

Научная статья

УДК 621.384.66

DOI 10.25205/2541-9447-2023-18-4-54-61

## **Широкоапертурный цилиндр Фарадея для высокоинтенсивного линейного ускорителя протонов проекта DARIA\***

**Сергей Александрович Гаврилов<sup>1,2</sup>, Юрий Жоржевич Калинин<sup>1</sup>  
Александр Иванович Титов<sup>1,2</sup>**

<sup>1</sup>Институт ядерных исследований Российской академии наук  
Москва, Россия

<sup>2</sup>Московский физико-технический институт  
Долгопрудный, Россия

s.gavrilov@inr.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0353-912X>  
kalinin@inr.ru

alexander.i.titov@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9005-3450>

### *Аннотация*

Одной из основных проблем для диагностики пучка в проектируемом линейном ускорителе протонов для компактного источника нейтронов DARIA является значительная импульсная и средняя мощность пучка в совокупности с относительно низкой энергией, что существенно ограничивает выбор возможных диагностических приборов и методов. Для базовых измерений тока пучка и проведения настроечных процедур в низкоэнергетической части ускорителя был разработан широкоапертурный водоохлаждаемый цилиндр Фарадея. В данной работе представлены конструктивные особенности, оценки тепловых нагрузок в типичных рабочих режимах и экспериментальные результаты испытаний цилиндра на высокоинтенсивном пучке протонов, а также описаны особенности проектирования подобных устройств с учетом влияния пространственного заряда пучка на результаты измерений.

### *Ключевые слова*

линейный ускоритель протонов, диагностика пучка, цилиндр Фарадея

### *Благодарности*

Работа поддержана Министерством науки и высшего образования Российской Федерации в рамках работ по договору № 075-15-2021-1358 от 12 октября 2021 г.

### *Для цитирования*

Гаврилов С. А., Калинин Ю. Ж., Титов А. И. Широкоапертурный цилиндр Фарадея для высокоинтенсивного линейного ускорителя протонов проекта DARIA // Сибирский физический журнал. 2023. Т. 18, № 4. С. 54–61. DOI 10.25205/2541-9447-2023-18-4-54-61

---

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

# Wide-aperture Faraday Cup for the High-Intensity Linear Proton Accelerator of the Project DARIA

Sergei A. Gavrilov<sup>1,2</sup>, Yuri J. Kalinin<sup>1</sup>  
Alexander I. Titov<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Institute for Nuclear Research of the Russian Academy of Sciences  
Moscow, Russian Federation

<sup>2</sup>Moscow Institute of Physics and Technology  
Dolgoprudny, Russian Federation

s.gavrilov@inr.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0353-912X>  
kalinin@inr.ru

alexander.i.titov@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9005-3450>

## Abstract

One of the main problems for beam diagnostics in the projected linear proton accelerator for the DARIA compact neutron source is the high pulse and average beam power combined with a relatively low energy, that significantly limits the choice of possible diagnostic instruments and methods. For basic beam current measurements and tuning procedures in the low-energy part of the accelerator, a wide-aperture water-cooled Faraday cup was developed. This paper presents design features, estimations of thermal loads during typical operation and experimental results of the cup tests at a high-intensity proton beam, also the design features of such devices are described, considering the influence of the beam space charge on the measurement results.

## Keywords

linear proton accelerator, beam instrumentation and diagnostics, Faraday cup

## Funding

The work carried out by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation under Contract No. 075-15-2021-1358 dated October 12, 2021.

## For citation

Gavrilov S. A., Kalinin Yu. J., Titov A. I. Wide-aperture Faraday cup for the high-intensity linear proton accelerator of the project DARIA. *Siberian Journal of Physics*, 2023, vol. 18, no. 4, pp. 54–61 (in Russ). DOI 10.25205/2541-9447-2023-18-4-64-61

## Введение

Проект DARIA – компактный источник нейтронов, предназначенный для прикладных исследований, промышленного применения и образовательных задач, разрабатываемый на основе импульсного сильноточного линейного ускорителя протонов [1] со следующими проектными характеристиками (табл. 1.)

