

РАСЧЕТ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ В ПЕРЕХОДЕ ИЗОЛЯТОР-ВАКУУМ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

П. В. Королев, А. С. Пикарь

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

В электрофизических установках, имеющих вакуумные нагрузки, переход твердотельного изолятора в вакуум должен обладать достаточной электропрочностью по поверхности изолятора. Электропрочность перехода зависит от площади поверхности изолятора; от максимальной напряженности электрического поля вдоль поверхности изолятора в вакууме; от равномерности распределения этой напряженности по поверхности изолятора. Увеличение поверхности изолятора перехода изолятор-вакуум может привести к увеличению индуктивности линии подвода энергии к нагрузке. Численные расчеты позволяют оптимизировать переход изолятор-вакуум по этим параметрам.

Работа выполнялась с целью разработки оптимальной конструкции низкоиндуктивного перехода изолятор-вакуум в экспериментальных электрофизических установках ЭМИР (1) и Т-1 (2).

1. Расчет перехода изолятор-вакуум установки ЭМИР

В ходе выполнения расчетов решалась двумерная осесимметричная задача электростатики в цилиндрических координатах (r, z) :

$$-\nabla(\varepsilon_0 \varepsilon \nabla \varphi) = 0,$$

где ε_0 — диэлектрическая постоянная, ε — диэлектрическая проницаемость, φ — электрический потенциал.

На поверхности внутреннего электрода задавался электрический потенциал. Поверхность внешнего электрода была под нулевым потенциалом.

1.1. Первоначальная геометрия

Одна из первоначальных геометрий перехода изолятор-вакуум установки ЭМИР (рис. 1) была разработана без предварительного численного расчета и имела низкую индуктивность 2,2 нГн, при этом распределение напряженности вдоль поверхности изолятора крайне неравномерное (рис. 2). На рис. 3 видно, что на большом участке длины изолятора эквипотенциали идут практически параллельно его поверхности, т.е. напряженность вдоль поверхности изолятора на этом участке близка к нулю (рис. 3). В то время как на концах изолятора наблюдаются сильные скачки свыше 100 кВ/см, при потенциале на внутреннем

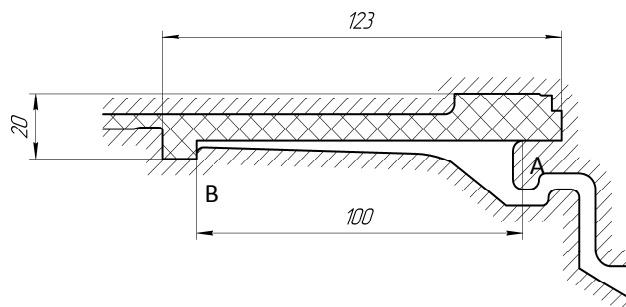


Рис. 1. Первоначальная геометрия перехода изолятор-вакуум установки ЭМИР

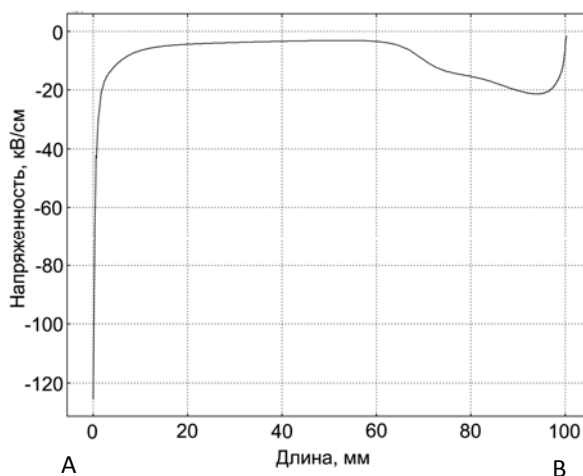


Рис. 2. Распределение напряженности электрического поля вдоль поверхности изолятора первоначального перехода изолятор-вакуум

