

А.Н. Евдокимов

**ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОЕ
И КОНСТРУКЦИОННОЕ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ**

ЗАДАЧНИК

**Санкт-Петербург
2020**

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ

**«САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ПРОМЫШЛЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ И ДИЗАЙНА»**

ВЫСШАЯ ШКОЛА ТЕХНОЛОГИИ И ЭНЕРГЕТИКИ

А.Н. Евдокимов

**ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОЕ
И КОНСТРУКЦИОННОЕ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ**

Задачник

**Санкт-Петербург
2020**

УДК 621.315
ББК 31.23
Е 155

Евдокимов А.Н. Электротехническое и конструкционное материаловедение: задачник / ВШТЭ СПбГУПТД. СПб., 2020. - 70 с.

Сборник содержит задания по разделам: «Диэлектрическая проницаемость. Диэлектрики»; «Электропроводность. Проводниковые и изоляционные материалы»; «Потери в проводниках»; «Магнитные материалы и их свойства»; «Диэлектрические потери»; «Электрическая прочность диэлектриков».

Предназначен для выполнения практических заданий по курсу «Электротехническое и конструкционное материаловедение» студентами, обучающимися по очной и заочной формам по направлению 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника».

Рецензент: канд. техн. наук, доцент кафедры автоматического электропривода и электротехники ВШТЭ СПбГУПТД Е.В. Хардигов.

Подготовлен кафедрой материаловедения и технологии машиностроения ВШТЭ СПбГУПТД (протокол № 1 от 31.08.2020 г.).

Рекомендован методической комиссией института технологии ВШТЭ СПбГУПТД (протокол № 2 от 28.09.2020 г.).

Рекомендован к изданию Редакционно-издательским советом ВШТЭ СПбГУПТД в качестве задачника.

© Высшая школа технологии и энергетики
Санкт-Петербургского государственного
университета промышленных технологий
и дизайна, 2020
© Евдокимов А.Н., 2020

Оглавление

Введение.....	4
1. Диэлектрическая проницаемость. Диэлектрики.....	5
1.1. Теоретическая часть.....	5
1.2. Задания для самостоятельного выполнения.....	8
2. Электропроводность. Проводниковые и изоляционные материалы.....	18
2.1. Теоретическая часть	18
2.2. Задания для самостоятельного выполнения	20
3. Потери в проводниках.....	28
3.1. Теоретическая часть.....	28
3.2. Задания для самостоятельного выполнения.....	29
4. Магнитные материалы и их свойства.....	38
4.1. Теоретическая часть.....	38
4.2. Задания для самостоятельного выполнения.....	40
5. Диэлектрические потери.....	48
5.1. Теоретическая часть.....	48
5.2. Задания для самостоятельного выполнения.....	49
6. Электрическая прочность диэлектриков.....	58
6.1. Теоретическая часть.....	58
6.2. Задания для самостоятельного выполнения.....	62
Библиографический список	70

Введение

Задачник предназначен для практического закрепления лекционного материала по дисциплине «Электротехническое и конструкционное материаловедение». Этот курс является одним из важнейших в программе подготовки студентов-бакалавров, обучающихся по направлению 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника».

Каждое задание в темах 1-5 состоит из двух частей. В первой части студент должен кратко описать, прежде всего, свойства заданного электротехнического материала и на их основе осуществить необходимый расчет (вторая часть задания). Для выполнения заданий студент может использовать справочные данные о материалах из изданий, приведенных в библиографическом списке в конце задачника, либо сведения из сети Internet. В любом случае студент обязан указать источники информации, которыми он воспользовался при решении заданий.

Выбор конкретных тем для выполнения заданий определяет преподаватель. Для каждой темы представлено 60 заданий. Номер своего варианта студент определяет по номеру в списке своей учебной группы (этот номер сообщается преподавателем на установочной лекции или в дальнейшем уточняется у старосты группы). Если количество студентов в учебной группе более 60, то номер варианта для тех, которые находятся в списке под номерами 61 и далее, начинается снова с первого и т. д.

1. Диэлектрическая проницаемость. Диэлектрики

1.1. Теоретическая часть

Диэлектрическая проницаемость как параметр материала характеризует поведение в электрическом поле зарядов вещества, связанных в атомы, молекулы, кристаллы (не свободных). При воздействии на материал внешнего электрического поля с напряжённостью $E_{пустоты}$, имеющего плотность потока электрического смещения

$$D_{внешн} = \varepsilon_0 E_{пустоты},$$

в нем происходит поляризация (смещение r связанных зарядов, q в соответствии с их знаком и направлением поля). Поляризацию обозначают вектором поляризации P . Вектор поляризации P равен сумме дипольных моментов $q \cdot r$ в единице объёма материала V и направлен против внешнего поля:

$$P = \frac{\sum qr}{V}. \quad (1.1)$$

В результате поляризации напряжённость поля в материале уменьшается с $E_{пустоты}$ до $E_{материала}$. Поэтому поток электрического смещения воздействующего на материал поля можно приравнять сумме двух векторов:

$$D_{внешн} = \varepsilon_0 E_{материала} + P. \quad (1.2)$$

Отсюда:

$$\frac{D_{внешн}}{\varepsilon_0 E_{материала}} = 1 + \frac{P}{\varepsilon_0 E_{материала}}. \quad (1.3)$$

Относительная величина

$$1 + \frac{P}{\varepsilon_0 E_{материала}} = \varepsilon \quad (1.4)$$

называется *диэлектрической проницаемостью* материала и обозначается ε .

Обычная форма записи, связывающая внешний поток электрического смещения $D_{внешн}$ с напряжённостью поля в материале $E_{материала}$, получается из (1.3) и (1.4) и выглядит как:

$$D_{внешн} = \varepsilon_0 \varepsilon E_{материала}. \quad (1.5)$$

В пустоте нет частиц, которые могли бы поляризоваться ($q = 0$), поэтому $P = 0$, а диэлектрическая проницаемость $\varepsilon = 1$. Для пустоты:

$$D_{\text{внешн}} = \varepsilon_0 E_{\text{пустоты}}. \quad (1.6)$$

С учетом (1.5) и (1.6):

$$\varepsilon = \frac{E_{\text{пустоты}}}{E_{\text{материала}}}. \quad (1.7)$$

Таким образом, можно дать следующие определения диэлектрической проницаемости:

Диэлектрическая проницаемость ε является мерой поляризации вещества в электрическом поле (1.4). Это мера ослабления поля в веществе по сравнению с внешним полем; её значение показывает во сколько раз поле в веществе слабее поля от того же источника в вакууме (1.7). Диэлектрическая проницаемость является также мерой ёмкости, которую может создать диэлектрик. Значение диэлектрической проницаемости вещества ε можно определить как отношение ёмкости конденсатора с данным веществом (диэлектриком) к ёмкости конденсатора тех же размеров, диэлектриком которого является вакуум.

Заряд какого-либо устройства q – есть произведение ёмкости этого устройства C на приложенное к устройству напряжение U :

$$q = CU. \quad (1.8)$$

Если ёмкость определяется по отношению к земле, потенциал которой принимается равным нулю, вместо напряжения U используется значение “потенциала” (φ) того тела, ёмкость которого определяется.

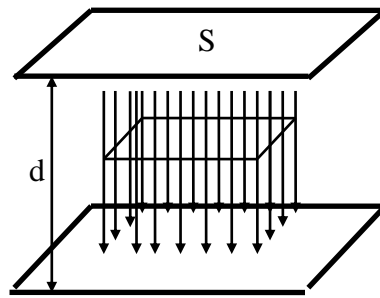
Для расчета ёмкости необходимо четко представить конфигурацию поля в рассчитываемом устройстве. В заданиях по теме 1 используются электрические поля следующих конфигураций:

- плоскопараллельное,
- радиально-цилиндрическое,
- радиально-сферическое.

Ниже приводится описание этих полей и необходимые для расчета формулы.

1. Плоскопараллельное поле

В плоскопараллельном поле эквипотенциальные поверхности (поверхности равного потенциала, поверхности уровня) представляют собой параллельные плоскости, а линии потока смещения D , совпадающие с направлением вектора напряженности поля E , – параллельны друг другу и перпендикулярны этим плоскостям.



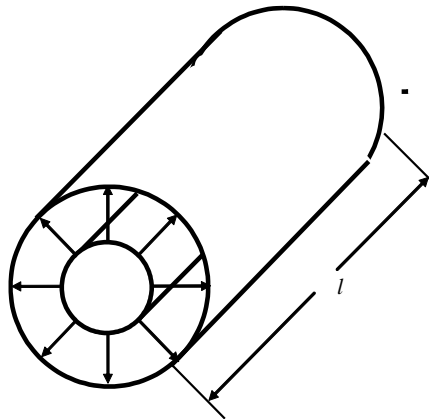
Значение ёмкости:

$$C = \varepsilon_0 \varepsilon \frac{S}{d}. \quad (1.9)$$

В плоскопараллельном поле напряжённость E одинакова во всех точках. Поэтому:

$$U = Ed. \quad (1.10)$$

По выражениям (1.9) и (1.10) рассчитываются параметры плоских конденсаторов.



2. Радиально-цилиндрическое поле

Эквипотенциальными в этом поле являются коаксиальные (имеющие общую ось) цилиндрические поверхности, а линии смещения располагаются по радиальным направлениям.

Значение ёмкости:

$$C = \varepsilon_0 \varepsilon \frac{2\pi l}{\ln \frac{r_2}{r_1}}, \quad (1.11)$$

где r_1 – радиус внутреннего цилиндра; r_2 – радиус внешнего цилиндра.

По формуле (1.11) можно рассчитать ёмкость одножильного коаксиального кабеля (например, кабеля для телевизионной антенны или одножильных кабелей на напряжение 110...500 кВ).

3. Радиально-сферическое поле

В этом поле поверхности уровня – это сферы с общим центром, а линии смещения направлены по радиусам.

Значение ёмкости:

$$C = \varepsilon_0 \varepsilon 4\pi \frac{r_1 r_2}{r_2 - r_1}, \quad (1.12)$$

причем, ёмкость шара по отношению к сфере бесконечного радиуса ($r_2 = \infty$):

$$C = \varepsilon_0 \varepsilon 4\pi r_1. \quad (1.13)$$

Ёмкость полушария в два раза меньше.

Соотношение для плотности потока смещения D , когда силовые линии от заряда q проходят перпендикулярно в каждой точке поверхности S :

$$D = q/S. \quad (1.14)$$

Если поток смещения одинаковой плотности пронизывает диэлектрики с различной диэлектрической проницаемостью, то справедливо соотношение (из 1.5):

$$\varepsilon_1 E_1 = \varepsilon_2 E_2. \quad (1.15)$$

Отсюда следует, что значения напряжённости поля обратно пропорциональны диэлектрическим проницаемостям:

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1}. \quad (1.16)$$

1.2. Задания для самостоятельного выполнения

1-01. Опишите свойства (физические, электрические) воздуха. Определите заряд шара радиусом 1 м, расположенного в воздухе при температуре 20 °С и давлении 101325 Па. Потенциал шара равен 10^6 В.

1-02. Опишите воздух как электротехнический материал. Как влияет давление на электрические характеристики воздуха? В воздушный конденсатор, имеющий при атмосферном давлении ёмкость 100 пФ и заряд 1 нКл, закачивается воздух. Каким станет напряжение на обкладках этого конденсатора при изменении давления закачиваемого воздуха от атмосферного до 10 МПа?

1-03. Опишите трансформаторное масло, его свойства и применение. Сравните электрические свойства трансформаторного масла и воздуха. В плоский конденсатор, заполненный трансформаторным маслом с площадью пластин 1 м² и расстоянием между электродами 1 см, попал 1 л воздуха. На сколько изменится ёмкость этой системы, если электроды расположены горизонтально?

1-04. Опишите электрические, физические свойства и область применения конденсаторного масла и трихлордифенила. Во сколько раз изменится общая ёмкость двух конденсаторов при замене в них конденсаторного масла на трихлордифенил при температуре 20 °С? Задачу решить при последовательном и параллельном соединениях конденсаторов.

1-05. Опишите полиметилфенилсилоксан (физические и электрические свойства, область применения). Два коаксиальных цилиндра длиной 1 м и радиусами 0,11 м и 0,12 м опускаются в полиметилфенилсилоксан. Построить кривую изменения ёмкости этой системы в зависимости от глубины погружения цилиндров в жидкость.

1-06. Опишите физические и электрические свойства поливинилхлорида и рассчитайте, какую поверхность должен иметь плоский воздушный конденсатор с расстоянием между пластинами 0,5 мм и ёмкостью, равной ёмкости кабеля с поливинилхлоридной изоляцией и следующими параметрами: длина кабеля 1 км, диаметр жилы 5 мм и диаметр оболочки 6 мм, температура 20 °С, частота 50 Гц.

1-07. Опишите физические и электрические свойства поливинилхлорида и полиметилметакрилата. Во сколько раз изменится расстояние между пластинами плоского конденсатора при замене находящегося между ними поливинилхлорида на полиметилметакрилат при условии сохранения ёмкости? Частота 50 Гц, температура 20 °С.

1-08. Опишите физические, электрические свойства, виды и область применения трансформаторного масла и определите значения заряда шарового электрода, погружаемого в масло при температурах 20 и 90 °С. Бак с трансформаторным маслом имеет большие размеры по сравнению с размерами электрода. У поверхности расположен шаровой электрод радиусом 0,1 м, полупогруженный в масло, диэлектрическая проницаемость которого имеет

минимальное значение из возможных. К шару приложено напряжение 10 В. Ёмкостью половинки шара, находящейся в воздухе, по отношению к баку можно пренебречь.

1-09. Опишите свойства и применение конденсаторных масел. В плоский конденсатор, заполненный конденсаторным маслом с площадью пластин 1 м^2 и расстоянием между электродами 1 см, попала вода в количестве 2 л. Electroды расположены вертикально. На сколько изменится ёмкость этой системы при попадании в неё воды?

1-10. Опишите свойства (физические, электрические) и область применения асбоцемента и эпоксидно-полиэфирных компаундов. С каких значений до каких изменится ёмкость между квадратными пластинами площадью 1 м^2 , прикладываемыми с обеих сторон к асбоцементной доске толщиной 5 мм, если последнюю покрыть с обеих сторон эпоксидно-полиэфирным компаундом КЭП-1 толщиной 1 мм. Для расчёта можно использовать минимальные значения параметров.

1-11. Опишите свойства любой локоткани и дистиллированной воды (физические, электрические). Укажите область применения локоткани в электротехнике. На стержень, диаметром 1 см и длиной 1 м наматывается локоткань толщиной 0,1 мм. Как изменится ёмкость между этим стержнем и соосным с ним цилиндром диаметром 2 см при погружении системы в дистиллированную воду, имеющую относительную диэлектрическую проницаемость ϵ_1 ?

1-12. Опишите свойства (физические, электрические) и область применения электроизоляционных резин. Металлический шарик диаметром 1 см полувдавливается в резиновый блок больших размеров из резины РТИШ и к нему прикладывается напряжение 1 кВ. В каких пределах возможно изменение заряда шарика при температуре $20 \text{ }^\circ\text{C}$ и разных влажностях резины?

1-13. Опишите свойства (физические, электрические) и область применения стеатитовой и высокочастотной конденсаторной электрокерамики. Выберите марку высокочастотной керамики, заменяющий стеатитовую керамику и позволяющий максимально уменьшить площадь плоского конденсатора, работающего при частоте 50 Гц, при условии сохранения ёмкости. Какое максимальное уменьшение площади можно при этом ожидать?

1-14. Опишите электроизоляционные неорганические плёнки. Конденсатор выполнен из двух, приложенных друг к другу, алюминиевых пластин, поверхность которых анодирована в плазме. Как изменится ёмкость конденсатора, если алюминиевые пластины заменить титановыми с теми же размерами и той же толщиной оксидной пленки?

1-15. Опишите полиамидные и полиимидные электроизоляционные полимерные материалы. Сравните между собой их строение и свойства. Подберите такой тип полиамида, который, заменив полиимид в устройстве, изменит ёмкость последнего не более чем на 9 %.

1-16. Опишите политетрафторэтилен (физические и электрические свойства, область применения). Провод изолирован политетрафторэтиленом толщиной 0,5 мм, имеет диаметр 1 мм и находится под напряжением 220 В. На поверхности провода под слоем изоляции имеется небольшое плоское воздушное включение. Определите напряжённости электрического поля в этом включении и в слое твёрдой изоляции, прилегающем к проводу.

1-17. Опишите трансформаторное масло и его свойства (физические, электрические, область применения). В баке с трансформаторным маслом у поверхности масла находится полушаровый электрод, к которому при температуре масла 20 °С приложено напряжение 10 В. Как следует изменить напряжение на этом электроде с целью сохранения его заряда, если температура масла повысилась до 90 °С? При решении задачи ёмкостью полушара, находящегося в воздухе, можно пренебречь.

1-18. Опишите свойства конденсаторного и касторового масел (физические и электрические), область их применения, и определите, во сколько раз может измениться ёмкость масляного изоляционного устройства, если в нем заменить конденсаторное масло на касторовое?

1-19. В баке больших размеров налиты полиметилсилоксановая кремнийорганическая жидкость ПМС-10 и трихлордифенил первого сорта. Опишите физические и электрические свойства, область применения названных материалов. Воспроизведите расчетным путем следующий опыт. Погружаясь из одной жидкости в другую, в баке передвигаются два коаксиальных цилиндра радиусами 0,11 м и 0,12 м и длиной 1 м. Постройте кривую изменения ёмкости этой цилиндрической системы в зависимости от глубины погружения цилиндров в нижнюю жидкость. При расчетах принять температуру жидкостей 20 °С и минимальные справочные значения необходимых параметров.

1-20. Опишите физические и электрические свойства политрифторхлорэтилена и воздуха. Сравните их на следующем примере. Одножильный кабель с изоляцией из политрифторхлорэтилена имеет длину 100 м, диаметр жилы 0,003 м и диаметр оболочки 0,005 м. Какую площадь поверхности должен иметь плоский воздушный конденсатор с расстоянием между пластинами 0,001 м, имеющий равную с кабелем ёмкость?

1-21. Дайте технические названия полиметилметакрилата и поливинилхлорида, опишите их физические и электрические свойства, область применения. Рассчитайте, во сколько раз изменится площадь пластин плоского

конденсатора, работающего при частоте 50 Гц, при замене находящегося между ними полиметилметакрилата на поливинилхлорид той же толщины при условии сохранения ёмкости?

1-22. Опишите полиимидную изоляцию и шеллак (физические и электрические свойства, область применения). Рассчитайте ёмкость изолированного провода следующей конструкции: провод диаметром 2 мм покрыт полиимидной изоляцией толщиной 0,1 мм и затем слоем шеллака той же толщины, поверх которого находится медный экран. Рассчитать ёмкость между жилой этого провода и медным экраном при длине провода 100 м.

1-23. Опишите свойства (физические, электрические, область применения) эпоксидных лаков и оцените значение ёмкости между стержнем и обмоткой в следующей конструкции. Провод, покрытый эпоксидным лаком ЭП-9114 с толщиной покрытия 0,1 мм, намотан плотно в 1 слой на металлический цилиндр диаметром 0,1 м и длиной 1 м.

