

Научная статья

УДК 681.513.1, 681.5.08

DOI 10.25205/2541-9447-2024-19-1-54-60

## Разработка и внедрение системы автоматизации ионного источника D-Race для ускорителя VITA\*

Алексей Михайлович Кошкарев<sup>1</sup>

Иван Михайлович Щудло<sup>2</sup>

Сергей Юрьевич Таскаев<sup>3</sup>

<sup>1-3</sup> Новосибирский государственный университет  
Новосибирск, Россия

<sup>1-3</sup> Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН  
Новосибирск, Россия

<sup>1</sup>koshi8bit@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9471-7904>

<sup>2</sup>cshudlo.i.m@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-8130-5249>

<sup>3</sup>taskaev@inp.nsk.su, <https://orcid.org/0000-0002-5313-2563>

### Аннотация

В Институте ядерной физики СО РАН (ИЯФ СО РАН) разработан ускорительный источник эпитепловых нейтронов VITA, используемый для развития методики бор-нейтронозахватной терапии (БНЗТ) злокачественных опухолей и ряда других приложений. Для управления установкой, хранения и анализа данных ранее создана система автоматизации, позволяющая оператору обеспечивать длительное стабильное получение пучка протонов или дейтронов в широком диапазоне изменения энергии и тока, а научным сотрудникам получать экспериментальные данные и обрабатывать их в режиме реального времени.

В настоящее время ИЯФ СО РАН изготавливает ускорительный источник нейтронов VITA для Национального медицинского исследовательского центра онкологии им. Н. Н. Блохина в Москве и планирует ввести его в эксплуатацию в 2025 г. В отличие от работающей экспериментальной установки ИЯФ СО РАН будет использоваться источник ионов компании D-Race (Канада).

В данной работе представлена процедура автоматизации нового ионного источника, алгоритмы управления, коэффициенты PID-регулятора и рабочие параметры, которые позволили получить максимальный средний ток пучка на цилиндре Фарадея 13 мА со стабильностью 0,14 %.

### Ключевые слова

бор-нейтронозахватная терапия, VITA, ионный источник, D-Race, автоматизация, стабилизация

### Финансирование

Работы выполнены при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ.

### Для цитирования

Кошкарев А. М., Щудло И. М., Таскаев С. Ю. Разработка и внедрение системы автоматизации ионного источника D-Race для ускорителя VITA // Сибирский физический журнал. 2024. Т. 19, № 1. С. 54–60. DOI 10.25205/2541-9447-2024-19-1-54-60

---

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

# Development and Implementation of the D-Pace Ion Source Automation System for the VITA Accelerator

Alexey M. Koshkarev<sup>1</sup>, Ivan M. Shchudlo<sup>2</sup>  
Sergey Yu. Taskaev<sup>3</sup>

<sup>1-3</sup>Budker Institute of Nuclear Physics SB RAS  
Novosibirsk, Russian Federation

<sup>1-3</sup>Novosibirsk State University  
Novosibirsk, Russian Federation

<sup>1</sup>koshi8bit@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9471-7904>

<sup>2</sup>cshudlo.i.m@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-8130-5249>

<sup>3</sup>taskaev@inp.nsk.su, <https://orcid.org/0000-0002-5313-2563>

## Abstract

The VITA accelerator neutron source based on a vacuum insulated tandem accelerator operates at the Institute of Nuclear Physics SB RAS. The development of a separate compact facility for the generation of fast neutrons is an actual task, it will allow the treatment of malignant tumors via boron-neutron capture therapy with fast neutrons and a number of other applications. To control the facility, store and analyze data, the author has previously created an automation system that allows the operator to provide long-term stable proton or deuteron beam production in a wide range of energy and current variations, and scientific staff to obtain experimental data and process them in real time.

Currently, the BINP SB RAS is manufacturing the accelerating neutron source VITA for the National Medical Research Center for Oncology named after N. N. Blokhina in Moscow. It is planned to put it into operation in 2025. In contrast to the operating experimental installation of the BINP SB RAS, an ion source from the D-Pace company (Canada) will be used.

This paper presents the automation procedure for the new ion source, control algorithms, PID controller coefficients and operating parameters, which made it possible to obtain a maximum average beam current on the Faraday cup of 13 mA with a stability of 0.14%.

