

# НИЗКОИНДУКТИВНЫЙ ВЫСОКОВОЛЬТНЫЙ ВВОД ИМПУЛЬСНОЙ МОЩНОСТИ В КРИОГЕННЫЙ МОДУЛЬ СЕПТУМНОГО МАГНИТА КОЛЛАЙДЕРА NICA

*Е. В. Муравьева, А. С. Петухов, А. А. Фатеев*<sup>1</sup>

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

Представлен вариант конструкции устройства ввода импульсной мощности в криогенный модуль септумного магнита коллайдера NICA. Такая конструкция позволяет минимизировать индуктивность ввода при приемлемых тепловых потоках от резистивного нагрева и от градиента температур.

A design variant of the pulse power input device for the cryogenic module of the septum magnet of the NICA collider is presented. This design minimizes the input inductance at acceptable heat fluxes from resistive heating and from a temperature gradient. A design variant of a pulse power input device is presented.

PACS: 29.20.-c; 29.27.Ac

## ВВЕДЕНИЕ

В качестве септум-магнита для инъекции ионных пучков в коллайдер NICA к настоящему времени принят так называемый «безжелезный» вариант. В ударных магнитах без ферромагнитных сердечников отклоняющее магнитное поле формируется посредством токнесущих проводников и проводящих экранов.

В ЛФВЭ были проведены концептуальные и макетные проработки такого подхода, которые подтвердили перспективность их использования в комплексе NICA. Подробно рассмотрены преимущества и недостатки этого варианта. Результаты ранее докладывались на семинаре памяти В. П. Саранцева и на «RuPAC2018» [1].

Некоторые из основных параметров импульсного септум-магнита показаны в табл. 1.

В соответствии с проектом пара септум-магнитов должна находиться в едином криомодуле при температуре жидкого азота. Один магнит работает в инъекционном цикле первого канала, а второй — при экстракции из другого канала. Концептуальная конструкция криомодуля показана на рис. 1.

---

<sup>1</sup>E-mail: afateev@jinr.ru

Таблица 1. Параметры септум-магнита

Параметр	Значение
Эффективная длина, мм	2500
Апертура, мм × мм	35 × 35
Амплитуда магнитного поля, Тл	0,5
Амплитуда рассеянных магнитных полей в области циркулирующего пучка, Тл	Не более $10^{-4}$
Длительность импульса тока, мкс	5–10
Амплитуда импульса тока, кА	50
Индуктивность токовой петли в экране, мкГн	1,0

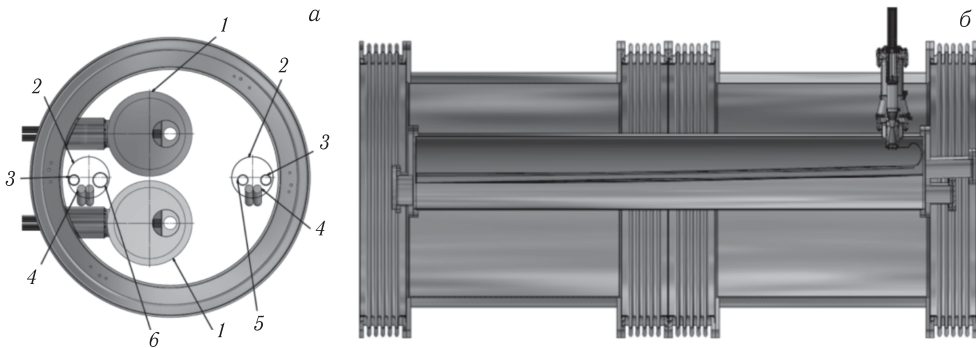


Рис. 1. Концептуальная конструкция криомодуля: а) расположение основных узлов (1 — септум-магнит; 2 — медный экран; 3 — трубопровод с жидким азотом; 4 — сверхпроводники; 5 — прямой гелиевый трубопровод; 6 — обратный гелиевый трубопровод); б) вид с разрезом септумного модуля

## 1. ТРЕБОВАНИЯ К УСТРОЙСТВУ ВВОДА ИМПУЛЬСНОЙ МОЩНОСТИ

Конструкция устройства ввода импульсной мощности в целом должна удовлетворять нескольким требованиям. Необходимы широкий температурный диапазон при эксплуатации, достаточная механическая гибкость в условиях охлаждения высоковакуумного объема до температуры жидкого азота, рабочее напряжение не менее 40 кВ, низкая индуктивность (не более 100 нГн), высокая электрическая проводимость, низкая тепловая проводимость.

