

Научная статья

УДК 621.384.64

DOI 10.25205/2541-9447-2023-18-4-28-35

Вакуумная система ускорителя ЛИНАК-200*

Дмитрий Сергеевич Шокин¹, Алексей Николаевич Трифонов²
Валерий Васильевич Кобец³, Дмитрий Львович Демин⁴
Александр Евгеньевич Бруква⁵, Владимир Григорьевич Шабратов⁶
Александр Васильевич Скрыпник⁷

Объединенный институт ядерных исследований,
Лаборатория ядерных проблем
Дубна, Московская область, Россия

¹dmitryshokin@jinr.ru

²trifonov@jinr.ru

³vkobets@jinr.ru

⁴demin@jinr.ru

⁵osel-dub@ya.ru

⁶v.shabratov@gmail.com

⁷skrypnik@jinr.ru

Аннотация

Линейный ускоритель ЛИНАК-200 в Лаборатории ядерных проблем Объединенного института ядерных исследований создается с целью обеспечить электронные тестовые пучки с энергией до 200 МэВ для исследований и разработок в области детекторов частиц, для изучения передовых методов диагностики электронных пучков и для работы в качестве облучательной установки для прикладных исследований. Хотя ЛИНАК-200 использует оборудование ускорителя МЕА (NIKHEF), вакуумная система была значительно модернизирована. В этой работе представлена конструкция и состояние новой вакуумной системы.

Ключевые слова

линейный ускоритель электронов, вакуум, магниторазрядные насосы, поток газов, расчет вакуумной системы

Для цитирования

Шокин Д. С., Трифонов А. Н., Кобец В. В., Демин Д. Л., Бруква А. Е., Шабратов В. Г., Скрыпник А. В. Вакуумная система ускорителя ЛИНАК-200 // Сибирский физический журнал. 2023. Т. 18, № 4. С. 28–35. DOI 10.25205/2541-9447-2023-18-4-28-35

* Статья написана по материалам конференции Russian Particle Accelerator Conference (RuPAC'23), Budker INP, 11–15 September 2023.

Vacuum System of the LINAC-200 Accelerator

Dmitry S. Shokin¹, Alexey N. Trifonov², Valery V. Kobets³
Dmitry L. Demin⁴, Alexander E. Brukva⁵, Vladimir G. Shabratov⁶
Alexander V. Skrypnik⁷

Laboratory of Nuclear Problems, Joint Institute For Nuclear Research
Dubna, Moscow region, Russian Federation

¹dmitryshokin@jinr.ru

²trifonov@jinr.ru

³vkobets@jinr.ru

⁴demin@jinr.ru

⁵osel-dub@ya.ru

⁶v.shabratov@gmail.com

⁷skrypnik@jinr.ru

Abstract

The LINAC-200 linear accelerator at the JINR Nuclear Power Plant is being built to provide electronic test beams with an energy of up to 200 MeV for research and development in the field of particle detectors, to study advanced methods for diagnosing electron beams and to work as an irradiation unit for applied research. Although the LINAC-200 uses MEA accelerator equipment (NIKHEF), the vacuum system has been significantly upgraded. This paper presents the design and condition of the new vacuum system.

Keywords

linear electron accelerator, vacuum, magnetic discharge pumps, gas flow, calculation of the vacuum system

For citation

Shokin D. S., Trifonov A. N., Kobets V. V., Demin D. L., Brukva A. E., Shabratov V. G., Skrypnik A. V.. Vacuum system of the LINAC-200 accelerator. *Siberian Journal of Physics*, 2023, vol. 18, no. 4, pp. 28–35 (in Russ). DOI 10.25205/2541-9447-2023-18-4-28-35

Введение

Линейный ускоритель ЛИНАК-200 в Объединенном институте ядерных исследований сооружается с целью обеспечения электронных тестовых пучков с энергией до 200 МэВ для проведения исследований и разработок в области детекторов частиц, изучения передовых методов диагностики пучка и работы в качестве установки облучения для прикладных исследований [1; 2].

Вакуумный объем ускорителя составляет ~400 литров и состоит из пучковой камеры и волноводов для передачи СВЧ-мощности от клистронов в ускоряющие секции.

Основными задачами разработки вакуумной системы являются:

- обеспечение откачки до давления $P \leq 5 \times 10^{-8}$ торр;
- обеспечение безмаслянной откачки;
- нечувствительность к газовым нагрузкам;
- высокая скорость откачки по всем газам;
- обеспечение возможности поиска течей.

