

A. O. Сидорин

Физический пуск бустера ускорительного комплекса NICA

В конце 2020 г. был успешно проведен первый сеанс работы с пучком бустера комплекса NICA, завершивший длительный процесс проектирования и изготовления этой установки.

Еще в начале 1980-х гг. в Лаборатории высоких энергий был разработан проект ускорительного комплекса тяжелых ионов (УКТИ) для обеспечения перспективных исследований в области релятивистской ядерной физики. Он включал в себя сверхпроводящий синхротрон нуклотрон, накопительное кольцо — бустер и новый линейный ускоритель. Первый из этих трех элементов, нуклотрон, вступил в строй в марте 1993 г. и работает с тех пор на физический эксперимент. В ходе эксплуатации нуклотрона неоднократно возвращались к проекту создания бустера, основной задачей которого являлось получение высоких интенсивностей ускоренных пучков тяжелых ионов. Свой современный вид бустер приобрел в ходе разработки и

реализации проекта ускорительного комплекса NICA, в структуре которого он играет одну из ключевых ролей. В его задачу входит обеспечение интенсивности и качества пучков ионов от дейтерия и гелия до урана, требуемых для реализации обширной программы исследований как на фиксированных мишенях, так и в режиме столкновений встречных пучков в коллайдере. Подобная задача, впервые решаемая в России, потребовала и существенного развития использованных ранее ускорительных технологий, и разработки новых оригинальных решений.

Перекрыть весь диапазон сортов ионов планируется с использованием источников ионов трех типов: плазменного, лазерного и электронно-струнного (ESIS). При этом длительность импульса тока от источника варьируется от нескольких наносекунд (для лазерного источника) до 20–30 наносекунд (для электронно-струнного). Соответственно, система инжек-

A. O. Sidorin

Physical Launch of the NICA Booster

At the end of 2020, the first beam circulation in the NICA complex Booster was successfully obtained, which completed the lengthy process of designing and constructing this facility.

A project of the Heavy Ion Accelerator Complex (HIAC) was developed at the Laboratory of High Energies as far back as the early 1980s to provide advanced research in the field of relativistic nuclear physics. It included a superconducting synchrotron Nuclotron, a storage ring — the Booster, and a new linear accelerator. The first of these three elements, the Nuclotron, went into operation in March 1993 and since then has been operating for a physics experiment. During the operation of the Nuclotron, the project to construct the Booster was reviewed time and again, the main goal of which was to obtain high intensities of accelerated heavy-ion beams. The Booster acquired its present form during the development and implementation of the NICA accelerator complex project, in the structure of which the Booster plays one of the key roles. Its task is to ensure the intensity and quality of ion beams from deuterium and helium to uranium, required for the imple-

mentation of an extensive research programme, both on fixed targets and in the collision mode of colliding beams in the collider. Such a problem, being solved for the first time in Russia, required both a significant development of the previously used accelerator technologies and the development of new original solutions.

It is planned to cover the whole range of ion types using three types of ion sources: plasma, laser and electron string (ESIS). In this case, the duration of the current pulse from the source varies from several nanoseconds, for a laser source, to 20–30 nanoseconds, for an electron string one. Thus, the injection system of the Booster should provide both single-turn injection (for high-intensity ion beams from a laser source) and multiturn injection when operating with an electron string ion source, which also requires a large accelerator acceptance. When using a laser source, multiple repeated injection is also planned for a number of ions.

A cooling system is required to ensure high-quality beams. Tuning of various operating modes requires an advanced diagnostic system. The operation of such an accel-

ции бустера должна обеспечивать как обычную однооборотную инжекцию (для ионных пучков высокой интенсивности от лазерного источника), так и многооборотную инжекцию при работе с электронно-струнным источником, для реализации которой требуется также большой акцептанс ускорителя. При использовании лазерного источника для ряда ионов планируется и многократно повторяемая инжекция.

Для обеспечения высокого качества пучков необходимо применение методов охлаждения. Настройка различных режимов работы требует развитой системы диагностики. Работа такого ускорителя невозможна без современной системы автоматизированного управления.

