

*А. О. Сидорин*

## Развитие комплекса NICA

После успешного тестирования основных систем бустера в декабре 2020 г. активно велись работы по подготовке ускорительного комплекса ЛФВЭ к реализации программы исследований на пучках нуклотрона. К сентябрю 2021 г. был завершен монтаж канала перевода пучка из бустера в нуклотрон. Тестирование всех его систем и настройка режимов, необходимых для перевода пучка в нуклотрон, являлись основной задачей сеанса работы бустера в период с 6 по 24 сентября. В этом сеансе настройка систем бустера была проведена так же, как и в первом сеансе, — на ионах  $\text{He}^{1+}$ , а затем был осуществлен переход на лазерный источник, режим которого был оптимизирован для генерации пучка ионов  $^{56}\text{Fe}^{14+}$ .

По сравнению с первым сеансом давление остаточного газа в пучковой камере бустера было существенно уменьшено. Время жизни ионов  $^4\text{He}^{1+}$  на «столе» инжекции составило более 10 с (вместо 1,3 с в первом сеансе), а ионов  $^{56}\text{Fe}^{14+}$  — более 5 с, что соответствует примерно среднему по орбите давлению — около

$5 \cdot 10^{-9}$  Па. Потери ионов  $^{56}\text{Fe}^{14+}$  при энергии инжекции из-за взаимодействия с остаточным газом составляли 1–2% при интенсивности пучка до  $4 \cdot 10^9$  ионов.

На пучке ионов  $^{56}\text{Fe}^{14+}$  был осуществлен адиабатический захват в режим ускорения на пятой гармонике ускоряющего поля с эффективностью более 95%. Практически без потерь пучок был ускорен до энергии 65 МэВ/нуклон. В соответствии с проектным циклом бустера при этой энергии пучок был разгруппирован и снова сгруппирован уже на первой гармонике, после чего ускорен до проектной энергии 578 МэВ/нуклон при темпе роста магнитного поля  $dB/dt = 1,2$  Тл/с. Затем была отлажена система управляемого локального смещения орбиты при выводе пучка, и ускоренный пучок был выведен из бустера и проведен по каналу до входа в нуклотрон с суммарной эффективностью вывода и транспортировки пучка около 70%.

Важным научным результатом сеанса стали настройка системы электронного охлаждения и реализация электронного охлаждения ионов железа.

*А. О. Сидорин*

## Development of the NICA Complex

After successful testing of the main Booster systems in December 2020, we have been actively working to prepare the VBLHEP accelerator complex for the implementation of the research programme at the Nuclotron beams. By September 2021, we had completed the installation of the beam transport channel from the Booster to the Nuclotron. Testing all its systems and tuning the modes necessary for transporting the beam to the Nuclotron was the primary goal of the Booster run carried out from September 6 to 24. During this run, we adjusted the Booster systems in the same way as for the first run with  $\text{He}^{1+}$  ions. Then we changed the source to the laser one, the mode of which was optimized for producing the  $^{56}\text{Fe}^{14+}$  ion beam.

Compared to the first run, the residual gas pressure in the Booster beam chamber was significantly reduced. The lifetime of  $^4\text{He}^{1+}$  ions at the injection plateau was more than 10 s (instead of 1.3 s during the first run), and the lifetime of  $^{56}\text{Fe}^{14+}$  ions was more than 5 s, which corresponds to approximately the average orbital pressure of about  $5 \cdot 10^{-9}$  Pa. Due to the interaction with the residual gas, the

losses of  $^{56}\text{Fe}^{14+}$  ions at the injection energy were 1–2% at the beam intensity of  $4 \cdot 10^9$  ions.

We successfully implemented the adiabatic capture of the  $^{56}\text{Fe}^{14+}$  ion beam in acceleration at the fifth harmonic of the accelerating field with an efficiency of more than 95%. The beam was accelerated to an energy of 65 MeV/nucleon with almost no ion losses. According to the Booster project cycle, at this energy, the beam was debunched and then bunched again at the first harmonic. After that, we accelerated it to the design energy of 578 MeV/nucleon at the ramping rate of the magnetic field  $dB/dt = 1.2$  T/s. Then we debugged the system of controlled local displacement of the orbit at the beam extraction, and the accelerated beam was extracted from the Booster and transported through the channel to the Nuclotron with a total efficiency of beam extraction and transportation of about 70%.