Наиболее полно вышеуказанным требованиям удовлетворяет использование турбонасосов и магниторазрядных насосов.

Схема вакуумной системы ускорителя ЛИНАК-200

От глубины вакуума зависит вероятность пробоя в волноводах ускорителя. Улучшение вакуума приводит к уменьшению рассеивания пучка электронов. При хорошем вакууме идет улучшение по выработке часов магниторазрядных насосов благодаря меньшей нагрузке на них. Исходя из этого, необходимо достигнуть рабочего уровня вакуума $P \leq 5 \times 10^{-8}$ торр в различных частях ускорителя.

- каждая станция обеспечена отдельными откачными постоянно работающими магниторазрядными насосами;
- каждая станция обеспечена возможностью подключения передвижного вакуумного поста и проведения откачки с атмосферы;
- станции отделены друг от друга ручными и электропневматическими шиберами, что позволяет проводить на этих участках аварийные или планово-профилактические работы, не нарушая вакуум в остальных частях ускорителя.

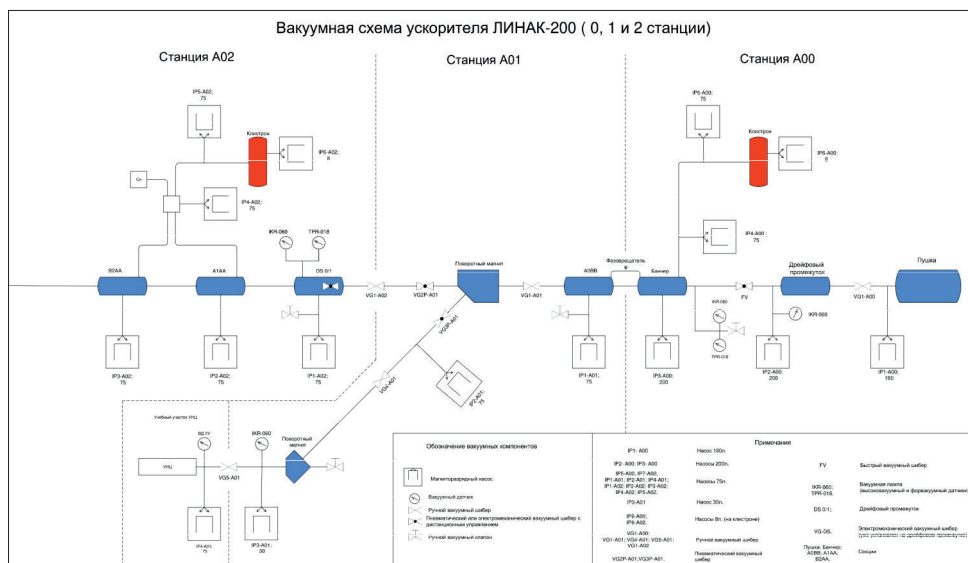


Fig. 1. Vacuum scheme of the LINAK-200 accelerator. Gun and stations 1, 2

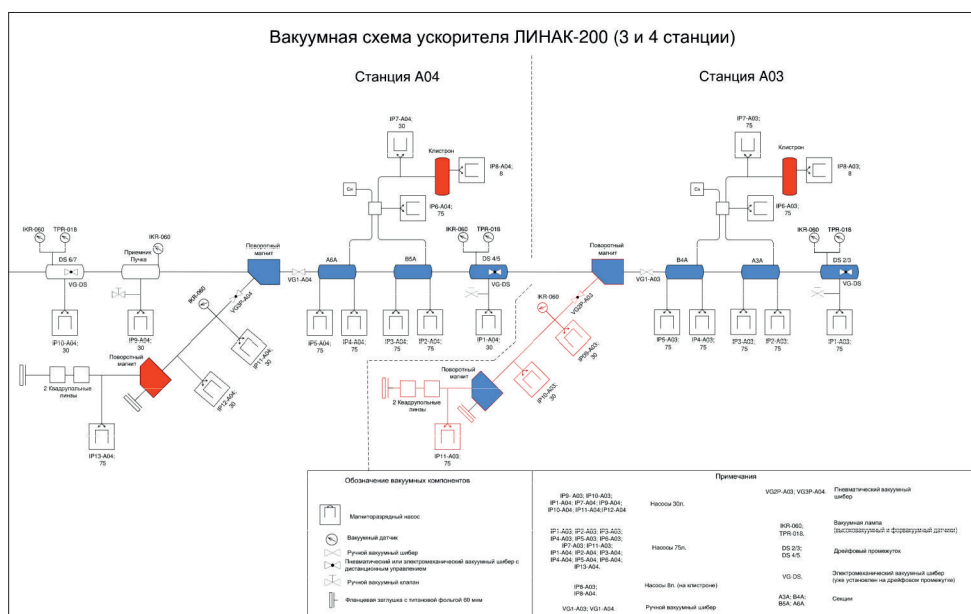


Fig. 2. Vacuum scheme of the LINAK-200 accelerator. Station 3, 4

На рис. 1 изображена вакуумная система первых двух станций ускорителя. А на рис. 2 – станция 3 и 4. В конце 2023 г. на четвертой ускоряющей станции был сделан параллельный перенос пучка электронов. Также уже ведется активная работа по параллельному переносу пучка на 3 станции. Подготавливается необходимая вакуумная арматура и поворотные магниты.

Выбор вакуумной арматуры и средства измерения откачки

Общие требования к вакуумной арматуре для использования ее на ускорителе ЛИНАК-200:

- 1) высокая скорость откачки обеспечивается конфигурацией подключения откачных насосов к ускоряющим структурам;
- 2) быстрота срабатывания аварийных автоматических шиберов (время закрытия не более 10 мс на пушке и не более 1 с на станциях) для защиты работающего высоковакуумного оборудования в случае ухудшения вакуума;
- 3) простота устройства вакуумной системы и удобство в эксплуатации.

Наиболее полно этим требованиям удовлетворяют клапаны (шиберы) с электропневматическим приводом, наряду с которым есть возможность использовать арматуру и с ручным приводом. Было решено в качестве вакуумной арматуры использовать ручные и электропневматические шиберы фирмы VAT серий 01 и 75.

