

СТАТУС КОМПЛЕКСА NICA

*А. В. Бутенко¹, О. И. Бровко, А. Р. Галимов, Б. В. Головенский,
Е. В. Горбачев, Е. Е. Донец, В. Н. Карпинский, С. А. Костромин,
В. А. Лебедев, К. А. Левтеров, И. Н. Мешков, В. В. Мялковский,
Д. Н. Никифоров, А. С. Сергеев, А. О. Сидорин, В. Л. Смирнов,
Е. М. Сыресин², Г. В. Трубников, А. В. Тузиков, Г. Г. Ходжибагиян,
М. М. Шандов*

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

В ОИЯИ ведется сооружение и монтаж ускорительного комплекса NICA, предназначенного для исследований плотной барионной материи и спиновой физики. Для формирования пучков тяжелых ионов с энергией 1–3,9 ГэВ/нуклон создан инжекционный комплекс коллайдера NICA. В состав комплекса входят два вновь созданных ускорителя: линейный ускоритель тяжелых ионов (ЛУТИ) и сверхпроводящий синхротрон бустер, а также модернизированный сверхпроводящий синхротрон — нуклотрон. Инжекционный комплекс обеспечивает формирование пучков для коллайдера NICA и экспериментов с выведенными пучками на фиксированных мишенях. Приведены результаты четвертого совместного сеанса ЛУТИ–бустер–нуклотрон в ходе экспериментов на фиксированных мишенях установки BM@N, а также обсуждается завершение сооружения оборудования и его монтаж в коллайдере NICA.

The NICA accelerator complex applied for the baryonic matter and spin physics researches is under construction and mounting at JINR at the present time. The NICA injection complex was constructed for the formation of the heavy ions with an energy of 1–3.9 GeV/u. The injection complex consists of two new accelerators: the Heavy Ion Linear ACcelerator (HILAC) and the superconducting synchrotron — the Booster, and the modernized superconducting synchrotron — the Nuclotron. These accelerators provide formation of the heavy ion beams for the NICA collider and the fixed-target experiments. The results of the fourth Booster–Nuclotron beam run are discussed for the fixed-target experiments on the BM@N setup. The collider equipment construction and mounting together with the plans of the first collider runs are also presented.

PACS: 25.75.–q; 29.20.db

ВВЕДЕНИЕ

В 2008 г. в ОИЯИ были начаты работы по проектированию нового ускорительного комплекса NICA (Nuclotron-based Ion Collider fAcility) [1–3]. Сооружение комплекса NICA имеет целью проведение экспериментальных исследований [3–5]:

¹E-mail: butenko@jinr.ru

²E-mail: esyresin@jinr.ru

- плотной барионной материи в столкновениях тяжелых ядер в области релятивистских энергий $\sqrt{s} = 4-11$ 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;
- прикладных исследований, направленных на взаимодействие ионных пучков с различными материалами и биологическими (в том числе живыми) организмами.

Ускорительный комплекс NICA [3] включает в себя две инжекционные цепочки: одну для формирования пучков тяжелых ионов, другую для формирования пучков поляризованных протонов, дейтронов и легких ионов. В состав нового инжекционного комплекса входят линейные ускорители, бустер, нуклотрон, каналы транспортировки пучков между ускорителями, а также каналы для экспериментов на фиксированных мишенях с выведенными пучками.

В ходе проведения экспериментов на фиксированных мишенях Short Range Correlation (SRC) и Barionic Matter at Nuclotron (BM@N) с новым инжекционным комплексом в 2023 г. была осуществлена первая стадия проекта NICA.

Вторая стадия проекта, выполняемая в настоящее время, включает монтаж оборудования колец коллайдера и подготовку экспериментов на детекторе MPD (Multi-Purpose Detector) на встречных пучках при светимости до 10^{27} см⁻²·с⁻¹ в столкновениях тяжелых ядер [5].

При выполнении третьей стадии проекта планируется сооружение SPD-детектора (Spin Polarized Physics Detector) и проведение исследований в области физики спина в столкновениях протонов (дейтронов) со светимостью до 10^{32} см⁻²·с⁻¹ [6].