1-24. Опишите свойства асбоцемента и эпоксидного компаунда (физические, электрические) и их область применения. Определите верхнюю и нижнюю границы изменения ёмкости между пластинами площадью 1 м^2 , прикладываемыми к асбоцементной доске толщиной 10 мм, если на нее затем с обеих сторон нанесено эпоксидное покрытие ЭВН-6 толщиной 1 мм.

1-25. Опишите физические и электрические свойства, область применения лакоткани и определите диапазон значений ёмкости системы коаксиальных (соосных) цилиндров. Система коаксиальных цилиндров радиусами 0,01 м и 0,02 м и длиной 1 м находится в дистиллированной воде с диэлектрической проницаемостью 81. На внутренний цилиндр намотано 10 слоев лакоткани ЛКМ-105, имеющей толщину 0,12 мм.

1-26. Опишите лаки на основе поливинилформалей (ПВФМ) и политрифторхлорэтилен (ПТФХЭ). Используя их свойства, рассчитайте толщину изоляции кабеля при следующих условиях. Жила одножильного кабеля, имеющая диаметр 3 мм, покрыта слоем лака на основе поливинилформалей (ПВФМ) толщиной 0,1 мм, а затем изоляцией из политрифторхлорэтилена. Определите толщину ПТФХЭ-изоляции при условии равенства напряжённостей поля частотой 1000 Гц на поверхности изоляции и на границе раздела материалов изоляции.

1-27. Опишите физические и электрические свойства, область применения стеатитовой и глиноземистой электрокерамики и определите, какую марку отечественной глиноземистой керамики следует использовать, чтобы максимально (вычислить, на сколько процентов) уменьшить длину системы коаксиальных цилиндров, не уменьшая их ёмкости, заменяя стеатитовую керамику на глиноземистую.

1-28. Опишите электроизоляционные неорганические пленки, в том числе указанные в задании (способ получения, физические, электрические свойства, область применения), и определите, как изменится ёмкость конденсатора при следующих условиях: конденсатор состоит из приложенных друг к другу алюминиевых пластин, поверхность которых окислена анодированием в плазме. Изоляционная пленка одной из пластин заменяется на пленку титаната бария той же толщины, нанесенную методом взрывного испарения.

1-29. Опишите электрические свойства газообразных диэлектриков, в частности, элегаза. Выберите такое давление элегаза, чтобы ёмкость коаксиальной системы длиной 47,65 м, состоящей из трубы диаметром 1 м и находящегося в ней токопровода диаметром 6 см, равнялась бы 1 нФ. Опишите свойства этого газа.

1-30. Опишите трансформаторное масло и выберите масло такой марки, при заливке которого в трансформатор ёмкость обмотки последнего по отношению к корпусу была бы минимальной. Определите, во сколько раз увеличится ёмкость по сравнению с трансформатором без масла?

1-31. Опишите кабельные масла. Выберите и опишите такие марки кабельного масла, при которых можно получить максимальное и минимальное значения ёмкости между жилами и оболочкой маслонаполненного кабеля. Во сколько раз отличаются эти ёмкости?

1-32. Опишите хлорированные жидкие диэлектрики. Выберите среди этих жидких диэлектриков такой, чтобы при заполнении им конденсатора с площадью пластин $1,9143 \text{ м}^2$ и расстоянии между ними 0,1 мм ёмкость конденсатора составила бы 1 мкФ при температуре $20 \text{ }^\circ\text{C}$. Приведите необходимые сведения об этом материале.

1-33. Опишите гетинакс и трансформаторное масло и определите, во сколько раз отличается напряжённость электрического поля в масле и в опущенной в него изоляционной перегородке из гетинакса при частоте 50 Гц, если масло имеет марку ТКп, а тип гетинакса – 111.

1-34. Опишите нагревостойкие заливочные компаунды и рассчитайте, как соотносятся напряженности поля по концам стержня из компаунда типа АФС-4, если к этим концам приложено напряжение частотой 1 кГц, один из концов стержня находится при комнатной температуре, а другой нагрет до $600 \text{ }^\circ\text{C}$.

1-35. Выберите и опишите пленку для изоляции конденсатора, работающего в условиях ионизирующего излучения. Пленка должна обеспечивать наибольшую ёмкость и неизменность этой ёмкости при

облучении электронами. Рассчитайте площадь пластин этого конденсатора при ёмкости 1 мкФ и толщине изоляции 0,1 мм.

1-36. Опишите политрифторхлорэтилен и политетрафторэтилен. Определите толщину наружной изоляции кабеля из этих материалов при условии равенства напряженностей поля частотой 50 Гц на поверхности изоляции и на границе раздела материалов изоляции при следующих условиях. Жила одножильного кабеля, имеющая диаметр 2 мм, покрыта слоем изоляции из политрифторхлорэтилена толщиной 1 мм, затем на эту изоляцию нанесен слой политетрафторэтилена.

1-37. Опишите политрифторхлорэтилен и электроизоляционные хладоны. Определите, во сколько раз отличается напряжённость электрического поля в хладоне-113 и в опущенной в него изолирующей перегородке из фторлона-3, полагая, что в диапазоне частот 50-100 Гц диэлектрическая проницаемость этих материалов остается неизменной.

1-38. Опишите нагревостойкие изоляционные материалы микалекс и новомикалекс. Рассчитайте, как соотносятся напряженности поля по концам проходного изолятора из новомикалекса, если один из концов стержня находится при комнатной температуре, а другой нагрет до 600 °С?

1-39. Опишите ударопрочные фенопласты. Выберите среди этого класса материалов и опишите такую пластмассу для изоляции электротехнического устройства, работающего в условиях облучения электронами, которая бы обеспечивала наибольшую ёмкость устройства и неизменность этой ёмкости при облучении электронами. Рассчитайте радиус полушара, вдавленного с поверхности в эту пластмассу, если его ёмкость 10 пФ.

1-40. Опишите полиэтилены и кремнийорганические каучуки. Определите толщину наружной изоляции одножильного кабеля при условии равенства напряженностей поля частотой 1 кГц на поверхности изоляции и на границе раздела материалов изоляции. Конструкция изоляции следующая: жила кабеля, имеющая диаметр 4 мм, покрыта слоем изоляции из хлорсульфированного полиэтилена толщиной 2 мм, затем на эту изоляцию нанесен слой кремнийорганического каучука.

1-41. Рассмотрите свойства полиолефинов на следующем примере: жила одножильного кабеля, имеющая диаметр 4 мм, покрыта слоем изоляции из хлорированного полиэтилена толщиной 1 мм, затем на эту изоляцию нанесен слой другого полиолефина толщиной 3,45 мм. Определите материал наружной изоляции при условии равенства напряженностей поля частотой 1 МГц на поверхности изоляции и на границе раздела материалов изоляции.

1-42. Опишите неполярные полимерные пленки и рассчитайте, как соотносятся напряженности поля частотой 1 кГц в двухслойной изоляции конденсатора, если один слой выполнен из политетрафторэтилена, а другой – из полифениленоксида?

1-43. Опишите поливинилхлорид и воздух. Используйте найденные параметры для решения следующей задачи: провод покрыт поливинилхлоридной изоляцией толщиной 0,5 мм, имеет диаметр 1 мм и находится под напряжением 220 В. На поверхности провода, под изоляцией имеется воздушное включение. Определите напряженности электрического поля в этом включении и в твёрдой изоляции, прилегающей к проводу.

1-44. Опишите характеристики полярных полимерных пленок. Используя найденные характеристики этих изоляционных сред, выполните расчет: в конденсаторе с двухслойной изоляцией “воздух-пленка из полиэтилентерефталата” толщиной по 1 мм каждого слоя пробивается и шунтируется электрической искрой воздух. Как и в какую сторону изменяется ёмкость конденсатора при пробое воздушной прослойки, если температура нормальная?

1-45. Опишите свойства и применение трансформаторного масла. Используя необходимые параметры масла, сделайте расчет следующего случая: в плоский конденсатор, заполненный трансформаторным маслом марки ГК, с площадью пластин 1 м^2 и зазором 1 см попала вода ($\varepsilon = 81$) в количестве 1 л. С какого до какого значения изменится ёмкость, если электроды расположены вертикально?

1-46. Опишите физические, электрические свойства, область применения полиуретана. Рассчитайте граничные значения ёмкости между проводом и металлическим экраном, если диаметр провода 1 мм и он изолирован от металлического экрана полиуретаном толщиной 0,1 мм при длине конструкции 10 м.

1-47. Опишите трихлордифенилы и полиимидные пленки. Рассчитайте ёмкостной делитель напряжения при таких условиях: ёмкостный делитель в верхнем плече имеет изоляцию из трихлордифенила высшего сорта, а в нижнем – из электроизоляционной полиимидной пленки. Как изменится отношение ёмкостей верхнего и нижнего плечей при повышении температуры с 20 до 90 °С? Зависимостью диэлектрической проницаемости от частоты в диапазоне 1 Гц...1 кГц пренебречь.

1-48. Опишите физические и электрические свойства, область применения электроизоляционных резин. Рассчитайте для нормальных условий ёмкость между шарами, вдавливаемыми в большой блок резины на значительном расстоянии друг от друга. Два шарика диаметром 1 см вдавливаются в резину

до половины. При расчётах следует учесть и те половинки, которые находятся в воздухе.

1-49. Опишите эпоксидные компаунды, в том числе их свойства при криогенных температурах. Рассчитайте, как соотносятся напряженности поля по концам проходного изолятора из компаунда ЭД-16, если они находятся под напряжением частотой 100 Гц. Один из концов стержня находится при температуре 20 °С, а другой охлажден до криогенной температуры 77 К.

1-50. Опишите воздух как электроизоляционный материал. Между двумя концентрическими сферами с радиусами 1 м и 1,1 м находится воздух при давлении 10 МПа. К сферам подведено постоянное напряжение 10 В. Определите, с какого до какого значения изменится заряд этого сферического конденсатора, если давление в нем уравнивается с атмосферным.

1-51. Опишите характеристики электроизоляционных неорганических пленок. В конденсаторе с двухслойной изоляцией “воздух-пленка титаната бария, нанесенная методом СВЧ-распыления” толщиной по 0,5 мм каждого слоя, пробивается и шунтируется электрической искрой воздух. Как при этом изменяется ёмкость конденсатора?

1-52. Опишите свойства и применение конденсаторных масел. В плоский конденсатор, заполненный конденсаторным маслом сернокислотной очистки с площадью пластин 1 м² и зазором 1 см попал воздух количестве 2 л. На сколько и в какую сторону изменится ёмкость, если электроды расположены горизонтально?

1-53. Опишите физические и электрические свойства кремнийорганических лаков, область их применения. Провод, покрытый кремнийорганическим лаком КО-990 с толщиной покрытия 0,01 мм, намотан плотно в 1 слой на металлический стержень длиной 1 м и диаметром 12 мм. Определите значение ёмкости между стержнем и обмоткой.

1-54. Опишите Совтол-10 и полиимидные плёнки. Рассчитайте ёмкостной делитель напряжения, выполненный с применением этих материалов. Ёмкостный делитель напряжения имеет изоляцию верхнего плеча из Совтола-10, а нижнего из полиимидной пленки. Соотношение ёмкостей верхнего и нижнего плечей при 90 °С составляет 1:1000. Как изменится это соотношение, если температура нижнего плеча понизится до 20 °С?

1-55. Опишите физические и электрические свойства, область применения электротехнического фарфора и высокочастотной керамики на основе рутила. Определите, во сколько раз (максимально) можно уменьшить длину системы коаксиальных цилиндров, не уменьшая их ёмкости, если заменить,

находящийся между цилиндрами электротехнический фарфор группы 100 на высокочастотную керамику на основе рутила?

1-56. Опишите электроизоляционные неорганические плёнки. Рассчитайте конденсатор, выполненный с их применением: конденсатор состоит из приложенных друг к другу алюминиевых пластин, поверхность которых окислена анодированием в плазме. Определите, во сколько раз (минимально) изменится ёмкость конденсатора, если пленку той же толщины получить методом электрохимического окисления?

1-57. Опишите конденсаторные керамические материалы. Выберите из справочника и опишите такой конденсаторный керамический материал, с помощью которого можно было бы создать цилиндрический конденсатор с ёмкостью не менее 1,64 нФ при частоте 0,5-5 МГц. Коаксиальные цилиндрические электроды конденсатора имеют радиусы 0,2 и 0,5 см и длину 0,1 м.

1-58. Соберите сведения по жидким диэлектрикам на основе фторорганических соединений. Выберите марку и опишите жидкий диэлектрик этого класса, при заливке которого в трансформатор ёмкость обмотки последнего по отношению к корпусу была бы минимальной. Определите, во сколько раз увеличится ёмкость по сравнению с трансформатором без этого жидкого диэлектрика?

1-59. Рассмотрите справочные данные по электроизоляционным неорганическим плёнкам. Выберите и опишите такую электроизоляционную неорганическую пленку (и способ ее получения), при которой можно получить максимальную ёмкость устройства, использующего эту пленку для изоляции между электродами. Во сколько раз уменьшится ёмкость устройства, если вместо пленки использовать воздушную изоляцию?

1-60. Опишите конденсаторное масло и конденсаторную бумагу. Рассчитайте возможные длины электродной фольги, ширина которой равна 10 см, если изоляцией между электродами конденсатора с ёмкостью 1 мкФ служит конденсаторная бумага типа АНКОН (марка 1), пропитанная конденсаторным маслом сернокислотной очистки. Изоляция состоит из 10 слоёв бумаги толщиной 12 мкм, спрессованной с коэффициентом запрессовки $K = 1,2$. При расчетах учесть изменение диэлектрической проницаемости целлюлозы в бумаге в результате её пропитки маслом. Плотность целлюлозы принять равной 1600 кг/м^3 .

2. Электропроводность. Проводниковые и изоляционные материалы

2.1. Теоретическая часть

Электропроводность – это способность вещества проводить электрический ток, обусловленная наличием свободных зарядов в веществе. Для численного определения этой способности вводятся величины: «удельное электрическое сопротивление» ρ и «удельная электрическая проводимость» γ . Эти величины являются обратными по отношению друг к другу:

$$\gamma = \frac{1}{\rho}. \quad (2.1)$$

Значение удельной электрической проводимости вещества γ , См/м определяется как произведение суммарного заряда свободных носителей в единице объема nq , Кл/м³ и подвижности этих зарядов u , м²/с·В:

$$\gamma = nqu, \quad (2.2)$$

где n – концентрация свободных зарядов, 1/м³; q – заряд носителя, Кл.

Удельное электрическое сопротивление ρ – это параметр вещества, численно равный сопротивлению образца длиной 1 м с площадью поперечного сечения 1 м², измеренному в плоскопараллельном поле.

Удельное электрическое сопротивление измеряется в Ом·м. Удельная электрическая проводимость измеряется в См/м.

По значению удельного электрического сопротивления все вещества подразделяются на 3 класса:

Проводники..... $\rho \approx 10^{-8} \dots 10^{-6}$ Ом·м;
Слабопроводящие материалы (полупроводники)... $\rho \approx 10^{-6} \dots 10^7$ Ом·м;
Диэлектрики (изоляционные материалы)..... $\rho \approx 10^6 \dots 10^{20}$ Ом·м.

В электропроводном материале вместо электростатического поля электрических зарядов существует электрическое поле тока, протекающего по материалу.

Для плоскопараллельного поля проводимость конструкции, имеющей площадь поперечного сечения S и длину d :

$$G = \gamma \frac{S}{d}, \quad (2.3)$$

где γ – удельная электропроводность материала.

Поскольку проводимость есть величина, обратная сопротивлению:

$$G = \frac{1}{R},$$

а удельная электропроводность – обратная удельному электрическому сопротивлению:

$$\gamma = \frac{1}{\rho},$$

то формула (2.3) идентична известной:

$$R = \rho \frac{d}{S},$$

где S – площадь поперечного сечения проводника; d – длина проводника.

Для радиально цилиндрического поля выражение для проводимости между двумя коаксиальными цилиндрами:

$$G = \gamma \frac{2\pi l}{\ln \frac{r_2}{r_1}}, \quad (2.4)$$

из которого также несложно получить выражение для сопротивления:

$$R = \rho \frac{\ln \frac{r_2}{r_1}}{2\pi l}.$$

В радиально-сферическом поле потенциал шара, с которого стекает ток в "бесконечность", будет выражаться как:

$$\phi = \frac{I}{\gamma 4\pi r}, \quad (2.5)$$

где I – ток, стекающий с шарового электрода радиуса r .

Проводимость между двумя концентрическими (имеющими общий центр) сферами радиусов r_1 и r_2 :

$$G = 4\pi\gamma \frac{r_1 r_2}{r_2 - r_1}. \quad (2.6)$$

Если материал конструкции между электродами имеет большое удельное сопротивление и определенное значение диэлектрической проницаемости, то для такой конструкции справедливо выражение:

$$CR = \varepsilon_0 \varepsilon \rho. \quad (2.7)$$

Левая часть этого выражения есть постоянная времени разряда конденсатора с ёмкостью C через сопротивление R . Правая часть называется постоянной времени релаксации:

$$\tau = \varepsilon_0 \varepsilon \rho.$$

Время релаксации отражает скорость затухания возбуждения в материале после исчезновения электрического поля, вызвавшего это возбуждение.

2.2. Задания для самостоятельного выполнения

2-01. Опишите свойства меди и области её применения. В точку на поверхности расплавленной меди вводится ток силой 10 кА. Если измерять разность потенциалов между точками, радиально отстоящими от места ввода тока на расстоянии 10 и 20 см, что покажет прибор?

2-02. Опишите алюминий (физические, электрические свойства, область применения). Между двумя коаксиальными кольцами наливается расплавленный алюминий. Как нужно изменить толщину слоя застывшего алюминия, чтобы сопротивление между кольцами не изменилось?

2-03. Опишите медь и алюминий как электропроводящие материалы и укажите, как влияют добавки на электрические характеристики материалов. Одна проволока сделана из алюминия с добавлением 0,25 % меди, другая – из чистого алюминия. Во сколько раз длина одной проволоки больше другой, если их сопротивление и сечение одинаковы?

2-04. Опишите поликристаллический графит (физические, электрические свойства, область применения). К концам двух коаксиальных цилиндров из поликристаллического графита с наружными диаметрами 5 см и 10 см, толщиной стенки 1 см и длиной 1 м приложено напряжение 1 В. Определить токи в обоих цилиндрах.

2-05. Опишите физические и электрические свойства контактных композиционных материалов и область их применения. Рассчитайте сопротивление контакта при замыкании контактов, выполненных из контактной

композиции КМК-Б25, если они коснулись друг друга лишь площадками диаметром 0,1 мм.

2-06. Опишите электроизоляционные неорганические плёнки. Электролитический конденсатор, анодом которого служит алюминиевая фольга, изолированная от второго электрода оксидной пленкой, имеет емкость 1 мкФ. Какой должна быть технология нанесения оксидной пленки, чтобы получить наибольшее сопротивление изоляции конденсатора? Укажите значение этого сопротивления.

