

ПЕРВЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ ПО ЭЛЕКТРОННОМУ ОХЛАЖДЕНИЮ ИОНОВ В БУСТЕРЕ NICA

*М. И. Брызгунов^а, А. В. Бублей^а, В. А. Лебедев^б, И. Н. Мешков^{б,в},
К. Г. Осипов^б, В. В. Пархомчук^{а,з}, В. М. Панасюк^а,
Ю. В. Прокофьевичев^б, В. Б. Рева^{а,з}, А. С. Сергеев^б, С. В. Семёнов^б,
Р. В. Тимонин^б, В. С. Шпаков^{б,1}*

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

^б Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

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

^з Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

Представлены результаты исследований системы электронного охлаждения синхротрона бустер в двух сеансах пусконаладочных работ 2020–2023 гг. на инжекционном комплексе коллайдера NICA. Продемонстрировано охлаждение пучков ионов $^{56}\text{Fe}^{14+}$ и $^{124}\text{Xe}^{28+}$ в бустере на энергии инжекции 3,2 МэВ/нуклон. Дано описание параметров ионного и электронного пучков и процедур настройки оптимальных значений энергии электронного пучка системы охлаждения.

We present the test run results for the electron cooling system at Booster synchrotron, which were conducted at the NICA injection complex, during 2020–2023. We have demonstrated a successful cooling of the $^{56}\text{Fe}^{14+}$ and $^{124}\text{Xe}^{28+}$ ion beams at the injection energy of 3.2 MeV/u. We provide the parameters of the ion and electron beams, as well as the detailed description of the tuning procedures used for the e-cooling system during the experiments.

PACS: 29.20.–с; 25.27.–q

ВВЕДЕНИЕ

Сооружение в Объединенном институте ядерных исследований ускорительного комплекса коллайдера NICA (Nuclotron-based Ion Collider fAcility) имеет целью проведение экспериментальных исследований [1, 2]:

- плотной барионной материи в столкновениях тяжелых ядер в области релятивистских энергий $\sqrt{s} = 4\text{--}11$ ГэВ/нуклон;
- физики спина частиц в области релятивистских энергий $\sqrt{s} = 27$ ГэВ в столкновениях протонов и $\sqrt{s} = 13,5$ ГэВ/нуклон в столкновениях дейтронов.

¹E-mail: shpakov@jinr.ru

Первая задача уже решается в экспериментах на фиксированной мишени — эксперименты Short Range Correlation (SRC) и Baryonic Matter at Nuclotron (BM@N). Готовятся эксперименты на встречных пучках коллайдера NICA при светимости до $10^{27} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ в столкновениях тяжелых ядер и до $10^{31} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ в столкновениях протонов (дейтронов).

Комплекс NICA располагает также разнообразной программой прикладных задач. В частности, обеспечивает исследование воздействия жесткого барионного излучения на живые организмы и различные элементы микроэлектроники, для чего строятся специальные каналы транспортировки пучков и экспериментальные станции для изучения ожидаемых эффектов.

Инжекционный комплекс коллайдера NICA [1] состоит из источника тяжелых многозарядных ионов (криогенного ионного источника КРИОН) и лазерно-плазменного источника, линейного ускорителя тяжелых ионов (ЛУТИ) и двух сверхпроводящих синхротронов — бустера и нуклотрона. Первый из них имеет систему электронного охлаждения (СЭО), разработанную в ИЯФ им. Г. И. Будкера СО РАН [3] и призванную обеспечить накопление ионов в бустере и формирование необходимого фазового объема пучка для его последующего перевода в нуклотрон.

На инжекционном комплексе NICA в 2021–2023 гг. проведено 4 сеанса пусконаладочных работ (ПНР), в течение которых проводились отладка его основных систем и, в заключение каждого сеанса, медленный вывод ускоренных ядер на мишени ядерно-физических экспериментов SRC и BM@N. В ходе ПНР на бустере были проведены эксперименты по электронному охлаждению ионов $^{56}\text{Fe}^{14+}$ и $^{124}\text{Xe}^{28+}$ на энергии инъекции 3,25 МэВ/нуклон (второй и четвертый сеансы соответственно) и $^{124}\text{Xe}^{28+}$ на энергии 65,0 МэВ/нуклон. Описанию этих экспериментов посвящена данная статья.