С учетом этих требований в 2015 г. был разработан технический проект бустера, основными особенностями которого являются:

— использование сверхпроводящих магнитов типа «Нуклотрон» нового поколения;

— использование дипольных магнитов секторного типа для оптимального сочетания экономичности и обеспечения большой величины акцептанса ускорителя;

— оригинальная конструкция системы инжекции пучка, позволяющая реализовать любую из трех требуемых схем инжекции одним и тем же набором устройств;

— сверхвысокий вакуум в пучковой камере ускорителя, необходимый для ускорения не полностью ободанных тяжелых ионов с малым уровнем потерь;

— оптическая структура кольца, оптимизированная для применения метода электронного охлаждения пучков.

К концу 2019 г. было завершено изготовление основных систем и элементов бустера. Все элемен-

Рис. 1. Магнитно-криостатная система бустера в сборе



Fig. 1. Booster magnet-cryostat system in assembly

erator is impossible without a modern automated control system.

Taking into account these requirements, the Booster TDR was developed in 2015. Its main features are:

— use of the upgraded superconducting magnets of the Nuclotron type;

— use of the sector-type dipole magnets for an optimal combination of efficiency and ensuring a large acceptance of the accelerator;

— original design of the beam injection system, which makes it possible to implement any of the three required injection schemes with the same set of units;

— ultra-high vacuum conditions in the beam chamber, which are necessary to accelerate incompletely stripped heavy ions with minimum losses;

— optical structure of the ring, which is optimized for the application of the beam electron cooling method.

By the end of 2019, the production of the main systems and elements of the Booster had been completed. All elements of the magnet-cryostat system were transported to the tunnel (the Booster with a perimeter of 210 m is located inside the Synchrotron yoke). On 23 December 2019, a phased testing, assembly and commissioning of the facility systems began. The assembly of the magnet-cryostat system of the Booster had been completed by November 2020 (Fig. 1). All subsystems were installed and tested, the power supply system for the magnets was tested and tuned for operation at an equivalent load, and the beam transport channel from the linear accelerator was tuned and tested.

On 12 November, a run was launched to test the Booster systems when operating under superconductivity, beam injection and acceleration conditions. The programme and equipment, which could be used during the

ты магнитно-криостатной системы были перевезены в туннель (бустер периметром 210 м располагается внутри яма магнита синхрофазотрона). 23 декабря 2019 г. была начата процедура поэтапного тестирования, сборки и ввода в эксплуатацию систем установки. Сборка магнитно-криостатной системы бустера была завершена к ноябрю 2020 г. (рис. 1), все подсистемы установлены в штатное положение и протестированы, система электропитания магнитов была протестирована и настроена при работе на эквивалентную нагрузку, настроена и испытана линия транспортировки пучка из линейного ускорителя.

12 ноября был начат сеанс по тестированию систем бустера при работе в условиях сверхпроводимости, инжекции и ускорения пучка. В соответствии с задачами и временными ограничениями при подготовке определялись программа сеанса и состав оборудования бустера. Для инжекции частиц было решено использовать простейшую из разработанных схем — однократную однооборотную. Устройства системы вывода пучка хотя и были установлены на кольцо, но в сеансе не использовались. Система откачки пучковой камеры включала минимум вакуумных постов, необходимых, чтобы перейти техническую границу области сверхвысокого вакуума в 10^{-7} Па. Система ди-

агностики циркулирующего пучка также была смонтирована не в полном объеме. По временной схеме была собрана система криогенного обеспечения.

Особое внимание было уделено выбору сорта частиц для ускорения. Для измерения и настройки орбиты синхротрона сорт частиц принципиального значения не имеет, однако для простоты интерпретации результатов предпочтительно иметь однокомпонентный пучок, состоящий из ионов только одного сорта в одном зарядовом состоянии. Кроме того, для испытания линейного ускорителя желательно иметь отношение массового числа иона к зарядовому, достаточно близкое к максимальному проектному значению — 6,3. В конце концов выбор пал на ионы He^{1+} , для генерации которых был разработан специализированный источник плазменного типа.

