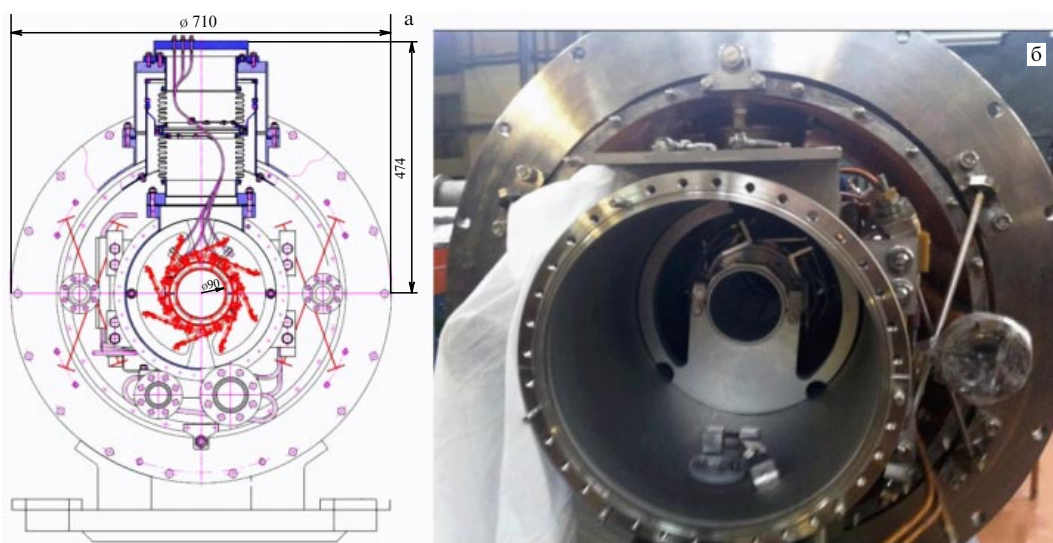


Рис. 10. (а) Схема поперечного сечения криостата с размещённой в нём пикап-станцией. (б) Собранный криостат с пикап-станцией внутри.

внутри вакуумного объёма не только пикап-станцию, но и систему дополнительной диагностики пучка: оборудование с линейным размером до 600 мм и диаметром до 250 мм. В сентябре 2011 г. изготовление и сборка криостата пикапа были завершены (см. рис. 10).

После успешно проведённых на стенде вакуумных и криогенных испытаний всей описываемой сборки, а также измерения высокочастотных характеристик пикап-станции при температурах жидкого гелия (4,5 К) криостат был установлен в кольцо Нуклотрона (рис. 11).

В 2010 г. в ЛФЭВ была разработана конструкция вакуумного бокса для размещения кикера в "тёплой" секции Нуклотрона. Специальная высоковакуумная камера была изготовлена при участии фирмы "Вакуум-Прага". После сборки и вакуумных испытаний вся конструкция была установлена в магнитно-криостатную систему Нуклотрона на место ранее существовавшего коробчатого электростатического пикап-модуля (рис. 12).

Поперёк здания, от места расположения пикапа до кикера, был проложен фидерный кабель с высокой скоростью распространения сигнала, малой групповой задержкой и малым коэффициентом потерь ( $0,07 \text{ дБ м}^{-1}$ ). Блок стабилизированного питания, промышленный ком-

пьютер, элементы электроники, оптический гребенчатый фильтр и мощный широкополосный усилитель были размещены в специальной стойке, расположенной вблизи "тёплой" секции Нуклотрона.

Таким образом, примерно в течение полутора лет все элементы системы охлаждения были спроектированы, изготовлены и к началу 44-го сеанса работы Нуклотрона (ноябрь 2011 г.) установлены на кольце. Ход работ по созданию системы, а также обсуждение её возможностей для тестирования элементов системы охлаждения коллайдера представлены в [20–23]. Во время 44-го сеанса работы Нуклотрона начались тестирование созданных устройств в условиях работы с пучком и изучение методик настройки параметров системы обратной связи.

## 7. Стендовые испытания и настройка элементов систем стохастического охлаждения

Для тестирования и настройки элементов разработанной системы стохастического охлаждения была специально создана СВЧ-лаборатория, в состав оборудования которой входят: анализатор спектра, сетевой анализатор с

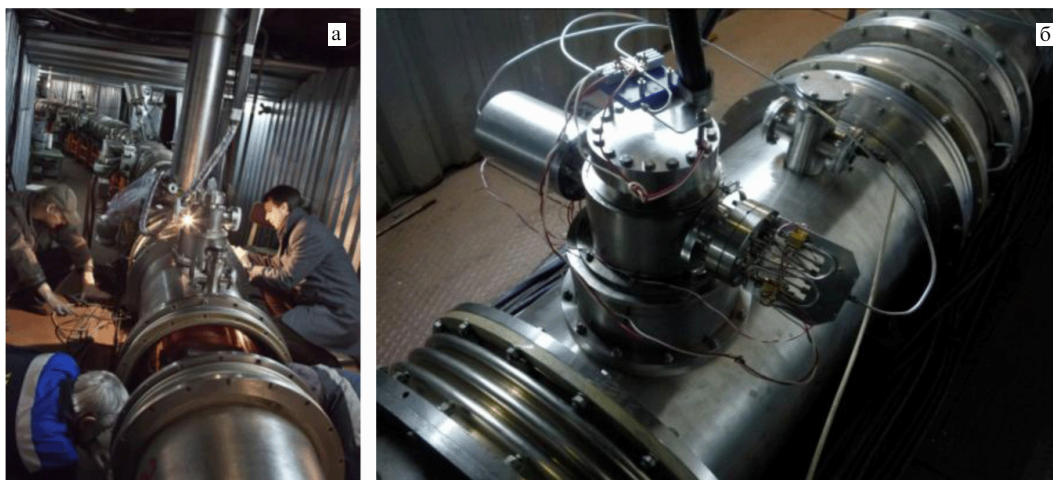


Рис. 11. (а) Установка криостата с пикапом в третьем прямолинейном промежутке Нуклотрона. (б) Собранный и установленный криостат с пикап-станцией на кольце Нуклотрона. На выводном фланце видны специальные сборки из усилителей и гибридных соединителей сигналов.

