

ВАКУУМНАЯ СИСТЕМА ПРОЕКТА NICA

А. Р. Галимов, А. В. Смирнов¹, А. Н. Свидетелев, А. М. Тихомиров

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

Представлены работы по созданию вакуумной системы проекта NICA. Описаны вакуумные требования в цепочке ускорителей и состояние работ на настоящее время. Особое внимание уделяется проблемам достижения сверхвысокого вакуума в бустере, для чего в сотрудничестве с компанией Vakuum Praha (Прага, Чехия) разработан и создан экспериментальный стенд для выбора наиболее эффективных средств откачки пучковой камеры сверхпроводящего быстросциклирующего синхротрона. Приводятся результаты моделирования распределения вакуума в сверхпроводящих ускорителях, имеющих «теплые» участки камеры при комнатной температуре, с помощью специально созданного программного кода. Моделирование показало необходимость установки дополнительных средств откачки по всему периметру бустера. Для решения данной проблемы в сотрудничестве с ИЯФ (Новосибирск) начата разработка оригинальной конструкции титанового сублимационного насоса, работающего при криогенных температурах.

The paper presents the progress of works on the design for the NICA project vacuum system, describing the vacuum requirements in the accelerator chain and the progress to date. Special attention is given to the problems of achieving ultra-high vacuum in the booster. For this purpose, in collaboration with Vakuum Praha Company (Prague, Czech Republic), a test bench for the most effective pumping of the accelerator chamber of the superconducting fast cycling synchrotron has been designed and built. The article provides the simulation results of vacuum distribution in superconducting accelerators with “warm” chamber parts at room temperature. The specialized programming code was developed for this purpose. The simulation has revealed a necessity of installation of additional pumping equipment along the booster perimeter. To solve this problem, development of original design of titanium sublimation pump operating at cryogenic temperatures has started in collaboration with the Budker Institute of Nuclear Physics (Novosibirsk, Russia).

PACS: 07.30.Cy; 07.30.Dz; 07.30.Hd; 29.20.dk

ВВЕДЕНИЕ

Основным требованием при формировании вакуумных условий в ускорителях заряженных частиц является уменьшение потерь частиц на молекулах остаточного газа. Скорость потерь определяется как параметрами пучка, так и составом остаточного газа. По мере ускорения и накопления пучка в цепочке ускорителей меняются требования к величине остаточного давления.

¹E-mail: smirnov@jinr.ru

Вакуумные системы ускорителей проекта NICA

Ускоритель	Длина, м	Давление, Па	Тип насосов	Статус
ЛУ-20	20,0	10^{-4}	Турбо + крио	Модернизирована
ЛУТИ	11,5	10^{-5}	Турбо + ионный	Протестирована
Бустер	211,0	10^{-9}	Ионный + геттер	Поставка оборудования
Нуклотрон	251,5	10^{-7}	Турбо + ионный	Модернизирована
Коллайдер	503,0	10^{-9}	Ионный + геттер	Проектирование

Ускорительный комплекс NICA [1] состоит из двух линейных ускорителей, бустерного синхротрона, ускорителя нуклотрон и двух колец коллайдера (таблица), каналов транспортировки пучков. Линейные ускорители частицы пролетают один раз, поэтому достаточно иметь давление на уровне 10^{-4} – 10^{-5} Па. Далее частицы по каналу транспортировки попадают в бустер. Энергия инжекции ионов Au^{31+} составляет всего 3,2 МэВ/нуклон, что требует наличие сверхвысокого вакуума в бустере порядка 10^{-9} Па. При рассеянии на молекулах азота при энергии инжекции сечение взаимодействия составляет $\sigma = 68 \cdot 10^{-22}$ м². Тогда при давлении 10^{-9} Па имеем время жизни пучка порядка 20 с, что уже сравнимо с циклом ускорения частиц в бустере около 5 с.

После ускорения в бустере до энергии вывода порядка 600 МэВ/нуклон частицы переводятся по каналу, имеющему обдирочную мишень, где ионы золота теряют все электроны. В нуклотрон инжектируются и сразу ускоряются полностью ободранные атомы, поэтому вакуумные требования существенно ниже, чем в бустере. Далее частицы переводятся в кольца коллайдера, где время жизни пучка должно составлять не менее 1 ч, что требует достижения сверхвысокого вакуума на уровне 10^{-9} Па.

