



Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
АМУРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
(ФГБОУ ВО «АмГУ»)

Факультет инженерно-физический
Кафедра физики
Направление подготовки 03.03.02 – Физика
Направленность (профиль) образовательной программы Физика конденсированного состояния


ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ
Зав. кафедрой
 Е.В. Стукова
«06» 06 2018 г.

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

на тему: Моделирование характеристик электрического поля в полимерной плёнке Karton при ее радиационной электризации

Исполнитель
студент группы 411-об  19.06.18 К.К. Тяжелкова
(подпись, дата)

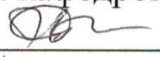
Руководитель
доцент, канд. физ.-мат. наук  20.06.18 И.В. Верхотурова
(подпись, дата)

Нормоконтроль
доцент, канд. физ.-мат. наук  21.06.18 О.А. Агапотова
(подпись, дата)

Благовещенск 2018

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
АМУРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
(ФГБОУ ВО «АмГУ»)

Факультет инженерно – физический
Кафедра физики

УТВЕРЖДАЮ
Зав. кафедрой
 Е.В.Стукова
«04» 05 2018 г.

ЗАДАНИЕ

К выпускной квалификационной работе студента Тяжелковой Ксении Константиновны

1. Тема выпускной квалификационной работы: Моделирование характеристик электрического поля в полимерной плёнке Kapton при ее радиационной электризации (утверждено приказом от 23.04.2018 № 914 – уч)

2. Срок сдачи студентом законченной работы (проекта) 14.06.2018

3. Исходные данные к выпускной квалификационной работе: пакет прикладных программ COMSOL MultiPhysics, электрофизические характеристики полимерной плёнки Kapton, содержащиеся в библиотеке материалов программы COMSOL MultiPhysics.

4. Содержание выпускной квалификационной работы (перечень подлежащих к разработке вопросов): провести в программе COMSOL MultiPhysics моделирование процесса электризации полимерной пленки Kapton; получить уравнение определяющие напряженность внутреннего электрического поля в перфорированной пленке Kapton при ее электризации; провести моделирование процесса электризации пленки Kapton содержащей отверстия разные по радиусу, форме и их количеству, приходящихся на единицу площади пленки; проанализировать полученные результаты.

5. Перечень материалов приложения: (наличие чертежей, таблиц, графиков, схем, программных продуктов, иллюстративного материала и т.п.) нет

6. Консультанты по выпускной квалификационной работе (с указанием относящихся к ним разделов) нет

7. Дата выдачи задания 07.05.2018

Руководитель выпускной квалификационной работы: Верхотурова Ирина Владимировна, доцент, канд. физ. мат. наук, доцент

Задание принял к исполнению (дата): 07.05.2018



(подпись студента)

РЕФЕРАТ

Бакалаврская работа содержит 48 страниц, 22 рисунка, 1 таблицу, 21 источник.

ПОЛИМЕРНАЯ ПЛЕНКА, ЭЛЕКТРОННЫЙ ПУЧОК, ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ПРОБОЙ, ПЕРФОРАЦИЯ, МОДЕЛИРОВАНИЕ, ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ

Полимерные материалы со структурой полиимидов (пленки Kapton) широко применяются в качестве различных функциональных материалов космических аппаратов. Однако они подвержены процессу электризации под действием ионизирующего излучения космической плазмы. В настоящее время создание новых и модифицирование уже существующих материалов для защиты космического аппарата от поражающих факторов радиационной электризации, а также исследование изменения их свойств под воздействием радиационного излучения актуально.

Цель работы – оценить влияние параметров перфорации на ослабление внутреннего электрического поля путем компьютерного моделирования процесса электризации пленки Kapton.

Значение напряженности внутреннего электрического поля, полученное в работе моделированием в COMSOL MultiPhysics процесса электризации пленки Kapton, хорошо согласуется с экспериментальным значением напряженности, при котором происходит пробой в пленке. Получено уравнение, определяющее относительное ослабление внутреннего электрического поля в перфорированной пленке Kapton при ее электризации. Моделирование процесса электризации перфорированной пленки Kapton в программе COMSOL MultiPhysics показало, что снижение значения напряженности внутреннего электрического поля в пленке зависит от параметров перфорации (радиуса отверстия и их количества, приходящихся на единицу площади пленки).

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	4
1 Обзор литературы	6
1.1 Применение пленки Kapton в космической отрасли	6
1.2 Основные модели электризации полимерных пленок Kapton под действием электронного пучка	9
1.3 Влияние параметров электронного пучка и полимерной пленки на процесс электризации	13
1.4 Перфорация полимерной пленки как метод снижения процесса ее электризации	16
2 Объекты и методы моделирования	20
2.1 Полимерная пленка Kapton	20
2.2 Пакет прикладных программ COMSOL Multiphysics	21
3 Моделирование характеристик электрического поля в полимерной плёнке Kapton при ее радиационной электризации	26
3.1 Модель электризации полимерной пленки Kapton	26
3.2 Уравнение определяющие напряженность электрического поля в перфорированной пленке Kapton при ее электризации	31
3.3 Численное моделирование процесса электризации перфорированной полимерной пленки Kapton в COMSOL MultiPhysics	37
Заключение	45
Библиографический список	46

ВВЕДЕНИЕ

Многообразие полимерных композиций и возможность получать на их основе материалы с широким диапазоном физико-химических свойств привели к успешному использованию их в микроэлектронике, радиотехнике и космической отрасли [1]. Полимерные материалы со структурой полиимидов (пленки Kapton) нашли широкое применение в качестве терморегулирующих покрытий и слоев экранно-вакуумной тепловой изоляции поверхности космического аппарата. Однако возникающая электризация пленок под действием ионизирующего излучения приводит к большому количеству сопутствующих негативных процессов [2, 3, 4].

Существуют несколько методов позволяющих повысить электрическую прочность полимерных пленок или улучшить стекание объемного заряда на металлизированную поверхность пленки. К таким методам относятся:

- применение полимеров, обладающих повышенной электропроводностью за счет введения определенных примесей;
- использование полимерных пленок толщиной меньше пробега электронов в данных пленках;
- нанесение на облучаемую поверхность полимерной пленки тонкого проводящего прозрачного покрытия с высокой эмиссионной способностью;
- перфорация полимерной пленки сквозными отверстиями, направленная на улучшение стекания объемного заряда через пленку на металлизированный слой [2, 3].

Цель работы – оценить влияние параметров перфорации на ослабление внутреннего электрического поля путем компьютерного моделирования процесса электризации пленки Kapton.

Для достижения цели необходимо выполнить следующие задачи:

- 1) провести в программе COMSOL MultiPhysics численное моделирование процесса электризации полимерной пленки Kapton;
- 2) получить уравнение определяющие напряженность внутреннего элект-

рического поля в перфорированной полимерной пленке Kapton при ее электризации;

3) провести в программе COMSOL MultiPhysics численное моделирование процесса электризации полимерной пленки Kapton содержащей отверстия разные по радиусу, форме и их количеству, приходящихся на единицу площади пленки;

4) проанализировать полученные результаты.

1 ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

1.1 Применение пленки Kapton в космической отрасли

Полимерные материалы со структурой полиимидов (пленки Kapton) широко применяются в качестве различных функциональных материалов космических аппаратов. Пленка характеризуется высокой устойчивостью к радиационным воздействиям, нахождению в агрессивных химических растворах, сильным низким и высоким температурам. Эти свойства пленки дают возможность применять ее в качестве электроизоляционных, терморегулирующих материалов космических аппаратов и в качестве одного из слоев мата экранно-вакуумной теплоизоляции [3, 4].

Экранно-вакуумная теплоизоляция представляет собой внешнюю теплоизоляцию космического аппарата или его отдельных отсеков. Это один из наиболее эффективных средств пассивной тепловой защиты объектов космической техники в условиях космического пространства, позволяющий снизить интенсивность теплообмена между космическим аппаратом и лучистых тепловых потоков, поступающих от солнца, планет, излучения наружных поверхностей элементов космического аппарата [5].

Конструктивно экранно-вакуумная теплоизоляция представляет собой пакет тепловых экранов ($n = 10 - 100$ шт.), состоящих из материалов с высокой отражающей способностью и разделенных прокладками из материалов с низкой теплопроводностью. При воздействии на внешнюю поверхность экранно-вакуумной теплоизоляции часть лучистого потока отражается от нее, а часть поглощается первым экраном. Это приводит к нагреву экрана, и он в свою очередь начинает излучать теплоту в обе стороны. Внутри пакета экранно-вакуумной теплоизоляции теплота передается за счет тепловой радиации и теплопроводности. Выбор материала экранов зависит от температурных условий эксплуатации [6]:

- 1) при температурах < 150 °С – экраны состоят из полиэтилентерефталатной пленки толщиной 5 мкм и 12 мкм с напылением алюминия с одной или с двух сторон;

2) при температурах < 300 °С – экраны состоят из полиимидной пленки (Kapton) толщиной 12, 16 и 20 мкм с напылением алюминия с одной или с двух сторон;

3) при температурах < 500 °С – экраны состоят из алюминиевой фольги толщиной 10 и 20 мкм;

4) при температурах > 500 °С – экраны состоят из никелевой фольги толщиной 5,8 мкм (сплав НВ₃В) [6].

При воздействии на полимерные материалы экранов ионизирующего излучения космического пространства в них возникает явление электризации, которое может привести к пробоям и разрушению полимерных пленок [7, 8].

Покрyтия, способные отражать энергию лучистого потока в космическое пространство и уменьшающие возникновение электрических разрядов на поверхности космических аппаратов, называют терморегулирующими. Они составляют пассивную часть системы терморегулирования космического аппарата [9].

Терморегулирующие покpытия предназначены для поддержания необходимого теплового режима объектов за счет установления баланса между поглощаемой извне энергией и энергией, излучаемой в окружающую среду. Покрyтия должны обеспечивать нормальное функционирование космического аппарата подверженного воздействию практически всех факторов космического пространства [2, 6, 9]. Терморегулирующие покpытия классифицируются на несколько видов: солнечные отражатели, истинные отражатели, солнечные поглотители, истинные поглотители [2].

Необходимо учитывать, что на космические аппараты действуют многие факторы, обуславливающие изменение свойств и рабочих характеристик материалов внешних поверхностей космического аппарата [9]. Рассмотрим основные факторы, воздействующие на терморегулирующие покpытия.

1. При воздействии *невесомости* на конструкцию космических аппаратов ухудшается теплопередача из-за отсутствия конвективного теплообмена, усложняется работа всех систем с жидкими и газовыми рабочими телами, что

требует применения специальных технических решений для нормального функционирования систем космических аппаратов в условиях невесомости [10].

2. *Влияние глубокого вакуума* сказывается на характеристиках материалов во время длительного их пребывания в космическом пространстве, в результате чего происходит испарение части материалов, в первую очередь – покрытий [10].

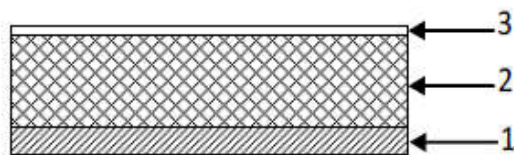
3. *Радиационное воздействие*, создаваемое солнечным корпускулярным излучением, радиационными поясами Земли и космическим излучением, оказывает влияние на физико-химические свойства и структуру материалов, космических аппаратов их прочность [10].

4. *Электромагнитное воздействие* приводит к накоплению статического электричества на поверхности космических аппаратов, что влияет на точность работы отдельных приборов и систем, а также на пожаробезопасность систем жизнеобеспечения [10].

5. *Тепловые воздействия*, создаваемые солнечным излучением и работой тепловыделяющих систем космических аппаратов, сказываются на работе приборов и экипажа. Для регулирования теплового режима применяются теплоизоляционные покрытия или защитные чехлы на поверхности космических аппаратов, осуществляя термокондиционирование внутреннего пространства [10].

Для обеспечения защиты внешней поверхности космического аппарата от воздействующих факторов используются терморегулирующие покрытия в качестве эмалей или керамических покрытий, на основе полимерных пленок с напыленными металлическими слоями в качестве отражателей, анодированные поверхности, плазменнонапыленные покрытия [9].

На рисунке 1 представлена схема терморегулирующие покрытия со слоем прозрачного электропроводного покрытия. На представленном рисунке терморегулирующее покрытие с прозрачным электропроводным покрытием включает в себя: 1 –отражающий слой металла толщиной ~0,1 мкм (Ag, Al); 2 – полимерную основу (пленки Kapton, Teflon); 3 – слой электропроводных оксидов толщиной ~0,01 мкм (ZnO, ITO) [9].



1 – непрозрачный отражающий слой; 2 – прозрачная полимерная пленка;

3 – прозрачный электропроводный слой

Рисунок 1 – Схема терморегулирующего покрытия со слоем прозрачного электропроводного покрытия [9]

В космосе в процессе эксплуатации внешний слой терморегулирующего покрытия, а именно прозрачное электропроводное покрытие, наиболее подвержен разрушающему воздействию ионизирующего излучения космического пространства, тем самым подвергая этим же воздействиям и полимерную пленку. В результате этого происходит электризация полимерной пленки за счет накопления неравновесных носителей заряда, а в определенный момент и ее пробой [9].

