

МНОГОКРАТНАЯ ИНЖЕКЦИЯ ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ В БУСТЕР КОЛЛАЙДЕРА NICA

*A. A. Мартынов^{a, 1}, Б. В. Головенский^a, К. А. Левтеров^a,
B. B. Мялковский^a*

^a Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия

В состав ускорительного комплекса NICA входит линейный ускоритель тяжелых ионов, предназначенный для инжекции ионов с отношением массы к заряду $A/Z \leqslant 6,35$ в накопительный синхротрон бустер. Пусконаладочные работы с ускоренными ионами Xe^{28+} показали недостаточную интенсивность пучка тяжелых ионов для экспериментов на коллайдере. Последний ускорительный сеанс завершился в феврале 2023 г. Он был посвящен подготовке к работе коллайдера, а также медленному выводу пучка с энергией 3,9 ГэВ/нуклон на эксперимент BM@N. Для повышения интенсивности пучка разработана и опробована методика многократной инжекции. Представлены результаты настройки режима многократной инжекции для экспериментов с тяжелыми ионами на коллайдере NICA.

The NICA accelerator complex includes a Heavy Ion Linear Accelerator designed for injection of heavy ions (with the mass-to-charge ratio $A/Z \leqslant 6.35$) into the storage Booster synchrotron. Commissioning sessions with accelerated Xe^{28+} ions showed insufficient beam intensity of the required heavy ion beam parameters for experiments at the collider. The latest accelerator run ended in February 2023. It was devoted to preparations for the collider operation and also delivered slowly extracted 3.9 GeV/u xenon beam to the BM@N experiment. A multiple injection technology has been developed and is currently being implemented for increase of beam intensity. The paper presents the results of multiple injection mode for heavy ion experiments at the NICA collider.

PACS: 29.25.Lg; 29.25.Ni

ВВЕДЕНИЕ

Ускорительный сеанс № 4, проведенный на линейном ускорителе тяжелых ионов (ЛУТИ) и бустере, проходил с 20 сентября 2022 г. по 3 февраля 2023 г. Главной целью сеанса являлся запуск инжекционного комплекса NICA [1] в проектной конфигурации [2]. В состав инжекционного комплекса входят:

- электронно-струнный источник Крион-6Т [3], предназначенный для получения тяжелых ионов в высоком зарядовом состоянии;
- линейный ускоритель ЛУТИ (рис. 1), состоящий из ускоряющей секции с пространственно-однородной квадрупольной фокусировкой (ПОКФ) на энергию 300 кэВ/нуклон и двух ускоряющих секций с трубками дрейфа на энергию 3,2 МэВ/нуклон [4];

¹E-mail: martynovaa@jinr.ru

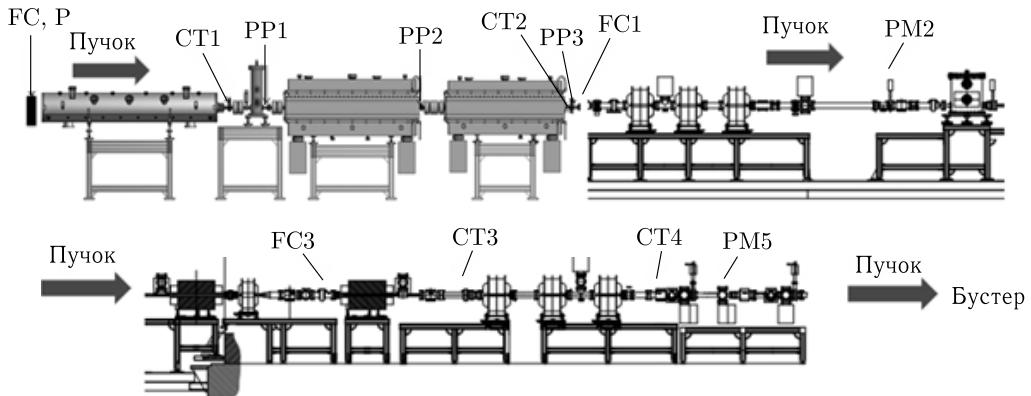


Рис. 1. Инжекционный комплекс бустера: ЛУТИ и канал инжекции ЛУТИ-бустер. FC — цилиндры Фарадея; СТ — импульсные трансформаторы тока; PP — фазовые датчики; PM — профилометры

— канал транспортировки ЛУТИ-бустер (см. рис. 1).

Инжектор на базе ЛУТИ предназначен для инжекции пучка ионов в сверхпроводящий накопительный синхротрон бустер с последующим переводом в сверхпроводящий синхротрон нуклotron и коллайдер [5, 6].

Источником ионов выступает электронно-струнный источник «Крион-6Т» [7], являющийся основным устройством для получения тяжелых ионов для инжекционного комплекса NICA. В ходе сеанса № 4, во время ввода источника в эксплуатацию, использовались ионы $^{40}\text{Ar}^{13+}$, $^{124}\text{Xe}^{28+}$ [8]. Интенсивность ускоренных в бустере ионов $^{124}\text{Xe}^{28+}$ оказалась на порядок ниже требуемой для инжекции в нуклotron и обеспечения проектной светимости в коллайдере [1].

