

Физический пуск линейного ускорителя тяжелых ионов инжекционной цепочки коллайдера NICA

Инжекционный комплекс коллайдера NICA в режиме столкновений тяжелых ионов включает в себя линейный ускоритель тяжелых ионов (HILac), пучок из которого инжектируется в бустер, ускоряется до энергии примерно 600 МэВ/нуклон, при которой производится перезарядка ионов и перевод пучка в нуклотрон, где пучок ускоряется до энергии эксперимента. Для обеспечения требуемой интенсивности сгустка на выходе нуклотрона полный ток пучка на выходе HILac должен составлять до 10 мА. Энергия пучка при этом определяется оптимальными условиями инжекции в бустер и составляет 3–7 МэВ/нуклон. Проект такого ускорителя был разработан фирмой Bevatech OHG (Франкфурт, Германия). HILac состоит из трех ускоряющих секций (секции с пространственно-однородной квадрупольной фокусировкой — RFQ и двух секций с трубками дрейфа на основе IH-резонатора)

A. Sidorin, A. Butenko

Commissioning of the Heavy Ion Linac of the NICA Collider Injection Chain

The NICA collider injection complex for heavy ion operational mode consists of the heavy ion linear accelerator (HILAC) whose beam is injected into Booster accelerating it up to about 600 MeV/nucleon, thereafter the ions are stripped and transferred into the Nuclotron for acceleration up to the experiment energy. To obtain required beam intensity at the exit of the Nuclotron, the total current of the HILAC is to be up to 10 mA at the final energy of 3–7 MeV/nucleon. The design of such an accelerator was performed by Bevatech OHG Company (Frankfurt, Germany). The HILAC consists of three accelerating sections (RFQ and two DTL sections based on IH cavities) and medium energy beam transport (MEBT). The design of RFQ and IH-tank1 follow closely to 2 MeV/nucleon BNL EBIS-based pre-injector. IH-tank2 is added to reach a final kinetic energy of 3.2 MeV/nucleon. The HILAC RF system includes solid-state power amplifiers and

и канала транспортировки средней энергии (МЭВТ). Конструкция RFQ и первой секции с трубками дрейфа подобна конструкции ускорителя на 2 МэВ/нуклон, созданного для Брукхейвенской национальной лаборатории (США). Дополнительная секция на основе IH-резонатора добавлена для увеличения энергии до 3,2 МэВ/нуклон. Высокочастотная система (ВЧ) ускорителя собрана на основе мощных твердотельных усилителей и управляющей ВЧ-системы низкого уровня мощности, обеспечивающей совместную согласованную работу всех резонаторов. Рабочая частота всех резонаторов составляет 100,625 МГц. Длина секции RFQ на основе 4-проводной линии составляет 3,16 м, секции на основе IH-резонаторов имеют длину 2,42 и 2,15 м. Энергия пучка на выходе RFQ 300 кэВ/нук-

лон и 3,2 МэВ/нуклон на выходе структуры с трубками дрейфа. Для проектного отношения массы к заряду A/q , равного 6,5, полная эквивалентная разность потенциалов равна 20,8 МВ.

Все три резонатора были изготовлены в 2013–2015 гг. (рис. 1), секция RFQ — из нержавеющей стали, секции IH-резонаторов — из обычной стали, трубки дрейфа и электроды 4-проводной линии — из меди.

Для размещения ускорителя и системы высокочастотного питания было реконструировано здание ЭГ5 (пристройка к первому корпусу ЛФВЭ, где в 1957 г. должен был размещаться электростатический генератор на 5 МВ — первый инжектор синхрофазотрона). На первом этаже здания установлена единая стальная ферма для размещения источника и ускоряющих

Рис. 1. Четырехпроводная структура RFQ в процессе монтажа (слева) и секция с трубками дрейфа в процессе сборки (справа)

