

УДК 621.384.64

КОНСТРУКЦИЯ ПРОТОТИПА СЕКЦИЙ РЕЗОНАТОРА С ПРОСТРАНСТВЕННО-ОДНОРОДНОЙ КВАДРУПОЛЬНОЙ ФОКУСИРОВКОЙ КОМПАКТНОГО ИСТОЧНИКА НЕЙТРОНОВ DARIA

© 2023 г. А. И. Семенников^а, А. Л. Ситников^а, Г. Н. Кропачев^а,
Т. В. Кулевой^{а, *}, М. Ю. Наumenко^б, О. В. Анфалова^б, В. С. Краев^б

^аНаучный исследовательский центр “Курчатовский институт”,
Москва, 123182 Россия

^бРоссийский федеральный ядерный центр — Всероссийский научно-исследовательский
институт технической физики им. академика Е.И. Забабахина, Снежинск, 456770 Россия

*e-mail: kulevoy@itep.ru

Поступила в редакцию 28.12.2022 г.

После доработки 15.02.2023 г.

Принята к публикации 15.02.2023 г.

Проект компактного источника нейтронов DARIA на основе линейного резонансного ускорителя протонов направлен на создание серийной установки, способной обеспечить российское научное сообщество импульсными нейтронными пучками с интенсивностями, сопоставимыми с интенсивностями исследовательских ядерных реакторов. Отсутствие делящегося вещества позволяет существенно снизить требования к радиационной безопасности таких установок и, следовательно, размещать их на площадке ведущих научных центров и университетов, готовящих специалистов в области нейтронной физики. В рамках гранта Министерства науки и высшего образования ведется разработка ключевых элементов установки. Представлена на обсуждение конструкция и последовательность изготовления полномасштабного макета секции ускорителя с пространственно-однородной квадрупольной фокусировкой и резонатора с трубками дрейфа.

Ключевые слова: источник нейтронов, протонный ускоритель, ионный пучок, резонатор с трубками дрейфа, ускоритель с пространственно-однородной квадрупольной фокусировкой, ВЧ-параметры, непрерывный режим, вакуумная пайка.

DOI: 10.31857/S1028096023070166, EDN: TDGUHD

ВВЕДЕНИЕ

Проект компактного источника нейтронов DARIA (Dedicated for Academic Research and Industrial Application) на основе линейного резонансного ускорителя протонов направлен на создание серийной установки, способной обеспечить научное сообщество Российской Федерации импульсными нейтронными пучками с интенсивностями, сопоставимыми с интенсивностями исследовательских ядерных реакторов [1]. Источник нейтронов на основе линейного резонансного ускорителя протонов состоит из сильноточного источника протонов [2, 3], линейного ускорителя [4–6], бериллиевой мишени [7], замедлителя нейтронов [8] и набора нейтронных станций [9–11]. Для контроля параметров высокоинтенсивного пучка разрабатывается уникальная система диагностики [12]. Разработку резонансного линейного ускорителя ведет Курчатовский комплекс теоретической и экспериментальной физики НИЦ “Кур-

чатовский институт” (бывший ИТЭФ). Ускоритель должен обеспечить ускорение до энергии 13 МэВ импульсного пучка протонов с интенсивностью 100 мА, длительностью импульса 100 мкс, следующего с периодичностью 100 имп./с. Несмотря на богатую историю развития ускорительной техники, в стране отсутствуют установки с такими параметрами. Главной проблемой при создании ускорителя является тот факт, что необходимо разработать и внедрить технологии изготовления резонаторов, способных работать в режиме малой скважности вплоть до ускорения непрерывного пучка (continuous wave). На сегодняшний день развитие таких технологий является ключевой задачей в физике и технике линейных резонансных ускорителей заряженных частиц. Можно говорить, что уже освоены технологии разработки резонаторов для ускорения пучков низкой интенсивности. Например, на установке RIKEN успешно функционирует линейный уско-