Следует отметить, что для того, чтобы достичь в бустере необходимое время жизни пучка при энергии инжекции, необходимо решить задачу получения сверхвысокого вакуума. В то время как в коллайдере главная проблема — подавление вторичной эмиссии электронов со стенок камеры, что приводит к эффекту электронных облаков [2]. При этом оценки динамического вакуума, когда вторичная эмиссия ионов со стенок камеры приводит к локальному ухудшению вакуума, показывают, что данный эффект не является существенным во всех ускорителях комплекса.

ВАКУУМНАЯ СИСТЕМА БУСТЕРА

Вакуумная система бустера состоит из четырех сверхпроводящих арок, работающих при криогенных температурах, и четырех прямолинейных участков, находящихся при комнатной температуре. На сегодня в ОИЯИ поставлены вакуумные объемы двух прямолинейных участков: ВЧ-станций и системы электронного охлаждения. Оба объема изготовлены в Институте ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН (ИЯФ). В ходе монтажа и тестирования системы электронного охлаждения были достигнуты необходимые вакуумные условия на уровне $2 \cdot 10^{-9}$ Па [3].

Прямолинейный промежуток системы инжекции находится в стадии изготовления и в 2018 г. должен быть поставлен в ОИЯИ. Прямолинейный промежуток системы вывода пучка из бустера вместе с каналом перевода в нуклотрон изготавливается в ИЯФ. Во всех «теплых» участках в качестве финального метода вакуумной откачки используются ти-

тановые распылители в комбинации с ионными насосами. В качестве дополнительных средств откачки используются нераспыляемые геттеры [4].

Проектирование вакуумных камер сверхпроводящих арок практически полностью завершено, и изготовлены прототипы различных камер, работающие при криогенных температурах. В настоящее время готовятся вакуумные испытания пучковых камер криволинейных магнитов, изготовленных в сотрудничестве с компанией Frako-Term (Польша). Предполагается, что основным типом ионов остаточного газа в сверхпроводящих арках будут молекулы и атомы водорода, поэтому вакуумные посты бустера будут иметь насосы на основе нераспыляемых геттеров.

Ввиду малой вакуумной проводимости камер и больших расстояний между вакуумными постами в сверхпроводящих арках (около 9 м) необходимо установить дополнительные средства откачки, работающие при криогенных температурах. Скорость откачки нераспыляемых геттеров при снижении температуры резко падает [5]. Хорошим решением этой проблемы является использование криосорбционных насосов. Однако такой подход требует сильных изменений в криогенной системе сверхпроводящих магнитов, что в настоящий момент уже невозможно.

Поэтому было принято решение о разработке вакуумных насосов на основе титановых распылителей, которые будут установлены во всех промежутках между сверхпроводящими магнитами. В этом случае потребуются установить в криостатах изоляционного объема дополнительные токовводы на 40 А. Использование таких насосов позволит снизить давление в несколько раз и достигнуть необходимых вакуумных условий в бустере.

ВАКУУМНЫЙ СТЕНД

Для испытания сверхвысоковакуумных насосов, элементов ускорителей и материалов, которые планируется использовать в устройствах, размещаемых в пучковых камерах, совместно с компанией Vakuu Praha [6], спроектирован и создан стенд, позволяющий осуществлять прогрев всех элементов до температуры 300 °С и достигать вакуума, необходимого для проведения масс-спектрометрического анализа состава остаточных газов [7].

На стенде в модельной пучковой камере после прогрева в течение 30 ч при температуре 280 °С был получен вакуум $< 10^{-9}$ Па [8]. Для достижения данного давления использовалась связка из ионного и титанового сублимационных насосов. Измерения вакуума проводились при помощи датчиков вакуума типа Байярда–Альперта и вакуумметров фирмы Varian.

Измерение массового состава газов в камере показало, что при соблюдении требований вакуумной гигиены после прогрева основным компонентом остаточного газа является H_2 (до 99 % по массе).

Для проведения исследований по достижению требуемого вакуума в реальных условиях сверхпроводящих арок был разработан второй стенд, на котором планируется проверка работы вакуумной системы с использованием комбинаций различных типов насосов и путем моделирования реальных газовых нагрузок при помощи дозированного напуска и варьирования температуры стенок камер (рис. 1).