Таблица 1

Основные параметры пучка протонов проекта DARIA

Table 1

Main parameters of DARIA project proton beam

| Параметр                                 | Значение |
|------------------------------------------|----------|
| Энергия пучка на выходе источника (МэВ)  | 0,06     |
| Энергия пучка на выходе RFQ (МэВ)        | 3,3      |
| Энергия пучка на выходе ускорителя (МэВ) | 13       |
| Импульсный ток (мА)                      | до 100   |
| Длительность импульса тока (мкс)         | 100      |
| Частота следования импульсов (Гц)        | до 100   |
| Частота следования сгустков (МГц)        | 162,5    |

Для прямых измерений тока пучка на низкоэнергетическом канале транспортировки ускорителя предусмотрен цилиндр Фарадея (ЦФ) с рабочей апертурой 100 мм, который ввиду высокой средней и импульсной мощности пучка также играет роль аварийной охлаждаемой ловушки, позволяющей блокировать пучок на входе в ускоряюще-фокусирующий канал для защиты ускорителя в нештатных ситуациях или на время проведения настроечных процедур.

### 1. Особенности конструкции

Предлагаемый к использования подвижный цилиндр Фарадея с непрямым охлаждением размещен в отдельной вакуумной камере с присоединительными фланцами CF100 и суммарной установочной длиной 134 мм, а для ввода/вывода ЦФ с установленной системой охлаждения в рабочую апертуру ионопровода использован сильфонный вакуумный ввод линейного движения на основе шагового двигателя (рис. 1).

Непрямое охлаждение основано на использовании диска из нитрида алюминия ( $\sim 170 \text{ Вт/}(\text{м}^2\text{K})$ ) толщиной 1 мм, изолирующего сигнальный электрод от охлаждаемой сборки из двух медных пластин с запрессованной и пропаянной между ними цельнотянутой медной трубкой  $\varnothing 6 \times 1 \text{ мм}$ , по которой прокачивается вода из основной системы охлаждения ускорителя. Выводы медной трубки на атмосферу выполнены на основе «грибковых» соединений, уплотненных витонowymi кольцами с использованием высокотемпературной высоковакуумной смазки.

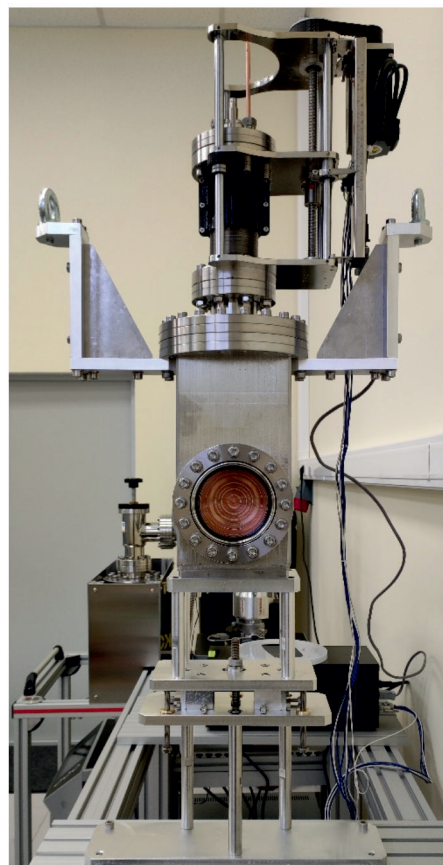
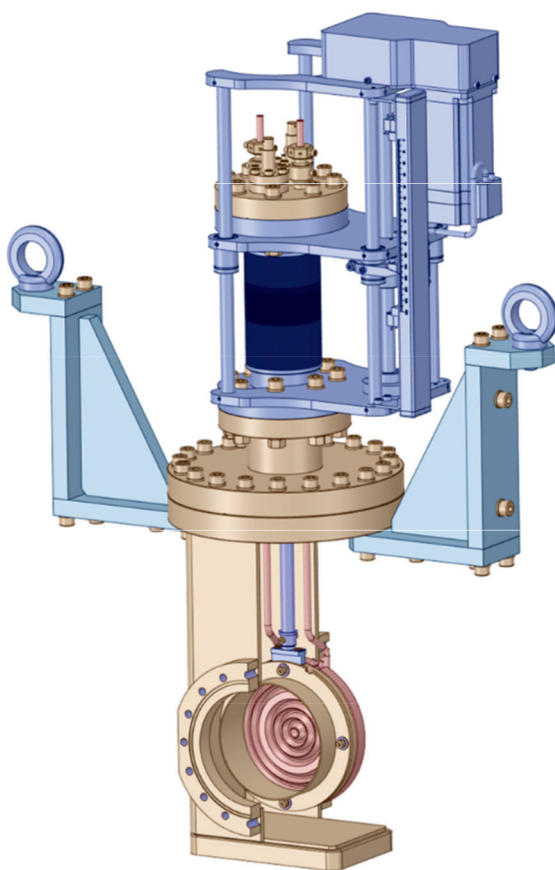