Общие требования к датчикам измерения вакуума:

- 1) высокая надежность работы;
- 2) высокая радиационная стойкость;
- 3) нечувствительность к ухудшению вакуума (вплоть до атмосферы);
- 4) обеспечение измерения вакуума в пределах $P = 10^{-3} \div 5 \times 10^{-9}$ торр (для высоковакуумных датчиков).

Этим требованиям вполне удовлетворяют датчики типа Pirani (измерение форвакуума) и датчики с холодным катодом типа Penning (измерение высокого вакуума). На ускорителе используется оборудование фирмы Pfeiffer Vacuum GmbH.

Получение вакуума

Вакуумная откачка ускорителя осуществляется в 2 этапа.

1. Откачка камеры ускорителя ЛИНАК-200 (или отдельных секций) «с атмосферы» с применением передвижного вакуумного поста:

- форвакуумная откачка камеры до давления $P \sim 5 \times 10^{-2}$ торр;
- откачка турбонасосом до давления $P \sim 5 \times 10^{-7}$ торр.

2. Включение и дальнейшая постоянная откачка камеры ускорителя ионными магниторазрядными насосами до давления $P \leq 5 \times 10^{-8}$ торр.

Рекомендуемое давление запуска магниторазрядных насосов $P < 10^{-5}$ торр. Предварительный вакуум $P \sim 1 \times 10^{-6}$ торр обеспечивает более быстрый запуск магниторазрядных насосов и достигается при первичной длительной откачке с помощью вакуумного передвижного поста.

Проектный расчет вакуумной системы

Суммарный поток газов, поступающий в рабочий объем $Q_{\text{сумм}}$ равен

$$Q_{\text{сумм}} = Q_{\text{ПР}} + Q_{\text{НАТ}} + Q_{\text{ДИФ}} + Q_{\text{ПОВ}}, \quad (1)$$

где $Q_{\text{ПР}}$ – поток, обусловленный проницаемостью стенок вакуумной камеры; $Q_{\text{НАТ}}$ – поток газов, натекающий из атмосферы через течи и соединения; $Q_{\text{ДИФ}}$ – поток газов, обусловленный

диффузионным газовыделением из глубины конструкционных; $Q_{\text{ПОВ}}$ – поток газа с поверхности камеры и элементов, расположенных в ней [3].

$Q_{\text{ПР}} = \sum_{i=1}^n q_{\text{ПР}i} \cdot A_i \approx 0 \frac{\text{м}^3 \text{Па}}{\text{с}}$, так как удельные потоки проницаемости для меди существенны только при высоких температурах.

$Q_{\text{ДИФ}} \approx 0$ потому, что нет нагрева стенок камеры, который приводил бы к диффузии.