1.2 Основная модель электризации полимерной пленки Картон под действием электронного пучка

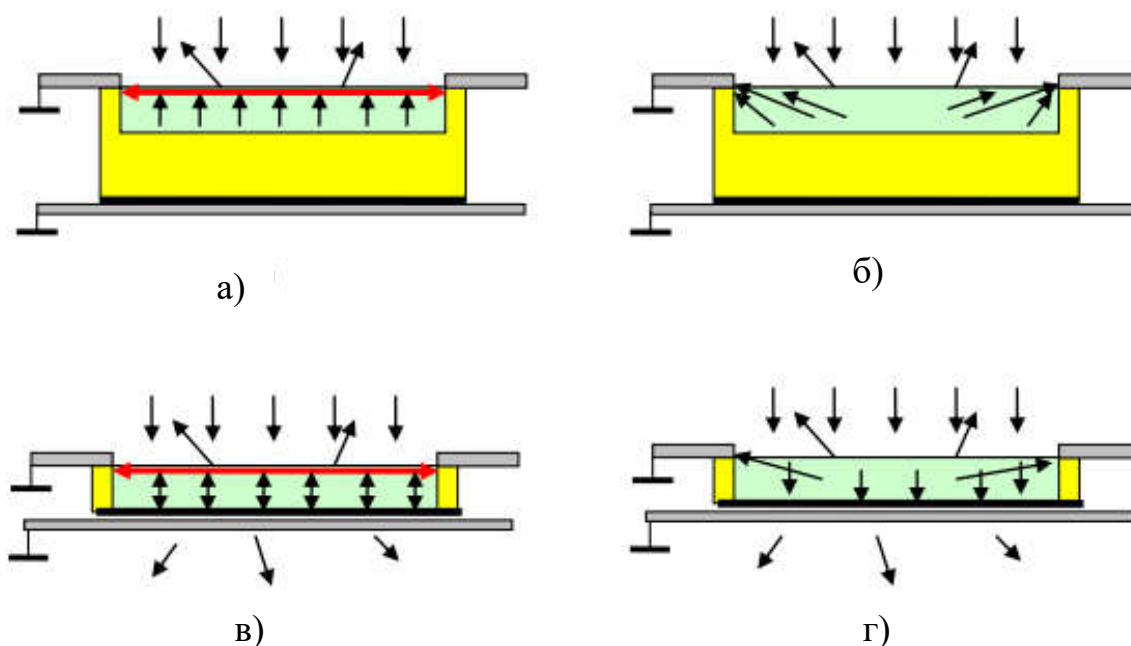
В настоящее время имеют место три основных модели электризации диэлектрических материалов. Эти модели подробно рассматриваются в работах [8, 11]. Модели процесса электризации полимерной пленки построены на решении системы уравнений непрерывности, закона Ома в дифференциальной форме, уравнения Пуассона для данного вещества и теоремы Гаусса для вектора индукции электрического поля [8].

Общим фактом в этих моделях является то, что при облучении полиимидной пленки потоком низкоэнергетических электронов происходит их накопление в объеме пленки на определенной глубине. Нарастающая с течением времени термализация электронов в объеме диэлектрика приводит к возникновению и возрастанию внутреннего электрического поля (тока проводимости), оказывающего воздействие на движение носителей заряда в диэлектрике [12].

Почти одновременно с возрастанием значения тока проводимости во вре-

мья облучения пленки электронным пучком возрастает и ее радиационная электропроводность на несколько порядков. И если ее значение недостаточно для эффективного разряда диэлектрика (при стекании избыточного заряда на металлизированную поверхность), то заряд будет накапливаться до тех пор, пока напряженность не превысит пробойного значения [8].

В работе Пашенцева В.Н. [8] рассматриваемая модель зарядки полимерных пленок (Kapton, Teflon) основывается на условии баланса токов внутри пленки, т.е. равенстве тока падающего пучка электронов и тока проводимости внутри пленки, который возникает под действием напряженности электрического поля накопленного объемного заряда (рисунок 2) [8].



а) $d \geq h$ с проводящим покрытием; б) $d \geq h$ без покрытия; в) $d < h$ с проводящим покрытием;
г) $d < h$ без покрытия

Рисунок 2 – Распределение токов внутри полимерной пленки, облучаемой электронным пучком [8]

В его работе рассматривается несколько вариантов распределения токов внутри полимерной пленки в зависимости от соотношения толщины пленки и длины пробега электронов, а также при наличии или отсутствии на облучаемой

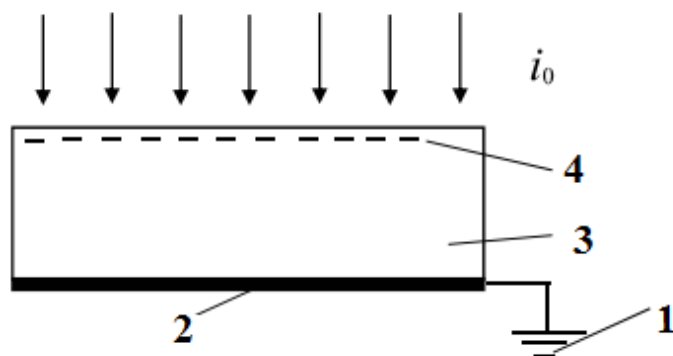
поверхности пленки прозрачного проводящего покрытия (рисунок 2) [8]. В реальных условиях полимерная пленка толщиной d располагается между двумя поверхностями: нижняя поверхность – проводящая металлизированная слоем алюминия, заземленная; верхняя, облучаемая электронами, поверхность – имеет тонкое прозрачное проводящее покрытие (заземляемое) или не имеет его вообще [8].

Таким образом, при бомбардировке полимерных пленок электронным пучком возможны два варианта:

1) электроны проходят пленку толщиной d насквозь и стекают по заземленной металлической поверхности, не приводя к образованию электростатического разряда;

2) задерживаются в пленке на некоторой глубине h (порядка длины пробега электронов), образуя между заряженной областью и заземленным металлическим слоем, изолирующий слой диэлектрика с низкой проводимостью, препятствующий стеканию заряда на нижнюю металлизированную поверхность пленки [8].

Абрамешиным А. Е. в работе [13] предложена следующая модель электризации полимерной пленки Kapton, под действием потока моноэнергетических электронов. Не учитывая влияние вторичной электронной эмиссии на уменьшение тока, протекающего в диэлектрике, считается, что электроны космической плазмы задерживаются в пленке на некоторой глубине h , образуя отрицательный виртуальный верхний электрод (рисунок 3) [13]. Также в модели рассматривается стационарный случай, когда не учитывается стекание избыточного заряда на металлизированную поверхность и одновременное его накопление во время облучения, то есть зарядный ток i_0 равен току стекания i_c по объему диэлектрика. Это условие позволяет грубо оценить значение максимального накапливаемого отрицательного заряда, увеличение которого приводит к увеличению напряженности внутреннего электрического поля, вызывающего ток проводимости электронов в направлении этого поля [13].



1 – земля; 2 – нижний металлический электрод; 3 – полимерная пленка;
4 – виртуальный верхний электрод из встроенных в пленку электронов космической плазмы

Рисунок 3 – Модель электризации полимерной пленки [13]

Величина максимального электрического заряда, накапливаемого в объеме пленки за счет облучения определяется по формуле:

$$q_{\max} = j_0 SCR, \quad (1)$$

где j_0 – плотность тока падающего электронного потока, мкА/мм²;

S – площадь облучаемой поверхности, мм²;

C – емкость диэлектрика, Ф;

R – сопротивление диэлектрика, Ом [13].

При вычислении заряда емкость пленки определяется по формуле:

$$C = \varepsilon \varepsilon_0 \frac{S}{d}, \quad (2)$$

где ε – относительная диэлектрическая постоянная пленки;

ε_0 – электрическая постоянная, Ф·м⁻¹;

d – толщина пленки, мкм [13].

Сопротивление полимерной пленки рассчитывается по формуле:

$$R = \frac{d}{\sigma S}, \quad (3)$$

где σ – удельная проводимость пленки, $\text{Ом}^{-1}\cdot\text{м}^{-1}$ [13].

Таким образом, максимальный электрический заряд, накопившийся в приповерхностном слое пленки, облучаемой потоком электронов:

$$Q_{\max} = j_0 S \epsilon \epsilon_0 \frac{S}{d} \frac{d}{\sigma S} = \frac{j_0 S \epsilon \epsilon_0}{\sigma}. \quad (4)$$

Так же можно принять допущение, что бомбардирующие электроны задерживаясь в пленке на некоторой глубине h , образуют постоянный, равномерно распределенный в объеме. После установления стационарного состояния, когда ток зарядки сравняется с током стекания избыточного заряда на металлизированную поверхность пленки.

1.3 Влияние параметров электронного пучка и параметров полимерной пленки на процесс электризации

На процесс электризации полимерной пленки оказывают влияние определенные параметры. Рассмотрим основные из них, связанные, как с самой диэлектрической пленкой, так и с электронным пучком бомбардирующим диэлектрик. Большое значение имеют следующие параметры: длина пробега электронов в пленке h ; мощность дозы облучения; вторичная электронная эмиссия; радиационная электропроводность и напряженность внутреннего электрического поля [8].

Длина пробега электронов в пленке. Электроны, проходящие через вещество, испытывают упругое и неупругое рассеяние, а также излучают фотоны при взаимодействии с ядрами и электронами окружающей среды. В результате, частицы теряют свою энергию и отклоняются от первоначального направления на большие углы, поэтому траектория их движения в веществе не прямолинейная. Так как происходит большое рассеивание и разброс потерь энергии, то длину пробега электронов через пленку определяют экспериментально [8, 14].

Для расчета экстраполированного пробега электронов в веществе может быть использована эмпирическая формула:

$$R = 0,4U^{1,4}, \quad (5)$$

где R – длина экстраполированного пробега электрона, г/ см²;

U – энергия электронов, МэВ [8].

Так как длина пробега электрона зависит от плотности ρ вещества, то она может быть рассчитана по формуле:

$$h = \frac{R}{\rho}, \quad (6)$$

где h – длина пробега электрона в веществе, см [8].

Определенная по данной формуле длина пробега в Картон равна 83 мкм при энергии 80 кэВ [8]. Пашенцевым В.Н. в работе [8] показано, что тонкие пленки Картон толщиной 51 мкм и 76 мкм часть электронов проходит насквозь, а в толстых толщиной 127 мкм и 254 мкм глубина проникновения электронов в несколько раз меньше толщины пленки, что обуславливает существование в пленках диэлектрического слоя с низкой проводимостью, препятствующего стеканию заряда от облученной области к металлизированной поверхности пленки.

Мощность дозы электронного облучения. Поглощение электронов обусловлено потерями энергии на ионизацию и возбуждение атомов (ионизационные потери), а также при высоких энергиях электронов на тормозное излучение (радиационные потери) [11]. В статье [8] установлено, что распределение поглощенной дозы неоднородно по глубине пленки и зависит от распределения плотности тока и потерь энергии электронов. В работе [12] авторами было проведено моделирование распределения дозы по глубине диэлектрика методом Монте-Карло, которое показало наличие максимума дозы, находящегося на некоторой глубине пленки [12].

В работе [8] предложена формула для оценочного значения равномерно распределенной мощности дозы:

$$P = \frac{jU}{R}, \quad (7)$$

где P – мощность дозы, Гр/с;

j – средняя плотность тока электронов, прошедших в диэлектрик, А/м²;

U – энергия электрона, эВ;

R – экстраполированный пробег электрона, кг/м² [8].

Вторичная электронная эмиссия на поверхности пленки. Когда на поверхность металла в вакууме падает ток электронов, то часть их отражается поверхностью металла, а другие поглощаются металлом. При этом, если энергия электронов, бомбардирующих поверхность металла, достаточно высока, то из металла выбиваются электроны, образующие вместе с отраженными электронами встречный поток. Это явление носит название вторичной электронной эмиссии [8, 15].

Аналогичное выбивание электронов (вторичная эмиссия) наблюдается также при бомбардировке электронами диэлектриков, к которым относятся полимерные пленки. Выбивание электронов с поверхности диэлектрика уменьшает ток, протекающий в диэлектрике. Вследствие того, что число частиц в потоке вторичных электронов в несколько раз превышает число электронов первичного потока, направленного на поверхность металла [13]. Таким образом, плотность тока, протекающего в диэлектрике при его электризации, определяется по формуле:

$$j = j_0(1 - \gamma), \quad (8)$$

где j – плотность тока, протекающего в диэлектрике;

j_0 – плотность тока падающего электронного потока;

γ – коэффициент вторичной эмиссии [8].

Коэффициент вторичной эмиссии зависит от энергии бомбардирующих электронов и определяется следующим образом:

$$\gamma = 2,33\left(\frac{0,15}{U}\right)^{0,35}, \quad (9)$$

где U – энергия электрона, кэВ [8].

Для электронов с малой энергией порядка 2 кэВ коэффициент вторичной эмиссии будет составлять $\gamma = 1$, то есть будет очень медленное накопление объемного заряда на диэлектрике. При энергии порядка выше 80 кэВ значение вторичной электронной эмиссии будет равна примерно $\gamma = 0,26$. Это означает, что поток падающих электронов равен обратному потоку вторичных электронов с энергией в сотни электронвольт, выбитых из приповерхностного слоя [8, 15].

