

ВАКУУМНЫЕ СИСТЕМЫ ЛИНЕЙНЫХ УСКОРИТЕЛЕЙ ИНЖЕКЦИОННОГО КОМПЛЕКСА NICA

*В. В. Косачев, А. М. Базанов, А. В. Бутенко, А. Р. Галимов,
А. В. Нестеров, Р. В. Пивин, А. В. Смирнов¹*

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

В Лаборатории физики высоких энергий Объединенного института ядерных исследований (Дубна) осуществляется проект NICA, включающий в себя несколько ускорителей заряженных частиц. Получение требуемых вакуумных условий является одним из ключевых моментов в реализации проекта, так как достижение необходимого времени жизни ионов на всех этапах ускорения частиц определяет в итоге эффективную светимость экспериментов. В настоящее время проводится модернизация вакуумной системы инжекционного комплекса линейного ускорителя легких ионов ЛУ-20, являющегося одним из старейших ускорителей в ОИЯИ, и сборка нового линейного ускорителя NICAL для ускорения ионов золота для коллайдерного режима комплекса NICA. На конечных участках линейных ускорителей давление остаточного газа должно составлять около 10^{-5} Па, что определяется максимальной амплитудой электрического поля ВЧ, используемого для ускорения ионов.

In Laboratory of High Energy Physics (Joint Institute for Nuclear Research, Dubna) the project NICA is under construction, which includes several accelerators of charged particles. Obtaining the required vacuum conditions is one of the key points in the project, as the achievement of the required lifetime of the ion in all phases of acceleration of particles in the end determines the effective luminosity experiments. Currently the vacuum system of injection complex of the linear accelerator of light ions LU-20 is being modernized, which is one of the oldest accelerators at JINR, and a new linear accelerator NICAL to accelerate gold ions for collider mode of complex NICA is being assembled. At end part of linear accelerators the residual gas pressure must be approximately 10^{-5} Pa, which is determined by the maximum amplitude of the RF electric field used to accelerate ions.

PACS: 29.20.Ej, 29.27.Ac

ЛИНЕЙНЫЙ УСКОРИТЕЛЬ ЛЕГКИХ ИОНОВ ЛУ-20

Основной задачей инжекционного комплекса на базе линейного ускорителя ЛУ-20 является ускорение легких ионов до энергии инжекции в нуклотрон [1]. Для использования данного инжектора для ускорения поляризованных дейтронов проводится модернизация отдельных его секций. В частности, вместо существующего форинжектора будут установлены канал транспортировки (LEBT, рис. 3) и предускоритель (RFQ).