Первый этап сеанса состоял в завершении сборки и испытаний изоляционного вакуумного объема и системы криогенного обеспечения. По результатам его выполнения 4 декабря было принято решение о начале охлаждения кольца. С этого момента была запущена АСУ бустера, введена в эксплуатацию система мониторинга, предназначенная для наблюдения за процессом криостатирования и включающая в себя систему термометрии. 12 декабря, в точном соответствии с на-

run of the Booster, were determined according to the goals and time constraints during the preparation process. For the injection of particles, it was decided to use the simplest of the developed schemes: single-turn injection. The units of the beam extraction system, although being installed on the ring, were not used in the run. The pump-out system of the beam chamber included a minimum of vacuum units required to achieve the technical breakpoint of the ultra-high vacuum range of 10^{-7} Pa. The circulating beam diagnostic system was also not fully assembled. A cryogenic support system was assembled according to the temporary scheme.

Special attention was paid to the selection of the type of particles for acceleration. For measuring and tuning the orbit of the synchrotron, the type of particles is not so important; however, for ease of the result interpretation, it is preferable to have a single-component beam consisting of only one type of ions in one charge state. In addition, for testing the linear accelerator, it is desirable to have the ratio of the ion mass number to the charge number close enough to the maximum design value of 6.3. In the end, He^{1+} ions were selected, for the generation of which a designated plasma-type source was developed.

The first stage of the run included the completion of the assembly and testing of the insulation vacuum volume and the cryogenic support system. On 4 December, based on the results of its implementation, it was decided to start cooling the ring. From that moment on, the Booster ACS was launched, a monitoring system designed to observe the cryostatting process, including a thermometry system, was put into operation. On 12 December, in strict compliance with the schedule, the magnet-cryostat system was cooled to a temperature of 4.5 K. Then tuning and putting into operation a system for detecting transitions to the normal conducting state, testing the energy evacuation system, tuning the cycle setting system and the power supply system for the Booster magnets were held. By this time, the linear accelerator and the beam transport channel to the Booster had already been set, and the injection system units had been brought to the design parameters. On 19 December, permission was granted to work with the beam.

As planned, the beam circulation mode was obtained without switching on the magnetic field error correction system (Fig. 2), while the deviations of the beam orbit from the nominal position in the horizontal plane did not exceed

меченным графиком, магнитно-криостатная система была охлаждена до температуры 4,5 К. Следующим шагом стала настройка и ввод в эксплуатацию системы детектирования переходов в нормально проводящую фазу, тестирование системы эвакуации энергии, настройка циклозадающей системы и системы электропитания магнитов бустера. К этому времени уже были настроены линейный ускоритель и канал транспортировки пучка в бустер, выведены на проектные параметры устройства системы инъекции. 19 декабря было получено разрешение на работу с пучком.

Как и планировалось, режим циркуляции пучка был получен без включения системы коррекции ошибок магнитного поля (рис.2), при этом отклонения орбиты пучка от номинального положения в горизонтальной плоскости не превышали ± 15 мм (несколько

Рис. 2. Первые обороты пучка в бустере, 19 декабря 2020 г.

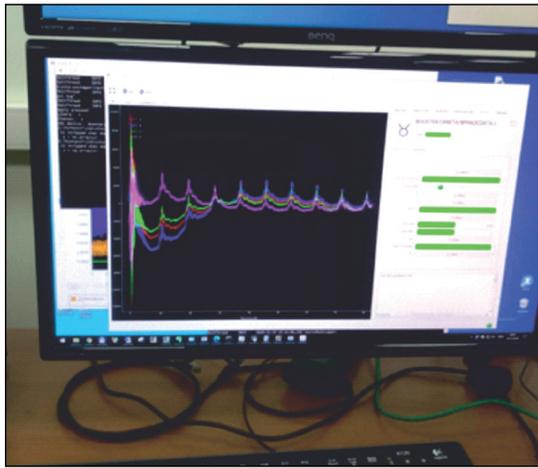


Fig. 2. First beam circulation in the Booster, 19 December 2020

± 15 mm (a few more in the vertical plane), almost exactly as in the calculations. And this is one of the most important results of the run, which is of crucial importance for the NICA and FAIR projects: the technology for the production, assembly and testing of magnets ensures the design parameters of the units. An additional indicator of the production quality of the magnet-cryostat system is the fact that during the run there was a stable operation of the system with a magnetic field cycle of about 400 h.

