

РАСЧЕТ И ТЕСТИРОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ РЕЖИМОВ ЦАНГОВОГО ВВОДА МАГНИТНОГО КИКЕРА НУКЛОТРОНА

*П. А. Сидоров^a, А. П. Козлов^{a, 1}, М. П. Лепкин^a, И. Н. Репкин^a,
А. И. Сидоров^a, В. С. Швецов^a*

^a Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия

В данной работе решается вопрос о передаче импульсной мощности в магнитный кикер нуклотрона ускорительного комплекса NICA. В рабочем режиме узлы кикера, в том числе и цанговые вводы, находятся в условиях низких температур, около -190°C . Задача, требующая решения, — подобрать материал проводника с высокой электропроводностью, чтобы минимизировать омические потери при прохождении больших токов через проводник с низкой теплопроводностью, для того чтобы ограничить скорость теплового потока от внешней среды к узлам кикера. Соответствующие расчеты и исследования, включая экспериментальные данные, представлены в этой работе.

This article addresses the issue of transmitting pulse power to the magnetic kicker of the Nuclotron of the NICA accelerator complex. In the operating mode, the kicker units, including the collet inputs, are in low temperature conditions of about -190°C . It is required to select a conductor material with high electrical conductivity to minimize ohmic losses when passing large currents and low thermal conductivity to limit the rate of heat flow from the external environment to the kicker units. The corresponding calculations and studies, including experimental data, are presented.

PACS: 29.20.—c

ВВЕДЕНИЕ

Для магнитных кикеров нуклотрона ускорительного комплекса NICA были разработаны специальные высоковольтные цанговые вводы импульсной мощности [1–3]. Конструкция вводов состоит из трех частей: внешнего керамического высоковакуумного узла ввода, внешнего и внутреннего цанговых проводников, внутреннего керамического высоковакуумного узла ввода (рис. 1).

Основная функция ввода — пропускать импульсный ток в десятки килоампер и обеспечивать надежный электрический контакт между внешним и внутренним керамическими вакуумными узлами после охлаждения до температуры жидкого азота. Поэтому для внутреннего и внешнего проводников ввода выбрана бронза, которая обеспечивает высокую электропроводность, достаточную упругость и жесткость для цанговых соединений. Надежный электрический контакт ввода обеспечивается

¹E-mail: kozlovap@jinr.ru

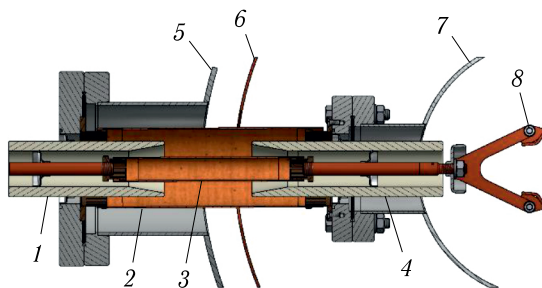


Рис. 1. Высоковольтный цанговый ввод выводного кикера: 1 — внешний керамический высоковакуумный узел ввода; 2, 3 — внешний и внутренний трубчатые проводники; 4 — внутренний керамический высоковакуумный узел ввода; 5 — внешний вакуумный кожух; 6 — азотный экран; 7 — ионопровод; 8 — токопроводы кикера

за счет соединения внешнего и внутреннего проводников с цангами внешнего и внутреннего керамических высоковакуумных узлов.

Для разработанных цанговых вводов кикеров нуклотрона не предусматривались специальные меры для тепловой развязки между ионопроводом и наружным кожухом кикера, которые соединяются цанговым вводом. В основном тепловая развязка осуществлялась за счет уменьшения толщины внутреннего и внешнего трубчатых проводников цангового ввода. Идея тепловой развязки состоит в том, чтобы уменьшить толщину токопроводящего слоя до минимальной величины, например, до толщины скинслоя. Такие металлы, как медь, серебро, обладающие высокой электропроводностью, имеют минимальную толщину скинслоя практически для любых частот. Но они при толщине скинслоя не обладают необходимой жесткостью и не могут обеспечить прочность, необходимую внутреннему и внешнему проводникам цангового ввода. Для того чтобы создать минимальный проводящий слой и обеспечить его прочность, необходимо использовать трубки-корсеты с низкой теплопроводностью и их поверхность покрывать скинслоем серебра или меди.

