

# ВЫСОКОИНТЕНСИВНЫЙ УСКОРИТЕЛЬ ПРОТОНОВ КВАЗИНЕПРЕРЫВНОГО ДЕЙСТВИЯ ДЛЯ КОМПАКТНОГО ИСТОЧНИКА НЕЙТРОНОВ

*Т. В. Кулевой\**

Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Москва

Разработка и создание компактных источников нейтронов (КИН) — это современная тенденция развития исследовательских методик с использованием рассеяния нейтронов. Под КИН понимают источники нейтронов малой и средней мощности, работающие на базе импульсных ионных или электронных ускорителей. Представлены результаты развития проекта компактного источника нейтронов DARIA (Dedicated for Academic Research and Industrial Application) на основе линейного резонансного ускорителя протонов, призванного обеспечить научное сообщество современными источниками нейтронов.

Compact accelerator-driven neutron sources (CAN) are a modern trend in the development of research techniques using neutrons. CAN is a low-power neutron source operating on the basis of pulsed ion or electron accelerators. The development results of the compact neutron source project DARIA (Dedicated for Academic Research and Industrial Application) based on a linear resonant proton accelerator are presented. The CAN DARIA is designed to provide the Russian Federation scientific community with a modern neutron sources network.

PACS: 29.25.Dz; 29.20.Ej

## ВВЕДЕНИЕ

Уникальные свойства нейтрона определяют его востребованность в качестве инструмента научных исследований. Ввиду своей электрической нейтральности нейтроны обладают высокой неразрушающей проникающей способностью и, как следствие, могут быть использованы при исследованиях вещества в экстремальных условиях. Энергия тепловых нейтронов имеет тот же порядок, что и энергия элементарных возбуждений в твердом теле, и, как следствие, нейтроны могут «чувствовать» возбуждения решетки (кристаллической и магнитной) и молекулярные вибрации, а значит, являются эффективным инструментом для исследования этих явлений. Длина волны нейтронов имеет тот же порядок, что и межатомные расстояния в веществе, значит, с их помощью можно определить кристаллические структуры и межатомные пространства

---

\* E-mail: kulevoy@itep.ru

исследуемых образцов. При этом определять положение атомов можно с точностью от  $10^{-13}$  см. Кроме того, нейтроны имеют спин и, соответственно, магнитный момент, что позволяет формировать пучки поляризованных нейтронов и изучать когерентное и некогерентное магнитное рассеяние. Таким образом, нейтроны могут быть использованы для исследования магнитных структур и магнитных флуктуаций. Необходимо упомянуть и такую особенность нейтронов, как умение «видеть» ядро, т. е. нейтроны имеют чувствительность к легким атомам, обладают изотопной контрастностью. Однако надо констатировать, что сегодня наблюдается тенденция к катастрофическому снижению доступных для проведения исследовательских работ пучков нейтронов. Во многом это обусловлено тем, что исследовательские реакторы, бум строительства которых пришелся на прошлый век, постепенно выводятся из эксплуатации, а строительство новых крайне затруднено из-за тенденции на отказ от ядерной энергетики в развитых странах, а также на ужесточение требований безопасности, предъявляемых к ядерным установкам. Так, Neutron Landscape Group (NLG) пришла к выводу, что в ближайшие 5–10 лет ученые в Европе столкнутся с резким сокращением использования пучков нейтронов для исследований. По мнению группы экспертов, выработка нейтронов может сохраняться в пределах 20% от существующих уровней при условии, что самый большой исследовательский реактор ILL [1] будет работать по крайней мере до 2030 г., а планируемый к вводу в эксплуатацию к концу десятилетия самый мощный в мире источник нейтронов на базе ускоренного пучка протонов в Швеции сразу будет работать на все запланированные экспериментальные станции [2]. Научное сообщество надеется, что исследовательские ядерные реакторы могут быть заменены установками на основе каскадно-испарительной реакции (так называемые Spallation Source), базирующимися на мощных ускорителях ионов. Уже успешно действуют установки SNS в США [3], ISIS в Великобритании [4], J-PARC в Японии [5] и CSNS в Китае [6]. Как упоминалось выше, вводится в эксплуатацию установка в Европе (ESS) [7]. Но, как говорит старая поговорка, сила самого сильного уходит, если слабые ее ежедневно не поддерживают.