¹E-mail: smirnov@jinr.ru

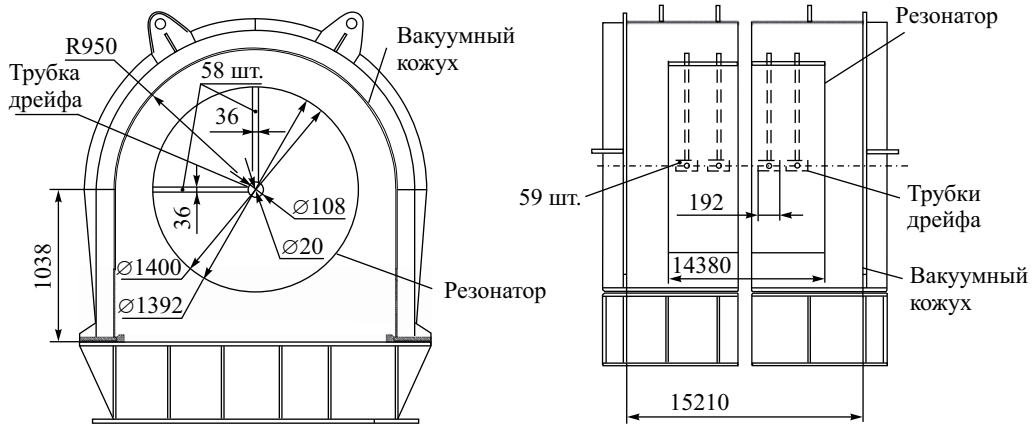


Рис. 1. Вакуумный кожух ускорителя ЛУ-20

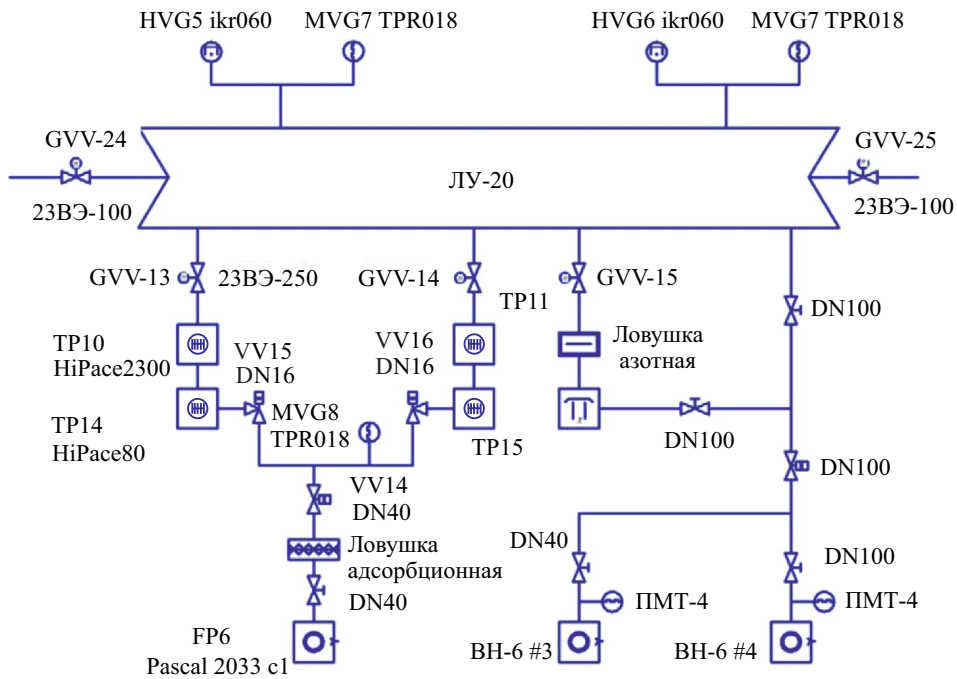


Рис. 2. Вакуумная схема ЛУ-20

Основными элементами ускорителя ЛУ-20 являются: вакуумный кожух объемом $V = 44 \text{ м}^3$, который состоит из стального колпака, монтируемого на массивной опорной плите. На рис. 1 показана часть вакуумного кожуха ЛУ-20. В колпаке имеются отверстия с вмонтированными в них фланцами для подсоединения измерительной аппаратуры. К опорной плите приварены фланцы, через которые производится откачка вакуумного объема линейного ускорителя, а к резонатору подводятся трубки системы охлаждения и вакуумные электрические вводы системы электропитания.

Таблица 1. Список основного вакуумного оборудования ЛУ-20

Кол-во	Оборудование	Тип	Управление	Производитель	Положение на схеме
2	Turbopump	HiPace 80	TCP 110	Pfeiffer Vacuum	TP14-TP15
1		HiPace 700	TCP 350	Pfeiffer Vacuum	—
4		HiPace 400	TCP 350	Pfeiffer Vacuum	—
5		HiPace 300	TCP 350	Pfeiffer Vacuum	—
2		HiPace 2300	TCP 1200	Pfeiffer Vacuum	TP10-TP11
1	Ion pump	IP 400	Foton	Varian	IP1
5	Forvacuum pump	Tri Scroll 300	—	Agilent	FP6
2		ВН-6	—	—	#3, #4
9	Vacuum gauge	TPR 018	TPG 300	Pfeiffer Vacuum	MVG7–MVG8
8	Vacuum gauge	IKR 060	TPG 300	Pfeiffer Vacuum	HVG5–HVG6
6	Gate vacuum valve	Series 108	—	VAT	—
8	Gate vacuum valve	ZVE	—	—	GVV24–GVV25, GVV13–GVV15
16	Angle vacuum valve	Series 284	—	VAT	VV15–VV16
1	Vacuum valve	—	—	VAT	VV14
11	Manual vacuum valve	—	—	VAT	—