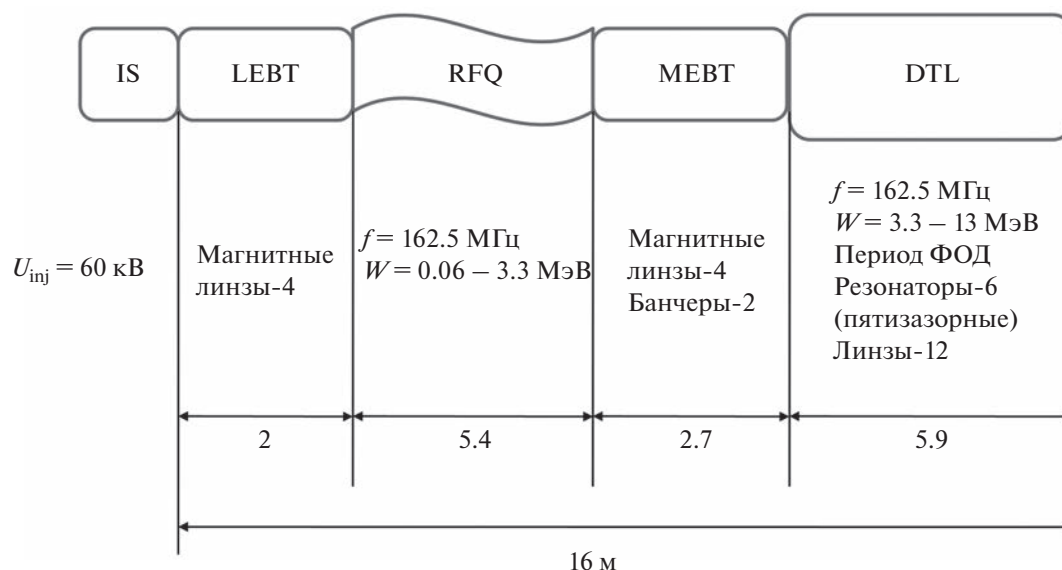


Рис. 1. Схема протонного линейного ускорителя: IS — ионный источник; LEBT — канал транспортировки низкоэнергетического пучка; RFQ — резонатор с пространственно-однородной квадрупольной фокусировкой; MEVT — канал транспортировки пучка средней энергии; DTL — набор резонаторов с трубками дрейфа и фокусирующими гибридными квадрупольными линзами.

ритель RILAC (Япония) [13], а на создаваемой установке FRIB (Facility for Rare Isotope Beams), сооружаемой в США, успешно проведены тестовые испытания начальной части установки [14]. Однако еще рано говорить о полностью решенной задаче ускорения в режиме непрерывного пучка. Все ускорительное сообщество наблюдает за тестовыми испытаниями, проводимыми на установке IFMIF, где в импульсном режиме при скважности, превышающей требуемую для DARIA, получен ускоренный ток ионов дейтерия 125 мА [15]. Используя опыт, накопленный сообществом разработчиков линейных ускорителей, в рамках проекта DARIA создают линейный резонансный ускоритель, состоящий из начальной части — резонатора с пространственно-однородной квадрупольной фокусировкой RFQ (Radio Frequency Quadrupole), основной части — набора резонаторов с трубками дрейфа DTL (Drift Tube Linac) — и фокусирующих гибридных квадрупольных линз, устанавливаемых между резонаторами [16] (рис. 1). В работе обсуждается выбор конструкции для изготовления полномасштабных макетов секций резонатора RFQ и первого резонатора DTL.

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ СЕКЦИИ RFQ И ЕЕ ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ

Для уменьшения поперечных размеров резонаторов RFQ выбрана ускоряющая конструкция со смещенными окнами связи [17]. На начальном

этапе было проведено сравнение параметров секции RFQ для конструкции трех видов: когда обечайка секции выполнена в виде цилиндра, как в [14], имеет в сечении вид восьмиугольника, как описано в [18], или квадрата, как описано в [15]. На рис. 2 показаны вышеперечисленные варианты.