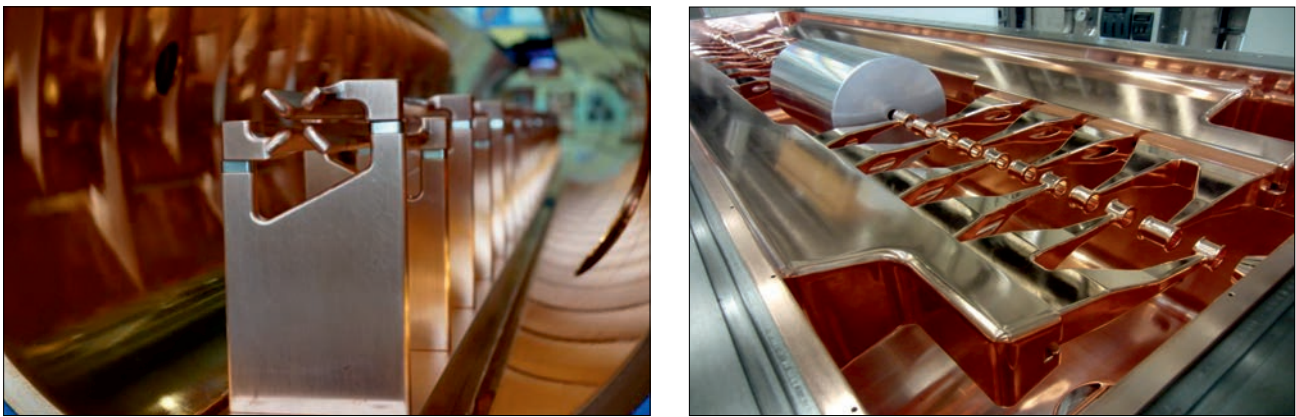


Fig. 1. The 4-rod-RFQ during installation work (left) and IH1 cavity with drift tubes under assembly (right)

LLRF (Low Level RF system) providing a joint coordinated work of all cavities. The cavities for the NICA injector operate at 100.625 MHz. Downstream a 3.16 m long 4-rod-RFQ there are two Interdigital H-type cavities (IH) with 2.42 m and 2.15 m outer length, respectively. The final energies are 300A keV for the RFQ and 3.2A MeV for the IH-DTL. For the design A/q value of 6.5 the sum voltage gain is 20.8 MV.

During 2013–2015 all three cavities were fabricated (Fig. 1). The material is stainless steel for the RFQ-tank, black steel for the IH-tanks and bulk E-Cu for the inner elements like 4-rod structure and drift tubes.

For the accelerator rooming the building EG-5 was repaired and prepared for the accelerator and amplifier assembly. In 2015 after copper coating all the HILAC elements were transferred to Dubna. The solid state 140-kW RFQ amplifier and two 340-kW IH DTL amplifiers have been pre-tested with full power on a water load and a calibrated bidirectional coupler. Additionally, a cavity with a Q factor of around 7000 has been used to test sensitivity and behavior in the matched and unmatched case. Long-

term stability tests at 90% full power have been performed over two days. A digital Low Level RF system developed by ITEP and also in use at LU20 of the Nuclotron facility is providing the amplitude and phase adjustments in all cavities. After installation of all amplifiers, connectivity to LLRF system, rigid lines and HILAC cavities at JINR, the preconditioned cavities were tested successfully up to full power.

For the HILAC commissioning the following equipment was designed, fabricated and assembled at JINR:

- HV platform for the ion source including HV source up to 120 kV with accelerating tube and divider transformer;
- low-energy beam transport line;
- vacuum system of the accelerator;
- water cooling system;
- low level RF and control systems, required powerful rigid lines;
- power supply for quadrupole lenses.

The ion beam was provided with the Laser Ion Source (LIS) based on a commercially available Nd-YAG laser

секций, на втором этаже подготовлено помещение для усилителей мощности. После меднения и ВЧ-тестирования резонаторов все элементы HILac были доставлены в Дубну в 2015 г. Твердотельные усилители: 140-кВт для RFQ и два усилителя по 340 кВт для секций с трубками дрейфа — были предварительно протестированы на эквивалентной нагрузке при полном уровне мощности, контролируемой с помощью направленных ответвителей. Для проверки их поведения при работе на согласованную и несогласованную нагрузку предварительно использовался резонатор с добротностью около 7000. В течение двух суток был проведен тест на долговременную стабильность при 90% полной мощности. Разработанная в ИТЭФ цифровая ВЧ-система низкого уровня мощности (LLRF, аналогичная используемой на RFQ и ускорителе ЛУ-20 инжекционного комплекса нуклотрона) обеспечила согласование фаз и амплитуд во всех резонаторах. После установки и проверки усилителей, подсоединения LLRF, фидерных линий и предварительной ВЧ-подготовки все резонаторы были успешно протестированы на полном уровне мощности.

Для ввода ускорителя в эксплуатацию в ОИЯИ были разработаны, изготовлены и смонтированы:

— высоковольтная платформа источника ионов с источником импульсного высокого напряжения до

120 кВ, разделительным трансформатором и ускоряющей трубкой;

- канал транспортировки пучка низкой энергии;
- вакуумная система ускорителя;
- система водяного охлаждения;
- система ВЧ-питания, включающая задающий генератор, систему управления на низком уровне мощности и необходимые мощные фидерные линии;
- система питания магнитных фокусирующих линз.

Ионные пучки для тестирования ускорителя были получены от лазерного источника (LIS) на основе стандартного ниодим-гранатового лазера LPY 7864-2. На экспериментальном стенде лазер был предварительно проверен в режимах генерации ионов углерода, а также использован в сеансе нуклотрона.

Для определения энергии ускоренных ионов разработан и создан анализатор спектра на основе дипольного магнита.