Для предварительной откачки вакуумного кожуха используются два золотниковых насоса ВН-6, подключенных к вакуумному объему через развитую систему труб диаметром 0,1 м. Высоковакуумная откачка линейного ускорителя производилась при помощи двух агрегатов ВА-5-4, подключенных через трубопровод внутренним диаметром 0,5 м. Ловушки охлаждения агрегатов подключены к системе распределения криоагента. На выходе агрегатов ВА-5-4 были использованы два бустерных насоса БН-3, на выходе которых установлен золотниковый насос ВН-7Г-1.

В объеме ЛУ-20 в основном присутствуют пары воды, для откачки которой был установлен криогенный насос КН-20000, охлаждаемый жидким азотом, с расчетной скоростью действия в молекулярном режиме 20000 л/с, который позволил существенно уменьшить время достижения рабочего вакуума порядка 10^{-5} Па.

В ходе реализации проекта НИСА была модернизирована вакуумная система ЛУ-20 [2]: добавлен диффузионный насос для получения предварительного вакуума (DP1, рис. 2) и вместо агрегатов ВА-5-4 установлены современные безмасляные системы откачки на базе турбомолекулярных насосов типа HiPace 2300 (TP9-TP11, рис. 2) компании «Pfeiffer Vacuum». Сами агрегаты ВА-5-4 не были демонтированы и оставлены в качестве резервных средств откачки. Список основного вакуумного оборудования ЛУ-20 представлен в табл. 1.

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ИНЖЕКЦИОННЫМ КОМПЛЕКСОМ ЛУ-20

В ходе модернизации вакуумного оборудования инжекционного комплекса ЛУ-20 была создана автоматизированная система управления (АСУ) [3]. Она решает задачи по

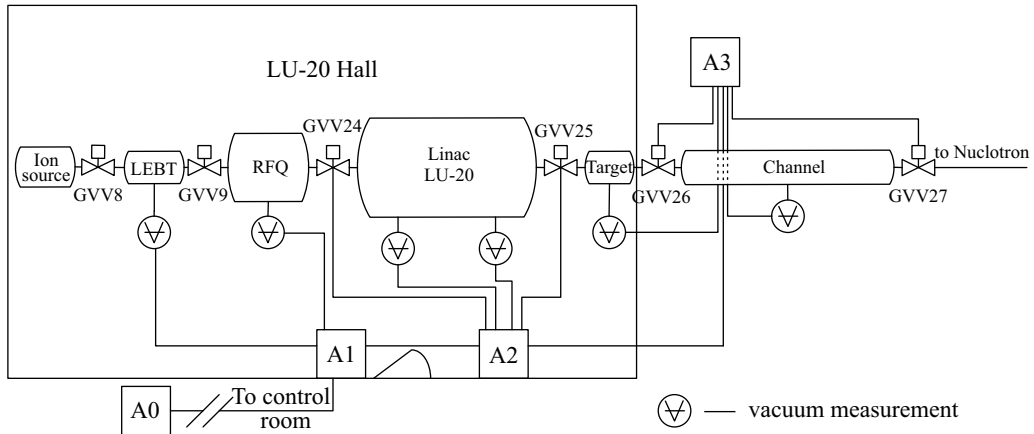


Рис. 3. Общая схема комплекса ЛУ-20: Ion source — ионный источник; LEBT и RFQ — предварительные ускорители; LU-20 — линейный ускоритель; Target — пучковый канал; Channel — инжекционный канал в нуклотрон. А0–А3 — шкафы управления вакуумным оборудованием