Для накопления в бустере ионов до требуемой интенсивности необходимо использовать предусмотренную в проекте возможность многократной инжекции. Для снижения значения продольного эмиттанса пучка ионов, накапливаемого в результате ряда последовательных инжекций в бустере, используется система электронного охлаждения [10]. В результате исследований по охлаждению ионов в бустере установлено, что требуемое время действия электронного охлаждения составляет ~ 100 мс. Таким образом, электронное охлаждение будет эффективным при частоте следования инжектируемых сгустков ионов 10 Гц.

Соответственно, с частотой 10 Гц источник «Крион-6Т» должен обеспечивать поступление ионов на вход ускорителя ЛУТИ, а все системы инжектора, имеющие импульсное питание, должны также обеспечивать надежную работу с той же частотой. Подготовка систем инжектора и пучковые испытания были проведены для режима десятикратной инжекции.

СИСТЕМА ИМПУЛЬСНОГО ПИТАНИЯ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ПЛАТФОРМ НАПРЯЖЕНИЕМ ИНЖЕКЦИИ

Система импульсного высоковольтного питания обеспечивает требуемую входную энергию пучка ионов на входе в ускоритель (17 кэВ/нуклон). Система состоит из двух генераторов высоковольтных импульсов на основе импульсных трансформаторов, на

первичную обмотку которых разряжаются накопительные емкости. Для работы в режиме десятикратной инжекции были приобретены источники зарядного напряжения, удовлетворяющие требованиям по скорости заряда накопительных емкостей (быстрее 100 мс). На платформу с ускоряющей трубкой подается основное ускоряющее напряжение $\sim 70\text{--}100$ кВ. На платформу с источником «Крион-6Т» подается потенциал 10–15 кВ относительно основной платформы. В ходе испытаний оба генератора высоковольтных импульсов обеспечили стабильную работу по ускорению пучков ионов.

СИСТЕМА СОЛЕНОИДАЛЬНОЙ И КВАДРУПОЛЬНОЙ ФОКУСИРОВКИ

В ходе подготовки нового режима требовалось проверить также работу соленоидов и квадрупольных линз. Нагрев соленоидальных линз при работе в режиме повышенной частоты импульсов потребовал замены воздушной системы охлаждения обмоток линз на водянную, а источники питания были заменены на новые, удовлетворяющие требованиям работы при многократной инжекции. Имевшаяся система питания и охлаждения квадрупольных линз удовлетворяет условиям работы в режиме десятикратной инжекции и вмешательства не потребовала, продемонстрировав стабильную работу.

СИСТЕМА ВЧ-ПИТАНИЯ ЛУТИ

В состав системы ВЧ-питания ЛУТИ [10] входят пять твердотельных ВЧ-усилителей производства Tomco Technologies [11], которые предназначены для возбуждения резонаторов ПОКФ, ИН1, ИН2, банчера и дебанчера. Согласно паспортным данным усилителей максимальная частота посылок ВЧ-импульсов составляет 10 Гц при полной максимальной длительности импульса 200 мкс. Все усилители обеспечили стабильное возбуждение резонаторов при пучковых испытаниях (рис. 2) по ускорению ионов ксенона.

Также свою надежность показала имеющаяся система синхронизации при эксплуатации в новом для нее режиме.

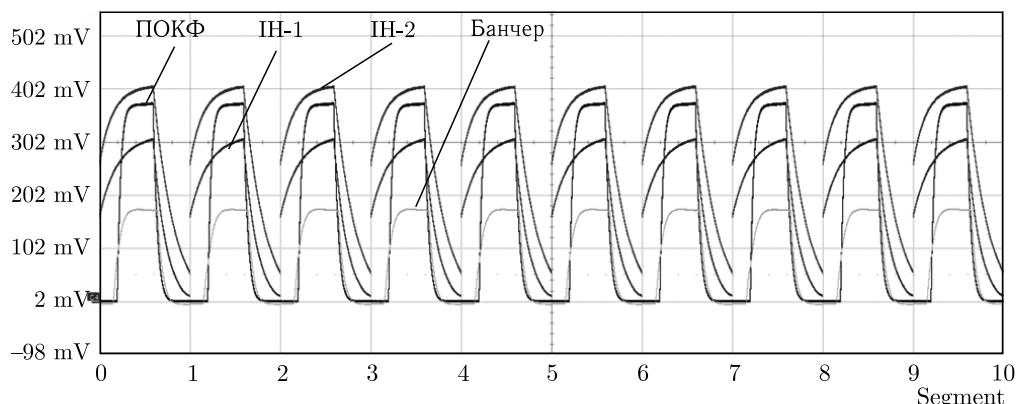


Рис. 2. ВЧ-сигналы с пикапов резонаторов ПОКФ, ИН1, ИН2, Банчера

РАБОТА ЛУТИ В РЕЖИМЕ МНОГОКРАТНОЙ ИНЖЕКЦИИ

В ходе технического сеанса летом 2024 г. ЛУТИ с новыми источниками и системой водяного охлаждения линз показал стабильную работу в режиме десятикратной инжекции пучка: 10 импульсов через 100 мс при рабочем цикле ускорителя от 5 до 7 с. Наблюдаемые изменения амплитуды сигналов пучка на пролетных фазовых датчиках пучка (рис. 3) и на цилиндре Фарадея перед вторым поворотным магнитом от импульса к импульсу незначительны. Ускорение в бустер в режиме десятикратной инжекции запланировано на сеанс в 2025 г.

