# Лекция 1. Введение в предмет

Диэлектрические материалы являются основными видами электротехнических материалов с которыми придется встретиться на практике будущим инженерам-электрикам. Эти материалы служат в качестве изоляции токоведущих частей энергооборудования. Они включают в себя такие разнообразные типы электрической изоляции как: воздух в линиях электропередач и электроаппаратах; нефтяные и искусственные масла в трансформаторах, кабелях и конденсаторах; твердые диэлектрики в изоляторах воздушных линий (ВЛ), конденсаторах, установочных изделиях и корпусах аппаратов и т.п. При этом физические условия, в которых должна находиться и функционировать изоляция, накладывают определенные требования на физико-химические параметры материала, ограничивая возможные вид, тип используемых электротехнических материалов. Кроме того, при конструировании даже простейших изделий, предназначенных для работы в электрическом поле, необходимо четко представлять, какие процессы происходят в материале, как влияет тот, или иной материал на работу других частей устройства, в том числе за счет перераспределения электрического поля. Здесь необходимо учитывать разноплановые характеристики материала - механические характеристики: плотность и вес материала, прочность на сжатие, разрыв или изгиб; теплофизические характеристики: теплопроводность, теплоемкость, нагревостойкость, теплостойкость и горючесть; электрофизические характеристики: диэлектрическая проницаемость, электропроводность, электрическая прочность, трекингостойкость; физико-химические характеристики: химическая стойкость, влагопроницаемость и т.д. Зачастую всем требованиям невозможно удовлетворить, поэтому необходимо ясное понимание всего комплекса процессов, происходящих при функционировании устройств, чтобы оценить значимость каждого из требований и понять, какие их них, в каждом конкретном случае, являются главными, а какие - второстепенными и ими можно пренебречь.

Целью настоящего курса является изучение основных процессов, происходящих в диэлектрических материалах под действием электрического поля, ознакомление с основными материалами, применяемыми в электроэнергетике, их основными свойствами.

***1.1. Что такое материал, материаловедение, электротехническое материаловедение.***

**Материал - это объект обладающий определенным составом, структурой и свойствами, предназначенный для выполнения определенных функций.** Материалы могут иметь различное агрегатное состояние: твердое, жидкое, газообразное или плазменное. Функции, которые выполняют материалы - разнообразны. Это может быть обеспечение протекания тока - в проводниковых материалах, сохранение определенной формы при механических нагрузках - в конструкционных материалах, обеспечение непротекания тока, изоляция - в диэлектрических материалах, превращение электрической энергии в тепловую - в резистивных материалах. Обычно материал выполняет несколько функций, например диэлектрик обязательно испытывает какие-то механические нагрузки, а значит является конструкционным материалом.

**Материаловедение - наука, занимающаяся изучением состава, структуры, свойств материалов, поведением материалов при различных воздействиях: тепловых, электрических, магнитных и т.д., а также при сочетании этих воздействий**. Стихийными материаловедами были еще древние люди, , например, научившиеся делать каменные наконечники или топоры из определенных камней со слоистой структурой. Технический прогресс человечества во многом основан на материаловедении. В свою очередь технический прогресс дает новые возможности, методы, приборы для материаловедения, позволяет создавать новые материалы.

Рассмотрим пример с компьютерной техникой. Первые компьютеры были на вакуумных электронных лампах и имели сравнительно скромные возможности. Размер их был примерно со спортивный зал, размер единичного элемента для хранения и обработки информации составлял несколько сантиметров. После открытия полупроводников размер элемента уменьшился примерно в 10 раз, размеры компьютера уменьшились также примерно в 10 раз. По мере исследования полупроводников их размер уменьшался, пока не произошел качественный скачок после открытия интегральных схем, когда несколько транзисторов соединили в одном элементе. В дальнейшем и этот элемент постоянно уменьшался и в нем соединяли все большее количество транзисторов. В настоящее время элементарный транзистор имеет размер примерно 0.5 мкм, в больших интегральных схемах соединяются тысячи элементов. Предполагается, что в ближайшем будущем будет постепенно осуществляться переход на масштаб 0.2 мкм и 0.18 мкм. Имеются идеи о создании элементов размером в молекулу!

**Электротехническое материаловедение - это раздел материаловедения, который занимается материалами для электротехники и энергетики, т.е. материалами, обладающими специфическими свойствами, необходимыми для конструирования, производства и эксплуатации электротехнического оборудования.** Ряд материалов традиционны для любого из разделов материаловедения, в первую очередь, это конструкционные материалы. Основные материалы, рассматриваемые здесь специфичны именно для электротехнического раздела материаловедения, это в первую очередь диэлектрические материалы, затем проводниковые материалы, магнитные материалы, материалы для резисторов. В основном эти темы и будут рассматриваться в курсе электротехнического материаловедения. Для успешного освоения курса не требуется особых знаний. Математика в школьном объеме, физика в объеме курса общей физики. Впрочем несколько лекций для освежения необходимых физических понятий все-таки потребуются.  

***1.2. Роль материалов в современной технике, в частности в энергетике.***

Материалы играют определяющую роль в техническом прогрессе. Выше я рассматривал пример из области вычислительной техники, когда совершенствование материала и технологии изготовления элементов оборудования из него приводит к радикально новым результатам. Можно привести еще примеры из других областей техники.

Например изготовление баллонов для хранения газов под давлением. Вес баллона определяется толщиной стенки сосуда, который, в свою очередь, определяется механической прочностью материала. Чем менее прочный материал, тем тяжелее сосуд. Так вот, сосуд для хранения азота, примерно на давление 100 атм, объемом 100 л, изготовленный из стали имеет разный вес в разных странах, где разная технология изготовления стали и, соответственно, разная ее механическая прочность. К примеру вышеупомянутый сосуд в США имеет вес 40 кГ, у нас - 80 кГ, а в Китае - 150 кГ.

Другой пример, более близкий к энергетике. Рабочая напряженность электрического поля в мощном импульсном накопителе энергии (большой конденсатор, в котором в качестве диэлектрика является вода) в американском накопителе «Юпитер» выбирается 150 кВ/см, в нашем накопителе «Ангара» - всего 80 кВ/см. У американцев лучше технология приготовления воды и электродов, следовательно лучше свойства материала (воды) в накопителе, значит пробой в воде достигается при более высокой напряженности, и можно выбрать большую рабочую напряженность.

Еще более близкий пример - изоляторы высоковольтных линий. Исторически первыми придумали изоляторы из фарфора. Технология их изготовления достаточно сложна, капризна. Изоляторы получаются довольно громоздкими и тяжелыми. Научились работать со стеклом - появились стеклянные изоляторы. Они легче, дешевле, их диагностика несколько проще. И, наконец последние изобретения - это изоляторы из кремнийорганической резины. Первые изоляторы из резины были не очень удачны. На их поверхности с течением времени образовывались микротрещины, в которых набивалась грязь, образовывались проводящие треки, затем изоляторы пробивались. Подробное изучение поведения изоляторов в электрическом поле проводов ВЛ в условиях внешних атмосферных воздействий, позволило подобрать ряд добавок, улучшивших атмосферостойкость, стойкость по отношению к загрязнениям и действию электрических разрядов. В результате сейчас создан целый класс легких, прочных изоляторов на различные уровни воздействующего напряжения.

Для сравнения, вес подвесных изоляторов для ВЛ 1150 кВ сопоставим с весом проводов в пролете между опорами и составляет несколько тонн. Это вынуждает ставить дополнительные параллельные гирлянды изоляторов, что увеличивает нагрузку на опору. Требуется использовать более прочные, а значит более массивные опоры. Это увеличивает материалоемкость, большой вес опор значительно поднимает расходы на монтаж. Для справки, стоимость монтажа составляет до 70% стоимости строительства линии электропередач. На примере видно, как один элемент конструкции влияет на конструкцию в целом. Применение кремнийорганической резины позволяет резко удешевить и ускорить строительство. Сейчас в Новосибирске действуют, по крайней мере, три фирмы, разработавшие конструкции быстромонтируемых опор. Основой для этого прогресса является разработка и использование для изоляторов новых электротехнических материалов. Легкие изоляторы дают возможность облегчить опоры, тем самым уменьшается ветровая нагрузка, удешевляется изготовление, доставка и монтаж ВЛ.

***1.3. Основные типы материалов, применяемых в энергетике и электротехнике, композиционные материалы.***

Основные материалы, которые используются в энергетике, можно разделить на несколько классов - это проводниковые материалы, магнитные материалы, диэлектрические материалы. Общим для них является то, что они эксплуатируются в условиях действия напряжения, а значит и электрического поля. В них протекают электрические токи, выделяется тепловая энергия, происходят потери электрической энергии, происходит нагревание материалов. Более специфичны магнитные материалы, в них запасается магнитная энергия, в них также происходят ее потери, выделяется тепло при работе в переменном электрическом поле.

Здесь также следует выделить целый громадный класс материалов не по признаку их функционирования, а по составу. Это композиционные материалы.

**Композиционные материалы - материалы, состоящие из нескольких компонент, выполняющих разные функции, причем между компонентами существуют границы раздела.**

Примеры композиционных материалов - стеклопластик (стержни и трубы), стеклотекстолит листовой, материалы для контактов (смеси электропроводного и тугоплавкого металлов). Сочетание двух или более материалов позволяет использовать сильные стороны каждого из материалов. При этом свойства композита, далеко не всегда являются промежуточными между свойствами компонентов. В ряде случаев улучшаются характеристики, либо появляется материал с принципиально новыми характеристиками. Рассмотрим, например стеклопластик. Он состоит из волокон стекловолокна, пропитанных полимером, обычно эпоксидным полимером. Основное достоинство этого материала - высокая механическая прочность. Прочность эпоксидного компаунда недостаточно велика, этот материал достаточно хрупок. Прочность стеклянного волокна - значительна, но у него хрупкость также значительна. После пропитки волокон и последующей полимеризации прочность стеклопластикового стержня на разрыв не уступает прочности волокон, тогда как хрупкость у стержней в принципе отсутствует.