2-07. Опишите физические и электрические свойства меди и припоя ПОС-10, а также области их применения. Медный провод сечением 1 мм² запаивается припоем ПОС-10 в цилиндрическую втулку с внутренним диаметром 2 мм на длину 5 мм. Найти сопротивление контакта.

2-08. Опишите физические и электрические свойства контактных композиционных материалов и область их применения. Определите марку контактной композиции в следующем примере: композиционный материал для сильноточных контактов состоит из медной матрицы (97 %) и углеродистого наполнителя (поликристаллический графит, 3 %). Сравните расчетное значение удельного сопротивления этой композиции со справочным.

2-09. Опишите электрические свойства растворов соляной кислоты и латуни. Сравните эти свойства, используя следующий пример: полиэтиленовая труба с внутренним диаметром 0,5 м, заполненная 10%-й соляной кислотой, служит проводником электрического тока. Определите сечение проводника из латуни марки Л68, эквивалентное названному электролитическому проводнику.

2-10. Опишите полиэтилены высокого (ПЭВД) и низкого давления (ПЭНД). Найдите минимальное значение сопротивления изоляции из ПЭВД у одножильного кабеля с диаметром токоведущей жилы 1 мм и диаметром экрана 10 мм при длине кабеля 1 км.

2-11. Опишите физические и электрические свойства 10%-го раствора хлорида натрия. Какую разность потенциалов следует приложить к двум полушаровым электродам диаметром 1 мм, погруженным с поверхности в 10%-й раствор хлорида натрия на значительном расстоянии от стенок сосуда и друг от друга, чтобы между этими электродами потек ток силой 1 А?

2-12. Опишите физические и электрические свойства, область применения нихромовой проволоки из сплава Х20Н80. Определите массу этой проволоки диаметром 0,6 мм, необходимую для создания резистора с сопротивлением 2,5 кОм, работающем при оптимальной для этой марки температуре.

2-13. Рассмотрите электротехнический материал, полученный смешиванием измельченной слюды (мусковит) с полиуретаном. Опишите физические, электрические свойства и область применения указанного материала. Рассчитайте значения удельного сопротивления материала при содержании в нём слюды (с минимальным удельным сопротивлением) 20 % и 80 % по объему.

2-14. Опишите высоконагревостойкое стеклоэмалевое покрытие для провода марки ПЭЖБ и оцените сопротивление изоляции этого провода в нормальном состоянии и после выдержки в 100%-й влажности в течение 250 ч. Диаметр провода 0,4 мм, толщина изоляции 20 мкм, а длина провода 100 м.

2-15. Опишите физические и электрические свойства, область применения нихрома и нержавеющей стали. Пользуясь найденными параметрами, оцените, как отличаются длины проволок из нихрома марки Х15Н60 и нержавеющей стали марки 05Х12Н2М, если у этих проволок одинаковое сечение и сопротивление.

2-16. Опишите алюминий как материал для проводов линий электропередачи. Электрический ток передается через землю с удельным сопротивлением 70 Ом·м на расстояние 95,5 км при помощи 2-полушаровых электродов радиусом 1 м, вдавленных с поверхности в грунт по обоим концам электропередачи. Обратный ток возвращается по алюминиевому проводу. Какое сечение провода соответствует условию равенства сопротивлений указанных путей тока?

2-17. Опишите физические, электрические свойства и область применения стального (марка стали “сталь 10”), алюминиевого и медного проводов и определите соотношение их сечений при одинаковых сопротивлении и длине.

2-18. Опишите алюминий и нержавеющую сталь как материалы для проводов линий электропередачи. Провод линии электропередачи марки АС 120/19 имеет стальной сердечник из 7 стальных проволок диаметром 1,85 мм (марка нержавеющей стали 07Х16Н6 и навив из 26 алюминиевых проволок диаметром 2,7 мм). Каково соотношение значений постоянного тока, проходящего по стали и алюминию?

2-19. Опишите физические и электрические свойства стали и хлорированного полиэтилена, область их применения. Провод длиной 10 км имеет стальную жилу диаметром 0,5 мм (марки стали “сталь 10”) и изоляцию из хлорированного полиэтилена ХПЭ толщиной 1 мм. Во сколько раз сопротивление изоляции больше сопротивления жилы провода?

2-20. В точку на поверхности расплавленной меди вводится ток, растекающийся в расплаве. На расстояниях 5 и 15 см от точки ввода тока

измеряется разность потенциалов, составляющая 100 мкВ. Опишите физические и электрические свойства меди, область применения и определите, какой ток вводится в расплав?

2-21. Полагая, что структура контактного композиционного материала для сильноточных контактов марки КМК-Б45 является статистической смесью, рассчитайте ожидаемое значение удельного сопротивления этого материала, описав предварительно входящие в него компоненты и необходимые для расчета параметры. Компонентом с малым процентным содержанием можно пренебречь.

2-22. Опишите физические и электрические свойства, область применения молибдена и вольфрама. Определите, во сколько раз отличается масса отожженных проволок из вольфрама и молибдена, если у них одинаковые сечение и сопротивление?

2-23. Опишите влияние добавок на удельное сопротивление меди и алюминия. Рассчитайте сопротивление постоянному току катушки из медной проволоки в случае, если в меди содержится 0,06 % железа. Диаметр проволоки 0,5 мм, длина 100 м. Меньше это сопротивление или больше, чем у проволоки тех же размеров из алюминия (с тем же содержанием железа)?

2-24. Опишите дисилицид молибдена как жаростойкий материал для резисторов (физические, электрические свойства, область применения). К двум коаксиальным цилиндрам из дисилицида молибдена с наружными диаметрами 5 и 10 мм, толщиной стенки 1 мм и длиной 1 м приложено по концам напряжение 1 В. Найти значения токов в обоих цилиндрах.

2-25. Опишите физические и электрические свойства, область применения контактной композиции КМК-А32. При замыкании сильноточных контактов, выполненных из контактной композиции КМК-А32, они коснулись друг друга площадками с радиусом 0,1 мм. Оцените значение сопротивления такого контакта.

2-26. Опишите конденсаторные керамические материалы с линейной поляризацией и выберите из них такой конденсатор, который с емкостью 1 пФ будет иметь наименьшее сопротивление изоляции. Рассчитайте это сопротивление.

2-27. Опишите физические и электрические свойства электролитов на основе солей. Используя раствор хлорида калия, определите потенциал погруженного в него электрода и его изменение при увеличении концентрации соли до 20 %. Условия: полусферовый электрод диаметром 1 см погружен с поверхности в 5%-й раствор хлорида калия, через который проходит ток 0,1 А.

2-28. Опишите поликристаллический графит (физические, электрические свойства, область применения). На поверхности земли, удельное сопротивление которой $50 \text{ Ом}\cdot\text{м}$, вертикально стоит полый цилиндр из поликристаллического графита высотой 1 м , наружным диаметром 10 см и толщиной стенки 1 см . К верхнему его концу подводится ток $0,1 \text{ А}$. Какова разность потенциалов между этим концом и точкой на поверхности грунта, отстоящей от оси цилиндра на 1 м ?

2-29. Опишите фторопласт (физические, электрические свойства, область применения). Найти погонное значение сопротивления изоляции из фторопласта типа 2М у одножильного экранированного провода с сечением жилы $0,5 \text{ мм}^2$ и толщиной изоляции 1 мм .

2-30. Опишите медь, бронзу как электропроводные материалы и укажите, как влияют добавки на электрические характеристики материалов. Решите задачу: одна проволока сечением 1 мм^2 сделана из меди, содержащей $0,1 \%$ алюминия, другая – из чистой меди. Во сколько раз длина одной проволоки больше другой, если их сопротивление одинаково?

2-31. Опишите физические и электрические свойства электролитов на основе неорганических кислот. На примере соляной кислоты решите следующую задачу: между двумя полушаровыми электродами диаметром 1 мм , погруженными с поверхности в 5% -й раствор соляной кислоты, протекает ток 1 А . Оцените разность потенциалов, приложенных к этим электродам. Как изменится эта разность потенциалов при повышении концентрации кислоты до 40% ?

2-32. Опишите физические и электрические характеристики меди и ее область применения. Определите длину и сопротивление медной проволоки марки МТ диаметром $0,9 \text{ мм}$, если ее масса на катушке составляет 10 кг .

2-33. Опишите физические и электрические свойства, область применения алюминия. Между двумя коаксиальными кольцами находится слой затвердевшего алюминия. Определите, как следует изменить толщину этого слоя в расплавленном состоянии, чтобы сопротивление между кольцами не изменилось?

2-34. Опишите алюминий как материал для проводов линий электропередачи. Электрический ток передается через землю с удельным сопротивлением $120 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ на расстояние 10 км и возвращается по алюминиевому проводу марки А из проволоки марки АТ сечением 50 мм^2 . Для ввода тока в землю и вывода из нее используются полушаровые электроды. Определите диаметр этих электродов при условии равенства сопротивлений провода для заземления и провода из алюминия.

2-35. Опишите физические и электрические свойства, область применения хромели и алюмели. Определите соотношение их длин при одинаковых сечении и сопротивлении.

2-36. Опишите сталь и медь как материал для проводов и определите сопротивление 1 км провода для телефонной связи, который состоит из 7 стальных жил из стали марки 10 диаметром 0,1 мм и одной медной жилы из меди марки МТ того же диаметра.

2-37. Опишите физические и электрические свойства, область применения меди и кабельной резины РТИ-1. Медный провод марки МТ сечением 0,75 мм² и длиной 1 км имеет изоляцию из кабельной резины типа РТИ-1 толщиной 1 мм. Во сколько раз сопротивление изоляции больше сопротивления жилы провода?

2-38. Опишите полиэтилен высокого давления и определите минимальное значение тока утечки через полиэтиленовую изоляцию кабеля при напряжении на жиле 70 кВ. Одножильный кабель имеет длину 1 км, диаметр жилы 10 мм и толщину изоляции 15 мм.

2-39. Опишите карбоцепные полимеры. Минимальный ток утечки через изоляцию из хлорированного полиэтилена составляет 2 мкА. Подберите и опишите материал из того же класса, при котором в той же конструкции минимальный ток утечки через изоляцию понизился бы до 0,02 мкА.

2-40. Опишите поливинилхлорид. Определите, во сколько раз и в какую сторону изменится сопротивление изоляции кабеля из этого материала, если от протекающего тока он нагреется до 140 °С?

2-41. На любых примерах опишите полиэфиры и эпоксидные смолы. Изоляционная деталь выполнена из полиформальдегида и имеет сопротивление изоляции 32 МОм. Подберите и опишите эпоксидную смолу с отвердителем, из которой можно было бы изготовить такую же деталь, но с сопротивлением не менее 3000 МОм.

2-42. Опишите электроизоляционный покрывной лак марки ХС-9105 и оцените максимально возможное значение сопротивления изоляции провода, покрытого таким лаком, если диаметр проводника 1 мм, толщина пленки 0,03 мм, а длина провода 1 м. Как изменится это сопротивление, если провод выдержать 4 суток при влажности 95 % и температуре 40 °С?

2-43. Опишите клеящие лаки. Подберите и опишите такой тип лака, чтобы сопротивление изоляции между пластинами было бы не менее 1 ГОм. Условие: две металлические пластины площадью 1 м² склеиваются лаком таким образом, что толщина пленки лака между пластинами составляет 0,2 мм.

2-44. Опишите составы и свойства компаундов, в том числе, заливочные компаунды. При изготовлении трансформатора тока его изоляция была выполнена из заливочного компаунда типа КФ-4, при этом сопротивление изоляции при 20 °С составило 60 МОм. Подберите и опишите такой заливочный компаунд, при котором сопротивление изоляции в тех же условиях можно повысить до 5,5 ГОм и более.

2-45. Опишите электроизоляционные бумаги из синтетических волокон. Оцените максимально возможное сопротивление изоляции между обкладками конденсатора ёмкостью 1 мкФ. Изоляция конденсатора выполнена из бумаги типа КМ-60.

2-46. Опишите материалы на основе асбеста. С использованием этих материалов необходимо выполнить изделие, состоящее из двух металлических пластин и двухслойной изоляции из асбестовых материалов между этими пластинами. Подберите и опишите такие материалы, которые бы создавали напряженность постоянного электрического поля у одной пластины в 1000 раз большую, чем у другой.

2-47. Опишите гетинакс и текстолит и выберите такие марки этих листовых материалов, чтобы сопротивление их оказалось одинаковым.

2-48. Опишите свойства кабельных электроизоляционных резин. Одножильный кабель с изоляцией из резины должен эксплуатироваться в воде. Выберите и опишите резину, которая обеспечивала бы сопротивление изоляции в этих условиях не менее 70 кОм/км при радиусе жилы 2 мм и толщине изоляции 3 мм.

2-49. При изготовлении композиционного материала для сильноточных контактов марки КМК-А25 в него не добавили никель. Опишите правильный состав и свойства этого материала и сравните расчетное значение удельного сопротивления полученного материала со справочным для этой марки. При расчетах можно принять, что матрицей в этой композиции служит вольфрам.

2-50. Опишите высокочастотные керамические материалы. Выберите такую марку керамики, при которой сопротивление изоляции керамического конденсатора было бы наибольшим. Керамический конденсатор имеет емкость 0,01 мкФ, выполнен с применением керамики на основе диоксида титана и работает в интервале частот 0,5-5 МГц. Рассчитайте его сопротивление.

2-51. Опишите физические, электрические свойства и область применения полиуретана и слюды. Рассчитайте параметры электротехнического материала, состоящего из измельченной слюды (мусковита) и полиуретана, значение диэлектрической проницаемости которого минимальное из возможных. Зная,

что относительная диэлектрическая проницаемость слюды равна 7, рассчитайте значения диэлектрической проницаемости этого материала при содержании в нём слюды 30 и 70 %.

2-52. Опишите пропиточные составы высокой нагревостойкости. Изоляция, выполненная путем пропитки пропиточным нагревостойким составом марки СПВ-914, при нагревании до 850 °С имеет сопротивление 2 МОм. Подберите такие пропиточные составы для изоляции того же устройства, чтобы сопротивление изоляции в тех же условиях повысилось, по крайней мере, до 25 МОм.

2-53. Опишите электроизоляционные покрытия высокой нагревостойкости. Деталь изолирована высоконагревостойким органосиликатным покрытием марки ОС-92-18 и имеет сопротивление изоляции 32 МОм при температуре 700 °С. Подберите такое покрытие, из которого можно было бы изготовить такую же деталь, но с сопротивлением в тех же условиях не менее 85 МОм.

2-54. Опишите поливинилхлорид и алюминий. Рассчитайте длину алюминиевого проводника сечением 1,5 мм² в поливинилхлоридной изоляции с минимальным значением удельного сопротивления и толщиной 1 мм, при которой сопротивление проводника постоянному току будет в 10⁹ раз меньше сопротивления его изоляции.

2-55. Опишите слюдяные электроизоляционные материалы. Рассчитайте сопротивление изоляции между контактными пластинами коллектора электрической машины с изоляцией из миканита во влажном состоянии, если в сухом состоянии оно равно 1 МОм.

2-56. Опишите мрамор как минеральный диэлектрик и рассчитайте диапазоны сопротивления устройства следующей конструкции: между двумя металлическими пластинами с площадью 1 м² находится мраморная доска толщиной 1 см. Сопротивление необходимо рассчитать двумя способами, задаваясь: а) диэлектрической проницаемостью и удельным сопротивлением; б) только удельным сопротивлением.

2-57. Опишите медь и полиэтилен. Имеется коаксиальный кабель, радиус медной жилы которого 1 мм, а радиус оплетки 5 мм. Изоляция кабеля выполнена из полиэтилена. Найти длину, при которой сопротивление изоляции будет в 10¹⁰ раз больше продольного сопротивления медной жилы.

2-58. Опишите электроизоляционные картоны. Барьерная изоляция масляного трансформатора выполнена из картона марки А. Рассчитайте диапазон значений полного сопротивления 1 м² барьерной изоляции при изменении влагосодержания от 1 до 6 %.

2-59. Опишите кабельные изоляционные резины. Найдите погонное сопротивление изоляции коаксиального двухслойного кабеля, состоящего из резины РНИ и РТИ-0, толщиной 1 мм каждый слой при радиусе жилы 3 мм. Ближе к жиле находится резина с большей электрической прочностью.

2-60. Опишите композиционный электроизоляционный материал изофлекс и рассчитайте его диэлектрическую проницаемость, воспользовавшись моделью статистической смеси. Значения диэлектрической проницаемости компонентов примите минимальными, а объемную долю неорганического компонента 0,1.

3. Потери в проводниках

3.1. Теоретическая часть

Задачи данной темы относятся, в основном, к кратковременному нагреву проводников, когда можно пренебречь теплоотводом. При кратковременном нагреве справедливо уравнение теплового баланса:

$$j^2 \rho \tau = cd \Delta T, \quad (3.1)$$

где j – плотность тока в проводнике; ρ – удельное сопротивление проводника; c , d – его теплоемкость и плотность (произведение этих величин можно назвать объемной теплоемкостью); τ – время протекания тока; ΔT – разница между начальной и конечной температурами проводника.

Плотностью тока называется значение тока, протекающего через единицу поперечного сечения проводника. Обычная единица измерения плотности тока в проводниках А/мм².

Теплоёмкостью (удельной теплоёмкостью) называется энергия, которую нужно сообщить единице массы материала, чтобы повысить температуру материала на 1 К. Размерность Дж/кг·К.

Плотностью называется масса единицы объёма материала. Размерность кг/м³.

При нагреве проводника его удельное сопротивление изменяется в соответствии с температурным коэффициентом удельного сопротивления $TK\rho$. Поэтому соотношение (3.1) приобретает вид:

$$\frac{I^2}{S^2} = \frac{cd}{TK\rho_t \tau \rho_t} \ln \frac{TK\rho_t^{-1} - t + t_k}{TK\rho_t^{-1} - t + t_0}. \quad (3.2)$$

В выражении (3.2) I – ток; S – сечение проводника; $TK\rho_t$ и ρ_t – температурный коэффициент и удельное сопротивление, определенные при температуре t ; t_k и t_0 – конечная и начальная температуры проводника.

Температурный коэффициент удельного электрического сопротивления $TK\rho$ – это относительное изменение удельного сопротивления при увеличении температуры на 1 К. Размерность K^{-1} .

Для решения заданий может понадобиться формула для расчета мощностей однофазной сети ($P = IU = I^2R$) и трехфазной сети ($P_{3\phi} = 3IU_\phi$). Номинальное напряжение трёхфазной сети – это её линейное напряжение U_L , которое связано с фазным напряжением U_ϕ соотношением $U_L = \sqrt{3}U_\phi$.

При решении задач студент может контролировать результаты, сравнивая их с примерными значениями допустимых и предельных плотностей тока для проводов из различных материалов, которые указаны в приводимой ниже таблице.

При расчете нагревателей из нихрома, если известно сечение (диаметр) провода, следует вначале определить ток, текущий по фазе нагревателя, по току и сечению -- плотность тока, и сравнить последнюю с допустимыми значениями, указанными в таблице. Если расчетная плотность тока больше допустимой, то нагреватель следует конструировать из 2 или 3 параллельных проволок, плотность тока в суммарном сечении которых входит в допустимые пределы.