1. СИСТЕМА ЭЛЕКТРОННОГО ОХЛАЖДЕНИЯ

Кольцо бустера располагается внутри ярма магнита синхрофазотрона, выведенного из эксплуатации в 2002 г., и, как следствие, имеет 4 прямолинейные секции, в одной из которых располагается СЭО (рис. 1, табл. 1), выполненная по классической схеме таких устройств с формированием замагниченного электронного пучка в продольном («соленоидальном») магнитном поле [4].

СЭО бустера предполагает работу в двух основных режимах: это электронное охлаждение ионов на энергии инъекции (3,2 МэВ/нуклон), которое планируется применять для формирования плотного ионного пучка и накопления ионов с многократной инъекцией. Последний режим требуется, чтобы компенсировать недостаточную интенсивность источника тяжелых ионов КРИОН. Охлаждение пучка ионов на более высокой энергии, вплоть до 90 МэВ/нуклон, может быть использовано для формирования пучка ионов с предельной плотностью в фазовом пространстве для последующей транспортировки в нуклотрон.

2. ОХЛАЖДЕНИЕ ИОНОВ $^{56}\text{Fe}^{14+}$ и $^{124}\text{Xe}^{28+}$

В описываемых экспериментах ионный пучок с энергией 3,2 МэВ/нуклон инжектировался на плато магнитного поля бустера длительностью 200 мс. Затем проводились адиабатическая группировка пучка на пятой гармонике частоты обраще-

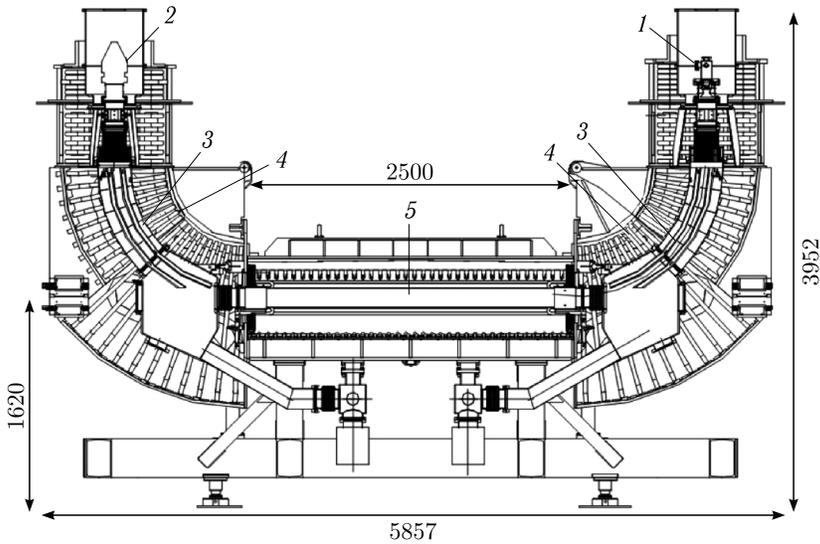


Рис. 1. Общая схема СЭО бустера: 1 — электронная пушка; 2 — коллектор электронов; 3 — пластины поворотного электрического поля; 4 — соленоиды продольного магнитного поля; 5 — участок охлаждения ионного пучка

Таблица 1. Основные параметры СЭО бустера

Параметр	Значение
Максимальная энергия электронов, кэВ	50
Ток электронного пучка, А	0–1
Длина секции охлаждения, м	2,500
Габаритная длина СЭО на равновесной орбите пучка в бустере, м	5,857
Радиус электронного пучка, мм	14