Для исследования по нагреву цангового ввода были изготовлены два образца проводников цангового ввода: в одном — внешний и внутренний трубчатые проводники сделаны из бронзы (с толщиной стенки 0,7 мм), в другом — из аустенитной нержавеющей стали (с толщиной стенки 0,7 мм), покрытой скинслоем серебра (0,1 мм) (рис. 2). Теплопроводность аустенитной нержавеющей стали в 30 раз меньше теплопроводности меди.

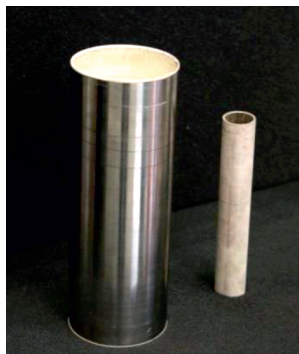


Рис. 2. Внутренний и внешний трубчатые проводники цангового ввода, сделанные из нержавеющей стали (с толщиной стенки 0,7 мм), покрытой серебром толщиной 0,1 мм

сти серебра. Кроме того, еще два образца: в одном — проводники из нержавеющей стали, покрытые двойным скинслоем серебра (0,2 мм), в другом — проводники из керамики, покрытые скинслоем серебра, — исследовались расчетным путем.

РЕЗУЛЬТАТЫ ТЕСТИРОВАНИЯ

Нагрев цангового ввода осуществлялся колоколообразным импульсом тока длительностью 3 мкс, амплитудой $I = 27$ кА, с частотой 1 Гц. Температура в указанных на схеме точках определялась инфракрасным измерителем температуры фирмы Testo SE и термометром. Измерения проводились после нескольких часов нагрева цангового ввода на атмосфере, после того как наступал стационарный режим и температура его элементов оставалась постоянной. Схема измерения температуры показана на рис. 3. Результаты измерений представлены в табл. 1.

По экспериментальным данным была уточнена расчетная модель, с помощью которой моделировали распределение температур в образцах с двойным скинслоем серебра на нержавеющей трубке и скинслоем серебра на керамике.

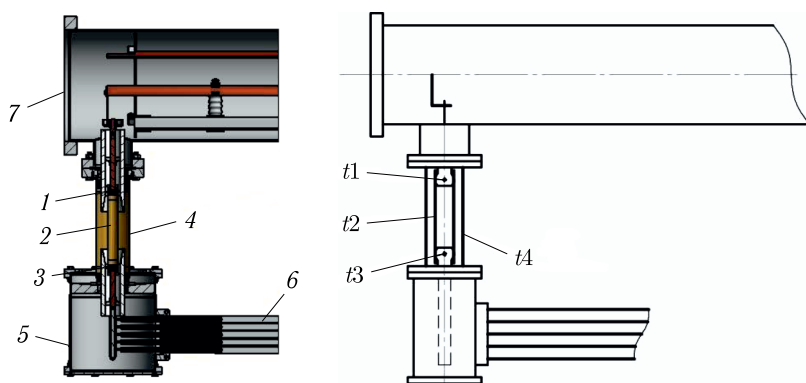


Рис. 3. Схема измерения температуры в цанговом вводе: 1, 3 — цанга; 2 — внутренний трубчатый проводник; 4 — внешний трубчатый проводник; 5 — крупногабаритный разъем кабельной сборки; 6 — высоковольтные кабели; 7 — кикер