Последние два требования довольно противоречивы в случае металлических проводников.

## 2. КОНСТРУКЦИЯ ВВОДА

Конструкция ввода в сборе показана на рис. 2.

Функционально устройство можно разделить на три узла: узел ввода (поз. 2, 3), узел тепловой развязки (поз. 4, 5) и узел высоковакуумного ввода, совмещенный с механической развязкой (поз. 6).

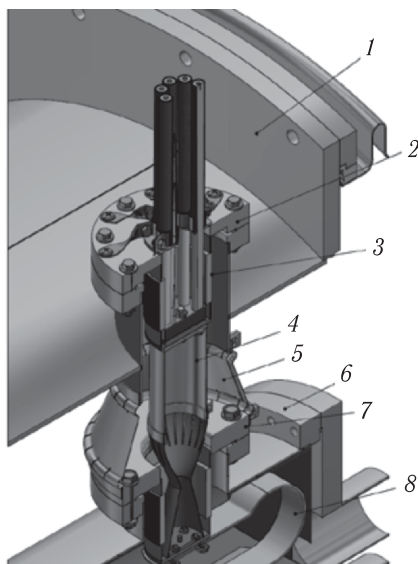


Рис. 2. Устройство ввода: 1 — фланец криомодуля; 2 — фланец ввода в изоляционный вакуум; 3 — высоковольтный изолятор; 4 — тепловая развязка высоковольтных электродов; 5 — тепловая развязка заземленных экранов; 6 — фланец ввода в высоковакуумный объем; 7 — высоковакуумный объем; 8 — токовая петля

### 3. УЗЕЛ ВВОДА

Конструкция узла ввода показана на рис. 3.

Узел ввода обеспечивает гибкое соединение запитывающего генератора с входным изолятором и низкоиндуктивный ввод в изоляционный вакуум.

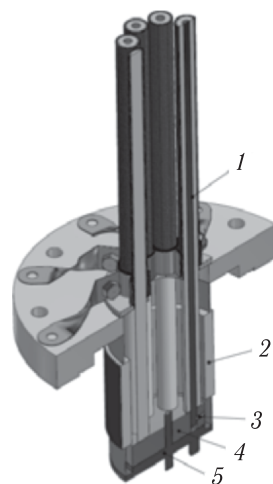


Рис. 3. Узел ввода: 1 — подводящие кабели; 2 — цилиндрический изолятор; 3 — прижимной винт; 4 — контактная шайба; 5 — выходной контакт

### 4. УЗЕЛ ТЕПЛОЙ РАЗВЯЗКИ

Узел тепловой развязки состоит из внутреннего тонкостенного нержавеющей цилиндра (потенциальный проводник) и внешнего разрезного тонкостенного нержавеющей конуса в качестве земляного проводника. Расположение элементов показано на рис. 4.

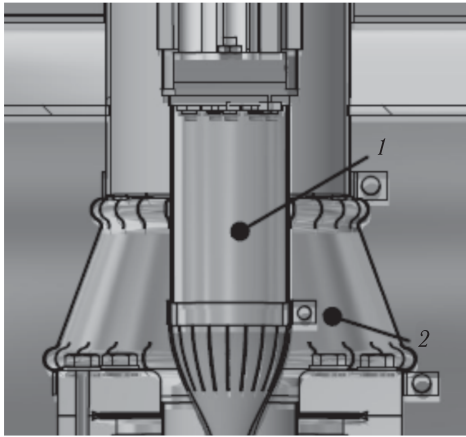


Рис. 4. Узел тепловой развязки: 1 — внутренний проводник; 2 — внешний проводник

В общем случае выбор материала и геометрии элементов развязки зависит как от параметров токового импульса, так и от ограничений по тепловому притоку. С учетом вышеприведенных параметров импульса тока была выбрана нержавеющая сталь марки 12X18H10T толщиной 0,3 мм, параметры которой приведены в табл. 2.

Оценку теплопритоков приведем на примере внутреннего проводника (поз. 1 на рис. 4).

Конструкция детали показана на рис. 5. Длина цилиндра 0,1 м, диаметр — 0,053 м, толщина — 0,0003 м.

Используя данные табл. 1 и 2, можно оценить тепловые потоки от градиента температур и от импульсного нагрева.