ния, ускорение до промежуточного плато магнитного поля, соответствующего энергии 65 МэВ/нуклон, адиабатическая разгруппировка с последующей группировкой на первой гармонике, ускорение до максимальной энергии и перепуск сгустка в нуклотрон. И во втором, и в четвертом сеансах охлаждение проводилось на инжекционном плато, однако во втором сеансе длительность плато охлаждения была увеличена до 3,5 с, в то время как в четвертом охлаждение всегда проводилось в течение 200 мс. Соответственно, разброс импульсов ионов измерялся во втором сеансе (ионы $^{56}\text{Fe}^{14+}$) при помощи дробового шума разгруппированного пучка (Schottky noise), а в четвертом (ионы $^{124}\text{Xe}^{28+}$) разброс импульсов определялся из длины сгустка, измеряемой при помощи быстрого трансформатора тока (Fast Current Transformer — FCT [5]). В этом случае электронное охлаждение сопровождалось сокращением длины сгустка (рис. 2, а). Заметим, что на энергии инжекции из-за малой частоты обращения и быстрого охлаждения временное разрешение метода дробового шума не позволяло проследить динамику охлаждения. К тому же одним из основных назначений

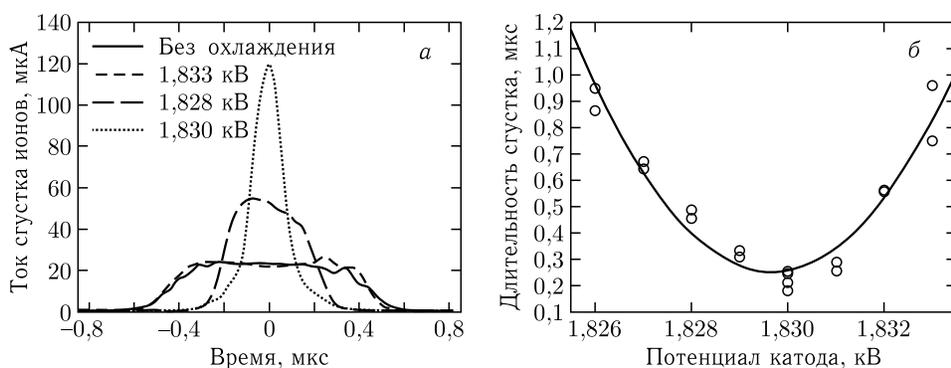


Рис. 2. Ток сгустка ионов в конце инжекционного плато при различных значениях потенциала катода пушки U_{cath} (а) и зависимость FWHM (Full Width at Half Maximum — полная ширина на полувысоте импульса) этих импульсов от U_{cath} (б); ток электронов — 50 мА, длительность сепаратрисы — 1,701 мкс

электронного охлаждения является обеспечение накопления ионного пучка с многократной инжекцией, что предполагает наличие ВЧ при инжекции. По этим причинам в четвертом сеансе измерения проводились со сгруппированным пучком.

Оптимальный режим охлаждения ионов достигается при совмещении осей ионного и электронного пучков и подстройке энергии электронов и охлаждаемых ионов до совпадения по величине и направлению векторов их средних скоростей [4]:

$$\frac{E_e}{m_e} = \frac{E_i}{m_i}. \quad (1)$$

Здесь E_e и E_i — значения кинетической энергии электронов и ионов; m_e и m_i — масса электрона и ядра иона соответственно¹. При энергии ионного пучка 3,203 МэВ/нуклон² энергия электронов на участке охлаждения должна составлять 1,7699 кэВ. Чтобы обеспечить эту величину, нужно увеличивать отрицательный потенциал катода электронной пушки, компенсируя торможение электронов на ее выходе электрическим полем пространственного заряда электронного пучка (рис. 2, б). По этой причине оптимальное значение катодного напряжения зависит от значения тока электронного пучка. При «нулевом» токе электронов это значение равно рассчитанному по формуле (1). При токе электронов 50 мА, радиусах поперечного сечения пучка 14 мм и вакуумной камеры 50 мм отрицательное значение потенциала тормозящего электрического поля спадает по радиусу пучка, а потенциал на оси пучка «провисает» относительно стенок вакуумной камеры на 64 В. Кроме того, разность потенциалов между осью и границей пучка составляет 18 В, что создает на размере радиуса электронного пучка разность значений импульсов электронов $\Delta p/p \approx 5 \cdot 10^{-3}$ [6]. Зависи-

¹При расчете энергии ионов в МэВ/нуклон в формуле (1) m_i есть средняя масса нуклона в ядре с учетом удаленных электронов. Для изотопа $^{124}\text{Xe}^{28+}$ $m_i = 930,787$ МэВ/нуклон.