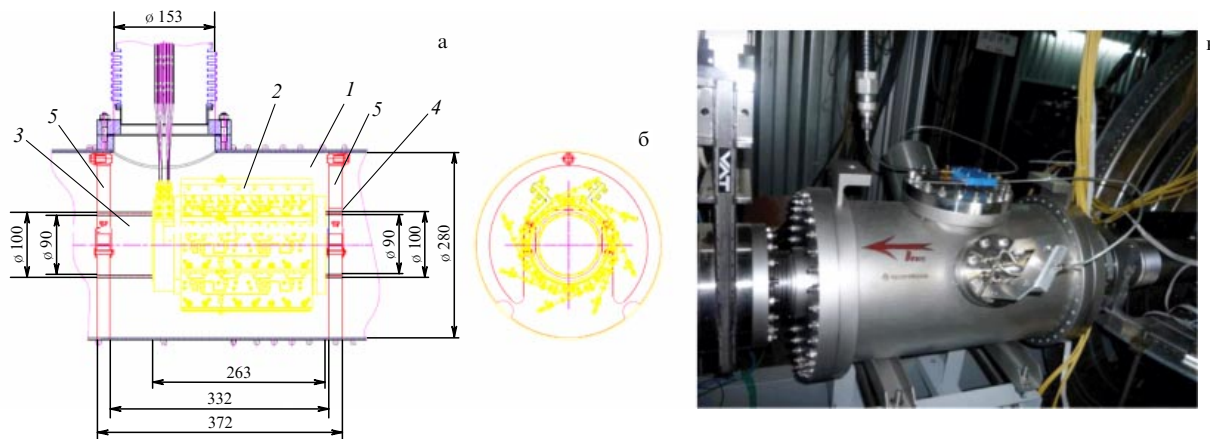


Рис. 12. (а) Вакуумная сборка кикер-станции: 1 — вакуумный кожух, 2 — радиотехническая сборка (кикер) из монтажных плат, 3 — вакуумная камера, 4 — узел крепления и юстировки структуры внутри вакуумного кожуха, 5 — юстировочная обечайка. Размеры даны в миллиметрах. (б) Поперечное сечение конструкции. (в) Установленный на кольцо Нуклотрона кикер (стрелкой на вакуумной камере указано направление движения пучка).



необходимым вспомогательным оборудованием, а также многофункциональная платформа для тестирования и измерений оптоволоконных сетей MAP-200 (MAP — Multiple Application Platform) фирмы JDSU, содержащая лазер на основе распределённого брэгговского отражателя, позволяющий точно ( $\pm 0,016$  нм) настраивать частоту излучаемого света (используется длина волны 1550 нм) и регулировать выходную мощность излучения от 7 до 13 дБм.

К числу важнейших работ, выполненных СВЧ-лабораторией, относятся оптимизация конструкции режекторного фильтра и отработка методики его автоматической подстройки. Для эффективного охлаждения амплитудно-частотная зависимость должна иметь одинаковые минимумы и малую дисперсию во всей полосе частот. Благодаря тщательному подбору элементов фильтра была достигнута средняя величина затухания в минимумах более 40 дБ. Для коаксиальных фильтров эта величина составляет порядка 25 дБ, для коаксиально-оптических — около 35 дБ. Максимальное отклонение положения минимумов амплитудно-частотной зависимости от гармоник частоты обращения пучка (дисперсия) обеспечено на уровне менее 10 Гц (рис. 13) [24]. Для наиболее точных коаксиально-оптических фильтров дисперсия составляет примерно 25 Гц.

При настройке фильтра необходимо добиться того, чтобы положения минимумов его амплитудно-частотной характеристики во всей рабочей полосе частот совпадали с гармониками некоторой заданной частоты. В полосе обычно находится несколько тысяч гармоник, и требуется провести большое количество измерений для настройки фильтра с максимальной точностью. Процесс ручной настройки является очень трудоёмким, и его невозможно осуществить удалённо, что приводит к непроизводительным затратам времени в ходе сеанса ускорителя. Для решения этой проблемы было разработано программное обеспечение, позволяющее провести настройку в полностью автономном режиме в течение 5–10 мин, в зависимости от точности начальной настройки. Процедура настройки состоит из двух этапов:

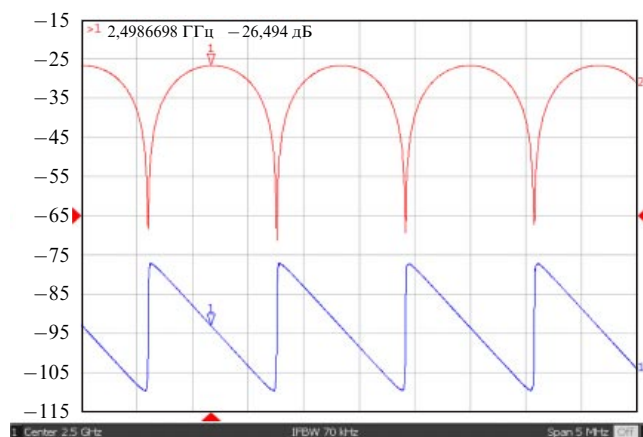


Рис. 13. Дисплей сетевого анализатора с результатами измерений амплитудно-частотной (верхняя кривая) и фазо-частотной (нижняя кривая) характеристик фильтра. По горизонтальной оси отложена частота, центр шкалы соответствует частоте 2,5 ГГц, полный размах шкалы 2,5 МГц. По вертикальной оси — затухание в децибелах. При переходе амплитудно-частотной характеристики через минимум фаза скачком изменяется на  $180^\circ$ .

настройки частоты фильтра и настройки затухания прямой ветви, реализованных на основе алгоритма последовательных итераций.

Другой процедурой, требующей больших затрат времени при настройке системы стохастического охлаждения, является настройка системной задержки в линии обратной связи. Для ускорения настройки системы стохастического охлаждения было разработано оригинальное программное обеспечение, позволяющее выполнять её дистанционно в полуавтоматическом режиме. Всё разработанное программное обеспечение было отлажено в СВЧ-лаборатории. В результате время настройки системы стохастического охлаждения было уменьшено до 1–2 ч (в зависимости от периода следования циклов ускорения), тогда как в других ускорительных центрах для настройки аналогичной системы требуется 1–2 смены.