Основными характеристиками материалов являются электропроводность или обратная величина - сопротивление, плотность, механическая прочность при различных нагрузках, теплоемкость, теплопроводность. Для диэлектрических материалов наиболее важны удельное электрическое сопротивление, диэлектрическая проницаемость, диэлектрические потери, электрическая прочность.

Большинство этих терминов вам неизвестно, в процессе изучения настоящего курса вы с ними подробно познакомитесь.

**Характеристики композиционных материалов**

Для начала введем понятие обобщенной проводимости.

Оказывается удельные теплопроводность, электропроводность, диэлектрическая проницаемость, коэффициент диффузии являются близкими характеристиками, в том смысле что они описывают потоки (зарядов, вещества, тепла, электрического поля) в зависимости от сил, вынуждающих эти потоки.

**Градие́нт**— [вектор](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%92%D0%B5%D0%BA%D1%82%D0%BE%D1%80_%28%D0%BC%D0%B0%D1%82%D0%B5%D0%BC%D0%B0%D1%82%D0%B8%D0%BA%D0%B0%29), своим направлением указывающий направление наибольшего возрастания некоторой величины, значение которой меняется от одной точки пространства к другой ([скалярного поля](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A1%D0%BA%D0%B0%D0%BB%D1%8F%D1%80%D0%BD%D0%BE%D0%B5_%D0%BF%D0%BE%D0%BB%D0%B5)), а по величине (модулю) равный быстроте роста этой величины в этом направлении.

Например, плотность тока связана с градиентом потенциала через проводимость:



Индукция связана с градиентом потенциала через диэлектрическую проницаемость:



Поток тепла связан с градиентом температуры через теплопроводность



Для композиционных материалов оказалось, что зависимость какого то параметра композиции (ε, σ, λ )от аналогичных параметров компонентов (ε, σ, λ) идентична для любого из параметров. Поэтому говорят об обобщенной проводимости, т.е. о зависимости обобщенной проводимости композиции от аналогичных проводимостей компонентов.

Существует достаточно большое количество выражений для вычислений обобщенной проводимости композиционных материалов (диэлектрической проницаемости, теплопроводности, диффузии и электропроводности) в различных случаях. Кроме того, теоретически получена группа оценок сверху и снизу, причем при использовании дополнительной информации о частицах, среде и характере их взаимодействия интервал между оценками можно сделать достаточно узким.

Для оценочных расчетов более удобен способ непосредственного вычисления обобщенной проводимости, исходя из характеристик компонентов. Поскольку нас интересует, в первую очередь, диэлектрическая проницаемость и электропроводность, при использовании известных выражений, полученных для расчета других видов проводимости будем заменять соответствующие физические характеристики на нужные.

Здесь нужно ввести еще два понятия о структуре. Существуют две принципиально различные структуры: матричная и взаимопроникающая.

**Структура является матричной, если по одному из компонентов можно попасть в любую точку этого компонента, не пересекая границ раздела компонент.**

**Такая компонента называется дисперсионной фазой, или матрицей композиции. Компонента, частички которой окружены дисперсионной компонентой называется дисперсной фазой, или наполнителем.**

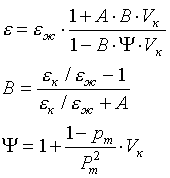
Например, частички сажи в полиэтилене. Полиэтилен является матрицей, частички сажи - наполнителем. Другой пример - молоко. Вода является дисперсионной средой, микрокапельки жира в ней - дисперсной фазой.

**Структура называется взаимопроникающей, если не выполняется условие матричности и геометрические характеристики обоих компонентов (форма частиц) одинаковы .**

Например, материал, приготовленный методами порошковой металлургии, когда смешивают два, или несколько разных порошков и полученную смесь прессуют.

**Матричные структуры.** Расчет электрических характеристик гетерогенных систем достаточно точен в случае разбавленных суспензий. Для этих условий применимы известные формулы Максвелла, Вагнера-Винера, Оделевского. В случае малых концентраций они дают близкие значения. При достаточно больших концентрациях, и при большом различии параметров компонентов практически все известные выражения непригодны.

Наиболее правдоподобно описывает зависимости формула Нильсена, которая предложена для описания наполненных полимеров. Для случая наполнитель - керамика с диэлектрической проницаемостью εк, а матрица - жидкость с диэлектрической проницаемостью εж формулу Нильсена можно написать в виде



где Vк -объемная доля керамики, А - характеризует форму частиц, А=1.5 для сфер, А=3 для частичек нерегулярной формы с минимальной поверхностью, А=4 для пластинок и чешуек различной формы. Pm - максимально возможная объемная доля твердой фазы, характеризующая укладку и форму частиц.

Анализ зависимостей диэлектрической проницаемости от концентрации твердой фазы показывает, что при малых концентрациях все зависимости дают примерно одинаковые значения. Экспериментальные данные не противоречат расчетам. Однако при повышении концентрации до 25-30% все зависимости, кроме формулы Нильсена дают значительно меньшие значения чем эксперимент. До концентрации 50-55% формула Нильсена дает блестящее совпадение с экспериментом. Причем это проверено на ряде жидкостей, начиная с трансформаторного масла и заканчивая сульфоланом. После 50-55% формула Нильсена начинает давать значения, большие чем зарегистрировано в эксперименте.

**Взаимопроникающие структуры.** Для этого случая также предложено большое количество выражений. Наиболее популярна формула Лихтенеккера

**ε=ε1v1⋅ε2(1-v1)**

Видно, что в этой формуле оба компонента равноправны.

***1.4. Методические указания по курсу, литература.***

Мне бы хотелось подчеркнуть, что материаловедение заключается не в запоминании материалов и их характеристик, это можно сделать, пользуясь справочниками, но в первую очередь, в понимании процессов, происходящих в материалах под действием тех либо иных факторов при использовании материалов в электротехнике. Поэтому в нашем рассмотрении уклон будет в сторону физики. Я надеюсь, что это приведет к более глубокому пониманию электротехнических материалов.

**Литература**

1. Коробейников С.М. Диэлектрические материалы: Учебное пособие, Новосибирск, НГТУ, 2000, 67 с. (http://etm.power.nstu/trud/index

2. Богородицкий Н.П. и др. Электротехнические материалы: Учебник для электротехн. и энерг. спец. вузов / Н.П.Богородицкий, В.В.Пасынков, Б.М.Тареев. - 7-е изд., перераб. и доп. - Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1985. - 304 с.

 3 .Справочник по электротехническим материалам: в 3-х т. / Под ред. Ю.В.Корицкого и др. - 3-е изд., перераб. - М.: Энергоатомиздат

# Лекция 2. Электрофизические характеристики материалов. Электропроводность.

      Электропроводность присуща всем материалам, без исключения. Дело в том, что заряды присутствуют в любых, даже самых идеальных диэлектриках, не говоря уже о металлах и полупроводниках. В этой лекции будут рассмотрены следующие вопросы:

***2.1. Основное уравнение электропроводности.***

      Способность любых материалов проводить электрический ток определяется наличием зарядов в нем и возможностью их движения. Можно написать наиболее общую формулу, для плотности тока j верную для любых сред,

j = Σ ni·qi·Vi                                                                                (2.1)

      Здесь i - тип или cорт заряда, (например электроны, ионы различных молекул, молионы, заряженные частицы и т.п.), ni - концентрация зарядов i-cорта, qi - значение заряда, Vi - скорость носителей заряда.

     Чтобы разобраться с электропроводностью разных материалов, необходимо понять, какие в них плотности (концентрации) заряда, как они появляются и от чего они зависят, какие величины зарядов, с какими скоростями могут двигаться. Все это главные вопросы в изучении электропроводности.

    Для всех сред, за исключением вакуума, скорость носителей пропорциональна напряженности поля

Vi = bi·E                                                                                           (2.2),

 где bi - подвижность носителей заряда.

**Подвижностью носителей** заряда называется коэффициент пропорциональности между скоростью носителей заряда Vi и напряженностью поля E.   
     Размерность подвижности -  м2/(В с). Фактически подвижность численно равна скорости носителей заряда при напряженности поля 1 В/м.

     Типы носителей заряда и их подвижность могут быть разными в различных средах. Подвижность носителей также сильно зависит от среды. Выражение (2.1) можно переписать, используя другие термины

 j = ·E,  = ·ni·qi·i                                                                   (2.3)

Здесь - удельная электропроводность. Еще один вариант записи выражения (2.3)

j = E/                                                                                            (2.4)

где - удельное сопротивление.

      Нетрудно убедиться, что это все разные способы записи **закона Ома в дифференциальной форме**, для локальных параметров электрической цепи. Вы знаете, что для участка цепи закон Ома можно записать в виде I = U/R. Нетрудно убедиться, что для участка цепи, используя (2.4), площадь сечения участка S, длину *l* несложно получить классическое выражение для закона Ома. Для этого обе части в (2.4) умножаем на S, затем в правой части числитель и знаменатель умножаем на *l*. Получим в левой части ток, в числителе правой части напряжение, а если S перенести в знаменатель, то в знаменателе получим сопротивление. Таким образом мы доказали идентичность закона Ома в дифференциальной форме и в классической форме.

***2.2. Электропроводность проводников, полупроводников и диэлектриков.***

       Анализ выражений (2.2 - 2.4) проведем с учетом природы и поведения носителей заряда в различных средах. В первую очередь необходимо выяснить механизмы появления и исчезновения зарядов.