1.4 Перфорация полимерной пленки как метод снижения процесса электризации

Существуют несколько методов позволяющих повысить электрическую прочность полимерных пленок или улучшить стекание объемного заряда на металлизированный слой. К таким методам относятся:

- применение полимеров, обладающих повышенной электропроводностью за счет введения определенных примесей;
- использование полимерных пленок толщиной меньше пробега электронов в данных пленках;
- нанесение на облучаемую поверхность полимерной пленки тонкого проводящего прозрачного покрытия с высокой эмиссионной способностью для увеличения коэффициента вторичной электронной эмиссии;
- перфорация полимерной пленки сквозными отверстиями, направленная на улучшение стекания объемного заряда через пленку на металлизированный слой [3].

Для обеспечения защиты полиимидной пленки от воздействия электростатических зарядов осуществляется перфорация конструктивных элементов мата экранно-вакуумной тепловой изоляции. Задача процесса перфорации – изготовление перфорированных материалов экранно-вакуумной тепловой изоляции с круглыми перфорационными отверстиями диаметром от 2 до 5 мм и шагом перфорации от 10×10 мм до 50×50 мм. При этом эти пленки должны сохра-

нять свои механические и физико-химические свойства и иметь минимальные загрязнения [3].

В настоящее время известно несколько методов перфорации полимерных пленочных материалов.

Контактные методы перфорации.

1. Холодная механическая перфорация. Она осуществляется путем механического прокола с использованием технологических операций:

- рулон с формованной пленкой снимается с формовочной установки;
- пленка раскатывается на столе (при необходимости разрезается);
- производится ручная перфорация при помощи механического инструмента [3, 16].

Такая перфорация не обеспечивает прочностные свойства материала, отсутствие разрывов и напряжений в пленке, высокую производительность и точность перфорирования.

2. Механическая перфорация горячими иглами. Такая перфорация основана на прожигании отверстий при помощи вала с изолированными электрически нагреваемыми игольчатыми сегментами, вращающегося со скоростью обрабатываемой пленки и осуществляющего получение круглых отверстий на обрабатываемом материале. Этот метод перфорации за счет оплавления краев отверстий релаксирует напряжения в материале, сохраняет прочностные свойства на уровне исходного значения, но обладает рядом других недостатков, таких, как: вытянутость отверстия в направлении протяжки; наличие дефектов, вызванных неполным оплавлением краев отверстия; фиксированный шаг и диаметр отверстий [3, 16].

Бесконтактные методы перфорации.

1. Электроискровая перфорация. Такая перфорация осуществляется путем прожигания отверстий в полимерной пленке с помощью электрического разряда. Недостатками такой перфорации является то, что при попадании такого разряда меняются параметры и свойства пленки, а это увеличивает радиационное излучение в пленке, влияя на тепловыделение и распределения плотности тока в материале [3, 17].

2. В работе [3] Барабановым А.А. и др. предложен новый метод перфорации конструктивных элементов мата экранно-вакуумной тепловой изоляции – перфорация лазерным излучением. В работе обоснованы преимущества этого метода перфорации, которые заключаются в следующем:

- процесс лазерной перфорации происходит одновременно с дублированием пленки прокладочным материалом;
- увеличение производительности за счет автоматизации процесса и исключения ручных технологических операций;
- увеличение точности перфорирования;
- оперативная регулировка диаметра и шага отверстий [3].

В работе [3] рассмотрены следующие типы лазеров с подходящими характеристиками для перфорации и создании лазерных установок для перфорации пленочных материалов:

- газовые лазеры (CO_2 и СО-лазеры);
- ультрафиолетовые лазеры (экимерный KrF и Nd-лазера на четвертой гармонике);
- волоконный лазер (1,062 мкм) [3].

Рассматривая преимущества и недостатки каждого в отдельности типа лазера авторами работы [3] для реализации перфорации полимерных материалов экранно-вакуумной тепловой изоляции было предложено использовать волоконный лазер (YLP-1-100-20-20-RG), с длиной волны излучения 1,062 мкм и возможностью фокусировки излучения в пятно малых размеров (~ 40 мкм). На основе этого типа лазера Барабановым А.А. была спроектирована и изготовлена специализированная лазерная автоматизированная установка «Лазерная система перфорации». Работа на этой установке основывается на принципе линейно-углового сканирования лазерного излучения. В результате воздействия лазерного излучения на полиимид происходит процесс его испарения, сопровождающийся интенсивной деструкцией. В результате чего выделяется большое количество углеродосодержащих продуктов, что приводит к загрязнению поверхности пленок [3, 9]. Проведенный в работе [3] анализ технологии лазерной

перфорации показал, что предложенная лазерная система способна осуществлять лазерную перфорацию металлизированных полимерных пленок при производстве изделий экранно-вакуумной тепловой изоляции с приемлемым качеством.

Таким образом, для проведения численного моделирования процесса электризации перфорированной полимерной пленки Kapton будем считать, что отверстия в пленке сформированы бесконтактным методом лазерной перфорации. А также учтем, что процесс лазерной перфорации круглыми отверстиями можно проводить не только с шагом перфорации 50×50 мм, но и в шахматном порядке. Тогда отверстия будут располагаться в вершинах равностороннего треугольника со стороной L , что позволит избежать перекрытия зон лазерного воздействия в материале, наличие которых приводит к значительному изменению исходных свойств материала.

2 ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

2.1 Полимерная пленка Kapton

Полимерные материалы со структурой полиимидов (пленки Kapton) нашли широкое применение в качестве защитных электроизоляционных покрытий поверхности космического аппарата.

Kapton – это лента, изготовленная из полиимида (рисунок 4), представляющая собой прекрасный диэлектрик, который проявляет стабильные свойства в достаточно широком диапазоне температур (от $-273\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+400\text{ }^{\circ}\text{C}$) [18].

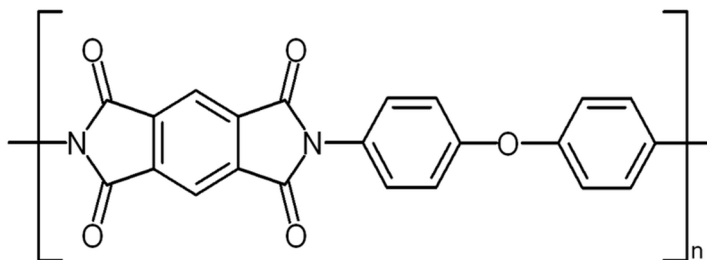


Рисунок 4 – Структура поли-оксидифенилен-пиромеллитимид [18]

Kapton состоит из двух слоев различных веществ. Первый слой при изготовлении наносится из фторопластов, а второй из полиимидов, которые обладают замечательной особенностью, заключающейся в способности спекаться в однородную массу под воздействием высокой температуры. В результате получается высокая плотность и однородность изоляционного слоя, обладающего определенным набором свойств, объясняющих широкий спектр применения данного изоляционного материала [18].

Основные свойства и характеристики лент из полиимида [19]:

- 1) электрическая прочность, В/мкм, при 60 Гц, 25-150 $^{\circ}\text{C}$: 6000-7000;
- 2) диэлектрическая проницаемость при 1000 Гц, 25-200 $^{\circ}\text{C}$: 3,5-3,0;
- 3) удельное объемное электрическое сопротивление, Ом·см 25-200 $^{\circ}\text{C}$: 10^{12} ;
- 4) удельное поверхностное электрическое сопротивление, Ом, при 1 кВ и относительной влажности 50 %, 25 $^{\circ}\text{C}$: 10^{13} ;

5) сохраняет свои свойства в достаточно широком диапазоне температур (от -273 до $+400$ °С);

6) отличается безупречной стойкостью к повышенной влажности, а также не подвержен истиранию и разрушению под воздействием химических веществ;

7) легче, чем другие изоляторы, и имеет хорошие изоляционные и температурные характеристики [19].

Применение полиамидной ленты Kapton Tape [19]:

1) в качестве изоляции электропроводки в гражданском и военном авиационном строении;

2) для изготовления гибких печатных плат и как расходный материал микроэлектронике и высоких технологиях;

3) создания тепловых экранов в конструкции космических аппаратов и скафандров;

4) в качестве покрытия отдельных проводников;

5) при изготовлении космических зондов и солнечных парусов [19].

2.2 Пакет прикладных программ COMSOL MultiPhysics

COMSOL Multiphysics – это мощная интерактивная среда для моделирования и расчетов большинства научных и инженерных задач, основанных на дифференциальных уравнениях в частных производных методом конечных элементов [20].

Цель моделирования в пакете COMSOL MultyPhysics – это определение значения физических величин, установление между ними количественных соотношений, применение ЭВМ для решения конкретных задач [20, 21]. С этим программным пакетом можно расширить стандартные модели, использующие одно дифференциальное уравнение (прикладной режим) в мультифизической модели для расчета связанных между собой физических явлений. Расчет не требует глубокого знания математической физики и метода конечных элементов [20].

Часть программного пакета COMSOL MultiPhysics, состоит из семи основных модулей и блоков. Интерфейс программы обеспечивает управление работой всего пакета программы: управляет потоками данных, позволяет работать со всеми модулями и блоками и обеспечивает связь между модулями и блоками. Основные модули программного пакета представлены ниже [20].

Расчетный модуль – проведение расчетов, основанных на методе конечных элементов.

Модуль вывода данных – сохраняет результаты проведенных расчетов в отдельные файлы.

Модуль визуализации – возможность просмотра результатов расчета в 2D и в 3D виде.

Модуль ввода данных – задает начальные и граничные условия для модели.

Модуль построения геометрии – возможность для построения моделируемого объекта, включая графический редактор, который имеет широкий набор примитивов для построения на плоскости или в пространстве различных геометрических объектов.

Блок для хранения готовых моделей – возможность выбора уже готовых моделей из библиотеки. Возможность сохранения в библиотеку созданных пользователем моделей, для того чтобы другие пользователи могли загрузить уже готовую модель для решения своей конкретной задачи [21].

Этапы моделирования. На рисунке 5 представлена блок-схема описания последовательных действий при проведении численного эксперимента. Описание последовательных действий при проведении эксперимента на примере блок-схемы (рисунок 5): начало – ввод параметров (начальные и граничные условия, параметры среды электризации).

После задания начального шага производится построение сетки. Затем переходим ко второму этапу – численный расчет. На последнем этапе после где производится расчет и обработка данных идет визуализация параметров.



Рисунок 5– Блок-схема численного эксперимента [20]

Пошаговая иллюстрация к входу в программу COMSOL MultiPhysics представлена ниже.

1. Выбираем вкладку New File – Model Wizard (рисунок 6);

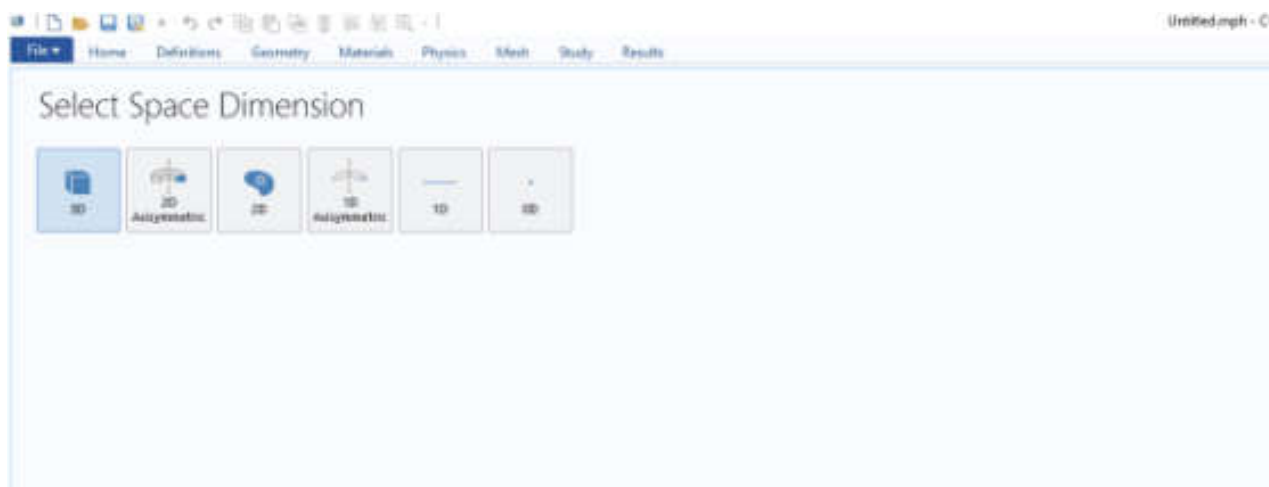


Рисунок 6 – Вид вкладки New File – Model Wizard

2. Выбираем пространственное измерение, т.е. определяем рабочую область и задаем геометрию – 3D (рисунок 7);

