

МОДЕЛИРОВАНИЕ УСКОРИТЕЛЬНОЙ ТРУБКИ ДЛЯ ИМПУЛЬСНОГО СИЛЬНОТОЧНОГО УСКОРИТЕЛЯ ЭЛЕКТРОНОВ «ГАММА-1»

Д. С. Фарафонов, Д. С. Губин

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

Введение

В импульсных высокопоточных ускорителях электронов особое место занимает изолятор, разделяющий вакуумированный объем и объем, заполненный жидким диэлектриком. Этот узел должен соответствовать нескольким критериям по электрической прочности, наиболее существенным из которых является критерий пробоя по поверхности твердого диэлектрика в вакууме.

Как правило, изолятор состоит из нескольких диэлектрических секций, разделенных металлическими электродами – градиентными кольцами. Для таких изоляторов электрическая прочность при заданном рабочем напряжении определяется в основном равномерностью распределения разности потенциалов между градиентными электродами, и, соответственно, напряженности электрического поля в секциях изолятора.

Рассмотрению узла разделительного изолятора посвящен ряд работ. В частности, в работах [1, 2] рассмотрены изоляторы ускорителей Supermite и INER. Эти изоляторы с распределениями потенциалов в них представлены на рис. 1, а, б. Подходы, примененные в данных работах к разработке конструкции ускорительной трубки, в общих чертах схожи. Из них следует, что равномерное распределение по-

тенциалов по изолятору затруднено, если не использовать дополнительные элементы конструкции. Такими элементами могут быть диэлектрические линзы либо дополнительные электроды. Применение линз позволяет добиться более равномерного распределения потенциалов. На рис. 2 приведены распределения потенциалов по изоляторам ускорителей Supermite и INER при использовании диэлектрических линз.

В установке, обеспечивающей большие импульсные токи, узел секционированного изолятора не должен существенно ограничивать скорость нарастания тока, то есть его эквивалентная индуктивность должна быть минимальной. Вследствие этого требование равномерности распределения потенциалов усиливается.

В одном из исследованных вариантов ускорительной трубки ускорителя «Гамма-1» [3], с диаметром корпуса 650 мм, для выравнивания распределения потенциалов были использованы и диэлектрической линзы, и проводящие экраны. Изолятор был рассчитан на импульс напряжения амплитудой 2,5 МВ длительностью 60 нс на полувысоте, поступающий к трубке по водяной передающей линии с волновым сопротивлением 2,9 Ом. Испытания узла ускорительной трубки показали, что при данном импульсе происходят пробой по изоляторам и диэлектричес-

