

РАСЧЕТЫ И ТЕСТИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ ЦАНГОВЫХ ВВОДОВ МАГНИТНЫХ КИКЕРОВ НУКЛОТРОНА

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

^a Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия

Рассматриваются конструкции высоковольтных цанговых вводов магнитных кикеров, разработанных для ускорительного комплекса NICA. Подробно описаны конструкции цанговых соединений вводов. Также описана методика определения электрической прочности вводов. Определены величины рабочих напряжений цанговых вводов, которые для инжекционного и выводного кикеров составляют 46 и 60 кВ соответственно. Измерены индуктивности вводов. Выбраны материалы для изготовления цанг. Представлены результаты ресурсных испытаний цанговых вводов.

The paper considers the designs of high-voltage collet inputs of magnetic kickers developed for the NICA accelerator complex. The designs of the collet connections of the inputs are described in detail. The method for determining the electrical strength of the inputs is described. The values of the working voltages of the collet inputs are determined, which for the injection and output kickers are 46 and 60 kV, respectively. The inductances of the inputs are measured. The materials for the manufacture of the collets are selected. The results of resource tests of the collet inputs are presented.

PACS: 29.20.–с; 29.20.D–

ВВЕДЕНИЕ

Для магнитных кикеров нуклotronа ускорительного комплекса NICA были разработаны специальные высоковольтные цанговые вводы импульсной мощности. Кикер состоит из двух основных частей — ионопровода с токопроводами (рис. 1, позиции 7, 8) и внешнего вакуумного кожуха (рис. 1, поз. 5), которые соединены между собой высоковольтным цанговым вводом импульсной мощности (рис. 1, поз. 1–4). В рабочем режиме ионопровод кикера охлаждается до температуры жидкого азота по отношению к внешнему вакуумному кожуху. Из-за разности температур ионопровод смещается на несколько миллиметров относительно внешнего вакуумного кожуха. Для компенсации указанных смещений разработан специальный высоковольтный ввод, соединяющий внешний кожух и ионопровод.

Конструкция ввода состоит из трех частей: внешнего керамического высоковакуумного узла ввода, внешнего и внутреннего цанговых проводников, внутреннего керамического высоковакуумного узла ввода (см. рис. 1).

¹psidorov@jinr.ru

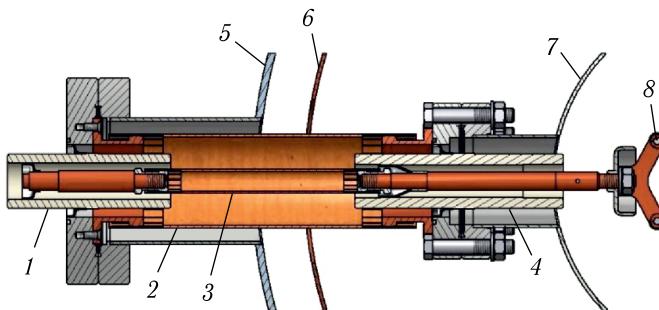


Рис. 1. Высоковольтный цанговый ввод инжекционного кикера: 1 — внешний керамический высоковакуумный узел ввода; 2, 3 — внешний и внутренний цанговые проводники; 4 — внутренний керамический высоковакуумный узел ввода; 5 — внешний вакуумный кожух; 6 — азотный экран; 7 — ионопровод; 8 — токопроводы кикера

Для инжекционного кикера [1, 2] оконечные части внешнего ($d = 48,6$ мм) и внутренне-го ($d = 13,2$ мм) проводников (рис. 1, поз. 2, 3; рис. 2, поз. Б) с обоих концов сделаны в виде цанг. Оконечные части внешнего и внутрен-него высоковакуумных узлов ввода изгото-влены из меди в виде шаровых наконечников (рис. 2, поз. А). Кроме того, они покрыты сереб-ром толщиной 10 мкм для увеличения площа-ди соприкосновения с цангами проводников.

Проводники изготовлены из бронзы БрБ2 с минимальной толщиной 0,7 мм по той при-чине, чтобы не нарушить механическую про-чность и уменьшить поток тепла от внешнего кожуха к охлаждаемому ионопрово-ду. Цанговое соединение проводников обес-печивает повороты проводников во всех направлениях и позволяет компенсиро-вать возникающие смещения между внешним вакуумным кожухом и ионопроводом как при охлаждении, так и при отоплении ки-керов. Важной характеристики цангового ввода является напряжение, при котором он будет эксплуатироваться, оно не должно превышать напряжения пробоя.