Различные варианты резонаторов сравнивали при следующих фиксированных параметрах, определенных в результате моделирования динамики пучка [5] и предварительного моделирования конструкции электродов: частота 162.5 МГц; длина резонатора 778 мм; средний радиус апертуры R_0 9 мм; длина окна связи 230 мм; высота окна связи 90 мм; ширина основания электрода 78 мм; ширина вершины электрода 30 мм; длина сторон 345 мм; высота наконечников (с учетом немоделированных наконечников) 17.2 мм.

Результаты моделирования представлены в табл. 1. Сравнение результатов моделирования позволяет сделать вывод о том, что электродинамические характеристики резонаторов RFQ в различных конфигурациях мало различаются. В то же время конфигурация с квадратным сечением потребует заметно меньше материала для изготовления. Кроме того, такая конструкция значительно проще для организации пайки составных частей, что предопределило выбор в пользу данной конфигурации.

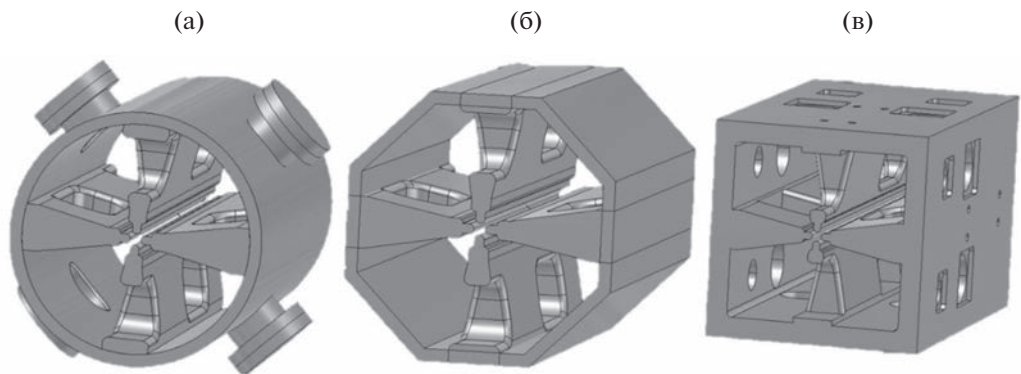


Рис. 2. Варианты исполнения секции RFQ с обечайкой: а – цилиндрической; б – с восьмиугольным сечением; в – с квадратным сечением.

Дополнительно на основе численного моделирования была построена зависимость собственной добротности резонатора квадратного сечения от радиуса скругления внутренних ребер резонатора. Полученная зависимость представлена на рис. 3. Ее анализ позволил установить максимум при радиусе 50 мм. Моделирование всего резонатора RFQ, составленного из секций квадратного сечения, дало возможность определить его электродинамические характеристики (табл. 2).

КОНСТРУКЦИЯ ПРОТОТИПА СЕКЦИИ RFQ

Результаты моделирования были использованы для конструирования макета отдельной секции резонатора RFQ. Конструкция секции представлена на рис. 4. Поскольку предполагается, что ускоритель будет работать в режиме малой скважности и, как следствие, с большой тепловой напряженностью отдельных узлов, резонатор должен быть изготовлен из бескислородной меди. Для макета была выбрана медь, соответствующая стандарту Cu–OF (С10200/М06 ГОСТ 859-2014) с содержанием кислорода не более 0.001%

(в тестовом образце содержание кислорода составило 0.00043%) и фосфора не более 0.002% (в тестовом образце 0.0001%).

