

## 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*

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ»,  
пр. Мира 37, Саров, Нижегородская область, 607188, Россия

Представлена ускорительная трубка типового модуля создаваемой во ВНИИЭФ электрофизической установки «Гамма-4». Данная ускорительная трубка является составной частью системы передачи энергии модуля, которая обеспечивает транспортировку высоковольтного электрического импульса от выхода формирующей системы до узла нагрузки. Отличительной особенностью конструкции трубки является использование диэлектрической линзы для выравнивания потенциала вдоль поверхности секционированного изолятора. Использование линзы позволило на 30 % снизить напряженность электрического поля в районе наиболее напряженных диэлектрических колец, уменьшив тем самым вероятность пробоя изолятора. С целью увеличения ресурса трубки ее габаритные размеры выбирались, исходя из расчетной средней напряженности электрического поля вдоль поверхности изолятора 55 кВ/см. При этом индуктивность ускорительной трубки составила 87 нГн.

Всего с данной ускорительной трубкой проведено 230 включений ускорителя «Гамма-1» с напряжением на изоляторе до 2,7 МВ. Электрических пробоев изолятора во всех включениях зафиксировано не было.

### Введение

Компоновочная схема типового ускорительного модуля создаваемой в РФЯЦ-ВНИИЭФ электрофизической установки «Гамма-4» предполагает передачу энергии электромагнитного импульса от выхода системы формирования высоковольтных импульсов к узлу нагрузки по водяной передающей линии (ВПЛ) с поворотом на угол, близкий к 90°, и сравнительно короткой цилиндрической магнитоизолированной передающей линии (МИПЛ) [1]. Результатом проведенных исследований стала разработка новой системы передачи энергии (СПЭ) с характерным диаметром ~1 м. Составной частью данной СПЭ является ускорительная трубка с секционированным изолятором.

### Конструкция ускорительной трубки

При разработке конструкции ускорительной трубки учитывался многолетний опыт использования аналогичных устройств в сильноточных импульсных ускорителях электронов, входящих в состав экспериментальной базы РФЯЦ-ВНИИЭФ. Основным узлом является секционированный изолятор, конструктивно представляющий собой набор изоляционных (из полиэтилена) и градиент-

ных (из нержавеющей стали) колец, стянутых диэлектрическими шпильками. Общий вид ускорительной трубки представлен на рис. 1.

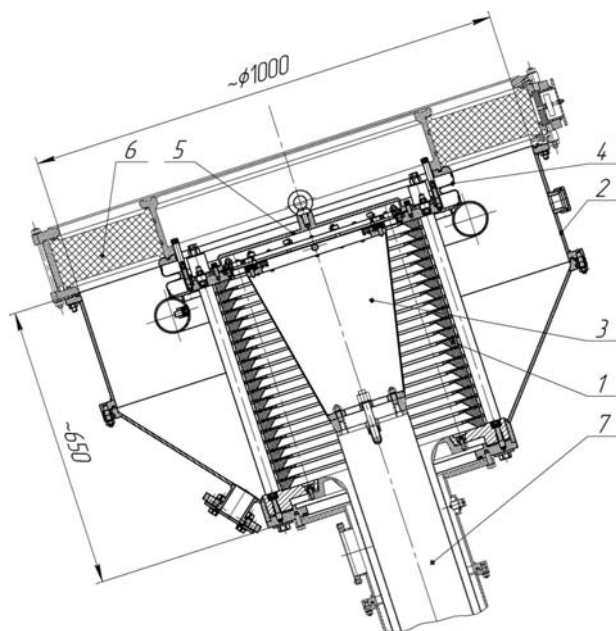


Рис. 1. Общий вид ускорительной трубки: 1 – секционированный изолятор; 2 – корпус; 3 – катододержатель; 4 – сильфонный узел; 5 – крышка; 6 – опорный изолятор ВПЛ; 7 – МИПЛ

Длина изолятора 490 мм определена из условия его электрической прочности на основе результатов электростатических расчетов напряженности электрического поля. С целью увеличения ресурса трубки расчетная средняя напряженность электрического поля вдоль поверхности изолятора выбрана на уровне 55 кВ/см. При этом индуктивность трубки от изолятора до входа в МИПЛ составляет 87 нГн. Герметичность изолятора обеспечивается резиновыми уплотнениями между изоляционными и градиентными кольцами. Поскольку изолятор конструктивно представляет собой цельный узел, обеспечена возможность контроля качества сборки и герметичности до его установки в ускорительную трубку.

Ускорительная трубка была изготовлена и испытана в составе СПЭ на сильноточном импульсном ускорителе электронов «Гамма-1» [2]. Одной из проблем в процессе испытаний было то, что после нескольких включений ускорителя возникали электрические пробой секционированного изолятора. Это приводило к снижению выходных электрических и дозовых характеристик ускорителя по сравнению с нормальным режимом его работы.