Допустимые и предельные плотности токов для проводов

Материал	Допустимая плотность тока (проводник не нагревается) А/мм ²	Предельная плотность тока (проводник сгорает) А/мм ²
Медь	4...10	100...200
Алюминий	3...8	75...150
Сталь	1...2	30...40
Нихром	15...35 (нагрев до $\approx 1000^\circ\text{C}$)	сгорает при превышении допустимой плотности тока

3.2. Задания для самостоятельного выполнения

3-01. Опишите алюминиевые сплавы. По трёхфазной системе шин электроустановки с номинальным напряжением 10 кВ передается мощность 10 МВт. Шины выполнены из алюминиевого сплава АДО, имеют прямоугольное сечение с размерами 4×40 мм² и температуру в установившемся режиме 20°C . Опишите физические, электрические свойства и область применения указанного сплава и определите потери мощности в шинах, если их длина 20 м.

3-02. Опишите физические, электрические свойства и область применения алюминия. Определите, какое значение превышал ток короткого замыкания в электрической сети, если время между началом замыкания и его отключением составило 0,12 с, а начальная температура алюминиевых проводов воздушной линии электропередачи была 40 °С. Дополнительные условия: при коротком замыкании в сети 110 кВ фазный провод из алюминия сечением 120 мм² нагрелся до температуры, составляющей 20 % от значения температуры плавления провода.

3-03. Опишите алюминий (физические и электрические свойства, область применения). Определите, до какой температуры нагреются алюминиевые провода электрической сети сечением 120 мм² при отключении короткого замыкания основной защитой через 0,08 с. А также определите температуру проводов в случае, когда основная защита отказывает и работает резервная со временем действия 0,5 с. Мощность трехфазного короткого замыкания в сети 110 кВ составляет 3 ГВт. Начальная температура проводов 30 °С.

3-04. Опишите медь и алюминий как материалы для изготовления проводов. Определите, какое сечение должен иметь алюминиевый провод, чтобы при токе короткого замыкания 10 кА, протекающем в течение 1 с, он нагрелся бы до той же температуры, что и медная шина. Медная шина прямоугольного сечения 40×4 мм² присоединена к алюминиевому проводу последовательно. Начальная температура проводов 10 °С.

3-05. Опишите физические и электрические свойства и область применения нихрома, в том числе сплава Х13Ю4. Определите максимальную длину нихромовой проволоки диаметром 0,5 мм из этого сплава для изготовления нагревателя мощностью 1 кВт на напряжение 220 В. Температура нагрева проволоки должна быть оптимальной, а плотность тока лежать в допустимом диапазоне.

3-06. Опишите физические и электрические свойства, область применения меди и алюминия. По трехфазной воздушной линии напряжением 380/220 В передается мощность 5 кВт. Два провода линии выполнены из проволоки АТ сечением 16 мм², а третий – из проволоки ММ диаметром 2 мм. Определите потери в перечисленных материалах при длине линии 100 м.

3-07. Опишите физические и электрические свойства, область применения алюминия и алюминиевых проводов. Мощность, передаваемая в отдельный коттедж, составляет 6 кВт. Питание осуществляется по двухпроводной линии напряжением 220 В длиной 0,5 км. Провода линии выполнены из алюминиевой проволоки марки АТ сечением 25 мм². Определите удельное сопротивление материала проволоки, сравните его с удельным сопротивлением чистого алюминия. Рассчитайте, каким должно быть

напряжение на подстанции, чтобы на электрощитке коттеджа оно было номинальным?

3-08. Опишите физические и электрические свойства и область применения нихрома, в том числе сплава X20H80. Какой минимальной длины нужно взять нихромовую проволоку из этого сплава, если ее диаметр 0,3 мм и из нее необходимо изготовить нагреватель на напряжение 220 В мощностью 1 кВт. Температура нагрева проволоки должна быть оптимальной, а плотность тока лежать в допустимом диапазоне.

3-09. Опишите физические и электрические свойства, область применения меди и полиэтилена низкого давления. Определите, каким должно быть сечение медного провода в полиэтиленовой изоляции, чтобы при токе короткого замыкания 2 кА, протекающего в течение 1 с, температура бы не превысила допустимую (длительную рабочую) для изоляции. Провод имеет начальную температуру 40 °С.

3-10. Опишите физические и электрические свойства, область применения меди и поливинилхлорида. Определите, через какое время может начать плавиться («течь») изоляция медной электропроводки. Электропроводка из медного изолированного провода сечением 2,5 мм² имеет поливинилхлоридную изоляцию. При коротком замыкании с током 100 А отключения автомата не произошло.

3-11. Опишите медь как материал для плавких вставок (физические и электрические свойства, область применения). Выберите диаметр медной проволоки для плавких вставок, которые за 0,5 с расплавились бы от тока в 2 раза превышающего ток нагрузки. Мощность трехфазной нагрузки 10 кВт, напряжение сети 380/220 В.

3-12. Опишите физические и электрические свойства, область применения алюминиевых сплавов, в том числе сплава АД 31. Определите потери мощности в шинах из этого сплава, если их длина 100 м. По двум шинам электроустановки постоянного тока напряжением 3,3 кВ передается мощность 6 МВт. Шины имеют прямоугольное сечение 5×50 мм² и температуру в установившемся режиме 20 °С.

3-13. Опишите физические и электрические свойства, область применения алюминия. Определите, какое максимальное сечение было у проводов воздушной линии электропередачи напряжением 220 кВ, если при коротком замыкании в сети, фазный провод, состоящий из двух алюминиевых проводов, нагрелся до температуры плавления? Ток короткого замыкания составил 17,7 кА, замыкание отключилось через 5 с, а начальная температура проводов была 30 °С.

3-14. Опишите алюминий как материал для изготовления проводов (физические и электрические свойства, область применения). Мощность трехфазного короткого замыкания в сети 220 кВ составляет 25 ГВт. Определите, существует ли опасность расплавления проводов из алюминия сечением $2 \times 70 \text{ мм}^2$ в случаях работы основной и резервной защит на отключение? Время отключения равно, соответственно, 0,12 и 0,7 с. Начальная температура проводов $10 \text{ }^\circ\text{C}$.

3-15. Опишите физические и электрические свойства, область применения меди и алюминия. Определите сечение медной шины при следующих условиях: к медной шине подсоединен алюминиевый провод сечением 120 мм^2 . При токе короткого замыкания 10 кА, протекающего в течение 1 с, медная шина нагревается до той же температуры, что и алюминиевый провод. Начальная температура проводов $30 \text{ }^\circ\text{C}$.

3-16. Опишите физические и электрические свойства, область применения нихрома, в том числе сплава ХН70Ю. Определите минимальное количество в метрах нихромовой проволоки диаметром 1 мм, необходимой для выполнения трехфазного нагревателя мощностью 10 кВт на напряжение 380/220 В.

3-17. Опишите медь и алюминий как материалы, применяемые для изготовления проводов (физические и электрические свойства, область применения). От трехфазной сети 380/220 В питается электропечь, потребляющая мощность 3 кВт. Проводка к электропечи выполнена двухжильным медным проводом (МТ) диаметром 1,78 мм и одножильным алюминиевым (проволока марки АМ) диаметром 4,5 мм. Определите потери мощности в электропроводке на длине 10 м от распределительного щитка до электропечи.

3-18. Опишите физические и электрические свойства, область применения алюминия. Определите сечение проводов, питающих животноводческую ферму, при условии, чтобы напряжение на оборудовании было не менее 380 В. Мощность работающего оборудования на животноводческой ферме составляет 20 кВт. Ферма питается от трехфазной сети с номинальным напряжением 0,4 кВ. Питающая линия выполнена из алюминиевых проводов марки А, проволоки марки АТ и имеет длину 2 км.

3-19. Опишите физические и электрические свойства, область применения нихрома, в частности, марки Х15Н60. Сделайте расчёты нагревателя из нихрома. Необходимо изготовить трехфазный нагреватель для сети 0,4 кВ мощностью 5 кВт. Для этой цели имеется проволока диаметром 0,3 мм. Определите сколько метров проволоки необходимо для изготовления трёхфазного нагревателя?

3-20. Опишите физические и электрические свойства, область применения алюминия и поливинилхлорида. Кабель с алюминиевой жилой и поливинилхлоридной изоляцией работает при длительно допустимой рабочей температуре. Сечение жилы 50 мм^2 . Определите, какой ток короткого замыкания сможет пропустить кабель в течение $0,5 \text{ с}$, чтобы температура изоляции не превысила предела ее текучести?

3-21. Опишите физические и электрические свойства, область применения алюминия и полиэтилена любого типа. Алюминиевая проводка сечением $2,5 \text{ мм}^2$ имеет изоляцию из полиэтилена высокого давления. При коротком замыкании, ток которого 50 А , не сработали автоматические выключатели. Определите, через какое время может начать плавиться изоляция?

3-22. Опишите медь и алюминий. Рассчитайте, каким должно быть сечение медной проволоки в предохранителе, чтобы при коротком замыкании в сети предохранитель бы расплавился через $0,5 \text{ с}$, а электропроводка нагрелась бы при этом с температуры 20 до 90°C ? Электропроводка выполнена алюминиевым проводом сечением $2,5 \text{ мм}^2$.

3-23. Опишите физические и электрические свойства нихрома и нихромовой проволоки из сплава Х20Н80. Определите, какой минимально возможный ток нагреет эту проволоку до предельной температуры за 1 с , если ее диаметр равен $0,6 \text{ мм}$?

3-24. Опишите физические и электрические свойства нихрома и конструкционной стали марки 10. Определите минимальный диаметр стальной проволоки, удельная выделяемая мощность в которой была бы равна удельной мощности, выделяемой в нихромовой проволоке из нихрома марки Х15Н60 диаметром $0,6 \text{ мм}$ при условии, что обе проволоки соединены последовательно.

3-25. Опишите алюминий как материал для проводов. Ток можно передать через землю при помощи алюминиевой оболочки кабеля или используя два полусферических заземлителя радиусом 3 м . Для последнего случая удельное сопротивление грунта равно $50 \text{ Ом}\cdot\text{м}$, а допустимая плотность тока с поверхности заземлителей по условию невысыхания грунта составляет $1 \text{ А}/\text{м}^2$. Определите сечение алюминиевой оболочки кабеля длиной 1 км , в которой выделяемая мощность в 40 раз меньше мощности, выделяемой при передаче тока через землю. Чему равна мощность, теряемая в оболочке?

3-26. Опишите алюминий как материал для проводов линий электропередачи. Провод линии электропередачи марки АС120/19 имеет стальной сердечник из 7 стальных проволок диаметром $1,88 \text{ мм}$ и навив из 26 алюминиевых проволок диаметром $2,7 \text{ мм}$. До какой температуры нагреются алюминиевые и стальные проволоки от тока короткого замыкания 50 кА за 1 с ,

если их начальная температура была $20\text{ }^{\circ}\text{C}$? Расчет провести, пренебрегая теплопроводностью. В качестве параметров стали принять: удельное сопротивление и плотность – для марки 15Х11МФ; теплоемкость и температурный коэффициент удельного сопротивления – для резистивного сплава Х13Ю4.

3-27. Опишите физические и электрические свойства стали и хлорированного полиэтилена, область их применения. Провод имеет 3 стальных жилы диаметром $0,2\text{ мм}$ каждая («сталь 10») и изоляцию из хлорированного полиэтилена ХПЭ. Сколько времени должен протекать по жиле ток 10 А , чтобы изоляция на границе с проводом нагрелась бы до значения длительной рабочей температуры полиэтилена? Теплоемкость и температурный коэффициент удельного сопротивления стали принять равными значениям этих величин для железа.

3-28. Между двумя коаксиальными кольцами из меди находится слой алюминия. Диаметр и длина внутреннего кольца 1 см . Опишите физические и электрические свойства алюминия и определите ток, который за 1 с доведет алюминий до плавления у внутреннего кольца

3-29. Опишите физические и электрические свойства меди и припоя ПОС-90, области применения. Решите с использованием найденных параметров задачу: Медный провод сечением 3 мм^2 и длиной 1 см запаивается припоем ПОС-90 в цилиндрическую втулку. При каком токе, протекающем от провода к втулке через 1 с , начнет плавиться припой?

3-30. Опишите свойства (физические и электрические) политетрафторэтилена (фторопласта) и алюминия. Рассчитайте сечение алюминиевой жилы у провода с изоляцией из фторопласта, при которой ток в 130 А , протекающей по жиле, нагреет провод за 1 с до значения длительной рабочей температуры фторопласта.

3-31. Опишите свойства меди и подберите среди электроизоляционных полимеров, применяемых для изоляции проводов, подходящие материалы для изоляции медного провода по условиям нагрева. Медный проводник сечением 1 мм^2 предназначен для односекундного протекания тока 100 А .

3-32. Изоляция алюминиевого провода выполнена из политрифторхлорэтилена. Опишите свойства алюминия и политрифторхлорэтилена и подберите такое сечение алюминия, при котором ток в 200 А за 1 с нагреет проводник до температуры, равной длительной рабочей политрифторхлорэтилена (при которой изоляция остается эластичной).

3-33. Опишите свойства меди. По катушке с медным проводом сечением $2,5\text{ мм}^2$ протекает постоянный ток 20 А . При этом в катушке выделяется

мощность 20 Вт. Определите массу меди в катушке. Нагревом провода пренебречь.

3-34. Опишите физические и электрические свойства вольфрама и молибдена. Определите длину раскаленной до 2000 °С вольфрамовой нити диаметром 0,02 мм в электролампочке мощностью 40 Вт. Какой в этих условиях была бы длина такой же нити из молибдена?

3-35. Опишите сталь марки 10 и медь. Провод для связи состоит из 3 стальных жил марки 10 диаметром 0,2 мм и 4 медных марки МТ диаметром 0,1 мм. Опишите сталь и медь как материалы для проводов и определите, до какой температуры нагреются проволоки при протекании по проводу в течение 0,1 с тока 100 А? Значения недостающих параметров для стали взять такими же, как для железа, начальную температуру принять равной 20 °С.

3-36. Опишите физические и электрические свойства, область применения меди и кабельной резины РТИ. Медный провод марки МТ сечением 0,75 мм² имеет изоляцию из кабельной резины типа РТИ-1. Какой ток должен протекать по жиле в течение 1 с, чтобы нагреть ее до длительной рабочей температуры, допускаемой резиной?

3-37. Опишите алюминий и полиэтилен. Определите ток, который за 0,5 с нагреет жилу алюминиевого проводника с изоляцией из полиэтилена до длительно допустимой рабочей температуры полиэтилена. Диаметр жилы 10 мм.

3-38. Опишите полиэтилен и хлорированный полиэтилен, а также медь. Определите, каким должен быть диаметр медной жилы с изоляцией из полиэтилена, чтобы при протекании по ней тока 350 А в течение 0,1 с ее температура не превысила бы длительной рабочей для изоляции.

3-39. Опишите поливинилхлорид и определите, во сколько раз и в какую сторону изменится сопротивление изоляции кабеля из этого материала, если от протекающего тока он нагреется до 140 °С. Какая плотность тока при этом будет в медной жиле, если время протекания тока составляет 1 с?

3-40. Опишите свойства меди, подберите и опишите материал для изоляции провода по условиям нагревостойкости. По медному проводу сечением 2,5 мм² в течение 1 с должен протекать ток 300 А.

3-41. Опишите свойства меди, полиэтилена и органосиликатных композиций, применяемых для изоляции проводов. Медный провод сечением 1 мм² изолирован полиэтиленом и по нему в течение 1 с протекает ток, нагревающий жилу до максимальной рабочей температуры полиэтилена. Во

сколько раз можно увеличить время протекания этого тока, если этот же провод изолировать стеклоэмалью ТК-40 с органосиликатной композицией?

3-42. Опишите политетрафторэтилен и изоляционные материалы высокой нагревостойкости. Высоконагревостойкий провод ПЭЖБ имеет сечение медной жилы 1 мм^2 . В течение $0,3 \text{ с}$ по нему протекает ток, разогревающий провод до максимально допустимой температуры. Какое сечение меди необходимо было бы для этого провода, если его изоляция была бы выполнена из политетрафторэтилена?

3-43. Опишите физические и электрические свойства, область применения нихрома, в частности, сплава Х13Ю4. Определите массу нихромовой проволоки диаметром $0,6 \text{ мм}$ для изготовления нагревателя мощностью 1 кВт на напряжение 220 В .

3-44. Опишите физические и электрические свойства, область применения алюминия и определите потери энергии в электропроводке к коттеджу за 1 месяц. Мощность, передаваемая в коттедж, составляет 10 кВт . Питание осуществляется по двухпроводной линии напряжением 220 В длиной $0,5 \text{ км}$, выполненной из алюминиевых проводов марки А сечением 16 мм^2 , свитых из проволоки марки АТ.

3-45. Опишите физические и электрические свойства, область применения нихромовой проволоки из сплава Х20Н80. Сколько граммов такой проволоки диаметром 1 мм необходимо для того, чтобы изготовить нагреватель на напряжение 220 В мощностью 3 кВт ?

3-46. Опишите физические и электрические свойства, область применения меди и полиэтилена и определите плотность тока, при которой через 1 с после начала протекания тока температура бы не превышала допустимое значение для изоляции. Медный провод в полиэтиленовой изоляции имеет начальную температуру $40 \text{ }^\circ\text{С}$.

3-47. Опишите физические и электрические свойства, область применения алюминия и полиэтилена любого типа. Определите, через какое время начнет плавиться изоляция при коротком замыкании в алюминиевой проводке. Алюминиевая проводка сечением $1,5 \text{ мм}^2$ имеет полиэтиленовую изоляцию из ПЭСД. При коротком замыкании, ток которого 100 А , не сработали предохранители.

3-48. Опишите свойства алюминия и меди. Электропроводка выполнена алюминиевым проводом сечением $1,5 \text{ мм}^2$. Каким должно быть сечение медной проволоки в предохранителе, чтобы при коротком замыкании в сети она бы расплавилась за $0,1 \text{ с}$, а проводка нагрелась бы при этом с температуры 20 до 90

°С? Опишите физические и электрические свойства, а также область применения названных материалов.

3-49. Опишите физические и электрические свойства фторопласта. Найдите сечение медной жилы провода с изоляцией из фторопласта-4, при котором ток в 300 А, нагреет жилу за 1 с до предельной температуры, допускаемой фторопластом-4.

3-50. Опишите физические, электрические свойства и области применения стального (марка «сталь10») алюминиевого и медного проводов и определите значения токов, при которых погонные потери составят 1кВт/км при сечениях, равных для всех проводов 6 мм².

3-51. Опишите физические и электрические свойства стали и полипропилена, область их применения. Провод имеет стальную жилу диаметром 0,2 мм (марка «сталь 10», теплоемкость и температурный коэффициент сопротивления принять такими же, как у железа) и изоляцию из полипропилена. Сколько времени должен протекать по жиле ток 5 А, чтобы изоляция на границе с проводом начала бы плавиться?