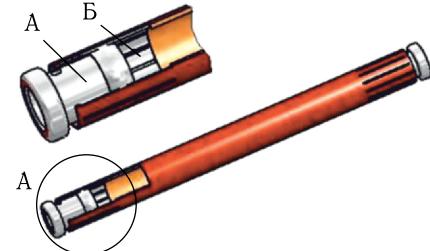


Рис. 2. Конструкция внутреннего про-водника высоковольтного цангового ввода инжекционного кикера

РАСЧЕТЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ

Для определения электрической прочности мы используем методику, которая поз-воляет достаточно точно определить величину напряжения пробоя, не проводя эко-спериментальной проверки в вакууме. Ее суть состоит в том, что макет цангового ввода испытывается в условиях атмосферы. На его внутренний трубчатый проводник подается положительное напряжение, которое повышается до той величины, когда происходит пробой. Цанговый ввод разбирается, и определяется место пробоя. По из-вестной величине напряжения пробоя производится расчет напряженности элекtri-

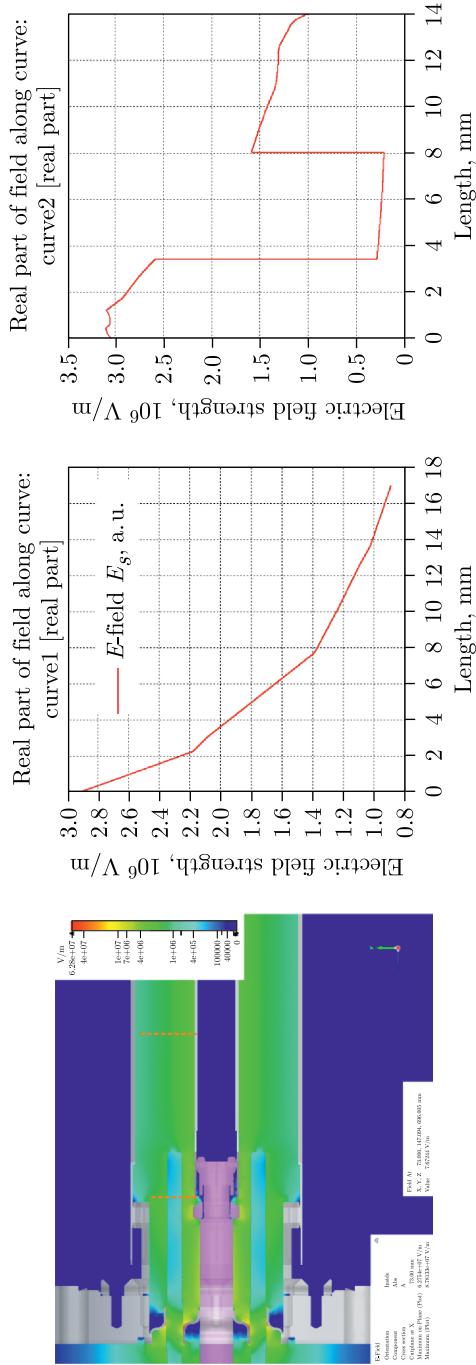


Рис. 3 (цветной в электронной версии). Распределение электрического поля в цанговом вводе инжекционного кикера в сечении, обозначенном оранжевой пунктирной линией, при постоянном напряжении на вводе 28 кВ

ческого поля цангового ввода в месте пробоя. Если величина напряженности электрического поля соответствует условиям пробоя (напряженность равна 30 кВ/см), это означает, что расчетная модель адекватно отражает реальную конструкцию ввода. Затем делается расчет для того, чтобы определить величину напряжения, при котором в точке пробоя напряженность электрического поля равна 60 кВ/см. Найденная величина напряжения соответствует напряжению пробоя цангового ввода в вакууме. Рабочее напряжение цангового ввода составляет 85–90 % от рассчитанной величины. Например, для конструкции цангового ввода, показанной на рис. 1, при подаче на цанговый ввод постоянного напряжения пробой в нем наблюдались при 28–29 кВ. На рис. 3 показано распределение электрического поля в сечениях, обозначенных оранжевыми пунктирными линиями. Из расчетов видно, что напряженность поля в центре соответствует напряженности поля пробоя воздуха в условиях атмосферы. Осмотр поверхностей внешнего и внутреннего проводников показал, что пробой происходил именно в центральной части между ними.