An important scientific outcome of the run was tuning of the electron cooling system and implementation of electron cooling of iron ions. To implement this, we initially adjusted the circulating beam orbit when we increased the

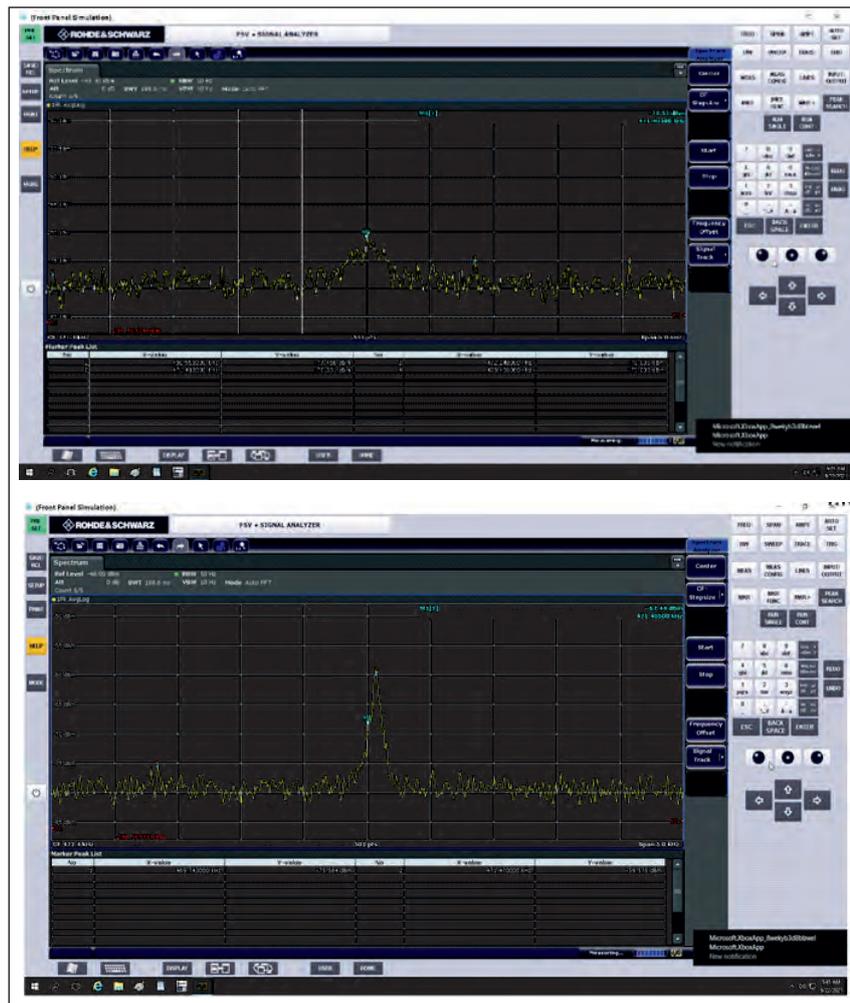


Рис. 1. Измеренный спектр дробового шума пучка (шума Шоттки) на 4-й гармонике частоты обращения ионов перед охлаждением (сверху) и после охлаждения (снизу)

Fig. 1. Measured spectrum of the Schottky noise of the beam at the 4th harmonic of the ion circulation frequency before cooling (top) and after cooling (bottom)

field of the solenoid in the cooling section to 700 G. With the solenoid operating, we accelerated the beam. There were no additional losses. Then we provided the recuperation of the electron beam with a current of up to 160 mA. We carried out the diagnostics of the cooling process by measuring the Schottky noise of the beam, using one of the standard beam position sensors and an ionization profilometer based on micro-channel plates. Fine tuning of the electron energy and optimization of the mutual position of the electron and ion beams have resulted in the implementation of ion cooling at the injection energy. The mean-square relative momentum distribution of ions during the injection was about  $5 \cdot 10^{-4}$ . As a result of the cooling, it was reduced to about  $1.7 \cdot 10^{-4}$  (Fig. 1). The characteristic cooling time of the longitudinal degree of freedom was approximately 0.2 s. In addition, we recorded a decrease in the width of horizontal and vertical beam profiles with the characteristic time of about 2.3 s.

By now, we have produced the elements of the beam injection system from the Booster to the Nuclotron. They are being tested and installed to the Nuclotron ring. We have upgraded the power supply system for the magnetic optics elements of the transport channel of the beam extracted from the Nuclotron. In early 2022, the first run of the accelerator complex in full configuration was performed and the beam was transported to the BM@N detector location.

