

*А. О. Сидорин*

## Итоги четвертого этапа пусконаладочных работ на комплексе NICA

В период с 20 сентября 2022 г. по 3 февраля 2023 г. состоялся 4-й этап пусконаладочных работ на ускорительном комплексе NICA, задачей которого являлась отработка режимов совместной работы всех элементов тяжелоионной инжекционной цепочки коллайдера: прототипа специализированного источника тяжелых ионов «Крион», линейного ускорителя тяжелых ионов и двух сверхпроводящих синхротронов — бустера и нуклотрона. Полная продолжительность сеанса составила 3250 часов. Основная часть этого времени была посвящена развитию ускорительного комплекса, и около 700 часов заняли работы по программе физических экспериментов.

Подготовка к сеансу началась в апреле 2022 г. с установки источника «Крион-6Т» на высоковольтной платформе форинжектора линейного ускорителя. Параллельно с оптимизацией режимов генерации и ускорения тяжелых ионов была проведена модификация магнитно-криостатной системы нуклотрона.

Ускоряющая высокочастотная станция была перенесена в другую прямолинейную секцию кольца — подготовлено место для установки в будущем элементов системы быстрого вывода пучка для инъекции в коллайдер, заменена одна из структурных квадрупольных линз. На основе результатов весеннего сеанса была оптимизирована работа сателлитного рефрижератора в системе криогенного обеспечения бустера. Вакуумная система каналов выведенного пучка была подготовлена к модернизации, завершённой уже в ходе сеанса.

На начальном этапе сеанса проводилось ускорение ионов аргона. Оптимизировались режимы работы линейного ускорителя и бустера, а также было проведено облучение микросхем на станции СОЧИ. Затем комплекс был настроен на ускорение и вывод ионов ксенона.

В ходе сеанса существенное развитие получили практически все системы комплекса: реализована динамическая коррекция орбиты пучка в бустере, иссле-

*А. О. Сидорин*

## Results of the 4th Stage of Commissioning Works at NICA

From 20 September 2022 to 3 February 2023, the fourth commissioning run at the NICA Accelerator Complex was held. The project team worked out the conditions of joint operation of all the elements of the collider's heavy-ion injection chain: a prototype of the specialized heavy-ion source KRION, the linear heavy-ion accelerator, and two superconducting synchrotrons, namely, the Booster and the Nuclotron. The facilities operated for 3250 hours. Most of the beam time was devoted to the development of the accelerator complex and about 700 hours to physics experiments.

Preparation for the run began in April 2022 with the installation of the KRION-6T source on the high-voltage platform of the linear accelerator foreinjector. Together with the optimization of the modes of production and acceleration of heavy ions, the magnet cryostat system of the Nuclotron was modified. The accelerating RF station was relocated to another straight section of the ring. A place was prepared for the installation of elements of the fast

beam extraction system for injection into the collider in the future. One of the structural quadrupole lenses was replaced. Based on the results of the spring run, the operation of the satellite refrigerator in the Booster cryogenic support system was optimized. The vacuum system of the extracted beam channels was prepared for the upgrade, which was already completed during the run.

At the initial stage of the run, argon ions were accelerated. Employees optimized the operating modes of the linear accelerator and the Booster and irradiated microchips at the SOCHI (Station Of Chip Irradiation) station. Then the configuration of the complex was tuned for accelerating and extracting xenon ions.

Almost all systems of the complex were significantly developed during the run: a dynamic correction of the beam orbit in the Booster was put into operation; the modes of ion recharge during extraction from the Booster were studied; operating conditions of accelerating RF systems were optimized; radiotechnical parameters of the proto-

дованы режимы перезарядки ионов при выводе из бустера, оптимизировались режимы работы ускоряющих высокочастотных систем, исследованы радиотехнические характеристики прототипа пикапа системы стохастического охлаждения коллайдера, установленного в «теплой» секции нуклотрона. Одним из важнейших результатов явилось уточнение стратегии получения интенсивных пучков тяжелых ионов для последующей инъекции в коллайдер.

Перед завершением модернизации вакуумной системы ионопровода канала выведенного пучка релятивистскими ядрами ксенона были облучены ядерные фотоэмульсии и пластинка CR-39. Были измерены спектры в оптическом диапазоне переходного и черенковского излучения при прохождении релятивистского пучка через тонкую алмазную мишень под разными углами, что в дальнейшем позволит создать новый детектор пучков ионов в энергетическом диапазоне нуклотрона.