Расчет величины напряжения пробоя показал, что оно соответствует 54 кВ, в то время как рабочее напряжение — 46 кВ. Проверка работоспособности инжекционного кикера в сеансе на нуклotronе с пучком показала его надежную и стабильную работу в целом и цангового ввода в частности. Ввод предназначен для работы с токами до 20 кА, длительностью 2,5 мкс, напряжением до 46 кВ при частоте посылок 1 Гц. Измеренная индуктивность цангового ввода составляет 115 нГн.

Для быстрого вывода пучков ионов из нуклотрона разработан более мощный кикер [3] с рабочим током до 30 кА. Высоковольтный ввод выводного кикера [4], так же как и ввод инжекционного кикера, выполнен в виде цанговой коаксиальной конструкции. Основные изменения в конструкции показаны на рис. 4.

Отличие от ввода инжекционного кикера состоит в том, что в модернизированном цанговом вводе шаровые наконечники оконечных частей внешнего и внутренне-го высоковакуумных узлов ввода заменены на цанги, а оконечные части внешнего и внутреннего проводников (см. рис. 1, поз. 2, 3; рис. 2, Б) с обоих концов, сделанные в виде цанг, заменены на проводник в виде сплошной трубы, в которую вставляются цанги. Увеличены размеры внешнего и внутреннего проводников до 60,6 и 19,2 мм соответственно.

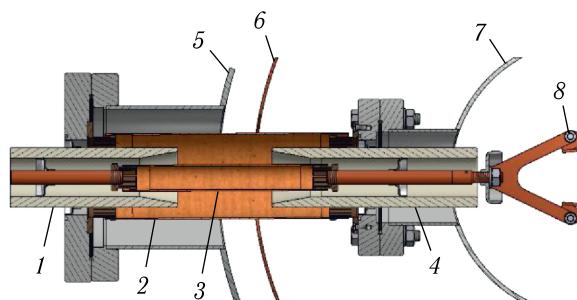


Рис. 4. Высоковольтный цанговый ввод выводного кикера: 1 — внешний керамический высоковакуумный узел ввода; 2, 3 — внешний и внутренний цанговые проводники; 4 — внутренний керамический высоковакуумный узел ввода; 5 — внешний вакуумный кожух; 6 — азотный экран; 7 — ионопровод; 8 — токопроводы кикера

Изменены форма и осевая длина изоляторов внешнего и внутреннего керамических высоковакуумных узлов ввода. При подаче на цанговый ввод постоянного напряжения пробой в нем наблюдались при 40 кВ (рис. 5). Осмотр поверхностей внешнего и внутреннего проводников показал, что пробой, так же как и в предыдущем случае, происходил в центральной части между ними. Перерасчет с допустимой напряженностью в центре внутреннего проводника показал, что величина напряжения пробоя равна 68 кВ, соответственно, рабочее напряжение ввода составляет 60 кВ. Ввод предназначен для работы с токами до 30 кА, длительностью 3 мкс, напряжением до 60 кВ при частоте посылок 1 Гц. Измеренная индуктивность цангового ввода составляет 150 нГн.

Кикер состоит из двух независимых секций. Каждая секция запитывается отдельным импульсным генератором. Генератор соединяется с секцией кикера с помощью специально разработанной кабельной сборки (рис. 6), состоящей из пяти кабелей типа M1-TYPE (Varex Imaging Corporation) с крупногабаритными разъемами с обоих концов. В рабочем режиме вся кабельная сборка находится в условиях атмосферы. Кабели рассчитаны на постоянное напряжение 60 кВ.

Для того чтобы исключить пробой в разъеме в рабочем режиме, напряженность электрического поля уменьшена за счет выбора соотношения диаметров электродов разъема и не превышает 30 кВ/см (см. рис. 6).