Для успешного существования нейтронного сообщества необходимо найти замену широкой сети малых исследовательских реакторов, которая стремительно уходит в историю. Решить эту проблему могут компактные источники нейтронов на базе высокоинтенсивных ускорителей [8]. Проекты таких установок сегодня находятся в той или иной степени проработки практически во всем мире, и ученые, работающие над ними, организовали сообщество, получившее название UCANS (Union for Compact Accelerator-driven Neutron Sources — сообщество компактных источников нейтронов на основе ускорителей заряженных частиц) [9]. Источники нейтронов на базе ионных линейных ускорителей имеют ряд преимуществ, обусловленных более высоким выходом нейтронов. Как пример, можно назвать японскую установку RANS (RIKEN Accelerator-

driven compact neutron sources), где на протонном пучке с энергией 7 МэВ при средней интенсивности 100 мкА достигается выход нейтронов на уровне  $10^{12} \text{ с}^{-1}$  [10]. В РФ можно упомянуть установку в ИЯФ СО РАН, обеспечивающую генерацию нейтронных потоков ускоренными пучками протонов при взаимодействии с литиевой мишенью [11]. Также следует отметить реализуемый сегодня совместно европейско-японским сообществом проект компактного нейтронного источника на основе дейтериевого пучка IFMIF (International Fusion Materials Irradiation Facility) [12]. Источник должен работать в непрерывном режиме, но на сегодня уже ведутся работы с пучком на начальной части — RFQ. В импульсном режиме получены токи пучка порядка 100 мА.

В Российской Федерации в рамках Федеральной научно-технической программы развития синхротронных и нейтронных исследований и исследовательской инфраструктуры на 2019–2027 гг. [13] ведется разработка компактного источника нейтронов на основе высокоинтенсивного ускорителя протонов, получившего название DARIA [14] (neutron source Dedicated to Academic Research and Industrial Applications — источник нейтронов, предназначенный для научных исследований и промышленного применения). КИН DARIA создается как прототип серийной установки, предназначенной для формирования инфраструктуры синхротрон-нейтронных исследований, охватывающей всю территорию страны от Калининградской области до Дальнего Востока. На рис. 1 представлены возможные станции для проведения исследований на нейтронных пучках. Для конкретного потребителя будет создаваться свой набор станций

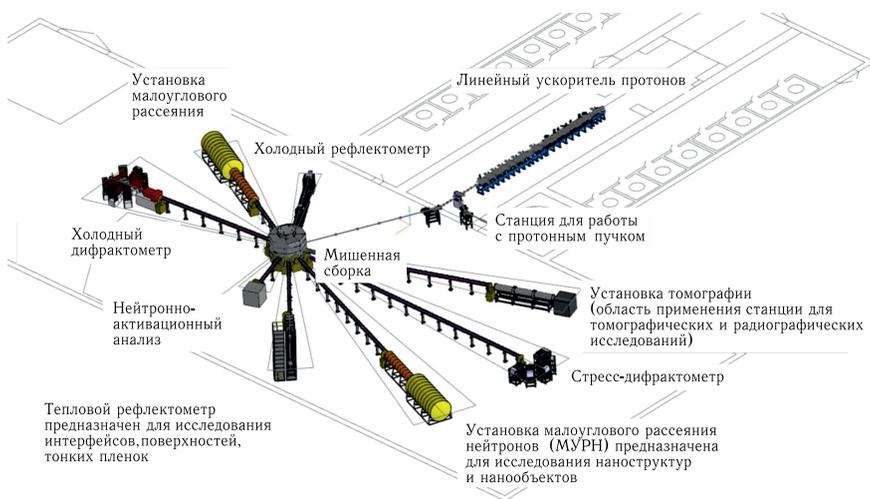


Рис. 1. Компактный источник нейтронов DARIA

«под заказ». К настоящему времени разработаны макеты ключевых элементов линейного ускорителя.