The infrastructure for conducting applied and radiobiological studies within the framework of the ARIADNA collaboration is being actively developed. The significance of the NICA complex for applied studies is primarily connected with the possibility to obtain heavy charged particle beams with energies from several MeV/nucleon to several GeV/nucleon. For instance, currently in Russia there is no technology for carrying out research and testing of highly promising products of semiconductor micro- and nano-

Для этого первоначально орбита циркулирующего пучка была скорректирована при подъеме поля в соленоиде секции охлаждения до 700 Гс. При включенном соленоиде проведено ускорение пучка, и дополнительные потери не наблюдались. После этого был обеспечен режим рекуперации электронного пучка с током до 160 мА. Диагностика процесса охлаждения осуществлялась за счет измерения дробового шума (шума Шоттки) пучка на одном из штатных датчиков положения пучка и с помощью ионизационного профилометра на основе микроканальных пластин. В результате тонкой настройки энергии электронов и оптимизации взаимного положения электронного и ионного пучков было реализовано охлаждение ионов при энергии инжекции. Среднеквадратичный относительный разброс ионов по импульсу в процессе инжекции составлял примерно  $5 \cdot 10^{-4}$ , в результате охлаждения он был уменьшен до величины примерно  $1,7 \cdot 10^{-4}$  (рис. 1). При токе электронного пучка 46 мА характерное время охлаждения продольной степени свободы составило примерно 0,2 с. Также было зафиксировано уменьшение ширины горизонтального и вертикального профилей пучка с характерным временем примерно 2,3 с.

electronics, solid-state microwave electronics and micromechanical systems using beams with an energy of 150–500 MeV/nucleon in order to predict, evaluate and control their radiation resistance. This is necessary for their further use as part of spacecrafts and aviation systems. To solve this problem, an experimental station is being constructed in a small measuring hall. Another experimental station is being constructed to continue studies at a higher level in the field of space radiobiology and simulation of the effects of heavy charged particles of galactic cosmic radiation on biological objects, including cognitive functions of the brain during long-term interplanetary spaceflights. For testing encapsulated microcircuits, a station has been constructed on the channel of the beam accelerated in the linear accelerator to an energy of 3.2 MeV/nucleon (Fig. 2). The completion of installing the equipment of these stations and its testing with the beam is expected in 2022.

Изготовленные элементы системы инжекции пучка из бустера в нуклотрон были протестированы и установлены на кольцо нуклотрона. Завершена модернизация системы питания элементов магнитной оптики канала транспортировки выведенного из нуклотрона пучка. В начале 2022 г. состоялся первый сеанс работы ускорительного комплекса в полной конфигурации, а также был проведен пучок до точки расположения детектора VM@N.

Активно развивается инфраструктура для проведения прикладных и радиобиологических исследований в рамках коллаборации ARIADNA (Applied Research Infrastructure for Advance Development at NICA Facility). Значение комплекса NICA для прикладных исследований, в первую очередь, связано с возможностью получения пучков тяжелых заряженных частиц с энергиями от нескольких МэВ/нуклон до нескольких ГэВ/нуклон. Это необходимо для их дальнейшего использования в составе космических аппаратов и