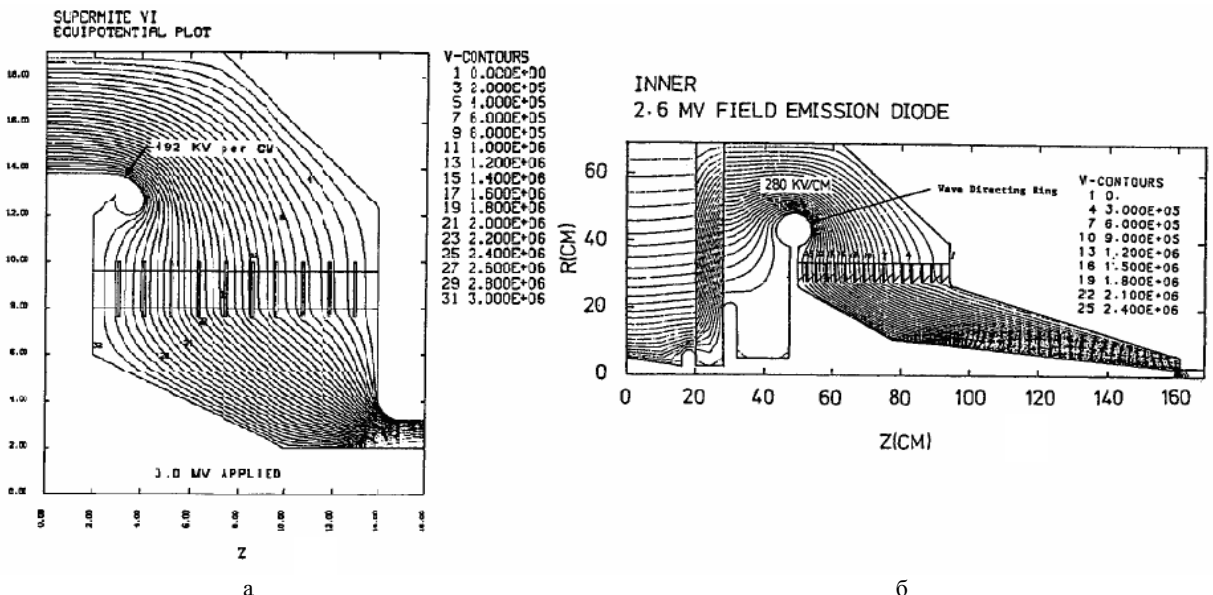
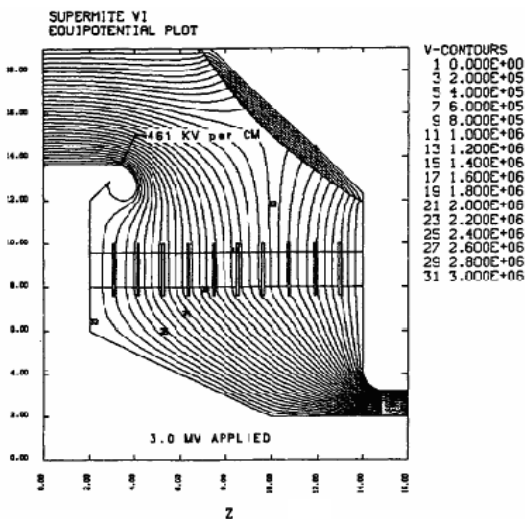
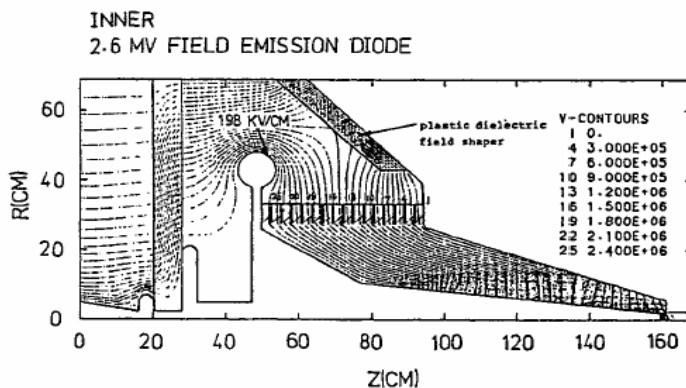


Рис. 1. Распределение потенциалов в изоляторах установок: а – Supermite; б – INER



а



б

Рис. 2. Распределение потенциалов при использовании диэлектрических линз в установках: а – Supermite; б – INER

ким линзам. Исследованный вариант изолятора был признан неработоспособным, и было принято решение увеличить диаметр водяной передающей линии и, соответственно, разработать новую конструкцию ускорительной трубки с учетом требования электрической прочности и с минимальной эквивалентной индуктивностью.

Целью данной работы является обоснование работоспособности разрабатываемой ускорительной трубки при помощи компьютерного моделирования.

Критерии работоспособности и варианты конструкции трубки

Ускорительная трубка может быть признана работоспособной, если она обладает достаточным запасом электрической прочности, который, в свою очередь, определяется, исходя из свойств материалов трубки и распределения электрического поля в ней. Наиболее часто это распределение получают в электростатическом приближении. Данное приближение справедливо при сравнительно больших временах, начиная от сотен наносекунд, но при меньших временах использование статического приближения приводит к ошибке. Причина этой ошибки понятна, если рассмотреть дифференциальные уравнения, соответствующие электростатическому случаю и динамике: это, соответственно, уравнение Лапласа $\Delta U = 0$ и система уравнений для скалярного и векторного потенциала, эквивалентная уравнениям Максвелла

$$DU - \frac{\epsilon\mu}{c^2} \nabla^2 U = 0; \quad DA - \frac{\epsilon\mu}{c^2} \nabla^2 A = 0.$$

Уравнение для скалярных потенциалов переходит в уравнение Лапласа при бесконечной скорости распространения электромагнитных волн c , так что электростатическое приближение может быть спра-

ведливо для достаточно длительных импульсов (сотни наносекунд), но не для нашего случая.