Рис. 1. Трехмерная модель и фотография ЦФ

Fig. 1. 3D model and photo of the Faraday cup

Решающим ограничением для выбора материалов и конструкции охлаждаемого ЦФ являлось требование отсутствия сварных или паяных швов на границе «вода – вакуум»,

которые создают значительные риски прорыва охлаждающей жидкости, циркулирующей под давлением, в вакуумный контур ускорителя. Сборка прикреплялась к сигнальному электроду с помощью массива вентилируемых винтов через изолирующие втулки из нитрида алюминия и пружинные шайбы для компенсации теплового расширения материалов ЦФ.

Для подавления ВЭЭ предусмотрен кольцевой электрод из нержавеющей стали под фиксированным потенциалом смещения до  $-5$  кВ, подаваемым от отдельного источника высоковольтного напряжения через разъем SHV-5 DN16CF. Сигнальный электрод находится под потенциалом виртуальной земли предусилительной электроники, изготавливается из меди для обеспечения высокой электро- и теплопроводности и имеет плоскую геометрию для сокращения продольных размеров. На поверхности электрода сделаны V-образные кольцевые канавки для двукратного увеличения площади взаимодействия электрода с пучком с целью снижения поверхностной плотности мощности тепловыделения.

## 2. Пучковые испытания

Испытания работоспособности ЦФ были проведены на канале инжекции пучка протонов линейного ускорителя ИЯИ РАН со следующими параметрами: энергия  $0,4$  МэВ, частота следования импульсов  $50$  Гц, длительность импульсов  $\sim 77 \div 179$  мкс, импульсный ток  $\sim 0,5 \div 71,0$  мА, среднеквадратичный радиус  $\sim 5$  мм. Максимальная средняя мощность пучка на ЦФ во время испытаний не превышала  $255$  Вт.

Система водяного охлаждения ЦФ была подключена к штатной системе охлаждения элементов канала, при этом температура и расход воды на выходе и входе ЦФ были равны друг другу и не менялись в ходе испытаний, оставаясь равными  $13$  °C и  $\sim 2$  л/мин соответственно при давлении  $\sim 4$  кгс/см<sup>2</sup>.

На рис. 2 показана измеренная зависимость минимально необходимого напряжения смещения от величины импульсного тока пучка. Полное подавление вторично-эмиссионных электронов при максимальном импульсном токе пучка  $\sim 71$  мА наблюдалось при напряжении смещения  $\sim -0,9$  кВ.