Ресурс цангового ввода зависит от выбора не только рабочего напряжения, но и материала для проводников. Материал выбирается с тем расчетом, чтобы изменение их геометрических размеров находилось в пределах линейных изменений в диапазоне рабочих температур. Материал должен обладать достаточной жесткостью и упругостью, чтобы обеспечить длительную работоспособность цанговых соединений и минимальную толщину внешнего и внутреннего проводников для уменьшения теплопередачи по цанговому вводу. Кроме того, материал должен обладать высокой электропроводностью. Для проведения исследования были отобраны такие материалы, как нержавеющая сталь, латунь и бериллиевая бронза (БрБ2). Были проведены испытания образцов вводов, изготовленных из указанных выше материалов, при воздействии на них импульсов тока амплитудой 27 кА, длительностью 3 мкс и частотой $f = 1$ Гц. Состояние поверхности сплошных проводников и цанг оценивалось после воздействия 10^5 импульсов тока. Для увеличения площади и качества контактов поверхности ламелей цанг покрываются серебром толщиной ~ 10 мкм. Все поверхности проводников указанных материалов обработаны одним и тем же способом. Исследование поверхностей цанг и внутренних поверхностей сплошных трубчатых проводников в области их соприкосновения до и после испытаний показало, что поверхности латуни и бронзы БрБ2 практически не изменились. Однако на внутренней поверхности нержавеющей трубы в области соприкосновения с ламелями цанги появилась глубокая эрозия: поверхность осыпалась мелкими гранулами размером 0,3–0,5 мм (рис. 7). Для изготовления цангового ввода по совокупности требуемых свойств выбрана бериллиевая бронза БрБ2.

Мы провели ресурсные испытания полномасштабного образца модернизированного высоковольтного ввода, изготовленного из бронзы БрБ2. При испытаниях через ввод пропустили 10^6 импульсов тока колоколообразной формы длительностью 3 мкс, амплитудой 30 кА. Изменений в контактных поверхностях проводников цангового ввода не обнаружено.

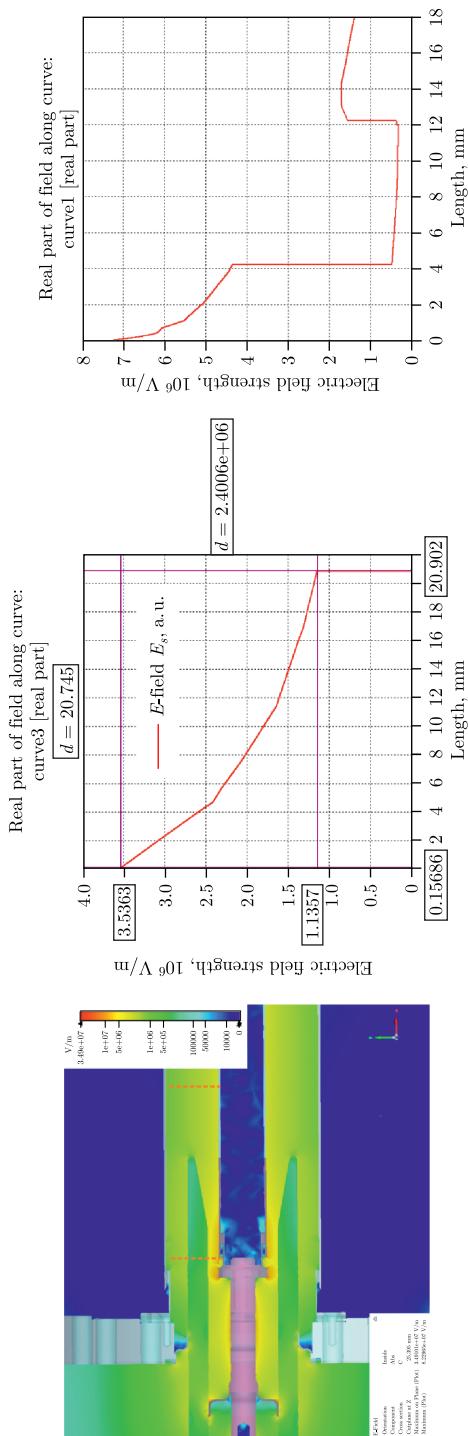


Рис. 5 (цветной в электронной версии). Распределение напряженности электрического поля в цанговом вводе в сечениях, показанных оранжевыми пунктирными линиями, при постоянном напряжении на вводе 40 кВ