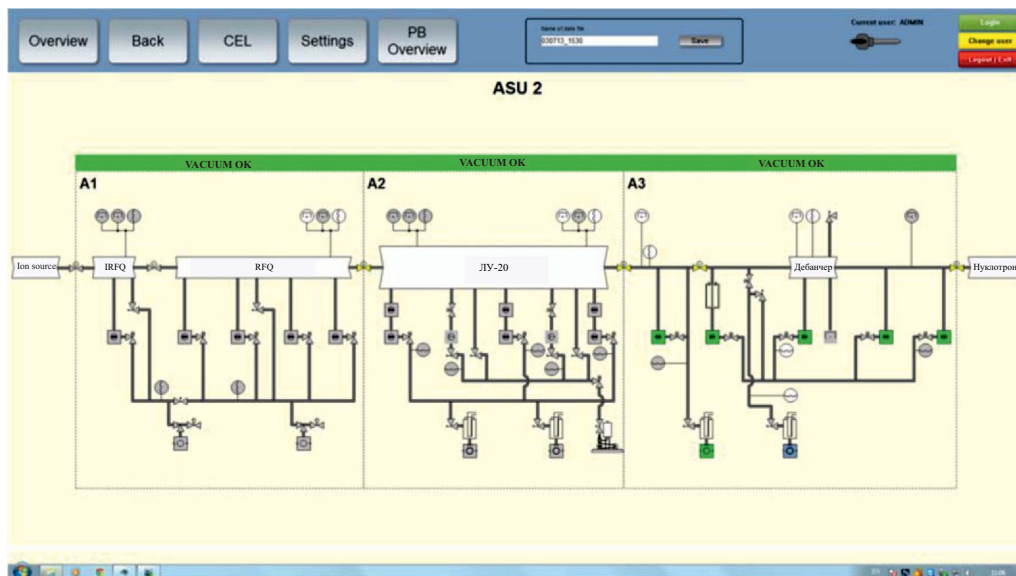


Рис. 4. Окно программы для управления вакуумным оборудованием

локальному и дистанционному управлению вакуумным оборудованием, а также защите оборудования при возникновении аварийных ситуаций.

АСУ основана на базе программируемого логического контроллера (ПЛК) Siemens S7-300. В состав АСУ входят шкафы управления (А1, А2, А3 (рис. 3)), расположенные непосредственно в зале ускорителя, и центральный шкаф (А0 (рис. 3)). Связь между шкафами и распределенным оборудованием основана на промышленной сети Profibus.

Таблица 2. Таблица блокировок для ЛУ-20

№ события	In	Out											
		GVV24 off	GVV25 off	GVV13 off	GVV14 off	TP10 off	TP14 off	TP11 off	TP15 off	VV15 off	VV16 off	VV14 off	FP6 off
1	HVG6 nok	■	■										
2	TP10 off			■									
3	HVG5 nok			■	■								
4	TP11 off			■	■								
5	VV15 off			■		■	■						
7	Water off			■	■	■	■	■					
6	VV16 off			■	■	■	■	■	■				
8	VV14 off			■	■	■	■	■	■	■			
9	MGV8 nok			■	■	■	■	■	■	■	■		
10	FP6 off			■	■	■	■	■	■	■	■		
11	Air < 5,1 атм			■	■	■	■	■	■	■	■	■	■

Место оператора организовано на базе шкафа А0. Для повышения надежности возможность управления вакуумной системой дублируется посредством тач-панели и ПК. Программа управления выполнена в SCADA-системе Zenon (рис. 4) [4]. Для возможности последующей обработки полученных данных система ведет запись в архив.

АСУ имеет развитую систему защит. Первый уровень реализован без участия ПЛК. Эта защита обеспечивает отключение ускоряющего напряжения и блокирует вакуумный объем, в котором давление достигает критического уровня. Второй уровень защит основан на контроле состояний всех устройств системы и обеспечивает безаварийное отключение вакуумного оборудования при возникновении внештатных ситуаций, связанных с разгерметизацией вакуумных линий, выхода из строя насосов и др.

Логика работы блокировок представлена в табл. 2, где серым цветом отмечены ячейки, которые показывают соответствие между состоянием элемента системы (in — событие) и соответствующим ему состоянием зависимых элементов (out — действие).

Например, выключение насоса FP6 приводит к закрытию VV14; закрытие VV14 приводит к закрытию VV15 и VV16; закрытие VV15 останавливает TP10 и TP14, а закрытие VV16 останавливает TP11 и TP15; остановка TP10 закрывает GVV13, а остановка TP11 закрывает GVV14.