²В эксперименте с $^{124}\text{Xe}^{28+}$ энергия пучка измерялась по частоте обращения и равна 3,203 МэВ/нуклон

Таблица 2. Энергия электронов на выходе пушки

Ток электронного пучка, мА	Потенциал катода электронной пушки, кВ			
	Энергия иона, МэВ/нуклон	Эксперимент V_{exp} , кВ	Расчет V_{theor} , кВ	$(V_{\text{theor}} - V_{\text{exp}})/V_{\text{exp}}$
50	3,2	1,830	1,8202	$-5,3 \cdot 10^{-3}$
100		1,883	1,8815	$-8,2 \cdot 10^{-4}$
150		1,920	1,9407	$1,1 \cdot 10^{-2}$
200		35,449	35,7490	$8,5 \cdot 10^{-3}$

мость потенциала катода от тока пучка показана в табл. 2. Относительная разность оптимальных экспериментальных значений энергии электронов на оси электронного пучка E_{exp} и оптимальных расчетных E_{theor} , найденных по результатам работы [6], не превышает $4 \cdot 10^{-3}$.

В четвертом сеансе скорость охлаждения вычислялась по изменению длины сгустка ионов на его полувысоте (рис. 2, а), а во втором — по изменению ширины спектра дробового шума тока пучка. Необходимо отметить, что при охлаждении пучка на энергии инжекции отклонение ускоряющего напряжения (потенциала катода электронной пушки) от оптимального значения, в данном случае равного 1,83 кВ, всего лишь на 3 В приводило к почти полному прекращению охлаждения.

2.1. Поперечное охлаждение пучка. Во время четвертого сеанса для регистрации эффекта охлаждения ионов и положения ионного пучка на входе канала транспортировки из бустера в нуклотрон использовался люминофорный экран в канале вывода [7], который позволяет получить изображение поперечного распределения интенсивности пучка после его ускорения при перепуске в нуклотрон.

Как видно из рис. 3, поперечное охлаждение ионного пучка уменьшает его поперечный размер и, следовательно, уменьшает его поперечный эмиттанс. FWHM сечения пучка до охлаждения: 7,81 мм — горизонтальный и 5,38 мм — вертикаль-

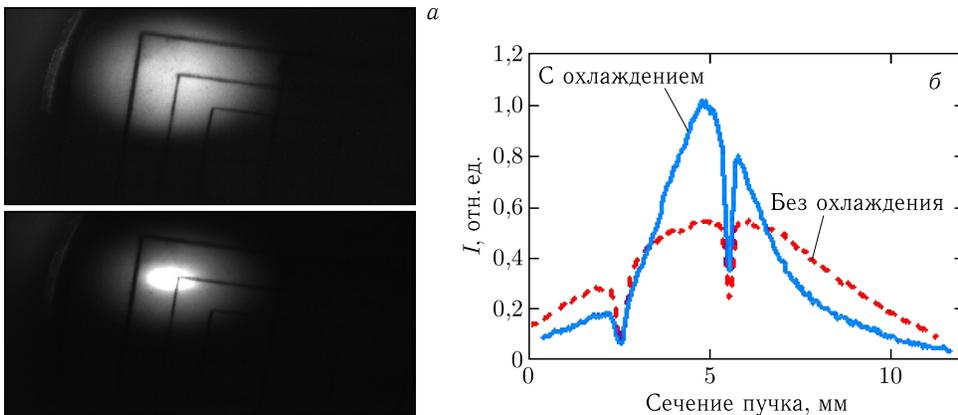


Рис. 3. Поперечные профили ионного пучка: а) кадры пучка на люминофоре без охлаждения (вверху) и с охлаждением (внизу); б) проекция интенсивности засветки: без охлаждения (штриховая кривая) и с охлаждением (сплошная)