       Сначала необходимо рассмотреть электронное строение разных сред.   
       **В газах** электроны находятся на орбитах, принадлежащих конкретным атомам, или молекулам. Согласно квантовой модели атома, электрон может находиться только на определенных орбитах, которым соответствуют определенные, квантованные уровни энергии. На каждом уровне может находиться только один электрон. Электрон, находящийся на уровне, соответствующем самой дальней орбите, имеет самую слабую связь с ядром. Поэтому он легче всего ионизируется, т.е отрывается от ядра.

Энергия, которую надо сообщить электрону, находящемуся в основном состоянии, для отрыва от "материнского" иона называется **энергией** **ионизации** W.

       Чтобы оторвать второй электрон, надо сообщить ему гораздо больше энергии. Это второй уровень ионизации. Существует несколько уровней возбуждения, т.е. если сообщить электрону, энергию меньшую, чем энергия ионизации, то электрон перейдет на какой-либо уровень возбуждения. Все уровни дискретны. Их можно схематически изобразить на рисунке.

       При сближении, допустим, двух атомов с одинаковыми энергетическими уровнями до расстояния, когда орбиты перекрываются, произойдет объединение электронных систем, причем каждый уровень разделится на два, которые чуть-чуть отличаются один от другого. Дело в том, что согласно законам квантовой физики, в принципе в любой системе не может быть двух одинаковых уровней. Этот принцип называется **принципом Паули.** Когда объединятся три атома - будет три расщепленных уровня. Когда образуется кристалл - будет из каждого уровня образована некоторая область разрешенных энергий, которая называется зона. В принципе в зоне уровни практически сливаются и можно говорить о сплошном спектре. При этом верхняя часть зоны располагается выше, чем начальный уровень в одиночном атоме. Нижняя часть зоны располагается ниже, чем начальный уровень.

      Могут возникнуть ситуации, когда из-за этого сдвига, зоны, соответствующие разным уровням, будут перекрываться. Здесь наиболее интересен случай, когда перекрывается зона, занятая электронами и зона, которая появилась из расщепленного возбужденного уровня. Именно этот случай соответствует металлам. Когда эти зоны не перекрываются, между ними существует область запрещенных энергий, т.н. запрещенная зона. В зависимости от ширины этой зоны можно говорить о полупроводниках и диэлектриках.

**Для металлов зоны перекрываются и электроны могут свободно перемещаться по образцу. Ширина запрещенной зоны равна нулю.** Поэтому подвижные электроны всегда существуют в металлах в большом количестве.

Можно посмотреть на это с других позиций. Дело в том, что в атомах металлов электроны достаточно слабо связаны с ионными остатками. Поэтому при образовании из атомов собственно материала металла эти электроны от разных атомов как - бы обобществляются и могут свободно передвигаться по всему объему металла. Они и являются носителями заряда. Примерное количество электронов в металле составляет около 1022 шт/см3. Их подвижность также велика. Оценки дают значения bi примерно 10-2-10-1 м2/(В ·с). Значения удельного сопротивления у металлов обычно находятся в диапазоне 0.01 мк·Ом·м до 1 мк·Ом·м.

      При протекании тока в металле электрическое поле невелико. Можно сделать простую оценку по выражению (2.2). Если взять медный провод сечением 2 мм2 и пропустить ток 5 А, то при удельном сопротивлении меди =1.7 10-8 Ом·м, получим E = j· = 4·10-2 В/м, или E = 40 мВ/м. Если таким проводом протянуть питание на 1 км, то получим на нем падение напряжения 40 В.

**В диэлектриках и полупроводниках**, зонная структура такова, что существует запрещенная зона определенной ширины.

**В полупроводниках ширина зоны составляет примерно от доли электрон-вольта до 3 электрон-вольт, в диэлектриках ширина зоны составляет примерно от 3 электрон-вольт до 10 электрон-вольт.**

Для того, чтобы возникла электропроводность в этих веществах, заряды должны попасть из валентной, занятой электронами зоны, в зону проводимости, т.е. любой свободный носитель заряда появится, если только ему сообщить энергию, не меньшую, чем ширина запрещенной зоны.

      Под действием не очень сильных электрических полей, заряды появляются, в первую очередь, путем термоионизации молекул основного вещества или примесей, либо за счет появления из электродов. Последний способ называется эмиссией носителей заряда. При всех способах в диэлектрике появляются, в основном, электроны и ионы. Оценку их концентрации ni можно сделать из общих энергетических соображений. Изменение концентрации носителей заряда определяется в соответствии с обычным законом Аррениуса

dni /dt ~ n·ν·e-W/kT                                                                            (2.5)

где n - плотность молекул, - частота колебаний электрона в молекуле (~10141/сек), W - энергия ионизации (ширина запрещенной зоны), k- постоянная Больцмана, Т - температура. При комнатной температуре kT~1/40 эВ.

       Здесь важно учесть не только появление носителей заряда, но и их исчезновение. Механизмы исчезновения зарядов - рекомбинация электрона с ионом, уход на поверхности и электроды. Для рекомбинации можно воспользоваться выражением

 dni /dt = - Krni 2 (2.6)

где Kr - коэффициент рекомбинации. В равновесии количество носителей не меняется со временем, складывая (2.5) и (2.6) и приравнивая сумму нулю получим окончательное выражение.

ni = (N /Kr)1/2 ·e-W/2kT                                                                    (2.7)

         Оценим проводимость по (2.3) с учетом (2.7):

**Твердые диэлектрики.** Здесь носителями заряда могут быть электроны и дырки. Ионы "вморожены" и практически не имеют возможности движения bi ~10-23 м2/(В ·с). Подвижность электронов и дырок достаточно высока и может достигать be~10-3 м2/(В·c). Количество электронов и дырок определяется шириной запрещенной зоны W~5-10 эВ, тепловой энергией kT~1/40 эВ, плотностью молекул n~1027 шт/м3 и составляет пренебрежимо малую величину. Оценить ее ничтожность для диэлектриков можно с помощью выражения (2.5)

dni /dt ~ 1027e-200 ·1014 ~ 104120-67~10412-6710-67 ~ 104110-2010-67~10-46 шт/(м3·сек). Образование свободных носителей заряда в разумном количестве, характерном для хороших диэлектриков, практически невероятно. Рекомбинация носителей заряда в твердых телах не затруднена. Ясно, что по этому механизму проводимость твердых диэлектриков практически отсутствует, т.к. заметное изменение концентрации возможно лишь за времена, сопоставимые с геологическими периодами. Поскольку основную роль в выражениях (2.7), (2.5) играет экспоненциальный множитель, то лишь наличие примесей с энергетическими уровнями внутри запрещенной зоны, вблизи от краев зоны с W~1 эВ, дает возможность проводимости твердых тел. Поскольку таких примесей обычно немного, электропроводность диэлектриков обычно мала.

Таким образом, электропроводность диэлектриков определяется наличием примесей, уровни энергии которых, близки к уровням краев зоны проводимости или запрещенной зоны.

**Полупроводники.** Для полупроводников с малой шириной запрещенной зоны существенный вклад в электропроводность может дать термоионизация молекул вещества. Однако гораздо более сильную роль играют специальные, т.н. "легирующие" добавки. Дело в том, что если в полупроводник ввести примеси, энергетические уровни которых будут попадать в запрещенную зону основного вещества, то ионизация этих уровней, если они заняты и энергетически близки к зоне проводимости приведет к появлению зарядов в зоне проводимости. Если уровни не заняты, но энергетически близки к валентной зоне, то электроны могут выйти из валентной зоны и осесть на этих уровнях. Тогда в валентной зоне появятся подвижные положительно заряженные объекты, т.н. дырки.

**Газообразные диэлектрики.** Рекомбинация носителей не затруднена, т.к. заряды разного знака могут беспрепятственно сближаться на близкое расстояние. В оценке считаем n ~ 1025 шт/м3, энергию ионизации W~10-20эВ, подвижность электронов be~10-3 м2/(В·c), ионов bi~10-4 м2/(В·c), заряд e  = 1.6 10-19 Кл. Определяющим фактором является экспоненциальный множитель e-W/kT

  dni /dt ~ 1025e-400 ·1014 ~ 103920-133 ~ 10392-13310-133 ~ 103910-4010-133 ~ 10-136 шт/(м3·сек), что дает пренебрежимо малую проводимость.

На самом деле фактором, определяющим проводимость газов, является космическое излучение. Обычно в воздухе образуется порядка 1000 шт. электронов и ионов в 1 см3 за 1 сек. Часть электронов и ионов быстро рекомбинирует, часть прилипает к нейтральным молекулам, образуя долгоживущие отрицательные ионы. В равновесии в объеме газа обычно находится до 109 ионов/м3. Отсюда проводимость воздуха за счет естественной ионизации составит ~10-14 Cм/м. Отметим, что если искусственно создавать носители заряда,  то в газе можно получить высокую проводимость.

***2.3. Проводимость жидкостей и электролитов.***

**Жидкости.** Современные представления о проводимости диэлектрических жидкостей состоят в следующем. Здесь носителями заряда являются ионы, т.к. электроны легко прилипают к нейтральным молекулам жидкости и не могут существовать в свободном состоянии. Кроме того, в жидкости заряды могут переноситься молионами, частицами и даже пузырьками. Ионизация облегчена по сравнению с газами за счет большей диэлектрической проницаемости, ибо высота потенциального барьера (энергия ионизации) понижена в раз. Это можно показать рассматривая кулоновскую энергию взаимодействия двух зарядов +e и -e, разошедшихся на расстояние r   W = e2/(4πε0εr). Рекомбинация носителей заряда в жидкости затруднена, поскольку заряды взаимодействуют со средой, а именно, легко окружаются соседними молекулами, ориентированными соответствующими концами постоянных или индуцированных диполей к ионам.