ЛИНЕЙНЫЙ УСКОРИТЕЛЬ ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ HLAC

Линейный ускоритель тяжелых ионов (ЛУТИ, или HLAC — Heavy Ion Linear Accelerator) предназначен для обеспечения инжекции в бустер тяжелых ионов (например, золота $^{197}\text{Au}^{31+}$) с энергией 3,2 МэВ/нуклон [5]. ЛУТИ может ускорять пучки тяжелых ионов с отношением заряда к массе $q/A \geq 1/6$ и пиковым током до 10 мА в импульсе длительностью 8–27 мкс при частоте повторения импульсов до 10 Гц.

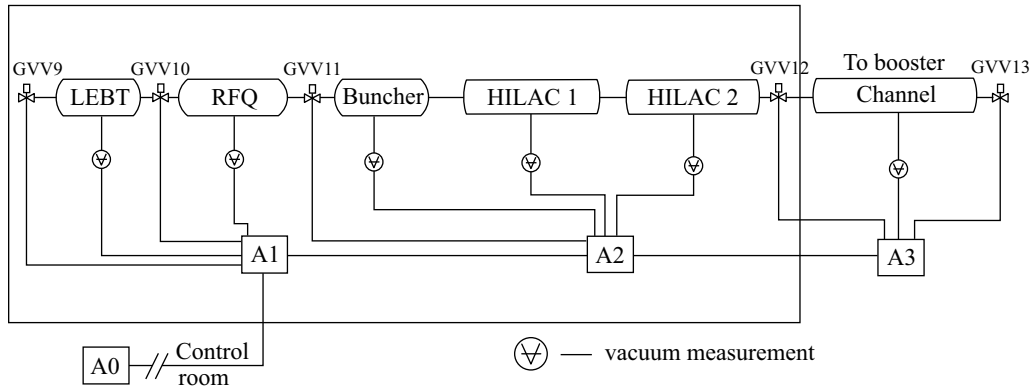


Рис. 5. Структура линейного ускорителя ЛУТИ (HILAC)

ЛУТИ состоит из следующих основных частей (рис. 5):

- электронно-струнный источник высокозарядных ионов «Крион-NICA», расположенный на высоковольтной платформе форинжера под потенциалом до 110 кВ относительно земли;
- канал транспортировки ионов низкой энергии (Low Energy Beam Transfer, LEBT);
- первая ускоряющая секция с резонатором на базе высокочастотной квадрупольной фокусировки типа 4-rod RFQ (четырёхстержневой);
- канал транспортировки ионов промежуточной энергии с группирователем (Medium Energy Beam Transfer, MEBT);
- вторая и третья ускоряющие секции резонаторов с трубками дрейфа и квадрупольными линзами (так называемая DTL — Drift Tube Linac): IH1 и IH2.

ВАКУУМНАЯ СИСТЕМА УСКОРИТЕЛЯ HILAC

Вакуумная система инжекционного комплекса ускорителя тяжелых ионов HILAC разделена на три секции линейными вакуумными шиберами (рис. 6). Вакуумное оборудование (табл. 3) рассчитано на достижение рабочего вакуума на уровне 10^{-5} Па.

Канал транспортировки пучка низкой энергии (LEBT), несмотря на небольшой объем, имеет значительное натекание, а потому для его откачки используется турбомолекулярный насос HiPace 700.

Для создания рабочего вакуума в предварительном ускорителе ионов (RFQ) выбран тандем из турбомолекулярного насоса HiPace 700 и магнитоэридного насоса IP 400. Это позволяет без вспомогательного насоса получить предварительное разрежение, необходимое для запуска магнитоэридного насоса. RFQ является самостоятельной вакуумной секцией, и здесь может оказаться идеальным сочетание магнитоэридного насоса и нераспыляемого геттера. Этот вариант можно рассмотреть после завершения пусконаладочных работ и определения максимального газового потока, с которым придется работать.