ный. После охлаждения размеры уменьшились до 3,34 и 1,63 мм соответственно. На основе полученных размеров можно оценить изменение поперечного эмиттанса при охлаждении ионного пучка, воспользовавшись известным выражением:

$$\sigma_x = \sqrt{\epsilon_g \beta_x}, \quad (2)$$

где σ_x — размер пучка в точке измерения; β_x — значение бета-функции канала в точке измерения; ϵ_g — геометрический эмиттанс пучка. Такая оценка дает уменьшение горизонтального и вертикального эмиттансов в 5,5 и 11 раз соответственно. Предполагая экспоненциальное затухание, мы можем оценить времена охлаждения по амплитуде. Они равны 240 и 170 мс для горизонтального и вертикального затуханий. В данных экспериментах использовался ток электронного пучка 50 мА.

Во втором сеансе, во время экспериментов с охлаждением железа, для оценки поперечного охлаждения использовался ионизационный профилометр [8]. Благодаря непрерывающему характеру измерений ионизационный профилометр позволяет отслеживать процесс охлаждения во времени [9], однако в четвертом сеансе, во время экспериментов с охлаждением $^{124}\text{Xe}^{28+}$, эта система не применялась.

2.2. Продольное охлаждение пучка. Исследования продольного охлаждения пучка ионов проводились во время второго и четвертого сеансов ПНР на энергии инжекции ионов железа $^{56}\text{Fe}^{14+}$ и ксенона $^{124}\text{Xe}^{28+}$ соответственно. Во время второго сеанса ПНР охлаждение ионов железа проводилось на длинной (3,5 с, рис. 4) полке инжекции, что позволило охлаждать пучок до равновесной продольной температуры и использовать детектор шума Шоттки [10] для измерения продольного разброса импульса ионов¹. Упомянутое выше недостаточное временное разрешение

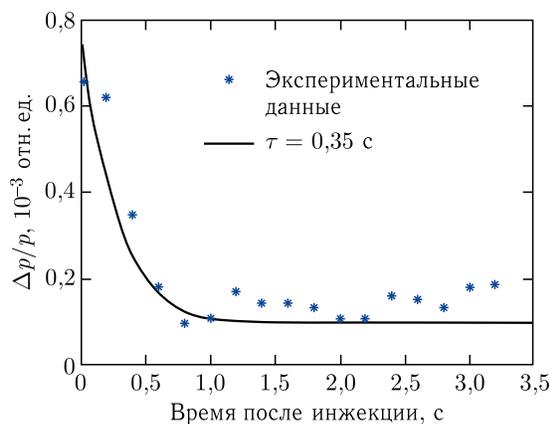


Рис. 4. Охлаждение ионов $^{56}\text{Fe}^{14+}$ во время второго сеанса ПНР. Кривая фитирования построена на основе выражения (4) для двух различных значений характерного времени охлаждения. Ток электронного пучка равен 50 мА

¹Детектор шума Шоттки измеряет дробовой шум тока пучка, который имеет пик спектральной плотности вокруг каждой гармоники частоты обращения ионов. Из-за зависимости частоты обращения от импульса спектральная мощность шума напрямую связана с функцией распределения по продольному импульсу.

Шоттки монитора (~ 100 мс) не позволило отследить детали охлаждения, что отчетливо видно на рис. 4. Для расчета разброса ионов по продольному импульсу использовалась известная формула, связывающая частоты обращения ионов и их отклонения по импульсу:

$$\frac{\Delta p}{p} = \frac{1}{\eta} \frac{\Delta f}{f_r}, \quad (3)$$

где $\Delta p/p$ — относительный разброс по импульсам; $\Delta f/f_r$ — относительный разброс по частотам обращения ионов; f_r — частота обращения ионного пучка; η — slip-фактор, равный для бустера 0,94.