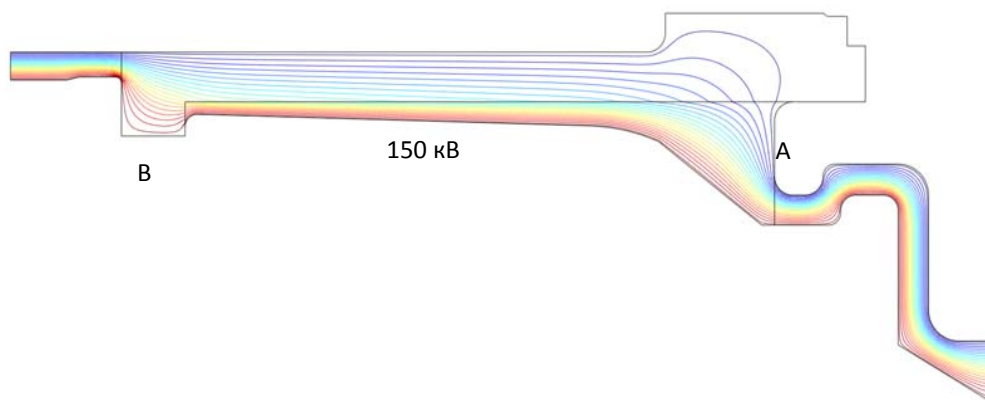


Рис. 3. Распределение эквипотенциалей в первоначальном переходе изолятор-вакуум

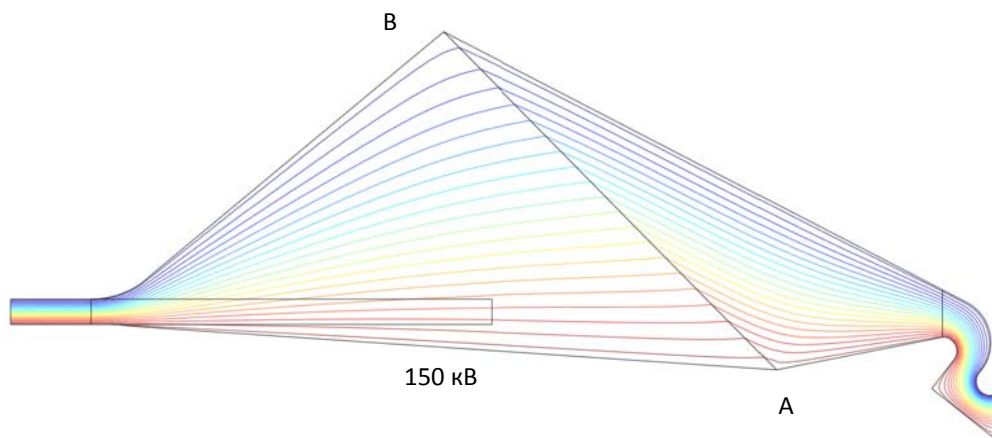


Рис. 4. Распределение эквипотенциалей в оптимальном переходе изолятор-вакуум

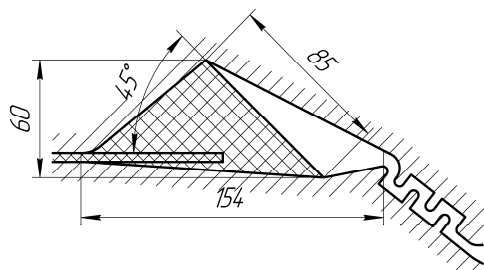


Рис. 5. Геометрия оптимального перехода изолятор-вакуум

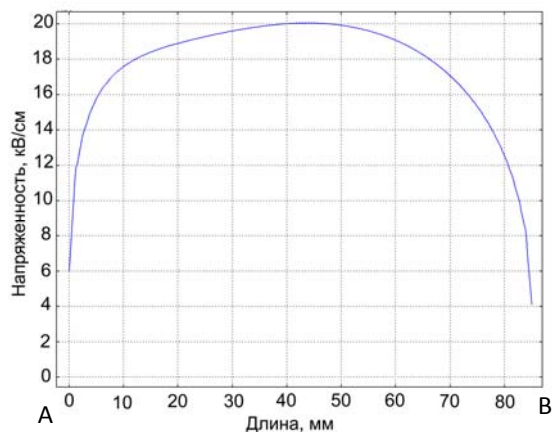


Рис. 6. Распределение напряженности электрического поля вдоль поверхности изолятора оптимального перехода изолятор-вакуум

электроте равном 150 кВ. Из этого можно заключить, что большая часть поверхности изолятора не работает, и для исключения вероятных электрических пробоев по поверхности изолятора необходимо менять форму изолятора.

1.2. Оптимальная геометрия

Для получения оптимальной геометрии были проведены численные расчеты различных моделей перехода изолятор-вакуум со стандартным углом наклона поверхности изолятора к оси электродов равным 45° . Результатом расчетов стала геометрия оптимальная по распределению поля на поверхно-

сти изолятора и максимальному значению электрической напряженности вдоль этой поверхности. Оптимальная геометрия показана на рис. 5.