Заложенные характеристики резонатора, а также использование меди как основного материала корпуса и электродов требуют применения технологии многоступенчатой пайки припоями, характеризующимися разными температурами плавления. Конструкция макета RFQ состоит из четырех электродов, четырех стенок резонаторов, торцевых фланцев и набора патрубков и бонок для подсоединения магистралей подачи и сброса охлаждающей жидкости (рис. 5). В каждой секции находятся две пары электродов – горизонтальная и вертикальная. Они отличаются не только модуляцией на гребне, но и расположением окон связи (рис. 6). Электроды устанавливают на внутренние стенки резонатора, до того, как стенки будут соединены в общую конструкцию. В теле электрода сделаны каналы для охлаждающей жидкости, а на гребень электрода наносят модуляцию, определенную в результате моделирования динамики пучка [5]. Горизонтальный канал для потока охлаждающей жидкости в непосред-

Таблица 1. Сравнение варьируемых параметров секции RFQ разной конфигурации

Параметр	Сечение		
	цилиндрическое	восьмиугольное	квадратное
Диаметр резонатора, мм	385	370	323
Собственная добротность	12000	12000	11600
ВЧ-мощность потерь на секцию, кВт	119	119	120

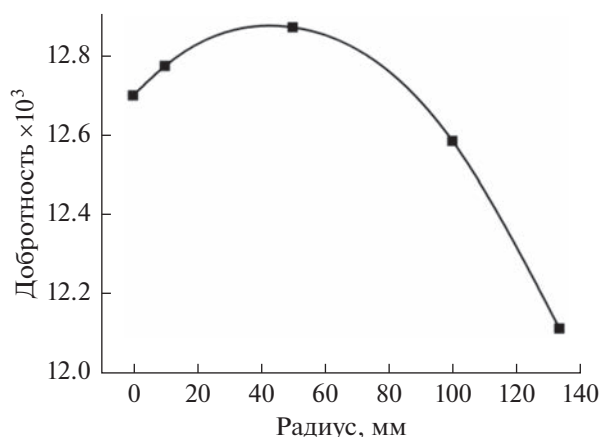


Рис. 3. График зависимости собственной добротности от радиуса скругления внутренних ребер резонатора.

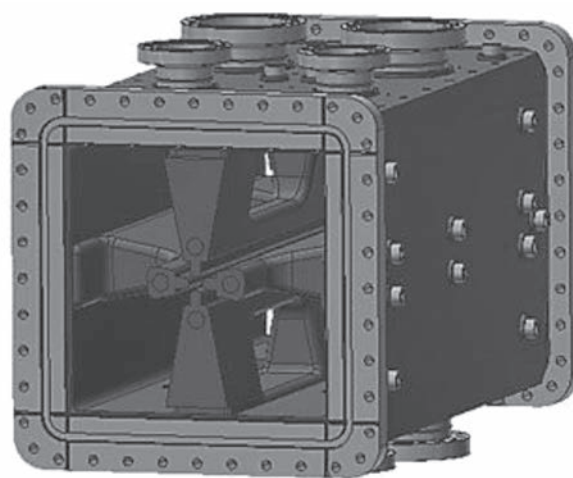


Рис. 4. Внешний вид секции в сборе.

ственной близости от гребня электрода изготавливают в ходе сверления. Его герметичность обеспечивает установка торцевой заглушки с применением технологии пайки (рис. 6). Ввод охлаждающей жидкости будет осуществляться через отверстия в основании электродов сквозь соответствующие отверстия в стенках резонатора. В этих местах припаивают соединительные резьбовые бонки. Стенки также разбиты на пары (рис. 6). В стенках аналогично электродам путем сверления изготавливают каналы для их охлаждения. Отверстия сверлят вдоль резонатора RFQ с последующей герметизацией торцевых технологических отверстий аналогично каналам охлаждения электрода. Охлаждающую жидкость вводят в каналы и выводят из них через специальные глухие отверстия, просверленные с внешней стороны стенок резонатора.