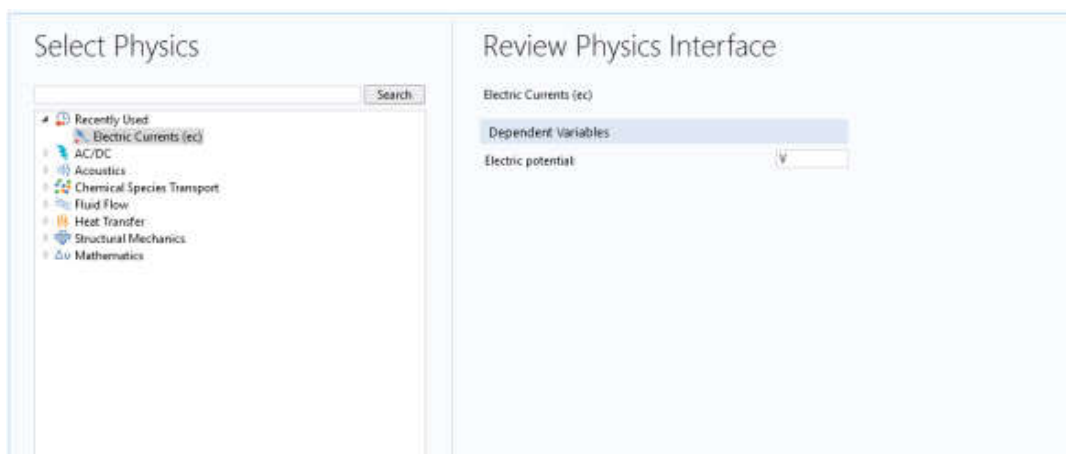


Рисунок 7 – Физический интерфейс

3. Выбираем размерность модели, определяем физический раздел electric currents (рисунки 7, 8);

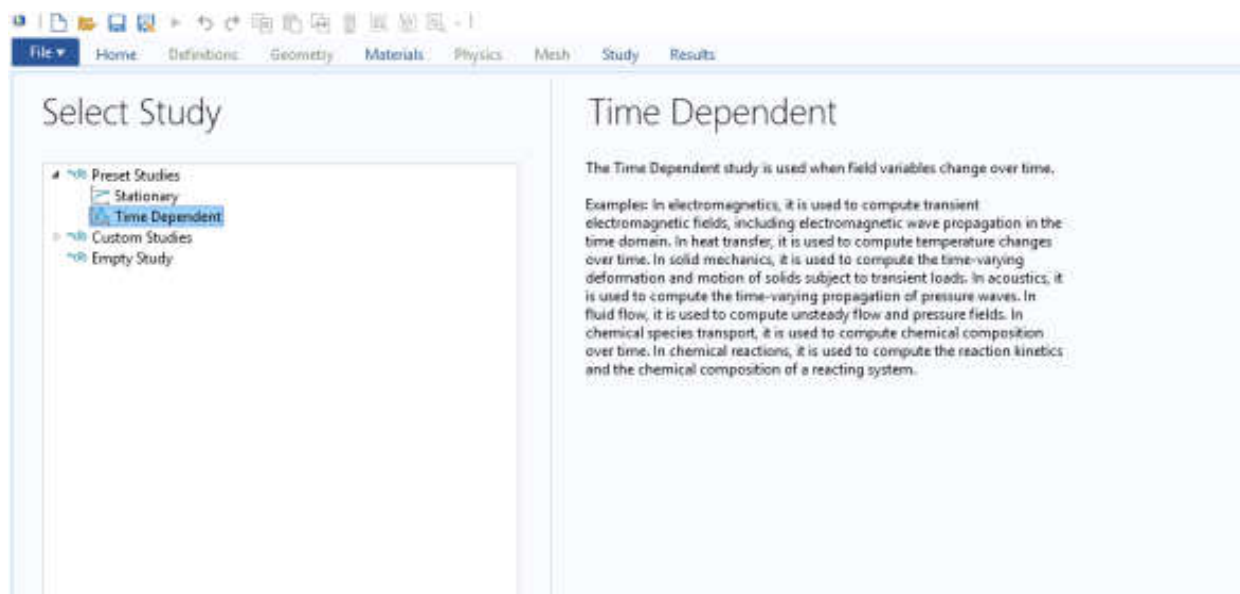


Рисунок 8 – Выбор метода исследования

4. После выбора выше представленных условий открывается окно основной программы с рабочей областью, инструментальными панелями и главным меню. Кнопки на инструментальных панелях повторяют пункты главного меню (рисунок 9).

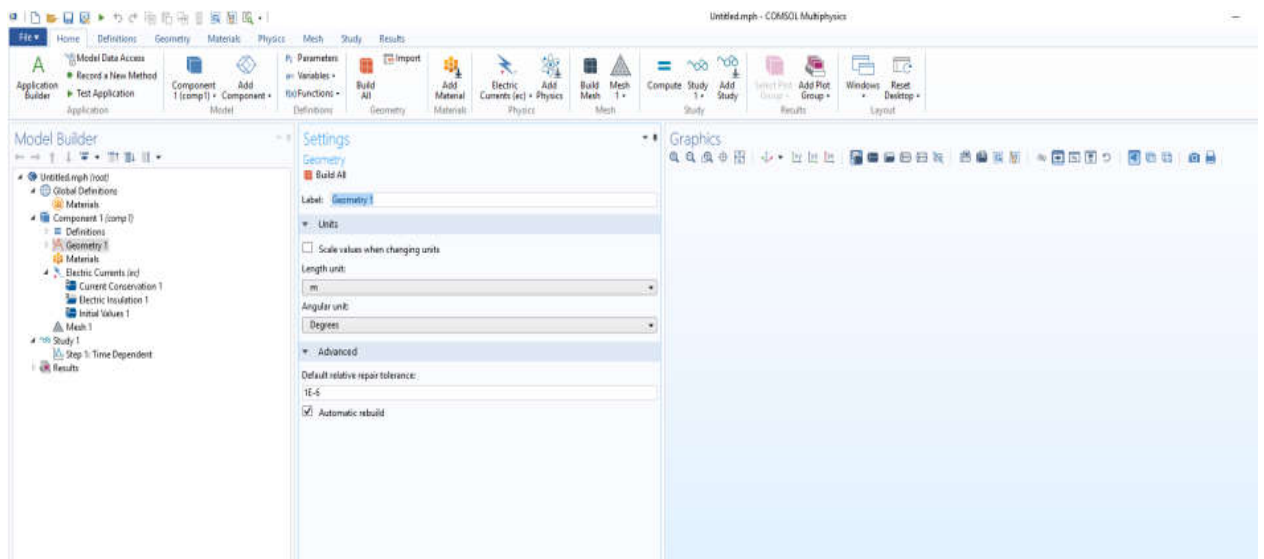


Рисунок 9 – Основное меню

Визуализация моделирования является важным этапом процесса разработки объекта. Отображение моделируемых физических процессов позволяет увидеть процессы, протекающие внутри модели. Таким образом, программа COMSOL MultiPhysics – это метод компьютерного моделирования позволяющий создавать геометрию исследуемого объекта, задавать свойства материалов и получать данные о физических процессах, происходящих в исследуемых объектах [21].

3 МОДЕЛИРОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ В ПОЛИМЕРНОЙ ПЛЕНКЕ КАРТОН ПРИ ЕЕ РАДИАЦИОННОЙ ЭЛЕКТРИЗАЦИИ

3.1 Модель электризации полимерной пленки Karton

Моделирование процесса электризации полимерной пленки при воздействии на нее потока моноэнергетических электронов космической плазмы основано на использовании основных положений модели Абрамешина А. Е., представленной в работе [13].

Считаем, что полимерная пленка с диэлектрической проницаемостью ϵ и толщиной d располагается между двумя поверхностями: нижняя – проводящая металлизированная слоем алюминия заземленная поверхность; верхняя облучаемая электронами поверхность – не имеет тонкого прозрачного проводящего покрытия. Электроны задерживаются в пленке на некоторой глубине h , образуя виртуальный верхний электрод из встроенных в диэлектрик электронов из космической плазмы.

Рассматриваем стационарный случай, когда ток стекания избыточного заряда на металлизированную поверхность и ток зарядки диэлектрика, за счет облучения, равны. Это условие позволяет определить максимальное значение стороннего электрического заряда используя для его расчета следующие установленные параметры из работ [8, 13]:

– средняя плотность тока бомбардирующих пленку электронов $j_e = 0,001$ мкА/мкм²;

– удельная проводимость пленки $\sigma = 10^{14}$ Ом⁻¹м⁻¹;

– площадь облучаемой поверхности $S = 10^6$ мкм².

Значение максимального стороннего электрического заряда, накопившегося в диэлектрике, рассчитываем по формуле (4). Его значение составляет $q_{\max} = 2,66 \cdot 10^{-4}$ Кл. Полученное значение заряда задается в программе в качестве граничного условия для верхней поверхности – terminal boundary.

Приняв выше перечисленные допущения была построена модель полимерной пленки, не содержащей отверстия. Геометрическая модель расчетной области представляет собой три области.

Первая область в форме цилиндра высотой 1000 мкм и радиусом 1000 мкм – объем пространства, в котором будут происходить все физические процессы.

Вторая область – цилиндр высотой 250 мкм и радиусом 900 мкм, который представляет собой моделируемую пленку. В малом цилиндре задаем третью область – часть второй в форме цилиндра высотой 80 мкм, которая представляет собой толщину пленки, в которой равномерно распределяется объемный электрический заряд, поступающий в диэлектрик в процессе облучения. Геометрия полученной модели представлена на рисунке 10.

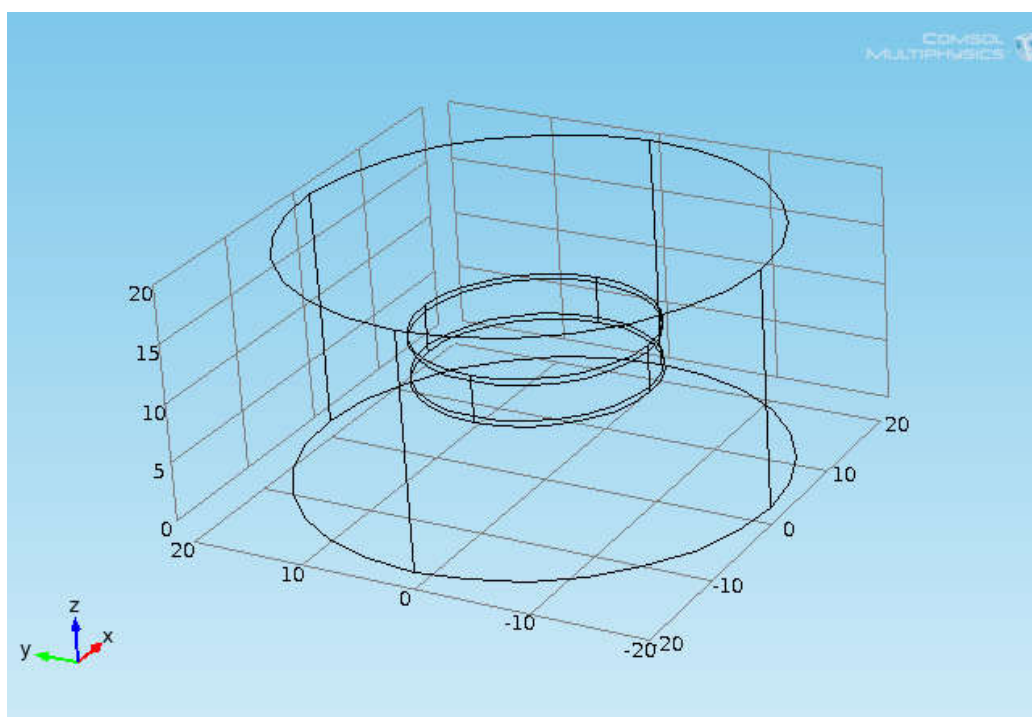


Рисунок 10 – Геометрия модели пленки

Объединим указанные выше области в модели. Обозначим верхнюю пластину *terminal boundary* (рисунок 11), нижнюю заземленную пластину – *ground boundary* (рисунок 12). Диэлектрик назовем – *model*.

