

## Физика и материаловедение

УДК 51-73

К.К. Тяжелкова, И.В. Верхотурова

### МОДЕЛИРОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ВНУТРЕННЕГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ В ПЕРФОРИРОВАННОЙ ПЛЕНКЕ КАРТОН ПРИ ЕЕ ЭЛЕКТРИЗАЦИИ

*В статье представлены результаты моделирования в программе COMSOL MultiPhysics характеристик внутреннего электрического поля перфорированной пленки Картон при ее электризации в результате облучения электронами.*

*Ключевые слова: моделирование, Картон, электризация, перфорация, внутреннее электрическое поле.*

### MODELING OF THE CHARACTERISTICS OF THE INTERNAL ELECTRIC FIELD OF A PERFORATED KAPTON FILM DURING ITS ELECTRIFICATION

*The modeling results in the COMSOL MultiPhysics software of the characteristics of the internal electric field of a perforated Kapton film when it is electrified as a result of irradiation with electrons are presented in this paper.*

*Key words: modeling, Kapton, electrification, perforation, the internal electric field.*

#### Введение

Пленка Картон характеризуется высокой устойчивостью не только к агрессивным химическим растворам, в низких и высоких температурах, но и к радиационным воздействиям. Эти свойства пленки дают возможность применять ее в качестве терморегулирующих покрытий и слоев экранно-вакуумной тепловой изоляции поверхности космического аппарата [1-4]. Однако возникающая под действием ионизирующего излучения электризация пленки приводит к ее пробое и разрушению [1-4].

Общим фактом в моделях электризации пленки Картон, подробно изложенных в работах [2, 4], является то, что при облучении потоком низкоэнергетических электронов происходит их накопление в объеме пленки. В результате возникает и возрастает внутреннее электрическое поле, оказывающее воздействие на движение носителей заряда в пленке. Почти одновременно с возрастанием значения тока проводимости в процессе облучения пленки на несколько порядков увеличивается и ее радиационная электропроводность. И если ее недостаточно для эффективного разряда пленки, то заряд будет накапливаться до тех пор, пока напряженность не превысит пробойного значения [2, 4].

Существует несколько методов, позволяющих эффективно снижать процесс электризации пленки Картон, облучаемой потоком низкоэнергетических электронов. К их числу относится метод сквозной перфорации пленки лазерным излучением, предложенный А.А. Барабановым и др., позволяющий улучшить стекание объемного заряда через пленку на металлизированный слой [5].

В настоящей работе представлены результаты оценки влияния параметров перфорации на ослабление внутреннего электрического поля путем компьютерного моделирования процесса электризации пленки Kapton. Результаты работы содержат проведенное в программе COMSOL MultiPhysics (лицензия на учебный класс по сублицензионному договору №20/15/230 т 16.12.2015) численное моделирование процесса электризации неперфорированной и перфорированной полимерной пленки Kapton. Также получено уравнение, определяющее напряженность внутреннего электрического поля в перфорированной полимерной пленке Kapton при ее электризации. Проведено сравнение значений ослабления напряженности внутреннего электрического поля, полученных по результатам моделирования и результатам расчета по полученной формуле.

### Эксперимент

Моделирование процесса электризации полимерной пленки Kapton при воздействии на нее потока моноэнергетических электронов космической плазмы основано на использовании основных положений модели А.Е. Абрамешина, представленной в работе [4]. Согласно этой модели, электроны

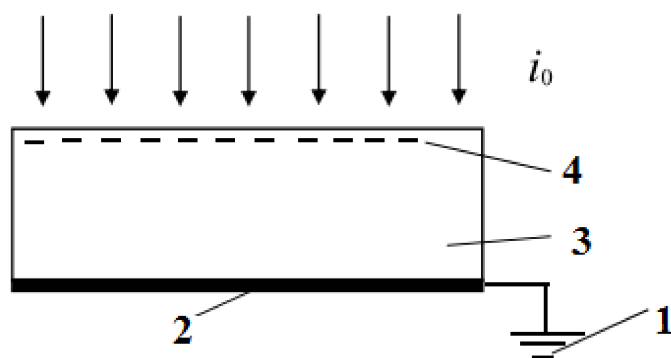


Рис. 1. Модель электризации полимерной пленки Kapton [4]: 1 – земля; 2 – нижний металлический электрод; 3 – полимерная пленка; 4 – виртуальный верхний электрод из встроенных в пленку электронов космической плазмы.