Стенд состоит из крестовины, к которой подключается откачное и измерительное оборудование. Для исследования производительности к крестовине поочередно могут быть

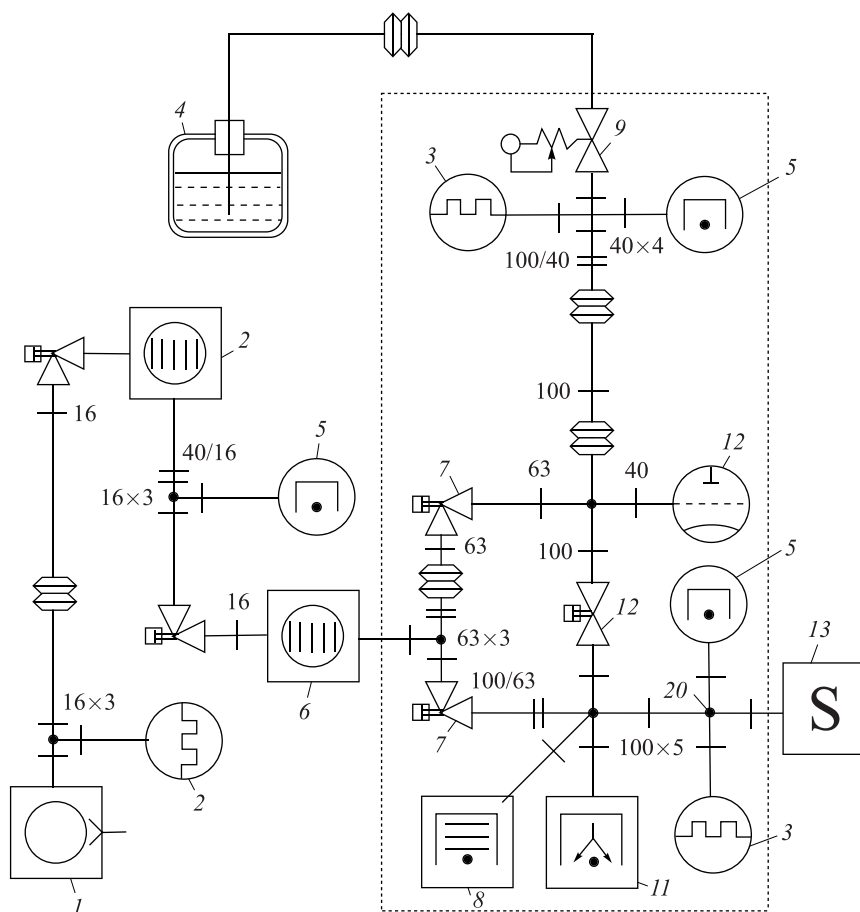


Рис. 1. Схема высоковакуумного поста: 1 — сухой безмасляный спиральный насос; 2 — турбомолекулярный вспомогательный насос; 3 — датчик вакуума терморезистивный; 4 — сосуд Дьюара с жидким азотом; 5 — датчик вакуума с холодным катодом; 6 — турбомолекулярный насос с повышенной компрессией по легким газам; 7 — угловой цельнометаллический клапан; 8 — ионный насос с распыляемым геттером; 9 — натекатель; 10 — затвор цельнометаллический; 11 — ионный насос с нераспыляемым геттером; 12 — датчик вакуума с горячим катодом (Байярда-Альперта); 13 — масс-спектрометр

присоединены исследуемые типы насосов. Конструкция стенда позволяет соединить его с пучковой камерой тестового магнита и на криогенном стенде проверить работу различных конфигураций оборудования [9].

Для достижения рабочего давления в камере ($< 1 \cdot 10^{-9}$ Па) предусмотрено устройство прогрева всех элементов стенда до температуры 280°C со скоростью подъема и снижения температуры не выше $50^\circ\text{C}/\text{ч}$. В процессе прогрева откачка осуществляется с помощью тандема турбомолекулярных насосов (поз. 2, 6), что позволяет очень оперативно реагировать на изменение вакуумных условий с помощью датчика (поз. 5). Измерение давления осуществляется при помощи высоковакуумного датчика (поз. 12). С противо-

положного конца станции откачки тестового трубопровода устанавливается натекатель (поз. 9). Через натекатель возможна подача пробного газа, тем самым создаются условия, имитирующие различные газовые нагрузки.