1. ИНЖЕКЦИОННЫЙ КОМПЛЕКС КОЛЛАЙДЕРА NICA

Инжекционный комплекс, предназначенный для формирования пучков тяжелых ионов [3] с энергией 1–3,9 ГэВ/нуклон и интенсивностью на выходе из нуклотрона до 10^9 ионов за импульс, состоит из ионного источника на основе электронной «струны» «Крион-6Т» [7], нового линейного ускорителя тяжелых ионов [8], нового сверхпроводящего синхротрона бустера [9, 10] и модернизированного сверхпроводящего синхротрона нуклотрона [11]. Инжекционный комплекс коллайдера NICA для пучков тяжелых ионов решает две задачи: оптимизирует процесс накопления ионов в коллайдере и параметры пучков, выведенных из нуклотрона для экспериментов на фиксированных мишенях.

На инжекционном комплексе NICA в 2021–2023 гг. было проведено 4 пучковых сеанса, в течение которых выполнена отладка его основных систем, и настроен медленный вывод ускоренных ядер на мишени ядерно-физических экспериментов SRC и BM@N. Для этих экспериментов существенно модернизирован канал транспортировки пучков ВП1 из нуклотрона в детектор BM@N. В ходе этих сеансов проведено ускорение ионов He, C, Fe [10] и Xe [12].

В период сентября 2022 г. – февраля 2023 г. был проведен сеанс бустера–нуклотрона по исследованию барионной материи в детекторе BM@N. В ходе этого сеанса из ионного источника «Крион-6Т» выведен пучок ионов ксенона с суммарным зарядом 2,4 нКл, полной длительностью импульса 12–15 мкс, целевой зарядностью $^{124}\text{Xe}^{28+}$ и интенсивностью $1,2 \cdot 10^8$ частиц за импульс (рис. 1) [12].

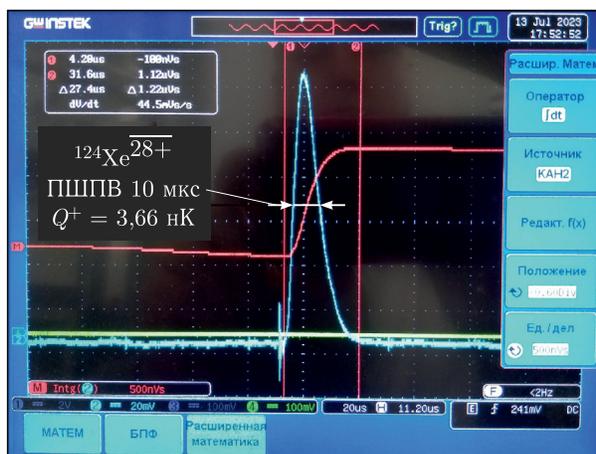


Рис. 1. Импульс тока пучка ионов ксенона на выходе из ионного источника «Крион-6Т», ПШПВ 10 мкс (полуширина на полувысоте), $Q^+ = 3,66$ нКл — суммарный заряд ионов в источнике

Отметим, что полная длительность импульса тока из «Крион-6Т» в 1,5 раза превышает период обращения ионов в бустере после ускорения в ЛУТИ. Передний фронт импульса определяется ускоряющим электрическим полем в ионно-оптической структуре, формируемым для вывода ионов. Задний фронт определяется скоростью ухода ионов из трубчатых электродов ионно-оптической структуры, внутри которых отсутствует ускоряющее электрическое поле. С целью дальнейшей оптимизации параметров ионного источника предполагается изменить геометрию трубчатых электродов ионно-оптической системы путем формирования внутри них ускоряющего электрического поля, что значительно сократит задний фронт импульса тока пучка.

Проектная интенсивность выведенного пучка ионов висмута Bi^{35+} из источника должна составлять $2 \cdot 10^9$ частиц за импульс [3]. В ближайших сеансах планируется увеличение в два раза интенсивности целевой зарядности ионов $^{124}\text{Xe}^{28+}$ в пучке, выведенном из источника. Однако эта величина почти на порядок меньше проектной. Для достижения проектных параметров рассматривалась многократная инжекция в бустер с использованием электронного охлаждения [13]. Первые эксперименты по электронному охлаждению ионов в бустере NICA дали обнадеживающие результаты [14, 15].

