

УДК 539.1.03(621.384.6+533.9.07:533.952)

## УСКОРИТЕЛЬНАЯ ТРУБКА МОДУЛЯ УСТАНОВКИ “ГАММА-4”

Н. В. Завьялов, В. С. Гордеев, С. Ю. Пучагин,  
А. В. Гришин, К. В. Страбыкин, Е. С. Бердников,  
С. Т. Назаренко, В. С. Павлов, В. А. Деманов

Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики,  
607188 Саров, Россия

E-mails: zavyalov@expd.vniief.ru, gordeev@expd.vniief.ru, Sergey.Puchagin@cern.ch,  
grishin@expd.vniief.ru, strabykin@expd.vniief.ru, berdnikov@expd.vniief.ru,  
STNazarenko@vniief.ru, VSPavlov@vniief.ru, VADemanov@vniief.ru

Приведено описание ускорительной трубки типового модуля разрабатываемой электрофизической установки “Гамма-4”. Данная ускорительная трубка является частью системы передачи энергии модуля, которая обеспечивает передачу высоковольтного электрического импульса от выхода формирующей системы к узлу нагрузки. Особенностью конструкции трубки является использование диэлектрической линзы для выравнивания потенциала вдоль поверхности секционированного изолятора, что позволяет на 30 % снизить напряженность электрического поля вблизи наиболее напряженных диэлектрических колец, уменьшив тем самым вероятность пробоя изолятора. С целью увеличения ресурса трубки ее размеры выбирались с учетом расчетной средней напряженности электрического поля вдоль поверхности изолятора 55 кВ/см. При этом индуктивность ускорительной трубки составляла 87 нГн. С использованием предлагаемой ускорительной трубки проведено 230 включений ускорителя “Гамма-1” с напряжением на изоляторе до 2,7 МВ. При всех включениях электрических пробоев изолятора не зафиксировано.

**Ключевые слова:** ускорительная трубка, высоковольтный импульс, электрический пробой, диэлектрическая линза.

**Введение.** Типовой ускорительный модуль создаваемой во Всероссийском научно-исследовательском институте экспериментальной физики (ВНИИЭФ) электрофизической установки “Гамма-4” предназначен для передачи энергии электромагнитного импульса от выхода системы формирования высоковольтных импульсов к узлу нагрузки по водяной передающей линии с поворотом на угол, близкий к 90°, и сравнительно короткой цилиндрической магнитоизолированной передающей линии [1]. В результате проведенных исследований разработана новая система передачи энергии (СПЭ) с характерным диаметром  $\approx 1$  м, частью которой является ускорительная трубка с секционированным изолятором.

**Конструкция ускорительной трубки.** При разработке конструкции ускорительной трубки учитывался опыт использования аналогичных устройств в сильноточных импульсных ускорителях электронов экспериментальной базы ВНИИЭФ. Основным узлом трубки является секционированный изолятор, представляющий собой набор изоляционных (из полиэтилена) и градиентных (из нержавеющей стали) колец, стянутых диэлектрическими шпильками. Общий вид ускорительной трубки представлен на рис. 1.

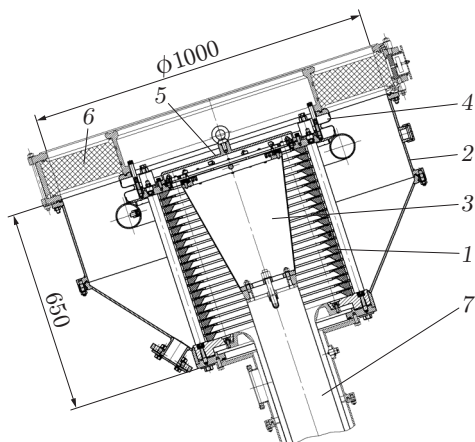


Рис. 1. Общий вид ускорительной трубки:

1 — секционированный изолятор, 2 — корпус, 3 — катододержатель, 4 — сильфонный узел, 5 — крышка, 6 — опорный изолятор водяной передающей линии, 7 — магнитоизолированная передающая линия

Длина изолятора 490 мм определена из условия его электрической прочности на основе результатов электростатических расчетов напряженности электрического поля. Средняя напряженность электрического поля вдоль поверхности изолятора составляет 55 кВ/см, что позволяет увеличить ресурс трубки. При этом индуктивность трубки на участке от изолятора до входа в магнитоизолированную передающую линию составляет 87 нГн. Герметичность изолятора обеспечивается резиновыми уплотнителями, расположенными между изоляционными и градиентными кольцами. Поскольку изолятор представляет собой цельный узел, обеспечена возможность контроля качества сборки и герметичности до его установки в ускорительную трубку.