К сожалению, жесткие требования, предъявляемые к сопряжению отдельных элементов ускорителя, не позволили разместить затвор между банчером, имеющим повышенный

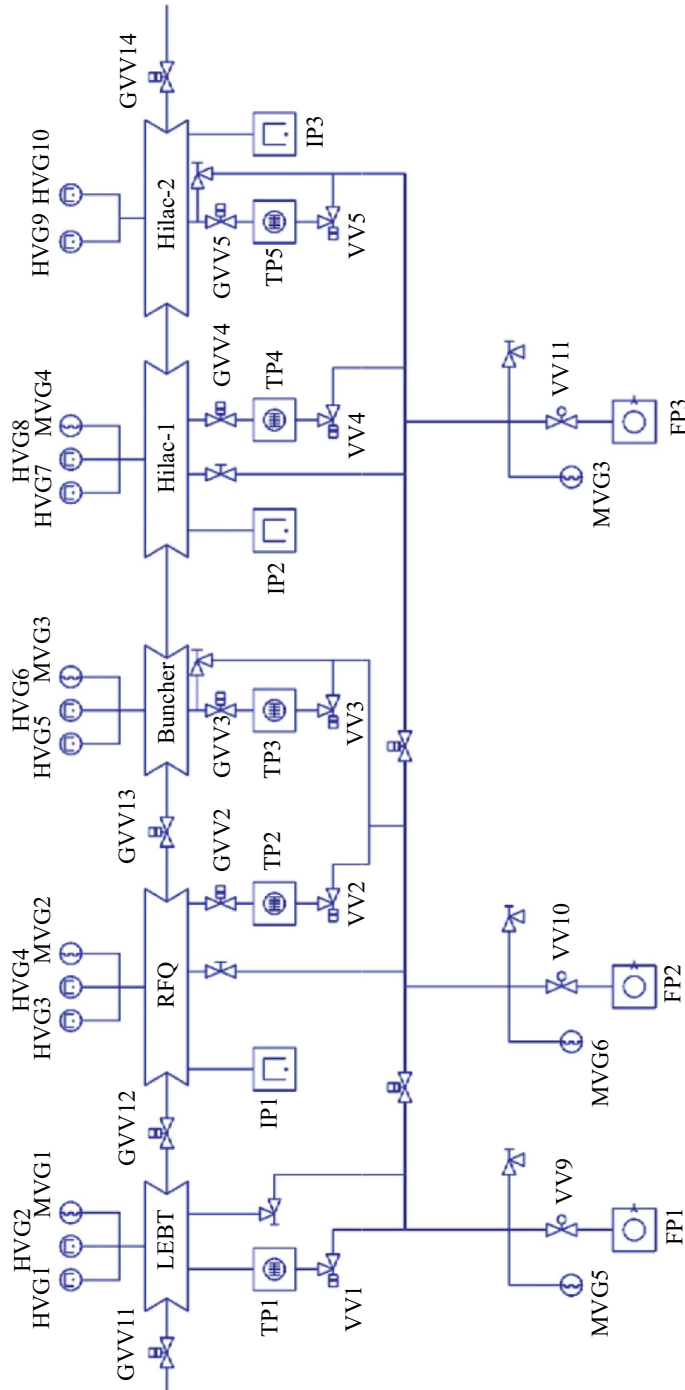


Рис. 6. Вакуумная схема линейного ускорителя НПЛАС

Таблица 3. Список основного вакуумного оборудования НЛАС

Кол-во	Оборудование	Тип	Управление	Производитель	Положение на схеме
2	Turbopump	HiPace 80	TCP 110	Pfeiffer Vacuum	TP2, TP7
5	Turbopump	HiPace 700	TCP 350	Pfeiffer Vacuum	TP1, TP3–TP6
2	Turbopump	HiPace 400	TCP 350	Pfeiffer Vacuum	TP8–TP9
7	Ion pump	IP 400	Foton	Varian	IP1–IP7
4	Forvacuum pump	Tri Scroll 300	—	Agilent	FP1–FP4
5	Vacuum gauge	TPR 018	TPG 300	Pfeiffer Vacuum	MVG1–MVG5
11	Vacuum gauge	IKR 060	TPG 300	Pfeiffer Vacuum	HVG1–HVG11
6	Gate vacuum valve	—	—	VAT	GVV1–GVV6
32	Vacuum valve	—	—	VAT	—

уровень натекания, и резонаторами ускорителя. Банчер откачивается турбомолекулярным насосом HiPace 700, а каждый резонатор оснащен турбиной HiPace 700 и магниторазрядным насосом IP 400.