Эффект взаимодействия со средой называется **сольватацией**.      Ионизироваться могут молекулы основной жидкости, или примесей, если они являются **ионофорами**, т.е. имеющими преимущественно ионную связь между частями молекулы. Характерный пример ионофора - молекула NaCl, которую можно представить состоящей из ионов Na+ и Cl-. В жидкости молекула NaCl может растворяться и существовать сразу в виде ионов, либо ионных пар (Na+Cl).

Превращение молекулы в пару ионов называется **диссоциацией.** Помимо ионофоров, в жидкости могут существовать **ионогены**, т.е. вещества, образующие ионы только при взаимодействии друг с другом. Например вода, растворенная в диэлектрической жидкости, может облегчать ионизацию других примесей, растворенных в жидкости. Оценка по выражению (1.9) степени ионизации примеси с потенциалом ионизации 4 В, растворенной в жидкости с ε = 2 в количестве 1% с учетом рекомбинации (коэффициент рекомбинации Kr ~ 10-15 м3/cек) дает, что практически вся примесь оказывается диссоциированной на ионы.

          Что касается подвижности, то она определяется движением жидкости. При этом подвижности любых ионов близки друг другу, т.к. ионы "вморожены" в жидкость и переносятся "микроструйками" жидкости. Наши эксперименты по исследованию движения носителей заряда и микропузырьков в нитробензоле под действием сильных импульсных электрических полей показали, что и пузырьки и ионы движутся при временах воздействия менее 1 мкс. Отсюда был сделан вывод, что они переносятся микроструйками, которые образуются за времена менее 1 микросекунды. Доказательством образования струек являлось зарегистрированное оптическим способом, в сочетании с электрооптическим способом, движение различных носителей заряда и пузырьков с одинаковыми скоростями.

        Подвижность, связанная с движением жидкости, называется **электрогидродинамической подвижностью.** Она составляет μэгд ~ (10-7 - 10-8) м2/(В·c), т.е. на три - четыре порядка меньше подвижности ионов в газах. Оценка для вышеприведенного примера с диссоциированной примесью дает σ ~10-9 Cм/м.

        Таким образом, в жидкостях обычно проводимость больше, чем в газах и твердых телах за счет облегченной ионизации и затрудненной рекомбинации.

       С другой стороны, отсутствие формы жидкости, легкость очистки дают возможность уменьшения электропроводности, что невозможно сделать с твердыми диэлектриками. В настоящее время существуют несколько новых технологий очистки жидкостей, например **электродиализ**, благодаря которым некоторые жидкости очищали до проводимости, не хуже лучших образцов твердых диэлектриков, типа янтарь, т.е. до проводимости менее  σ ~ 10-19 Ом·м.

       Еще необходимо отдельно рассмотреть электропроводность **электролитов**. В энергетике они применяются, в основном, в аккумуляторах. Кроме того, естественные электролиты обеспечивают электропроводность в системах заземления энергетических объектов. Дело в том, что земля имеет преимущественно электролитический характер электропроводности.

При этом, наиболее важным видом электролитов являются водные электролиты. Вода является самым распространенным жидким веществом, кроме того, она является самым сильным растворителем и самой сильной ионизирующей средой.

В электролитах заряды появляются в жидкости за счет электролитической диссоциации молекул на ионы. Условно все вещества, растворенные в жидкости и частично диссоциирующие на ионы делят на два типа: сильные электролиты и слабые. Сильные электролиты - вещества полностью диссоциирующие на ионы. Это соли типа NaCl, сильные кислоты типа HCl. Выше, при рассмотрении проводимости диэлектрических жидкостей они назывались ионофорами.  Слабые электролиты - малодиссоциирующие вещества, т.е. они растворяются в виде молекул, только малая часть молекул диссоциирует на ионы. Пример - спирты, органические кислоты (например, уксусная кислота). Число ионов зависит от концентрации растворенных веществ. Подвижность ионов - невелика, обычно она составляет порядка 10-8 м2/(В·с).

        За счет большой растворяющей способности воды, обычно электропроводность влажных сред оказывается достаточно велика, т.к. растворенные вещества зачастую содержат соли, которые сильно диссоциируют. Причиной электропроводности увлажненных диэлектриков является растворение в воде различных примесей с их последующей диссоциацией на ионы. Поэтому обычно самым большим "врагом" электрической изоляции является вода, попадание которой в диэлектрик ухудшает электрофизические (конкретно - диэлектрические) характеристики материала.

# Лекция 3. Электрофизические характеристики материалов. Диэлектрическая и магнитная проницаемости.

Особенностями использования материалов в электроэнергетике является то, что они эксплуатируются в условиях воздействия электрических полей, и в несколько меньшей степени, в условиях воздействия магнитных полей. Основными процессами, происходящими под действием этих полей являются поляризация вещества, электропроводность, намагничивание вещества. В предыдущей лекции рассматривалась электропроводность. В этой лекции будут рассмотрены следующие вопросы:

Прежде чем приступить к лекции хотелось бы напомнить термины и определения.

**Электрическое поле** - это вектор, направленный от положительного заряда к отрицательному заряду. Численно оно равно силе, действующей на единичный заряд (заряд в один кулон). Размерность напряженности поля в системе единиц СИ - В/м. С напряжением между точками a и b оно связано следующим выражением:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (3.1), |

а с потенциалом ϕ: E = -grad ϕ. (3.2)

В однородном поле, в межэлектродном зазоре d, эти выражения упрощаются

                          U = E·d, или E = U/d (3.3)

## *3.1. Диэлектрическая проницаемость материалов.*

        Определение этой величины вы должны помнить еще из школы. Давайте вспомним. Если взять плоский конденсатор в вакууме, то заряд на каждой его пластине равен (по модулю):

 (3.4)

где ε0 - диэлектрическая постоянная, или диэлектрическая проницаемость вакуума, ε0 = 8.85 10-12 Ф/м, S- площадь каждой из пластин, d - зазор между пластинами, U - напряжение между ними. Разделив на площадь и перейдя к плотности заряда на обкладке получим σ = ε0E.

Если в межэлектродное пространство ввести диэлектрик, то что произойдет? Все зависит от того, подключен заряженный конденсатор к источнику или отключен. В подключенном конденсаторе напряжение между пластинами принудительно поддерживается, но заряд на каждой пластине увеличивается до нового значения Qm.

**Отношение Qm/Q0 = ε называется диэлектрической проницаемостью материала.**

Из самого определения видно, что диэлектрическая проницаемость материала является **безразмерной** величиной. Перейдя к плотности заряда на обкладке в случае диэлектрика получим σ = ε0εE.

Откуда притекает дополнительный заряд? Ясно, что заряд притекает из источника.

В отключенном от источника заряженном конденсаторе ситуация несколько отличается. Заряд не может измениться, т.к. ему некуда утекать и неоткуда притекать. В этом случае изменится другой параметр. Оказывается уменьшаются напряжение на конденсаторе и, соответственно, напряженность поля в конденсаторе.

**Коэффициент ослабления поля тот же самый, как и в случае увеличения заряда при подключенном источнике, т.е. он равен ε.** Это второе определение диэлектрической проницаемости.

          За счет чего это происходит? Рассмотрим этот вопрос подробнее. Здесь придется обратиться к понятию **поляризации**. Как известно, молекулы состоят из атомов, окруженных электронными оболочками. При этом электроны могут равномерно распределяться по молекуле, а могут и концентрироваться на каких-либо атомах. В первом случае говорят, что молекула неполярная. Пример - молекула водорода или атом гелия, или молекула бензола. Во втором случае в молекуле образуются области с положительным и отрицательным зарядом. Если в молекуле можно выделить направление, вдоль которого с одной стороны можно расположить положительные заряды, а с другой стороны - отрицательные, то такая молекула называется **полярной** или **дипольной**.

**Дипольный момент молекулы является вектором, направленным от отрицательного к положительному заряду. Численно он равен произведению расстояния между зарядами на модуль заряда.**

В неполярной молекуле под действием электрического поля происходит смещение электронных оболочек. Возникает индуцированный дипольный момент у молекулы, молекула поляризуется.

**Поляризация за счет смещения электронов называется электронной.** Возникающий дипольный момент невелик. Диэлектрическая проницаемость неполярных жидкостей и твердых диэлектриков также невелика, она не превышает 3.

**Диэлектрики, состоящие из неполярных молекул называются неполярными диэлектриками**.

В полярной молекуле под действием поля происходит поворот диполя в направлении напряженности электрического поля. В этом случае, в зависимости от значения дипольного момента молекулы и концентрации молекул поляризация может быть значительной. Для жидкостей и твердых диэлектриков с дипольной поляризацией диэлектрическая проницаемость достигает примерно 100 и даже больше.

**Диэлектрики, состоящие из полярных молекул называются полярными диэлектриками**.

В некоторых твердых диэлектриках может существовать особый вид поляризации: спонтанная, или доменная поляризация. Она существует только в кристаллах, но далеко не во всех, в аморфных телах ее не бывает. Оказывается иногда в среде возникают самопроизвольно микроскопические области с поляризацией, которая получается при смещении положительно заряженных ионов решетки в одну сторону, а отрицательно заряженных ионов в другую сторону.

**Микрообласть со спонтанной поляризацией называется доменом.** Обычно размер доменов составляет микроны и десятки микрон. Суммарный дипольный момент любого образца равен нулю, т.к. дипольные моменты доменов направлены в разные стороны.