Ускорительная трубка изготовлена и испытана в составе СПЭ на сильноточном импульсном ускорителе электронов “Гамма-1” [2]. В процессе испытаний после нескольких включений ускорителя возникали электрические пробой секционированного изолятора, что приводило к уменьшению выходных электрических параметров и параметров излучения ускорителя по сравнению с соответствующими параметрами в нормальном режиме его работы. При разборке трубки на вакуумной поверхности секционированного изолятора были видны следы электрических пробоев. Согласно результатам электростатических расчетов кольца со следами пробоев находятся на наиболее напряженном участке секционированного изолятора ускорительной трубки. При этом распределение напряженности электрического поля по поверхности изолятора является неравномерным. При разработке конструкции ускорительной трубки следует обеспечить равномерное распределение напряженности электрического поля по поверхности изолятора для уменьшения вероятности возникновения пробоев на его поверхности.

Существует несколько способов обеспечения равномерного распределения напряженности электрического поля по поверхности секционированного изолятора, находящегося в рассматриваемой ускорительной трубке [3], а именно использование волноводов, выравнивающих электродов различной конфигурации и диэлектрических линз. В данном случае, когда длина изолятора (490 мм) сравнима с диаметром колец (480 мм), наиболее эффективным способом является использование диэлектрической линзы.

**Диэлектрическая линза.** При разработке конструкции диэлектрической линзы для ускорительной трубки модуля установки “Гамма-4” в качестве основы была выбрана конструкция, описанная в работе [4]. Внешняя поверхность диэлектрической линзы разме-

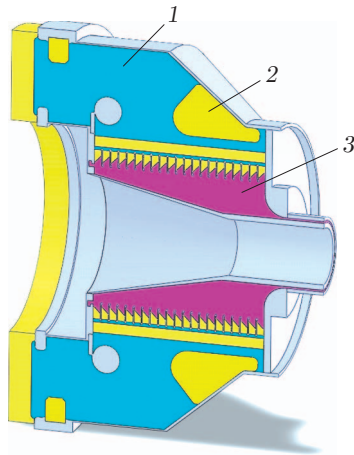


Рис. 2

Рис. 2. Ускорительная трубка с диэлектрической линзой:

1 — вода, 2 — диэлектрическая линза, 3 — вакуум

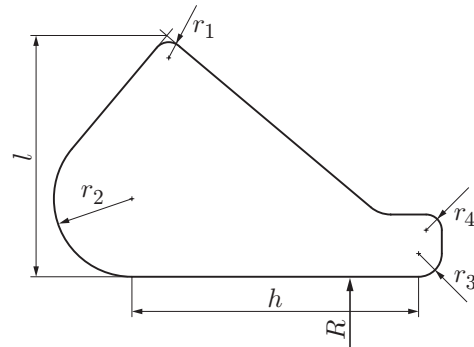


Рис. 3

Рис. 3. Профиль осевого сечения диэлектрической линзы

щенной в жидком диэлектрике, прилегает к корпусу ускорительной трубки. Поверхность линзы со стороны жидкого диэлектрика является тороидальной с большим радиусом кривизны. Сама линза выполнена из материала, обладающего большой электрической прочностью (акрил). Недостатками данной трубки являются сложность изготовления и высокая стоимость, обусловленная использованием крупных заготовок и материала с высокой электрической прочностью. При разработке ускорительной трубки, рассматриваемой в настоящей работе, главной целью являлось создание оптимальной конструкции диэлектрической линзы с улучшенными эксплуатационными характеристиками.

На рис. 2 показана ускорительная трубка с диэлектрической линзой в разрезе. Ускорительная трубка представляет собой два электрода — продолжения соответствующих электродов коаксиальной линии передачи, один из которых является корпусом трубки. В трубке, заполненной жидким диэлектриком — деионизованной водой, размещена диэлектрическая линза, выполненная из полиэтилена с электрической прочностью 150 кВ/см. Профиль осевого сечения диэлектрической линзы показан на рис. 3.

Поверхность диэлектрической линзы со стороны жидкого диэлектрика образована четырьмя тороидальными участками. Первый и второй участки сопряжены с помощью конического участка, второй и третий — с помощью цилиндрического, третий и четвертый — с помощью плоского участка. Образующая конического участка линзы расположена перпендикулярно поверхности корпуса. Были выбраны следующие размеры элементов поверхности диэлектрической линзы:  $R = (1,25 \div 1,40)r$ ,  $r_1 = (0,025 \div 0,075)h$ ,  $r_2 = (0,25 \div 0,35)h$ ,  $r_3 = (0,025 \div 0,075)h$ ,  $r_4 = (0,025 \div 0,075)h$ ,  $l = (0,7 \div 0,8)h$  ( $h$  — высота цилиндрического участка поверхности линзы;  $r$  — радиус внешней поверхности секционированного изолятора;  $R$  — радиус цилиндрического участка поверхности линзы;  $r_1, r_2, r_3, r_4$  — радиусы первого, второго, третьего и четвертого тороидальных участков поверхности линзы;  $l$  — расстояние между образующей цилиндрического участка поверхности линзы и точкой пересечения поверхности корпуса с образующей конического участка поверхности, измеренное в плоскости, в которой находится ось симметрии линзы).