С внешней стороны на пару вертикальных стенок резонатора устанавливают только патрубки с бонками для последующего подсоединения охлаждающей жидкости. На пару горизонтальных

стенок резонатора с внешней стороны устанавливают патрубки большого сечения (с ДУ63 мм и ДУ100 мм), предназначенные для монтажа вводов ВЧ-мощности, подстроечных ВЧ-элементов (подвижных плунжеров), измерительных ВЧ-петель, а также элементов вакуумной системы (турбомолекулярных насосов, измерителей давления и входного фланца канала форвакуумной откачки). На каждой секции резонатора предусмотрено по четыре патрубка ДУ100 мм и четыре ДУ63 мм (рис. 7). Патрубки ДУ100 и ДУ63 выполняют в виде биметалла — основание, близкое к стенкам резонатора, изготавливают из бескислородной меди, а присоединительные фланцы — из нержавеющей стали. Торцевые фланцы секции также выполняют в виде биметаллических узлов. Внешнюю, торцевую, сторону изготавливают из нержавеющей стали (рис. 8), что обеспечивает механическую прочность соединения отдельных секций в единый резонатор. Промежуточная проставка — из меди.

Таблица 2. Электродинамические характеристики прототипа секции RFQ

Параметр	Величина
Резонансная частота, МГц	162.5
Межэлектродное напряжение, кВ	173
Добротность	13000
ВЧ-мощность на единицу длины, кВт/м	125
ВЧ-мощность на весь резонатор, кВт	680

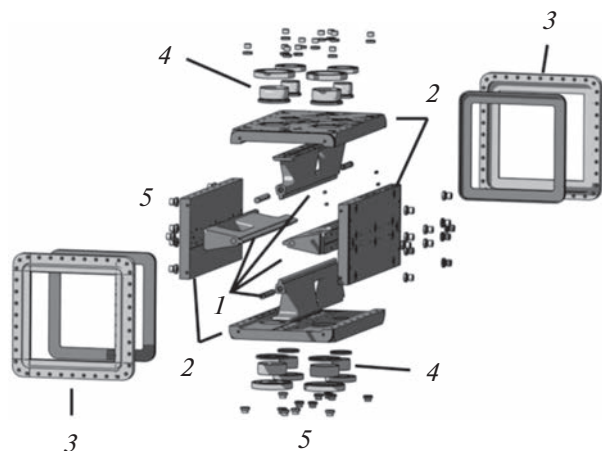


Рис. 5. Составные части секции RFQ: 1 – электроды; 2 – стенки секции резонатора; 3 – торцевые фланцы; 4 – боковые патрубки; 5 – бонки для подсоединения подводов с охлаждающей жидкостью.

ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ ИЗГОТОВЛЕНИЯ

На первом этапе изготавливают электроды без нанесения модуляции на их гребень, стенки резонатора с припусками, патрубки, бонки, торцевые фланцы с припуском и запасом для последующего выполнения зуба для вакуумного уплотнения, промежуточные медные проставки, необходимые по технологии пайки. После этого производят сборку биметаллических узлов, т.е. спаивают радиальные патрубки, бонки с медными проставками, торцевые фланцы с подложкой.

На следующем этапе электроды, радиальные патрубки и бонки припаивают к стенкам резонатора. На этом же этапе заглушки впаивают в тело электрода. После этого на электроды наносят модуляцию согласно результатам моделирования динамики пучка [5], производят контрольную сборку в единый корпус для тестовых измерений электродинамических характеристик резонатора и, при необходимости, выполняют чистовую обработку привалочных поверхностей оснований и штифтовку соединяемых элементов. По окончании тестовых измерений отдельные части спаивают в единый резонатор, но без торцевых фланцев. Предварительно перед установкой торцевых фланцев проводят торцовку корпуса под эти фланцы.