Рис. 2. Станция прикладных исследований на линейном ускорителе тяжелых ионов

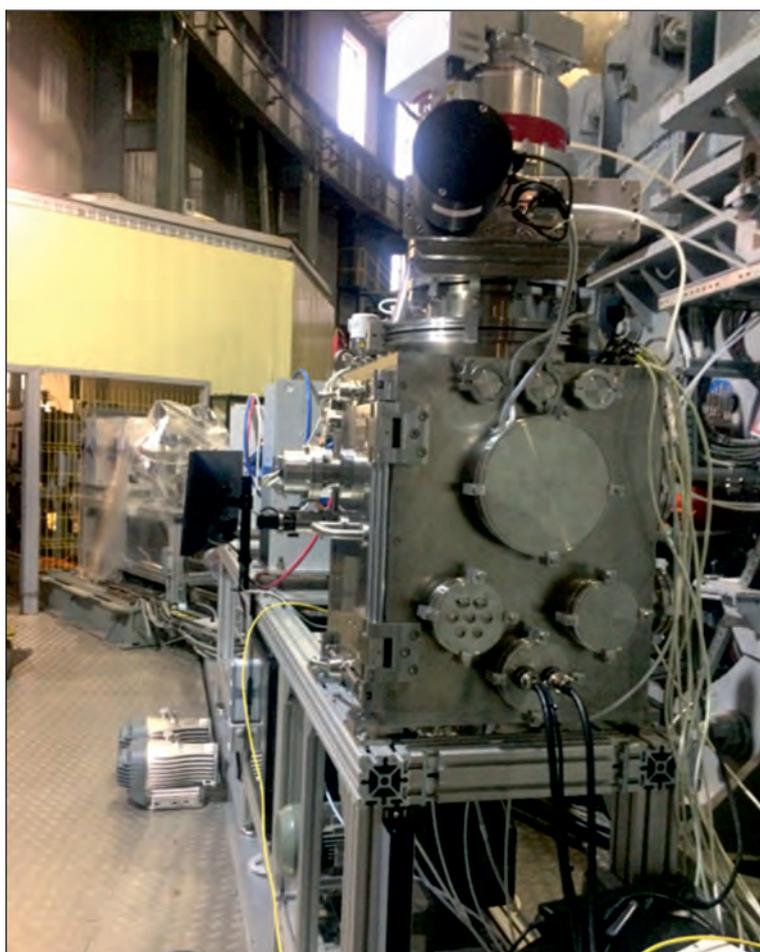


Fig. 2. Applied research station at the heavy-ion linear accelerator

авиационных систем. Так, в настоящее время в России отсутствует технология проведения исследований и испытаний на пучках с энергией 150–500 МэВ/нуклон перспективных изделий полупроводниковой микро- и нанoeлектроники, твердотельной СВЧ-электроники и микромеханических систем с целью прогнозирования, оценки и контроля их радиационной стойкости. Для решения этой задачи создается экспериментальная станция в малом измерительном павильоне. Еще одна экспериментальная станция создается для продолжения на более высоком уровне исследований в области космической радиобиологии и моделирования воздействия тяжелых заряженных частиц галактического космического излучения на биологические объекты, в том числе на когнитивные функции мозга при длительных межпланетных космических полетах. Для тестирования инкапсулированных микросхем создана станция на канале пучка, ускоренного в линейном ускорителе до энергии 3,2 МэВ/нуклон (рис. 2). Завершение монтажа оборудования этих станций и его тестирование на пучке ожидается в 2022 г.

В ближайшее время на нуклотроне планируется продолжение исследований взаимодействия протонов, дейтронов и легких ионов при энергиях 0,3–4,5 ГэВ/нуклон с композитными тяжелыми мишенями с целью получе-

ния новых данных, необходимых для развития технологий переработки отходов ядерной энергетики и электро-ядерного метода генерации энергии. Предназначенная для этого экспериментальная зона оборудуется современной диагностической аппаратурой.

Параллельно с развитием существующего ускорительного комплекса проводятся работы по созданию новой экспериментальной установки для проведения исследований в режиме встречных пучков — коллайдера NICA. Изготовлены и проходят тестирование основные системы стартовой конфигурации оборудования. В ЛФВЭ в завершающей стадии находятся изготовление и испытание магнитов коллайдера: изготовлено и испытано 100% дипольных магнитов арок, изготовлено 100% квадрупольных магнитов арок, из них прошли испытания 50%. В декабре 2021 г. был начат монтаж оборудования в туннеле, а на конец 2022 г. намечено начало процедуры поэтапной настройки и ввода в эксплуатацию систем коллайдера.

#### Список литературы / References

1. *Filatov G., Slivin A., Syresin E., Vorozhtsov A., Agapov A., Butenko A., Shipulin K., Tuzikov A., Antoine S., Beeckman W., Duveau X., Guerra-Phillips J., Jehanno P.* Irradiation Methods and Infrastructure Concepts of New Beam Lines for NICA Applied Research // Proc. IPAC-2021, Campinas, Brazil, 2021.
2. *Butenko A.V., Kostromin S.A., Meshkov I.N., Sidorin A.O., Syresin E., Khodzhbagiyani H.G., Trubnikov G.V.* The NICA Complex Injection Facility // Proc. RuPAC-2021, Alushta, Russia, 2021.
3. *Tikhomirov A.M., Filatov G.A., Kozlov O.S., Syresin E.M., Agapov A.V., Galimov A.R., Shipulin K.N., Slivin A., Tyulkin V.I.* Sub Channel SOCHI of the NICA Accelerator Complex // Proc. RuPAC-2021, Alushta, Russia, 2021.
4. *Korovkin S.A., Borisov V.V., Khodzhbagiyani H.G., Kostromin S.A., Nikiforov D., Petrov M.V., Bespalov Yu.G.* Production of Superconducting Magnets for the NICA Collider at JINR // Proc. RuPAC-2021, Alushta, Russia, 2021.

In the near future, we plan to continue research of the interaction of protons, deuterons and light ions at the Nuclotron at energies of 0.3–4.5 GeV/nucleon with composite heavy targets to obtain new data required for the development of technologies for processing nuclear energy waste and the electronuclear method for energy generation. The experimental zone intended for this purpose is being equipped with modern diagnostic equipment.

Together with the development of the existing accelerator complex, we are constructing a new experimental facility for conducting research using colliding beams — the NICA collider. The main systems of the launch configuration of the equipment have been produced and are being tested. The production and testing of collider magnets are in the final stage at VBLHEP: 100% of the dipole magnets of the arches have been produced and tested, 100% of the quadrupole magnets of the arches have been produced, 50% of them have been tested. In December 2021, we started the installation of equipment in the tunnel, and the phased tuning and commissioning of collider systems are scheduled to begin at the end of 2022.