Цикл формирования ионных пучков для экспериментов SRC и VM@N и, в дальнейшем, для накопления ионов в коллайдере обрабатывался в третьем и четвертом сеансах на инжекционном комплексе NICA.

В «Крион-6Т» были сформированы и инжектированы в ЛУТИ пучки ионов ксенона с несколькими зарядностями. На выходе из секции ЛУТИ с квадрупольной фокусировкой ток многокомпонентного пучка ионов ксенона составил 200 мкА (рис. 2, кривая 1). На выходе из ЛУТИ ток ионов ксенона равен 65 мкА (рис. 2, кривая 2). Количество ионов $^{124}\text{Xe}^{28+}$, ускоренных в ЛУТИ до энергии 3,2 МэВ/нуклон, составило около $5 \cdot 10^7$.

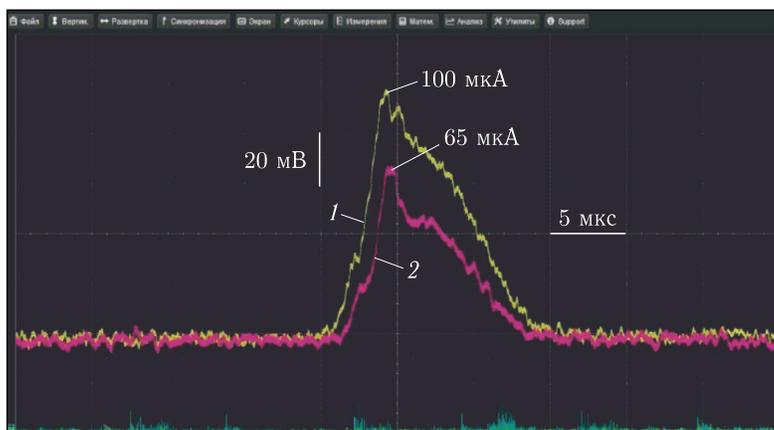


Рис. 2. Сигналы с трансформатора тока для ионов ксенона на выходе из секции с квадрупольной фокусировкой линейного ускорителя ЛУТИ (кривая 1) и его полной структуры (кривая 2)

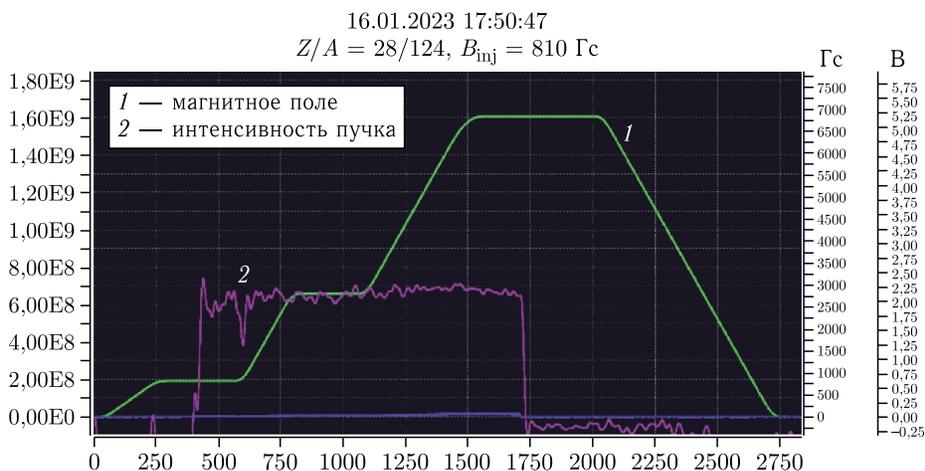


Рис. 3. Результаты измерения количества ионов с помощью параметрического трансформатора тока интенсивности пучка $^{124}\text{Xe}^{28+}$, циркулирующего в бустере при его инжекции, группировке и ускорении. Кривая 1 — магнитное поле [Гс]; кривая 2 — количество циркулирующих частиц