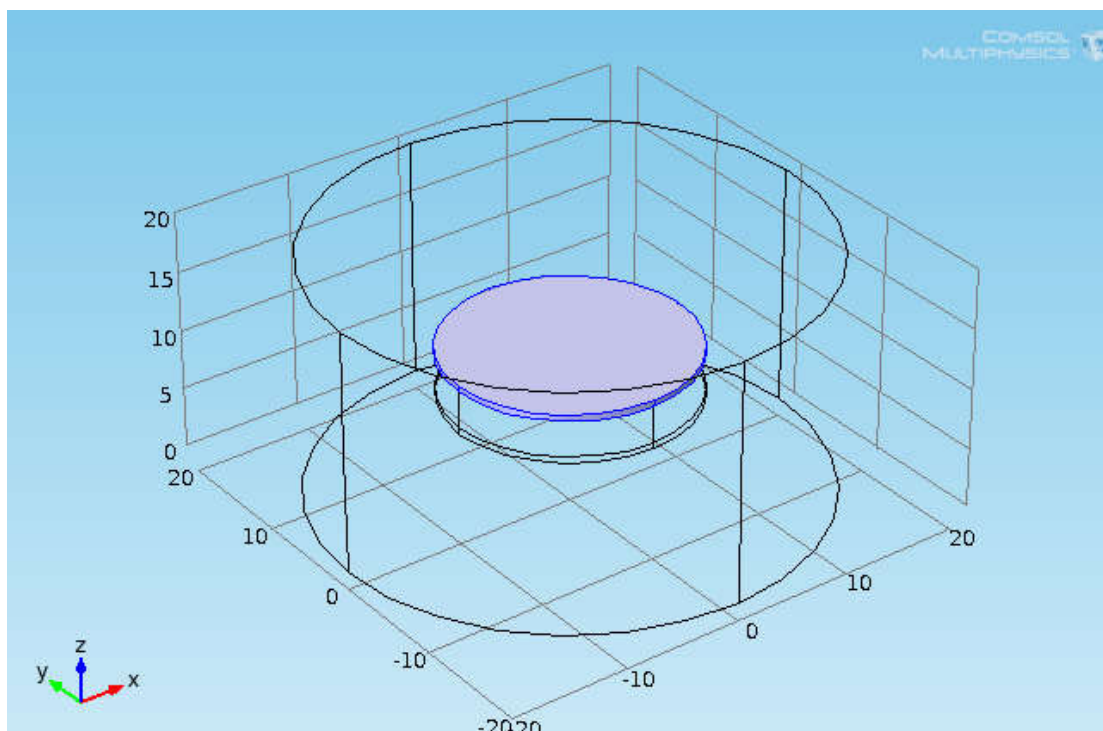


Рисунок 11 – Верхняя часть области – terminal boundary

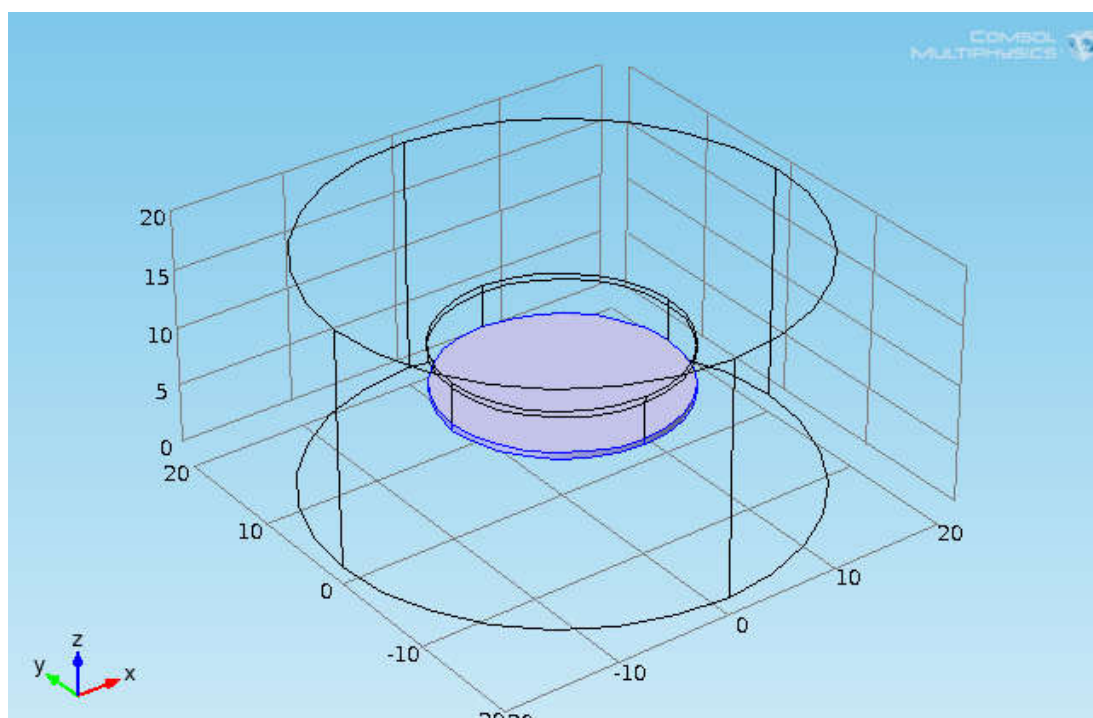


Рисунок 12 – Заземленная часть области – ground boundary

Зададим материал модели. Для этого заходим в раздел Materials и выбираем соответствующие материалы. Диэлектрик, то есть малый цилиндр, состо-

ит из материала Каптон, а область вокруг диэлектрика, большой цилиндр – воздух.

Задав исследуемую область, объект и материал модели требуется создать сетку используя раздел Mesh (рисунок 13).

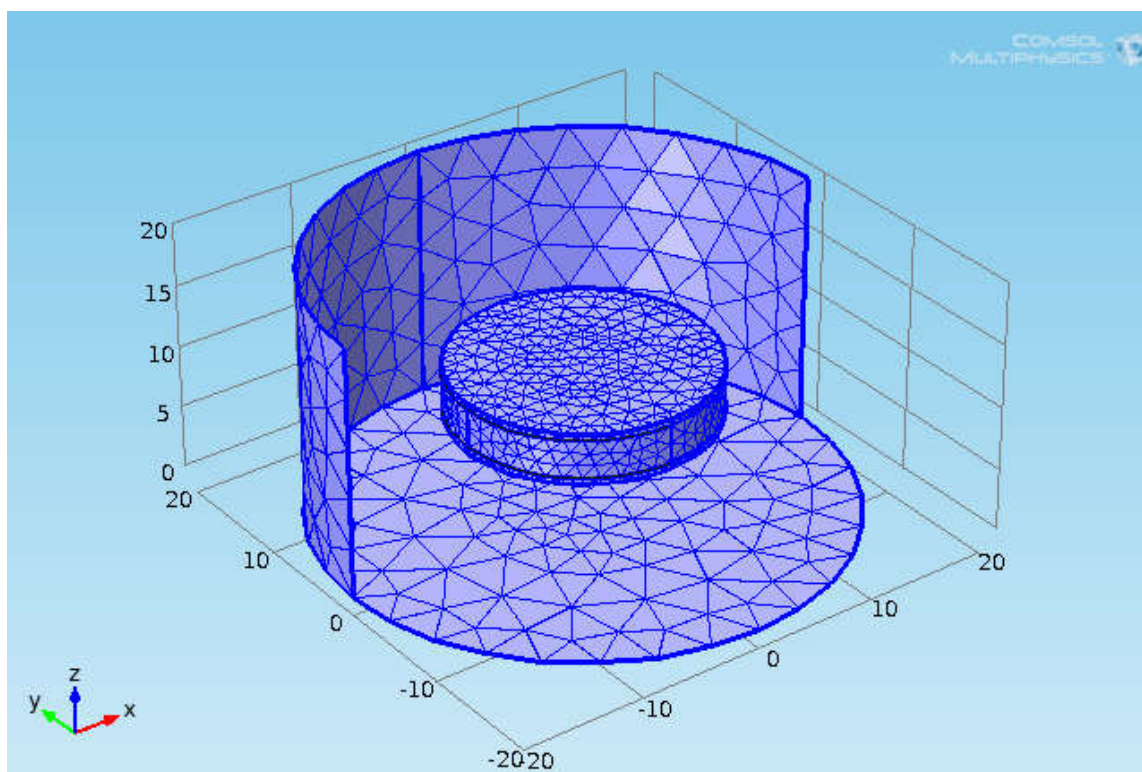


Рисунок 13– Задание сетки модели

Результатом моделирования в пакете прикладных программ COMSOL MultiPhysics электризации полимерной пленки при стационарном ее зарядении потоком электронов космической плазмы является распределение характеристик внутреннего электрического поля.

На рисунке 14 отображено распределение линий напряженности внутреннего электрического поля в виде нормированных векторов E .

Из полученных результатов моделирования видно, что линии напряженности внутреннего электрического поля по всей поверхности пленки распределены нормально, то есть внутреннее электрическое поле в пленке однородно.

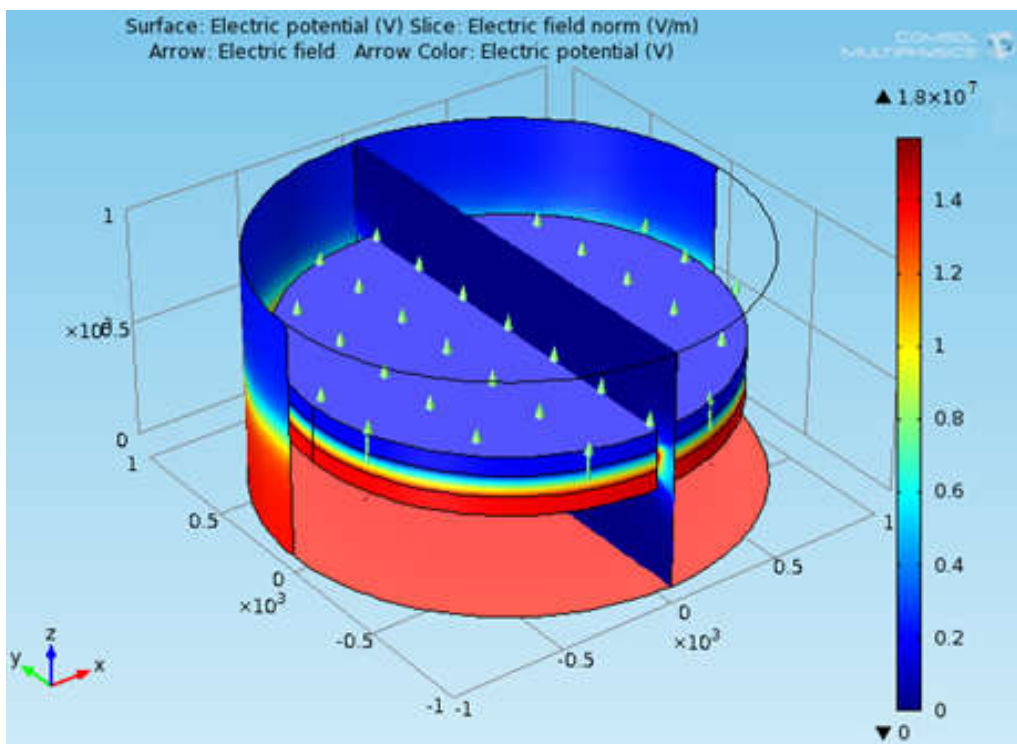


Рисунок 14 – Распределение линий напряженности внутреннего электрического поля в пленке

На рисунке 15 представлено распределение потенциала электрического поля в поперечном сечении пленки.

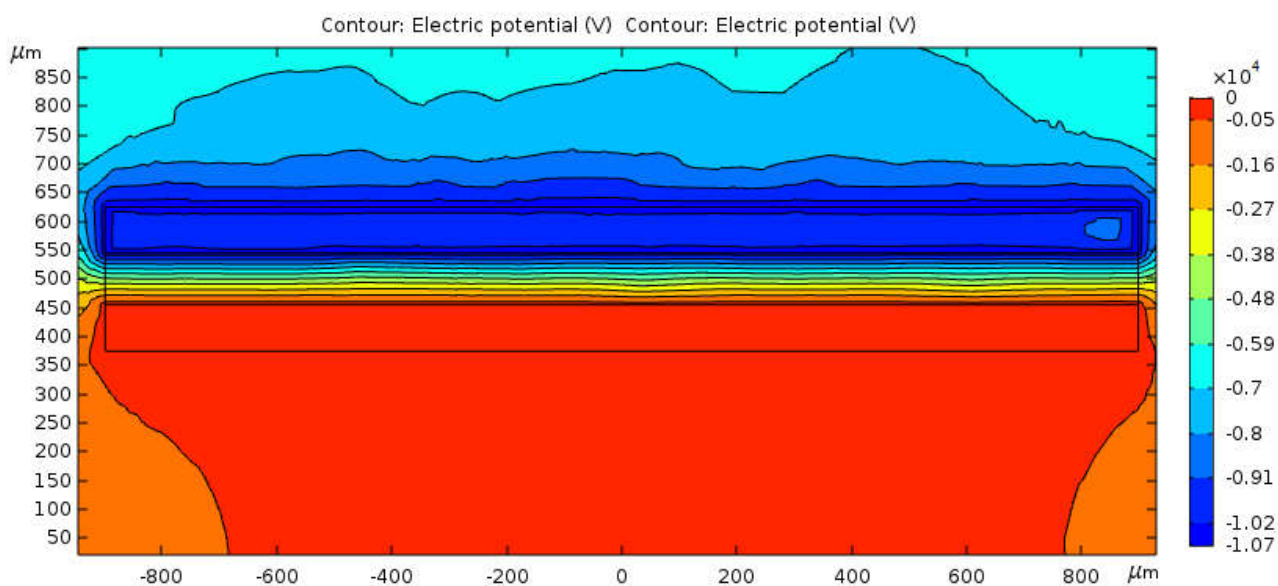


Рисунок 15 – Распределение потенциала электрического поля в поперечном сечении пленки

Также однородность внутреннего электрического поля в пленке при ее электризации подтверждает распределение потенциала электрического поля в поперечном сечении пленки. Эквипотенциальные линии поля внутри пленки параллельны друг другу

При моделировании процесса электризации пленки Картон полученное значение напряженности внутреннего электрического поля, при котором происходит пробой пленки, имеет значение $E_{пр} = 1,8 \cdot 10^7$ В/м. Экспериментальное значение пробивного напряжения для пленки Картон согласно работе [13] составляет $2 \cdot 10^7$ В/м.

