

## Повышение электрической прочности ускоряющей системы малогабаритного ускорителя ионов

*И.А. Каншин\**

*ФГУП «ВНИИА им. Н.Л. Духова», Сущевская, 22, Москва 127055, Россия,*

*\*ilia.kanshin2011@yandex.ru*

**Аннотация.** Настоящая работа посвящена изучению влияния на электропрочность ускоряющей системы малогабаритного ускорителя ионов запыления внутренней поверхности изолятора, а также “тройных” точек и кромок электродов, имеющих малый радиус кривизны. Для этого выполнялись расчёты электрических полей в ускоряющей системе, позволившие выявить участки с локальным повышением напряженности электрического поля. Приведены результаты расчетов, демонстрирующие возможность снижения локальной напряженности электрического поля в ускоряющей системе за счет изменения геометрии высоковольтного электрода и конструкции изолятора

**Ключевые слова:** ускоряющая система, траекторный анализ, электропрочность.

### 1. Введение

При разработке малогабаритного ускорителя ионов, конструкция которого включает Пеннинговский источник ионов и ускоряющую систему [1, 2], особое внимание уделяется её электропрочности. Снижение этого параметра в основном связано с тем, что в ускоряющей системе ускорителя при приложении отрицательного напряжения к высоковольтному электроду протекают “вторичные” процессы. Один из них – это запыление внутренней поверхности изолятора ускоряющей системы продуктами взаимодействия пучка ионов с ее электродами. В этом случае образуется проводящий слой, способствующий пробоем по внутренней поверхности изолятора [3]. Другой процесс – это эмиссия электронов из областей с повышенной локальной напряженностью электрического поля: “тройных” точек [4], кромок электродов ускоряющей системы, имеющих малый радиус кривизны. Лавинообразное движение эмитированных из “тройных” точек электронов ведёт к поверхностному пробоем изолятора [4] и, как следствие, снижению электрической прочности ускоряющей системы.

Одним из методов повышения электропрочности ускоряющих систем газоразрядных электровакуумных приборов выступает оптимизация формы электродов и изолятора. Для этого проводятся численные расчеты, направленные на изучение влияния изменений формы электродов и изолятора на значение напряженности электрического поля в критических областях ускоряющей системы [4]. В результате достигается оптимальный вариант её конструкции.

В представленной работе приведены результаты расчетов, направленных на изучение электропрочности ускоряющей системы малогабаритного ускорителя ионов. По результатам моделирования динамики корпускулярных потоков и электростатического поля в ускоряющей системе показано влияние запыления внутренней поверхности изолятора и образования слоя металлизации, а также “тройных” точек и кромок электродов, имеющих малый радиус кривизны, на электропрочность ускоряющей системы. На основе расчетов продемонстрирована возможность повышения её электропрочности и представлены варианты возможных конструкций ускоряющей системы.

### 2. Экспериментальные результаты и их обсуждение

#### 2.1. Методика проведения численного моделирования

Анализ электропрочности ускоряющей системы малогабаритного линейного ускорителя выполнялся в среде COMSOL Multiphysics начинался с создания трехмерной модели её

конструкции. После дальнейшей ее загрузки в среду моделирования и задания материалов расчетных областей (металл, диэлектрик) решались последовательно две задачи. Первая – электростатическая, в результате которой определялось распределение потенциала в рассматриваемой конструкции. При решении электростатической задачи напряжение на высоковольтном электроде ускоряющей системы (Рис.1) устанавливалось равным минус 100 кВ. Затем с учетом геометрических параметров моделируемой конструкции ускоряющей системы определялись эмиттанс пучка и параметры Твисса, служащие стартовыми условиями динамики пучка [5]. Далее решалась вторая задача – трассировка заряженных частиц в полученном до этого электростатическом поле, в результате которой вычислялись их траектории и определялись пространственные и энергетические характеристики пучка молекулярных ионов дейтерия [5–7]. Целью данного этапа моделирования являлось определение преимущественных областей распыления участков ускоряющей системы, а также области образования напыленного слоя на поверхности изолятора. После изучалась зависимость величины напряженности электростатического поля вблизи поверхности изолятора в направлении линии Z, изображенной на Рис. 1, а также на кромках электродов, находящихся под высоким отрицательным потенциалом относительно земли, для различных исполнений ускоряющей системы.