Возможности вычислительной техники позволяют исследовать объект, такой как ускорительная трубка, в динамике, при помощи уравнений Максвелла. Учет более сложных эффектов, таких, как электронная эмиссия и нелинейности в диэлектрике требует, тем не менее, слишком больших вычислительных ресурсов для достижения приемлемой точности. Динамическая модель, не учитывающая этих эффектов, будет менее адекватной, но все же ближе к реальному объекту, чем электростатическая модель.

Рассмотрим трубку, используемую в ускорителе «Гамма-1», с диаметром корпуса 1618 мм (рис. 3). Трубка хорошо себя зарекомендовала, что послужило одной из причин, по которой она была принята за

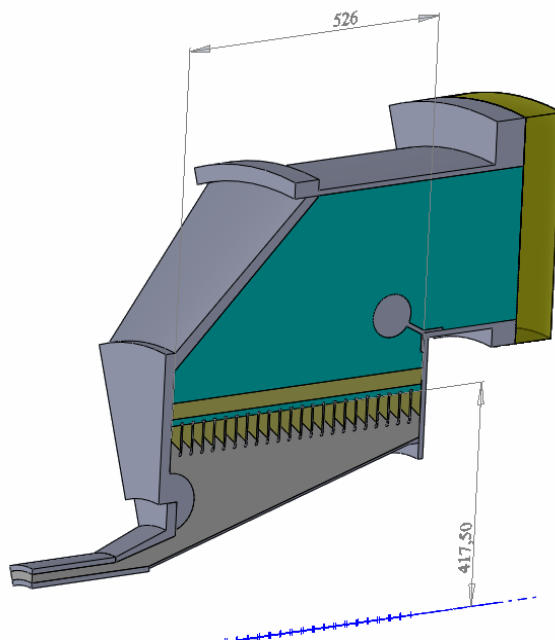


Рис. 3. Ускорительная трубка с диаметром водяной передающей линии 1618 мм

основу конструкции новой трубки. Если при эксплуатации ускорительной трубки не были зафиксированы пробой в изоляторе, то, зная значение напряжённости в секциях изолятора данной трубки, мы можем судить об электрической прочности другой трубки по напряженности в ее изоляторе. Распределение средней напряженности электрического поля, полученное при помощи программы WEC [4], приведено на рис. 4. В качестве входного импульса здесь и далее использовался выходной импульс с формирующей системы ускорителя «Гамма-1» с приведенными выше параметрами.

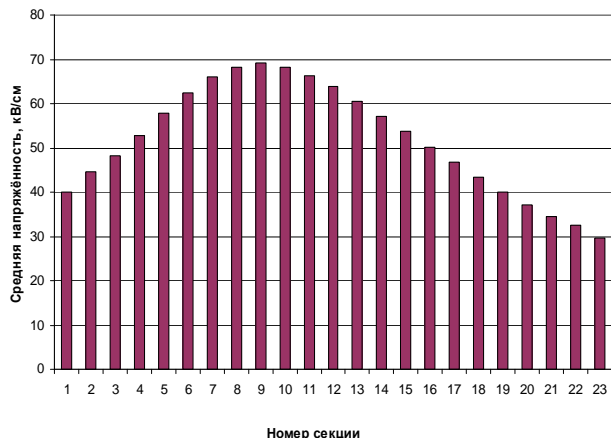


Рис. 4. Распределение средней напряженности электрического поля в трубке диаметром 1618 мм

Поскольку рассматриваемая трубка, очевидно, относится к такому же типу трубок, как и приведенные на рис. 1, то она обладает теми же недостатками. Одним из них является трудность создания равномерного распределения электрического поля по изолятору, что демонстрируют рис. 1 и 4.

Способы улучшения равномерности распределения уже рассмотрены выше: диэлектрические линзы и проводящие экраны. Из работ [1, 2] следует, что при применении линз цель может быть достигнута, но необходимо правильно выбрать форму линзы.