3.2 Уравнение определяющие напряженность электрического поля в перфорированной пленке Картон при ее электризации

Рассмотрим задачу, по определению характеристики поля в полимерной пленке Картон, не содержащей отверстий, при ее электризации в результате электронного облучения (рисунок 16).

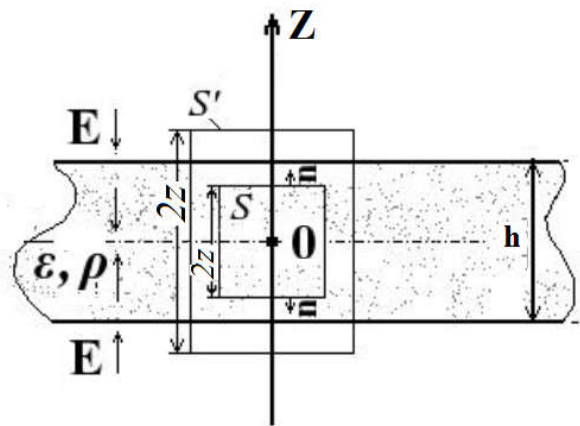


Рисунок 16 – Диэлектрическая плёнка толщиной h , заряженная сторонним зарядом с объемной плотностью заряда ρ

Для решения задачи воспользуемся теоремой Гаусса для вектора D :

$$\oint_S \vec{D} \cdot d\vec{S} = \int_V \rho \cdot dV = q, \quad (10)$$

где D – вектор электрического смещения;

ρ – объемная плотность электрического заряда, накапливающегося в приповерхностном слое полимерной пленке;

q – электрический заряд, образованный в пленке в результате бомбардировки электронами.

Используя данную формулу можно определить выражение для вектора D в пределах слоя толщиной h и за его пределами. Изотропность диэлектрика позволяет найти модуль напряженности электрического поля внутри пластины с помощью формулы связи между векторами D и E , а потенциал поля с использованием формулы взаимосвязи между вектором E и потенциалом φ .

Таким образом, характеристики поля внутри полимерной пленки толщиной h равномерно заряженной сторонним зарядом за счет облучения постоянный во времени потоком электронов, определяется выражениями:

– внутри пленки:

$$E = \frac{\rho z}{\varepsilon \varepsilon_0}, \quad (11)$$

$$\varphi = \int E dz = \frac{\rho}{\varepsilon \varepsilon_0} \int z dz = \frac{\rho z^2}{2 \varepsilon \varepsilon_0}, \quad (12)$$

– снаружи:

$$E = \frac{\rho h}{2 \varepsilon \varepsilon_0}, \quad (13)$$

$$\varphi = \int E dh = \frac{\rho}{2 \varepsilon \varepsilon_0} \int dh = \frac{\rho h}{2 \varepsilon \varepsilon_0}. \quad (14)$$

Так как считается, что объемный заряд равномерно распределен по всему слою h пленки, то достижение напряженности поля максимального значения (т.е. возникновение пробоя пленки) равновероятно для любой точки пленки.

Приняв аналогичные допущения что и для рассматриваемой выше задачи, определим характеристики поля в полимерной пленке Karton, содержащей отверстия, при ее электризации в результате электронного облучения.

Поле, создаваемое плоскостью с отверстиями будем рассматривать как суперпозицию двух полей: поля пленки толщиной h без отверстий, заряженной с объемной плотностью заряда $\rho < 0$, и поля цилиндра радиуса R , заполняющего отверстие и заряженного объемной плотностью заряда $\rho > 0$.

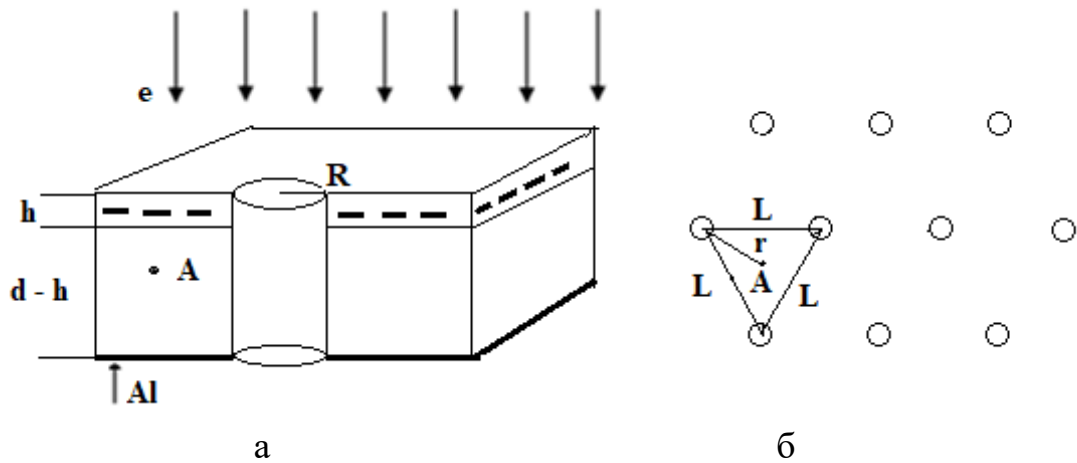
Заряд плёнки индуцирует на металлизированной алюминии поверхности заряды противоположного знака с поверхностной плотностью заряда σ , определяемой по формуле:

$$\sigma = \rho \cdot h . \quad (15)$$

В результате, напряженность электрического поля между слоем объемного заряда и подложкой максимальна и равна:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon\varepsilon_0} = \frac{\rho h}{\varepsilon\varepsilon_0}. \quad (16)$$

При наличии сквозного отверстия в плёнке, полный заряд, расположенный в слое h пленки уменьшается, а положительный заряд на металлизированной поверхности распределяется неравномерно по поверхности, что приводит к ослаблению электрического поля внутри пленки вблизи отверстия. Таким образом, при электризации перфорированной пленки, вероятность электрического пробоя высока в местах, максимально удаленных от отверстий, то есть. на расстоянии r отверстия – точка А (рисунок 17, б).



а) вид сбоку; б) вид сверху

Рисунок 17 – Диэлектрическая пленка с отверстиями

Для того, чтобы определить величину ослабления напряженности электрического поля ΔE в точке А равноудаленной от отверстия необходимо, сначала определить напряженность E_1 электрического поля в этой точке, которое создавало бы одно отверстие. При этом отверстие рассматриваем как цилиндр радиуса R, заряженный объемной плотностью заряда $\rho > 0$. Заряд этого цилиндра индуцирует на поверхности проводящей подложки неравномерно распределенный заряд. Согласно методу изображений для электрического поля, напряженность E_1 результирующего поля такой системы можно найти как поле диполя. При условии, что размеры отверстия R малы по сравнению с расстоянием r до точки А ($R \ll r$), заряды +q и - q можно считать точечными. Тогда напряженность электрического поля диполя в точке А равна:

$$E_1 = \frac{p}{4\pi\epsilon\epsilon_0 r^3}, \quad (17)$$

где p – дипольный момент, определяемый по формуле:

$$p = q \cdot l = q \cdot 2\left(d - \frac{h}{2}\right). \quad (18)$$

Заряд цилиндра, вырезаемого из пленки определяется как (рисунок 17, а):

$$q = \rho V = \rho h \pi R^2 . \quad (29)$$

Подставляя формулы (17) и (18) в (16), получим окончательное выражение для напряженности электрического поля диполя в точке А:

$$E_1 = \frac{2\pi\rho h R^2 (d - \frac{h}{2})}{4\pi\epsilon\epsilon_0 r^3} = \frac{\rho h}{\epsilon\epsilon_0} \cdot \frac{R^2 (d - \frac{h}{2})}{2r^3} . \quad (20)$$

Величину ослабления напряженности электрического поля ΔE в точке А определим по принципу суперпозиции как разницу между полем E пленки толщиной h без отверстий и полем E_1 в этой же точке А пленки с отверстием:

$$\Delta E = E - E_1 . \quad (21)$$

Стоит отметить, что при $r \gg R$ вектор напряженности E_1 направлен строго вертикально.

Теперь рассмотрим перфорированную пленку с отверстиями, расположенными на одинаковом расстоянии L и с центрами в вершинах правильных n -угольников (рисунок 17, б). Расстояние r от центров отверстий до точки А в общем виде, есть радиус окружности, описанной вокруг n -угольника:

$$r = \frac{L}{2\sin(\frac{180^\circ}{n})} , \quad (22)$$

где L – расстояние между центрами отверстий в вершинах правильных n -угольников.

Напряженность электрического поля в точке А пленки с отверстиями:

$$E_1 = \frac{8 \sin^3\left(\frac{180^\circ}{n}\right) R^2 \left(d - \frac{h}{2}\right)}{2L^3}. \quad (23)$$

Если учесть, что площадь вырезанного отверстия равна:

$$S_{\text{отв}} = \pi \cdot R^2, \quad (24)$$

а часть общей площади пленки, приходящейся на одно отверстие определяется как:

$$S = \frac{nL^2}{2(n-2)} \cdot \operatorname{ctg} \frac{180^\circ}{n}. \quad (25)$$

Тогда выражение для напряженности электрического поля в точке А пленки с отверстиями имеет вид:

$$E_1 = \frac{S_{\text{отв}}}{S} \frac{4 \sin^2\left(\frac{180^\circ}{n}\right) \cos\left(\frac{180^\circ}{n}\right) n^2 \left(d - \frac{h}{2}\right)}{2L\pi(n-2)n}. \quad (26)$$

Введем безразмерный коэффициент α :

$$\alpha = \frac{4n^2 \sin^2\left(\frac{180^\circ}{n}\right) \cos\left(\frac{180^\circ}{n}\right)}{2\pi(n-2)}. \quad (27)$$

Окончательно напряженность электрического поля в точке А в пленке с отверстиями примет вид:

$$E_1 = \alpha \frac{S_{\text{отв}}}{S} \frac{\left(d - \frac{h}{2}\right)}{Ln}, \quad (28)$$

где $\frac{S_{\text{отв}}}{S}$ – доля площади, потерянная пленкой при перфорации.

Из выше сказанного можно сделать вывод, что параметрами перфорации, влияющими на напряженность внутреннего электрического поля в перфорированной пленке Kapton, являются радиус отверстия, расстояние L между их центрами и их количество на единицу площади пленки.

3.3 Численное моделирование процесса электризации перфорированной полимерной пленки Kapton в COMSOL MultiPhysics

В программе COMSOL MultiPhysics проводилось численное моделирование характеристик электрического поля в полимерной пленке Kapton при ее электризации в зависимости от количества цилиндрических и конических отверстий в пленке и их диаметра.

Согласно модели, представленной в работе [13], упрощенную модель электризации диэлектрической пленки представим, как заряджение пленки, расположенной между пластинами конденсатора. В качестве нижнего заземленного металлического электрода будет рассматриваться нижняя поверхность пленки. В качестве верхнего электрода конденсатора – часть пленки толщиной h , на которую воздействует постоянный во времени поток электронов.

Максимальное значение стороннего электрического заряда, попадающего в пленку в результате бомбардировки электронами, определим по выше представленной формуле (4) через параметры электронного пучка и пленки установленные в работах [8, 13].

Проведем геометрическое моделирование расчетной области. Строим первую область в форме цилиндра высотой 1000 мкм и радиусом 1000 мкм – объем пространства, в котором будут происходить все физические процессы. Далее строим вторую область – цилиндр высотой 250 мкм и радиусом 900 мкм, который представляет собой моделируемую пленку. В малом цилиндре задаем третью область (представляющей собой отверстие в пленке) – часть второй в форме цилиндра высотой 250 мкм и радиусом 50 мкм. Геометрия полученной модели представлена на рисунке 18.

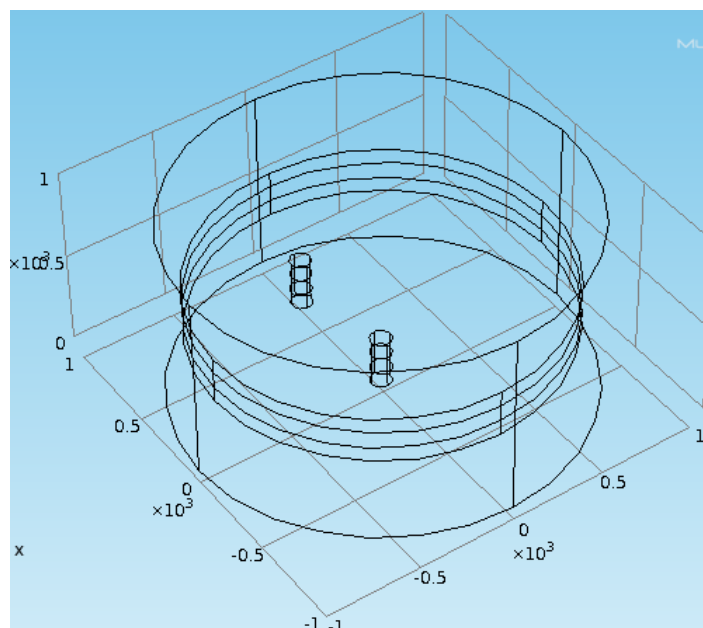


Рисунок 18 – Геометрическое построение модели

Объединим указанные выше области в модели. Обозначим верхнюю пластину *terminal boundary*, нижнюю заземленную пластину – *ground boundary* (рисунок 19). Диэлектрик назовем – *model*.