В результате оптимизации работы всех систем достигнута рекордная для нуклотрона интенсивность пучка ядер ксенона (свыше  $10^7$  ядер за цикл), ускоренных до энергии 3,9 ГэВ/нуклон. Более месяца ускорительный комплекс стабильно отработал на эксперимент BM@N, на энергии 3,9 ГэВ/нуклон было запи-

сано примерно 500 млн событий и еще примерно 50 миллионов — на энергии 3 ГэВ/нуклон.

Параллельно с набором статистики на установке BM@N в фоновом режиме проведен широкий цикл исследований по программе коллаборации ARIADNA. На мишени BM@N оптикой канала был сформирован пучок с очень малой расходимостью, что позволило располагать образцы для облучения перед поглотителем пучка. Последовательно исследовались защитные свойства, радиационная стойкость и радиомодификация новых композитных материалов для космической отрасли, радиационные модификации в сапфирах ( $Al_2O_3$ ), политетрафторэтиленовых, полиэтилентерефталатных, полиэтиленовых и полиамидных пленках. Проведено облучение ВТСП лент с целью изучения возможности повышения критического тока. В рамках программы «Plants and Vegetation in Space» облучены 16 контейнеров с семенами горчицы, салата, укропа и индау. Проводился активационный анализ материалов при облучении релятивистскими тяжелыми ионами. На установке СОЧИ было проведено облучение ионами ксенона терморadiационно-модифицированных политетрафторэтиленовых (ТРМ-ПТФЭ) пленок.

type pick-up of the collider's stochastic cooling system installed at the Nuclotron's "warm" gap were studied. One of the crucial results was the development of a strategy for obtaining intense beams of heavy ions for subsequent injection into the collider.

Before the upgrade of the vacuum system of the ion pipe for the extracted beam channel was completed, nuclear photoemulsions and the CR-39 plate were irradiated with relativistic xenon nuclei. The spectra in the optical range of transition and Cherenkov radiation were measured during the passage of a relativistic xenon beam through a thin diamond target at different angles, which in the future will allow constructing a new detector of ion beams in the energy range of the Nuclotron.

Optimization of operation of all systems resulted in achieving a record for the Nuclotron intensity of the Xe beam (up to  $10^7$  nuclei per cycle) accelerated to an energy of 3.9 GeV/nucleon. For more than a month, the accelerator complex was operating stably for the BM@N experiment. About half a billion events were recorded at an energy of 3.9 GeV/nucleon, and about 50 million events at an energy of 3 GeV/nucleon.

Within the operation of the BM@N facility, a wide range of research under the ARIADNA collaboration programme was performed. A beam with a very small divergence was formed on the BM@N target by the optics of the channel, which made it possible to place samples for irradiation in front of the beam absorber. Specialists successively studied protective properties, radiation resistance and radiation modification of new composite materials for the space industry — radiation modifications in sapphires ( $Al_2O_3$ ), PTFE, PET, PE and PI films. HTSP tapes were irradiated in order to study the possibility of increasing the critical current. Within the framework of the programme "Plants and Vegetation in Space", 16 containers with mustard, lettuce, dill and indau (arugula) seeds were irradiated. Activation analysis of materials under irradiation with relativistic heavy ions was carried out. Thermoradiationally modified polytetrafluoroethylene (TRM-PTFE) films were irradiated with xenon ions at the SOCHI station.

The interaction of the Xe beam with the Nuclotron internal targets made of tungsten and silver was studied at two energies.