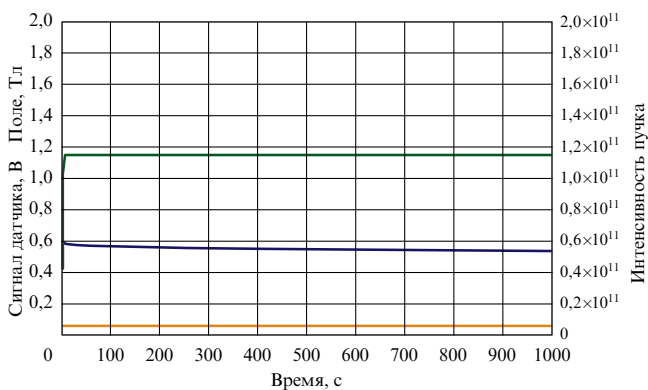
Достигнутые точности настройки, а также измеренные в СВЧ-лаборатории характеристики элементов схемы были использованы при численном моделировании процесса охлаждения и сравнении результатов расчёта с экспериментальными данными.

## 8. Развитие систем Нуклотрона

Для обеспечения выполнения программы экспериментальных исследований стохастического охлаждения на Нуклотроне была проведена частичная модернизация ряда его систем. При этом одна часть работ выполнялась в плановом порядке, в рамках подготовки ускорителя к работе в составе инжекционной цепочки коллайдера NICA, а другая часть была непосредственно ориентирована на обеспечение режимов работы Нуклотрона, требующихся для экспериментов по стохастическому охлаждению.

В первую очередь необходимо было обеспечить возможность длительной циркуляции распущенного и сгруппированного пучков на "столе" магнитного поля. Это потребовало доработки подсистемы управления полем циклозадающей аппаратуры, улучшения режима охлаждения ускоряющих ВЧ-станций, доработки системы связи частоты ускоряющего ВЧ-напряжения с полем дипольных магнитов.

До начала работ по стохастическому охлаждению основной источник питания магнитной системы управлялся сигналом В-серии, вырабатываемым В-таймером циклозадающей аппаратуры на основе измерения производной поля по времени в измерительном магните. При небольшой длительности цикла такая схема обеспечивала требуемую точность обработки заданных полей. В режиме длинных "столов" из-за дрейфов В-таймера и шумов в измерительных цепях происходил неконтролируемый дрейф магнитного поля. Для обеспечения постоянного значения поля в магнитах был реализован режим работы источника, соответствующий стабилизации тока. Для этого был установлен датчик тока в силовой цепи на основе масляного шунта. Разработаны схемы вторичной коммутации защит шунта и достигнуто их согласование с действующими схемами управления источником питания, создан электронный узел прецизионного гальванически развязанного операционного усилителя для схем регулирования. Первоначально новая схема работы магнитной системы Нуклотрона была проверена без ускорения пучка при относи-



**Рис. 14.** Результаты, выводимые в окно клиентского приложения системы управления трансформатором тока при циркуляции пучка дейтронов на "столе" поля длительностью 1000 с. Верхняя кривая — сигнал датчика магнитного поля (левая шкала, в теслах), две нижние кривые — сигналы от ускоренного пучка дейтронов с трансформатора тока — прямой (левая шкала, в вольтах) и пересчитанный в число циркулирующих ионов (правая шкала).

тельно небольшой величине поля, 8 кГс, и длительности "стола" до 500 с [25].

В ходе 45-го сеанса работы Нуклотрона (март 2012 г.) исследовались режимы циркуляции ускоренного пучка при последовательном удлинении "стола" начиная с длительности в 30 с. Проводилось сравнение времени жизни пучка на "столе" при работе основного источника питания в режиме стабилизации тока и режиме стабилизации поля. Вследствие дрейфа В-таймера в режиме стабилизации поля за времена примерно 30 с происходит уход орбиты на полную апертуру камеры, что приводит к гибели пучка. В режиме стабилизации тока получено на "столе" 1,2 Тл (что соответствует энергии примерно 3 ГэВ на нуклон) время жизни пучка, существенно большее, чем 1000 с (рис. 14) [25]. Для измерения в течение длительного времени тока пучка было доработано программное обеспечение трансформатора тока.

Представленные выше результаты, помимо того что они важны для исследований стохастического охлаждения, дали необходимый материал для выполненной впоследствии программной коррекции дрейфов В-таймера. В режиме стабилизации тока относительную нестабильность поля на "столе" удалось уменьшить до величины примерно  $6 \times 10^{-5}$ , что важно, в частности, для повышения качества медленного вывода пучка.

При обеспечении режима длительной циркуляции сгруппированного пучка пришлось также решать проблему дрейфов В-таймера. В режиме ускорения частота ускоряющего ВЧ-напряжения управляется величиной производной магнитного поля, что обеспечивает практически полное отсутствие потерь частиц. При циркуляции на "столе" аппаратный дрейф частоты приводит к смещению орбиты пучка на апертуру примерно за 15 с. Для решения этой проблемы система управления задающим генератором была модифицирована, по сигналу начала "стола" цепь управления частотой разрывается, и значение частоты остаётся фиксированным до поступления сигнала на восстановление привязки к полю. Впоследствии эта процедура, разработанная для экспериментов по стохастическому охлаждению, была использована при реализации режима работы Нуклотрона с двумя пользователями. При этом необходимо обеспечить цир-

куляцию распущенного пучка на первом "столе" поля, где проводится эксперимент на внутренней мишени, затем сгруппировать и захватить оставшуюся часть пучка в режим ускорения и на втором "столе" реализовать медленный вывод для эксперимента на фиксированной мишени. Режим "замораживания" частоты задающего генератора на первом "столе" обеспечил максимальную эффективность повторного захвата в режим ускорения.