Таблица 1

Материал проводника	Изменение температур, °C			
	$T_{\text{начальная}}$	ΔT_1	ΔT_2	ΔT_3
Нержавеющая сталь (0,7 мм), покрытая серебром (0,1 мм)	23	13,8 (36,8)	7,9 (30,9)	13,8 (36,8)
Бронза (0,7 мм)	23	16,2 (39,2)	8,9 (31,9)	16,2 (39,2)
Нержавеющая сталь (0,7 мм), покрытая серебром (0,2 мм)	20	6,5 (26,5)	3,86 (23,86)	6,5 (26,5)
Керамика (2 мм), покрытая серебром (0,1 мм)	20	15,25 (35,25)	3,01 (23,01)	15,25 (35,25)

Расчеты разделены на два этапа. На первом этапе выполнялся электромагнитный расчет контактов элементов цанги в условиях рабочего импульса. Определялся источник нагрева и его величина через объемные потери в элементах конструкции. На втором этапе выполнялся расчет всей структуры высоковольтного цангового ввода с заданными источниками тепла в стационарном режиме работы. Для указанных расчетов предполагалось, что цанги сделаны из бронзы БрБ2, а начальная температура равнялась 20 °С. Результаты расчетов представлены на рис. 4 и в табл. 1.

Анализ расчетных и измеренных значений температур показал, что при прохождении тока через ввод возникает температурный барьер на его проводниках. Температура в области контакта цанга–трубка выше, чем в середине проводников. Высота барьера зависит от свойств материала проводников. С одной стороны, этот барьер препятствует тепловому потоку от окружающего кикер пространства к ионопроводу, с другой стороны, область контакта цанга–трубка сама является источником потока тепла к ионопроводу.

Трубчатый проводник, сделанный из нержавеющей стали, покрытый скинслоем серебра, нагревается до меньшей температуры в области контакта цанга–трубка, соответственно, и в середине проводника, чем такой же проводник, сделанный из бронзы.

Нержавеющая трубка, покрытая скинслоем серебра, нагревается до меньшей температуры, чем керамика, покрытая таким же слоем серебра. Это связано с тем, что, несмотря на низкую теплопроводность, трубка из нержавеющей стали забирает часть тепла из области контакта цанга–трубка и распределяет его по всей трубке.

В нержавеющей трубке, покрытой серебром толщиной в два скинслоя, температура нагрева существенно ниже, чем в такой же трубке и керамической трубке с одним скинслоем серебра, и уже не зависит от материала трубки-корсета, на которую нанесен слой серебра.

Если цанговый ввод использовать в обычных условиях окружающего пространства, то для внутреннего проводника надо выбирать трубку из нержавеющей стали с двойным скинслоем серебра, поскольку область контакта цанга–трубка нагревается до существенно меньшей температуры, чем другие проводники, указанные выше, соответственно, и поток тепла от этой области будет меньше. Внешний проводник нагревается до температур, меньших на 1–3 °С, за счет того, что его сечение почти в 4 раза больше сечения внутреннего проводника, и может изготавливаться из бронзы или нержавеющей стали, покрытой скинслоем серебра.

В условиях низких температур, около –190 °С, ситуация существенно меняется. Температурный барьер заметного влияния на теплопритоки через ввод не оказывает (рис. 5), поскольку токовый нагрев не оказывает существенного влияния на градиент отрицательной температуры вдоль цангового ввода.