## УСКОРИТЕЛЬ ПРОТОНОВ ДЛЯ УСТАНОВКИ DARIA

Для компактного источника ионов DARIA разрабатывается линейный ускоритель протонов на энергию 13 МэВ с током 100 мА длительностью 100 мкс и частотой следования импульсов до 100 имп./с. В качестве нейтрон-генерирующей мишени предполагается использовать сборку на основе бериллия [15]. Для генерации протонного пучка предназначен разработанный в ИПФ РАН источник GISMO [16]. Результаты измерения эмиттанса протонного пучка, генерируемого источником, легли в основу разработки ускоряющего канала линейного ускорителя [17]. На модернизированной конструкции ведутся работы по оптимизации параметров генерируемого пучка [18, 19]. Ускоряющая структура с пространственно-однородной квадрупольной фокусировкой (RFQ) обеспечивает ускорение и группировку пучка на начальном этапе вплоть до энергии 3,3 МэВ [20]. Используется структура со смещенными окнами связи, хорошо зарекомендовавшая себя в ряде проектов [21]. Дальнейшее ускорение до конечной энергии осуществляется пятизакорными структурами с трубками дрейфа (DTL) [22]. Такая модульная структура позволяет не только регулировать выходную энергию пучка, что расширяет область применения установки, но и использовать разработанные технологии для создания ускорителей на меньшие/большие энергии, например, для нужд микроэлектроники и/или медицины. Для обеспечения поперечной устойчивости пучка в процессе ускорения в канале DTL предназначены гибридные линзы, располагаемые между резонаторами, где основное поле создается структурой на постоянных магнитах, а его подстройка обеспечивается дополнительным электромагнитным полем [23].

Работа ускорителя со скважностью 100 (duty factor = 1%) требует поиска подходов к разработке и созданию резонаторов, которые ранее никогда не реализовывались в Российской Федерации. Разработка резонаторов RFQ и DTL выполнена специалистами ККТЭФ – НИЦ «Курчатовский институт». Изготовление резонаторов ведется на заводе ВНИИТФ им. Е. И. Забахина и на опытном производстве ИЯФ им. Г. И. Будкера СО РАН.

В результате изучения технологических возможностей изготовления отдельных секций RFQ была разработана конструкция квадратного сечения, состоящая из семи секций [24]. Конструкция секции RFQ включает множество элементов, каждый из которых, за исключением фланцев, изготавливается из бескислородной меди (рис. 2). Фланцы, как для соединения секций между собой, так и для подсоединения вакуумного оборудования и системы охлаждения, изготавливаются из нержавеющей стали. Пайка производится в несколько этапов, с промежуточными работками деталей после каждой пайки. На первом этапе для провер-

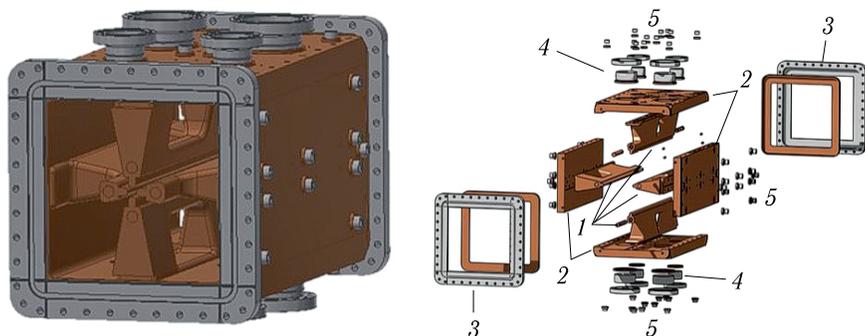


Рис. 2. Конструкция RFQ: 1 — электроды; 2 — стенки секции резонатора; 3 — торцевые фланцы; 4 — боковые патрубки; 5 — бонки для подсоединения подводов с охлаждающей жидкостью