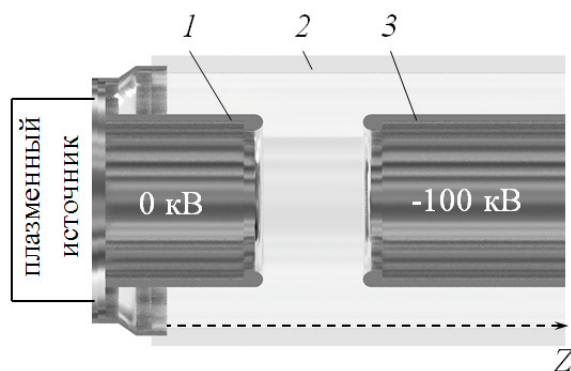


Рис.1. Схематичное изображение ускоряющей системы малогабаритного ускорителя ионов: 1 – низковольтный электрод ускоряющей системы, 2 – изолятор ускоряющей системы, 3 – высоковольтный электрод ускоряющей системы.

## 2.2. Влияние напыления на изоляторе на электрическую прочность ускоряющей системы

По результатам траекторного анализа установлено, что основной ионный пучок не взаимодействует с поверхностью высоковольтного электрода ускоряющей системы. В то же время образованные вследствие перезарядки медленные ионы и нейтральные атомы бомбардируют поверхность высоковольтного электрода, что будет приводить к его распылению [7]. С учетом угловых и энергетических распределений нейтралов и ионов, бомбардирующих поверхность высоковольтного электрода, в COMSOL Multiphysics смоделировано движение распыленных атомов железа [7]. В результате получено их распределение на поверхности изолятора ускоряющей системы (Рис.2).

Из Рис.2 видно, что максимальное запыление изолятора наблюдается в области межэлектродного зазора. При этом напыленный слой имеет конечные границы, а именно область запыления поверхности изолятора формируется вблизи координаты  $Z = 3$  мм и оканчивается вблизи координаты  $Z = 33$  мм. Данные границы модельно можно представить, как область контакта сред с различными диэлектрическими проницаемостями – “тройными” точками. Исходя из этого, рассмотрим влияние напыленного слоя на электропрочность изолятора ускоряющей системы.

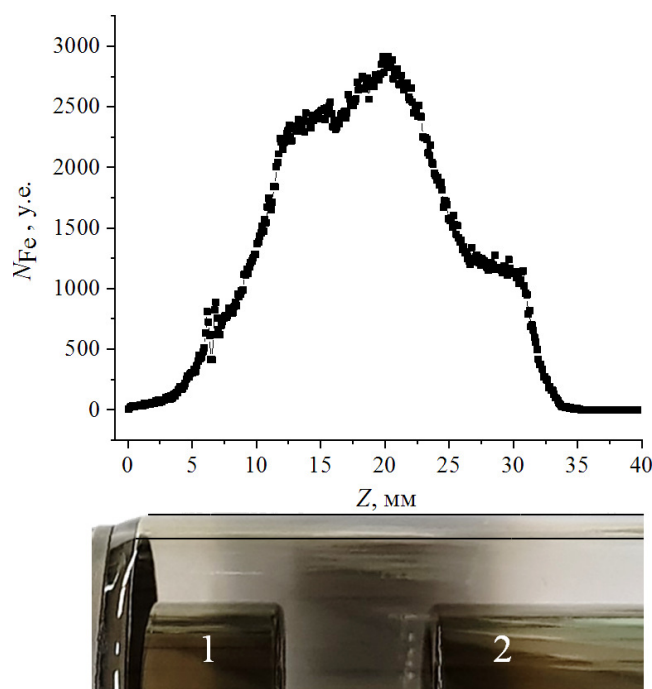


Рис.2. Распределение распыленных атомов железа на поверхности изолятора ускоряющей системы на её фоне. 1 – низковольтный электрод, 2 – высоковольтный электрод. Точка  $Z = 0$  соответствует краю стекла.