На первом этапе работы на стенде тестовая камера будет находиться при комнатной температуре. В последующем планируется собрать часть «холодного» участка ускорителя, охладить до рабочих температур и провести эксперименты в условиях, приближенных к реальным.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВАКУУМНЫХ УСЛОВИЙ

Особенностью вакуумных условий в проекте NICA является чередование пучковых камер, находящихся при криогенных температурах и при комнатной температуре. Более того, использование быстроциклирующих сверхпроводящих магнитов приводит к дополнительному нагреву камер внутри магнитов, что приводит к значительной неравномерности распределения температуры пучковых камер вдоль периметра ускорительных колец, особенно в бустере.

Для моделирования распределения давления вдоль пучковых камер был разработан собственный программный код, учитывающий распределение температуры вдоль камеры. Программа была создана на основе пакета Betacool, применяемого для моделирования динамики пучков в накопителе заряженных частиц [6].

Следует учесть, что при переходе из камеры в камеру с разными температурами концентрация и давление меняются следующим образом:

$$n_1 \sqrt{T_1} = n_2 \sqrt{T_2}, \quad \frac{P_1}{\sqrt{T_1}} = \frac{P_2}{\sqrt{T_2}}.$$

Тогда уравнение динамического распределения давления в зависимости от продольной координаты и с учетом разности температур между соседними камерами можно записать в виде

$$\frac{\Delta P_j}{\Delta t} V_j = C_j \left(P_{j+1} \sqrt{\frac{T_j}{T_{j+1}}} - P_j \right) - C_{j-1} \left(P_j - P_{j-1} \sqrt{\frac{t_j}{T_{j-1}}} \right) - S_j P_j + Q_j,$$

где P_j — давление в j -й камере; V — объем вакуумной камеры; C — проводимость вакуумной камеры; S — скорость откачки; Q — суммарное натекание. Для моделирования начальные значения лучше задавать нормированными на единицу длины камеры. Однако надо учесть, что проводимость камеры задается на единицу длины, т. е. для получения проводимости текущей камеры ее нужно разделить на длину участка, а не умножить, как для других начальных параметров (объем, скорость откачки, натекание).

На рис. 2 показан пример расчета для структуры камер бустера. Красным цветом (1) показано давление, черным (2) — концентрация [Па/К]. Из графиков видно, что в холодных участках давление меньше, а концентрация молекул больше. Для того, чтобы на графике не было таких скачков, лучше приводить распределение давления в зависимости от показаний вакуумметров, находящихся при комнатной температуре (рис. 3, красная линия (1)).

На первом этапе откачки бустера будут установлены восемь постов откачки (по два на каждую арку) на основе только турбомолекулярных насосов, что позволит достигнуть

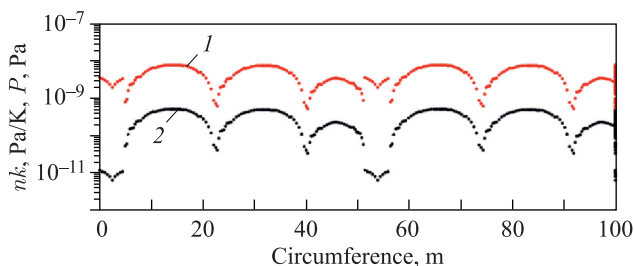


Рис. 2 (цветной в электронной версии). Распределение давления вдоль камеры бустера (половина кольца, начиная с «теплого» участка). Красный цвет (1) — давление; черный (2) — концентрация молекул

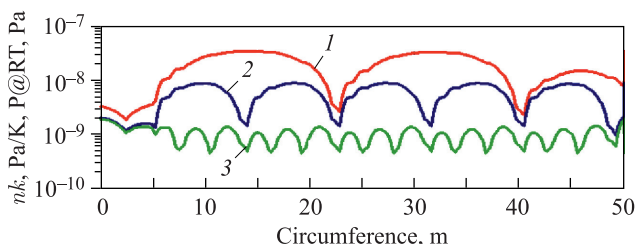


Рис. 3 (цветной в электронной версии). Распределение давления на вакуумных датчиках при комнатной температуре (1/4 бустера): красный цвет (1) — первый этап откачки только с турбонасосами; синий (2) — второй этап с использованием всех 24 постов откачки; зеленый (3) — использование дополнительных сублимационных насосов между всеми магнитами

давления на уровне 10^{-8} Па (рис. 3, красный цвет (1)). В дальнейшем использование всех 24 постов откачки, расположенных в сверхпроводящих арках через 9 м, позволит улучшить вакуумные условия в несколько раз (рис. 3, синий цвет (2)). Достижение необходимых вакуумных условий на уровне 10^{-9} Па предполагается после установки дополнительных сублимационных насосов между всеми магнитами бустера (рис. 3, зеленый цвет (3)).