**Если дипольные моменты доменов хаотически направлены в разные стороны, то такой диэлектрик называется сегнетоэлектриком.**

**Если домены существуют парами, причем у каждой пары дипольные моменты направлены в противоположные стороны, такой диэлектрик называется антисегнетоэлектриком.** Под действием электрического поля домены в диэлектрике поворачиваются в направлении электрического поля, как гигантские диполи. Только в отличии от диполей, где молекулы физически поворачиваются, в доменах перестраивается структура, так, что результирующий вектор поляризации каждого домена чуть-чуть смещается в направлении поля.

**Диэлектрическая проницаемость** **сегнетоэлектриков и антисегнетоэлектриков** велика, она может достигать десятков тысяч.

**Суммарный дипольный момент единицы объема называется поляризацией .** Вектор поляризации, появляющейся под действием электрического поля, направлен вдоль направления электрического поля. Его значение связано с напряженностью поля P = ε0χE, где χ- диэлектрическая восприимчивость. Диэлектрическая проницаемость связана с восприимчивостью ε = 1+χ.

В газообразном диэлектрике количество дипольных моментов мало вследствие низкой плотности газа, поэтому диэлектрическая проницаемость мало отличается от единицы, даже для полярных газов (Отличие в третьем, четвертом знаке после запятой).

Именно поляризация и вызывает увеличение плотности заряда на обкладках конденсатора при подключенном источнике. Значение плотности заряда на обкладках конденсатора σ = P+ε0E. Естественно, что в случае вакуума поляризация равна нулю, диэлектрическая проницаемость в точности равна единице.

В электродинамике вводят понятие **вектора электрического смещения**

 (3.5.)

который определяет заряд как в случае вакуума, так и в случае диэлектрика. Другие названия этого термина - **электрическая индукция или электростатическая индукция**. Размерность индукции Кл/м2. Кроме приведённых выражений полезно будет также вспомнить соотношения для электрического смещения **D**:

|  |  |
| --- | --- |
|  | = σ = ε0εE,                                                                          (3.6.) |

Энергия электрического поля в среде связана с диэлектрической проницаемостью

W = ε0⋅ε⋅E2/2 или W = DE/2, или W = D2/2ε.

Для устройств, содержащих в себе электрические поля важно понимать как изменяется напряженность электрического поля при использовании комбинации двух диэлектриков с разной диэлектрической проницаемостью. Если расположить диэлектрики так, что электрическое поле перпендикулярно поверхности раздела, то **значения напряжённости поля в каждом материале обратно пропорциональны диэлектрическим проницаемостям**:

|  |
| --- |
| (3.7) |

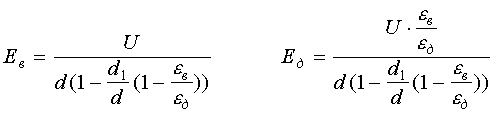
        Рассмотрим простую задачку. В плоский конденсатор с зазором d и напряжением U вводят пластину диэлектрика, которая имеет толщину d1, диэлектрическую проницаемость ε. Как изменится поле в оставшейся части зазора и какое поле будет в диэлектрике?

Несложно решить эту задачу воспользовавшись выражениями (3.3) и (3.7), которые для нашего случая можно переписать как

Ев(d-d1) + Eдd1= U (3.8)

Евεв= Eдεд

Решив систему уравнений получим:

 (3.9)

Анализируя эти выражения можно увидеть, что поле в газовой прослойке всегда увеличено, а в диэлектрической - уменьшено. Емкость конденсатора в этом случае увеличена, но незначительно по сравнению с емкостью конденсатора без диэлектрика.

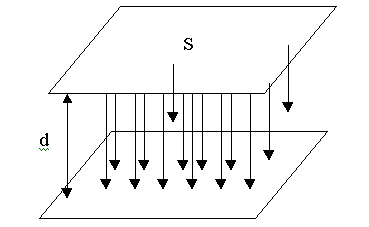
В случае, когда электрическое поле параллельно поверхности раздела, напряженности поля в материалах одинаковы. Этот случай можно реализовать, вводя в конденсатор диэлектрик, толщины, равной величине межэлектродного зазора в конденсаторе. Емкость, при этом, увеличивается существенно, пропорционально объемной доле диэлектрика .

Для понимания процессов в диэлектриках важно знать значения полей в случае различных электродов. Наиболее часто используются модельные представления электродных систем, к которым с той или иной степенью приближения можно свести многие реальные системы электродов. Это три типа полей:

* - плоско- параллельное,
* - радиально-цилиндрическое, или аксиальное
* - радиально-сферическое.

Ниже приводятся описание этих полей и необходимые для расчета формулы.

**Плоско-параллельное поле.**  Здесь эквипотенциальные поверхности (поверхности уровня) представляют собой параллельные плоскости, а линии индукции, совпадающие с направлением вектора напряженности поля (которая во всех точках поля одинакова), - перпендикулярны этим плоскостям.

  
Значение ёмкости:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (3.10) |

**В плоско-параллельном поле напряженность Е одинакова во всех точках.** Поэтому:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (3.11) |

**Радиально-цилиндрическое поле.** Эквипотенциальными в этом поле являются коаксиальные (имеющие общую ось) цилиндрические поверхности, а линии поля располагаются в радиальном направлении. Распределение напряженности электрического поля:

|  |  |
| --- | --- |
| Е( r ) = |  |

Значение емкости:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (3.12) |

r1 - радиус внутреннего цилиндра, r2 - радиус внешнего цилиндра

## *3.2. Магнитная проницаемость.*

Аналогично рассмотрению диэлектрической проницаемости, связывающей электрическую индукцию с напряженностью электрического поля, магнитная проницаемость связывает магнитную индукцию ***B*** (Определяет, с какой [силой](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A1%D0%B8%D0%BB%D0%B0) магнитное поле действует на [заряд](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%AD%D0%BB%D0%B5%D0%BA%D1%82%D1%80%D0%B8%D1%87%D0%B5%D1%81%D0%BA%D0%B8%D0%B9_%D0%B7%D0%B0%D1%80%D1%8F%D0%B4) , движущийся со скоростью . ) с напряженностью магнитного поля ***H***.

         B=μ0⋅μ⋅Η (3.15)

Здесь μ0- магнитная постоянная или магнитная проницаемость вакуума. μ0 = 4π⋅10-7 Гн/м. Можно ввести понятие намагниченности μ0M = B - μ0Η. Этот фактор вносит в магнитную индукцию именно среда, т.е. намагниченность является характеристикой среды. Аналогично поляризации среды в электрическом поле намагниченность складывается из намагниченностей отдельных атомов, которые называются магнитными моментами атомов M = Σmi. Намагниченность обычно пропорциональна напряженности магнитного поля

M = χм ⋅Н (3.16)

где χм - магнитная восприимчивость вещества. Значения μ и χм связаны μ = χм+1

Энергия магнитного поля W = B⋅Η/2 = μ0⋅μ⋅Η2/2 = B2/2μ0⋅μ

Магнитное поле имеет отличия от электрического поля. Электрическое поле создается зарядами, магнитное - токами. Силовые линии электрического поля начинаются на положительном заряде и, обязательно, заканчиваются на отрицательном заряде. Силовые линии магнитного поля замкнуты, они окружают линии тока. В электрическом поле заряд порождает индукцию поля.

D = q/4πε0⋅ε⋅r2 (3.17)

            В магнитном поле ток порождает напряженность магнитного поля (закон Био-Савара).

H = I/2πr. (3.18)

            Приведем еще выражение для напряженности поля и индукции в длинном соленоиде, которое специфично именно для магнитного поля.

H = n⋅I, B = μ0⋅μ⋅n⋅I (3.19)

где n- число витков катушки на единицу длины.

            В электрическом поле сила, действующая на заряд, пропорциональна напряженности поля (закон Кулона). В магнитном поле, сила действующая на заряд пропорциональна индукции. Еще одно принципиальное отличие состоит в том, что диэлектрическая проницаемость не может быть меньше 1, тогда как магнитная проницаемость может быть меньше 1 в некоторых материалах..

*Различные материалы по разному ведут себя в магнитном поле и, соответственно имеют различную магнитную проницаемость*.

**Диамагнетики - вещества, имеющие магнитную проницаемость меньше 1.**

Подавляющее большинство веществ являются диамагнетиками. Диамагнетизм проявляется тогда, когда атомы и молекулы не имеют магнитного момента в отсутствии магнитного поля, а намагниченность создается только за счет действия магнитного поля на электроны молекул. При этом магнитная восприимчивость χм< 0. По порядку величины значение восприимчивости составляет (-10-6).   
    **Парамагнетики - вещества, имеющие магнитную проницаемость больше 1.**

Эти вещества содержат атомы и электроны, имеющие собственный магнитный момент, который связан с орбитальным движением электронов или с собственным моментом импульса электрона, т.н. спином. Парамагнетиками являются кислород, магний, натрий (NaCl - диамагнетик), кальций, титан, палладий.

**Ферромагнетики - вещества, имеющие магнитную проницаемость много больше чем 1, которая создается спонтанной намагниченностью доменов, хаотически ориентированных в пространстве**.

Это железо, никель, кобальт и ряд более редких веществ. На основе этих элементов изготавливаются магнитные материалы.

**Ферримагнетики - вещества, имеющие магнитную проницаемость много больше чем 1, которая создается спонтанной намагниченностью кристаллических решеток, попарно антипараллельно ориентированных в пространстве. При этом суммарный магнитный момент не равен нулю.**

    **Антиферромагнетики - вещества, имеющие магнитную проницаемость немного больше чем 1, которая создается спонтанной намагниченностью кристаллических решеток, попарно антипараллельно ориентированных в пространстве и скомпенсировавших друг друга.**

Примеры ферримагнетиков и антиферромагнетиков - ферриты, соединения типа Fe2O3 c MeO, где Ме - двухвалентный металл.