Из ЛУТИ в бустер инжектируются ионы $^{124}\text{Xe}^{28+}$, где они ускоряются до энергии 204,5 МэВ/нуклон, затем полностью обдираются на выходе из бустера и выводятся в нуклотрон (рис. 3). Максимальное количество ионов $^{124}\text{Xe}^{28+}$, ускоренных в бустере до энергии вывода, составляло $2,5 \cdot 10^7$ ионов. При незначительных потерях на первом столе магнитного поля бустера пучок ионов ксенона был ускорен до энергии 65 МэВ/нуклон. На этой энергии пучок был разгруппирован и снова сгруппирован уже на первой гармонике, после чего ускорен до энергии 204,5 МэВ/нуклон при темпе роста магнитного поля $dB/dt = 1,2 \text{ Тл/с}$. В ходе ускорения ионов до их максимальной энергии практически не наблюдалось потерь ионов (см. рис. 3).

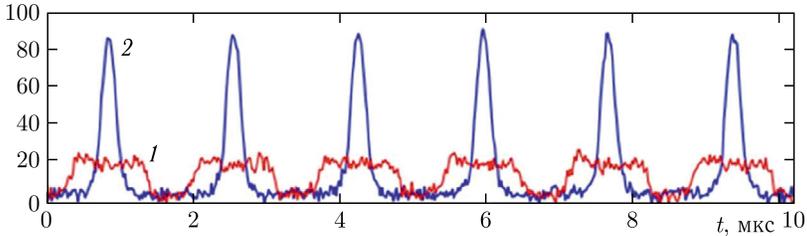


Рис. 4. Профиль сгустка ионов $^{124}\text{Xe}^{28+}$ при выключенном (кривая 1) и при включенном (кривая 2) электронном охлаждении на плато инжекции в бустере. Ток электронного пучка — 50 мА

Исследования электронного охлаждения пучка ионов в бустере проводились во время второго [15] и четвертого [14] сеансов на энергии инжекции ионов железа $^{56}\text{Fe}^{14+}$ и ксенона $^{124}\text{Xe}^{28+}$ соответственно. Во время четвертого сеанса ускорение ионов $^{124}\text{Xe}^{28+}$ начиналось примерно через 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 (рис. 4). Продольное время охлаждения ионного пучка составило $\tau = (67,1 \pm 8,1)$ мс.

Для регистрации эффекта поперечного охлаждения ионов в бустере использовался люминофорный экран в канале вывода, который позволяет получить изображение поперечного распределения интенсивности пучка после его ускорения при переводе в нуклотрон. Поперечное охлаждение ионного пучка уменьшает его поперечный размер (Full Width on Half Maximum — FWHM) с 7,8 мм в горизонтальном направлении и 5,4 мм в вертикальном до 3,3 и 1,6 мм соответственно (рис. 5).

Уменьшение поперечных размеров пучка при инжекции из бустера в нуклотрон сопровождалось снижением его потерь, в результате чего интенсивность пучка, выведенного из нуклотрона для экспериментов ВМ@N, была увеличена вдвое и достигла величины 10^7 ядер $^{124}\text{Xe}^{54+}$ за импульс (рис. 6).

Ядра $^{124}\text{Xe}^{54+}$ ускорялись в нуклотроне до энергии 3,9 ГэВ/нуклон с интенсивностью циркулирующего пучка более 10^7 при использовании системы электронного охлаждения в бустере. Около $(5-8) \cdot 10^6$ ядер $^{124}\text{Xe}^{54+}$ было ускорено в нуклотроне без электронного охлаждения в бустере. Эффективность обдирки на мишени ионов ксенона $^{124}\text{Xe}^{28+}$ до ядер составила около 80%, эффективность инжекции в нукло-



Рис. 5. Поперечные профили ионного пучка на люминофоре без охлаждения (слева) и с охлаждением (справа)

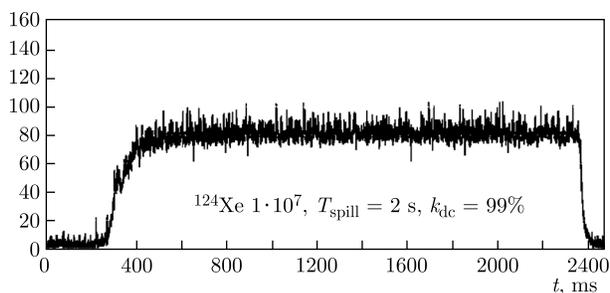


Рис. 6. Зависимость от времени интенсивности выведенного из нуклотрона пучка ядер ксенона