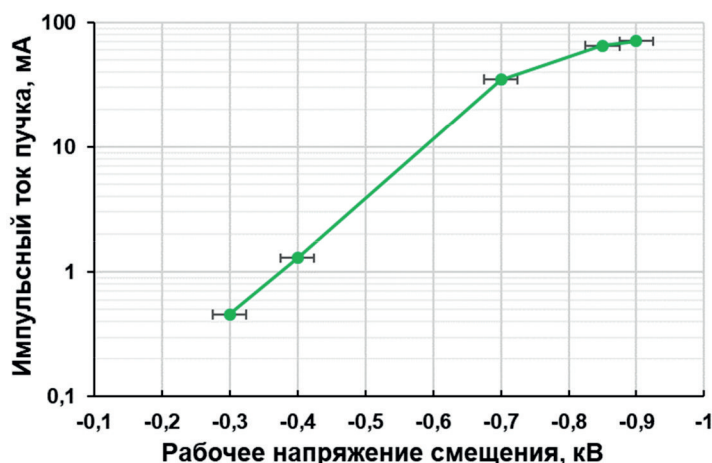


Рис. 2. Зависимость минимально необходимого напряжения смещения от тока пучка

Fig. 2. Dependence of the minimum required bias voltage on the beam current

На рис. 3 представлены фотографии установленного для испытаний цилиндра и примеры экспериментально измеренных импульсов тока пучка с разными величинами длительности и амплитуды, зарегистрированными при разных коэффициентах усиления предусилительной электроники.

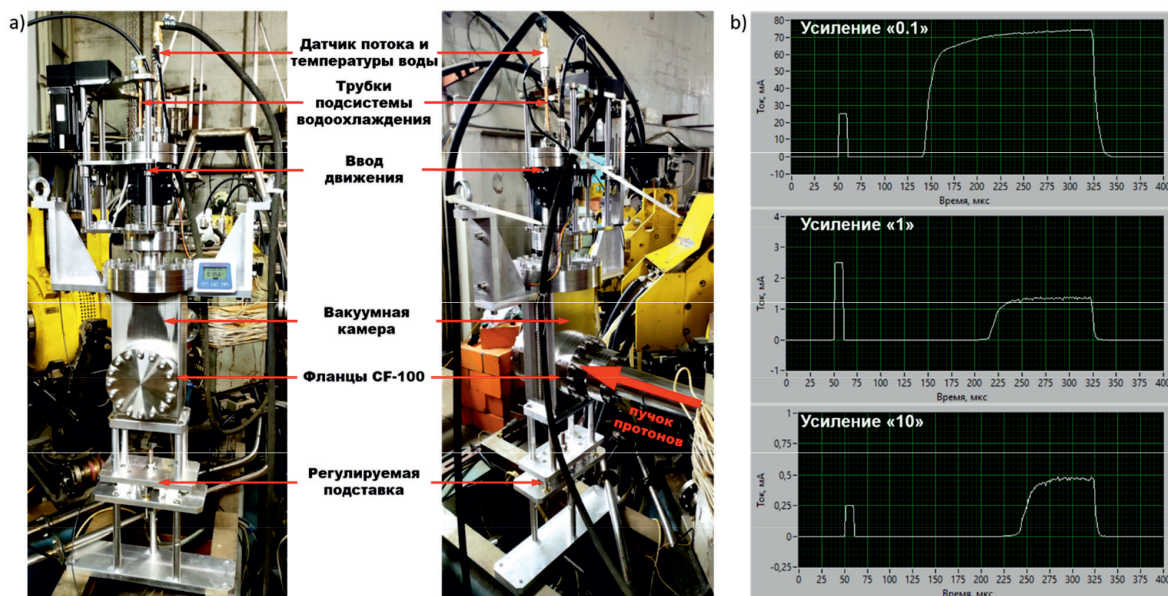


Рис. 3. Фотографии охлаждаемого цилиндра Фарадея, установленного на канале инжекции протонов линейного ускорителя ИЯИ РАН (а).

Примеры калибровочных и регистрируемых импульсов тока для разных интенсивностей пучка протонов (b)  
Fig. 3. Photos of the cooled Faraday cup installed at the proton injection channel of INR RAS linear accelerator (a).

Examples of calibrated and recorded current pulses for different proton beam intensities (b)

### 3. Влияние пространственного заряда пучка

При типичном импульсном токе протонного пучка в диапазоне  $10 \div 100$  мА сильное влияние на транспортировку пучка в низкоэнергетическом канале инжекции оказывает пространственный заряд пучка, который при этом существенным образом искажает электростатический потенциал смещения ЦФ, что приводит к необходимости использования киловольтных напряжений, так как только в этом случае суммарный потенциал на оси системы оказывается достаточным для полного подавления вылета вторичных электронов из апертуры цилиндра с поверхности плоского сигнального электрода. Также известно, что в магнитооптических каналах без электрических полей эффективный потенциал пучка может уменьшаться за счет компенсации до 80 % пространственного заряда пучка электронами, образующимися при ионизации остаточного газа [2].