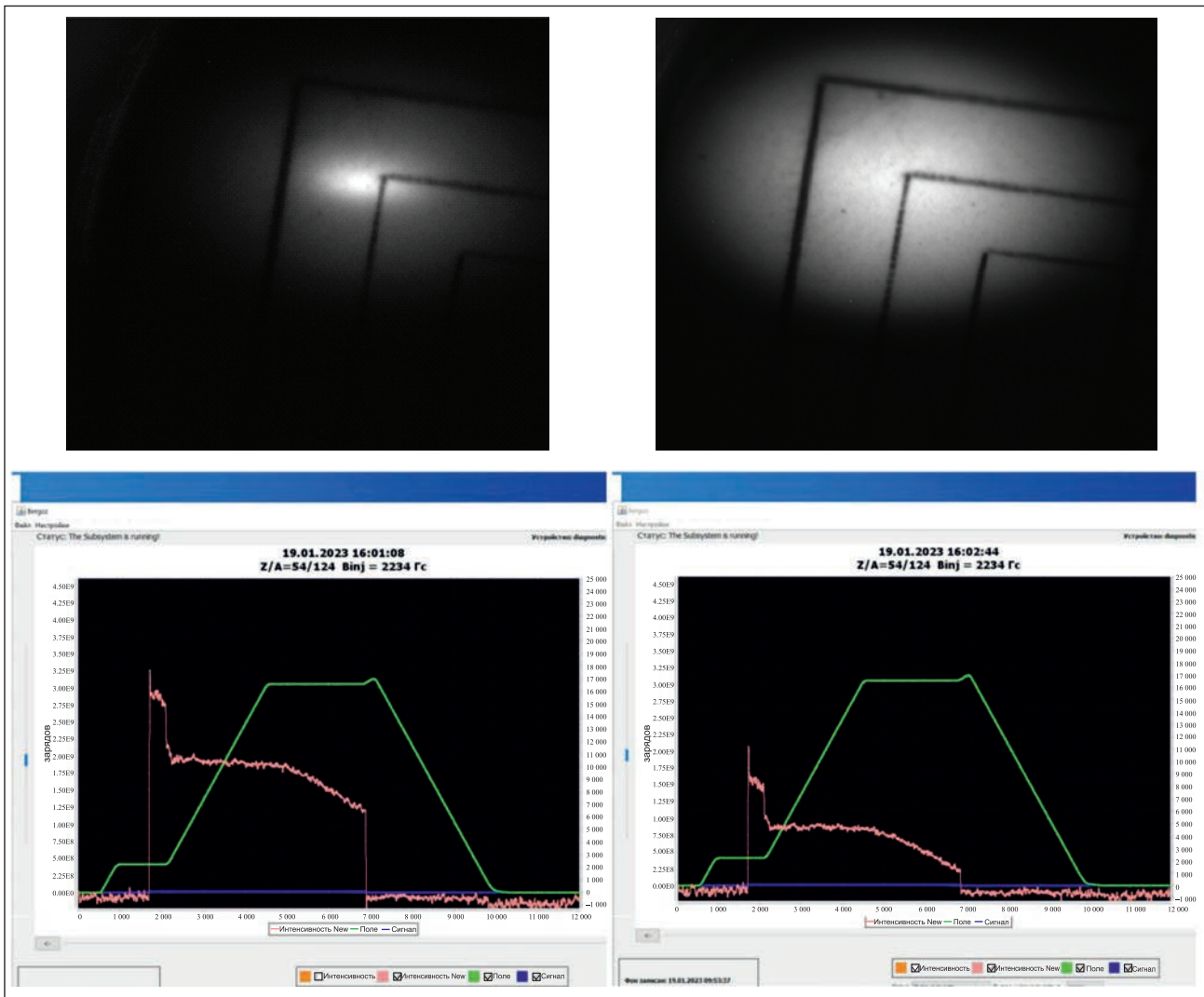
One of the most striking physics achievements of this run was the optimization of the operation mode of

При двух энергиях проведены исследования взаимодействия пучка ксенона с внутренними мишенями нуклотрона из вольфрама и серебра.

Одним из наиболее ярких физических достижений сеанса явилась оптимизация режима работы системы электронного охлаждения бустера, что привело к уменьшению поперечных размеров и энергетического разброса пучка на выходе из бустера и, как

следствие, к двукратному увеличению интенсивности пучка, ускоренного в нуклотроне (см. рисунок). Метод электронного охлаждения, предложенный и впервые реализованный в ИЯФ им. Г.И. Будкера, нашел применение во многих зарубежных научных центрах. В истории российской науки электронное охлаждение в ядерно-физическом эксперименте использовалось впервые.

Вверху: профиль пучка на люминофоре в канале перевода пучка из бустера в нуклотрон; внизу: интенсивность пучка при ускорении в нуклотроне — при включенном (слева) и выключенном (справа) электронном охлаждении



The beam profile on the phosphor screen in the Booster–Nuclotron transport channel (upper photos) and the beam intensity during acceleration in the Nuclotron (lower graphs) with electron cooling on (left) and off (right)

the Booster’s electron cooling system. This led to a decrease in the transverse dimensions and energy spread of the beam at the output from the Booster, and, as a consequence, to a twofold increase in the intensity of the beam accelerated in the Nuclotron (figure). The electron cool-

ing method proposed and first implemented at the Budker Institute of Nuclear Physics has been applied in many foreign scientific centres. In the history of Russian science, electron cooling was used in a nuclear physics experiment for the first time.