3-52. Между двумя коаксиальными кольцами из меди находится слой расплавленного алюминия при температуре на 10 °С выше температуры плавления. Диаметр и длина внутреннего кольца 1 см. Опишите физические и электрические свойства алюминия и меди и определите ток, который за 1 с доведет до плавления медь внутреннего кольца.

3-53. Опишите физические и электрические свойства меди и припоя ПОС-90, а также области применения. Медный провод диаметром 5 мм и длиной 1 см запаивается припоем ПОС-90 в цилиндрическую втулку. Через сколько времени от тока 4 кА, протекающего от провода к втулке, начнет плавиться припой, если его начальная температура была 150 °С?

3-54. Опишите свойства алюминия и определите его массу в катушке из алюминиевого провода. По катушке с алюминиевым проводом сечением 2,5 мм² протекает постоянный ток 15 А. При этом в катушке выделяется мощность 40 Вт.

3-55. Опишите физические и электрические свойства вольфрама и константана. Определите соотношение масс последовательно соединенных проволок из этих материалов при одинаковых сечении и выделяемой мощности.

3-56. Опишите медь и сложные эфиры поливинилового спирта. Медный провод покрыт лаком "метальвин" на основе поливинилацетата. Подберите

такое сечение меди, при котором ток в 485 А за 1 с нагреет проводник до температуры, равной длительной рабочей для лака.

3-57. Опишите свойства никеля, и высоконагревостойкую стеклокерамическую изоляцию проводов. Выберите материал для изоляции никелевого провода по условиям нагрева. Никелевый провод диаметром 0,5 мм предназначен для односекундного протекания тока 23 А.

3-58. Опишите физические и электрические свойства стали и темплена термостойкого, а также область их применения. Провод имеет стальную жилу диаметром 0,2 мм (марка «сталь 10», теплоемкость и температурный коэффициент сопротивления принять для железа) и изоляцию из темплена. Какой ток должен протекать по жиле, чтобы изоляция на границе с проводом за 1 с нагрелась бы до максимальной рабочей температуры темплена?

3-59. Опишите физические и электрические свойства фторопласта. Найти ток, протекающей по алюминиевой жиле провода с изоляцией из фторопласта, при котором жила сечением 2,5 мм² нагреется за 1 с до предельной температуры, допускаемой фторопластом-2М.

3-60. Опишите основные свойства сплавов на никелевой и медноникелевой основе для термопар. Выберите проволоку из такого сплава, в которой будут наибольшие удельные потери при температуре 800 °С.

4. Магнитные материалы и их свойства

4.1. Теоретическая часть

К магнитным материалам относятся материалы с упорядоченной магнитной структурой и большой магнитной проницаемостью: ферромагнетики и ферримагнетики. Основной особенностью магнитных материалов является высокая магнитная проницаемость μ и зависимость магнитной проницаемости от напряженности магнитного поля.

Магнитная проницаемость μ – это физическая величина, характеризующая изменение магнитной индукции при воздействии магнитного поля. Для изотропных сред магнитная проницаемость равна отношению индукции в среде B к напряженности внешнего магнитного поля H и к магнитной постоянной μ_0 :

$$\mu = \frac{B}{\mu_0 H}. \quad (4.1)$$

Магнитная проницаемость – величина безразмерная. При малой напряженности внешнего магнитного поля (или его отсутствии), когда

магнитные моменты доменов магнитного материала образуют замкнутые магнитные цепи, магнитная проницаемость минимальна и носит название «начальная магнитная проницаемость» $\mu_{нач}$. Увеличение напряженности магнитного поля приводит к необратимому смещению доменных границ, ориентации векторов намагниченности доменов по полю и увеличению магнитной проницаемости вплоть до «максимальной магнитной проницаемости» $\mu_{макс}$. При дальнейшем увеличении напряженности внешнего магнитного поля происходит полная ориентация магнитных моментов доменов по полю и материал переходит в состояние технического насыщения. Магнитная проницаемость уменьшается, стремясь к 1.

В силу зависимости магнитной проницаемости от напряженности магнитного поля зависимость индукции в материале от напряженности внешнего магнитного поля нелинейна. Эта зависимость называется «начальной кривой намагничивания».

Комплекс магнитных свойств магнитного материала описывается кривыми намагничивания-размагничивания (зависимостью индукции в материале от напряженности переменного магнитного поля) – петлями гистерезиса (hysteresis – отставание, запаздывание). Наиболее информативной является предельная петля гистерезиса, когда индукция в материале достигает максимально возможного значения для образца (материал полностью намагничен). Предельная петля гистерезиса определяет следующие параметры магнитного материала:

- начальная магнитная проницаемость $\mu_{нач}$ (при напряженности магнитного поля на начальной кривой намагничивания близкой к нулю);
- максимальная магнитная проницаемость $\mu_{макс}$ (в точке кривой намагничивания с максимальным значением производной);
- индукция насыщения $B_{нас}$ (индукция полного намагничивания образца. Индукция технического насыщения – значение индукции магнитного материала, определяемое экстраполяцией из области напряжённости магнитных полей, соответствующих намагниченности технического насыщения, к нулевому значению напряжённости поля);
- остаточная индукция $B_{ост}$ (индукция, сохраняющаяся в магнитном материале после намагничивания его до намагниченности технического насыщения и уменьшения напряженности магнитного поля в нём до нуля);
- коэрцитивная сила H_c (величина, равная напряжённости магнитного поля, необходимого для изменения магнитной индукции от остаточной индукции до нуля. По значению коэрцитивной силы различают магнитомягкие $H_c \leq 800$ А/м и магнитотвёрдые $H_c \geq 4000$ А/м материалы);
- магнитные потери на гистерезис – потери энергии на перемагничивание, пропорциональные площади, охватываемой петлей гистерезиса.

Петля гистерезиса представлена на рис. 4.1:

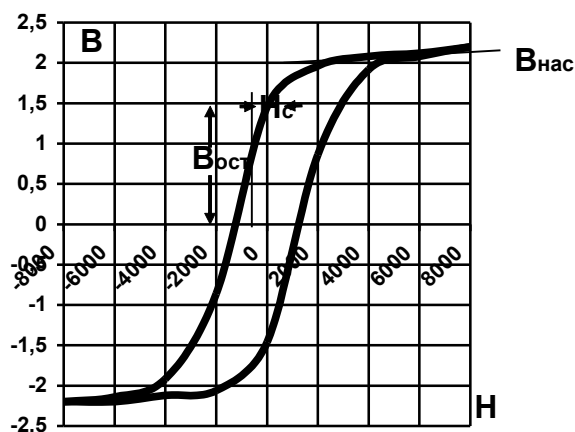


Рис 4.1. Предельная петля гистерезиса

Магнитные потери бывают двух видов:

- потери на перемагничивание (на гистерезис) – потери энергии, нагревающие магнитный материал и связанные с перестройкой доменов в переменном магнитном поле. Удельная мощность потерь, расходуемых на гистерезис, пропорциональна максимальному значению индукции $B_{макс}$ (возникающей в материале при перемагничивании) в степени 1,6...2,0 и частоте f :

$$P_{гист} \sim B^{(1,6...2)}f; \quad (4.2)$$

- потери на вихревые токи – потери энергии, нагревающие магнитный материал и обусловленные индуцированными в нем переменным магнитным полем вихревыми токами, большими при большей электропроводности материала. Удельная мощность потерь, расходуемых на вихревые токи, пропорциональна квадрату максимального значения индукции $B_{макс}$ (возникающей в материале при перемагничивании) и квадрату частоты f :

$$P_{вихр} \sim B^2 f^2. \quad (4.3)$$

4.2. Задания для самостоятельного выполнения

4-01. Опишите электротехнические нелегированные стали. Постройте кривую намагничивания электротехнической нелегированной стали (действующий ГОСТ 11036-75) марки 10864 в постоянном поле.

4-02. Опишите электротехнические горячекатаные стали. Постройте зависимость относительной магнитной проницаемости от напряженности магнитного поля для любого представителя электротехнической стали для листа толщиной 0,35 мм.

4-03. Опишите электротехнические холоднокатаные стали. Определите удельные потери в магнитопроводе из листов холоднокатаной стали типа 2 (действующий ГОСТ 21427.2-83) с содержанием кремния до 0,4 %, толщиной листа 0,65 мм, при напряженности поля 1000 А/м, частоте 50 Гц, учитывая коэффициент заполнения, равный 0,93.

4-04. Опишите электротехнические горячекатаные стали. Постройте кривую зависимости удельных потерь в горячекатаной стали любой марки при толщине листа 0,5 мм от напряженности магнитного поля в диапазоне 2500...30000 А/м при частоте 50 Гц.

4-05. Опишите электротехнические горячекатаные стали. В магнитопроводе объемом 0,51 м³, выполненном из листов 0,35 мм горячекатаной стали любой марки с коэффициентом заполнения 0,98, общие потери в стали составляют 13 кВт. Определите напряженность магнитного поля.

4-06. Опишите электротехнические горячекатаные стали. В сталях для переменных полей третья цифра марки, равная 0 или 1, означает, что удельные потери нормируют при частоте 50 Гц. Полагая, что основную массу составляют потери на вихревые токи, найти для любой стали данного типа значения удельных потерь для частоты 400 Гц при напряженности магнитного поля 2500 А/м и толщине листа 0,35 мм.

4-07. Опишите электротехнические стали с нормированными свойствами в переменных полях. Полагая, что все потери определяются вихревыми токами, определите удельные потери для стали 3441 с толщиной листа 0,03 мм при напряженности магнитного поля 2500 А/м и частоте 3000 Гц. Определите при этих условиях относительную магнитную проницаемость стали.

4-08. Опишите магнитомягкие сплавы с прямоугольной петлей гистерезиса. Определите, во сколько раз магнитная индукция в сердечнике из лент толщиной 0,01 мм сплава 79 НМ (действующий ГОСТ 10160-75) при напряженности магнитного поля 7 А/м будет меньше индукции насыщения. Магнитную проницаемость принять равной начальной.

4-09. Опишите магнитомягкие сплавы с повышенным электрическим сопротивлением. Определите, во сколько раз напряженность магнитного поля при индукции, близкой к индукции насыщения, больше коэрцитивной силы для

ленты толщиной 0,50 мм из сплава 50НХС класса II, полагая, что относительная магнитная проницаемость достигла значений начальной.

4-10. Опишите магнитомягкие сплавы с низкой остаточной индукцией. У сплава марки 47НК сняли кривую намагничивания при температуре 20 °С в интервале напряженностей магнитного поля 100...1000 А/м. Затем, не ослабляя напряженности, охладили образец до 60 °С и сняли обратный ход кривой. Воспроизведите на графике результаты опыта.

4-11. Опишите марганцево-цинковые ферриты. Постройте кривую намагничивания ферритового стержня марки 3000НМ при частоте 0,1 МГц в диапазоне напряженности поля 0...32 А/м.

4-12. Опишите никель-цинковые ферриты. Считая температурный коэффициент магнитной проницаемости неизменным в диапазоне напряженностей магнитного поля 0...10 А/м, постройте зависимость магнитной индукции в феррите 2000НН от температуры при напряженности поля 8 А/м и в диапазоне температур 0...70 °С. Что произойдет при нагревании образца до 100 °С?

4-13. Опишите ферриты для телевизионной техники. У сердечника из феррита группы IV типа 2500НМС1 при температуре 20 °С сняли кривую зависимости относительной магнитной проницаемости от напряженности магнитного поля в диапазоне 0...320 А/м, после чего феррит нагрели до 100 °С и сняли обратный ход кривой. Постройте полученные кривые.

4-14. Опишите ферриты для телевизионной техники. Определите, во сколько раз отличаются магнитные потери двух образцов феррита IV группы типа 2500НМС1, если первый имеет диаметр 0,8 см, длину 10 см и находится в поле напряженностью 30 А/м, а второй, соответственно, 0,5 см, 8 см и 40 А/м. Температура комнатная (25 °С), частота 16 кГц.

4-15. Опишите ферриты для импульсных трансформаторов. Определите оптимальные значения магнитной индукции в ферритовом сердечнике из феррита группы V марки 300ННИ при частоте 0,5...5 кГц.

4-16. Опишите ферриты для датчиков температуры. При нагреве масла в трансформаторе выше 70 °С необходимо включать охлаждающие вентиляторы. Если использовать в качестве датчика катушку с ферритовым сердечником, то какую марку феррита следует выбрать?

4-17. Опишите магнитодиэлектрики из пермаллоя. Постройте петлю гистерезиса для магнитодиэлектрика из пермаллоя марки П-250.

4-18. Опишите магнитотвердые материалы. Определите значение относительной магнитной проницаемости магнитотвердого сплава “железо-хром-кобальт” марки 28Х10К в точке кривой размагничивания, где произведение индукции в материале на напряженность магнитного поля максимально.

4-19. Опишите термомагнитные материалы. Постройте зависимость магнитной индукции от температуры для термомагнитного материала 33НХЗ при напряженности магнитного поля 112 кА/м.

4-20. Опишите ферриты с прямоугольной петлей гистерезиса. Постройте предельные петли гистерезиса для феррита типа ППГ марки 100П.

4-21. Опишите аморфные магнитные материалы. Сердечник из аморфного магнитного сплава марки 10НСР имеет площадь поперечного сечения 1 см² и общую длину 10 см и работает при индукции 0,1 Тл. Постройте зависимость магнитных потерь в этом сердечнике от частоты.

4-22. Опишите аморфные магнитные материалы. Масса сердечника из аморфного магнитного сплава 10НСР 100 г. Определите зависимость магнитных потерь в нем от напряженности магнитного поля в диапазоне 0...120 А/м при частоте 10 кГц.

4-23. Опишите ферриты для импульсных трансформаторов. Импульсный трансформатор на сердечнике из феррита 1000ННИ объемом 12 см³ работает при температуре 20 °С. Постройте зависимость потерь в нем от напряженности магнитного поля для импульсов длительностью 3 мкс с частотой следования 5 кГц.

4-24. Опишите электротехнические стали с нормированными свойствами в постоянных полях. Определите по имеющимся данным значения магнитной проницаемости сортовой электротехнической стали марки 10864 (действующий ГОСТ 11036-75) в диапазоне напряженности магнитного поля 500...30000 А/м.

4-25. Опишите электротехнические стали с нормированными свойствами в постоянных полях. Определите магнитную проницаемость электротехнической стали любого типа для толщин 0,20 и 0,35 мм при нормируемой магнитной индукции.

4-26. Выберите среди магнитомягких сплавов и опишите физические, механические электрические и магнитные свойства такой марки, у которой в слабом магнитном поле магнитная проницаемость наивысшая. Вычислите для этого сплава необходимую напряженность магнитного поля, при которой происходит насыщение магнитопровода.

4-27. Среди магнитомягких сплавов выберите и опишите физические, механические, электрические и магнитные свойства такой марки, у которой электрическое сопротивление наибольшее. Вычислите для этой марки индукцию в магнитопроводе при напряженности магнитного поля 800 А/м и сравните ее с индукцией насыщения.

4-28. Выберите среди магнитомягких сплавов с высокой магнитной проницаемостью и повышенной индукцией насыщения марку с максимальной индукцией насыщения. Опишите физические, механические, электрические и магнитные свойства этой марки и определите, при какой напряженности магнитного поля произойдет полное намагничивание сплава.

4-29. Среди магнитомягких сплавов с высокой коррозионной стойкостью выберите сплав с наиболее узкой петлей гистерезиса, опишите его физические, механические, электрические и магнитные свойства и постройте петлю гистерезиса для этого сплава.

4-30. Среди магнитомягких ферритов I группы выберите феррит с максимальной начальной магнитной проницаемостью. Опишите его состав, свойства и постройте для него петлю гистерезиса.

4-31. Опишите электротехнические стали с нормированными свойствами в постоянных полях. Постройте кривую намагничивания электротехнической нелегированной стали (действующий ГОСТ 3836-83) марки 21864 в постоянном магнитном поле.

4-32. Опишите электротехнические стали с нормированными свойствами в постоянных полях. Постройте графики зависимости относительной магнитной проницаемости стали от напряженности магнитного поля для любой марки горячекатаной легированной стали толщиной 0,35 и 0,20 мм.

4-33. Опишите электротехнические стали с нормированными свойствами в переменных полях. Определите потери в 1 м³ стального магнитопровода, имеющего коэффициент заполнения сталью 0,95. Магнитопровод выполнен из холоднокатаной анизотропной стали с содержанием кремния 2,8...3,8 % при напряженности магнитного поля 100 А/м и частоте 50 Гц. Порядковый номер типа стали 8, толщина листа 0,27 мм.

4-34. Опишите электротехнические стали с нормированными свойствами в переменных полях. Постройте кривую зависимости удельных потерь в холоднокатаной изотропной стали (действующий ГОСТ 21427.2-83) марки 2012 с толщиной листа 0,65 мм от напряженности магнитного поля в диапазоне 1000-30000 А/м при частоте 50 Гц.

4-35. Опишите электротехнические стали с нормированными свойствами в переменных полях. В магнитопроводе объемом $0,21 \text{ м}^3$, выполненном из листов холоднокатаной изотропной стали марки 2212 (действующий ГОСТ 21427.2-83) толщиной $0,5 \text{ мм}$ с коэффициентом заполнения $0,95$, общие потери составляют $7,8 \text{ кВт}$. Определите напряженность магнитного поля.

4-36. Опишите электротехнические стали с нормированными свойствами в переменных полях. В сталях, используемых в переменных полях, третья цифра марки, равная 2, означает, что удельные потери нормируют для частоты 400 Гц . Полагая, что основную массу потерь составляют потери на вихревые токи, найдите для стали марки 1521 с толщиной листа $0,35 \text{ мм}$ потери при частоте 50 Гц и напряженности магнитного поля 2500 А/м и сравните их с потерями для стали марки 1511.

4-37. Опишите электротехнические стали с нормированными свойствами в переменных полях. Полагая, что все потери определяются вихревыми токами, найдите удельные потери для стали 3441 с толщиной листа $0,01 \text{ мм}$ при напряженности магнитного поля 2500 А/м и частоте 3000 Гц . Определите при этом относительную магнитную проницаемость стали.

4-38. Опишите магнитомягкие сплавы с наивысшей магнитной проницаемостью в слабых магнитных полях. Сердечник выполнен из листов сплава 80 НХС и индукция в нем составляет $0,14$ от максимально возможной. Определите напряженность магнитного поля.

4-39. Опишите магнитомягкие сплавы с высокой магнитной проницаемостью и повышенной индукцией насыщения. Полагая, что при индукции, близкой к индукции насыщения, относительная магнитная проницаемость равна начальной, определите для прутка из сплава 50Н, во сколько раз напряженность магнитного поля при насыщении будет больше коэрцитивной силы.

4-40. Опишите магнитомягкие сплавы с низкой остаточной индукцией. У сплава марки 64Н сняли кривую намагничивания при комнатной температуре в диапазоне напряженностей магнитного поля от 50 до 500 А/м . Затем, не ослабляя напряженности, нагрели образец до $120 \text{ }^\circ\text{С}$ и сняли при этой температуре обратный ход кривой. Постройте на графике результаты опыта.

4-41. Опишите никель-цинковые ферриты. Постройте кривую намагничивания ферритового образца марки 1000НН при частоте $0,1 \text{ МГц}$ в диапазоне напряженностей магнитного поля от 0 до 32 А/м .