Конструкция разрабатываемой ускорительной трубки, работоспособность которой нам необходимо обосновать, показана на рис. 5. Она имеет разборный изолятор, скрепленный диэлектрическими шпильками в количестве 24 штук. Изолятор состоит из 21 секции, но имеется возможность варьировать его длину. В отличие от ранее рассмотренной трубки с диаметром 1618 мм, предусмотрена возможность установки диэлектрической линзы. Было рассчитано несколько вариантов линзы, из которых было выбрано два.

Рассмотрим базовый вариант ускорительной трубки с изолятором, состоящим из 21 секции. Нормированное (при напряжении на изоляторе 1 В) распределение средней напряженности электрического поля в секциях изолятора без диэлектрической линзы представлено на рис. 6. В модели этого варианта нет диэлектрических шпилек и линзы, а форма секций изолятора упрощена. В этой и в других моделях, которые будут рассмотрены ниже, величина нагрузки

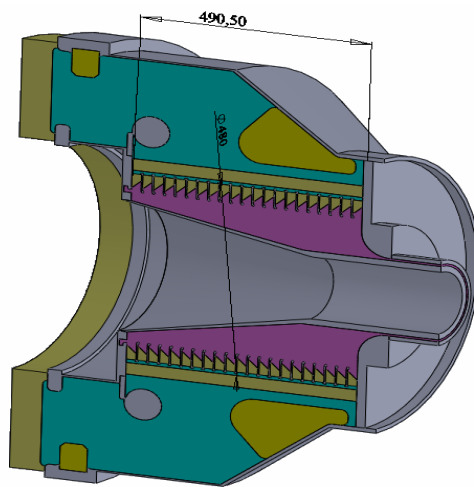


Рис. 5. Проект ускорительной трубки

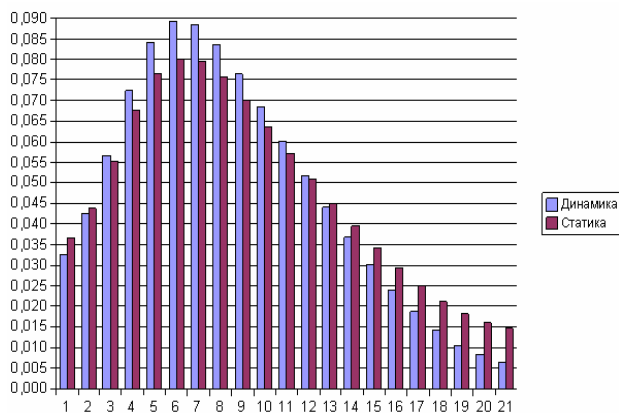


Рис. 6. Нормированное распределение средней напряженности в изоляторе без диэлектрической линзы

близка к согласованной. При использовании этой же модели было исследовано влияние диэлектрической линзы на распределение напряженности. Полученные средние напряженности с диэлектрической линзой в сравнении с напряженностями, полученными при отсутствии линзы, приведены на рис. 7. Очевидно, при использовании линзы разрыв между максимальной и средней напряженностью значительно меньше, чем при ее отсутствии, и, следовательно, электрическая прочность изолятора выше.

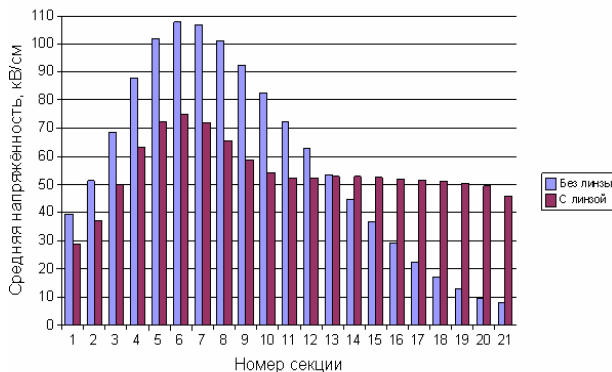


Рис. 7. Средняя напряженность в секциях изолятора при наличии и отсутствии линзы

Имеющейся двумерной модели недостаточно для проверки таких эффектов, как влияние диэлектрических шпилек. При помощи программы WEC нельзя получить значение напряженности на охранный электроре и оценить электрическую прочность линзы. В связи с этим была построена трехмерная модель.

При помощи модели получено распределение напряженности в ускорительной трубке. Напряженность поля в нескольких секциях изолятора такова, что при импульсном напряжении 2,5 МВ велика вероятность пробоя.