## Keywords

boron neutron capture therapy, VITA, ion source, D-Pace, automation, stabilization

## For citation

Koshkarev A. M., Shchudlo I. M., Taskaev S. Yu. Development and implementation of the D-Pace ion source automation system for the VITA acceleration. *Siberian Journal of Physics*, 2024, vol. 19, no. 1, pp. 54–60 (in Russ.). DOI 10.25205/2541-9447-2024-19-1-54-60

## Введение

Заболееваемость злокачественными образованиями значительна, поэтому требуется развитие новых методов лечения. Одним из таких методов является бор-нейтронозахватная терапия [1] (БНЗТ), предложенная в 1936 г. Данная терапия позволяет избирательно воздействовать на опухолевые клетки, не повреждая здоровые, и таким образом лечить пока что неизлечимые злокачественные опухоли [2], такие как глиомы головного мозга высокой степени злокачественности, включая глиобластому, рак мягких тканей головы и шеи, рак кожи (меланому) и его метастазы.

Метод показал свою эффективность, и в разных странах в конце 90-х годов прошлого столетия было принято решение внедрять его в клиническую практику. На тот момент единственным источником нейтронов нужного спектра и плотности были ядерные реакторы, которые практически невозможно установить в медицинском учреждении из-за их больших размеров, дороговизны и радиационной опасности. Поэтому несколько команд начали работу по созданию компактных ускорителей заряженных частиц для генерирования нейтронов, которые можно установить в медицинских учреждениях.

В Институте ядерной физики СО РАН разрабатывается ускорительный источник тепловых нейтронов VITA [3], энергия которых идеально подходит для проведения БНЗТ зло-

качественных опухолей в условиях онкологической клиники. Ускоритель представляет собой экспериментальную физическую установку, на которой проведено множество экспериментов, показавших готовность использования концепции ускорителя в клинике. Один из следующих шагов к реализации медицинской установки – замена старого ионного источника на разработку компании D-Pace (Канада)<sup>1</sup> для Национального медицинского исследовательского центра онкологии им. Н. Н. Блохина в Москве. Данная работа посвящена разработке системы автоматизации нового ионного источника.

### Ионный источник D-Pace

Создание пучка отрицательных ионов водорода является первой ступенью в процессе генерации нейтронов. В качестве инжектора для медицинской установки был выбран ионный источник D-Pace (Канада), который способен генерировать пучок отрицательных ионов водорода с током до 15 мА и энергией до 30 кэВ. Общий вид платформы ионного источника представлен на рис. 1.

Одна из особенностей управления заключается в том, что ионный источник и его периферия расположены на различных потенциалах: 1)  $-150$  кВ; 2)  $-180$  кВ; 3) потенциал земли. На рис. 2. представлена упрощенная схема подключения блоков питания и системы автоматизации.

Для управления и стабилизации тока пучка разработана программа на языке C++ и фреймворком Qt. Для отображения графиков реального времени с частотой обновления 50 Гц и количеством серий данных в 20 параметров был разработан собственный компонент, в основе которого стала общедоступная библиотека QCustomPlot.

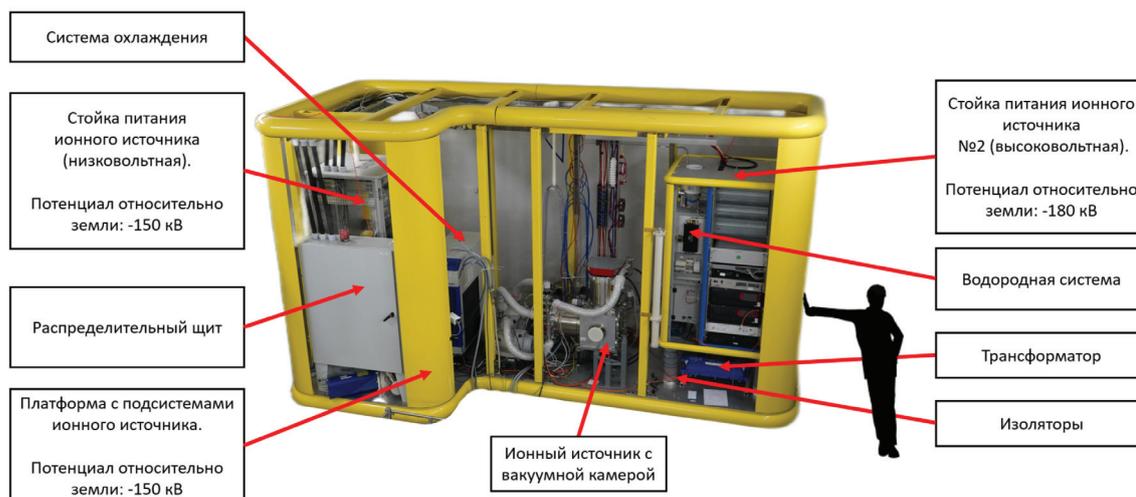


Рис. 1. Общий вид ионного источника и его частей  
Fig. 1. General view of the ion source and its parts

<sup>1</sup> Ионный источник D-Pace. URL: <https://www.d-pace.com/?e=304> (дата обращения: 15.09.2023).