Первоначально в штатное положение была установлена секция RFQ и проведены ее исследования в режиме ускорения пучка. Выходная энергия, измеренная магнитным спектрометром, составила 300 кэВ/нуклон $\pm 3\%$. Коэффициент захвата C^{3+} для многокомпонентного пучка углерода от LIS (C^{4+} , C^{3+} , C^{2+}) составил более 90%. В ходе сеанса в августе–сентябре

LPY 7864-2. The laser was preliminarily tested at its operational regimes producing carbon ions at a test bench and used during the Nuclotron run for the beam acceleration.

For measurements of the beam energy, a spectrum analyzer on the basis of dipole magnet was constructed.

Before installing the IH cavities the RFQ has been tested with beam. The beam energy was measured with a magnet spectrometer to be 300 keV/nucleon $\pm 3\%$. The beam injected into the RFQ contained a mixture of carbon ion species C^{3+} and C^{2+} from the LIS. The total RFQ beam transmission was 90%. During daily runs in August and September 2016, the RFQ demonstrated a stable operation with good reserve of RF power when extrapolated to the A/Q design value of 6.25.

The injector commissioning took three weeks. Vacuum conditions were at the 10^{-8} mbar level after three days of continuous pumping. In October 2016, at the exit of HILAC the beam of C^{2+} (the same mass-to-charge ratio as for ions Au^{31+}) from laser source was obtained at the designed energy. The energy behind the RFQ and for each IH cavity was validated to be well in agreement with the design values. The ion source, LEBT, RFQ, MEBT and IH DTLs are in good agreement between simulations and

measurements. The RFQ was operated absolutely stable with a transmission of $> 90\%$ for all carbon species from the LIS mixed beam. During this time a total transmission of accelerated beam after LEBT of more than 50% for C^{3+} was measured in first tests. All accelerating structures, the solid state RF power amplifiers and the digital LLRF system run stable.

The optimization process for HILAC will start in 2017. As one of the next steps, the ESIS source will be added providing beam with $A/Q = 6.25$ using target ions of Au^{32+} for which HILAC was designed. The goal of the next steps is to optimize all settings for maximum beam transmission.

After four and a half years of design and development work, the HILAC at JINR's new injector complex has been successfully commissioned. The created accelerator is the first high-current heavy-ion accelerator in JINR Member States and first accelerator with solid-state powerful RF amplifier. For the JINR Member States it is a remarkable achievement in the accelerator physics and technique — a world leading level facility was created in the framework of a wide international collaboration.

2016 г. была продемонстрирована устойчивая работа RFQ с запасом по ВЧ-мощности, достаточным, в соответствии с экстраполяцией, для ускорения пучков с проектным отношением массы к заряду.

После окончательной сборки в течение трех недель были проведены работы по физическому пуску инжектора. Давление остаточного газа на уровне 10^{-8} мбар было получено после трех суток непрерывной откачки. В октябре 2016 г. на выходе ускорителя был получен пучок ионов C^{2+} (такое же отношение массы к заряду, как и для целевых ионов Au^{31+}) с проектной энергией. Соответствие энергии расчетному значению было установлено как на выходе RFQ, так и на выходе каждой из секций с трубками дрейфа. Параметры LEVT, RFQ, МЕВТ и двух структур с трубками дрейфа оказались в хорошем согласии с результатами моделирования динамики частиц. На RFQ для всех компонентов ионов углерода из источника был получен коэффициент захвата более 90% при абсолютно стабильной работе секции. В первых тестах для ионов C^{3+} полный коэффициент захвата от выхода LEVT до выхода ускорителя составил более 50%. Все ускоряющие структуры, мощные усилители и система управления ВЧ низкого уровня мощности продемонстрировали устойчивую работу.

Оптимизация режимов работы инжектора намечена на 2017–2018 гг. Планируется тонкая настройка

всех систем для получения максимального коэффициента захвата. Одним из обязательных шагов является установка источника тяжелых ионов и демонстрация ускорения ионов Au^{32+} , для которых ускоритель был спроектирован.

Физический пуск нового ускорителя явился результатом четырех с половиной лет упорной работы по конструированию, изготовлению и монтажу его элементов. Созданный ускоритель тяжелых ионов является первым в странах-участницах ОИЯИ сильно-точным тяжелоионным ускорителем, впервые в нем используется система высокочастотного питания на основе твердотельных транзисторных усилителей. Для стран-участниц ОИЯИ это заметное достижение в области ускорительной науки и техники — силами большой международной коллаборации создана уникальная установка с параметрами, соответствующими передовому мировому уровню.

Список литературы / References

Butenko A. V., Aleksandrov V. S., Donets E. E. et al. The Heavy Ion Linac at the NICA Project // Proc. of LINAC2014, Geneva, Switzerland.

Bazanov A. M., Butenko A. V., Golovenskiy B. V. et al. Commissioning of the New Heavy Ion Linac at the NICA Project // Proc. of RuPAC2016, St. Petersburg, Russia.



Участники работ по физическому пуску ускорителя

HILAC team for commissioning