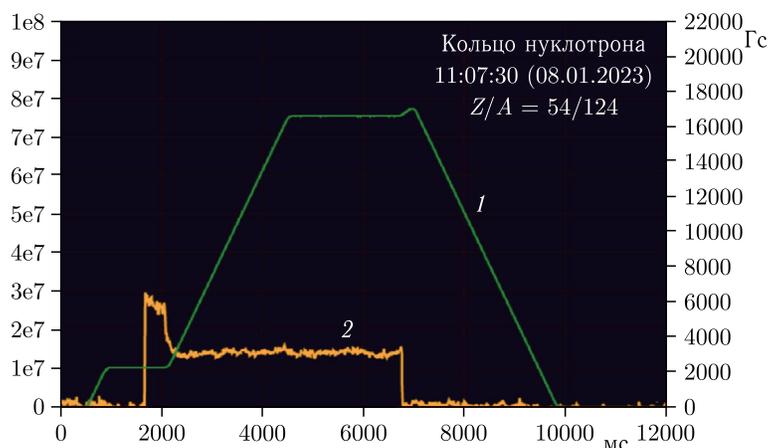


Рис. 7. Результаты измерения интенсивности циркулирующего в нуклотроне пучка ядер $^{124}\text{Xe}^{54+}$ с помощью параметрического трансформатора тока. Кривая 1 — величина магнитного поля [Гс]; кривая 2 — количество циркулирующих частиц

трон была близка к 50% из-за роста продольного эмиттанса пучка при ускорении ионов в бустере, а эффективность захвата при ускорении в нуклотроне была около 70% (рис. 7).

Количество ускоренных ядер $^{124}\text{Xe}^{54+}$ в этом сеансе было на три порядка выше, чем в первом сеансе по ускорению ионов ксенона, проведенном в 2010 г. Количество ядер $^{124}\text{Xe}^{54+}$ было ускорено в соответствии с требованиями эксперимента VM@N, в котором допустимая максимальная частота регистрации и обработки событий не превышает $8,5 \cdot 10^5$ Гц.

Завершена разработка конструкторской документации секции вывода пучка из нуклотрона в коллайдер и начато изготовление ее элементов. Ключевым из них является магнит Ламбертсона.

2. КОЛЛАЙДЕР NICA

Монтаж магнитных элементов арок коллайдера был начат в декабре 2021 г. Все дипольные магниты и линзы арок собраны и протестированы на криогенных стендах. Большинство магнитных элементов арок установлено в туннеле коллайдера (рис. 8).



Рис. 8. Восточная арка магнитов коллайдера NICA

Установлены четыре станции системы ВЧ2 и одна станция системы ВЧ1. Монтаж остальных станций систем ВЧ2 и ВЧ1 запланирован на конец 2023 г.

Завершена разработка конструкторской документации системы инъекции в коллайдер, включая кикерный и септумный магниты. Изготовление криостатной системы этих магнитов планируется в ОИЯИ, пучковые камеры вместе с элементами импульсных магнитов будут изготовлены в ИЯФ СО РАН им. Г. И. Будкера. Монтаж секции инъекции запланирован на лето 2024 г.

Оборудование канала транспортировки пучка из нуклотрона в коллайдер изготовлено французской фирмой «СигмаФи». Магниты и линзы канала были поставлены в ОИЯИ в 2021 г., источники питания к ним, корректирующие магниты, вакуумные камеры и подставки изготовлены, однако они до сих пор не поставлены и находятся во Франции. По причине невозможности транспортировки этого оборудования начато его изготовление в России. Завершение изготовления этого оборудования запланировано на лето 2024 г.

Технологический сеанс по запуску криомагнитной системы запланирован на осень 2024 г. В ходе этого сеанса планируется запуск и тестирование криогенной системы, криомагнитной системы, системы питания магнитов и линз, формирование цикла магнитного поля, системы термометрии, системы защиты и эвакуации энергии, системы питания корректоров, вакуумных систем изоляционного объема и пучковой вакуумной камеры, системы контроля и управления.