Тепловой поток, который будет проходить от внешней среды к ионопроводу через ввод, зависит от параметра $\lambda \times S$ (произведения коэффициента теплопроводности на площадь сечения проводника). Например, для внутреннего трубчатого проводника из бронзы ($D = 19,2$ мм, $d = 17,8$ мм) параметр $\lambda \times S$ равен $340 \cdot 10^{-5}$ Вт·м/°С. Для проводника из нержавеющей стали с теми же размерами, покрытого серебром толщиной в один скинслой, — $\lambda \times S = 320 \cdot 10^{-5}$ Вт·м/°С, а покрытого толщиной в два скинслоя — $\lambda \times S = 560 \cdot 10^{-5}$ Вт·м/°С. Для внешнего проводника значения параметра $\lambda \times S$ существенно увеличиваются за счет сечения ($D = 62,6$ мм, $d = 61,2$ мм), которое больше сечения внутреннего проводника в 4 раза (табл. 2). В табл. 2 приведены ско-

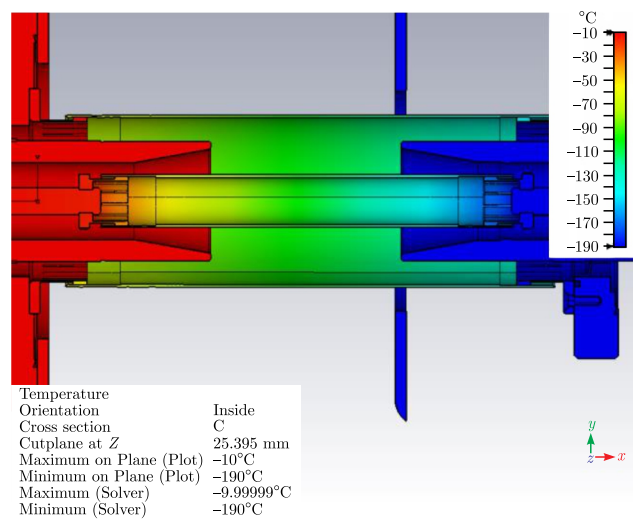


Рис. 5. Распределение температуры в цанговом вводе. Трубчатые проводники сделаны из бронзы с толщиной стенки 0,7 мм. На левой цанге температура -70°C , на правой цанге -189°C

Таблица 2

Материал проводника	Внешний проводник		Внутренний проводник	
	$\lambda \times S$, Вт · м/ $^{\circ}\text{C}$	Скорость теплового потока для $\Delta T = 120^{\circ}\text{C}$, Вт	$\lambda \times S$, Вт · м/ $^{\circ}\text{C}$	Скорость теплового потока для $\Delta T = 120^{\circ}\text{C}$, Вт
Бронза (0,7 мм)	$1300 \cdot 10^{-5}$	8,8	$340 \cdot 10^{-5}$	2,6
Нержавеющая сталь (0,7 мм), покрытая серебром (0,1 мм)	$1050 \cdot 10^{-5}$	7,0	$320 \cdot 10^{-5}$	2,46
Нержавеющая сталь (0,7 мм), покрытая серебром (0,2 мм)	$1870 \cdot 10^{-5}$	12,6	$560 \cdot 10^{-5}$	4,4

рости тепловых потоков через внутренний и внешний проводники цангового ввода в рабочем режиме кикера.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В условиях низких температур минимальная скорость потока тепла в цанговом вводе от внешней среды к кикеру возникает тогда, когда внутренний проводник сделан из нержавеющей трубки с толщиной стенки 0,7 мм, покрытой серебром толщиной 0,1 мм, или из бронзовой трубки с толщиной стенки 0,7 мм, а внешний проводник — из нержавеющей трубки, покрытой серебром толщиной 0,1 мм.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сидоров А. И. и др. Высоковольтный цанговый ввод инжекционного кикера нуклотрона // Письма в ЭЧАЯ. 2020. Т. 17, № 4(229). С. 543–546.

2. *Сидоров А. И. и др.* Высоковольтный цанговый ввод ударного магнитного кикера для вывода пучка ионов из нуклотрона // Письма в ЭЧАЯ. 2023. Т. 20, № 4(249). С. 1006–1009.
3. *Сидоров П. А. и др.* Расчеты и тестирование электрической прочности цанговых вводов магнитных кикеров нуклотрона // XV Международный научный семинар памяти В. П. Саранцева. 2024.

Получено 28 октября 2024 г.