Потенциал на внутреннем электроде 150 кВ. Материал изолятора – оргстекло с диэлектрической проницаемостью $\epsilon = 3,5$ (3). На рис. 4 видно, что эквипотенциали пересекают изолятор равномерно по всей поверхности, т.е. работает вся поверхность изолятора. Напряженность электрического поля (рис. 6) равномерно распределена по границе изолятор-вакуум и находится в пределах 20 кВ/см. На концах границы в «тройных» точках перехода напряженность стремится к нулю. Индуктивность перехода равна 6 нГн.

Данная оптимальная геометрия была использована при разработке реальной конструкции перехода. К сожалению, форма изолятора по технологическим причинам претерпела изменения в худшую сторону.

1.3. Реальный переход изолятор-вакуум

На рис. 8 показана геометрия реального перехода изолятор-вакуум. Потенциал на внутреннем электроде 150 кВ. Материал изолятора — оргстекло с $\epsilon = 3,5$.

Результаты расчетов показаны на рис. 7–9. На рис. 7 показано распределение эквипотенциалей в переходе изолятор-вакуум. Видно, что эквипотенциали выходят из изолятора под большим углом на практически одинаковом расстоянии друг от друга. Это показывает, что напряженность электрического поля должна распределяться равномерно по поверхности изолятора. На рис. 9 видно, что напряженность электрического поля вдоль поверхности изолятора около 20 кВ/см и распределена достаточно равномерно на границе изолятор-вакуум, но ближе к концам границы имеются колебания, которых в оптимальной модели не было. Индуктивность перехода изолятор-вакуум 6,6 нГн,

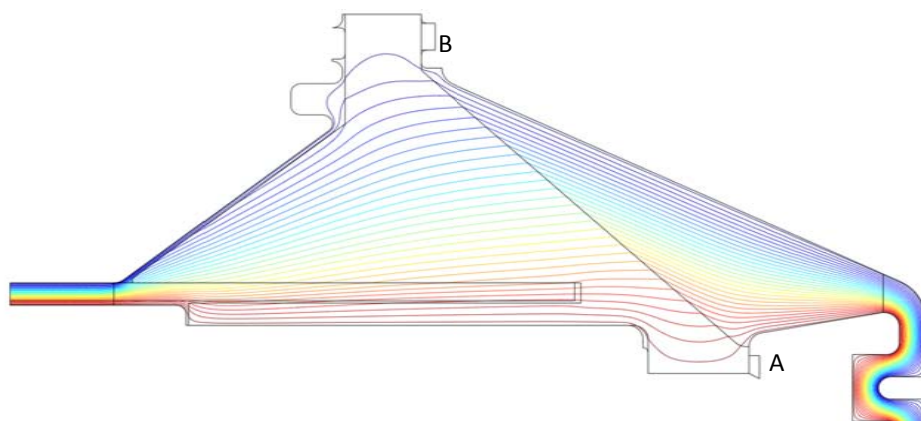


Рис. 7. Распределение эквипотенциалей в переходе изолятор-вакуум (реальная конструкция)

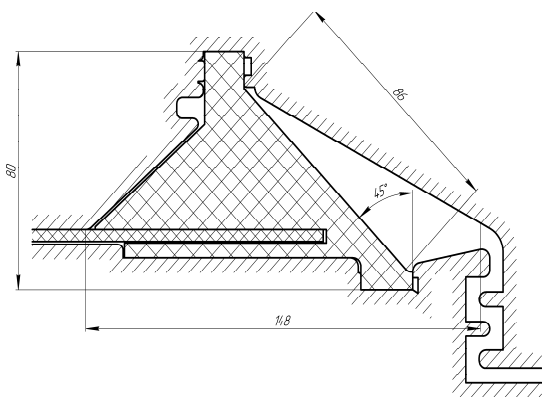


Рис. 8. Геометрия перехода изолятор-вакуум (реальная конструкция)