# Лекция 4. Теплофизические и механические характеристики материалов.

Теплофизические характеристики материалов очень важны для практики. Действительно, материалы в различных энергетических устройствах и установках работают в различных температурных условиях. Это могут быть климатические условия: солнце, влага, мороз и т.д. Это может быть и нагревание самого материала за счет процессов, происходящих в эксплуатации. Это может быть и материалы для устройства подогрева электрооборудования в холодное время года.

Поэтому важно понимать, как ведут себя материалы при различных температурах, как они могут отводить тепло или аккумулировать тепло.

***4.1. Понятие температуры. Характерные температуры (плавления, кипения, Кюри,  и т.п.) Температуростойкость материалов. Теплостойкость*** *материалов.*

Температура - это понятие, введенное для характеристики энергии, которой обладают молекулы вещества. С другой стороны, это физическая характеристика, которая соответствует равновесию при приведении двух тел в контакт. Как и всякая физическая характеристика, она поддается измерению. Общепринятыми, в настоящее время, являются две температурные шкалы - Цельсия и Кельвина. Мера одного градуса у них одинакова, она соответствует (исторически) одной сотой от разницы температур кипения воды и ее плавления. У Цельсия, вы знаете, нуль соответствует точке плавления, а 100 °С - точке кипения воды. По шкале Кельвина, или абсолютной шкале температур, нуль соответствует абсолютному нулю, а нулевая температура по шкале Цельсия соответствует 273 К. Значок градуса в этом случае не ставится. Ниже нуля Кельвина температуры в принципе не может быть. Она соответствует абсолютному покою, при этой температуре, согласно классической механике, молекулы и атомы абсолютно неподвижны. В квантовой механике это не совсем так, возможны колебательные движения молекул. Кроме того, некоторые электроны и при этой температуре обладают энергией в силу невозможности занятия энергетических уровней, уже занятых другими электронами. Нулевая температура в принципе недостижима, предпринимается много попыток достичь минимума температуры в надежде проявления новых свойств материи. На этом пути была обнаружена сверхпроводимость некоторых металлов, сверхтекучесть жидкого гелия, т.н. гелия-II. Я знаю о достижении к настоящему времени, по крайней мере, примерно одной тысячной доли градуса.

Для материалов вводят несколько характерных температурных точек, указывающих работоспособность и поведение материалов при изменении температуры.

***Нагревостойкость*** - максимальная температура, при которой не уменьшается срок службы материала.

По этому параметру все материалы разделены на классы нагревостойкости.

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Обозначение класса | Y | A | E | B | F | H | C |
| Рабочая температура, °С | 90 | 105 | 120 | 130 | 155 | 180 | Выше 180 |

***Теплостойкость*** - температура, при которой происходит ухудшение характеристик при кратковременном ее достижении. ***Термостойкость*** - температура, при которой происходят химические изменения материала. ***Морозостойкость*** - способность работать при пониженных температурах (этот параметр важен для резин). ***Горючесть*** - способность к воспламенению, поддержанию огня, самовоспламенению Это различные степени горючести.

Все эти понятия определяют характерные температуры, при которых меняется какое-либо свойство материала. Есть некоторые температуры, характерные для всех материалов, есть температуры, специфичные для некоторых электротехнических материалов. при которых резко меняются какие-либо характеристики.

Большинству материалов присущи точки плавления, кипения.

http://sermir.narod.ru/lec/Warning.gif**Точка плавления - температура, при которой происходит переход из твердого состояния в жидкое.** Не обладает точкой плавления жидкий гелий, он даже при нуле Кельвина остается жидким. К наиболее тугоплавким можно отнести вольфрам - 3387 °С, молибден 2622 °С, рений - 3180 °С, тантал - 3000°С. Есть тугоплавкие вещества среди керамик: карбид гафния HfC и карбид тантала TaC имеют точки плавления 2880 °С., нитрид и карбид титана - более 3000 °С.

Есть материалы, в основном это термопластичные полимеры, которые обладают точкой размягчения, но до плавления дело не доходит, т.к. начинается разрушение полимерных молекул при повышенных температурах. У термореактивных полимеров даже до размягчения дело не доходит, материал раньше начинает разлагаться. Есть сплавы и другие сложные вещества у которых сложный процесс плавления: при некоторой температуре, называемой «солидус» происходит частичное расплавление, т.е. переход части вещества в жидкое состояние. Остальное вещество находится в твердом состоянии. Получается что-то типа кашицы. По мере повышения температуры все большая часть переходит в жидкое состояние, наконец при некоторой температуре, называемой «ликвидус» произойдет полное расплавление вещества. Например сплав олова и свинца для пайки, называемый попросту «припой», начинает плавиться примерно при 180 °С (точка солидус), а расплавляется примерно при 230 °С (точка ликвидус).

В любых процессах плавления, достижение определенной точки является необходимым, но недостаточным условием плавления. Для того, чтобы расплавить вещество нужно сообщить ему энергию, которая называется теплотой плавления. Она рассчитывается на один грамм (или на одну молекулу).

http://sermir.narod.ru/lec/Warning.gif**Точка кипения - температура, при которой происходит переход из жидкого состояния в парообразное.** Кипят практически все простые вещества, не кипят сложные органические соединения, они разлагаются при более низких температурах, не доходя до кипения. На точку кипения оказывает значительное влияние давление. Так, например для воды можно сдвинуть точку кипения от 100 °С до 373°С приложением давления в 225 атм. Кипение растворов, т.е. взаимно растворимых друг в друге веществ происходит сложным образом, кипят сразу два компонента, только в паре одного вещества больше, чем другого. Например слабый раствор спирта в воде выкипает так, что в паре спирта больше чем в воде. За счет этого работает перегонка и после конденсации пара получается спирт, но обогащенный водой. Есть смеси выкипающие одновременно, например 96% спирт. Здесь при кипении состав жидкости и состав пара одинаковы. После конденсации пара получается спирт точно такого же состава. Такие смеси называются **азеотропными**.

Есть температуры специфичные для электротехнических материалов. Например для сегнетоэлектриков вводят т.н. **точку Кюри**. Оказывается, что сегнетоэлектрическое состояние вещества возникает только при пониженных температурах. Существует такая температура для каждого сегнетоэлектрика, выше которой домены не могут существовать и он превращается в параэлектрик. Такая температура называется точкой Кюри. Диэлектрическая проницаемость ниже точки Кюри велика, она слабо нарастает по мере подхода к точке Кюри. После достижения этой точки диэлектрическая проницаемость резко падает. Например, для наиболее распространенного сегнетоэлектрика: титаната бария, точка Кюри  120 °С, для цирконат-титаната свинца  270 °С, для некоторых органических сегнетоэлектриков температура Кюри отрицательна.

Аналогичная температура (и тоже называется точка Кюри) имеется для ферромагнетиков. Поведение магнитной проницаемости подобно поведению диэлектрической проницаемости по мере повышения температуры и подхода к точке Кюри. Единственное отличие - падение магнитной проницаемости с ростом температуры происходит более резко после достижения точки Кюри. Значения точки Кюри для некоторых материалов: железо  770 °С, кобальт  1330°С, эрбий и гольмий  (-253°С), керамика - в широком диапазоне температур. Для антиферромагнетиков аналогичная точка называется **точкой Нееля**.

***4.2. Теплоемкость, теплопроводность, температурные коэффициенты материалов.***

http://sermir.narod.ru/lec/Warning.gif**Теплоемкость - это способность накапливать тепловую энергию в материале при его нагревании**. Численно удельная теплоемкость равна энергии, которую нужно ввести в единицу массы материала, чтобы нагреть его на один градус. Размерность удельной теплоемкости [Дж/(кг· К)]. Эта величина экстенсивная, т.е. можно говорить о теплоемкости отдельной молекулы или атома, затем просуммировать количество молекул до одного грамма или до одного моля и получить теплоемкость одного грамма или одного моля вещества. Значение теплоемкости зависит от природы материала. Самая высокая теплоемкость у воды 4.2·103 Дж/(кг· К) или 4.2 кДж/(кг·К). У подавляющего большинства материалов удельная теплоемкость порядка 1 кДж/(кг· К). Теплоемкость зависит от температуры. Вблизи нуля Кельвина она мала, в рабочем диапазоне температур - слабо меняется с ростом температуры. Какие-либо скачки теплоемкости связаны со структурной перестройкой тел, например с растянутым плавлением таких веществ, как парафин. Здесь можно упомянуть пример с парафиновой прогревающей повязкой, когда тепло долго сохраняется за счет высокой теплоемкости парафина и повязка греет длительное время.

Теплоемкость газов хорошо изучена теоретически. Для газов даже введено два типа теплоемкости: при постоянном давлении Cp и при постоянном объеме Cv. Обычно рассматривают теплоемкость, приходящуюся на одну молекулу.

Тогда для одноатомного газа Cp= 5/2 kT, а Cv = 3/2 kT. Почему при постоянном давлении труднее нагревать молекулы? Ясно, что при этом газ расширяется, значит нужна дополнительная энергия, чтобы нагревать газ при постоянном давлении. Отметим, что для многоатомных газов теплоемкость выше, т.к. при нагревании требуется энергия на возбуждения вращения молекул, колебания и т.п.

Приведем выражение для тепловой энергии материала:

Q = c⋅m⋅(T2-T1), (4.1)

где m-масса материала, T2,T1 конечная и начальная температуры.

Это выражение можно переписать для локальных, удельных, параметров:

Q/V = c⋅d⋅(T2-T1), (4.2)

где Q/V - удельное выделение энергии (в единице объема), d- плотность материала.