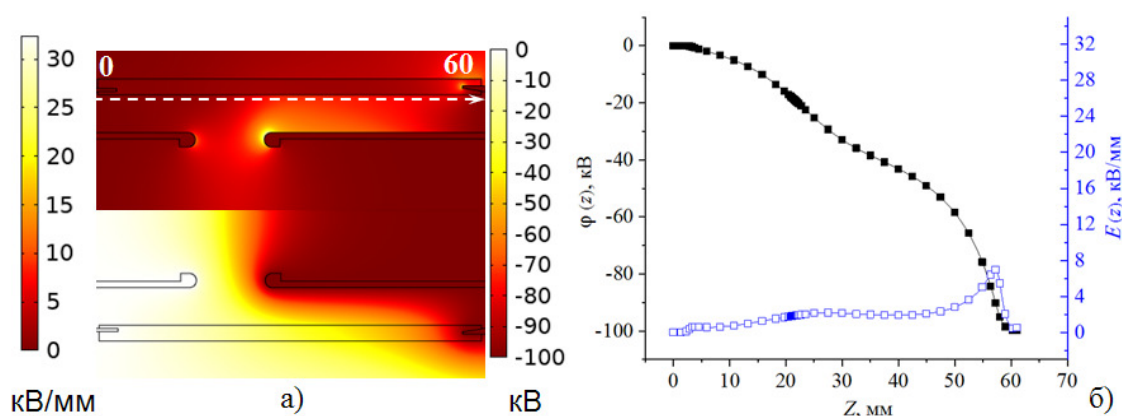


Рис.3. Распределение потенциала (а – нижняя половина) и напряженности электрического поля (а – верхняя половина), а также потенциал и напряженность вблизи поверхности изолятора (б) для случая, когда напыление отсутствует на изоляторе.

На Рис.3 показано распределение потенциала (Рис.3а, нижняя половина) и напряженности электрического поля (Рис.3а, верхняя половина), а также потенциал и напряженность вблизи поверхности изолятора (Рис.3б) для случая, когда напыление отсутствует на изоляторе. В области от 0 до 20 мм происходит падение потенциала от 0 до минус 16 кВ с плавным увеличением скорости падения (модуля напряженности поля до 2 кВ/мм на данном участке). Затем в области от 20 до 45 мм скорость падения потенциала от минус 16 до минус 50 кВ постоянна (график изменения модуля напряженности параллелен оси ординат на данном участке). Затем крутизна графика распределения потенциала меняется, и его падение от минус 50 до минус 100 кВ, приходящееся на 16 мм длины изолятора, становится более быстрым на данном участке (резкое увеличение модуля напряженности поля почти до 8 кВ/мм). Таким образом, в отсутствие напыления изменение потенциала вблизи большей части изолятора равномерно и не претерпевает скачков.

Иная ситуация наблюдается для случая, если имеется напыление на изоляторе. На Рис. 4а представлено распределение напряженности электрического поля, а на Рис. 4б потенциал и напряженность вблизи поверхности изолятора. Здесь же для наглядного сравнения приведены соответствующие зависимости для случая, когда изолятор не запылен. Согласно проведенным расчетам, напыленный слой приобретает потенциал минус 11 кВ (см. Рис. 4б), что задаёт эквивалентную разность потенциалов на участке длиной всего 3 мм (от 0 до 3 мм длины изолятора). Кроме того, контакт границ напыленного слоя, поверхности изолятора и вакуума в плоскостях  $Z = 3$  мм и  $Z = 33$  мм образуют “тройные” точки, напряженность в которых скачком поднимается до 32 кВ/мм (пик № 1) и 12 кВ/мм (пик № 2), соответственно. В первом случае напряженность поля превышает значение пробивной напряженности по поверхности стекла, используемого для изготовления изолятора рассматриваемого ускорителя ионов. Кроме того, напыленный слой, являясь накопителем зарядов, будет способствовать постепенному увеличению напряженности как вблизи поверхности изолятора, так и на участке между слоем и высоковольтным электродом. В совокупности создаются условия для осуществления пробоя диэлектрика, а также зазора между напыленным слоем и высоковольтным электродом.