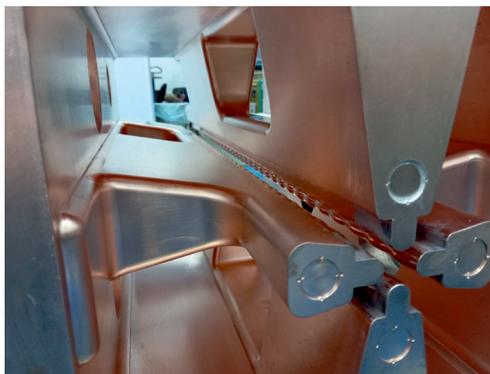


Рис. 3. Секция резонатора RFQ после пайки

ки разработанной технологии ведется изготовление второй секции RFQ в полном объеме. На рис. 3 представлена секция после пайки с нанесенной модуляцией на рабочую поверхность.

Аналогично для отработки технологии ведется изготовление полномасштабного макета резонатора DTL. Модель DTL представлена на рис. 4. Так же, как и RFQ, резонатор изготавливается из бескислородной меди, за исключением фланцев, которые изготавливаются из нержавеющей стали. На рис. 5 показано устройство охлаждаемой трубки дрейфа DTL в ходе ее изготовления.

Как было сказано выше, для обеспечения поперечной фокусировки ускоряемого пучка предполагается использовать гибридные квадрупольные линзы, где основное поле создается постоянными магнитами, а обмотки используются для коррекции поля для оптимизации проводки

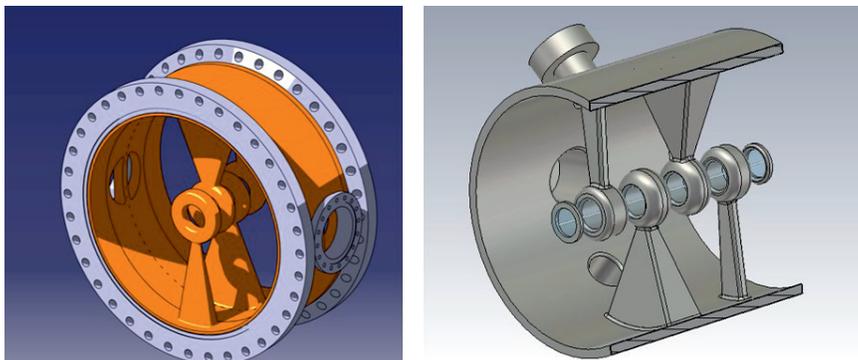


Рис. 4. Модель резонатора DTL для установки DARIA



Рис. 5. Трубка дрейфа в ходе изготовления резонатора DTL

высокоинтенсивного пучка. Разработаны два варианта гибридной линзы для DTL [23, 25], и в 2024 г. запланировано их изготовление.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках Федеральной программы развития синхротрон-нейтронных исследований ведется разработка компактного источника нейтронов на базе линейного высокоинтенсивного ускорителя протонов DARIA. Разработаны конструкции начальной части ускорителя — резонатора структуры с пространственно-однородной квадрупольной фокусировкой и основной части — резонаторов с трубками дрейфа. Поскольку установка должна работать в квазинепрерывном режиме, то требуется применение уникальных технологий, ранее не используемых в Российской Федерации. В рамках проекта изготавливаются макеты резонаторов, а также макеты гибридных квадрупольных линз, необходимых для поперечной фокусировки пучка.