4-42. Опишите марганцево-цинковые ферриты. Полагая температурный коэффициент магнитной проницаемости феррита 3000НМ не зависящим от

напряженности магнитного поля, постройте зависимость магнитной индукции от температуры при напряженности 16 А/м в диапазоне температур 0...140 °С.

4-43. Опишите ферриты для телевизионной техники. Образец из феррита IV группы марки 3000 НМС нагрели до 120 °С и при этой температуре сняли зависимость магнитной проницаемости от напряженности магнитного поля в диапазоне 0...240 А/м, после чего, не снижая напряженности, образец охладили до комнатной температуры и сняли обратный ход кривой. Постройте на графике полученные зависимости.

4-44. Опишите ферриты, использовавшиеся для телевизионной техники. Определите, во сколько раз отличаются магнитные потери двух образцов феррита группы IV типа 3000НМС, если один из них имеет диаметр 0,5 см и длину 5 см и находится в поле напряженностью 20 А/м, а другой, соответственно, 1 см, 10 см и 40 А/м? Температура 120 °С, частота 16 кГц.

4-45. Опишите ферриты для импульсных трансформаторов. Определите диапазон возможных значений индукции в ферритовом сердечнике из феррита V группы марки 1100НМИ, работающем при оптимальной напряженности.

4-46. Опишите ферриты для датчиков температуры. Электрошкаф для просушки образцов должен включаться при температуре 85...95 °С и выключаться при нагреве свыше 200 °С. Для управления этим режимом используются две катушки с ферритовыми сердечниками. Какие марки ферритов использованы в этих катушках?

4-47. Опишите магнитодиэлектрики из пермаллоя. Постройте петлю гистерезиса для сердечника из пермаллоя марки ПК-60.

4-48. Опишите магнитотвердые материалы из сплавов системы ЮНДК. Определите значение магнитной проницаемости магнитотвердого сплава ЮНДК18 по кривой размагничивания в точке с максимальным значением произведения индукции в материале на напряжённость магнитного поля.

4-49. Опишите термомагнитные материалы. Постройте зависимость магнитной индукции от температуры в термомагнитном материале 28НХ4С при напряженности магнитного поля 112 кА/м.

4-50. Опишите ферриты с прямоугольной петлей гистерезиса. Постройте предельные петли гистерезиса для феррита типа ППГ марки 5ВТ.

4-51. Опишите аморфные магнитные материалы. Сердечник из аморфного магнитного сплава марки 10НСР имеет площадь поперечного сечения 60 мм² и общую длину 500 мм. Постройте зависимость потерь в этом сердечнике от индукции при частоте 10 кГц.

4-52. Опишите аморфные магнитные материалы. На сердечник из аморфного магнитного сплава марки 10НСР весом 150 г воздействует магнитное поле напряженностью 80 А/м. Постройте зависимость потерь в нем от частоты в диапазоне 1...10 кГц.

4-53. Опишите ферриты для импульсных трансформаторов. Сердечник импульсного трансформатора изготовлен из феррита марки 1100НМИ и имеет объем 16 см³. Постройте зависимость потерь в нем от напряженности импульсного магнитного поля при длине импульса 3 мкс, частоте следования 5 кГц и температуре 40 °С.

4-54. Опишите электротехнические стали с нормированными свойствами в постоянных полях. Постройте кривую намагничивания сортовой электротехнической стали (действующий ГОСТ 11036-75) марки 11895 для диапазона напряженностей магнитного поля от 500 до 2500 А/м.

4-55. Опишите электротехнические стали с нормированными свойствами в постоянных полях. Как изменится значение относительной магнитной проницаемости электротехнической стали, измеренной при нормируемой магнитной индукции, если ее толщину изменить с 0,20 до 0,35 мм?

4-56. Опишите магнитодиэлектрики из ферритовых порошков. Выберите самый легкий из бариевых порошкообразных ферритов и опишите его свойства.

4-57. Среди магнитотвердых сплавов найдите и опишите сплавы системы железо-никель-алюминий-кобальт (ЮНДК). Выберите среди них сплав с максимальной удельной магнитной энергией и определите значение магнитной проницаемости при комнатной температуре и напряженности магнитного поля 40 кА/м.

4-58. Опишите магнитотвердые ферриты. Выберите среди магнитотвердых ферритов по ГОСТ 24063-80 марку с минимальным значением коэрцитивной силы и вычислите для этой марки значение магнитной проницаемости при напряженности магнитного поля 60 кА/м.

4-59. Описать термомагнитные материалы, называемые термаллоями. Составьте для них таблицу значений магнитной проницаемости при разных температурах при напряженности магнитного поля 8 кА/м.

4-60. Опишите ферриты с прямоугольной петлей гистерезиса. Выберите среди них марку с минимальным удельным электрическим сопротивлением и построьте для нее петлю гистерезиса.

5. Диэлектрические потери

5.1. Теоретическая часть

Диэлектрические потери – это потери энергии в диэлектрике, находящемся в электрическом поле. Энергия электрического поля расходуется на нагрев диэлектрика.

Наибольшие потери бывают при переменном электрическом поле. Энергия переменного электрического поля расходуется на поляризацию и электропроводность диэлектрика и за счет указанных явлений нагревает диэлектрик.

При постоянном напряжении потери зависят только от тока проводимости:

$$P_{пост} = \frac{U^2}{R}$$

или в удельных величинах:

$$P_{пост. уд} = \frac{E^2}{\rho_v}. \quad (5.1)$$

где U – напряжение, приложенное к изоляционной конструкции; R – сопротивление изоляционной конструкции; E – напряженность электрического поля в материале; ρ_v – удельное объёмное сопротивление диэлектрика.

При переменном напряжении к потерям от проводимости добавляются потери от поляризации, характеризующиеся углом диэлектрических потерь δ . Диэлектрические потери на переменном напряжении рассчитываются по формулам:

$$P_{перем} = U^2 \omega C \operatorname{tg} \delta; \quad P_{перем. уд} = E^2 \omega \epsilon_0 \epsilon \operatorname{tg} \delta, \quad (5.2)$$

где C – ёмкость изоляционной конструкции; ω – круговая частота ($\omega = 2\pi f$); δ – угол диэлектрических потерь.

Углом диэлектрических потерь δ называют угол, дополняющий до 90° угол сдвига между током и напряжением в диэлектрике.

Если диэлектрик представить параллельной схемой замещения с емкостью C и сопротивлением R , то

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{1}{\omega CR}. \quad (5.3)$$

В случае, когда от нагревающегося в электрическом поле диэлектрика нет теплоотвода, диэлектрические потери полностью расходуются на нагрев

изоляции. При этом можно записать уравнение теплового баланса, где в левой части представлен расход электрической энергии, а в правой – затраты энергии на нагрев:

$$P_{\text{потерь}} \cdot t_{\text{сек}} = cd\Delta T^0, \quad (5.4)$$

где c , d – теплоемкость и плотность материала; $t_{\text{сек}}$ – время нагрева диэлектрическими потерями; ΔT^0 – разность конечной и начальной температур.

В заданиях также используется постоянная времени релаксации:

$$\tau = \varepsilon_0 \varepsilon \rho = CR, \quad (5.5)$$

с помощью которой можно определить время разряда с напряжения U_0 до напряжения U заряженной изоляции через собственное сопротивление.

5.2. Задания для самостоятельного выполнения

5-01. Отрезок высокочастотного коаксиального кабеля длиной 100 м имеет диаметр жилы 1 мм и диаметр оболочки 10 мм. Изоляция между жилой и оболочкой (экраном) выполнена из фторопласта-4. При заземлённом экране кабель заряжается до напряжения на жиле 200 В, после чего источник питания отключается. Через час измерение показало, что напряжение составило 5 В. Опишите указанный материал (физические, электрические свойства и область применения), определите сопротивление изоляции при минимальном значении диэлектрической проницаемости. Рассчитайте удельное объёмное сопротивление изоляции и сравните его с удельным сопротивлением фторопласта.

5-02. Сопротивление изоляции коаксиального кабеля, выполненной из полиэтилена высокого давления ПЭВД-102-01К, составляет 200 ГОм при длине кабеля 100 м, диаметре жилы 1 мм и диаметре оболочки 10 мм. Кабель заряжается до напряжения 220 В между жилой и экраном, после чего источник питания отключается. Опишите указанный материал (физические, электрические и область применения) и определите, через какое время напряжение между жилой и экраном станет равным 100 В, если диэлектрическую проницаемость и удельное сопротивление принять минимальными для этого ПЭ. Сравните расчетное значение удельного объёмного сопротивления изоляции со справочным.

5-03. Сопротивление изоляции коаксиального кабеля, выполненной из темплен, составляет 170 ГОм. Опишите указанный материал (физические, электрические и область применения) и определите мощность диэлектрических потерь в кабеле при частоте 10^6 Гц и напряжении 100 В.

5-04. Мощность диэлектрических потерь в коаксиальном кабеле при частоте 10^6 Гц и напряжении 100 В составляет 1 Вт. Изоляция кабеля выполнена из темпленя термостойкого. Опишите указанный материал (физические, электрические и область применения) и определите сопротивление изоляции кабеля.

5-05. Сопротивление изоляции высоковольтного устройства, выполненной из кремнепласта любой марки, составляет 1 ГОм. Опишите указанный материал (физические, электрические и область применения) и определите диапазон диэлектрических потерь в нем при частоте 10^6 Гц и напряжении 1 кВ.

5-06. Определите удельные диэлектрические потери в жидкой изоляции из кремнийорганической полиэтиленсилоксановой жидкости ПЭС-3 при температурах жидкости от 20 до 100 °С, частоте 100 Гц и напряженности поля 1 кВ/мм. Опишите указанный материал (физические, электрические свойства и область применения) и оцените значение удельного сопротивления жидкости при температуре 100 °С, полагая диэлектрическую проницаемость независимой от частоты в диапазоне 50-100 Гц и от температуры в диапазоне 20...100 °С. Схему замещения диэлектрика принять параллельной.

5-07. Плоский конденсатор с изоляцией из хлорированного полиэтилена имеет площадь пластин 1 м^2 и расстояние между пластинами 1 мм. Опишите указанный материал (физические, электрические и область применения) и определите, как изменится мощность диэлектрических потерь в нём при напряжении на пластинах 10 кВ, если рабочая частота изменится со значения 1 кГц до 1 МГц.

5-08. Опишите физические, электрические свойства и область применения таких материалов как поливинилхлорид и политрифторхлорэтилен. Определить максимально возможное изменение сопротивления изоляции высоковольтного устройства при замене материала изоляции с поливинилхлорида на политрифторхлорэтилен, если диэлектрические потери в нём при напряжении 1 кВ и частоте 50 Гц изменились при этом с 2,8 до 4 Вт?

5-09. Изоляция плоских конденсаторов с площадью пластин 1 м^2 и расстоянием между ними 1 мм выполнена из природного мусковита. При напряжении 380 В и частоте 50 Гц разброс диэлектрических потерь у разных образцов составляет от $1,125 \cdot 10^{-3}$ до $2,25 \cdot 10^{-2}$ Вт. Опишите физические, электрические свойства и область применения указанного материала и рассчитайте значение его диэлектрической проницаемости.

5-10. Диэлектрические потери в куске мрамора при частоте 50 Гц и напряжении 6,3 кВ составляет 0,001 Вт. Определите физические и

электрические свойства и определите сопротивление этого куска (при той же схеме измерения) принимая значения удельных параметров равными минимальным табличным.

5-11. К поверхности двух сложенных вместе листов электротехнического стекла, содержащих, соответственно, 40 и 80 % алюмосиликатов, каждое толщиной 2 мм и площадью 0,6 м², приложено напряжение 660 В, частотой 10³ Гц. Опишите физические, электрические свойства и область применения указанных материалов и рассчитайте диэлектрические потери в этой системе при минимальных значениях угла диэлектрических потерь.

5-12. Из эпоксидной смолы ЭД-20 (с отвердителем МТГФА) и мраморной крошки ЭМК-5 изготовлена доска площадью 1 м² и толщиной 2 см. Опишите физические, электрические свойства и область применения указанных материалов и определите максимально возможное значение диэлектрических потерь в такой доске при напряжении 6 кВ и частоте 50 Гц если объёмное содержание мрамора равно 80 %. Схему замещения диэлектрика принять параллельной.

5-13. Керамический конденсатор ёмкостью 1 мкФ заряжается до напряжения 100 В и подключается к вольтметру с внутренним сопротивлением 10 МОм. Через 10 с напряжение заряда конденсатора стало равным 10 В. Известно, что диэлектриком в конденсаторе служит керамика на основе соединений титана (действующий ГОСТ 20419-83). Опишите указанную керамику (физические, электрические свойства и область применения) и определите марку керамики.

5-14. Две пластины из электротехнического стекла толщиной 5 мм с содержанием алюмосиликатов 50 % склеены эпоксидным компаундом К-153 с толщиной проклейки 0,5 мм. Перпендикулярно плоскости стёкол приложено напряжение 1 кВ частотой 10 кГц. Опишите физические, электрические свойства и область применения указанных материалов и при условии независимости параметров материалов от частоты определите, что будет нагреваться больше – стёкла или клеевая прослойка?

5-15. Конденсатор ёмкостью 1 мкФ имеет изоляцию из полиэтиленовой плёнки. Опишите эту плёнку, её особенности, свойства при применении в качестве электрической изоляции. Рассчитайте мощность диэлектрических потерь в этом конденсаторе при постоянном и переменном (на частоте 1 кГц) напряжениях, равных 3 кВ. Значение угла диэлектрических потерь считать независимым от частоты.

5-16. Опишите неполярные полимерные плёнки и сравните диэлектрические потери в полипропиленовой плёнке на постоянном

напряжении с такими же потерями в полистирольной и полиэтиленовой плёнках при напряженностях, составляющих 0,1 от электрической прочности.

5-17. Опишите полиэтилентерефталатную плёнку (физические, электрические и область применения). Постройте зависимость удельных диэлектрических потерь в этой плёнке от частоты (в диапазоне 10^2 - 10^5 Гц) при напряжённости электрического поля 1 кВ/мм.

5-18. Для изоляции проводов, работающих при высоких температурах, используется полярная полиимидная плёнка с односторонним фторполимерным покрытием. Если тепло от диэлектрических потерь в такой изоляции никуда не отводится, то сколько нужно времени, чтобы от этих потерь при частоте 1 кГц и напряжении 500 В плёнка нагрелась бы с 18 °С до 0,1 от длительно допустимой температуры? Теплоемкость пленки принять равной минимальному значению теплоемкости полиэтилена высокого давления.

5-19. Высокочастотное устройство выполнено из ситалла марки СТ 50-1. Опишите этот материал и, пренебрегая теплоотводом, определите, можно ли ожидать расплавления материала при нагреве диэлектрическими потерями в течение минуты, если начальная температура была 20 °С, частота устройства 10^{10} Гц, а напряженность приложенного поля составляет 0,001 от электрической прочности?

5-20. Отрезок коаксиального кабеля длиной 200 м имеет диаметр жилы 1 мм и диаметр экрана 8 мм. Изоляция между жилой и экраном выполнена из полиэтилена высокого давления. При заземлённом экране кабель заряжается до напряжения на жиле 100 В, после чего источник питания отключается. Через 40 мин измерение показало, что напряжение составило 1 В. Опишите указанный материал (физические, электрические свойства и область применения), определите сопротивление изоляции, её расчетное удельное объёмное сопротивление и сравните последнее значение с удельным сопротивлением ПЭВД 102-01К.

5-21. Сопротивление изоляции коаксиального кабеля, выполненной из фторопласта-4, составляет 100 ГОм при длине кабеля 150 м, диаметре жилы 0,8 мм и диаметре оболочки 8 мм. Кабель заряжается до напряжения 100 В между жилой и экраном, после чего источник питания отключается. Опишите физические, электрические свойства и область применения фторопласта-4 и определите, через какое минимальное расчётное время напряжение между жилой и экраном станет равным 50 В? Сравните расчетное значение удельного объёмного сопротивления изоляции со справочным.

5-22. Сопротивление изоляции коаксиального кабеля, выполненной из поливинилхлорида И40-13А, составляет 3 ГОм. Опишите физические,

электрические свойства и область применения указанного материала и определите диапазон диэлектрических потерь в нём при частоте 50 Гц и напряжении 120 В.

5-23. Мощность диэлектрических потерь в коаксиальном кабеле при частоте 10^6 Гц и напряжении 200 В составляет 10 Вт. Изоляция выполнена из полиэтилена низкого давления ПЭНД 209-15. Опишите физические, электрические свойства и область применения указанного материала и определите сопротивление «идеальной» изоляции этого кабеля.

5-24. Сопротивление изоляции тягового электродвигателя составляет 2 ГОм. Изоляция выполнена из эпоксидного пресс-материала ПЭТ-Гр, относящегося к группе реактопластов. Опишите физические, электрические свойства и область применения указанного материала и определите мощность диэлектрических потерь в изоляции при частоте 50 Гц и напряжении 1,5 кВ.

5-25. Плоский конденсатор с изоляцией из поливинилхлорида имеет площадь пластин 2 м^2 и расстояние между пластинами 1 мм. Опишите физические, электрические свойства и область применения указанного материала и определите, как максимально изменится в нём мощность диэлектрических потерь при напряжении на пластинах 5 кВ и нормальной температуре, если частота изменится с 50 Гц до 1 МГц.

5-26. Как максимально изменится сопротивление изоляции высоковольтного устройства при замене материала изоляции с политрифторхлорэтилена на поливинилхлорид, при условии изменения толщины изоляции таким образом, что емкость устройства не меняется? Диэлектрические потери в первоначальной изоляции при напряжении 2 кВ и частоте 50 Гц составляли 8 Вт. Опишите физические, электрические свойства и область применения указанных материалов.

5-27. Изоляция плоских конденсаторов с площадью пластин $0,5 \text{ м}^2$ и расстоянием между ними 0,5 мм выполнена из природного флогопита. При напряжении 220 В, частоте 1 кГц и $20 \text{ }^\circ\text{C}$ разброс диэлектрических потерь у разных образцов составляет от $4,84 \cdot 10^{-3}$ Вт до $9,69 \cdot 10^{-2}$ Вт. Опишите физические, электрические свойства и область применения указанного материала и определите значение его относительной диэлектрической проницаемости.

5-28. Опишите физические, электрические свойства и область применения мраморных досок. Рассчитайте максимальное значение диэлектрических потерь в мраморной доске толщиной 2 см при частоте 50 Гц и напряжении 80 % от пробивного, если её сопротивление составляет 1 МОм.

5-29. К поверхности двух сложенных вместе листов электротехнического стекла, содержащих, соответственно, 60 и 80 % алюмосиликатов, каждое из которых имеет толщину 1 мм, приложено напряжение 100 В при частоте 10^6 Гц. Опишите физические, электрические свойства и область применения указанного материала и определите, от какого стекла к какому будет направлен тепловой поток, если углы диэлектрических потерь минимальны?