Для количественной оценки времени охлаждения τ использовалось уравнение фитирующей кривой зависимости от времени разброса ионов по импульсу:

$$\frac{\Delta p(t)}{p} = \sqrt{\left(\left(\frac{\Delta p(t_0)}{p} \right)^2 - \left(\frac{\Delta p}{p} \right)_{\min}^2 \right) \frac{e^{-2(t-t_0)}}{\tau} + \left(\frac{\Delta p}{p} \right)_{\min}^2}, \quad (4)$$

где $(\Delta p(t_0)/p)$ и $(\Delta p(t)/p)$ — соответственно начальное и текущее значения относительного разброса ионов по продольному импульсу; $(\Delta p/p)_{\min}$ — минимальное (равновесное) значение разброса ионов по импульсу; t — текущее время; t_0 — время первой экспериментальной точки. Для экспериментальных данных, полученных для ионов $^{56}\text{Fe}^{14+}$, характерное время охлаждения на энергии инжекции составляет $\tau = (0,35 \pm 0,02)$ с, а минимальный разброс по импульсу FWHM устанавливается на уровне $\sim (1,30 \pm 0,09) \cdot 10^{-4}$ при начальном разбросе $\sim 6,5 \cdot 10^{-4}$.

Во время четвертого сеанса ПНР ускорение ионов начиналось через $\sim 0,23$ с после инжекции, тем самым ограничивая время охлаждения ионного пучка. За такое короткое время охлаждения ионный пучок не успевает достичь равновесной температуры. Однако этого времени оказалось достаточно, чтобы при токе электронного пучка 50 мА существенно сократить длительность сгустка (см. рис. 2 и 5).

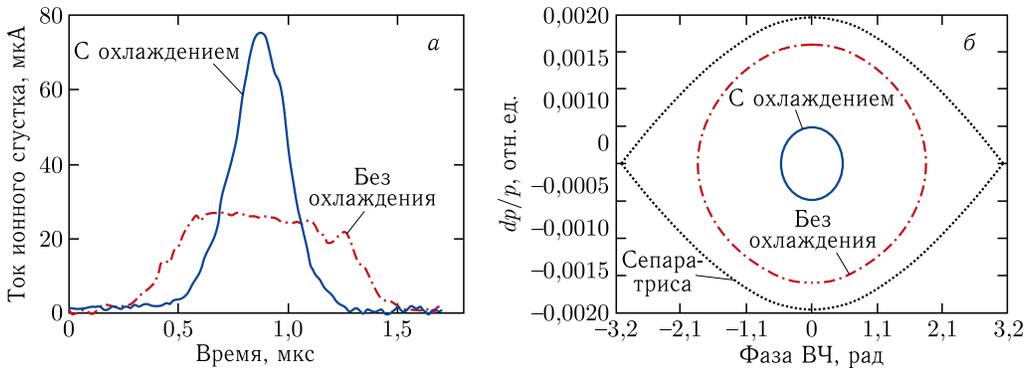


Рис. 5. Профиль сгустка ионов $^{124}\text{Xe}^{28+}$ (а) и его фазовый размер (б) при выключенном (штрихпунктирные кривые) и при включенном (сплошные кривые) электронном охлаждении на плато инжекции в бустере. Ток электронного пучка 50 мА. Пунктирная кривая (б) — сепаратриса при включенной ВЧ бустера

Для оценки разброса по импульсу в данном случае использовалась известная формула связи амплитуд линейных синхротронных колебаний — разброса частиц по импульсу $(\Delta p/p)_{\text{ampl}}$ и продольного размера сгустка частиц σ_s :

$$\left(\frac{\Delta p}{p}\right)_{\text{ampl}} = \frac{\sigma_s}{\beta R_s} \sqrt{\frac{h}{2\pi|\eta|} \frac{Z}{A} \frac{eV_{\text{rf}}}{\gamma m_N c^2}}. \quad (5)$$