Возможность проведения работ с длинными "столами" при большом токе питания магнитной системы осуществлялась посредством оптимизации режимов работы криогенного комплекса. Безопасность проведения таких исследований обеспечивалась новой системой датчиков перехода в нормально проводящую фазу, ввод в эксплуатацию которой был начат в ноябре 2011 года [25].

Для анализа спектров дробового шума пучка должна быть известна критическая энергия ускорителя, а для анализа процесса охлаждения — дисперсионная функция в точках расположения пикапа и кикера канала стохастического охлаждения. Впервые на Нуклотроне такие измерения были проведены в декабре 2011 г. с помощью введённых в строй в ходе модернизации ускорительного комплекса цифрового задающего генератора ВЧ-ускоряющей системы и цифровой системы измерения положения орбиты. Методика измерений заключается в определении положения орбиты сгруппированного пучка, циркулирующего на "столе" магнитного поля, как функции частоты обращения частиц, задаваемой ВЧ-ускоряющей системой. Измерения, проведённые при энергиях 2 и 3,5 ГэВ на нуклон и относительном изменении частоты ВЧ-ускоряющей системы порядка  $10^4$ , дали значение лоренц-фактора  $\gamma_{cr} = 6,71$ , соответствующее критической энергии, что отвечает значению коэффициента уплотнения орбит  $\alpha = 0,022$ . Измеренное значение дисперсии в начале суперпериода составило  $D \approx 1,1$  м. Эти результаты находятся в разумном согласии с расчётными параметрами Нуклотрона. Измерения проводились для рабочей точки Нуклотрона  $Q_x/Q_z = 7,3/7,35$ , что несколько выше проектного значения [18, 25].

Ещё до установки элементов канала стохастического охлаждения в сеансе Нуклотрона в марте 2011 г. были также проведены первые экспериментальные наблюдения дробового шума пучка. При этом сигнал снимался с одного из штатных датчиков положения пучка [18].

В настоящее время проводятся подготовительные работы к экспериментальному исследованию стохастического охлаждения поперечных степеней свободы пучка. Создан и испытан в ходе работы с пучком источник тока разбаланса фокусирующих и дефокусирующих линз, необходимый для обеспечения требуемого набега фазы колебаний от пикапа до кикера. Поперечное охлаждение требует точного позиционирования пучка в пикапе и кикере. Для решения этой задачи в течение ряда сеансов был освоен метод коррекции равновесной орбиты, основанный на разложении матрицы отклика на сингулярные числа. Проведено испытание работы корректирующих магнитов в режиме возрастания поля (для ускорения пучка в Нуклотроне достаточно коррекции орбиты только на энергии инъекции).

Таким образом, подготовка экспериментов по стохастическому охлаждению стала стимулом для развития целого ряда систем ускорителя, а проведение экспери-



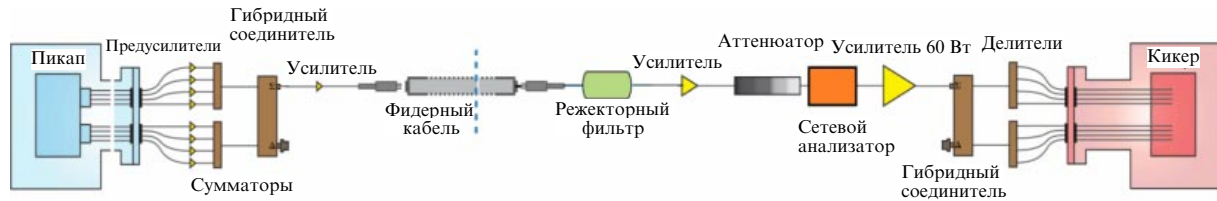


Рис. 15. Схема настройки временной задержки сигнала в линии обратной связи.

ментов явилось также комплексной проверкой функционального состояния Нуклотрона. Методики настройки ускорителя и режимы работы, использованные в ходе этих исследований, нашли применение и при выполнении программы физических исследований на пучках Нуклотрона.

## 9. Экспериментальные исследования процесса стохастического охлаждения

Экспериментальные исследования с помощью созданной системы стохастического охлаждения начались в декабре 2011 г. В первую очередь были проведены измерения дробового шума пучка во всей полосе пропускания системы (при этом анализатор спектра последовательно подключался в разных точках СВЧ-тракта), были также измерены величины импульсного разброса для пучка дейтронов (d) и ионов углерода ( $C^{6+}$ ) в широком диапазоне энергий. Характерная интенсивность пучка ионов углерода в ходе измерений составляла порядка  $(1-2) \times 10^9$  частиц на импульс, а интенсивность пучка дейтронов — от  $5 \times 10^9$  до  $2 \times 10^{10}$  частиц на импульс. Характерная ширина пиков соответствует относительному разбросу по импульсу  $\Delta p/p \sim 8,1 \times 10^{-4}$  для дейтронов и  $\Delta p/p \sim 9,5 \times 10^{-4}$  для ионов углерода.

Основное внимание в дальнейших экспериментах было направлено на освоение методик настройки канала охлаждения методом режекторного фильтра. Сама процедура настройки включает в себя две относительно независимые операции: настройку режекторного фильтра на частоту обращения пучка и прецизионную настройку задержки в линии обратной связи.

Прецизионная настройка временной задержки сигнала в линии обратной связи осуществляется методом измерений передаточной функции пучка, проводимых по схеме, показанной на рис. 15 [25]. При этом линия обратной связи размыкается перед входом основного усилителя и в эту точку помещается сетевой анализатор. Выходной сигнал генератора качающейся частоты сетевого анализатора подается на вход мощного усилителя и затем прикладывается к кикеру, воздействующему на пучок. Сигнал от пучка, измеренный пикапом, по линии обратной связи передается на вход сетевого анализатора, который измеряет отношение амплитуд выходного и входного сигналов и сдвиг между ними по фазе.

Предварительно с помощью сетевого анализатора были прецизионно измерены величины задержек всех элементов радиотехнической цепи, а также рассчитаны времена прохождения частицы от пикапа к кикеру при энергии эксперимента, исходя из того что точное расстояние от центра пикапа до центра кикера "по кольцу" составляет 127120 мм. На основании этих результатов выбирается длина оптоволоконного кабеля в линии

задержки, и дальнейшая настройка заключается в корректровке времени прохождения сигнала с помощью регулируемой прецизионной задержки перед входом режекторного фильтра.