5-30. Опишите состав и свойства кремнийорганических компаундов, выберите из них такой, диэлектрические потери которого в постоянном поле при нормальной температуре максимальны, и рассчитайте для этого компаунда мощность удельных диэлектрических потерь при частоте 1 МГц, нормальной температуре и напряженности поля, составляющей 1 % от пробивной.

5-31. К плоскому двухслойному диэлектрику, выполненному карбоцепных полимеров, площадью 1 м^2 , состоящему из слоя поливинилиденфторида, толщиной 10 мм и слоя поливинилкарбазола толщиной 10 мм, приложено напряжение 70 кВ частотой 1 МГц. Определить, на сколько нагреется каждый слой в течение 1 с? Теплопередачей между слоями пренебречь.

5-32. Керамический конденсатор ёмкостью 0,1 мкФ заряжается до напряжения 100 В и подключается к вольтметру с внутренним сопротивлением 100 МОм. Через 2 с напряжение на нём падает до 1,9 В. Известно, что диэлектриком в конденсаторе является керамика на основе соединений титана. Опишите физические, электрические свойства и область применения керамик на основе титана и определите марку керамики.

5-33. Две пластины из стеклотекстолита размером $0,5 \times 1,5 \times 0,002 \text{ м}^3$ склеены слоем парафина толщиной 1 мм. Перпендикулярно поверхности пластин приложено напряжение 6 кВ частотой 1 МГц. Опишите физические, электрические свойства и область применения указанных материалов и определите, что будет нагреваться больше – парафин или стеклотекстолит?

5-34. Конденсатор ёмкостью 0,5 мкФ имеет изоляцию из полипропиленовой плёнки. Опишите эту плёнку и её свойства и рассчитайте диапазоны мощностей диэлектрических потерь в этом конденсаторе при постоянном и переменном напряжении 1 кВ и частоте 1 кГц.

5-35. Для защиты от коррозии алюминиевые оболочки кабелей можно изолировать поливинилхлоридной плёнкой. Что это за материал и каковы его свойства? Чем он отличается от полипропиленовой плёнки, и каковы в этих плёнках удельные диэлектрические потери в электрическом поле напряженностью 1 кВ/мм частотой 1 кГц?

5-36. В качестве основы для металлизированной полимерной плёнки применяют, в частности, полиэтилентерефталат. Что это за материал и каковы его свойства? Постройте зависимость удельных диэлектрических потерь в нём от температуры при частоте 50 Гц и напряженности электрического поля 1 кВ/мм.

5-37. Для создания температуростойкого конденсатора ёмкостью 2 мкФ на напряжение 1 кВ использована американская полиимидная плёнка минимальной толщины. Опишите этот материал под американским названием. Если считать, что теплоёмкость полиимида равна теплоёмкости полиэтилентерефталатной плёнки (лавсан), то за какое время этот конденсатор нагреется с начальных 18 °С до 0,1 от длительно допустимой температуры за счёт диэлектрических потерь при частоте 1 кГц? Теплоотводом пренебречь.

5-38. Постройте зависимость удельных диэлектрических потерь в электротехническом ситалле от температуры в диапазоне от 20 до 400 °С при частоте 10^{10} Гц и напряженности поля, составляющей 0,1 от электрической прочности. Ситалл имеет марку СТ 50-2. Опишите этот класс материалов (физические, электрические свойства и области применения).

5-39. Опишите класс материалов, объединённых названием “фенопласты”. Среди фенопластов электроизоляционных выберите материал с наименьшими удельными диэлектрическими потерями при частоте 50 Гц. Во сколько раз эти потери отличаются от потерь на постоянном токе и потерь при частоте 1 МГц?

5-40. Среди фенопластов выберите материалы с наименьшими и наибольшими удельными потерями на постоянном токе и определите удельные потери материалов выбранных марок при частоте 1 МГц и напряженности электрического поля 100 В/мм.

5-41. Опишите класс материалов, объединённых названием “кремнепласты” и выберите среди них материал с наименьшими удельными диэлектрическими потерями при частоте 50 Гц. Во сколько раз эти потери отличаются от потерь на постоянном токе и потерь при частоте 1 МГц?

5-42. Среди кремнийорганических пресс-материалов выберите самый лёгкий, опишите этот материал и определите удельные диэлектрические потери при напряженности поля 100 В/мм при частотах: 0, 50, 1000000 Гц.

5-43. Что такое “фенопласты”, на какие группы они подразделяются, какой из электроизоляционных фенопластов самый тяжёлый и какие у него удельные диэлектрические потери на постоянном токе и частотах 50 Гц и 1 МГц, если напряженность электрического поля принять равной 100 В/мм?

5-44. Опишите типы и марки поливинилхлоридов, их свойства и применение. Для типа поливинилхлорида, имеющего максимальное значение предела прочности при растяжении, сравните удельные диэлектрические потери на постоянном токе и при частоте 1 МГц.

5-45. Среди неполярных полимерных пленок выберите и опишите марку с наименьшими диэлектрическими потерями на постоянном токе и рассчитайте диапазон полных потерь в пленке максимальной толщины площадью 1 м² при напряженности постоянного поля, составляющей 10 % от электрической прочности.

5-46. Среди полярных полимерных пленок выберите и опишите марку с наименьшими диэлектрическими потерями на частоте 1 кГц и определите диапазон возможных потерь в пленке минимальной толщины на постоянном напряжении с площадью пленки, равной 10 м² и напряженности поля, составляющей 10 % от электрической прочности.

5-47. Выберите и опишите марку каучука, имеющего после вулканизации минимальное влагопоглощение, и рассчитайте для этой марки удельные диэлектрические потери в постоянном и переменном (50 Гц) полях при напряженностях поля, составляющих 90 % от электрической прочности.

5-48. Опишите полиэтиленовую плёнку и определите диапазон отношений удельных диэлектрических потерь в ней к таким же потерям в полистирольной и полипропиленовой плёнках при напряженностях, составляющих 0,1 от электрической прочности на постоянном напряжении.

5-49. Опишите полифениленоксидную плёнку (физические, электрические и область применения). Постройте зависимость удельных диэлектрических потерь в этой плёнке при частоте 1 кГц от напряжённости электрического поля в пределах от 0 до значения, равном 0,1 от электрической прочности на постоянном напряжении.

5-50. Для высокотемпературной изоляции используется органосиликатная пластмасса ОС-91-92 с мусковитом и асбестом в качестве наполнителя. Опишите этот материал. Если тепло от диэлектрических потерь в такой изоляции никуда не отводится и ее параметры в процессе заданного нагрева не изменяются, то сколько нужно времени, чтобы от этих потерь при частоте 1 кГц и напряжённости электрического поля 5 МВ/м плёнка нагрелась бы с 18 °С до 0,1 от допустимой температуры? Теплоёмкость и плотность материала принять равными минимальным значениям этих параметров для мусковита.

5-51. Среди форстеритовых высокочастотных керамик подберите материал с наименьшими ожидаемыми диэлектрическими потерями в переменном поле. Опишите этот материал и пренебрегая теплоотводом

рассчитайте, какой станет температура материала при нагреве диэлектрическими потерями в течение часа, если начальная температура была 20 °С, частота устройства 1 МГц, а напряжённость электрического поля 2 кВ/мм. При расчетах теплоемкость керамики принять равной теплоемкости электротехнического фарфора.

5-52. Для создания температуростойкого конденсатора на напряжение 3 кВ использована американская полиимидная плёнка минимальной толщины. Опишите этот материал. Если считать, что теплоёмкость полиимида равна теплоемкости полиэтилентерефталатной плёнки (лавсан), то за какое время этот конденсатор нагреется с начальных 20 °С до 0,15 от длительно допустимой температуры за счёт диэлектрических потерь при частоте 1 кГц? Теплоотводом пренебречь.

5-53. Постройте зависимость удельных диэлектрических потерь в электротехническом ситалле СТ 38-1 от температуры в диапазоне от 20 до 400 °С при частоте 10^{10} Гц и напряженности поля, составляющей половину от электрической прочности ситалла, имеющего наименьшее значение этого показателя. Предварительно опишите этот класс материалов (физические, электрические свойства и область применения).

5-54. Опишите класс материалов, объединенных названием “шлакоситаллы” и определите возможные разбросы значений удельных диэлектрических потерь при частотах 10^6 и 10^{10} Гц и напряженности электрического поля, составляющей 0,1 от электрической прочности.

5-55. Среди бутадиеновых каучуков выберите материалы с наименьшими и наибольшими удельными диэлектрическими потерями на постоянном токе. Определите удельные диэлектрические потери материалов выбранных марок при частоте 1 МГц и напряженности электрического поля 100 В/мм.

5-56. Опишите класс материалов, объединенных названием “кремнепласты”. Выберите среди них материал с наименьшими диэлектрическими потерями на постоянном токе и сравните эти потери с потерями при частоте 1 МГц и при частоте 50 Гц. В обоих случаях напряжённость электрического поля составляет 50 % от электрической прочности.

5-57. Опишите кабельные изоляционные резины. Постройте кривые зависимостей удельных диэлектрических потерь от времени увлажнения кабельной резины типа РТИ-1 при 20 и 70 °С. Частота 50 Гц, напряженность электрического поля 1 кВ/мм.

5-58. Опишите мрамор как электроизоляционный материал. Проведите относительное сравнение удельных диэлектрических потерь мрамора в постоянном поле и в поле промышленной частоты.

5-59. Опишите электроизоляционные стёкла. Найдите возможный разброс удельных диэлектрических потерь в электротехнических стёклах при частоте 1 кГц и напряженности поля, составляющей 0,1 от среднего арифметического значения электрической прочности описанных марок.

5-60. Опишите стеклоэмали для фарфора. Подберите стеклоэмаль с минимальным значением температурного коэффициента диэлектрической проницаемости и постройте зависимость удельных диэлектрических потерь от температуры в диапазоне 20-200 °С при напряженности поля 1 кВ/мм. Порядок температурного коэффициента диэлектрической проницаемости считать равным 10^{-5} , а зависимость угла диэлектрических потерь от температуры принять линейной.

6. Электрическая прочность диэлектриков

6.1. Теоретическая часть

Электрической прочностью E_{np} называется средняя напряженность электрического поля, при которой происходит электрический пробой изоляционного промежутка. Напряжение, при котором происходит электрический пробой, называют «пробивным напряжением» U_{np} :

$$E_{np} = \frac{U_{np}}{h}, \quad (6.1)$$

где h – толщина диэлектрика (изоляционный промежуток между электродами, разрядный промежуток).

Пробивное напряжение зависит от размера разрядного промежутка. При увеличении промежутка пробивное напряжение возрастает, а электрическая прочность снижается.

Электрическим пробоем диэлектрика называют скачкообразное увеличение электропроводности материала при воздействии высокого напряжения, вплоть до образования электропроводящего плазменного канала. Явление электрического пробоя в газах или жидкостях часто называют «электрическим разрядом», что говорит о разряде емкости через этот канал.

Механизмы развития разряда в газообразных, жидких и твёрдых диэлектриках различны.

При электрическом пробое большого газового промежутка последовательно развиваются следующие явления:

I. Появление *свободного электрона* в газовом промежутке (случайного, из металлического электрода, в результате фотоионизации молекулы газа и т. п.)

II. Разгон свободного электрона электрическим полем до энергии, достаточной для того, чтобы при соударении с нейтральным атомом ионизировать последний (*ударная ионизация*).

III. Развитие *электронной лавины* как следствие множественных актов ударной ионизации.

IV. Рост *стримера* – проводящего плазменного канала, формирующегося из положительных ионов, оставшихся после прохождения лавины, и отрицательных зарядов, втягиваемых в положительную плазму.

V. Преобразование стримера в *лидер* за счет термоионизации, вызываемой прохождением емкостного тока по стримеру.

VI. *Главный разряд* происходит при замыкании каналом разряда разрядного промежутка.

При малых промежутках процесс пробоя может завершиться на стадиях III (лавинный пробой) и IV (стримерный пробой, искра).

Электрическая прочность газов зависит:

A) от давления, при увеличении давления уменьшаются расстояния между молекулами. Разгоняющемуся электрону необходимо на более коротком пути разгона (называемого длиной свободного пробега) получить ту же энергию, достаточную для ионизации атома. Эта энергия определяется в первую очередь конечной (в момент соударения) скоростью электрона. Большее ускорения электрон может достичь за счет увеличения действующей на него силы – напряженности электрического поля. Экспериментальная зависимость пробивного напряжения газового промежутка от произведения давления p на величину промежутка h называется законом Пашёна. Минимальное значение пробивного напряжения для воздуха при $p \cdot h = 0,7$ Па·м составляет примерно 330 В. Левее указанного значения $p \cdot h$ электрическая прочность возрастает из-за малой вероятности столкновения электронов с молекулами газа. Кривая Пашена представлена на рис. 6.1

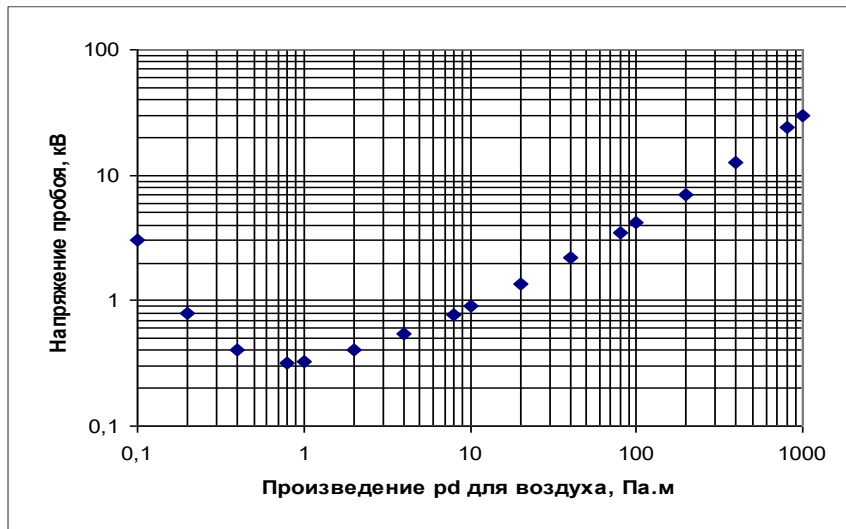


Рис 6.1. Кривая Пашёна для лавинного пробоя воздушного промежутка

При $p \cdot h \sim 10$ Па·м и более можно пользоваться следующей приближенной формулой для расчета пробивного напряжения

$$U_{np} = a_0 \frac{p \cdot h}{p_0} + b_0 \sqrt{\frac{p \cdot h}{p_0}}, \quad (6.2)$$

где параметры a_0 и b_0 зависят от вида газа:

Коэффициенты	Воздух	O ₂	N ₂	H ₂	Ar	He	Ne	SF ₆
$a_0, \text{МВ/м}$	2,45	2,6	2,35	1,26	0,57	0,57	0,201	8,93
$b_0, \text{МВ/м}^{1/2}$	0,064	0,0635	0,0955	0,0437	0,226	0,0153	0,0157	0

Здесь предполагается давление $p_0 = 101,3$ кПа, температура $T_0 = 293$ К. При изменении температуры и давления:

$$U_{np} = a_0 \delta \cdot h + b_0 \sqrt{\delta \cdot h}, \quad (6.3)$$

где $\delta = \frac{p \cdot T_0}{p_0 \cdot T}$;

Б) от сродства молекулы газа к электрону, электроотрицательности газа. (Сродство к электрону – это способность некоторых нейтральных атомов и молекул присоединять добавочные электроны, превращаясь в отрицательные ионы. В электроотрицательных газах, состоящих из атомов с высоким сродством к электрону, требуется большая энергия разгона электронов полем для образования электронной лавины).

Электрическая прочность жидкого диэлектрика не связана непосредственно с химическим строением жидкостей. Из-за близкого расположения молекул в жидком диэлектрике не реализуется механизм ударной ионизации.

На значение электрической прочности влияет, в первую очередь, количество газа в жидкости, состояние и площадь поверхности электродов.

Электрический пробой жидкого диэлектрика начинается, как правило, с пробоя микроскопических газовых пузырьков. Из-за низкой диэлектрической проницаемости газа напряженность в пузырьке выше, чем в жидкости, а электрическая прочность газа – ниже.

Частичные разряды в пузырьках приводят к росту последних, что в итоге завершается пробоем жидкого диэлектрика.

Электрическая прочность жидкого диэлектрика повышается при:

- очистке от твердых проводящих микрочастиц (сажа, уголь и т.п.);
- сушке жидкости (удалении воды);
- дегазации жидкости (вакууммировании);
- повышении давления P .

Для учета давления P и площади электродов S используется обобщение эмпирических зависимостей в виде формулы Мартина:

$$E_p = \frac{M \cdot P^{1/8}}{\tau^{1/3} \cdot S^{1/10}}; \quad (6.4)$$

где постоянная M зависит от сорта жидкости и имеет размерность МВ/см. В этом выражении длительность импульса τ следует подставлять в микросекундах, давление в атм., а площадь электродов S – в см². Постоянная M составляет 0,7 МВ/см для гексана и трансформаторного масла, 0,6 МВ/см – для глицерина, 0,5 МВ/см – для этилового спирта, 0,6 МВ/см для воды (в случае пробоя с катода) и 0,3 МВ/см (в случае пробоя с анода).

Механизмы пробоя твердых диэлектриков зависят от времени воздействия напряжения (с момента подачи до пробоя), определяющим физические процессы, происходящие при этом воздействии. Различают:

- электрический пробой (время воздействия – доли секунды);
- тепловой пробой (время воздействия от секунд до часов);
- пробой под действием частичных разрядов (время воздействия от нескольких часов до года и более).

При электрическом пробое твердого диэлектрика под действием приложенного напряжения разрываются химические связи, и вещество перерабатывается в плазму. Электрическая прочность твердого диэлектрика пропорциональна энергии химических связей.

Причиной теплового пробоя является разогрев диэлектрика, чаще всего за счет диэлектрических потерь, когда мощность потерь превышает мощность, отводимую от диэлектрика.

При повышении температуры увеличиваются электропроводность (за счет увеличения числа носителей) и угол диэлектрических потерь, что приводит к дополнительному росту энерговыделения и снижению электрической прочности.

Частичным разрядом (ЧР) называют разряд, проходящий в какой-либо ограниченной области изоляционного промежутка и не замыкающий весь промежуток. Одним из примеров частичного разряда является коронный разряд

в газах в неравномерном электрическом поле, когда стримером пробивается лишь область вблизи электрода с напряженностью поля выше электрической прочности газа (например, у провода высоковольтной линии электропередачи). В твердых телах ЧР – это локальный многолавиновый разряд в газовой поре диэлектрика.

Для возникновения частичного разряда в твердом диэлектрике необходимы два условия:

- наличие воздушного включения, напряженность поля в котором выше, чем в самом диэлектрике;

- напряжение, приложенное к диэлектрику, должно быть достаточным для того, чтобы напряженность поля в воздушном включении превысила пробивную.

При переменном поле, приложенном к диэлектрику, частичные разряды возникают на каждом полупериоде при достижении напряжением пробивного значения. Длительные периодические ЧР химически разрушают диэлектрик, увеличивают диэлектрические потери, что в конечном итоге приводит к пробое диэлектрика.