Здесь $\beta = v/c$ — отношение скорости частицы к скорости света; R_s — средний радиус орбиты пучка; h — гармоника ВЧ-поля; γ — лоренц-фактор ионного пучка; Z и A — заряд ионов и их массовое число соответственно; c — скорость света; m_N — масса нуклона; e — заряд электрона; V_{rf} — амплитуда ВЧ-поля. В данных измерениях ионы $^{124}\text{Xe}^{28+}$ имели энергию 3,2 МэВ/нуклон, амплитуда ВЧ-напряжения на пятой гармонике составляла 800 В. При этом перед началом ускорения неохлажденный пучок имел разброс по импульсу FWHM на уровне $1,7 \cdot 10^{-3}$, в то время как разброс по импульсу охлажденного пучка оказывался порядка $0,5 \cdot 10^{-3}$.

Для измерения длительности сгустка ионов с помощью ФСТ требуется наличие ВЧ-напряжения в синхротроне для формирования ионных сгустков. Таким образом, ФСТ позволяет отслеживать процесс охлаждения сгустков лишь на некотором участке первого стола охлаждения (рис. 6), начиная с $t \sim 0,15$ с и заканчивая началом ускорения ионов в момент времени $t \sim 0,23$ с. При этом рост амплитуды напряжения ВЧ-системы проходил относительно медленно, что отчетливо видно по уменьшению длительности пучка без охлаждения на начальном этапе (рис. 6, светлые кружки). В такой ситуации общее характерное время сжатия охлаждаемого ионного пучка от 0,15 до 0,23 с оказывается равным $\tau = (67,1 \pm 8,1)$ мс (рис. 6, кривая и звездочки), что близко к оценкам для продольного охлаждения ионов замагниченным электронным пучком [11, формулы (18), (19)]. Тем не менее нужно отметить, что на участке 0,15–0,17 с происходит подъем амплитуды ВЧ-напряжения, что вносит свой вклад в продольное сжатие сгустков ионов. В заключение заметим, что охлаждение в присут-

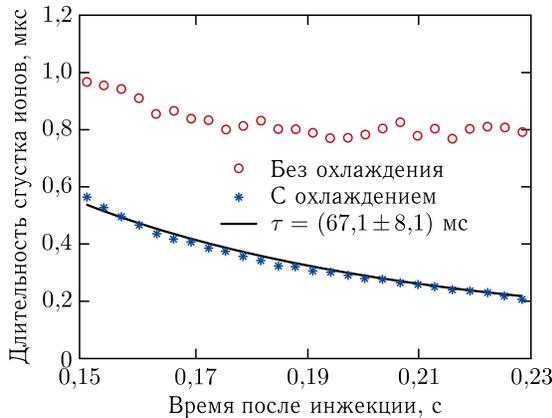


Рис. 6. Эволюция длительности ионных сгустков, измеренная с помощью ФСТ, в присутствии электронного охлаждения и без него

ствии ВЧ происходит существенно медленнее, чем для непрерывного пучка¹, а также что сила трения нелинейно зависит от скорости. Эти обстоятельства, а также градиент скоростей электронов по радиусу существенно осложняют динамику охлаждения и требуют дополнительного исследования.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Во время первых сеансов ПНР на инжекционном комплексе коллайдера NICA были проведены эксперименты с охлаждением ионных пучков, направленные, в первую очередь, на отработку приемов настройки системы электронного охлаждения, а также на тестирование различных систем диагностики ионного пучка. В частности, были отработаны приемы оптимизации напряжения на катоде электронной пушки и протестированы различные системы диагностики параметров ионного пучка, позволяющие получить максимальную эффективность электронного охлаждения.

Для ионных пучков $^{56}\text{Fe}^{14+}$ и $^{124}\text{Xe}^{28+}$ опробована работа системы электронного охлаждения. Подтверждено влияние электрического поля пространственного заряда электронного пучка на энергию электронов при выходе из электронной пушки, что приводит к необходимости соответствующей коррекции напряжения на катоде.