$Q_{\text{НАТ}} \approx \frac{V \cdot (P_{\text{кон}} - P_{\text{нач}})}{t}$, где V – объем каждой секции; $(P_{\text{кон}} - P_{\text{нач}})$ – разница в показаниях вакуума спустя время t с отключенной откачкой. В нашем случае $Q_{\text{НАТ}}$ является определяющим фактором ухудшения вакуума.

$$Q_{\text{ПОВ}} = S_{\text{кам}} \cdot q, \quad (2)$$

где q – удельное газовыделение с поверхности.

$$S_{\text{кам1}} = 0.975 \text{ м}^2; S_{\text{кам2}} = 1.667 \text{ м}^2; S_{\text{кам3-4}} = 3.052 \text{ м}^2.$$

Согласно выводам работы [3], газовыделение с поверхностей холодных элементов:

$$\lg q = A_{\text{ДЕС}} - B_{\text{ДЕС}} \cdot t = -9.2172, \quad (3)$$

где $A_{\text{ДЕС}}$ и $B_{\text{ДЕС}}$ – постоянные коэффициенты. Для необработанной меди $A_{\text{ДЕС}} = -3.486$, $B_{\text{ДЕС}} = 3,98 \cdot 10^{-5}$, $t = 144\,000 \text{ с}$ – время откачки.

Из формулы 3 выражаем q :

$$q = 10^{\lg q} = 6.06457 \cdot 10^{-10} \frac{\text{м}^3 \text{Па}}{\text{м}^2 \text{с}}.$$

Подставляя полученный результат в формулу 2, находим $Q_{\text{ПОВ}}$ для каждой станции.

Вакуумирование ускорительной станции 1 обеспечивает работу первой короткой секции (3,67 м) и первого дрейфового участка (1,5 м); ускорительной станции 2 – двух коротких секций ($2 \times 3,67 \text{ м}$) и следующего дрейфового участка (1,5 м); ускорительных станций 3 и 4 – двух длинных секций ($2 \times 7,35 \text{ м}$) и дрейфового участка (1,5 м).

Благодаря тому, что ускорительные структуры имеют протяженную геометрию с многочисленными «карманами» и небольшим проходным сечением, зависимость остаточного вакуума от скорости откачки вакуумных насосов невысока. В большей степени остаточный вакуум достигается за счет продолжительности откачки и, как было отмечено ранее, определяется натеканием.

В табл. 1–3 указаны рабочие параметры и суммарный поток газов на каждой станции в соответствии с проведенными расчетами.

Заключение

В результате проведенных работ была модернизирована вакуумная система линейного ускорителя ЛИНАК-200, что позволило отсекать отдельные участки вакуумной системы в случае ухудшения вакуума. Был произведен расчет суммарного потока газов на каждой станции, подобраны и установлены насосы с производительностью от 10 до 100 л/с на периферии ускоряющих структур (на трубы дрейфа), и был получен конечный вакуум в районе насосов $P \geq 5 \cdot 10^{-8} \text{ торр}$.

Таблица 1
Рабочие параметры и суммарный поток газов станции 1
Table 1
Operating parameters and total gas flow for the station 1

А01							
Объект	Количество	Параметры, мм	Площадь, мм ²	Полная площадь, мм ²	$Q_{\text{нат}}, \frac{\text{м}^3 \text{Па}}{\text{с}}$	$Q_{\text{пов}}, \frac{\text{м}^3 \text{Па}}{\text{с}}$	$Q_{\text{сумм}}, \frac{\text{м}^3 \text{Па}}{\text{с}}$
Короткая секция А0ВВ	1	60*3673	692 344	692 344	0	$9,91 \cdot 10^{-5}$	$9,91 \cdot 10^{-5}$
Дрейфовый участок DS0/1	1	60*1500	282 743	282 743	0	$4,047 \cdot 10^{-5}$	$4,047 \cdot 10^{-5}$
Соединения	15	—	—	—	$7,5 \cdot 10^{-12}$	0	$7,5 \cdot 10^{-12}$
						ИТОГ	$13,9587 \cdot 10^{-5}$

Таблица 2
Рабочие параметры и суммарный поток газов станции 2
Table 2
Operating parameters and total gas flow for the station 2