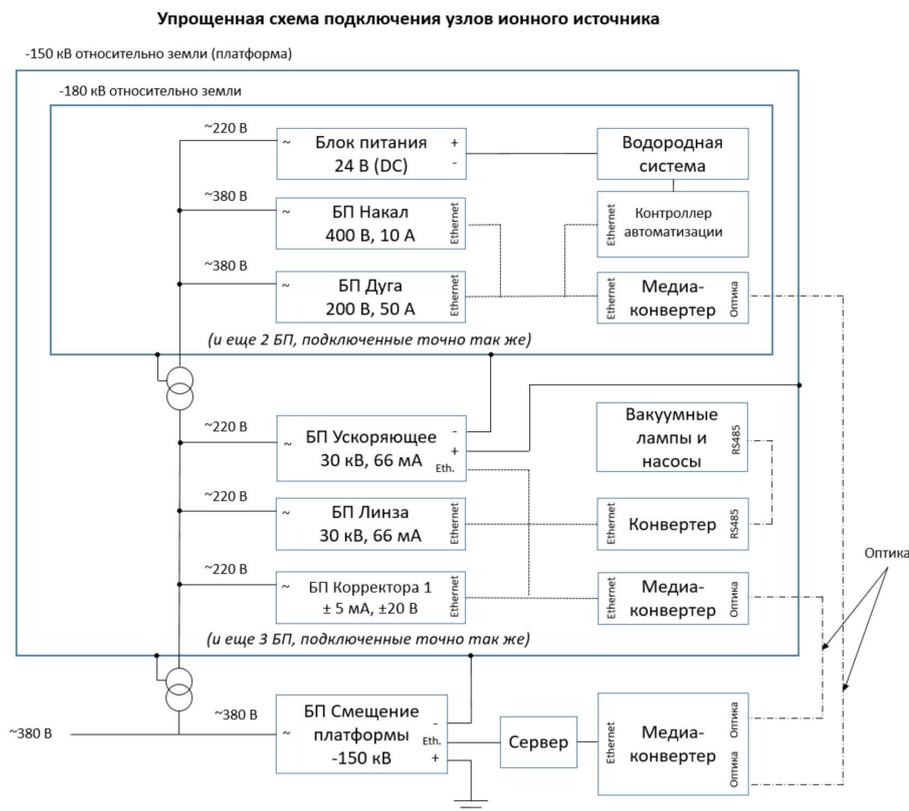


Рис. 2. Упрощенная схема подключения узлов ионного источника  
 Fig. 2. Simplified wiring diagram of the ion source nodes

Разработанная программа позволяет управлять: водородной системой (клапанами, датчиками давления, регулятором расхода водорода) через контроллеры ввода-вывода, блоками питания при помощи стандартных протоколов Modbus и SCPI, а также блоками питания CAENels FAST-PS 0520-100 и вакуумными лампами с нестандартными протоколами. Чтобы исключить влияние электромагнитных наводок, все узлы (кроме цилиндра Фарадея и водородной системы) управляются и диагностируются через цифровые интерфейсы Ethernet и RS485. Для реализации автоматического обновления и управления версиями программы и был настроен CI/CD на локальном сервере при помощи GitLab, в котором настроена автоматическая статическая компиляция и сохранением каждой версии в архив, что значительно упрощает процедуру отката до стабильной версии при необходимости.

### Стабилизация

Для генерации пучка ионов водорода со стабильным током следует поддерживать стабильный ток дуги при помощи изменения тока накала. Для этого был разработан алгоритм, который состоит из двух частей: 1) таблица параметров; 2) PID-регулятор. Значение тока пучка зависит от различных параметров: токов и напряжений на восьми блоках питания, а также потока водорода. Для автоматизированной генерации тока пучка предлагается реализовать таблицу, которую оператор разово заполняет в процессе наладки источника. Значения токов, напряжений и потока водорода в таблице подбираются экспериментально и устанавливаются в зависимости от требуемого тока.

На рис. 3 показана структура таблицы и логика PID-регулятора: в первой колонке заполнены желаемые значения тока пучка ионов водорода с шагом, например, 1 мА. Во всех остальных

колонках указывается напряжение/ток, которое нужно установить на блоках питания или поток водорода на регуляторе расхода. Если запрашиваемый оператором ток точно не совпадает с током из таблицы – алгоритм вычисляет промежуточное значение между ближайшими строками в таблице при помощи линейной интерполяции для каждого параметра.