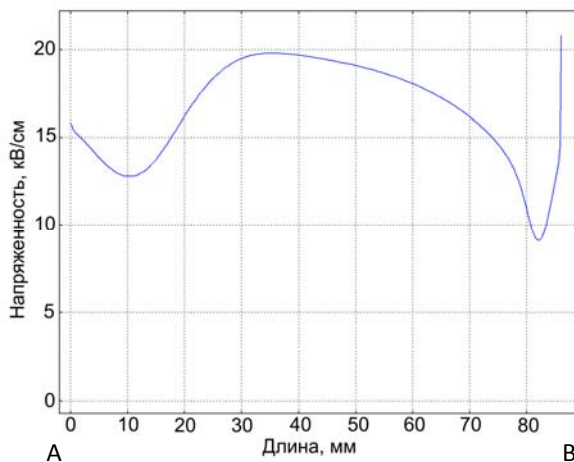


Рис. 9. Напряженность электрического поля вдоль поверхности изолятора (реальная конструкция)

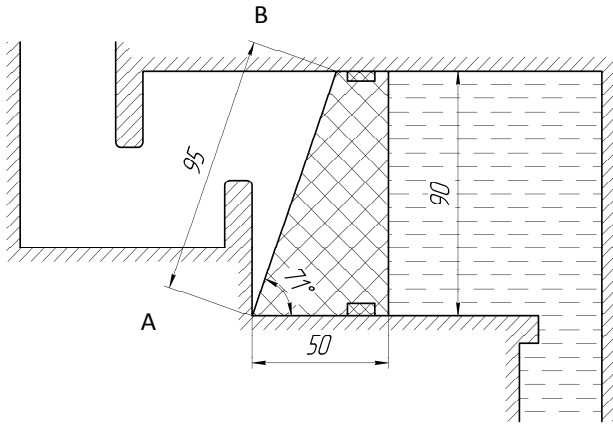


Рис. 10. Конструкция перехода изолятор-вакуум установки Т-1

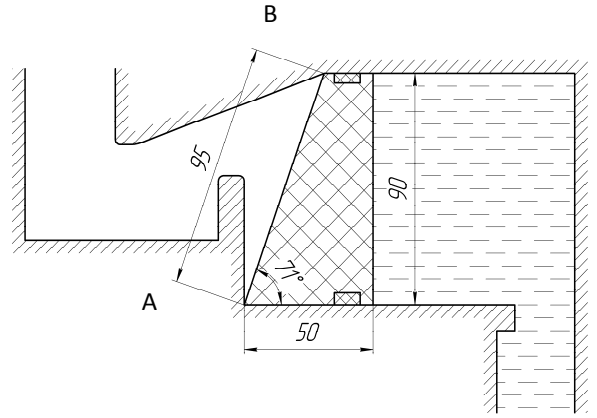


Рис. 11. Измененная модель перехода изолятор-вакуум установки Т-1

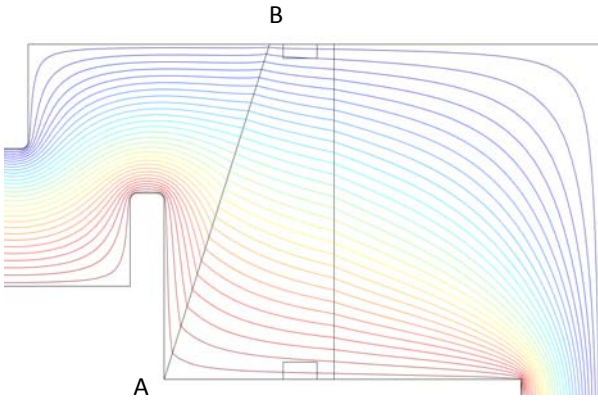


Рис. 12. Распределение эквипотенциалей в переходе изолятор-вакуум установки Т-1

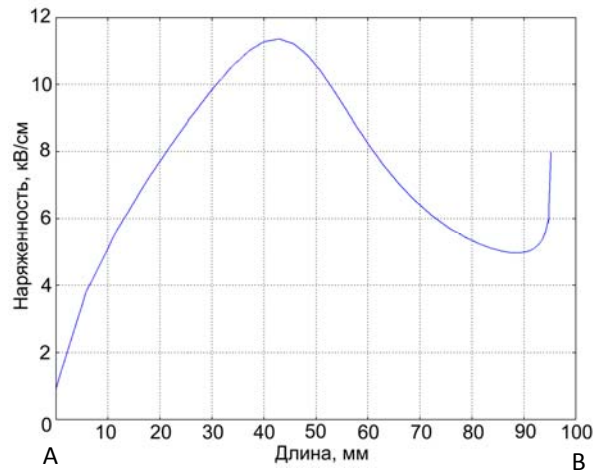


Рис. 13. Напряженность электрического поля вдоль поверхности изолятора установки Т-1