Выражения (4.1 - 4.2) позволяют определить изменение температуры материала в процессе его работы, например за счет потерь энергии, протекания тока или какого-либо другого процесса. Энерговыделение Q задается конкретными процессами, протекающими в материале.

http://sermir.narod.ru/lec/Warning.gif**Теплопроводность** **определяет способность передать тепловую энергию через материал.** Это тоже важная характеристика, она характеризуется коэффициентом теплопроводности λ. Численно он равен потоку q проходящему через площадку единичной площади, при перепаде на ее гранях температуры 1 °С. Лучше всего передают тепло металлы, так у меди λ = 400 Вт/(м К), для серебра чуть больше (418), для алюминия 200 Вт/(м К),, для нержавеющей стали примерно 20 Вт/(м К), для простых сталей примерно в два раза выше.

         У других материалов теплопроводность значительно ниже. Например у бетона λ = 0.6 Вт/(м К), у трансформаторного масла λ = 0.13 Вт/(м К), для воздуха λ = 3,67·10-2 Вт/м·К). В справочниках часто приводят в устаревших единицах, например кал/(см·сек·С); для перевода в систему единиц СИ нужно умножить на 4.18 ·102.

Для газов и жидкостей обычная теплопроводность играет незначительную роль. В этом случае главную роль играют **конвекция** и **излучение**.

Конвекция возникает из-за того, что нагретые жидкость или газ расширяются, их плотность уменьшается, они начинают «всплывать» под действием выталкивающей силы Архимеда. За счет этого возникают локальные течения, которые эффективно уносят тепло из нагретой зоны. В теплотехнике развит аппарат расчета теплопроводности при учете конвекции. Грубо, можно сказать, что конвекция увеличивает теплопроводность в несколько раз.

Учет естественной конвекции в воздухе приводит к увеличению эффективной теплопроводности в конвекторе из двух параллельно расположенных вертикальных пластин **примерно в 10 раз** при температуре поверхностей примерно 150-200 °С.

Тепловое излучение также важно, особенно при повышенных температурах. Основное выражение, используемое в оценках имеет вид:

qизл=εσΤ4 ,

гдеε- коэффициент серости излучающего материала, σ- посто~~я~~нная Стефана-Больцмана, σ= 5.67 ·10-8Вт/(м2К4). Коэффициент серости зависит от сорта материала, в особенности от его теплопроводности и состояния поверхности. Для металлов этот коэффициент невелик, он меняется от единиц до десятков процентов, в зависимости от шероховатости поверхности, причем более шероховатой поверхности соответствует больший коэффициент серости. Для красок (исключая специальные с электропроводными компонентами), ε находится в диапазоне 80 - 95%. Оценки показывают, что этот фактор становится главным при температурах порядка 100 градусов и выше.

Самая высокая теплопроводность в нормальном диапазоне температур может быть достигнута путем переноса теплоты испарения. Если где-то испарить жидкость, а затем ее конденсировать в другом месте, то теплота испарения заберет часть тепла от нагретого участка и передаст его при конденсации в другом месте. Это эквивалентно теплопроводности от одного места до другого. Оценки показывают, что эквивалентная теплопроводность может превысить теплопроводность меди примерно в пять тысяч раз.

**Температурные коэффициенты**.

Практически все свойства материалов зависят от температуры. Обычно это учитывается введением т.н. температурного коэффициента. Строго математически для какого-либо свойства х он вводится выражением

|  |  |
| --- | --- |
| Tkx = | http://sermir.narod.ru/lec/lect4-51.gif |

где х может быть любой характеристикой материала. Размерность любого температурного коэффициента - 1/К. Например возьмем в качестве х размер l образца материала. Тогда

|  |  |
| --- | --- |
| Tkl = | http://sermir.narod.ru/lec/lect4-52.gif |

означает температурный коэффициент расширения материала. Если взять диэлектрическую проницаемость, то это будет температурный коэффициент диэлектрической проницаемости, если взять удельное сопротивление, то это будет температурный коэффициент удельного сопротивления.

В практике обычно пользуются линейным приближением, считая изменение характеристики с температурой малым, по сравнению с основным значением. Для этого случая можно выписать температурную зависимость в явном виде.

**Для удельного сопротивления** ρ(Т) = ρ(Т0)(1 + Ткρ(Т-Т0))

**Для размера тела** l(Т) = l(Т0)(1 + Ткl(Т-Т0))

**Для диэлектрической проницаемости** ε(Т) = ε (Т0)(1 + Ткε(Т-Т0))

**Для магнитной проницаемости** μ(Т) = μ (Т0)(1 + Ткμ(Т-Т0))

Конкретные значения температурных коэффициентов материалов можно найти в справочниках. В случае сильного изменения характеристик с температурой (например диэлектрической проницаемости в случае сегнетоэлектриков, или магнитной проницаемости в случае ферромагнетиков) линейным приближением пользоваться нельзя. В этих случаях следует воспользоваться таблицами или графиками.

***4.3. Механические свойства материалов. Удлинение, деформация, модуль упругости. Разрушающие напряжения при различных видах нагрузки***.

В процессе эксплуатации на материал действуют механические нагрузки. Основные виды нагрузки: сжатие, растяжение, сдвиг, кручение.

http://sermir.narod.ru/lec/Warning.gif**Изменения размеров и формы тела под действием нагрузок называются деформациями**. Их легко проиллюстрировать на примере стержня.

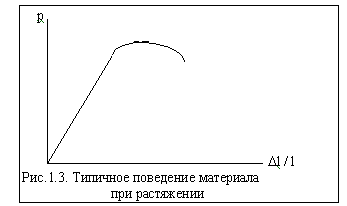
Если к стержню площадью s приложить силу F вдоль оси, то его продольный размер l и поперечный размер r изменятся

Δl/l = p /E, (4.4)

Δr/r = -σp /E,

где p = F/s- механическое напряжение, E - модуль Юнга или модуль всестороннего сжатия (или растяжения), σ- коэффициент Пуассона. Размерности p, E - Н/м2, σ - безразмерна.

Если сила сжимает стержень, то на стержень действует давление, продольное удлинение отрицательно, зато поперечное положительно. В случае растягивающей силы, т.е. действия напряжения - наоборот. Удлинение вдоль стержня, положительно, а поперек - отрицательно. При снятии нагрузки исходные размеры восстанавливаются. Такие деформации называются упругими.

В

выражение (4.4) показывает линейную связь нагрузки с удлинением.

http://sermir.narod.ru/lec/Warning.gif**Это выражение называется законом Гука.** Он характерен для упругих деформаций.

По мере увеличения нагрузки пропорциональность между изменением размера и нагрузкой перестает выполняться. Примерно при этих же нагрузках, после их снятия исходный размер полностью не восстанавливается.

http://sermir.narod.ru/lec/Warning.gif**Предел упругости (σ0.05) - напряжение, при котором остаточная деформация не превышает 0.05%.**

http://sermir.narod.ru/lec/Warning.gif**Предел текучести (σ0.2) - напряжение, при котором происходит удлинение до 0.2% без увеличения нагрузки.**

http://sermir.narod.ru/lec/Warning.gif**Предел прочности или временное сопротивление σв-напряжение, соответствующее максимальной нагрузке.**

           Помимо указанных видов деформации при натяжении рассматривают механическую прочность при разных видах нагрузки, например при сжатии, при изгибе. Механизм разрушения во всех случаях заключается в появлении и прорастании трещин. Различают два вида разрушения - хрупкое и вязкое. При хрупком разрушении деформации малы и скорость разрушения велика. В некоторых случаях она достигает скорости километров в секунду. При вязком разрушении перед трещиной существует значительная пластическая деформация и скорость распространения трещины мала.

http://sermir.narod.ru/lec/Warning.gif**Пластическая деформация** **- часть деформации, которая остается после снятия нагрузки.**

**Твердость материала.** Свойство материала противостоять деформации при локальном контакте называется твердостью. Существует множество шкал твердости. Например шкала Мооса. Она применяется в основном для минералов. По ней выбраны десять материалов, каждый из ряда царапает все нижележащие и царапается вышележащими. Наибольшую твердость имеет алмаз, затем идет корунд и т.д. Нефрит имеет пятую позицию, сталь, в зависимости от закалки и типа - пятую или шестую. Известняк - третью.

Другие шкалы: Бринелля, Роквелла, Виккерса и т.д. основаны на вдавливании в материал шарика или алмазной призмы и измерении размеров полученной ямки. Далее по специальным таблицам определяют соответствующую твердость.

# Лекция 5.  Конструкционные материалы.

***5.1.  Общие свойства  конструкционных материалов.***

Разработка конкретных узлов и устройств ставит ряд общих и специфических задач для используемых материалов. Во первых, они должны выполнять те функции, которые заложены в исходные требования. Во вторых, материалы должны выбираться более дешевыми с учетом трудоемкости обработки и предполагаемого ресурса работы. В третьих, материалоемкость изделия должна быть, по возможности минимальной. Для того, чтобы все эти требования обеспечить необходимо хорошо понимать свойства материалов.

Наиболее распространенными конструкционными материалами являются металлы, а из металлов - сталь. Она составляет примерно 80-85% от всего объема выпуска металлов. Это обусловлено как относительной распространенностью железа, так и технологичностью обработки сплавов на основе железа.

*Относительно распространенности элементов можно сказать следующее. Как вы наверное знаете, наша вселенная появилась в результате Большого Взрыва. При этом, первыми образовались легкие элементы, сначала водород, затем из водорода путем термоядерной реакции слияния - гелий, затем литий, бериллий, бор, углерод, азот, кислород. В первых рядах - кремний, алюминий, магний и железо. А по распространенности в земной коре, самыми распространенными элементами являются кислород и кремний (75%) и железо (4%). С глобальной точки зрения - это материалы будущего.*

Металлы представляют собой поликристаллические тела, состоящие из мелких кристаллов размером от 1 мм до 10 мкм. Они называются зернами, или кристаллитами.