При прохождении электромагнитного импульса через ускорительную трубку электрическая составляющая электромагнитной волны способна вызвать пробой как в объеме, заполненном жидким диэлектриком, так и в диэлектрической линзе и изоляторе. С помощью

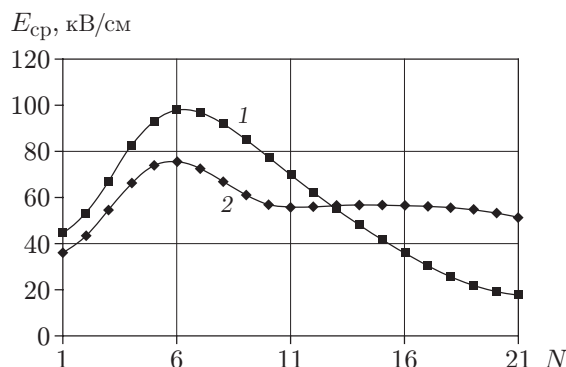


Рис. 4. Распределение средней напряженности электрического поля по поверхности секционированного изолятора:

1 — в отсутствие линзы, 2 — при наличии линзы

диэлектрической линзы электромагнитное поле перераспределяется в трубке таким образом, что распределение электрического поля в секционированном изоляторе становится более равномерным, в результате уменьшается вероятность электрического пробоя.

Для того чтобы подтвердить работоспособность предлагаемого устройства, проведены расчетно-теоретические исследования. В результате компьютерного моделирования получено распределение напряженности электрического поля в ускорительной трубке, в частности в линзе. При использовании диэлектрической линзы выбранной формы средняя напряженность в ней составила 110 кВ/см. На рис. 4 представлены распределения средней напряженности электрического поля  $E_{ср}$  по поверхности секционированного изолятора для ускорительной трубки без линзы и с линзой ( $N$  — номер кольца секционированного изолятора).

В случае использования диэлектрической линзы напряженность электрического поля вблизи наиболее напряженных колец уменьшается на  $\approx 30\%$ . Кроме того, стоимость линзы из полиэтилена в несколько раз меньше стоимости линзы, используемой в конструкции, описанной в работе [4]. Предлагаемая линза имеет компактную форму, что позволило уменьшить размер и массу заготовки. На конструкцию ускорительной трубки с диэлектрической линзой был получен патент [5].

С использованием данной ускорительной трубки проведено 230 включений ускорителя “Гамма-1” при напряжении на изоляторе до 2,7 МВ. При всех включениях электрических пробоев изолятора не зафиксировано.

**Выводы.** Разработана ускорительная трубка для типового модуля электрофизической установки “Гамма-4”, предназначенная для работы модулей на автономные вакуумные диоды. Проблема возникновения электрических пробоев в ускорительной трубке решена путем введения в конструкцию трубки диэлектрической линзы с целью выравнивания потенциала вдоль поверхности изолятора. Проведенные включения ускорителя электронов “Гамма-1” подтвердили надежность работы ускорительной трубки во всех исследованных режимах ускорителя.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Пунин В. Т., Завьялов Н. В., Басманов В. Ф. и др. Результаты экспериментальных исследований некоторых режимов работы сильнооточного импульсного ускорителя электронов “Гамма-1” // Сб. докл. Междунар. конф. “12-е Харитоновские научные чтения по проблемам

- физики высоких плотностей энергии”, Саров, 19–23 апр. 2010 г. Саров: Всерос. науч.-исслед. ин-т эксперим. физики, 2010. С. 49–54.
2. **Гордеев В. С., Гришин А. В., Назаренко С. Т. и др.** Результаты экспериментальных исследований системы передачи энергии типового модуля установки “Гамма” // Сб. докл. Междунар. конф. “14-е Харитоновские тематические научные чтения: Мощная импульсная электрофизика”, Саров, 12–16 марта 2012 г. Саров: Всерос. науч.-исслед. ин-т эксперим. физики, 2012. С. 112–116.
  3. **Chen Y. G., Mashima K., Benford J.** A low-inductance 2-MV tube // Proc. of the 2nd IEEE Pulse power conf., Lubbock (USA), June 12–14, 1979. N. Y.: IEEE, 1983. P. 487–490.
  4. **Moore W. B., Stinnett R. W., McDaniel D. H.** Supermite vacuum interface design // Proc. of the 5th IEEE Pulse power conf., Arlington (USA), June 10–12, 1985. N. Y.: IEEE, 1985. P. 315–317.
  5. **Пат. 2467527 РФ, МПК Н 05 Н 5/03.** Ускорительная трубка / А. В. Гришин, В. А. Деманов, В. С. Павлов, Д. С. Фарафонов. Оpubл. 20.11.12, Бюл. № 32.

*Поступила в редакцию 22/XII 2014 г.*

---