На окончательном этапе изготовления припаивают торцевые фланцы (в горизонтальном положении корпуса), проводят проверку на отклонение от перпендикулярности привалочных поверхностей торцевых фланцев относительно оси и фрезеруют шпоночные пазы в торцевых фланцах (максимальное отклонение симметричности

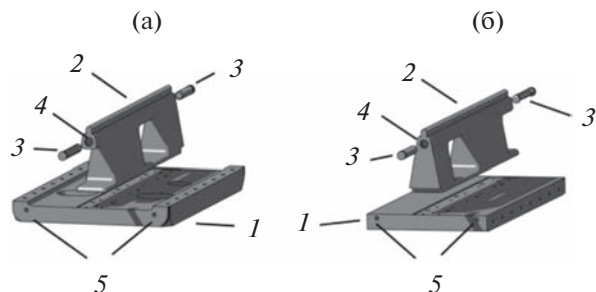


Рис. 6. Вертикальный (а) и горизонтальный (б) электроды с соответствующей стенкой резонатора: 1 – стенка секции резонатора; 2 – электрод; 3 – заглушка отверстия под канал охлаждения; 4 – отверстие для канала охлаждения электрода; 5 – отверстие под канал охлаждения в стенке резонатора.

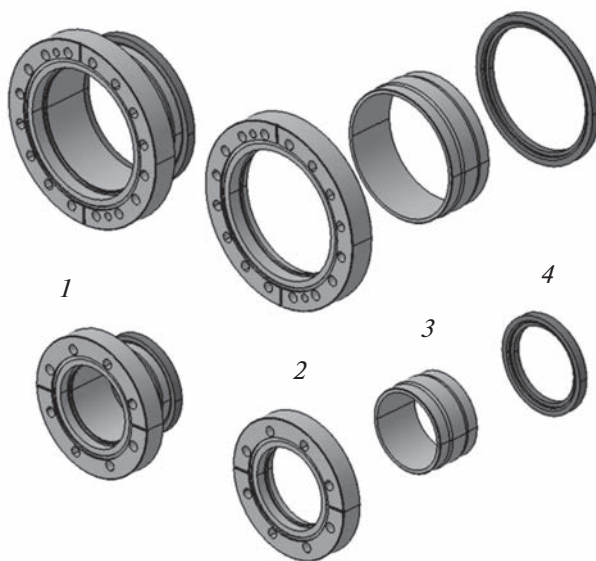


Рис. 7. Конструкция боковых патрубков с фланцами ДУ100 (вверху) и ДУ63 (внизу): 1 – патрубок с фланцем в сборе; 2 – фланец CF (ConFlat) из нержавеющей стали; 3 – патрубок из нержавеющей стали; 4 – промежуточная медная проставка.

50–100 мкм относительно плоскостей симметрии секции). В ходе пайки предполагается последовательно использовать припои нескольких марок. Для радиальных патрубков – биметалл ПМ17 (патрубок из нержавеющей стали спаивается с промежуточной медной проставкой, фланцы CF к нержавеющей трубкам привариваются методом аргонно-дуговой сварки). Для торцевых фланцев – биметалл ПМ17 с использованием ПМО12 (нержавеющий фланец спаивается с промежуточной медной проставкой). Для припаивания тела электрода к основанию вместе с заглушками, бонками, патрубками в сборе следует применять ПЗл-

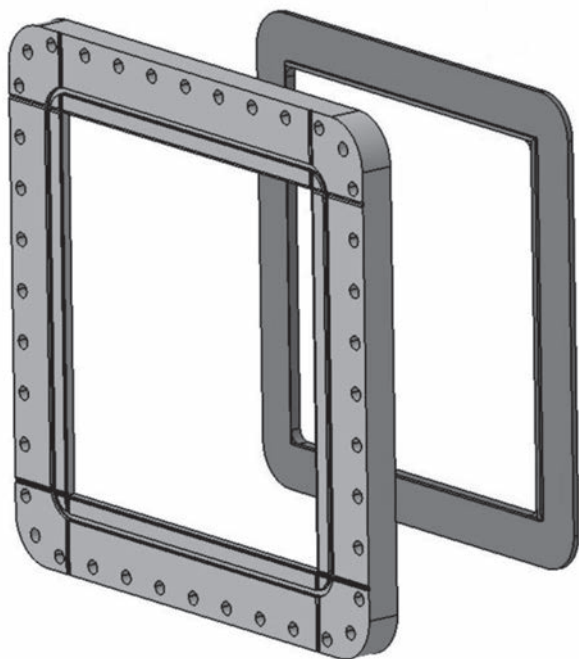


Рис. 8. Торцевой фланец из нержавеющей стали (1) и промежуточная медная проставка под него (2).