The run lasted until 30 December, and during this period, the following work was performed:

- the main systems for diagnostics of the circulating beam and the closed orbit correction system were consistently tested, the intensity of the circulating beam was ensured close to the design one;

- the high-frequency system was tuned, the adiabatic beam capture mode was tested in the acceleration mode,

больше в вертикальной плоскости), практически в точном соответствии с расчетами. И это один из важнейших результатов сеанса, имеющий принципиальное значение для проектов NICA и FAIR: разработанная технология производства, сборки и тестирования магнитов обеспечивает проектные характеристики устройств. Дополнительным показателем качества изготовления магнитно-криостатной системы является тот факт, что в ходе сеанса она стабильно отработала с циклом магнитного поля около 400 часов.

Сеанс продолжался до 30 декабря, и за этот период были выполнены следующие работы:

- последовательно протестированы основные системы диагностики циркулирующего пучка, система коррекции замкнутой орбиты, обеспечена интенсивность циркулирующего пучка, близкая к проектной;

- настроена высокочастотная система, протестирован режим адиабатического захвата пучка в режиме ускорения, обеспечено ускорение ионов до энергии 100 МэВ/нуклон;

- включена и протестирована система электронного охлаждения;

- системы питания магнитов, криогенная и магнитно-криостатная системы проверены при работе в цикле магнитного поля с проектными параметрами.

the acceleration of ions up to energy of 100 MeV/nucleon was ensured;

- the electron cooling system was switched on and tested;

- magnet power systems, cryogenic and magnet cryostat systems were tested when operating in a magnetic field cycle with design parameters.

The use of the orbit correction system together with the tuning of the beam transport channel from HILAC to the Booster and the tuning of the injection system units made it possible to achieve the beam intensity at the level of $7 \cdot 10^{10}$ of circulating He^{1+} ions (Fig. 3), which is equivalent in current to 10^9 Au^{31+} ions. The characteristic lifetime of ions due to recombination with molecules and atoms of the residual gas was approximately 1.3 s. Taking into account the cross sections of the recharging processes, this value corresponds to the residual gas pressure in the beam chambers at the level of $3 \div 6 \cdot 10^{-8}$ Pa, which corresponds to the readings of vacuum gauges and to the design value with the starting configuration of the pump-out system.

At the end of the run, a comprehensive testing of the magnet power systems, cryogenic and magnet-cryostat

Использование системы коррекции орбиты, совместно с настройкой канала транспортировки пучка из HILAS в бустер и настройкой устройств системы инжекции, позволило достичь интенсивности пучка на уровне $7 \cdot 10^{10}$ циркулирующих ионов He^{1+} (рис. 3), что по току эквивалентно 10^9 ионов Au^{31+} . Характерное время жизни ионов из-за взаимодействия с молекулами и атомами остаточного газа составило примерно 1,3 с. С учетом сечений процессов перезарядки это значение соответствует давлению остаточного газа в пучковых камерах на уровне $3 \div 6 \cdot 10^{-8}$ Па, что находится в хорошем согласии с показаниями вакуумметров и соответствует проектному значению при стартовой конфигурации системы откачки.

В завершение сеанса было проведено комплексное тестирование системы электропитания магнитов, кри-

огенной и магнитно-криостатной систем при работе в цикле магнитного поля с максимальными устойчиво достигаемыми параметрами. В результате был настроен цикл с двумя «столами» на участке растущего поля, соответствующими энергии инжекции и энергии электронного охлаждения, на третьем, верхнем «столе» было достигнуто поле 1,8 Тл, на участках роста и уменьшения поля был обеспечен темп изменения поля 1,2 Тл/с, что полностью соответствует проектным параметрам цикла.