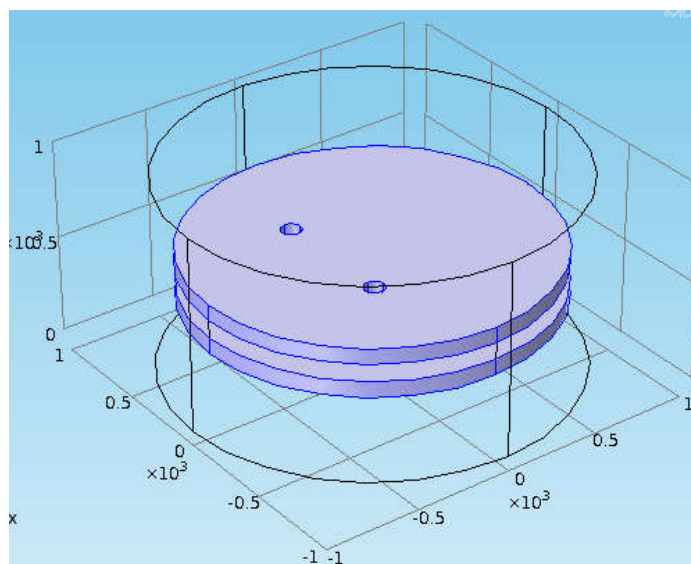


Рисунок 19 – Верхняя часть (*terminal boundary*) и заземленная часть второй области (*ground boundary*) второй области

Проведено геометрическое моделирование расчетной области других моделей пленки, содержащих три и четыре отверстия, центры которых располо-

жены на одинаковом расстоянии L . При этом для моделей с определенным количеством отверстий, создавались дополнительные модели в которых менялся диаметр отверстия от 100 до 200 мкм, а также форма самого отверстия (цилиндр на конус).

Материал модели задавали в разделе Materials. Диэлектрик, то есть вторая область, состоит из материала Kapton, а область вокруг диэлектрика, большой цилиндр – воздух. Задав исследуемую область, объект и материал модели требуется создать сетку используя раздел Mesh. Расчетная сетка используется для дискретизации модели при расчетах методом конечных элементов.

Результаты моделирования процесса электризации полимерной пленки, содержащей разное количество одинаковых отверстий в пакете прикладных программ COMSOL MultiPhysics представлен на рисунках 20 и 21.

На рисунках 20 и 20.1 отображено распределение линий электрического поля в виде нормированных векторов (на рисунках 20 и 20.1 стрелки зеленого цвета), указывающих направление вектора напряженности E электрического поля и распределение потенциала электрического поля в поперечном сечении диэлектрика (плоскость).

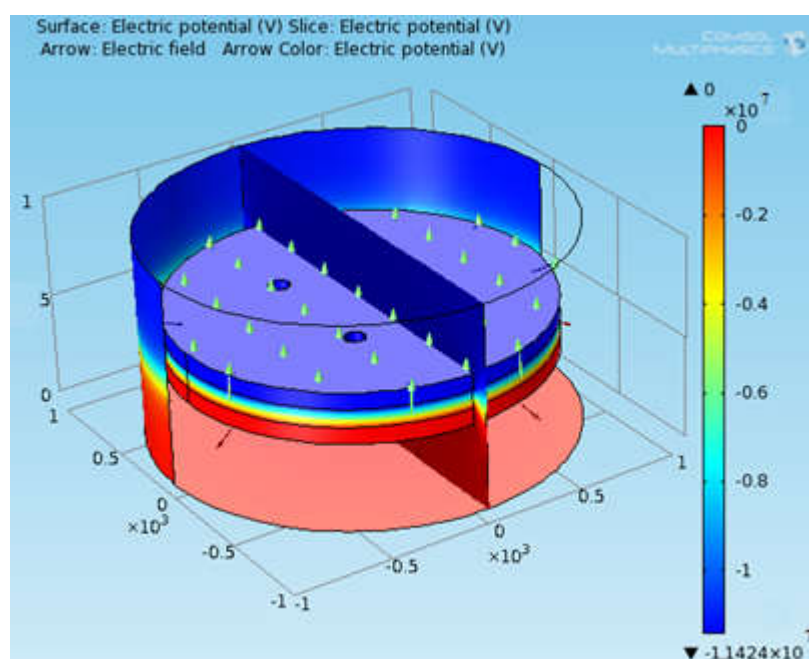


Рисунок 20 – Модель электризации полимерной пленки Kapton, содержащей два цилиндрических отверстия

На рисунке 20.1 представлен фрагмент модели электризации полимерной перфорированной пленки.

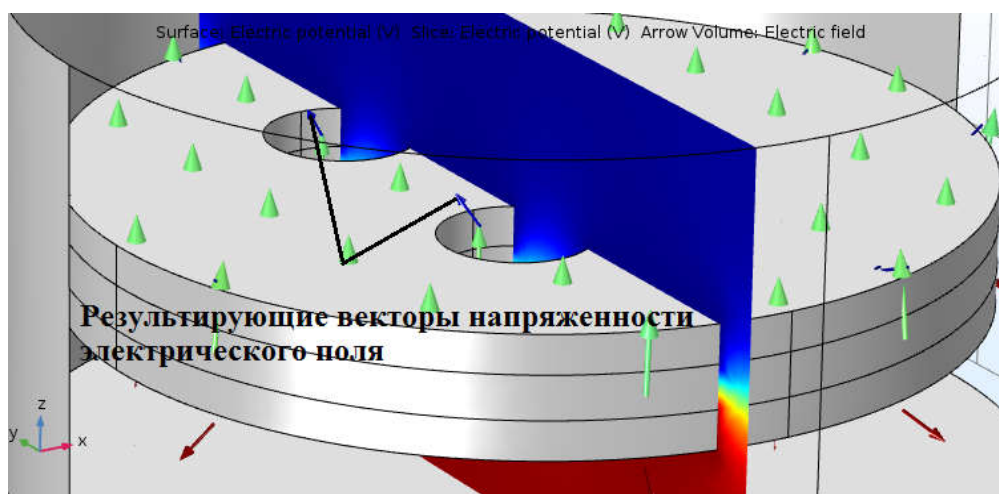


Рисунок 20.1 – Фрагмент модели электризации полимерной пленки с двумя цилиндрическими отверстиями

На рисунке 20 видно, что силовые линии внутреннего электрического поля вдали от отверстий распределены нормально, как в пленке без отверстий. Наличие отверстий приводит к неоднородному распределению электрического поля внутри пленки. Результирующее внутреннее электрическое поле в перфорированной пленке определяется по принципу суперпозиции: поля пленки без отверстий, заряженной с объемной плотностью заряда $\rho < 0$ и поля отверстия, заряженного объемной плотностью заряда $\rho > 0$, направленное радиально. На увеличенном фрагменте вектор напряженности результирующего внутреннего электрического поля показан в виде вектора отклоненного от нормали (синие стрелки).

На рисунке 20.2 представлен фрагмент поперечного разреза перфорированной пленки, демонстрирующий распределение эквипотенциальных линий внутреннего электрического поля в пленке.

Из рисунка видно, что эквипотенциальные линии поля внутри пленки параллельны друг другу вдали от отверстия и это сохраняется вплоть до самой границы с отверстием.

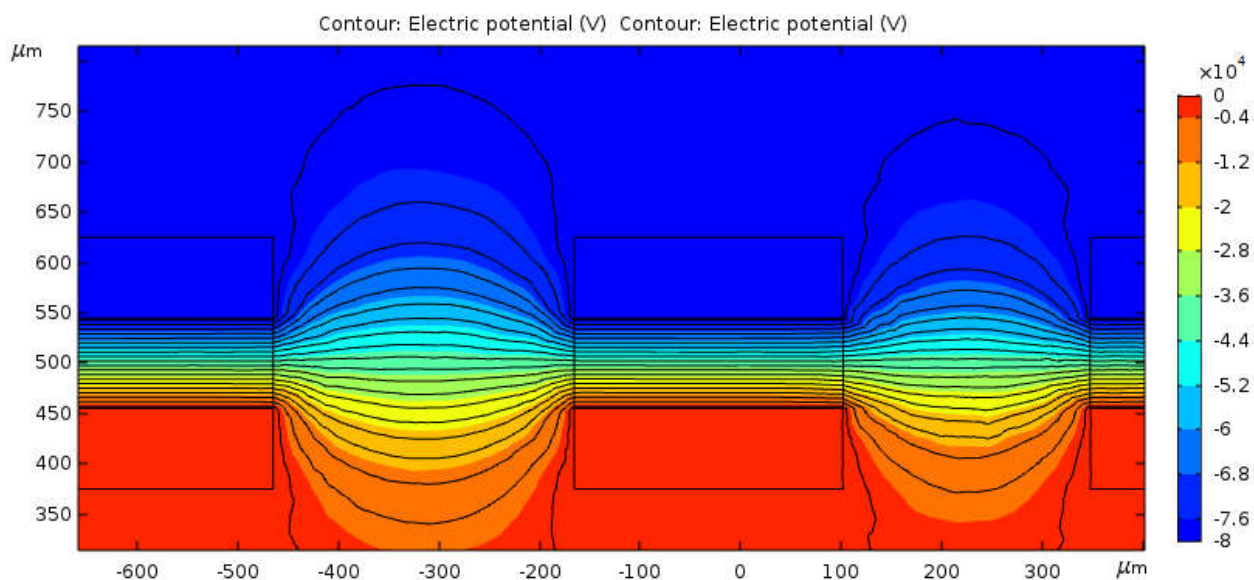


Рисунок 20.2 – Распределение эквипотенциальных линий электрического поля в поперечном сечении пленки с цилиндрическими отверстиями

В самом отверстии наблюдается искажение эквипотенциальных линий электрического поля, то есть на границе раздела двух сред диэлектрик-воздух, эквипотенциальные линии электрического поля перестают быть параллельными.

На рисунке 21 представлен фрагмент модели электризации полимерной пленки с двумя коническими отверстиями.

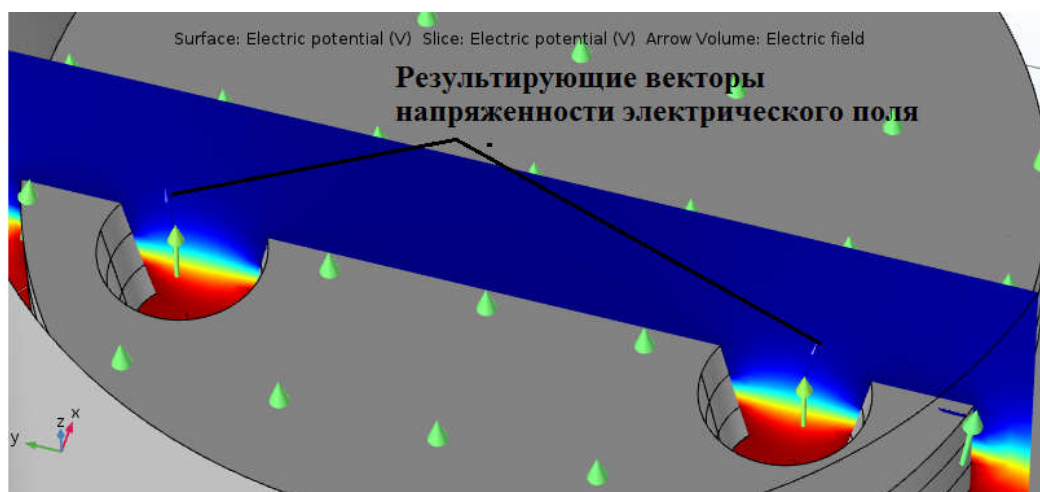


Рисунок 21 – Фрагмент модели электризации полимерной пленки с двумя коническими отверстиями

Вектор напряженности результирующего внутреннего электрического поля, показанный в виде вектора отклоненного от нормали (синие стрелки), отклонен от нормали, также, как и в модели электризации полимерной пленки с цилиндрическими отверстиями

На рисунке 21.1 представлен фрагмент поперечного разреза перфорированной пленки с коническими отверстиями, демонстрирующий распределение эквипотенциальных линий внутреннего электрического поля в пленке и в отверстии.