**Финансирование.** Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках Соглашения № 075-15-2022-830 от 27 мая 2022 г.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. <https://www.ill.eu/>
2. <https://www.science.org/content/article/europe-course-neutron-drought>
3. <https://neutrons.ornl.gov/sns>
4. <https://www.isis.stfc.ac.uk/Pages/home.aspx>
5. <https://j-parc.jp/c/en/>
6. <https://english.ihep.cas.cn/csns/>
7. <https://europeanspallationsource.se/>
8. *Berkovits D. et al.* IAEA-TECDOC-1981 “Compact Accelerator Based Neutron Sources”. Intern. Atomic Energy Agency. Vienna, 2021. 126 p.
9. <https://ucans.org/publication.html>
10. <https://rans.riken.jp/index-e.html>
11. *Таскаев С. Ю.* Разработка ускорительного источника эпитепловых нейтронов для бор-нейтронозахватной терапии // ЭЧАЯ. 2019. Т. 50, № 5. С. 657–669.
12. <https://www.ifmif.org/>
13. <http://static.government.ru/media/files/7H0npvIMtHyahEIAhzisATobIo9SKvkv.pdf>
14. *Павлов К. А., Коник П. И., Коваленко Н. А., Кулевой Т. В., Серебренников Д. А., Субботина В. В., Павлова А. Е., Григорьев С. В.* // Кристаллография. 2022. Т. 67, № 1. С. 5;  
*Pavlov K. A., Konik P. I., Kovalenko N. A., Kulevoy T. V., Serebrennikov D. A., Subbotina V. V., Pavlova A. E., Grigorev S. V.* // Crystallogr. Rep. 2022. V. 67, No. 1. P. 3.
15. *Швец П. В. и др.* Вращающаяся водоохлаждаемая бериллиевая мишень компактного источника нейтронов // Поверхность. Рентген., синхротр. и нейтрон. исслед. 2023. № 7. С. 63–70.
16. *Skalyga V. A. et al.* Gasdynamic Electron Cyclotron Ion Sources: Basic Physics, Applications, and Diagnostic Techniques // Rev. Sci. Instrum. 2022. V. 93. P. 033502.
17. *Барабин С. В. и др.* Измерения эмиттанса газодинамического электронно-циклотронного резонансного источника ионов // Письма в ЖТФ. 2021. Т. 47, вып. 10. С. 7–10.
18. *Выбин С. С. и др.* Разработка магнитной системы и системы формирования ионного пучка для протонного инжектора проекта DARIA // Прикл. физика. 2022. № 4. С. 29.
19. *Выбин С. С. и др.* Оптимизация систем протонного инжектора компактного нейтронного источника DARIA // Поверхность. Рентген., синхротр. и нейтрон. исслед. 2023. № 7. С. 4.
20. *Кропачев Г. Н. и др.* Моделирование динамики пучка в ускорителе RFQ для проекта DARIA // Вестн. СПбГУ. Прикл. математика. Информатика. 2022. Т. 18, вып. 4. С. 568;  
*Kropachev G., Sitnikov A., Kulevoy T.* // Cybernet. Phys. 2022. V. 11, No. 4. P. 205–209.

21. *Andreev V. A., Parisi G.* Field Stabilization and End-Cell Tuning in a 4-Vane RFQ // Proc. EPAC'94, London, June 1994. P. 1300–1302.
22. *Кропачев Г. Н. и др.* Высокоэнергетическая часть ускорителя для компактного источника нейтронов DARIA: ускоряющая структура с трубками дрейфа // Поверхность. Рентген., синхротр. и нейтрон. исслед. 2023. № 7. С. 27–39.
23. *Kilmetova V. et al.* Hybrid Quadrupole Lens for the Focusing Channel of the DARIA Complex // J. Surf. Invest.: X-Ray, Synchrotron Neutron Tech. 2023. V. 17, No. 4. P. 772.
24. *Семенников А. И., Ситников А. Л., Кропачев Г. Н., Кулевой Т. В., Науменко М. Ю., Анфалова О. В., Краев В. С.* Конструкция прототипа секций резонатора с пространственно-однородной квадрупольной фокусировкой компактного источника нейтронов DARIA // Поверхность. Рентген., синхротр. и нейтрон. исслед. 2023. № 7. С. 20–26.
25. *Antokhin E. I., Derbysheva T. R., Eliseev V. S. et al.* Quadrupole Lens for DTL Linac // Phys. At. Nucl. 2023. V. 86. P. 2283–2287.