Для оценки влияния этого эффекта на результаты испытаний было проведено трехмерное моделирование динамики вторичных электронов с типичным энергетическим спектром под влиянием суммарного потенциала (рис. 4) смещения  $-0,9$  кВ и потенциала пространственного заряда пучка энергией 400 кэВ и среднеквадратичным радиусом 5 мм. Максимальный импульсный ток пучка, при котором вторичные электроны возвращаются на сигнальный электрод ЦФ в заданной геометрии (рис. 5), составил  $\sim 64$  мА, т. е. наблюдаемая в процессе измерений эффективная компенсация пространственного заряда в присутствии электрического поля ЦФ составила  $\sim 10$  %.

Для проектного пучка DARIA энергией 60 кэВ и током 100 мА минимальный потенциал смещения составляет  $\sim -3$  кВ без учета эффекта компенсации.

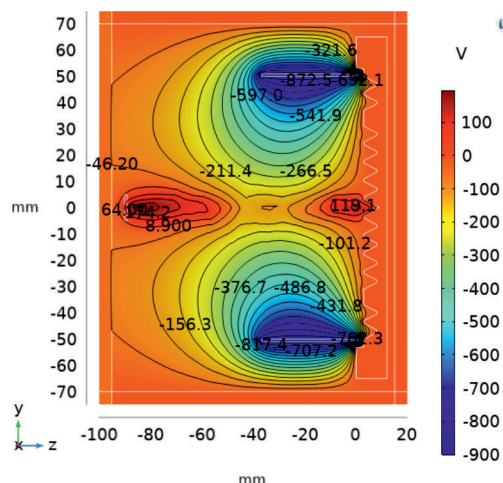


Рис. 4. Распределение суммарного электрического потенциала пучка (400 кэВ, 64 мА) и смещения  $-0,9$  кВ  
 Fig. 4. Distribution of the total electric potential of the beam (400 keV, 64 mA) and bias  $-0.9$  kV

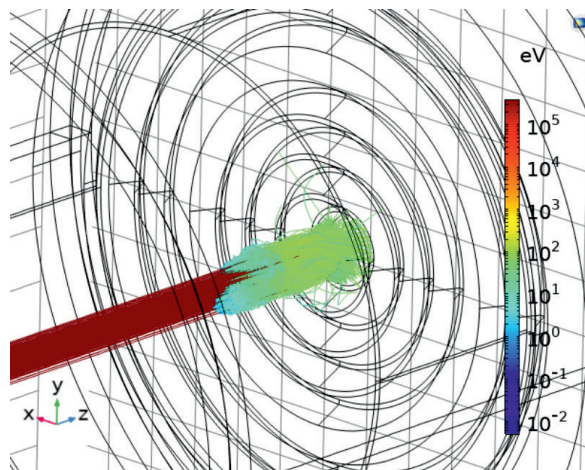


Рис. 5. Трасектории частиц пучка и вторичных электронов под действием суммарного потенциала пучка (400 кэВ, 64 мА) и смещения  $(-0,9$  кВ)  
 Fig. 5. Trajectories of beam particles and secondary electrons under the influence of the total beam potential (400 keV, 64 mA) and bias  $(-0.9$  kV)

#### 4. Расчет тепловых нагрузок

Моделирование тепловых нагрузок при испытаниях и в номинальных режимах работы для предложенной геометрии ЦФ было выполнено в ПО COMSOL Multiphysics<sup>1</sup> исходя из предположения, что:

- ионизационные потери пучка полностью переходят в тепло;
- теплоемкость, теплопроводность, коэффициент излучения поверхности и плотность материалов зависят от температуры согласно данным библиотеки COMSOL;
- геометрические параметры пучка:  $\sigma X = \sigma Y = 5$  мм.