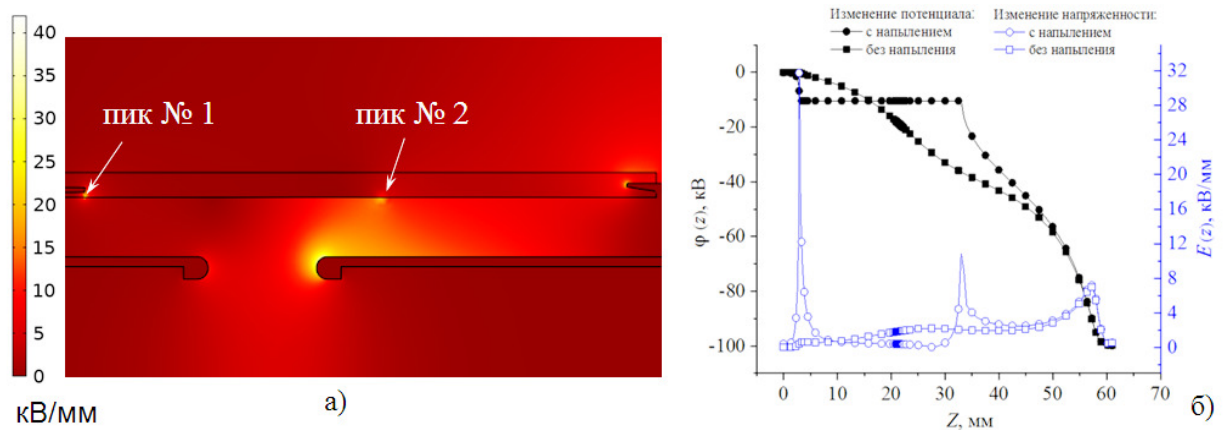


Рис.4. Распределение напряженности электрического поля (а), а также потенциал и напряженность вблизи поверхности изолятора (б) для случая, когда напыление присутствует на изоляторе. На Рис.4б для визуального сравнения также приведены соответствующие зависимости для случая, когда изолятор не запылен.

### 2.3. Исследование влияния геометрических параметров ускоряющей системы на её электропрочность

Отвод накапливаемого на слое заряда во внешнюю цепь возможен, в частности, в такой конструкции ускоряющей системы, в которой изолятор разделён на отдельные секции металлическим контактом в месте предполагаемого запыления. Металлический контакт должен иметь потенциал, определяемый его распределением в ускоряющей системе по результатам расчетов, и задаваться принудительно от внешнего источника питания для обеспечения стекания накопившегося заряда.

На Рис.5а представлен один из возможных вариантов ускоряющей системы, в которой имеется металлический контакт, разделяющий изолятор на две секции. В данном случае габариты ускоряющей системы, размеры электродов и расстояние между ними не изменились. Для того, чтобы прийти к оптимальной с точки зрения электропрочности конструкции были проведены численные расчеты, в которых одновременно менялось расстояние  $R$  между металлическим контактом и высоковольтным электродом за счет изменения его радиуса и расстояние  $L$  между ним и низковольтным электродом. При этом

анализировалось пиковое значение напряженности поля вблизи внутренней поверхности 1-го и 2-го изоляторов, а также вблизи поверхности высоковольтного электрода ( $E_{HV}$ ). Схема эксперимента изображена на Рис.5а, а на Рис.5б–г результаты расчетов, проведенных при уменьшении/увеличении радиуса высоковольтного электрода на 3 мм, а также при сближении электродов на 4 мм и удалении их друг от друга на 7 мм.