М50В, торцевых фланцев к корпусу — ПСР72, для спаивания стенок в единый корпус — ПСрМПД 65-20-15 В.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана конструкция полномасштабного макета секции резонатора RFQ. Конструкция позволяет обеспечить изготовление резонатора для работы в режиме малой скважности и в пределе — даже в режиме непрерывного пучка (continuous wave). В ближайшее время планируется изготовление макета секции RFQ для компактного источника нейтронов DARIA.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках Соглашения № 075-15-2022-830 от 27 мая 2022 г. (продолжение Соглашения № 075-15-2021-1358 от 12 октября 2021 г.).

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Pavlov K.A., Konik P.I., Kovalenko N.A., Kulevoy T.V., Serebrennikov D.A., Subbotina V.V., Pavlova A.E., Gri-

- gorev S.V. // Crystallogr. Rep. 2022. V. 67. Iss. 1. P. 3. <http://www.doi.org/10.1134/S1063774522010096>
2. Skalyga V.A., Izotov I., Golubev S.V., Razin S.V., Sidorov A.V., Viktorov M.E. // Rev. Sci. Instrum. 2022. V. 93. Iss. 3. P. 033502. <https://www.doi.org/10.1063/5.0075486>
3. Выбин С.С., Изотов И.В., Миронов Е.А., Палашов О.В., Скалыга В.А. // Прикладная физика. 2022. № 4. С. 29.
4. Kropachev G., Kulevoy T., Sitnikov A. // J. Surf. Invest.: X-ray, Synchrotron Neutron Tech. 2019. V. 13. Iss. 6. P. 11261131. <https://www.doi.org/10.1134/S1027451019060399>
5. Крощачев Г.Н., Кулевой Т.В., Ситников А.Л., Хабибуллина Е.Р., Виноградов С.В. // Вестн. СПбГУ. Прикладная математика. Информатика. 2022. Т. 18. Вып. 4. С. 567.
6. Крощачев Г.Н., Кулевой Т.В., Ситников А.Л., Виноградов С.В., Хабибуллина Е.Р., Скачков В.С., Сергеева О.С. // Поверхность. Рентген., синхротр. и нейтрон. исслед. 2023. № 7. С.
7. Швеиц П.В., Прокоповиц П.А., Фатьянов Е.И., Клементьев Е.С., Мороз А.Р., Коваленко Н.А., Гойхман А.Ю. // Поверхность. Рентген., синхротр. и нейтрон. исслед. 2023. № 7. С.
8. Коваленко Н.А., Рогов А.Д. // Поверхность. Рентген., синхротр. и нейтрон. исслед. 2023. № 7. С.
9. Григорьев С.В., Коваленко Н.А., Павлов К.А., Москвин Е.В. // Поверхность. Рентген., синхротр. и нейтрон. исслед. 2023. № 7. С.
10. Павлова А.Е., Павлов К.А., Москвин Е.В., Григорьев С.В. // Поверхность. Рентген., синхротр. и нейтрон. исслед. 2023. № 7. С.
11. Grigoriev S., Iashina E., Pavlov K. // J. Surf. Invest.: X-ray, Synchrotron Neutron Tech. 2019. V. 13. P. 11321134. <https://doi.org/10.1134/S1027451019060314>
12. Гаврилов С.А., Тутов А.И. // Поверхность. Рентген., синхротр. и нейтрон. исслед. 2023. № 7. С.
13. Ikezawa E., Fujimaki M., Higurashi Y., Kamigaito O., Kase M., Komiyama M., Nakagawa T., Ozeki K., Sakamoto N., Suda K., Uchiyama A., Yamada K., Kaneko K., Ohki T., Oyamada K., Tamura M., Yamauchi H., Yusa A. Heavy-Ion Beam Acceleration at RIKEN for Super-Heavy Element Search // Proc. Conf. HIAT2015. Yokohama, Japan, 2015. WEPB14. P. 22.
14. Ostroumov P.N., Bultman N., Ikegami M., Lidia S., Lund S., Machicoane G., Maruta T., Plastun A.S., Pozd-eyev E., Rao X., Wei J., Wong J., Xu T., Yoshimoto T., Zhao Q. Accelerator Physics Advances at FRIB // Proc. Conf. IPAC2018. Vancouver, BC, Canada, 2018. P. 2950. <http://www.doi.org/10.18429/JACoW-IPAC2018-THYGBF4>
15. Grespan F., Bellan L., Comunian M., Fagott E., Palmieri A., Pisent A., Scantamburlo F., Akagi T., Hirata Y., Kondo K., Shimosaki Y., Shinya T., Sugimoto M., Cara P., Dzitko H., Jokinen A., Marqueta A., Moya I., Bolzon B., Chauvin N., Marroncle J., Rodriguez Paramo A., Jimenez-Rey D., Podadera I. RFQ Beam Commissioning at Nominal 125 mA Deuteron Beam in Pulsed Mode // Proc. Conf. IPAC2020. Caen, France, 2020. P. 21. <http://www.doi.org/10.18429/JACoW-IPAC2020-TUVIR11>