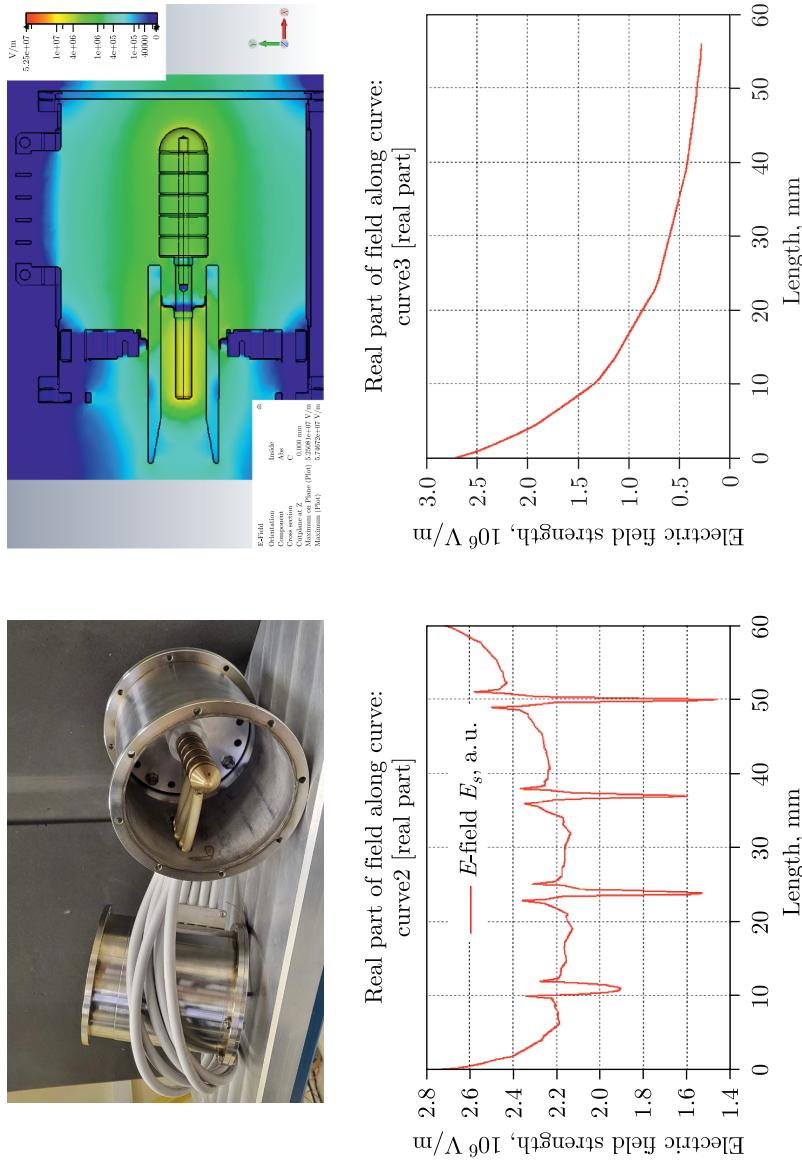


Рис. 6. Кабельная сборка для соединения кикера с генератором

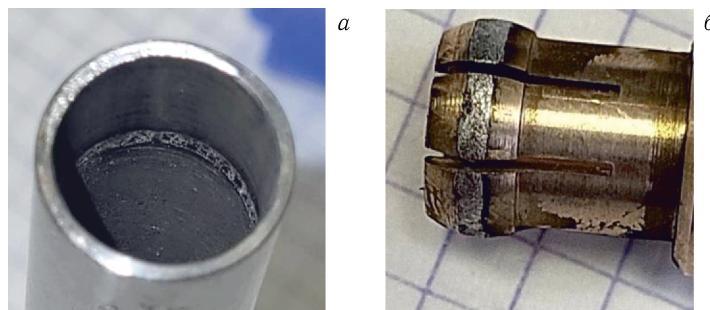


Рис. 7. Поверхности нержавеющей трубы в точках ее соприкосновения с ламелями цанг (а), поверхности ламелей цанг (б) после воздействия 10^5 импульсов тока амплитудой $I = 27$ кА, $t = 3$ мкс, $f = 1$ Гц

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты испытаний показали, что разработанный цанговый высоковольтный ввод — надежный элемент выводного кикера, — обладает большим ресурсом и сможет обеспечить ввод большой импульсной мощности для питания выводного кикера.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сидоров А. И. и др. Высоковольтный цанговый ввод инжекционного кикера нуклotronа // Письма в ЭЧАЯ. 2020. Т. 17, № 4(229). С. 543–546.
2. Сидоров А. И. и др. Магнитный кикер для инжекции пучка в нуклotron ускорительного комплекса NICA // Там же. С. 561–564.
3. Козлов А. П. и др. Ударный магнитный кикер для вывода ионного пучка из нуклотрона ускорительного комплекса NICA // Письма в ЭЧАЯ. 2023. Т. 20, № 4(249). С. 1010–1014.
4. Голубев И. И. и др. Высоковольтный цанговый ввод ударного магнитного кикера для вывода пучка ионов из нуклотрона ускорительного комплекса NICA // Там же. С. 1006–1009.

Получено 28 октября 2024 г.