При последующей разборке трубки были заметны следы электрических пробоев на вакуумной поверхности секционированного изолятора. В соответствии с результатами электростатических расчетов номера колец со следами пробоев соответствуют наиболее напряженному участку секционированного изолятора ускорительной трубки. При этом распределение напряженности электрического поля по поверхности изолятора далеко от равномерного. Обычно при разработке конструкции ускорительной трубки стремятся к равномерному распределению напряженности электрического поля по поверхности изолятора для уменьшения вероятности пробоев по его поверхности.

Существует несколько способов для выравнивания распределения напряженности электрического поля по поверхности секционированного изолятора в используемой нами геометрии ускорительной трубки [3]. К таким способам относятся: использование волноводов, выравнивающих электродов различной конфигурации, диэлектрических линз.

В нашем 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 установ-

ки «Гамма-4» в качестве прототипа была выбрана конструкция, описанная в работе [4]. Диэлектрическая линза размещается в объеме жидкого диэлектрика, и прилегает внешней поверхностью к корпусу ускорительной трубки. Поверхность линзы со стороны жидкого диэлектрика является тороидальной с большим радиусом кривизны. Сама же линза выполнена из материала с большой электрической прочностью (акрил). Недостатками данной трубки являются сложность в изготовлении и высокая стоимость, связанная с необходимостью использования крупных заготовок и материала с высокой электрической прочностью. Последнее вызвано неоптимальной формой линзы, приводящей к высокой напряженности электрического поля в объеме линзы и повышающей таким образом вероятность пробоя, для предотвращения которого необходима высокая электрическая прочность, а материалы с требуемыми характеристиками труднодоступны и стоят дорого. В процессе разработки представленной в докладе ускорительной трубки решалась задача создания оптимальной конструкции диэлектрической линзы для ускорительной трубки, которая позволила бы упростить и удешевить изготовление линзы и обеспечивала возможность использования более дешевых материалов с улучшением эксплуатационных характеристик.

На рис. 2 представлено изображение представленной в докладе ускорительной трубки с диэлектрической линзой.

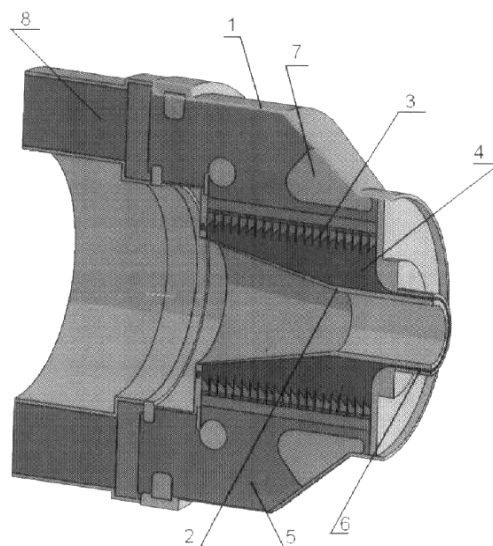


Рис. 2. Ускорительная трубка: 1 – анод, 2 – катод, 3 – секционированный изолятор, 4 – вакуумированный объем, 5 – объем, заполненный жидким диэлектриком, 6 – нагрузка, 7 – диэлектрическая линза, 8 – коаксиальная водяная передающая линия

Ускорительная трубка представляет собой два электрода, которые являются продолжениями соответствующих электродов коаксиальной линии передачи, один из которых является корпусом трубки. В объеме трубки, заполненном жидким диэлектриком – деионизованной водой, размещена диэлектрическая линза, выполненная из полиэтилена с заявленной электрической прочностью 150 кВ/см. Профиль осевого сечения диэлектрической линзы показан на рис. 3.