космической плазмы задерживаются в пленке Kapton на некоторой глубине  $h$ , образуя виртуальный верхний электрод из встроенных в диэлектрик электронов из космической плазмы [2, 4]. Таким образом, полимерная пленка с диэлектрической проницаемостью  $\epsilon$  и толщиной  $d$  располагается между двумя поверхностями: нижней, проводящей, металлизированной слоем алюминия заземленной поверхностью, и верхней, облучаемой электронами, не имеющей тонкого прозрачного проводящего покрытия (рис. 1).

Рассматривается стационарный случай, когда ток стекания избыточного заряда на металлизированную поверхность и ток зарядки диэлектрика за счет облучения равны. Это условие и установленные параметры облучения пленки Kapton в работе [4] позволяют определить максимальное значение стороннего электрического заряда, накапливаемого в слое толщиной  $h$ , при котором наступает пробой пленки. Полученное значение заряда использовалось в качестве одного из граничных условий при моделировании процесса электризации пленки в программе COMSOL MultiPhysics.

Результат моделирования в пакете прикладных программ COMSOL MultiPhysics электризации неперфорированной полимерной пленки при ее заряджении потоком электронов космической плазмы – это распределение характеристик внутреннего электрического поля в виде нормированных векторов  $E$  [6]. Результаты моделирования показали, что линии напряженности внутреннего электрического поля по всей поверхности пленки распределены нормально, т.е. внутреннее электрическое поле в пленке однородно. Эту однородность подтверждает полученное при моделировании распределение потенциала электрического поля в поперечном сечении пленки [6].

При моделировании процесса электризации пленки Kapton полученное значение напряженности внутреннего электрического поля, при котором происходит пробой пленки  $E_{пр}$ , равно  $1,8 \cdot 10^7$  В/м [6]. Экспериментальное значение пробивного напряжения для пленки Kapton, согласно работам [2, 4], составляет  $2 \cdot 10^7$  В/м.

Для численного моделирования процесса электризации перфорированной полимерной пленки Kapton и определения характеристик внутреннего электрического поля считали, что отверстия в

пленке были сформированы бесконтактным методом лазерной перфорации в шахматном порядке. Тогда отверстия цилиндрической формы будут располагаться в вершинах равностороннего треугольника со стороной  $L$ .

При определении характеристик внутреннего поля в неперфорированной полимерной пленке Картон при ее электризации считалось, что объемный заряд равномерно распределен по всему слою  $h$  пленки. Таким образом, достижение максимума напряженности поля (т.е. возникновение пробоя пленки) равновероятно для любой точки пленки.

Результирующее внутреннее электрическое поле в перфорированной пленке определяли как суперпозицию двух полей:

- 1) поля пленки толщиной  $h$  без отверстий, заряженной с объемной плотностью заряда  $\rho < 0$  (линии напряженности поля по всей поверхности пленки распределены нормально);
- 2) поля, образованного заряженным с объемной плотностью заряда  $\rho > 0$  цилиндром радиусом  $R$ , заполняющим отверстие (линии напряженности поля направлены радиально).

Таким образом, при электризации перфорированной пленки вероятность электрического пробоя будет высока в местах, максимально удаленных от отверстий, т.е. на расстоянии  $r$  от отверстий – точка А (рис. 2) [6].