16. Кильметова И.В., Козлов А.В., Крочачев Г.Н., Куле-
вой Т.В., Лякин Д.А., Сергеева О.С., Скачков В.С.,
Стасевич Ю.Б. // Поверхность. Рентген., син-
хротр. и нейтрон. исслед. 2023. № 7. С. 40–46.
17. Andreev V.A., Parisi G. 90°-Apert-Stem RFQ Structure
for Wide Range of Frequencies // Proc. Conf. PAC'93.
1993. P. 3124.
18. Ostroumov P.N., Barcikowski A., Clifft B., Rusthoven B.,
Sharma S., Sharamentov S.I., Toter W.F., Rathke J.W.,
Vinogradov N.E., Schrage D.L. High Power Test of a
57-MHz cw RFQ // Proc. Conf. LINAC, Knoxville,
Tennessee USA, 2006. THP079. P. 767.

Design of the Prototype of the Radio Frequency Quadrupole Sections for the Compact Neutron Source DARIA

A. I. Semennikov¹, A. L. Sitnikov¹, G. N. Kropachev¹, T. V. Kulevoy^{1, *}, M. Yu. Naumenko²,
O. V. Anfalova², V. S. Kraev²

¹NRC “Kurchatov institute”, Moscow, 123182 Russia

²Russian Federal Nuclear Center is the All-Russian Scientific Research Institute of Technical Physics named after Academician
E.I. Zababakhin, Snezhinsk, 456770 Russia

*e-mail: kulevoy@itep.ru

The DARIA compact neutron source project based on a linear resonant proton accelerator is aimed at creating a serial facility capable of providing the Russian scientific community with pulsed neutron beams with intensities comparable to those of research nuclear reactors. The absence of fissile material makes it possible to significantly reduce the radiation safety requirements for such installations and, consequently, to place them at the site of leading scientific centers and universities that train specialists in the field of neutron physics. Under a grant from the Ministry of Science and Higher Education, key elements of the facility are being developed. The design and sequence of manufacturing for a full-scale model of an accelerator section with radio frequency quadrupole focusing and a resonator with drift tube linac are presented.

Keywords: neutron source, proton accelerator, ion beam, drift tube linac, radio frequency quadrupole, RF parameters, continuous wave, vacuum soldering.