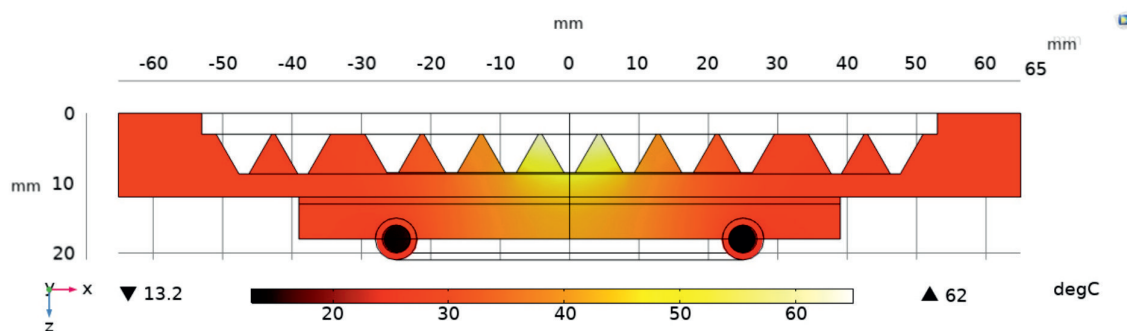


Рис. 6. Распределение температуры в поперечном сечении охлаждаемого цилиндра Фарадея под воздействием пучка (400 кэВ) средней мощностью 255 Вт  
 Fig. 6. Temperature distribution in the cross section of a cooled Faraday cup under the influence of a beam (400 keV) with an average power of 255 W

Результаты стационарных расчетов распределения температуры при испытательной тепловой нагрузке средней мощностью пучка приведены на рис. 6. Нагрев сигнального электрода при непрерывном облучении пучком с мощностью 255 Вт не превышает  $65$  °C на входной

<sup>1</sup> См.: [www.comsol.ru](http://www.comsol.ru)

поверхности сигнального электрода (рис. 6) при температуре охлаждающей воды 13 °С. Таким образом, данный ЦФ можно использовать не только для наладочных измерений, но и как ловушку полного среднего тока пучка ускорителя DARIA.

Максимальная средняя мощность, на которую рассчитана регулярная работа ЦФ при температуре охлаждающей воды 22 °С, составляет 800 Вт (при энергии пучка 3,3 МэВ), так как при этом температура поверхности трубки, контактирующей с водой, не превышает 60 °С, что предотвращает возможное выпадение осадка солей жесткости на стенки трубки охлаждения, а максимальная температура поверхности электрода не превышает 200 °С, что допустимо с точки зрения пластических деформаций элементов конструкции (рис. 7).

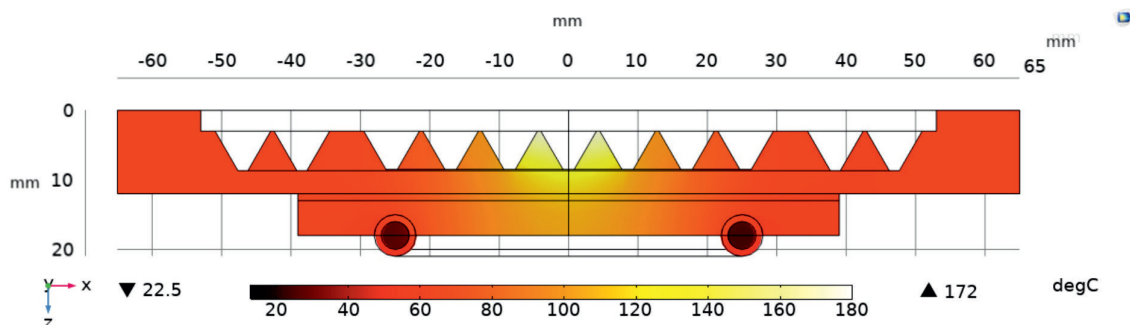


Рис. 7. Распределение температуры в поперечном сечении охлаждаемого ЦФ под воздействием пучка (3,3 МэВ) средней мощностью 800 Вт

Fig. 7. Temperature distribution in the cross section of a cooled Faraday cup under the influence of a beam (3.3 MeV) with an average power of 800 W

С учетом высокой импульсной мощности проектного пучка ускорителя DARIA (1,3 МВт) отдельным тепловым эффектом, требующим расчета, является импульсный нагрев поверхности и приповерхностного слоя сигнального электрода. Для номинальных параметров (ток 100 мА, длительность 100 мкс, среднеквадратичный радиус 5 мм) максимальная локальная температура в области входа пучка в сигнальный электрод ЦФ в конце импульса тока составляет ~ 200 °С для энергии пучка 3,3 МэВ и ~ 500 °С – для энергии 13 МэВ, что гарантирует отсутствие как импульсной термоэмиссии электронов, так и локальной пластической деформации сигнального электрода при облучении с частотой следования импульсов 1 Гц во всем проектном диапазоне энергий, таким образом, разработанный ЦФ может быть использован для измерений тока в наладочном режиме работы в любой части ускорителя.