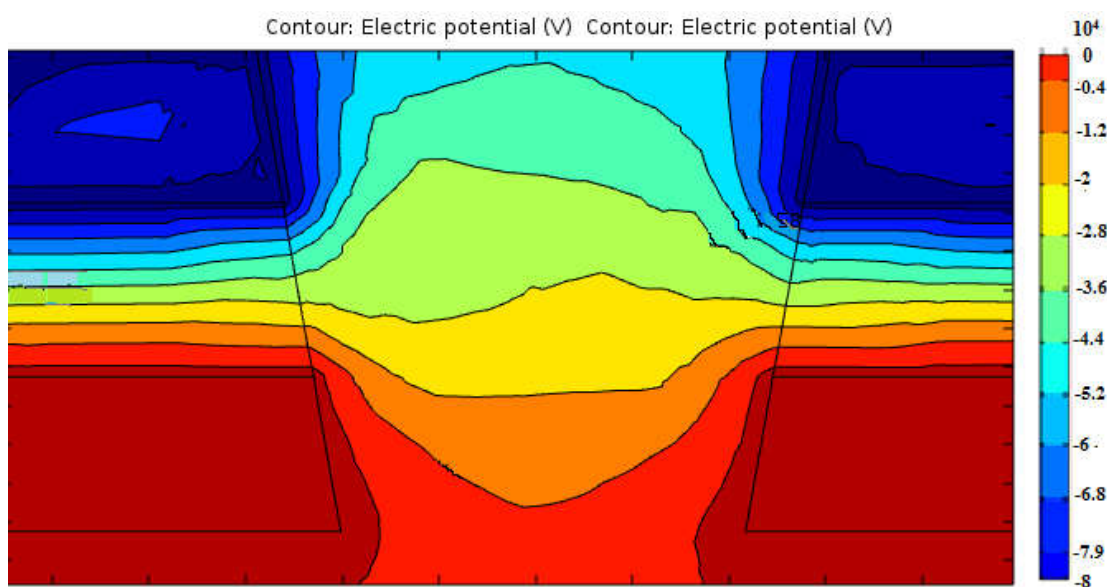
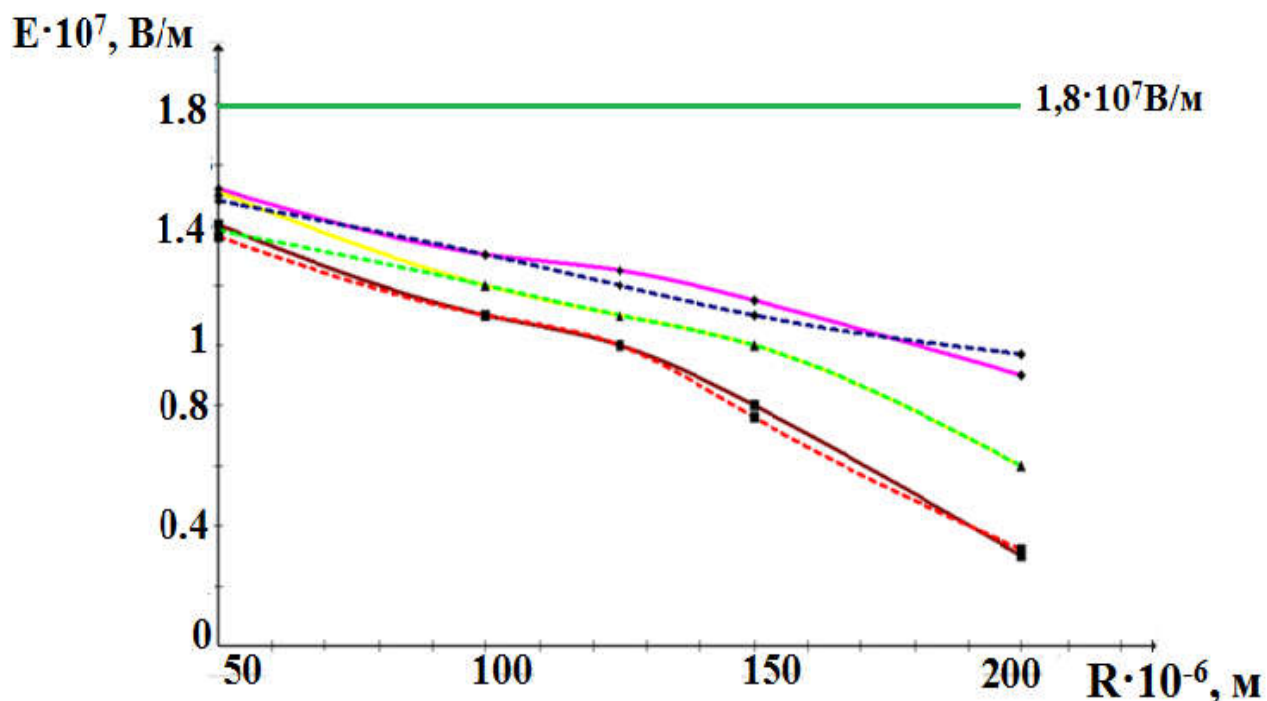


Рисунок 21.1 – Распределение эквипотенциальных линий электрического поля в поперечном сечении пленки с коническими отверстиями

Из рисунка видно, что эквипотенциальные линии поля внутри пленки параллельны друг другу вдали от отверстия, т.е. сохраняется однородность внутреннего электрического поля. Приближаясь к границе отверстия наблюдается несильное отклонение от параллельности эквипотенциальных линий поля, т.е. внутреннее электрическое поле становится неоднородным. В самом отверстии происходит сильное искривление эквипотенциальных линии, что свидетельствует о возрастании неоднородности поля. Таким образом, на однородность внутреннего электрического поля прежде всего влияет наличие самого отверс-

тия в пленке, а также его форма (коническая или цилиндрическая).

На основе данных моделирования построены графики зависимости напряженности внутреннего электрического поля, возникающего в перфорированной пленке Kapton в процессе ее заряжения, от радиуса отверстий R и для отверстий разной формы (рисунок 22).



◆ – пленка с двумя отверстиями; ▲ – пленка с тремя отверстиями; ■ – пленка с четырьмя отверстиями

Рисунок 22 – График зависимости напряженности внутреннего электрического поля перфорированной полимерной пленки от радиуса отверстий

На рисунке 22 сплошные линии соответствуют зависимости напряженности внутреннего электрического поля пленки с цилиндрическими отверстиями от радиуса отверстий. Пунктирные линии – зависимости напряженности внутреннего электрического поля пленки с коническими отверстиями от радиуса отверстий. Из зависимости $E(R)$ видно, что максимальное значение напряженности, соответствующее минимальному радиусу отверстий, не превышает пробойного значения. На это максимальное значение не сильно влияют другие па-

раметры перфорации такие как форма и количество отверстий на единицу площади плёнки.

С увеличением радиуса отверстий и их количества напряженность внутреннего электрического поля в пленке Kapton при ее электризации уменьшается. При этом изменение формы отверстий никак не сказывается на напряженности электрического поля.

Отношение внутреннего электрического поля в перфорированной полимерной пленке E_1 к пробойному значению напряженности E_{np} показывает величину ослабления напряженности за счет перфорации пленки. Для перфорированной пленки содержащей три и четыре отверстия цилиндрической формы проведен расчет ослабления напряженности внутреннего электрического поля E_1/E_{np} по результатам моделирования и ослабление напряженности внутреннего электрического поля E_1/E_{np} в пленке, где поле E_1 рассчитано по формуле (4). Результаты расчета представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Коэффициент ослабления напряженности внутреннего электрического поля в перфорированной цилиндрическими отверстиями пленке

Коэффициент ослабления напряженности внутреннего электрического поля	Радиус отверстия R, мкм при количестве отверстий n=3			
	50	100	150	200
$\left(\frac{E_1}{E}\right)_{\text{расчет.}}$	0,68	0,63	0,61	0,25
$\left(\frac{E_1}{E}\right)_{\text{модель}}$	0,73	0,65	0,51	0,32

Из сравнения значений ослабления напряженности внутреннего электрического поля полученных по результатам моделирования $\left(\frac{E_1}{E}\right)_{\text{модель}}$ и результатам расчета $\left(\frac{E_1}{E}\right)_{\text{расчет.}}$ видно, что наименьшее расхождение ослабления поля наблюдается при количестве отверстий приходящихся на единицу пленки равны трем с радиусами 100 мкм.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Особое место при проектировании защиты от факторов космического пространства занимает проблема возникновения электризации диэлектрических покрытий КА. Один из методов, позволяющих улучшить стекание объемного заряда через пленку на металлизированную поверхность пленки, является перфорация полимерной пленки сквозными отверстиями.

На основе полученных результатов моделирования в программе COMSOL MultiPhysics процесса электризации пленки Kapton можно сделать следующие выводы:

1) значение напряженности внутреннего электрического поля, полученное при моделировании, хорошо согласуется с экспериментальным значением напряженности, при котором происходит пробой в пленке;

2) на основании полученного уравнения установлено, что параметрами перфорации, влияющими на ослабление напряженности внутреннего электрического поля в перфорированной пленке Kapton при ее электризации, являются радиус отверстия и количество отверстий;

3) выявлено, что на однородность внутреннего электрического поля влияет наличие отверстий в пленке, а также их форма.

4) установлено, что с увеличением радиуса отверстий и их количества, напряженность внутреннего электрического поля уменьшается.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- 1 Electronics.ru:[Электронный ресурс]. – 2002. – Режим доступа: <http://www.electronics.ru/journal/article/1301>. – 06.04.18
- 2 Новиков, Л. С. Радиационные воздействия на материалы космических аппаратов / Л. С. Новиков. – 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
- 3 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
- 4 Танасиенко, Ф.В. Экспериментальное определение термического сопротивления образцов экранно-вакуумной изоляции / Ф.В. Танасиенко, А.А. Рудько, В.В. Басынин и др // Решетниковские чтения. – 2013. – 2(34). – С.100 – 102. Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/v/eksperimentalnoe-opredelenie-termicheskogo-soprotivleniya-obraztsov-ekranno-vakuumnoizolyatsii>. – 10.05.2018
- 5 Kosmos – inform.ru: [Электронный ресурс]. – 2014. – Режим доступа: <http://www.kosmos-inform.ru/eeuyu/ekranno-vakuumnaya-teploizolyaciya.html>. – 25.03.18
- 6 Bookini.ru: [Электронный ресурс]. – 2014. – Режим доступа: <https://bookini.ru/ekranno-vakuumnaya-teploizolyatsiya-i-opredelenie-eyo-harakteristik/5/>. – 29.04.18
- 7 Тютнев, А. П. Исследование радиационной проводимости диэлектриков / А. П. Тютнев, В. С. Саенко. –М.: «Книжный дом Университет». – 2007. – С.377-394.Режим доступа: <https://www.hse.ru/data/2015/09/28/1097652847/%D0%A0%D0%9F%20%D0%9D%D0%98%D0%A0%20%D0%9A%D0%9C%D0%A2%D0%A2%2015.pdf>. – 09.06.2018

8 Пашенцев, В.Н. Модель заряда тонких полимерных пленок пучком электронов с энергией 80 кэВ / В. Н. Пашенцев // Труды МАИ. – 2012. – № 53. – 14 с. Режим доступа: <https://mai.ru/upload/iblock/a4c/model-zaryada-tonkikh-polimernykh-plenok-puchkom-elektronov-s-energiey-80-kev.pdf>. – 16.05.18

9 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://sozдание-perspektivnyh-temoreguliruyuschih-pokrytiy-kosmicheskikh-apparatov.pdf.html>. – 01.06.2018

10 Helpiks.org: [Электронный ресурс]. – 2014. – Режим доступа: <http://helpiks.org/4-82543.html>. – 17.01.18

11 Акишин, А. И. Объемная электризация диэлектрических материалов космических аппаратов: моногр. / А. И. Акишин. – М.: «Книжный дом Университет». – 2007. – С.315-342. – Режим доступа: <http://epizodyspace.ru/bibl/znan/1985/3/3-elektrol-ka.html>. – 09.04.2018

12 Shu T.L., A critical overview on spacecraft charging mitigation methods./ T.L. Shu. – IEEE Trans.On plasma science, V31, N6. – 2003. С.1118–1124. Режим доступа: <http://ab-abp-rlc.web.cern.ch/ab-abp-rlc-ecloud/Related%20Papers/2006%20Lai%20Tautz%20IEEE.pdf>. – 17.02.18

13 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-protssessov-radiatsionnoy-elektrizatsii-nanoprovodyaschih-dielektrikov-kosmicheskikh-apparatov>. – 18.05.18

14 Стародубцев, В. А. Радиационная электризация диэлектрических материалов / В. А. Стародубцев // Известия Томского политехнического университета. – 2000. – № 303(3). – С. 22-31. – Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/radiatsionnaya-elektrizatsiya-dielektricheskikh-materialov>. – 14.05.2018

15 Chem21.info [Электронный ресурс]. 2017. – Режим доступа: <http://chem21.info/page/229150023127189185241092211049236144170047088015/>. – 05.01.18

16 Eximpack.ru: [Электронный ресурс]. 2017 .–Режим доступа: http://www.eximpack.com/oborudovanie/bobinorezatelnoeoborudovanie/plenka_micr operforacia/. – 19.04.18

17 Findpatent.ru: [Электронный ресурс].2014. – Режим доступа:<http://www.findpatent.ru/patent/241/2416499.html>. – 13.06.18

18 Wikipedia.org: [Электронный ресурс].2014. – Режим доступа: <https://en.wikipedia.org/wiki/Каптон>. – 04.01.18

19 Chem21.info: [Электронный ресурс].2014. –Режим доступа: <http://chem21.info/page/164207061047184015225154214195173088101111127147/>. – 13.03.18

20 Егоров, В.И. Применение ЭВМ для решения задач теплопроводности. Учебное пособие. – СПб: СПб ГУ ИТМО, 2006. – 77 с. Режим доступа: <http://window.edu.ru/catalog/pdf2txt/835/27835/11008>. – 14.02.18

21 Comsol.ru: [Электронный ресурс].2014.–Режим доступа: www.comsol.ru/support/knowledgebase/. – 14.02.18