В первых пучковых сеансах, планируемых в конце 2024 г. – начало 2025 г., коллайдер NICA должен будет обеспечить столкновения пучков ядер тяжелых элементов, таких как $^{124}\text{Xe}^{54+}$ или $^{209}\text{Bi}^{83+}$ с энергией в системе центра масс от 4 до 7 ГэВ/нуклон при средней светимости около $L = 10^{25} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ [16] (рис. 9). Максимальная светимость будет ограничена интенсивностью ионов, накопленных в коллайдере с помощью барьеров ВЧ1, которая в отсутствие системы электронного охлаждения определяется

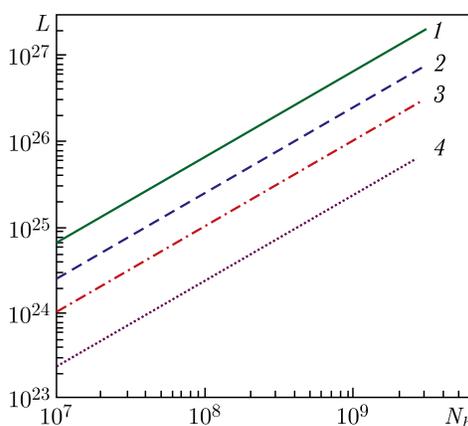


Рис. 9. Зависимость светимости от числа ионов в сгустке для разных кинетических энергий ионов: кривая 1 — 4,5 ГэВ/нуклон; кривая 2 — 3 ГэВ/нуклон; кривая 3 — 2 ГэВ/нуклон; кривая 4 — 1 ГэВ/нуклон

продольным аксептансом этих барьеров. Запуск высоковольтной системы электронного охлаждения коллайдера запланирован на конец 2025 г. Максимальная кинетическая энергия ионов 2,5 ГэВ/нуклон в ходе первых сеансов коллайдера определяется установкой в секции вывода нуклотрона одного из двух планируемых магнитов Ламбертсона.

Благодарности. Авторы выражают глубокую благодарность коллегам из ОИЯИ, участвующим в сеансах с бустером и нуклотроном, а также всем сотрудникам ИЯФ им. Г. И. Будкера СО РАН и ОИЯИ, принявшим участие в работах по созданию оборудования бустера, нуклотрона и коллайдера NICA.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Trubnikov G., Agapov N., Alexandrov V., Butenko A., Donets E., Eliseev A., Fimushkin V., Filatov Yu., Govorov A., Karpinsky V., Katayama T., Kekelidze V., Khodzhbagiyani H., Kobets V., Kostromin S., Kovalenko A., Kozlov O., Kuznetsov A., Meshkov I., Mikhaylov V., Monchinsky V., Shevtsov V., Sidorin A., Sissakian A., Smirnov A., Sorin A., Toneev V., Volkov V., Zhabitsky V., Brovko O.* Project of the Nuclotron-Based Ion Collider Facility (NICA) at JINR // Proc. of "EPAC08", Genoa, Italy, 2008. WEPP029. P. 2581–2583.
2. *Kekelidze V., Lednicky R., Matveev V., Meshkov I., Sorin A., Trubnikov G.* NICA Project at JINR // Phys. Part. Nucl. Lett. 2012. V. 4–5. P. 521–526.
3. Технический проект ускорительного комплекса NICA / Под ред. И. Н. Мешкова, Г. В. Трубникова. Дубна, 2015.
4. *Kekelidze V. D., Lednicky R., Matveev V. A., Meshkov I. N., Sorin A. S., Trubnikov G. V.* Three Stages of the NICA Accelerator Complex // Eur. Phys. J. A. 2016. V. 52. P. 211.
5. *Агапов Н. Н., Кекелидзе В. Д., Коваленко А. Д., Ледницкий Р., Матвеев В. А., Мешков И. Н., Никитин В. А., Потребенников Ю. К., Сорин А. С., Трубников Г. В.* Релятивистская ядерная физика в ОИЯИ: от синхрофазотрона к коллайдеру NICA // УФН. 2016. Т. 186, № 4. С. 405–423.