Принцип метода настройки заключается в следующем. Сигнал от кикера к пикапу передается со скоростью пучка, при этом если время распространения сигнала в линии обратной связи равно времени пролета пучка от пикапа к кикеру, то разность фаз сигналов на выходе и входе сетевого анализатора на всех гармониках частоты обращения будет одной и той же с точностью до  $2\pi n$ , где  $n$  — целое число. Измерения производятся на распущенном пучке, поэтому сетевой анализатор запускается на "столе" магнитного поля с некоторой задержкой после выключения ускоряющего ВЧ-напряжения. Модуляция продольной плотности частиц, регистрируемая пикапом, производится кикером только на частотах, присутствующих в спектре частот обращения частиц. Поэтому отношение амплитуд выходного и входного сигналов вблизи гармоники частоты обращения повторяет по форме спектр дробового шума пучка (рис. 16).

Амплитуда сигнала генератора качающейся частоты сетевого анализатора подбирается так, чтобы устойчиво регистрировать сдвиг фаз между выходным и входным сигналами. Сдвиг фазы, соответствующий максимуму амплитуды входного сигнала, измеряется последовательно на всех гармониках частоты обращения в полосе пропускания системы. Затем регулируемая прецизионная

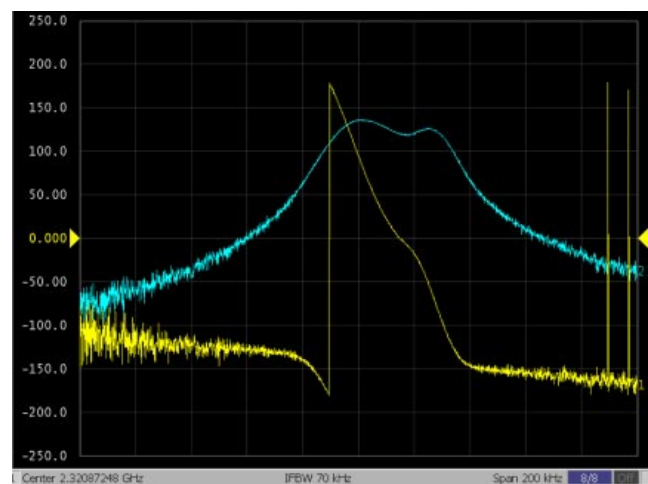
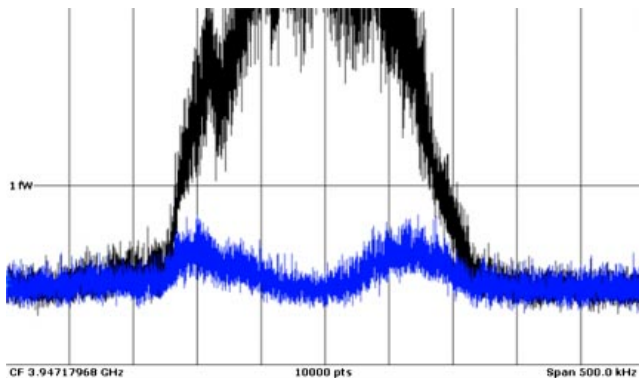


Рис. 16. Дисплей сетевого анализатора при измерениях с разомкнутой цепью на 2004-й гармонике частоты обращения. Верхняя (нижняя) кривая — амплитудный (фазовый) отклик. По горизонтальной оси отложена частота, центр шкалы соответствует 2,3207248 Гц, полный размах шкалы 200 кГц. По вертикальной оси — сдвиг по фазе в градусах.

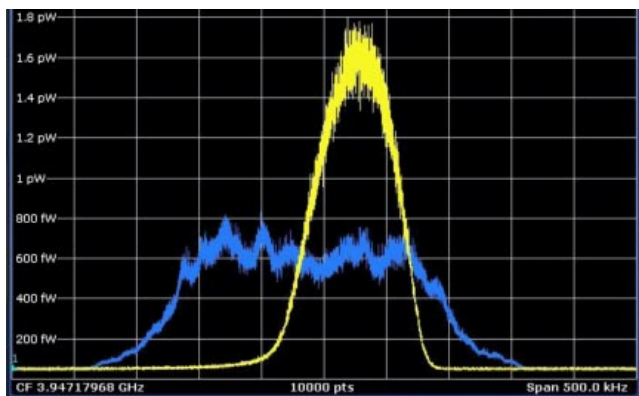


**Рис. 17.** (В цвете онлайн.) Дисплей анализатора спектра при измерениях дробового шума пучка (полоса Шоттки) на 3048-й гармонике частоты обращения: сигнал с выключенным (чёрный) и включённым (синий) фильтром. Центр шкалы соответствует частоте 3,9471968 ГГц, полный размах шкалы 500 кГц. По вертикальной оси — мощность шума в единицах [фВт].

задержка задаётся таким образом, чтобы сдвиг фаз имел одно и то же значение для максимально возможного количества гармоник. Предельно достижимая точность настройки определяется фазо-частотными характеристиками элементов линии обратной связи.

В ходе 46-го сеанса (декабрь 2012 г.) Нуклотрона впервые на пучке была проведена прецизионная настройка созданного гребенчатого фильтра [26]. Пример влияния фильтра на характеристики шумового сигнала пучка приведён на рис. 17. В этом же сеансе была реализована полная процедура настройки системы, потребовавшая работы в течение почти двух ускорительных смен, и зарегистрирован отклик пучка на воздействие цепи обратной связи.