Таким образом, все задачи сеанса были успешно решены. Следующий этап — сборка и ввод в эксплуатацию канала перевода пучка из бустера в нуклотрон. Начало экспериментов на фиксированных мишенях с использованием пучков обновленного ускорительного комплекса ЛФВЭ намечено на конец 2021 г.

Рис. 3. Результаты измерения интенсивности циркулирующего пучка с помощью параметрического трансформатора тока (ПТТ) при оптимальной настройке всех систем. Зеленая кривая — величина магнитного поля в гауссах; синяя — сигнал ПТТ; оранжевая — количество циркулирующих частиц. Время по горизонтальной оси — в миллисекундах

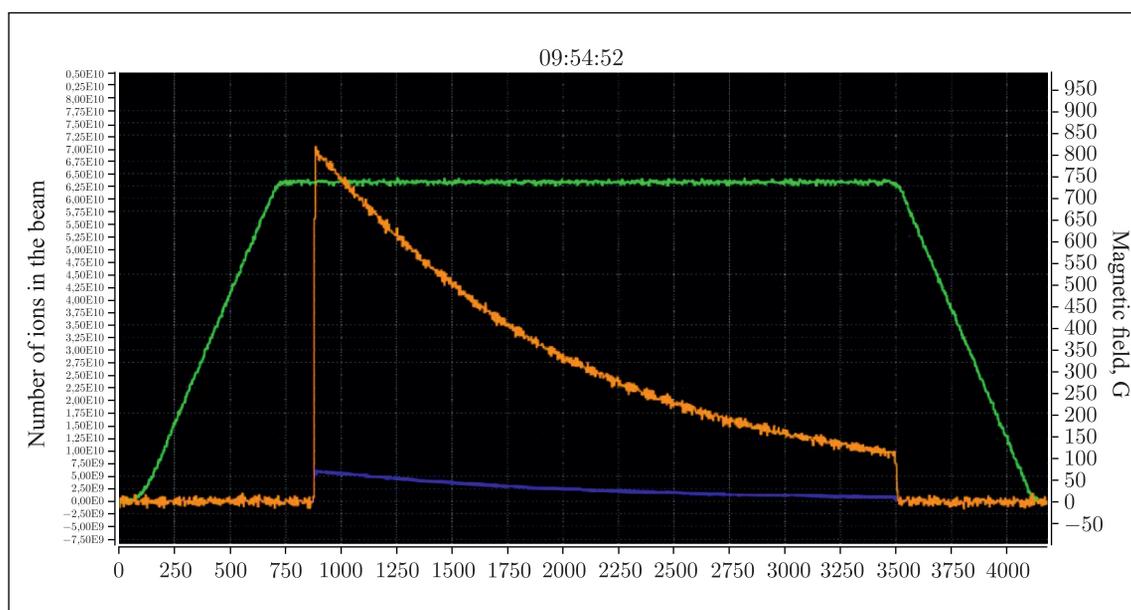


Fig. 3. Results of measuring the intensity of the circulating beam using a parametric power transformer (PPT) with optimum tuning of all systems. The green curve is the magnitude of the magnetic field in G, the blue curve is the PPT signal, and the orange curve is the number of circulating particles. Time along the horizontal axis is given in milliseconds

systems was carried out during operation in a magnetic field cycle with the maximum consistently achievable parameters. As a result, a cycle with two “plateaus” corresponding to the injection energy and the energy of electron cooling was set in the area of the increasing field. A field of 1.8 T was achieved on the upper “plateau”, and a rate of field change of 1.2 T/s was ensured in the areas of increase and decrease in the field, which fully corresponds to the design parameters of the cycle.

Therefore, all tasks of the run have been successfully completed. In the near future, it is planned to assemble and commission the beam transport channel from the Booster to the Nuclotron. The start of experiments on fixed targets using beams of the upgraded VBLHEP accelerator complex is scheduled for the end of 2021.