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ИНЖЕКЦИОННЫМ КОМПЛЕКСОМ НЛАС

В настоящее время ведется проектирование вакуумной АСУ НЛАС. За основу был взят проект АСУ ЛУ-20, так как ускорители имеют схожую структуру вакуумных и электрических систем. В АСУ НЛАС также уделено особое внимание защите смежных систем (ВЧ, накал катода), закладывается возможность изоляции места аварийного роста давления путем перекрытия линейных шибберов. Логика работы по уровню защит вакуумного оборудования представлена в табл. 4.

На основании опыта эксплуатации АСУ ЛУ-20 в проект АСУ НЛАС внесены следующие изменения:

1. Удалены переключатели и кнопки с фиксацией из системы локального управления. Это позволит избежать ошибок при переходе с автоматического управления на ручное.

2. Изменена схема коммутации шкафов. Последовательное соединение заменено соединением типа «звезда». Выход из строя одного шкафа не будет влиять на работу остальных.

3. Разработана схема интеграции АСУ с единой системой управления ускорителем. Параметры вакуумной системы будут автоматически сохраняться в общей базе данных.

Представленные автоматизированные системы управления вакуумным оборудованием незаменимы в решении следующих задач:

1) удаленный мониторинг и управление оборудования, находящегося в зоне радиационного излучения;

2) постобработка и анализ собранных данных;

3) защита оборудования в случае аварийной ситуации или ошибки персонала;

4) сокращение штата по обслуживанию вакуумных систем.

Можно отметить, что при модернизации вакуумной системы нуклотрона также была реализована система автоматического управления вакуумным оборудованием. Наличие

Таблица 4. Таблица блокировок НІЛАС

№ события	In	Out											
		GVV24 off	GVV25 off	GVV13 off	GVV14 off	TP10 off	TP14 off	TP11 off	TP15 off	VV15 off	VV16 off	VV14 off	FP6 off
1	HVG6 nok												
2	TP10 off												
3	HVG5 nok												
4	TP11 off												
5	VV15 off												
7	Water off												
6	VV16 off												
8	VV14 off												
9	MGV8 nok												
10	FP6 off												
11	Air < 5,1 атм												

АСУ позволило провести исследования вакуумных условий в нуклотроне при различных режимах работы ускорителя. Было показано, что водород, поступающий из канала инжекции, постепенно распространяется по кольцу нуклотрона и существенно снижает время жизни пучка. В итоге модернизация вакуумной системы канала инжекции в нуклотрон позволила решить вопрос с поступлением водорода в кольцо и существенно улучшить вакуумные условия в нем [6].

Описанные выше системы являются не только необходимыми для эксплуатации существующих ускорителей, но и служат прототипами систем управления вакуумным оборудованием бустера и коллайдера, сооружаемых в рамках проекта NICA.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Trubnikov G. V. et al.* NICA Project at JINR // Proc. of IPAC'2013. P. 1343–1345.
2. *Vacuum Systems of NICA Linear Accelerators* // XI Intern. Sci. Seminar in memory of V. P. Sarantsev, Alushta, Crimea, Russia, Sept. 7–11, 2015.
3. АСУ-2 // X Междунар. семинар по проблемам ускорителей заряженных частиц памяти В. П. Саранцева, Алушта, Крым, Украина, 3–7 сент. 2013 г.
4. Официальный сайт компании-разработчика COPADATA склада-системы ZenOn. <https://www.copadata.com/en-ru/>.
5. *Butenko A. V. et al.* Development of the NICA Injection Facility // Proc. of IPAC'2013. P. 3915–3917.
6. *Аверичев А. С. и др.* Итоги 40-го и 41-го сеансов нуклотрона. Сообщ. ОИЯИ Р9-2010-68. Дубна, 2010.