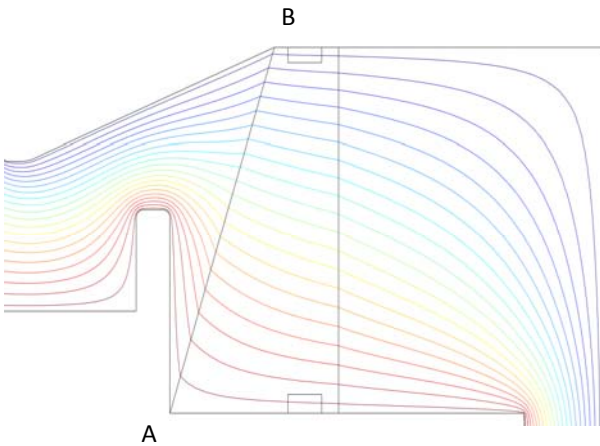


Рис. 14. Распределение эквипотенциалей в измененной модели перехода изолятор-вакуум установки Т-1

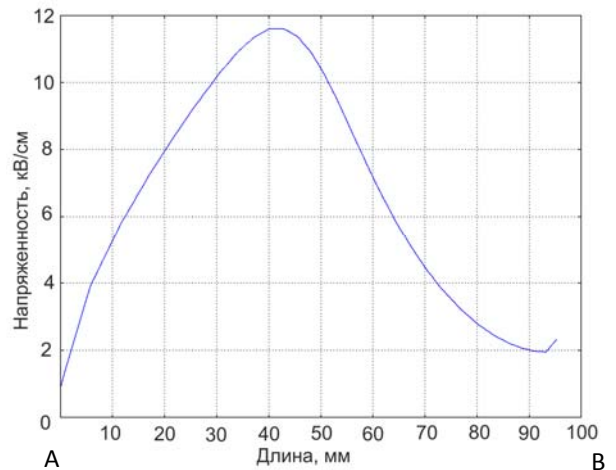


Рис. 15. Напряженность электрического поля вдоль поверхности изолятора измененной модели перехода изолятор-вакуум установки Т-1

что больше индуктивности расчетной оптимальной модели.

2. Оптимизация перехода изолятор-вакуум установки Т-1

Для исследования электропрочности и возможности оптимизации проводилось численное моделирование конструкции перехода изолятор-вакуум уже существующей стационарной электрофизической установки Т-1. На рис. 10 представлена геометрия перехода. Изолятор сделан из капрлона с $\varepsilon = 4$. Изоляция до капрлонового изолятора представляет собой трансформаторное масло с $\varepsilon = 2,3$. В изолятор вставлены кольца из вакуумной резины с $\varepsilon = 4$. Напряжение на внутреннем электроде 85 кВ. Расчеты показали, что в «тройной точке» V наблюдается скачок напряженности электрического поля вдоль поверхности изолятора (рис. 12 и рис. 13). Чтобы понизить в этой точке напряженность электрического поля, сделано изменение в геометрии перехода (рис. 11). Как видно на рис. 15 это изменение позволило значительно снизить напряженность электрического поля на поверхности изолятора в «тройной точке» V . При этом распределение эквипотенциалей в изоляторе не ухудшилось (рис. 14), а уменьшение объема перехода снизило его индуктивность.

Заключение

Проведенные расчеты позволили выявить недостатки переходов изолятор-вакуум в конструируемых и существующих установках и, изменив геометрию, улучшить их электропрочность. Была найдена оптимальная геометрия перехода изолятор-вакуум, которая, при улучшенной электропрочности, сохраняла минимальную индуктивность.

Список литературы

1. Селемир В. Д. Магнитная кумуляция в физике высоких плотностей энергии // XII International Conference on Megagauss Magnetic Field Generation and Related Topics, Novosibirsk, July 13–18, 2008.
2. Пикарь А. С. и др. Review of Structural Diagrams for Generation of Megaampere Current Pulses for T-1 Facility // Megagauss-9 / Eds. V. D. Selemir, L. N. Plyashkevich. – Sarov, VNIIEF, 2004, pp. 450–453.
3. Физические величины: Справочник / А. П. Бабичев, Н. А. Бабушкина, А. М. Братковский и др.; Под. Ред. И. С. Григорьева, Е. Э. Мецлихова. М.; Энергоатомиздат, 1991. С. 1232.