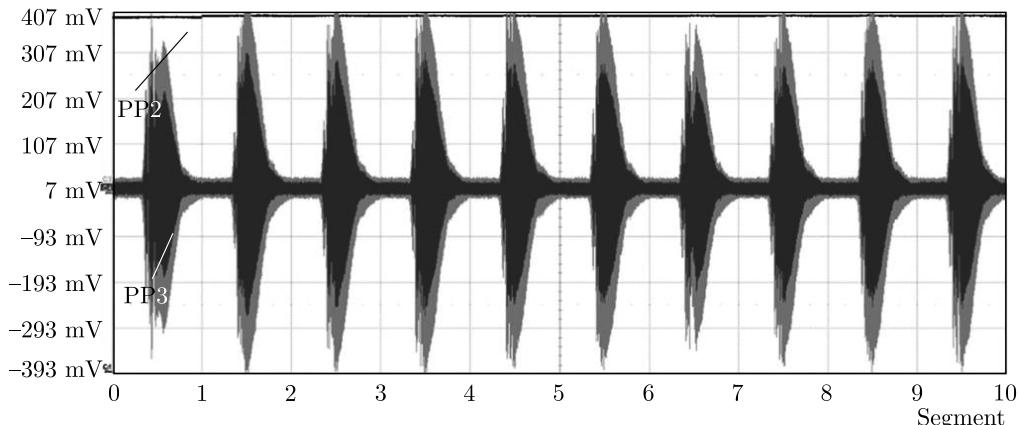


Рис. 3. Показания фазовых датчиков пролетающего пучка (PP2, PP3), установленных в ЛУТИ во время работы ускорителя в режиме десятикратной инжекции

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

После подготовки всех систем ЛУТИ к работе в режиме десятикратной инжекции проведены испытания по ускорению пучка $^{124}\text{Xe}^{28+}$, и на цилиндре Фарадея (FC3) на входе во второй поворотный магнит получены стабильные сигналы от попадания ионов ксенона. Дальнейшее ускорение пучка по каналу требовало проведения комплекса мероприятий по радиационной безопасности, поэтому отложено до проведения следующего ускорительного сеанса на кольце бустера.

Благодарности. Команда Ускорительного отделения ЛФВЭ благодарит всех, кто был задействован в проведении 4-го ускорительного сеанса и модернизации ЛУТИ под многократную инжекцию. Без их самоотверженной работы, упорства и профессионализма успех в выполнении запланированных работ был бы невозможен.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Trubnikov G. V. et al. Project of the Nuclotron-Based Ion Collider Facility (NICA) at JINR // Proc. EPAC'08, Genoa, Italy, June 2008. WEPP029. P. 2581–2583.
2. Kapišin M. et al. Studies of Baryonic Matter at the BM@N Experiment (JINR) // Nucl. Phys. A. 2019. V. 982. P. 967–970.

3. *Donets E. D. et al.* Physics Research and Technology Development of Electron String Ion Sources // Rev. Sci. Instrum. 2012. V. 83. P. 02A512.
4. *Butenko A. V. et al.* The Heavy Ion Linac at the NICA Project // Proc. LINAC'14, Geneva, Switzerland, Aug.–Sept. 2014. THPP094. P. 1068–1070.
5. *Butenko A. V. et al.* NICA Booster: A New-Generation Superconducting Synchrotron // Phys. Usp. 2023. V. 66, No. 2. P. 195–212.
6. *Smirnov A. A., Kovalenko A. D.* Nuclotron — Superconducting Accelerator of Nuclei at LHE JINR // Part. Nucl. Lett. 2004. V. 1, No. 6(123). P. 11–40.
7. *Rassadov D. N., Boytsov A. Yu. et al.* Prospects for Using the Source of Krion-6T Multicharged Ions on the NICA Injection Complex: The Multiple Injection of Heavy Element Ions // Phys. Part. Nucl. Lett. 2024. V. 21, No. 3. P. 236–240.
8. *Donets E. D. et al.* Use of EBIS in the String Mode of Operation on the Nuclotron Facility in JINR // Rev. Sci. Instrum. 2004. V. 75. P. 1543–1545.
9. *Брызгунов М. И., Бублей А. В. и др.* Первые эксперименты по электронному охлаждению ионов в бустере NICA // Письма в ЭЧАЯ. 2024. Т. 21, № 3(254). С. 342–351.
10. *Butenko A. V. et al.* Commissioning of the New Heavy Ion Linac at the NICA Project // Proc. 25th Russ. Part. Accel. Conf. (RuPAC'16), St. Petersburg, Russia, Nov. 2016. FRCAMH03. P. 156–159.
11. <https://www.tomcorf.com/>

Получено 7 апреля 2025 г.