А02							
Объект	Количество	Параметры, мм	Площадь, мм ²	Полная площадь, мм ²	$Q_{\text{нат}}, \frac{\text{м}^3 \text{Па}}{\text{с}}$	$Q_{\text{пов}}, \frac{\text{м}^3 \text{Па}}{\text{с}}$	$Q_{\text{сумм}}, \frac{\text{м}^3 \text{Па}}{\text{с}}$
Короткая секция А1АА, В2АА	2	60*3673	692 344	1 384 688	0	$14,25 \cdot 10^{-5}$	0,0001425
Дрейфовый участок DS2/3	1	60*1500	282 743	282 743	0	$2,910 \cdot 10^{-5}$	$2,910 \cdot 10^{-5}$
Соединения	10	—	—	—	$5 \cdot 10^{-12}$	0	$5 \cdot 10^{-12}$
						ИТОГ	$17,162 \cdot 10^{-5}$

Таблица 3

Рабочие параметры и суммарный поток газов станций 3 и 4

Table 3

Operating parameters and total gas flow for the stations 3 and 4

A03 и A04							
Объект	Количество	Параметры, мм	Площадь, мм ²	Полная площадь, мм ²	$Q_{\text{натр}}, \frac{\text{м}^3 \text{Па}}{\text{с}}$	$Q_{\text{пов}}, \frac{\text{м}^3 \text{Па}}{\text{с}}$	$Q_{\text{сумм}}, \frac{\text{м}^3 \text{Па}}{\text{с}}$
Длинная секция АЗА, В4А	2	60*7346	1 384 688	2 769 376	0	$3,338 \cdot 10^{-5}$	$3,338 \cdot 10^{-5}$
Дрейфовый участок DS4/5	1	60*1500	282 743	282 743	0	$3,408 \cdot 10^{-6}$	$3,408 \cdot 10^{-6}$
Соединения	10	—	—	—	$5 \cdot 10^{-12}$	0	$5 \cdot 10^{-12}$
					ИТОГ		$3,679 \cdot 10^{-5}$

В настоящее время на ускорителе ведутся работы по параллельному переносу пучка на 3-й ускоряющей станции. Подготавливается необходимая вакуумная арматура, магниторазрядные насосы и прочее.

В ближайшем будущем планируется сделать параллельный перенос пучка на 2-й ускоряющей станции, а также начать монтаж 5-й и 6-й станций, что позволит ускорителю ЛИНАК-200 получать электронные тестовые пучки с энергией до 400 МэВ.

Список литературы

1. FLAP Collaboration: Tasks and Perspective. Study of Fundamentals and New Application of Controllable Generation of Electromagnetic Radiation by Relativistic Electrons Using Functional Materials // *Physics and Nuclei Letters*. 2021. Vol. 18, no. 3. P. 338–353.
2. **Trifonov A. et al.** «Linac-200: a new electron test beam facility» // *PoS. 41st International Conference on High Energy Physics (ICHEP2022)*. Bologna, Italy, June, 2023. P. 1–4.
3. **Юрьева А. В.** Расчет вакуумных систем. Томск: Изд-во Том. политехн. ун-та, 2012. С. 67–69.

References

1. FLAP Collaboration: Tasks and Perspective. Study of Fundamentals and New Application of Controllable Generation of Electromagnetic Radiation by Relativistic Electrons Using Functional Materials. *Physics and Nuclei Letters*, 2021, vol.18, no 3, pp. 338-353.
2. **Trifonov A. et al.** «Linac-200: a new electron test beam facility». In *PoS., 41st International Conference on High Energy Physics (ICHEP2022)*. Bologna, Italy, June, 2023, pp. 1-4.
3. **Yuryeva A. V.** Calculation of vacuum systems. Tomsk, Tomsk Polytechnic University Publ., 2012, pp. 67–69. (in Russ.)

Информация об авторах

Дмитрий Сергеевич Шокин, инженер

Алексей Николаевич Трифонов, младший научный сотрудник

Валерий Васильевич Кобец, начальник сектора

Дмитрий Львович Демин, главный инженер установки

Александр Евгеньевич Бруква, ведущий инженер

Владимир Григорьевич Шабратов, начальник группы

Александр Васильевич Скрыпник, ведущий инженер

Information about the Authors

Dmitry S. Shokin, Engineer

Alexey N. Trifonov, Junior Researcher

Valery V. Kobets, Head of the Sector

Dmitry L. Demin, Chief Engineer

Alexander E. Brukva, Leading Engineer

Vladimir G. Shabratov, Head of the Group

Alexander V. Skrypnik, Leading Engineer

*Статья поступила в редакцию 15.09.2023; одобрена после рецензирования 03.11.2023;
принята к публикации 15.11.2023*

*The article was submitted 15.09.2023; approved after reviewing 03.11.2023;
accepted for publication 03.11.2023*