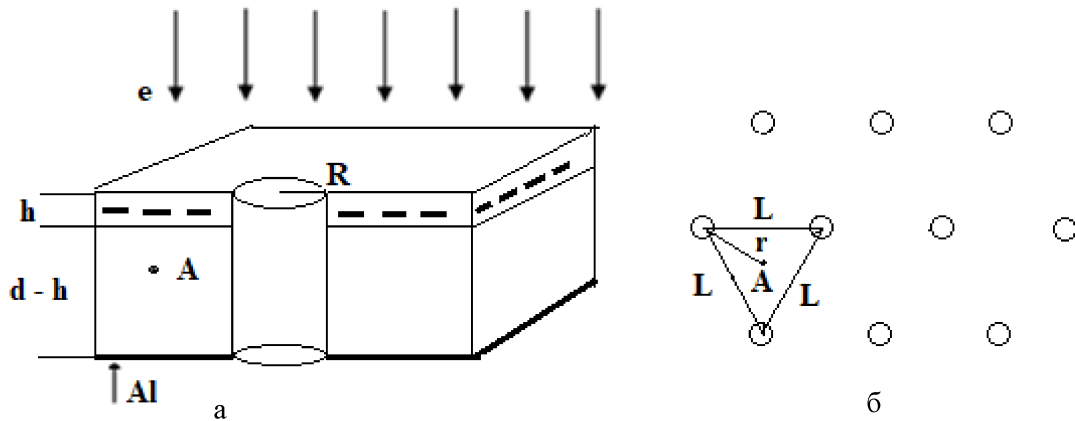


Рис. 2. Модель перфорированной пленки [6]: а) вид сбоку; б) вид сверху.

Для определения величины ослабления напряженности электрического поля в точке А, равноудаленной от трех отверстий, сначала устанавливалась напряженность электрического поля  $E_1$  в этой точке, которое создавало бы одно отверстие. Напряженность поля  $E_1$  определялась как поле диполя методом изображений при условии, что  $R \ll r$  и заряды  $+q$  и  $-q$  можно считать точечными. Полученная формула напряженности электрического поля в точке А в пленке с отверстиями, расположенными на одинаковом расстоянии  $L$  и с центрами в вершинах правильных  $n$ -угольников (рис. 2, б), имеет вид [6]:

$$E_1 = \alpha \frac{S_{oms}}{S} \frac{\left(d - \frac{h}{2}\right)}{Ln}, \quad (1)$$

где  $\alpha = \frac{4n^2 \sin^2\left(\frac{180^\circ}{n}\right) \cos\left(\frac{180^\circ}{n}\right)}{2\pi(n) - 2}$  – безразмерный коэффициент;  $\frac{S_{oms}}{S}$  – доля площади, потерянная пленкой при перфорации.

Установлено, что параметрами перфорации, влияющими на напряженность внутреннего электрического поля в перфорированной пленке Картон, являются радиус отверстия  $R$ , расстояние  $L$  между их центрами и их количество, приходящееся на единицу площади пленки.

Величина ослабления напряженности электрического поля в точке А определена как отношение напряженности внутреннего электрического поля  $E_I$  в этой точке пленки с отверстиями к напряженности поля  $E$  пленки толщиной  $h$  без отверстий [6].

В программе COMSOL MultiPhysics проведено моделирование характеристик электрического поля в перфорированной пленке Karton при ее электризации в зависимости от радиуса цилиндрических отверстий. Распределение линий напряженности внутреннего электрического поля в виде нормированных векторов напряженности электрического поля  $E_I$  – на рис. 3.

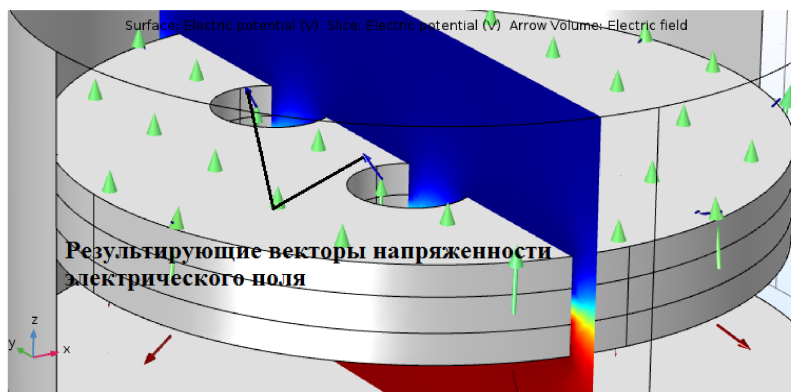


Рис. 3. Распределение векторов напряженности внутреннего электрического поля  $E_I$  в перфорированной пленке Karton при ее электризации [6].