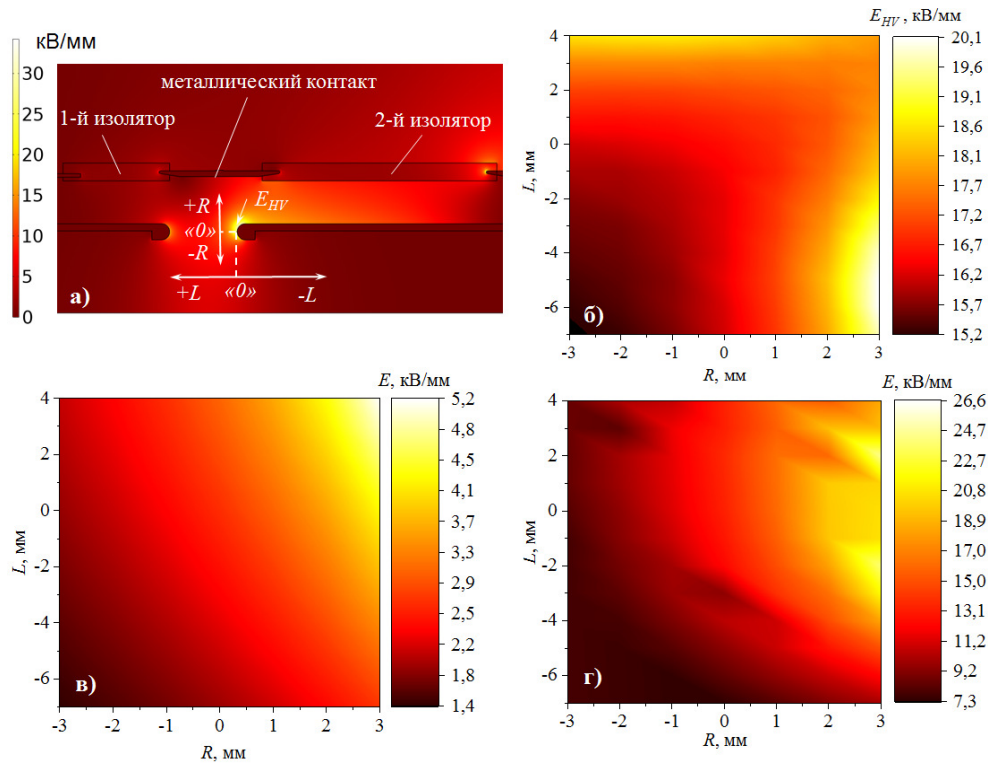


Рис.5. Распределение напряженности в примере конструкции ускоряющей системы с металлическим контактом (а). Зависимость пикового значения напряженности в данной ускоряющей системе от геометрических параметров  $R$  и  $L$  (пояснения в тексте) вблизи поверхности высоковольтного электрода (б), вблизи внутренней поверхности 1-го изолятора (в) и 2-го изолятора (г).

Из представленных зависимостей видно, что максимумы напряженности поля вблизи поверхностей 1-го и 2-го изоляторов, а также на поверхности высоковольтного электрода наблюдаются для случаев, когда его радиус максимален. При этом пик напряженности вблизи поверхности 1-го изолятора (5.2 кВ/мм) наблюдается при максимальном сближении электродов ускоряющей системы (Рис.5в). В свою очередь максимальное значение напряженности вблизи поверхности 2-го изолятора (26.6 кВ/мм) наблюдается в случаях, когда высоковольтный электрод приближен на 2 мм к низковольтному ( $L = +2$  мм) и смещён в обратную сторону на такое же расстояние ( $L = -2$  мм).

Из сравнения Рис.5б–г видно, что область геометрических параметров ускоряющей системы, где напряженность поля вблизи поверхностей 1-го, 2-го изоляторов и высоковольтного электрода минимальна, может быть обозначена следующим образом:  $L$  лежит в диапазоне от  $-7$  до  $-1$  мм, а  $R$  варьируется от  $-3$  до  $-1$  мм. На Рис.6 приведен пример конструкции ускоряющей системы, в которой за счет увеличения расстояния между электродами на 4 мм и уменьшения радиуса высоковольтного электрода на 2 мм снижено пиковое значение напряженности электрического поля как на его поверхности, так и на поверхностях 1-го и 2-го изоляторов. Согласно расчётам, на поверхности 1-го изолятора

максимум напряженности составляет 1.75 кВ/мм, на поверхности 2-го изолятора –8 кВ/мм, на поверхности высоковольтного электрода –16 кВ/мм.