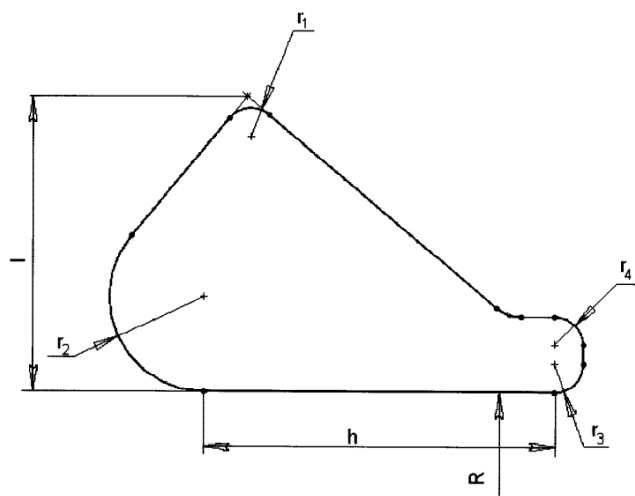


Рис. 3. Профиль осевого сечения диэлектрической линзы

Поверхность диэлектрической линзы со стороны жидкого диэлектрика образована четырьмя тороидальными участками, первый и второй участок сопряжены при помощи конического участка, второй и третий – цилиндрического, третий и четвертый – плоского участка. Образующая конического участка линзы выполнена перпендикулярно к поверхности корпуса. Соотношения различных элементов поверхности диэлектрической линзы к высоте цилиндрической поверхности выбраны следующими:  $R = (1,25-1,40)r$ ,  $r_1 = (0,025-0,075)h$ ,  $r_2 = (0,25-0,35)h$ ,  $r_3 = (0,025-0,075)h$ ,  $r_4 = (0,025-0,075)h$ ,  $l = (0,7-0,8)h$ , где  $h$  – высота цилиндрического участка поверхности линзы,  $r$  – радиус внешней поверхности секционированного изолятора,  $R$  – радиус цилиндрического участка поверхности линзы,  $r_1$  – радиус первого тороидального участка поверхности линзы,  $r_2$  – радиус второго тороидального участка поверхности линзы,  $r_3$  – радиус третьего тороидального участка поверхности линзы,  $r_4$  – радиус четвертого тороидального участка поверхности линзы,  $l$  – расстояние между образующей цилиндрического участка поверхности линзы и точкой пересечения поверхности корпуса с образующей конического участка поверх-

ности, измеренное в плоскости, в которой лежит 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. При помощи диэлектрической линзы электромагнитное поле перераспределяется в трубке таким образом, что распределение электрического поля в секционированном изоляторе становится ближе к равномерному, тем самым снижается вероятность электрического пробоя.

Для надежной работы ускорительной трубки проведено расчетно-теоретическое обоснование работоспособности предлагаемого устройства. В результате компьютерного моделирования было получено распределение напряженности электрического поля в ускорительной трубке и, в частности, в линзе. При использовании диэлектрической линзы выбранной формы средняя напряженность в линзе составила 110 кВ/см. На рис. 4 представлены графики распределения средней напряженности электрического поля по поверхности секционированного изолятора для ускорительной трубки без линзы и с линзой.

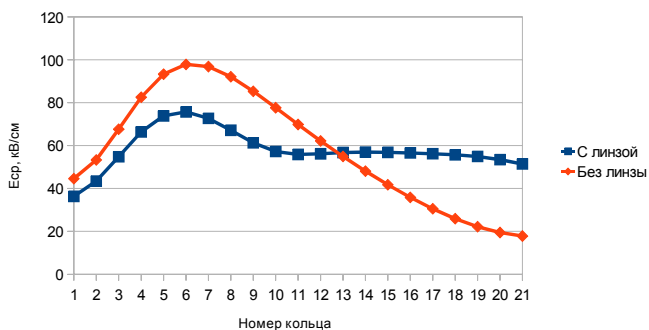


Рис. 4. Распределение средней напряженности электрического поля по поверхности секционированного изолятора

В случае использования диэлектрической линзы напряженность электрического поля в районе наиболее напряженных колец снижается на ~30 % по сравнению с исходным вариантом. Кроме того, выбор линзы из полиэтилена позволил в несколько раз уменьшить ее стоимость по сравнению с материалом, используемым в прототипе, а ее компактная форма позволила уменьшить размер и вес заготовки, что упростило и удешевило ее производство.

На конструкцию ускорительной трубки с диэлектрической линзой был получен патент на изобретение [5].

Всего с данной ускорительной трубкой проведено 230 включений ускорителя «Гамма-1» с напряжением на изоляторе до 2,7 МВ. Электрических пробоев изолятора во всех включениях зафиксировано не было.

### Выводы

Разработана ускорительная трубка для типового модуля электрофизической установки «Гамма-4» в режиме работы модулей на автономные вакуумные диоды. Проблемы с возникновением электрических пробоев в ускорительной трубке решены путем введения в конструкцию трубки диэлектрической линзы с целью выравнивания потенциала вдоль поверхности изолятора. Проведенные включения ускорителя электронов «Гамма-1» подтвердили надежную работу ускорительной трубки во всех исследованных режимах ускорителя.

### Список литературы

1. Пунин В. Т., Завьялов Н. В., Басманов В. Ф. и др. Результаты экспериментальных исследова-

ний некоторых режимов работы сильноточного импульсного ускорителя электронов «Гамма-1». // XII научные Харитоновские чтения по проблемам физики высоких плотностей энергии 19–23 апреля 2010 г. (сборник докладов). Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ». 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». // XIV Харитоновские тематические научные чтения. Мощная импульсная электрофизика. 12–16 марта 2012 г. (сборник докладов). Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ». 2012. С. 112–116.

3. Chen Y. G., Mashima K., Benford J. A low-inductance 2-MV tube // Proc. 2-nd IEEE Pulse Power Conf. - Lubbock, USA. 1979. pp. 487-490.

4. Moore W. B., Stinnett R. W., McDaniel D.H. Supermite vacuum interface design // Proc. 5-th IEEE Pulse Power Conf. Albuquerque, USA. 1985. pp. 315–317.

5. Пат.2467527 РФ МПК H05H 5/03. Ускорительная трубка/ А. В. Гришин, В. А. Деманов, В. С. Павлов и др. // Бюл. 2012. № 32.