### Заключение

Для прямых измерений тока пучка на высокоинтенсивном линейном ускорителе проекта DARIA разработан водоохлаждаемый цилиндр Фарадея с рабочей апертурой 100 мм. Ввиду высокой средней и импульсной проектной мощности пучка предлагается использовать данный цилиндр в качестве аварийной ловушки только в низкоэнергетическом канале транспортировки, где средняя ожидаемая мощность пучка не превышает 100 Вт.

Начиная со входа в ускоритель, где средняя мощность пучка достигает ~ 3,3 кВт, следует выбрать индукционные датчики тока для обеспечения неразрушающих токовых измерений.

При необходимости создания отдельной подвижной ловушки пучка на выходе ускорителя (средняя мощность пучка ~ 13 кВт) возможно использование относительно простых конструкций, предназначенных только для процесса теплосъема и не включающих в себя весь комплекс мер по измерению импульсов тока пучка, свойственных цилиндрам Фарадея. При этом следует

отметить возможность использования разработанного ЦФ в наладочном режиме работы с частотой следования импульсов 1 Гц во всем диапазоне энергий и токов ускорителя DARIA.

На основе экстраполяции результатов испытаний, заявленных физико-технических характеристик и результатов моделирования охлаждаемого ЦФ можно сформулировать следующие ограничения на рабочий диапазон параметров измеряемого протонного пучка.

- Максимальная энергия: 45 МэВ (ограничена минимальной толщиной медного электрода ЦФ равной 3,5 мм).
- Импульсный ток:  $0,01 \div 150$  мА (ограничен диапазоном регулировки коэффициентов усиления электроники ЦФ).
- Максимальная импульсная плотность мощности при облучении на частоте 1 Гц:  $2,5$  кВт/мм<sup>2</sup> (ограничена локальным импульсным перегревом входной поверхности электрода ЦФ).
- Максимальная средняя мощность пучка: 800 Вт при подаче на вход подсистемы охлаждения ЦФ воды с расходом более 2 л/мин и температурой менее 22 °С (ограничена расчетной средней мощностью теплосъема подсистемы охлаждения ЦФ).
- Максимальное напряжение смещения для регистрации импульсного тока пучка 100 мА (при энергии 60 кэВ) без учета эффекта компенсации пространственного заряда: –3 кВ (ограничено рабочим напряжением –5 кВ для разъема SHV-5).

#### Список литературы / References

1. **Kropachev G. et al.** The proton linac for compact neutron source DARIA. Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques, 2019, vol. 13, no. 6, pp. 1126–1131. DOI: 10.1134/S1027451019060399
2. **Belov A. et al.** A secondary ion energy analyzer for measuring the degree of compensation of the ion beam space charge. Instruments and Experimental Techniques, 2019, no. 62, pp. 609–614. DOI: 10.1134/S002044121905004X

#### Информация об авторах

**Сергей Александрович Гаврилов**, кандидат физико-математических наук

**Юрий Жоржевич Калинин**, кандидат технических наук

**Александр Иванович Титов**, младший научный сотрудник

#### Information about the Authors

**Sergei A. Gavrilov**, Ph.D. in Physics and Mathematics

**Yuri G. Kalinin**, Ph.D. in Technical Sciences

**Alexander I. Titov**, Junior Scientific Researcher

*Статья поступила в редакцию 12.09.2023; одобрена после рецензирования 15.09.2023;  
принята к публикации 16.11.2023*

*The article was submitted 12.09.2023; approved after reviewing 15.09.2023;  
accepted for publication 16.11.2023*