6. Сыресин Е. М., Бутенко А. В., Зенкевич П. Р., Козлов О. С., Колокольчиков С. Д., Костромин С. А., Мешков И. Н., Митянина Н. В., Сеничев Ю. В., Сидорин А. О., Трубников Г. В. Формирование поляризованных протонных пучков в ускорительном комплексе NICA // ЭЧАЯ. 2021. Т. 52, вып. 5. С. 1305–1341.
7. Donets E. D., Donets E. E., Donets D. E., Lyuosev D. A., Ponkin D. O., Ramsdorf A. Yu., Boytsov A. Yu., Salnikov V. V., Shirikov I. V. ESIS Ions Injection, Holding and Extraction Control System // Eur. Phys. J. Conf. 2018. V. 177, No. 5. P. 08002.
8. Butenko A. V., Aleksandrov V. S., Donets E. E., Donets E. D., Donets D. E., Govorov A. I., Kobets V. V., Kovalenko A. D., Levtarov K. A., Monchinsky V. A., Meshkov I. N., Mikhailov V. A., Sidorin A. O., Trubnikov G. V., Kulevov T. V., Liakin D. The Heavy Ion Injector at the NICA Project // Proc. of "LINAC 14", Geneva, 2014. P. 1068–1070.
9. Volkov V., Meshkov I., Mikhailov V., Trubnikov G., Tuzikov A., Fateev A. Conceptual Design of the System of Heavy-Ion Injection into Booster of the NICA Accelerator Complex // Phys. Nucl. Lett. 2014. V. 11. P. 675.
10. Бутенко А. В., Бровко О. И., Галимов А. Р., Горбачев Е. В., Костромин С. А., Карпинский В. Н., Мешков И. Н., Мончинский В. А., Сидорин А. О., Сыресин Е. М., Трубников Г. В., Тузиков А. В., Филиппов А. В., Ходжибагиян Г. Г. Бустер комплекса NICA: сверхпроводящий синхротрон нового поколения // УФН. 2023. Т. 193, № 2. С. 206–225.
11. Бутенко А. В., Говоров А. И., Донец Д. Е., Донец Е. Д., Донец Е. Е., Левтаров К. А., Мончинский В. А., Сидорин А. О., Трубников Г. В., Фимушкин В. В. Модернизация инжекционного комплекса нуклотрон // Письма в ЭЧАЯ. 2012. Т. 9, № 4–5(174–175). С. 654–665.
12. Brovko O. I., Butenko A. V., Galimov A. P., Gorbachev E. B., Donets E. E., Khodzhibagiyan H. G., Kekelidze V. D., Kostromin S. A., Lebedev V. A., Meshkov I. N., Sidorin A. O., Shandov M. M., Smirnov V. L., Syresin E. M., Trubnikov G. V., Tuzikov A. V. NICA Ion Collider and Its Acceleration Complex // Proc. of IPAC'23, Venezia, Italy, June 2023. P. 616–619.
13. Сыресин Е. М. Инжекция в бустер NICA с электронным охлаждением // Письма в ЭЧАЯ. 2015. Т. 12, № 4(195). С. 591–596.
14. Брызгунов М. И., Бублей А. В., Лебедев В. А., Мешков И. Н., Осипов К. Г., Пархомчук В. В., Прокофьевич Ю. В., Рева В. Б., Сергеев А. С., Семёнов С. В., Тимонин Р. В., Шпаков В. С. Первые эксперименты по электронному охлаждению ионов в бустере NICA // Письма в ЭЧАЯ. 2024. Т. 21, № 3(254) (в печати).
15. 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 COOL21, Novosibirsk, Russia, 2021. P. 1–5; doi:10.18429/JACoW-COOL2021-S101.
16. Syresin E., Brovko O., Butenko A., Galimov A., Gorbachev E., Kekelidze V., Khodzhibagiyan H., Kostromin S., Lebedev V., Meshkov I., Philippov A., Sidorin A., Trubnikov G., Tuzikov A. NICA Ion Collider and Plans of Its First Operation // Proc. of IPAC'22, Bangkok, June 2022. P. 1819–1821; doi: 10.18429/JACoW-IPAC2022-WEPOPT001.

Получено 15 сентября 2023 г.