При подготовке к 47-му сеансу работы Нуклотрона (февраль–март 2013 г.) для ускорения процедуры настройки было разработано программное обеспечение, автоматизирующее настройку фильтра и позволяющее



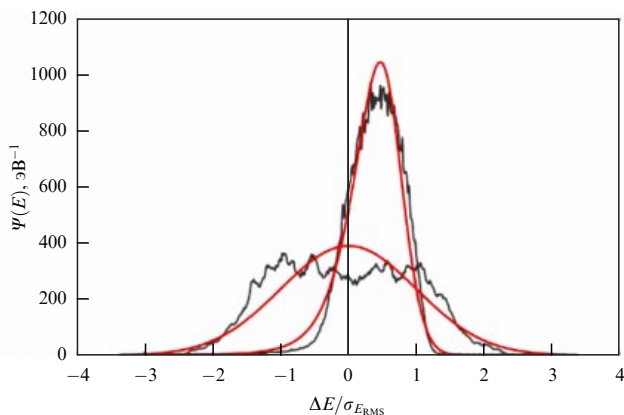
**Рис. 18.** (В цвете онлайн.) Окно клиентского приложения программы для дистанционного анализа спектра в ходе охлаждения пучка дейтронов с энергией 3 ГэВ на нуклон. Число частиц в пучке  $\sim 10^9$ . Приведён спектр продольного дробового шума пучка на 3048-й гармонике частоты обращения: нижняя кривая (голубая) — сразу после инъекции, жёлтая кривая — после 8 мин охлаждения. По горизонтальной оси отложена частота, центр шкалы соответствует значению 3,947196 ГГц, полный размах шкалы 500 кГц. По вертикальной оси — мощность шума в единицах [пВт].

проводить её удалённо. В ходе 47-го сеанса в течение одной смены система была настроена, оптимизированы параметры обратной связи и зарегистрирован эффект уменьшения импульсного разброса частиц в распущенном пучке (рис. 18). Среднеквадратичный разброс по импульсу был уменьшен примерно в 2,2 раза в течение 480 с. Для большей наглядности наблюдаемого эффекта начальный относительный разброс был искусственно увеличен до  $0,55 \times 10^{-3}$  за счёт скачкообразного выключения ускоряющего напряжения при выходе на "стол" поля. Конечный разброс составил  $0,25 \times 10^{-3}$  [26–29].

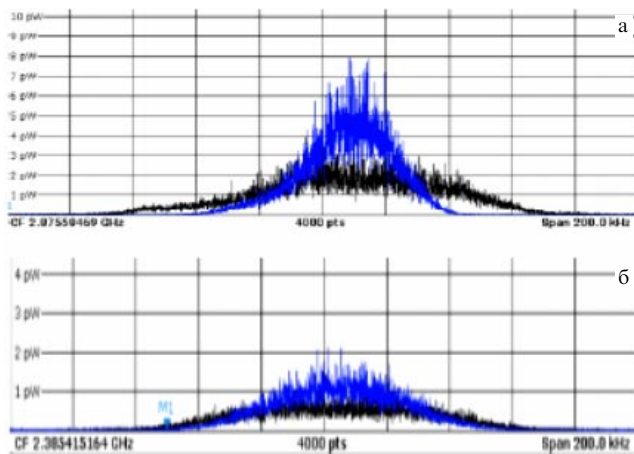
Для интерпретации полученного результата было проведено моделирование эволюции функции распределения частиц по энергии  $\Psi(E)$  посредством численного решения уравнения Фоккера–Планка. Скорость стохастического охлаждения слабо зависит от вида распределения частиц по энергиям, поэтому для упрощения расчётов экспериментальное распределение было аппроксимировано нормальным распределением. Основной усилитель системы работал в режиме, близком к насыщению, и полное усиление в цепи обратной связи может быть оценено величиной примерно в 110 дБ. Погрешности настройки цепи обратной связи, дающие наилучшее согласие результатов моделирования с экспериментальными данными (рис. 19) [30], имеют вполне разумные значения.

По завершении сеанса были проведены ревизия всех элементов системы охлаждения и оптимизация схемы с целью сокращения характерного времени охлаждения, необходимого для проведения эксперимента по охлаждению сгруппированного пучка (так как максимальная длительность импульса ВЧ-напряжения на "столе" поля в настоящее время не превышает 25 с).

В ходе 48-го сеанса (декабрь 2013 г.) эффект стохастического охлаждения был успешно продемонстрирован и для распущенного, и для сгруппированного пучков ядер углерода (рис. 20) [31, 32]. Напряжение на ускоряющей ВЧ-станции на "столе" поля составляло 2 кВ. Фактор группировки (отношение пикового тока сгустка к среднему току пучка), оценённый по измеренной величине импульсного разброса, равнялся примерно 5. В эксперименте энергия ионов составляла 2,5 ГэВ на нуклон, а их



**Рис. 19.** Результат моделирования процесса охлаждения при усилении в цепи обратной связи 110 дБ, погрешности задержки сигнала 20 пс и погрешности задержки в фильтре 10 пс. Экспериментальные (изломанные кривые) и теоретические (плавные кривые) начальное и конечное распределения,  $\sigma_{E_{RMS}}$  — среднеквадратичный разброс частиц пучка по энергии.



**Рис. 20.** (В цвете онлайн.) Экспериментальные результаты по охлаждению распущенного (а) и сгруппированного (б) пучков ионов  $^{12}\text{C}^{6+}$ . Спектр дробового шума пучка: чёрная кривая — начальное распределение, голубая — после охлаждения. По горизонтальным осям отложена частота, цена деления 20 кГц. На рисунке а центр шкалы соответствует значению 2,07550469 ГГц, а на рис. б — 2,385415264 ГГц. По вертикальным осям — мощность шума в [пВт].

число равнялось примерно  $2 \times 10^9$ . Импульсный разброс распущенного пучка в процессе охлаждения уменьшился от  $0,15 \times 10^{-3}$  до  $0,07 \times 10^{-3}$ , что соответствует характерному времени охлаждения примерно 27 с. Для сгруппированного пучка импульсный разброс уменьшился от  $0,2 \times 10^{-3}$  до  $0,13 \times 10^{-3}$ , при этом характерное время охлаждения составило примерно 64 с.

Данные результаты находятся в хорошем согласии с предсказаниями, полученными на основе численного моделирования.

В марте 2014 г. в рамках подготовки к экспериментам по стохастическому охлаждению поперечных степеней свободы была проведена серия измерений передаточной функции пучка в горизонтальной плоскости. На ближайшие сеансы Нуклотрона намечены эксперименты по исследованию времяпролётного метода охлаждения продольной степени свободы.