Видно, что силовые линии внутреннего электрического поля вдали от отверстий распределены нормально и равномерно, как в пленке без отверстий. Наличие отверстий приводит к неоднородному распределению электрического поля внутри пленки. Вектор напряженности результирующего внутреннего электрического поля  $E_I$  при наличии отверстия показан в виде вектора, отклоненного от нормали.

Фрагмент поперечного разреза перфорированной пленки, демонстрирующий распределение эквипотенциальных линий внутреннего электрического поля в пленке, представлен на рис. 4.

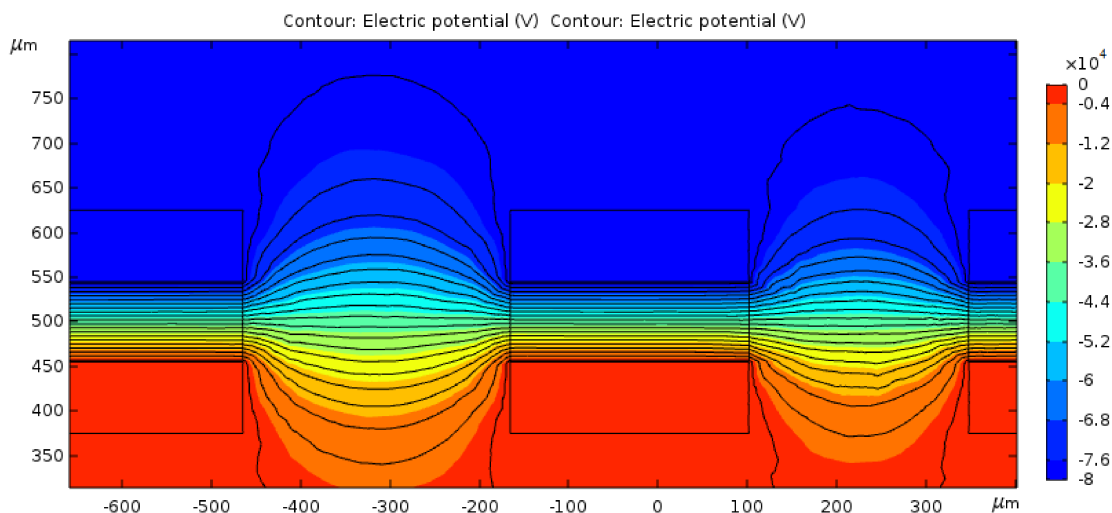


Рис. 4. Распределение эквипотенциальных линий электрического поля в поперечном сечении пленки с цилиндрическими отверстиями [6].

Из рис. 4 видно, что вдали от отверстия эквипотенциальные линии поля внутри пленки параллельны друг другу, и это сохраняется вплоть до самой границы с отверстием. В самом отверстии наблюдается искажение эквипотенциальных линий электрического поля.

На основе данных моделирования характеристик внутреннего электрического поля перфорированной пленки Karton построен график зависимости напряженности внутреннего электрического поля  $E_I$ , возникающего в перфорированной пленке Karton в процессе ее заряжения, от радиуса отвер-

стей  $R$ . Из полученной зависимости  $E_l(R)$  установлено, что максимальное значение напряженности, соответствующее минимальному радиусу отверстий, не превышает пробойного значения. На это максимальное значение не сильно влияют другие параметры перфорации – такие, как расстояние между центрами отверстий и их количество на единицу площади пленки. С увеличением радиуса отверстий значение напряженности внутреннего электрического поля в пленке Kapton при ее электризации уменьшается.