Рис. 3. Таблица параметров и логика PID-регулятора  
Fig. 3. Parameter table and PID controller inputs

Без использования PID-регулятора удавалось получить ток пучка 5,4 мА на цилиндре Фарадея, при этом оператор вручную задавал ток накала каждые 1–2 с, что неприемлемо для медицинской установки. Для стабилизации тока накала при помощи PID-регулятора следует на вход подать целевой ток дуги из таблицы и его измеренное значение из блока питания. Выход регулятора управляет током блока питания накала. Чтобы получить ток пучка ионов более 13 мА, требуется реализовать систему со временем реакции менее 10 мс за весь цикл синхронизации: 1) измерение тока дуги; 2) расчет нового значения тока накала в PID-регуляторе; 3) установка тока накала.

### Результаты и обсуждения

С использованием PID-регулятора получен пучок ионов с током 11,5 мА, стабильностью 3 % на протяжении двух с половиной часов. В другом эксперименте удалось получить пучок ионов с током 13 мА со стабильностью 0,14 % на протяжении часа. Такая стабильность не яв-

Параметры узлов ионного источника для различных токов пучка

Parameters of ion source nodes for various beam currents

Ток пучка на цилиндре Фарадея, мА	Поток водорода, ссст	Напряжение плазмы, В	Напряжение вытягивающее, кВ	Ток дуги цель, А	P	I	D
1	2	3	4	5	6	7	8
2,65	5,5	2,8	3	1,6	0,05	0,001	10
3,46	6	2,9	4	1,8			
4,1	6,5	3,1	5	1,8			
4,66	7	3,2	6	1,9			
5,25	7,5	3,35	7	2			
5,76	8	3,4	8	2,2			

Окончание табл.

1	2	3	4	5	6	7	8
6,25	8,5	3,4	9	2,2			
6,7	8,5	3,5	10	2,3			
7,12	9	3,7	11	2,35			
7,54	9,5	3,7	12	2,4			
7,95	11	3,7	13	2,45			
8,3	11,5	3,75	14	2,5	0,01		6
8,64	12	3,8	15	2,65			
8,97	12,5	3,85	16	2,75			
9,22	12,6	3,9	17	2,8			
9,52	13	3,95	18	2,9			
9,79	13,3	4	19	2,95			
10	13,5	4	20	3			
10,25	13,7	4,1	21	3			
10,5	14	4,1	22	3,05			
10,53	14,5	4,15	23	3,05			
10,76	14,5	4,2	24	3,15	0,001		
10,97	14,7	4,25	25	3,15			
11,2	15	4,3	26	3,15			
11,4	15,3	4,35	27	3,25			
11,62	15,5	4,35	28	3,25			
11,8	15,8	4,4	29	3,3			
11,97	16	4,4	30	3,3			

ляется порогом для этого источника. Оказалось, что со временем ток пучка уменьшается примерно на 0,5 мА каждый час, из-за чего расчетное значение стабильности ощутимо падает. Эту особенность возможно нивелировать путем автоматического увеличения устанавливаемого тока пучка до тех пор, пока измеренный ток на цилиндре Фарадея не сравняется с требуемым (следует управлять блоками питания при помощи таблицы параметров). В таблице приведены параметры узлов для различных токов пучка на цилиндре Фарадея и параметры PID-регулятора.

### Заключение

Разработанный и внедренный комплекс автоматизации источника ионов D-Race позволил получить пучок отрицательных ионов водорода с требуемым для терапии током и стабильностью при минимальном участии оператора. Комплекс автоматизации дает возможность генерировать поток нейтронов на ускорительном источнике нейтронов VITA для проведения бор-нейтронозахватной терапии в Национальном медицинском исследовательском центре онкологии им. Н. Н. Блохина в Москве.

### Список литературы / References

1. **Ahmed M. et al.** (Eds.) Advances in Boron Neutron Capture Therapy. *International Atomic Energy Agency*, Vienna, Austria, June 2023.
2. **Sauerwein W. A. G. et al.** (Eds.). Neutron capture therapy: principles and applications. *Springer Science & Business Media*, 2012.
3. **Taskaev S. et al.** Neutron Source Based on Vacuum Insulated Tandem Accelerator and Lithium Target. *Biology*, 2021, vol. 10, p. 350. DOI: 10.3390/biology10050350

### Сведения об авторах

**Кошкарев Алексей Михайлович**, аспирант

**Щудло Иван Михайлович**, научный сотрудник

**Таскаев Сергей Юрьевич**, доктор физико-математических наук

### Information about the Authors

**Alexey M. Koshkarev**, PhD Student

**Ivan M. Shchudlo**, Researcher

**Sergey Yu. Taskaev**, Doctor of Physical and Mathematical Sciences

*Статья поступила в редакцию 16.11.2023;  
одобрена после рецензирования 20.11.2023; принята к публикации 12.12.2023*

*The article was submitted 16.11.2023;  
approved after reviewing 20.11.2023; accepted for publication 12.12.2023*