Текущее состояние работ, их место в развитии проекта NICA и планы на ближайшую перспективу обсуждаются в обзорах [33, 34].

## 10. Заключение

На основе численного моделирования динамики частиц и экспериментальных результатов, полученных на Нуклотроне, обоснована стратегия достижения проектной светимости коллайдера NICA в диапазоне кинетических энергий сталкивающихся пучков тяжёлых ионов от 3 до 4,5 ГэВ на нуклон, определены основные технические параметры необходимой для этого системы охлаждения, подтверждена надёжность кода, используемого для расчётов в эксперименте.

Предложена методика экспериментальных исследований процесса стохастического охлаждения на синхротроне Нуклотрон (ОИЯИ) и создана оригинальная система стохастического охлаждения, предназначенная для реализации этой методики. Проведены пионерские в России эксперименты по охлаждению распущенных и сгруппированных пучков лёгких ионов.

Исследования, проводимые на Нуклотроне, помимо того что они вносят вклад в развитие проекта NICA, имеют существенное значение для международного проекта FAIR. Так, например, на Нуклотроне впервые был испытан в режиме воздействия на пучок частиц кикер, разработанный в Юлихском исследовательском центре для системы охлаждения накопителя HESR проекта FAIR (имеющей параметры, сходные с параметрами системы охлаждения NICA, но предназначенной для других целей).

Авторы считают своим долгом выразить искреннюю благодарность И.Н. Мешкову, Р. Майеру, Р. Штассену, Г. Штокхорсту, Т. Катаяме, Л. Торндалу, В. Лебедеву, внесшим неоценимый вклад в разработку систем стохастического охлаждения для коллайдера NICA и Нуклотрона, а также коллективу ускорительного отделения Лаборатории физики высоких энергий им. В.И. Векслера и А.М. Балдина ОИЯИ, без заинтересованного и активного участия которого эксперименты по стохастическому охлаждению на Нуклотроне были бы невозможны.

## Список литературы

1. ван дер Meer С *УФН* **147** 405 (1985); van der Meer S *Rev. Mod. Phys.* **57** 689 (1985)
2. Brennan J M, Blaskiewicz M, Mernick K, in *Proc. of the Intern. Particle Accelerator Conf., IPAC'12, New Orleans, Louisiana, USA, May 20–25, 2012* (Piscataway, NJ: IEEE, 2012) p. 2900; <http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/IPAC2012/papers/weppp082.pdf>
3. Kozlov O (for the NICA Team) *ICFA Beam Dynamics Newslett.* (53) 39 (2010); [http://icfa-usa.jlab.org/archive/newsletter/icfa\\_bd\\_nl\\_53.pdf](http://icfa-usa.jlab.org/archive/newsletter/icfa_bd_nl_53.pdf)
4. Mernick K, Blaskiewicz M, Brennan J M, in *Proc. of the NA PAC2013, North American Particle Accelerator Conf., Pasadena, Calif., 29 September–4 October 2013*, p. 41; <http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/PAC2013/papers/mozaa2.pdf>
5. Schaumann M et al., in *Proc. of the 5th Intern. Particle Accelerator Conf., IPAC2014, Dresden, Germany, June 15–20, 2014*, p. 1030; <http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/IPAC2014/papers/tupro013.pdf>
6. Ahmanova E et al., in *Beam Cooling and Related Topics. Proc. of the Workshop, COOL'09, Lanzhou, China, August 31–September 4, 2009* (Eds H-W Zhao, X-D Yang) (Lanzhou: Inst. Mod. Phys., 2010) p. 16; <http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/COOL2009/papers/mom2mcio02.pdf>
7. Prost L R et al., in *Beam Cooling and Related Topics. Proc. of the Workshop, COOL'09, Lanzhou, China, August 31–September 4, 2009* (Eds H-W Zhao, X-D Yang) (Lanzhou: Inst. Mod. Phys., 2010) p. 1; <http://epaper.kek.jp/COOL2009/papers/proceed1.pdf>
8. Prasuhn D, in *Proc. of the Intern. Workshop on Beam Cooling and Related Topics, COOL'13, Mürren, Switzerland, 10–14 June 2013*; [http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/COOL2013/talks/thpm2ha02\\_talk.pdf](http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/COOL2013/talks/thpm2ha02_talk.pdf)
9. Katayama T, Meshkov I, Trubnikov G, in *Proc. of the Workshop on Beam Cooling and Related Topics, COOL'11, Alushta, Ukraine, 12–16 September, 2011* (Ed. M V Kuzin) (Dubna: JINR, 2011) p. 52; <http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/COOL2011/papers/tuiob01.pdf>
10. Steck M et al., in *Proc. of the Workshop on Beam Cooling and Related Topics, COOL'11, Alushta, Ukraine, 12–16 September, 2011* (Ed. M V Kuzin) (Dubna: JINR, 2011) p. 140; <http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/COOL2011/papers/tups20.pdf>
11. Kostromin S et al. *ICFA Beam Dynamics Newslett.* (53) 44 (2010); [http://icfa-usa.jlab.org/archive/newsletter/icfa\\_bd\\_nl\\_53.pdf](http://icfa-usa.jlab.org/archive/newsletter/icfa_bd_nl_53.pdf)
12. Костромин С А и др. *Письма в ЭЧАЯ* **9** 537 (2012); Kostromin S A et al. *Phys. Part. Nucl. Lett.* **9** 322 (2012)
13. Möhl D et al. *Phys. Rep.* **58** 73 (1980)
14. Сидорин А О, Трубников Г В, Шурхно Н А *Вестн. Санкт-Петербург. ун-та, Сер. 10 Приклад. матем. Информатика. Процессы управления* (1) 70 (2012)