Для участка перфорированной пленки, содержащей три отверстия цилиндрической формы, проведен расчет ослабления напряженности внутреннего электрического поля (при различных радиусах  $R$  отверстий) по результатам моделирования  $\left(\frac{E_l}{E}\right)_{\text{модель}}$  и по результатам расчета  $\left(\frac{E_l}{E}\right)_{\text{расчет}}$ , где поле  $E_l$  определено по формуле (1). Из сравнения значений ослабления напряженности внутреннего электрического поля, полученных по результатам моделирования и результатам расчета, установлено, что наименьшее расхождение результатов наблюдается при радиусах отверстий 100 мкм.

### Заключение

Основываясь на полученных данных моделирования в программе COMSOL MultiPhysics процесса электризации перфорированной пленки Kapton, можно утверждать, что силовые линии результирующего внутреннего электрического поля при наличии отверстия представлены в виде вектора  $E_l$ , отклоненного от нормали, что увеличение радиуса отверстий приводит к уменьшению значения напряженности внутреннего электрического поля.

Полученное уравнение, определяющее напряженность внутреннего электрического поля в перфорированной полимерной пленке Kapton при ее электризации, показало, что параметрами перфорации, влияющими на ослабление напряженности внутреннего поля, являются радиус отверстия и количество отверстий.

Из сравнения значений ослабления напряженности внутреннего электрического поля, полученных по результатам моделирования и результатам расчета по полученной формуле, установлено, что наименьшее расхождение результатов для участка перфорированной пленки, содержащей три отверстия цилиндрической формы, наблюдается при радиусах отверстий 100 мкм.

---

1. Новиков, Л.С. Радиационные воздействия на материалы космических аппаратов. – М.: Московский гос. ун-т, 2010. – 192 с. – Режим доступа: <http://nashol.com/2014072079030/radiacionnie-vozdeistviya-na-materiali-kosmicheskikh-apparatov-novikov-l-s-2010.html>. – 12.05.2018

2. Пашенцев, В.Н. Модель заряда тонких полимерных пленок пучком электронов с энергией 80 кэВ // Труды МАИ. – 2012. – № 53. – Режим доступа: <https://mai.ru/upload/iblock/a4c/model-zaryada-tonkikh-polimernykh-plenok-puchkom-elektronov-s-energiy-80-kev.pdf>. – 16.05.2018.

3. Крючек, С.Д. Создание перспективных терморегулирующих покрытий космических аппаратов / С.Д. Крючек, М.Ф. Решетнев, Г.Г. Крушенко и др. // Решетниковские чтения. – 2015. – № 3(35). – С. 340-341. Режим доступа: <https://sozdanie-perspektivnyh-temoreguliruyuschih-pokrytiy-kosmicheskikh-apparatov.pdf.html>. – 01.06.2018.

4. Абрамешин, А.Е. Моделирование процессов радиационной электризации нанопроводящих диэлектриков / А.Е. Абрамешин, М.Д. Азаров, А.Е. Пожидаев и др. // Технологии электромагнитной совместимости. – 2015. – № 3 (42). – С. 325-333. – Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/modelirovanie-protsesov-radiatsionnoy-elektrizatsii-nanoprovodyaschih-dielektrikov-kosmicheskikh-apparatov>. – 18.05.2018.

5. Барабанов, А.А. Лазерная перфорация пленочных полимерных материалов экранно-вакуумной тепловой изоляции космических аппаратов / А.А. Барабанов, П.А. Вятлев, Ю.В. Ларченко и др. // Вестник НПО им. С.А. Лавочкина. – 2015. – № 2 (28). – С. 58-63. – Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=23857136.html>. – 09.12.2018.

6. Тяжелкова, К.К. Моделирование характеристик электрического поля в полимерной пленке Kapton при ее радиационной электризации: бакалаврская работа, науч. рук. – канд. физ.-мат. наук, доцент И.В. Верхотурова – Благовещенск: АмГУ, 2018. – 50 с.