Расчеты для коллайдера показывают (рис. 4), что для достижения давления на уровне 10^{-9} Па достаточно использовать в сверхпроводящих арках стандартные посты откачки, расположенные в квадрупольных линзах через 6 м. К тому же вакуумные требования в коллайдере менее жесткие по сравнению с бустером, так как коллайдер работает на существенно более высокой энергии с полностью ободанными ионами золота, а время жизни ионов превосходит необходимое время эксперимента более чем на порядок.

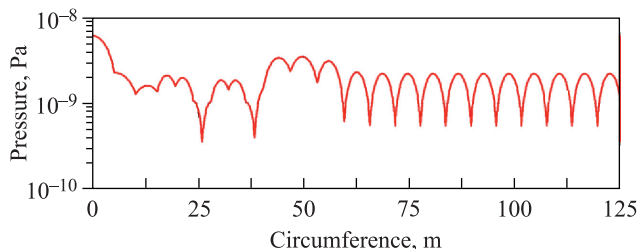


Рис. 4. Распределение давления для 1/4 коллайдера, начиная с точки встречи

Следует отметить, что для моделирования развития неустойчивости вследствие динамического вакуума, когда вторичные ионы приводят к локальному ухудшению вакуумных условий, была использована простая модель, в которой все ионы, взаимодействующие с молекулами остаточного газа на данном участке, здесь же попадают на стенки камеры и локально производят вторичные ионы. Расчеты показали, что этот эффект не имеет существенного влияния на вакуумные условия в бустере и коллайдере. Только при увеличении интенсивности пучка на два порядка по сравнению с проектной начинает проявляться неустойчивость, связанная с динамическим вакуумом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Trubnikov G. V., Agapov N. N., Donets E. D. et al.* NICA Project at JINR // Proc. of the 4th Intern. Particle Accelerator Conf. (IPAC'2013), Shanghai, China, May 12–17, 2013. P. 1343–1345.
2. *Мешков И. Н., Филиппов А. В.* Влияние пучков ионов на вакуумные условия в коллайдере NICA // XII Междунар. семинар по проблемам ускорителей заряженных частиц памяти проф. В. П. Саранцева, Алушта, Крым, Россия, 3–8 сент. 2017 г.; Письма в ЭЧАЯ. 2018. Т. 15, № 7(219). С. 749–754.
3. *Зиновьев Л. В., Смирнов А. В., Сергеев А. С., Семенов С. В., Колесников С. Ю., Куликов Е. А., Туманова Ю. А., Алфеев А. В., Брызгунов М. И., Бублей А. В., Рева В. Б.* Начало запуска системы электронного охлаждения бустера NICA // XII Междунар. семинар по проблемам ускорителей заряженных частиц памяти проф. В. П. Саранцева, Алушта, Крым, Россия, 3–8 сент. 2017 г.; Письма в ЭЧАЯ. 2018. Т. 15, № 7(219). С. 661–666.
4. <https://www.saesgetters.com/>
5. *Boffito C. et al.* Gettering in Cryogenic Applications // J. Vac. Sci. Technol. A. 1987. V. 5. P. 3442.
6. <http://www.vakuum.cz>
7. *Bazanov A. M., Butenko A. V., Galimov A. R., Nesterov A. V., Smirnov A. V.* Ultrahigh Vacuum in Superconducting Synchrotrons // Proc. of RuPAC-2014, Obninsk, Russia, 2014.
8. *Bazanov A. M., Butenko A. V., Galimov A. R., Lugovnin A. K., Smirnov A. V.* Ultrahigh Vacuum in Superconducting Accelerator Rings // Phys. Part. Nucl. Lett. 2016. V. 13, No. 7. P. 937–941.
9. *Kostromin S., Agapov N., Borisov V., Galimov A. et al.* Facility for Assembling and Serial Test of Superconducting Magnets // Proc. of IPAC'2014, Dresden, Germany, 2014. P. 2700–2702.
10. <http://betacool.jinr.ru/>