При наличии же диэлектрической линзы напряженность поля в секциях значительно ниже (примерно на 25 %), так что и вероятность пробоя снижена. Максимальная напряженность в диэлектрической линзе составляет около 150 кВ/см, средняя – около 110 кВ/см.

Таким образом, вариант ускорительной трубки с линзой, согласно вычислениям, обладает большей электрической прочностью, чем без линзы. Значение максимальной средней напряженности в секции изолятора позволяет утверждать, что вероятность безаварийной работы трубки с линзой высока.

Электрическая прочность не является единственным критерием, по которому следует оценивать работоспособность ускорительной трубки. Необходимо, чтобы она позволяла обеспечивать высокий уровень мощности на нагрузке. При помощи трехмерной модели была получена форма импульса на нагрузке, представляющей собой вакуумную линию с волновым сопротивлением 2,9 Ом, в которой отсутствует эмиссия электронов. Выходные импульсы для трубки диаметром 1618 мм и трех разновидностей разрабатываемой трубки представлены на рис. 8.

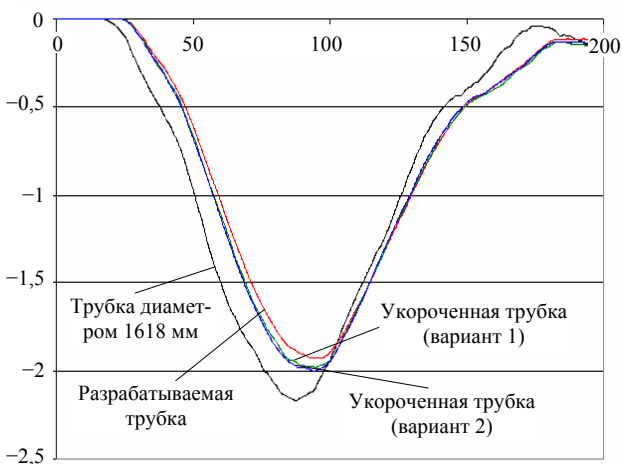


Рис. 8. Выходные сигналы с ускорительных трубок, полученные на нагрузке величиной 2,9 Ом для зарядного напряжения ускорителя 1 МВ

В своем базовом варианте новая трубка уступает трубке диаметром 1618 мм и по энергии, и по мощности: пиковая мощность на нагрузке у новой трубки составляет 1,28 ТВт, у существующей – 1,62 ТВт, в случае укороченных трубок мощность в нагрузке около 1,35 ТВт.

Более точное значение мощности, передаваемой в нагрузку, можно получить, если учитывать явление магнитной самоизоляции. Но в настоящее время конфигурация магнитноизолированной передающей линии окончательно не определена, и расчеты нами не проводились.

Заключение

Проведенные расчеты электрической прочности секционированного изолятора проектируемой ускорительной трубки позволили сделать вывод о необходимости использования в ее конструкции диэлектрической линзы. При отсутствии линзы в нескольких секциях изолятора напряженность поля достигает 110 кВ/см, что может приводить к электрическому пробую. Также показано, что по сравнению с ускорительной трубкой диаметром 1,6 м эквивалентная индуктивность трубки выше, что приводит к некоторому снижению мощности, передаваемой в нагрузку.

Литература

1. Moore W. B., Stinnett R. W., McDaniel D. H. Supermite Vacuum Interface Design / 5th IEEE International Pulsed Power Conference. Arlington, Virginia, 1985.
2. Hwang C. S. A New Vacuum Interface Design of INER High Current Pulsed Electron Beam Generators / 6th IEEE International Pulsed Power Conference. Arlington, Virginia, 1987.
3. Пунин В. Т., Завьялов Н. В., Басманов В. Ф., Гордеев В. С. и др. Результаты экспериментальных исследований некоторых режимов работы сильноточного импульсного ускорителя электронов «Гамма-1» // XII Харитоновские чтения по проблемам физики высоких плотностей энергии. Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ. 2010.
4. Гордеев В. С., Михайлов Е. С. Программа WEC для расчета систем формирования импульсов ускоряющего напряжения на линиях с распределенными параметрами // Труды РФЯЦ-ВНИИЭФ. Научно-исследовательское издание. Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ. 2002. Вып. 3. С. 160–165.