Для определения напряжённости поля, изоляции коаксиального кабеля можно использовать выражение:

$$E(r) = \frac{U}{r \cdot \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}, \quad (6.5)$$

где r – расстояние от оси кабеля до точки в изоляции; r_2 – радиус внешнего электрода; r_1 – радиус внутреннего электрода.

6.2. Задания для самостоятельного выполнения

6-01. Воздух при атмосферном давлении находится между двумя плоскопараллельными электродами, расстояние между которыми 1 см. Какое нужно установить давление воздуха, чтобы пробивное напряжение при расстоянии между электродами 1 мм осталось, как и в прежнем случае? Какова в этих условиях электрическая прочность воздуха?

6-02. Изоляционный промежуток заполнен азотом при атмосферном давлении. При заполнении какими газами пробивное напряжение этого промежутка изменится в 2 раза в большую и меньшую стороны?

6-03. Изоляционный промежуток длиной 1 см заполнен воздухом при температуре 20 °С и нормальном атмосферном давлении. Как следует изменить температуру в этом промежутке, не изменяя давления, чтобы пробивное

напряжение стало таким же, как и в случае заполнения промежутка чистым кислородом при нормальных условиях?

6-04. Расстояние между электродами, создающими равномерное поле, увеличено с 0,5 мм до 1 мм. Как следует изменить давление по отношению к начальному нормальному, чтобы значение пробивного напряжения воздуха осталось прежним?

6-05. Провод диаметром 1 см проходит внутри стальной трубы диаметром 1 м, заполненной элегазом при давлении 1 МПа. При каком напряжении на проводе появится коронный разряд, если температура элегаза 20 °С?

6-06. Шар диаметром 25 см устанавливается вначале на расстоянии 50 см, а затем 2 м от плоскости. В каком случае явление короны будет предшествовать пробоем, какова электрическая прочность промежутка в том и другом случаях?

6-07. Площадь поверхности электродов 1000 см², расстояние между ними 10 см, заполнено элегазом при давлении 0,2 МПа. Определить пробивное напряжение промежутка. Как оно изменится, если площадь поверхности электродов сделать равной 10 см² и почему?

6-08. Между электродами с площадью 100 см² находится воздух при давлении 1 МПа. Расстояние между электродами 20 см. Определите расстояние между электродами с площадью 1000 см² при заполнении промежутка элегазом при давлении 0,3 МПа и частоте 50 Гц при условии равенства пробивных напряжений.

6-09. На сколько нужно увеличить давление азота по сравнению с нормальным в промежутке 0,01 м с однородным полем при нормальной температуре, чтобы пробивное напряжение промежутка повысилось так же, как и при добавлении к азоту 10 % элегаза?

6-10. На каком расстоянии друг от друга нужно приложить электроды к поверхности парафина, чтобы напряжение перекрытия между ними при частоте 50 Гц численно равнялось напряжению пробоя воздушного промежутка длиной 1 см?

6-11. Токопровод элегазового распределительного устройства закреплен в трубе с помощью изоляторов из фторопласта. Расстояние между фланцами изолятора 20 мм. Давление в трубе 0,2 МПа. Во сколько раз напряжение перекрытия изоляторов при частоте 50 Гц будет ниже напряжения пробоя элегаза в том же промежутке?

6-12. Токопровод элегазового распределительного устройства закреплен в трубе изоляторами, расстояние между фланцами которых 20 мм. Давление элегаза

0,15 МПа. Как изменится поверхностная электрическая прочность промежутка при частоте 50 Гц, если заменить материал изоляторов с фторопласта на эпоксидный компаунд?

6-13. Для защиты от увлажнения высоковольтное устройство помещено в бакелитовую трубку, расстояние между фланцами которой 10 см. Как изменится напряжение перекрытия при замене бакелита на фарфор?

6-14. При испытаниях воздушного промежутка “стержень - плоскость” длиной 25 см увеличили частоту переменного напряжения с 50 Гц до 100 кГц. С какого до какого значений изменились электрические прочности промежутка?

6-15. Во сколько раз изменится пробивное напряжение воздушного промежутка с неоднородным полем длиной 0,9 м при частоте 50 Гц, при изменении температуры воздуха с -30 до +30 °С, если влажность при положительной температуре составила 10 г/м³?

6-16. Как изменится электрическая прочность воздушного промежутка с сильно неоднородным полем на переменном напряжении частотой 50 Гц при изменении длины промежутка с 40 см до 5 м?

6-17. Отсыревшее масло в промежутке 2 см между горизонтальными электродами имеет электрическую прочность при частоте 50 Гц равную прочности при испытаниях в стандартном разряднике, где зафиксировано пробивное напряжение 50 кВ. Как изменится пробивное напряжение промежутка, если у нижнего электрода появится отстой воды толщиной 1 мм, имеющей прочность выше 10 кВ/см?

6-18. Пространство 2 см между горизонтальными плоскими электродами заполнено наполовину первым сортом Совтола-10 и наполовину -- трансформаторным маслом адсорбционной очистки. Определить, при каком переменном (50 Гц) напряжении произойдет разряд, если считать, что электрическая прочность масла равна его электрической прочности при стандартных испытаниях.

6-19. Плоский электрод покрыт слоем полиметилсилоксановой жидкости ПМС-60 толщиной 1 см. К поверхности жидкости приближается из воздуха другой плоский электрод, параллельный первому; разность потенциалов между электродами поддерживается на уровне 200 кВ. Полагая поле равномерным, условия нормальными и электрическую прочность жидкости равной найденной при стандартных испытаниях, найти, при каком расстоянии между электродами произойдет пробой промежутка.

6-20. Между плоскими электродами находится слой полиэтилена ПЭВД толщиной 1 мм. Из-за неровностей между полиэтиленом и электродом имеется воздушный зазор толщиной 0,05 мм. Полагая поле равномерным, определить напряжение на электродах (при частоте 1 МГц) при которых:

- возникают частичные разряды в воздушных зазорах;
- происходит электрический пробой промежутка.

6-21. Между плоскими электродами находится стержень стеклопластика толщиной 10 мм с волокнами, ориентированными поперек поля. Из-за технологических ошибок между волокнами стеклопластика имеются воздушные поры. Частичные разряды появились при напряжении 50 кВ. Полагая пору в виде вытянутого в направлении поля образования, определить её размер.

6-22. Определить напряжение, прикладываемое к пластинке из эпоксидного компаунда горячего отверждения типа Д-61 толщиной 1 мм, которое при равномерном поле пластинка выдержит без пробоя при 20 °С и пробьется при 120 °С.

6-23. Две асбоцементные доски толщиной 1 см склеены эпоксидным клеем К-153 с толщиной клеевой прослойки 1 мм, и к ним приложено напряжение 35 кВ перпендикулярно плоскости склейки. Возникнут ли частичные разряды в клеевом слое при переменном напряжении 50 Гц и температуре 20 °С и 150 °С?

6-24. Между двумя слоями сухой лакоткани ЛХММ-105 толщиной 0,2 мм имеется воздушная прослойка толщиной 0,01 мм. Определить отношение напряжения возникновения частичных разрядов в воздушной прослойке к среднему пробивному напряжению при отсутствии дефектов и нормальной температуре.

6-25. Во сколько раз нужно изменить толщину изоляции из гетинакса высшей категории качества (тип 113) при сохранении пробивного напряжения, если ориентация слоев бумаги относительно поля изменится на 90°?

6-26. Между плоскими электродами находится слой полиэтилена ПЭВД толщиной 1 мм. Из-за неровностей между полиэтиленом и электродами имеется воздушный зазор. Частичные разряды появились при напряжении 36,4 кВ. Полагая пору плоской и ориентированной поперек поля, определить её размер.

6-27. Electroды вакуумного промежутка выполнены из вольфрама, расстояние между ними 1 мм. Поле равномерное. Каким электроотрицательным газом можно заполнить промежуток при давлении 1 МПа, чтобы электрическая прочность промежутка осталась той же, что и при вакууме?

6-28. Кабель 10 кВ имеет бумажно-масляную изоляцию из бумаги типа МКОН по ГОСТ 1908-82, толщина которой 30 мкм. Какое минимальное число слоёв бумаги выдержит номинальное фазное напряжение кабеля?

6-29. Расстояние между электродами 1 мм. Поле равномерное. Сколько и какой толщины листов асбестовой бумаги типа БЭ следует уложить в этот промежуток, чтобы максимально увеличить его пробивное напряжение?

6-30. Фольгированный стеклотекстолит марки ФДМ-2 толщиной 1 мм покрывает токоведущую часть электроустановки. Фольга стеклотекстолита заземлена. Какие напряжения можно допустить на токоведущей части при высшей и первой категориях качества материала по условию пробоа?

6-31. Водород при давлении 760 мм рт. ст. присутствует между плоскопараллельными электродами, находящимися на расстоянии друг от друга 0,8 см. Какое давление нужно установить, чтобы пробивное напряжение осталось прежним при изменении расстояния до 1 мм? Какова в этих условиях электрическая прочность водорода?

6-32. Изоляционный промежуток заполнен азотом при атмосферном давлении. При замене газа в этом промежутке его пробивное напряжение уменьшилось примерно в 4 раза. На какой газ был заменен азот? Какому примерно давлению азота соответствует это новое пробивное напряжение в однородном поле?

6-33. Изоляционный промежуток длиной 5 мм заполнен воздухом при температуре 20 °С и нормальном атмосферном давлении. Как следует изменить температуру в этом промежутке, не изменяя давления, чтобы пробивное напряжение стало таким же, как и в случае заполнения промежутка чистым азотом.

6-34. Промежуток между электродами с равномерным полем, заполненный элегазом, при нормальном давлении уменьшили с 0,5 до 0,3 м. Как следует изменить давление, чтобы пробивное напряжение промежутка осталось прежним?

6-35. Токопровод диаметром 3 см проходит внутри стальной трубы диаметром 1 м, заполненной элегазом при давлении 760 мм рт. ст. При каком напряжении на токопроводе появится коронный разряд, если температура газа 20 °С?

6-36. Шар диаметром 50 см устанавливается в начале на расстоянии 1 м, а затем - 3 м от плоскости. В каком случае явление короны будет предшествовать пробою? Какова электрическая прочность промежутка в том и другом случаях?

6-37. Площадь поверхности электродов 10 см^2 , расстояние между ними 20 см , промежуток заполнен элегазом при давлении $0,3 \text{ МПа}$. Определить пробивное напряжение промежутка. Как оно изменится, если площадь электродов сделать равной 1000 см^2 и почему?

6-38. Между электродами с площадью 100 см^2 находится воздух при давлении $2,5 \text{ МПа}$; расстояние между электродами 10 см . Определить расстояние между электродами с площадью 10 см^2 при заполнении промежутка элегазом при давлении $0,3 \text{ МПа}$ при условии равенства пробивных напряжений в обоих случаях.

6-39. На сколько нужно увеличить давление азота по сравнению с нормальным в промежутке $0,2 \text{ м}$ с однородным полем при нормальной температуре, чтобы пробивное напряжение промежутка повысилось так же, как и при добавлении к азоту 20% элегаза?

6-40. На каком расстоянии друг от друга нужно приложить электроды к поверхности фарфора при плоском контакте, чтобы напряжение перекрытия между ними численно стало равным напряжению пробоя воздушного зазора длиной 1 см .

6-41. Токопровод элегазового распределительного устройства закреплён в трубе с помощью изоляторов из фторопласта, расстояние между фланцами которых 20 мм . Каким должно быть давление в трубе, чтобы напряжение перекрытия соответствовало напряжению пробоя элегаза при давлении $0,18 \text{ МПа}$ (частота 50 Гц)? Найти значение электрической прочности в этих случаях.

6-42. Изоляторы в трубе элегазового распределительного устройства, имеющие расстояния между фланцами 20 мм , заменены с эпоксидных на фторопластовые. С какого значения на какое следует изменить давление элегаза, чтобы напряжение перекрытия этих изоляторов осталось на уровне 250 кВ переменного тока частотой 50 Гц ?

6-43. Для защиты от увлажнения высоковольтное устройство помещено в фарфоровую трубку, расстояние между фланцами которой 15 см . Как следует изменить это расстояние в устройстве с бакелитовой оболочкой, чтобы напряжение перекрытия осталось прежним? Какие значения будет иметь при этом поверхностная электрическая прочность?

6-44. При частоте 40 кГц пробивное напряжение “стержень - плоскость” составило 100 кВ . Как следует изменить расстояние между стержнем и плоскостью, чтобы пробивное напряжение при частоте 50 Гц осталось прежним? Определить значение электрической прочности в обоих случаях.

6-45. Во сколько раз изменится пробивное напряжение частотой 50 Гц воздушного промежутка с неоднородным полем длиной 0,8 м при изменении температуры с 5 до 30 °С и влажности воздуха с 3 до 15 г/м³?

6-46. Как изменится электрическая прочность воздушного промежутка с сильно неоднородным полем на переменном напряжении частотой 50 Гц при изменении длины промежутка с 9 м до 20 см?

6-47. Отсыревшее масло с пробивным напряжением в стандартном разряднике 60 кВ заполняет пространство между горизонтальными плоскими электродами, расстояние между которыми равно 3 см. Полагая, что электрическая прочность масла не изменяется, найти, как изменится пробивное напряжение промежутка в случае появления отстоя воды толщиной 0,5 мм, электрическая прочность которой выше 10 кВ/см.

6-48. Как нужно изменить зазор в стандартном разряднике для испытаний жидких диэлектриков, чтобы пробивное напряжение Совтола-10 первого сорта соответствовало стандартному пробивному напряжению трансформаторного масла Т-750?

6-49. Плоский электрод покрыт слоем полиметилсилоксановой жидкости ФМ-1322 толщиной 0,5 см. К поверхности жидкости приближается из воздуха другой плоский электрод параллельный первому, разница потенциалов между электродами составляет 100 кВ. Полагая поле равномерным, условия – нормальными и электрическую прочность жидкости – равную найденной при стандартных испытаниях, найти, при каком расстоянии между электродами произойдет пробой промежутка?

6-50. Между плоскими электродами находится пластина из полипропилена толщиной 1 мм. Из-за неровностей между этой пластиной и электродами имеется воздушный зазор толщиной 0,01 мм. Полагая поле равномерным, определить напряжения на электродах частотой 1 МГц, при которых:

- произойдёт электрический пробой пластинки;
- возникнут частичные разряды в воздушных зазорах.

6-51. При испытаниях изоляции провода его погружают в воду и подают напряжение на жилу. Найти напряжение, при котором должен был бы произойти электрический пробой изоляции из полипропилена, если толщина изоляции 1 мм, дефекты отсутствуют, а сечение жилы 10 мм².

6-52. Определить напряжение, выдерживаемое эпоксидной плёнкой толщиной 0,3 мм из компаунда ЭП-49Д при 20 °С, и не выдерживаемое при 150 °С.

6-53. К асбоцементной доске толщиной 1 см плотно приклеены (без воздушных включений) с помощью эпоксидного клея К-153 плоские электроды. Толщина клеевых слоев 0,5 мм. Возникнут ли частичные разряды в клеевых слоях при напряжении на электродах 18 кВ и температурах 20 и 150 °С?

6-54. Между двумя слоями лакоткани ЛХММ-105 толщиной 0,24 мм имеется воздушная прослойка толщиной 0,02 мм. Температура воздуха 20 °С, влажность 95 %. Определить отношение среднего пробивного напряжения этой системы к напряжению возникновения частичных разрядов в воздушной прослойке.

6-55. Во сколько раз нужно изменить толщину изоляции из текстолита 241 первой категории качества при сохранении пробивного напряжения, если ориентация слоёв ткани относительно поля изменяется на 90°? (Электрическая прочность выбирается по результатам испытаний, где расстояние между осями электродов диаметром 5 мм составляет 25 мм).

6-56. Трёхфазный токопровод заполнен элегазом при давлении 0,24 МПа с влажностью, соответствующей точке росы +9,5 °С. Шины к корпусу крепятся эпоксидными изоляторами длиной 10 мм, а эпоксидные распорки между шинами имеют длину 20 мм. На корпус или между шинами произойдет перекрытие по поверхности изолятора, если поднимать напряжение?

6-57. Расстояние между электродами 1 мм. Поле однородно. Промежуток заполнен элегазом при давлении 0,33 МПа. Из какого материала должны быть выполнены электроды, чтобы при создании вакуума между ними электрическая прочность промежутка не изменилась?

6-58. Кабель имеет бумажно-масляную изоляцию из бумаги типа КОН по ГОСТ 1908-82, толщина бумаги 10 мкм. Каково номинальное напряжение кабеля, если число слоёв бумаги более 10?

6-59. Между электродами положена асбестовая электроизоляционная бумага типа БЭ-1 толщиной 0,5 мм. Изменится ли пробивное напряжение этого промежутка при изъятии бумаги, если считать поле равномерным?

6-60. Токоведущая часть имеет напряжение по отношению к земле 20 кВ. От земли эта токоведущая часть изолирована фольгированным стеклотекстолитом марки ФДМЭ-1, имеющим толщину 1 мм. Фольга заземлена. Какой категории качества должен быть текстолит?

Библиографический список

Коробейников С.М., Нестеров С.В., Целебровский Ю.В., Черненко Н.А. Материаловедение. Технология конструкционных материалов: сборник практических заданий / под ред. Ю.В. Целебровского. – Новосибирск: НГТУ, 2008. – 102 с.

Петрова Л.Г., Потапов М.А., Чудина О.В. Электротехнические материалы: учеб. пособие. – М.: МАДИ (ГТУ), 2008. – 198 с.

Дудкин А.Н., Ким В.С. Электротехническое материаловедение: учеб. пособие. – 3-е изд. – СПб.: Лань, 2016. – 198 с.

Богородицкий Н.П., Пасынков В.В., Тареев Б.М. Электротехнические материалы: учебник для вузов. – 7-е изд., перераб. и доп. – Л.: Энергоатомиздат (Ленингр. отд-ние), 1985. – 304 с.

Справочник по электротехническим материалам. В 3 т. / под ред. Ю.В. Корицкого и др. – 3-е изд., перераб. – М.: Энергоатомиздат, 1986. Т. 1. – 368 с.

Справочник по электротехническим материалам. В 3 т. / под ред. Ю.В. Корицкого и др. – 3-е изд., перераб. – М.: Энергоатомиздат, 1987. Т. 2. – 464 с.

Справочник по электротехническим материалам. В 3 т. / под ред. Ю.В. Корицкого и др. – 3-е изд., перераб. – Л.: Энергоатомиздат (Ленингр. отд-ние), 1988. Т. 3. – 728 с.

Редактор и корректор Н.П. Новикова
Техн. редактор Л.Я. Титова

Темплан 2020 г., поз. 99

Подп. к печати 28.10.2020 г. Формат 60x84/16. Бумага тип № 1.

Печать офсетная. Печ. л. 4.5. Уч.- изд. л. 4.5.

Тираж 50 экз. Изд. № 99. Цена «С». Заказ

Ризограф Высшей школы технологии и энергетики СПбГУПТД,
198095, Санкт-Петербург, ул. Ивана Черных, 4.

Учебное издание

Андрей Николаевич Евдокимов

**ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОЕ И КОНСТРУКЦИОННОЕ
МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ**

Задачник