15. Кобец А Г, Сидорин А О, Трубников Г В, Шурхно Н А *Письма в ЭЧАЯ* **9** 604 (2012); Kobets A G, Sidorin A O, Trubnikov G V, Shurkhno N A *Phys. Part. Nucl. Lett.* **9** 364 (2012)
16. Stassen R et al., in *Proc. of the Workshop on Beam Cooling and Related Topics, COOL'11, Alushta, Ukraine, 12–16 September, 2011* (Ed. M V Kuzin) (Dubna: JINR, 2011) p. 129; <http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/COOL2011/papers/tups15.pdf>
17. Дементьев Е Н и др., в сб. *Труды 8-го Всесоюз. совещания по ускорителям заряженных частиц, Протвино, 1982* Т. 2 (Дубна: ОИЯИ, 1983) с. 276
18. Трубников Г В, Автореф. дисс. ... докт. физ.-мат. наук (Дубна: ОИЯИ, 2012)
19. Meshkov I et al., in *Particle Accelerator. Proc. of the 22nd Russian Conf., RuPAC 2010, Protvino, Russia, September 27–October 1, 2010* (Eds M V Kuzin, V R W Schaa) (Novosibirsk: Budker INP, 2010) p. 74; <http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/r10/papers/tupsa016.pdf>
20. Kostromin S et al., in *Proc. of the Workshop on Beam Cooling and Related Topics, COOL'11, Alushta, Ukraine, 12–16 September, 2011* (Ed. M V Kuzin) (Dubna: JINR, 2011) p. 25; <http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/COOL2011/papers/moio07.pdf>
21. Sidorin A et al., in *Proc. of the 23rd Russian Particle Accelerator Conf., RuPAC 2012, St. Petersburg, Russia, September 24–28, 2012* (Eds V R W Schaa, M V Kuzin) (St. Petersburg: Facult. Appl. Math. Control Processes, 2012) p. 117; <http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/rupac2012/papers/wezch03.pdf>
22. Shurkhno N et al., in *Proc. of the 23rd Russian Particle Accelerator Conf., RuPAC 2012, St. Petersburg, Russia, September 24–28, 2012* (Eds V R W Schaa, M V Kuzin) (St. Petersburg: Facult. Appl. Math. Control Processes, 2012) p. 313; <http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/rupac2012/papers/tuppb004.pdf>
23. Katayama T, Meshkov I, Sidorin A, Trubnikov G, in *Proc. of the 23rd Russian Particle Accelerator Conf., RuPAC 2012, St. Petersburg, Russia, September 24–28, 2012* (Eds V R W Schaa, M V Kuzin) (St. Petersburg: Facult. Appl. Math. Control Processes, 2012) p. 53; <http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/rupac2012/papers/tuych02.pdf>
24. Каденко И и др. *Письма в ЭЧАЯ* **11** 1087 (2014); Kadenko I et al. *Phys. Part. Nucl. Lett.* **11** 705 (2014)
25. Аверичев А С и др., Сообщения Р9-2012-108 (Дубна: ОИЯИ, 2012)
26. Аверичев А С и др., Сообщения Р9-2013-140 (Дубна: ОИЯИ, 2013)
27. Trubnikov G et al., in *Proc. of the 4th Intern. Particle Accelerator Conf., IPAC 2013, Shanghai, China, May 12–17, 2013* (Eds Z Dai et al.) (Geneva: JACoW, 2013) p. 1343; <http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/IPAC2013/papers/tupfi009.pdf>
28. Trubnikov G *CERN Courier* **53** (5) 19 (2013)
29. Agapov N et al., in *Proc. of the Intern. Workshop on Beam Cooling and Related Topics, COOL'13, Mürren, Switzerland, 10–14 June 2013*, p. 197; <http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/COOL2013/papers/thpm2ha01.pdf>
30. Shurkhno N et al., in *Proc. of the Intern. Workshop on Beam Cooling and Related Topics, COOL'13, Mürren, Switzerland, 10–14 June 2013*, p. 73; <http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/COOL2013/papers/tupm1ha01.pdf>
31. Trubnikov G et al., in *Proc. of the 5th Intern. Particle Accelerator Conf., IPAC2014, Dresden, Germany, June 15–20, 2014*, p. 1003; <http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/IPAC2014/papers/tupro005.pdf>
32. Sidorin A et al., in *Proc. of the XXIV Russian Particle Accelerators Conf., RuPAC 2014, Obninsk, Russian, October 6–10, 2014*, p. 283; <http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/rupac2014/papers/thx03.pdf>
33. Meshkov I, Trubnikov G *ICFA Beam Dynamics Newsltt.* (64) 94 (2014); [http://icfa-usa.jlab.org/archive/newsletter/icfa\\_bd\\_nl\\_64.pdf](http://icfa-usa.jlab.org/archive/newsletter/icfa_bd_nl_64.pdf)
34. Trubnikov G, Sidorin A, Shurkhno N *Cybernetics Phys.* **3** (3) 137 (2014); <http://lib.physcon.ru/doc?id=a9f57de276de>

## Experimental and theoretical JINR studies on the development of stochastic cooling of charged particle beams

A.O. Sidorin, G.V. Trubnikov, N.A. Shurkhno

Joint Institute for Nuclear Research, Veksler and Baldin Laboratory of High Energy Physics,  
ul. Joliot-Curie 6, 141980 Dubna, Moscow region, Russian Federation  
E-mail: [sidorin@jinr.ru](mailto:sidorin@jinr.ru), [trubnikov@jinr.ru](mailto:trubnikov@jinr.ru), [shurkhno@physics.msu.ru](mailto:shurkhno@physics.msu.ru)

In 2010, based on the superconducting synchrotron Nuclotron, a new accelerator complex NICA (Nuclotron based Ion Collider fAcility) started to be constructed at the Laboratory of High Energy Physics of the Joint Institute for Nuclear Research, its key facility being the 1.0–4.5 GeV per nucleon heavy ion collider. For the purpose of effectively collecting statistics, an average collider luminosity of  $10^{27} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$  is required. With this collider energy, the cooling of the beam both in the process of storage and during the experiment is mandatory to ensure the required parameters. In this paper, a possible new regime of stochastic cooling is examined.

**Keywords:** hadron collider, beam cooling, stochastic cooling

PACS numbers: 25.75.–q, 29.20.db

DOI: 10.3367/UFNr.0186.201603d.0275

Bibliography — 34 references

Received 6 July 2015, revised 4 August 2015

*Uspekhi Fizicheskikh Nauk* **186** (3) 275–291 (2016)

*Physics – Uspekhi* **59** (3) (2016)