Таблица 2. Параметры стали 12X18H10T при разных значениях температуры

$T, K$	$10^{-6} \rho, \text{ Ом} \cdot \text{ м}$	$1/\rho, \text{ см}$	$\lambda, \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{ К})$	$\lambda \rho \times 10^{-6}$
20	0,502	1,992031873	2,08	1,04416
30	0,504	1,984126984	3,37	1,69848
40	0,508	1,968503937	4,58	2,32664
50	0,51	1,960784314	5,68	2,8968
60	0,512	1,953125	6,66	3,40992
70	0,52	1,923076923	7,5	3,9
80	0,522	1,915708812	8,32	4,34304
100	0,532	1,879699248	9,37	4,98484
120	0,55	1,818181818	10,36	5,698
150	0,58	1,724137931	11,1	6,438
170	0,602	1,661129568	11,78	7,09156
200	0,64	1,5625	12,46	7,9744
220	0,66	1,515151515	13,12	8,6592
250	0,693	1,443001443	13,72	9,50796
270	0,72	1,388888889	14,25	10,26

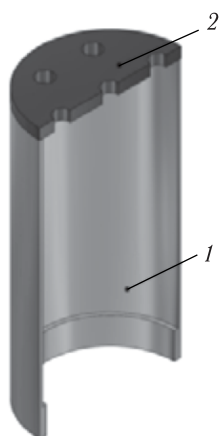


Рис. 5. Внутренний проводник тепловой развязки: 1 — контактная пластина; 2 — цилиндр из нержавеющей стали 12Х18Н10Т

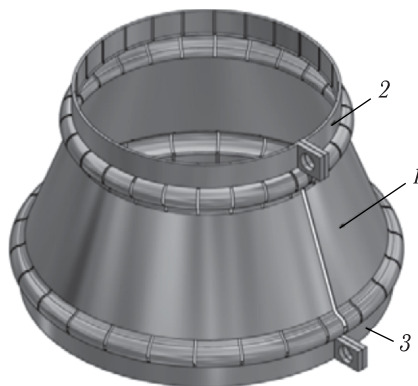


Рис. 6. Конструкция внешнего проводника: 1 — разрезной конус; 2, 3 — хомуты

Тепловой поток составляет  $\sim 7$  Вт. Среднее тепловыделение от токовых импульсов  $\sim 3$  Вт.

Оптимальным является соотношение 1 : 2. Поэтому толщина стенки цилиндра может быть уменьшена вдвое. Однако суммарная тепловая нагрузка на азотную магистраль невелика, что позволяет выбрать толщину из технологических соображений в диапазоне 0,1–0,5 мм.

Эти же оценки можно отнести и к внешнему проводнику (рис. 6).

## 5. УЗЕЛ ВЫСОКОВАКУУМНОГО ВВОДА

Конструкция узла ввода показана на рис. 7. Узел высоковакуумного ввода обеспечивает гибкое соединение цилиндра из нержавеющей стали с изолятором и низкоиндуктивный ввод в высокий вакуум.

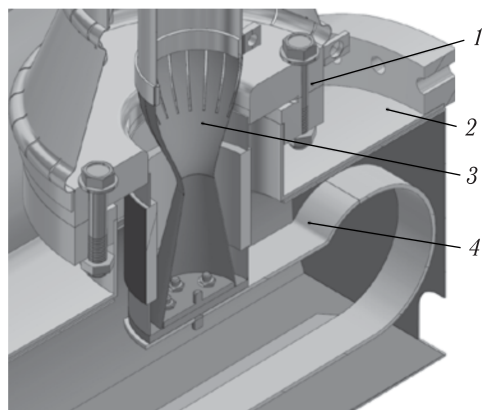


Рис. 7. Участок высоковакуумного ввода: 1 — фланец с вводным изолятором; 2 — криомодуль; 3 — тонкостенный медный соединитель; 4 — токовая шина

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Предлагаемая конструкция устройства ввода импульсной мощности в криогенный модуль септум-магнитов коллайдера NICA удовлетворяет всем основным требованиям к данному узлу. Собственная индуктивность устройства по оценкам не превысит 50 нГн. Наличие гибких механических развязок и надежных электрических соединений позволяет надеяться на хорошие эксплуатационные показатели. Основные принципы конструкции могут быть использованы в других аналогичных устройствах.

## **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. *Muravieva E. V., Petukhov A. S., Tuzikov A. V., Fateev A. A.* A Prototype of Pulsed Septum Magnet for NICA Collider Injection // Proc. of RuPAC2018, Protvino, Russia, 2018. P. 325–326.