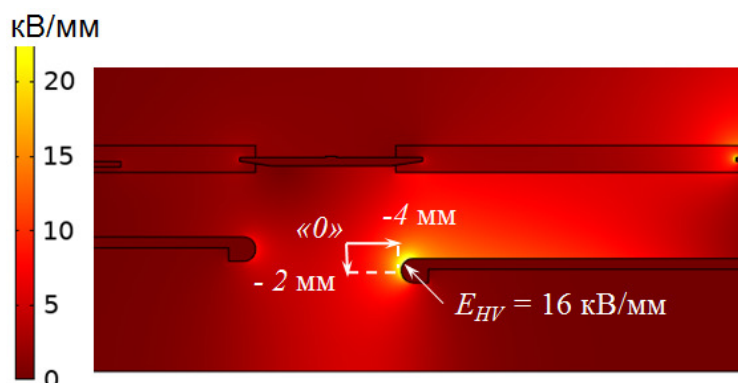


Рис.6. Распределение напряженности электрического поля в примере конструкции ускоряющей системы с геометрическими параметрами:  $L = -4$  мм,  $R = -2$  мм.

### 3. Заключение

В работе приведены результаты расчетов, направленных на изучение электропрочности ускоряющей системы малогабаритного ускорителя ионов. По результатам моделирования динамики корпускулярных потоков и электростатического поля в ускоряющей системе показано, что границы напыленного слоя на поверхности изолятора являются “тройными” точками. При величине ускоряющего напряжения минус 100 кВ вблизи одной из них происходит скачок напряженности электрического поля до значения 32 кВ/мм, что выше пробивного для стеклянного изолятора. Для предотвращения негативного влияния напыленного слоя на электропрочность ускоряющей системы изолятор был разделен металлическим контактом в месте предполагаемого запыления. После этого проведена оптимизация конструкции ускоряющей системы с целью минимизации пиковых значений напряженности электрического поля вблизи поверхности каждой секции изолятора и высоковольтного электрода. Показано, что для обеспечения данного требования радиус высоковольтного электрода должен быть уменьшен не менее, чем на 3 мм, а расстояние между ним и низковольтным электродом – не менее чем на 7 мм.

### 4. Список литературы

- [1] Mamedov N.V., Prokhorovich D.E., Yurkov D.I., Kanshin I.A., Solodovnikov A.A., Kolodko D.V., Sorokin I.A., *Instruments and Experimental Techniques*, **61**(4), 530, 2018; doi: 10.1134/S0020441218030223
- [2] Mamedov N.V., Shchitov N.N., Kan'shin I.A., *Instruments and Experimental Techniques*, **59**(6), 870, 2016; doi: 10.1134/S002044121606004X
- [3] Kanshin I.A. and Solodovnikov A.A., *Instruments and Experimental Techniques*, **63**(3), 315, 2020; doi: 10.1134/S0020441220030112
- [4] Venna K.R., Schramm H.-H., *XXVI Int. Symp. on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum*, 53, Mumbai, 2014; doi: 10.1109/DEIV.2014.6961617
- [5] Kanshin I A, *Proc. 7th Int. Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects (EFRE)*, 474, Tomsk, 2020; doi: 10.1109/EFRE47760.2020.9241976
- [6] Kanshin I.A., *J. Phys. Conf. Ser.*, **2064**, 0120113, 2021; doi: 10.1088/1742-6596/2064/1/012113
- [7] Kanshin I.A., Mamedov N.V., Solodovnikov A.A., Efimov N.E., *Vacuum*, **202**(3), 111194, 2022, doi: 10.1016/j.vacuum.2022.111194