При оптимизированной настройке СЭО размеры охлажденного пучка ионов в поперечной плоскости уменьшались в 2–3 раза относительно неохлажденного пучка. В продольном направлении включение СЭО позволяло сократить относительный разброс ионов по импульсу и для $^{124}\text{Xe}^{28+}$ и для $^{56}\text{Fe}^{14+}$ в среднем в 4–5 раз. Характерное время охлаждения ионов железа при этом составляло $\tau \approx 0,35$ с, а для ксенона характерное время комбинированного охлаждения (действие ВЧ-напряжения и охлаждающего электронного пучка) составило $\tau \sim 0,07$ с.

Благодарности. Авторы выражают глубокую благодарность А. В. Бутенко, П. В. Логачеву, А. Н. Скринскому, Е. М. Сыресину, Г. В. Трубникову за помощь и ценные обсуждения при разработке, создании, вводе в действие системы электронного охлаждения бустера NICA и проведении первых в России экспериментов по электронному охлаждению тяжелых ионов, а также всем сотрудникам ИЯФ им. Г. И. Будкера СО РАН и ОИЯИ, принявшим участие в работах по созданию и вводу в действие СЭО бустера NICA.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Kekelidze V., Lednicky R., Matveev V., Meshkov I., Sorin A., Trubnikov G.* Three Stages of the NICA Accelerator Complex // J. Phys.: Conf. Ser. 2016. V. 668, No. 1. P. 012023.
2. NICA White Paper. <http://theor0.jinr.ru/twiki-cgi/view/NICA/WebHome>.
3. *Bryzgunov M. B., Bublely A. V., Goncharov A. D., Denisov A. P., Kremnev N. C., Parkhomchuk V. V., Panasuk V. M., Putnikov A. A., Reva V. B., Shiyankov S. V.* The Status of the Electron Cooling System for the NICA Collider // Proc. of the 12th Workshop on Beam Cooling and Related Topics (COOL2019), Novosibirsk, Russia, Sept. 23–27, 2019. P. 55–58.

¹Для линейной зависимости силы трения от скорости охлаждение малых синхротронных колебаний в присутствии ВЧ происходит вдвое медленнее, чем для непрерывного пучка.

4. *Meshkov I.* Electron Cooling: Status and Perspectives // Phys. Part. Nucl. Lett. 1994. V. 25, No. 6. P. 631–661.
5. BERGOZ Instrumentation. <https://www.bergoz.com/products/fct/>.
6. *Мальцева Ж. Л., Мельников С. А., Мешков И. Н., Сергеев А. С., Черевко А. А.* Пространственный заряд электронного пучка в системе электронного охлаждения // ЯФ (в печати).
7. *Meshkov O., Smaluk V.* Booster NSLSS II Beam Diagnostics // Proc. of the 23rd Russ. Part. Accel. Conf. (RuPAC 2012), St. Petersburg, Russia, Sept. 24–28, 2012; https://accelconf.web.cern.ch/rupac2012/talks/frxor02_talk.pdf.
8. *Baldin A. A., Astakhov V. I., Beloborodov A. V. et al.* Nondestructive Diagnostics of Accelerated Ion Beams with MCP-Based Detectors at the Accelerator Complex NICA. Experimental Results and Prospects // Proc. of the 27th Russ. Part. Accel. Conf. (RuPAC 2021), Alushta, Russia, Sept. 27–Oct. 1, 2021. JACoW Publ., 2021. P. 82–84.
9. *Syresin E., Baldin A., Butenko A., Gorelyshev I., Kobets A., Melnikov S., Meshkov I., Osipov K., Semenov S., Sergeev A., Sidorin A., Trubnikov G.* NICA Synchrotrons and Their Cooling Systems // Proc. of the 13th Workshop on Beam Cooling and Related Topics (COOL2021), Novosibirsk, Russia, Nov. 1–5, 2021.
10. *Boussard D.* Schottky Noise and Beam Transfer Function Diagnostics // Proc. of CERN Accel. School: Accel. Phys., Berlin, 1989. Geneva, 1989.
11. *Диканский Н. С., Мешков И. Н., Пархомчук В. В., Скринский А. Н.* Развитие электронного охлаждения // УФН. 2018. Т. 188, № 5.

Получено 15 сентября 2023 г.