**Общие свойства металлов:**

**- высокая теплопроводность и электропроводность  
- повышенная способность к пластической деформации  
- хорошая отражательная способность (металлический блеск)  
- положительный ТКС  
- термоэлектронная эмиссия при нагреве.**

        Чистые металлы обладают низкой прочностью, они слишком пластичны и поэтому практически не используются. Обычно используют сплавы разных металлов, в качестве добавок используют и неметаллы. При этом компоненты могут смешиваться друг с другом на молекулярном уровне, т.е. взаимно растворяться друг в друге, а могут и не смешиваться образуя отдельные кристаллиты. В металловедении их называют фазами. Форма кристаллитов, их размер, взаимное расположение играет важную роль в создании тех свойств, которые требуются от материала. Каждый кристаллит представляет собой однородную систему со своей кристаллической структурой. Последняя образована ионами, образующими остов решетки и обобществленными электронами. Собственно говоря притяжением между электронами и ионным остовом решетки обязаны металлы своей прочностью. Большинство металлов имеют решетки следующих типов: кубическая объемно-центрированная, где ионы расположены по углам куба и один ион в центре куба, кубическая гранецентрированная, где 8 ионов расположены по углам куба и шесть ионов расположены по центрам сторон куба, гексагональная, где ионы расположены по углам шестигранной призмы и в центре плоскостей призм, а также три иона в центральной плоскости призмы. Если представить себе атомы шариками, то такие укладки шаров представляют собой структуры, близкие к плотной упаковке.

          Если в идеальный кристалл ввести атомы другого типа, которые хорошо смешиваются друг с другом на молекулярном уровне (растворяются), то в ряде случаев образуются т.н. «твердые растворы». Введенные атомы в достаточно большом количестве, чтобы они были в окружении каждого атома -хозяина, но в недостаточном количестве, чтобы менять строение решетки, образуют твердый раствор. Бывают два типа твердых растворов: твердый раствор внедрения и твердый раствор замещения. В первом случае добавленные атомы находятся в междоузлиях решетки, а во втором случае - они замещают атомы в кристаллической решетке.

***5.2. Конструкционные стали.***

Стали являются многокомпонентными системами на основе железа. В зависимости от добавок их свойства сильно меняются. Первой и основной добавкой к железу является углерод.

         Температура плавления железа 1539 °С, плотность 7.68 Т/м3. Две основные модификации - α - железо и γ - железо. Первая имеет объемно-центрированную решетку и существует в интервале температур до 910 °С и после 1392 °С. До температуры 768 °С эта модификация **ферромагнитна**. В промежуточном диапазоне существует γ-железо, у которого решетка гранецентрированная. Эта структура **парамагнитна**.

Температура плавления углерода 3500 °С, плотность 2.5 Т/м3. Углерод растворим в железе в твердом и жидком состоянии, также может образовывать химическое соединение цементит, при больших концентрациях может существовать в виде графита.

**Основные структуры системы Fe-C**

- твердый раствор углерода в α - железе с растворимостью всего 0.02 %, атом углерода помещается в центре грани решетки. Эта структура называется **феррит.**

- твердый раствор углерода в γ - железе с растворимостью 2.14 %, атом углерода помещается в центре куба. Эта структура называется **аустенит**. Отличается высокой пластичностью.

**- Цементит** - соединение Fe3C. Здесь 6.67% углерода. До температуры 210 °С цементит ферромагнитен. Отличается высокой твердостью.

        Кроме того, в качестве особой фазы может существовать графит, и в качестве эвтектической структуры (смеси двух структур) - **ледебурит.** Он представляет собой структуру, состоящую из пластин цементита, проросших древовидными (дендритами) структурами кристаллов аустенита.

**Сплавы с содержанием углерода до 2.14 % называются сталью, а выше 2.14 % - чугуном.** Сталь не содержит ледебурита, поэтому она пластична, ковка и т.п. Чугун в силу своего строения не поддается ковке, зато обладает лучшими литейными качествами, меньшей усадкой, более низкой температурой плавления (около 1000 °С). Аустенит при охлаждении ниже примерно 700 °С может превратиться в перлит - пластинчатые, чередующиеся структуры феррита и цементита.

       При очень медленном охлаждении расплава цементит не образуется, а вместо него образуются графит + аустенит при температуре 700-1200 °С и графит + феррит при температуре ниже 700 °С. Выдерживание сплава при повышенных температурах также приводит к распаду цементита на графит и второй твердый раствор (феррит или аустенит).

**Влияние различных добавок на сталь.**

1. **Содержание углерода.** Чем больше углерода, тем более хрупкая, менее вязкая, менее пластичная, поначалу более прочная, затем менее прочная. Растет удельное сопротивление, коэрцитивная сила, падает плотность, теплопроводность, магнитная проницаемость.

2. **Содержание кремния и марганца**. Их добавляют при выплавке для удаления окислов железа. Оставаясь в стали кремний повышает предел текучести, что затрудняет например штамповку. Марганец повышает прочность.

3. **Содержание серы**. Сера является естественной вредной примесью в металле. Она образует FeS, которые нарушают контактирование зерен между собой. При этом ухудшаются коррозионная стойкость, трещиностойкость, свариваемость.

4. **Фосфор** также является вредной примесью. Он частично растворяется в стали, частично собирается на границах зерен. Поэтому уменьшаются пластичность, вязкость, трещиностойкость.

5. **Содержание азота, кислорода и водорода**. Образование оксидов и нитридов происходит, в основном на границах зерен. Поэтому они способствуют хрупкому разрушению. Особенно опасен водород, что приводит к водородной хрупкости стали.

**Легирующие добавки**. Обычно это никель, марганец. Как правило они повышают предел текучести стали, причем они способствуют стабильности аустенита в низкотемпературной области. Из него делают нержавеющие стали. Отметим, что нержавеющая сталь действительно парамагнитна, как и должно быть у аустенита.

         Если в феррите увеличить содержание углерода, например путем быстрого охлаждения аустенита, то получится мартенсит - пересыщенный твердый раствор внедрения углерода в феррите. Он отличается высокой твердостью и прочностью.

         Рассмотрим наиболее популярные марки стали.

**Стали обыкновенного качества: Ст.0, Ст.1, Ст.2, Ст.3, Ст.4, Ст.5, Ст.6.**

С ростом номера растет содержание углерода от 0.06% до 0.4-0.5%, во всех сталях содержится марганец (0.2-0.7%), кроме Ст.0. В названии присутствуют знаки «сп», «пс», «кп», означающие «спокойная», «полуспокойная» и «кипящая». Фактически различаются разным количеством FeO, который взаимодействует с углеродом, образуя СО, который, в свою очередь, выделяется в виде пузырьков газа. Уменьшают содержание FeO, добавляя раскислители, взаимодействующие с FeO и уменьшающие, тем самым, его количество. Эти вещества - ферромарганец, ферросилиций и алюминий. Прочность обычных сталей порядка σв≈400 Мпа, σ0.2≈200 Мпа, удлинение до разрыва δ≈20%.

        В качественных сталях Ст.08, Ст.10, Ст.15, Ст.20 ,......, Ст.85 цифры означают содержание углерода в сотых долях процента. В них более строгие ограничения на содержание фосфора, серы и других неметаллических включений. Содержание углерода принципиально меняет свойства сталей. Низкоуглеродистые обладают низкой прочностью, низкой упругостью, зато высокой пластичностью и большим удлинением до разрыва, хорошей свариваемостью. Применяют для штамповки, сварки ответственных узлов и т.п. Высокоуглеродистые стали обладают повышенной прочностью σв>700 Мпа, износоустойчивостью, упругостью. Применяют для изготовления рессор, пружин и т.п.

          Легированные стали отличаются добавкой легирующих элементов: А-азот, Г-марганец, Н-никель, С-кремний, Т-титан, Х-хром, Ю-алюминий. Цифры в начале названия означают содержание углерода в сотых долях процента, цифры после букв означают содержание легирующего элемента в процентах. Например в популярной марке нержавеющей стали 12Х18Н10Т содержится 0.12% углерода, 18% хрома, 10% никеля и 1 % титана. В зависимости от добавок можно резко усилить те или иные свойства стали.

          Специальные стали с магнитными свойствами основаны на установлении структуры феррита, либо мартенсита. Чистые ферритные низкоуглеродистые, легированные кремнием стали являются прекрасными магнитно-мягкими материалами для трансформаторов. Мартенситные сплавы с большим содержанием углерода (1%), легированные кобальтом и хромом образуют семейство магнитотвердых материалов для магнитов.

***5.3. Цветные металлы и сплавы.***

      Наиболее распространенными из цветных металлов являются медь, алюминий, олово, титан, а также тугоплавкие металлы молибден и вольфрам. По механическим характеристикам, как конструкционные материалы, цветные металлы, как правило, уступают сталям. Кроме того, они более редки и дороги. Поэтому применяются они там, где нужны особые характеристики. Например вес конструкций, коррозионная стойкость, электропроводность, пластичность и т.п..

       Для самолетостроения, судостроения, космической техники используют сплавы алюминия и титана. Алюминиевые сплавы имеют характерную прочность примерно на уровне рядовых сталей σв ~ 300 МПа, при этом удельный вес (плотность) примерно в три раза меньше d ~2.7 Т/м3, против 7.9 Т/м3 у железа. Можно выделить две основные группы сплавов алюминия: «дуралюмин», представляющий собой сплав алюминия, меди и магния и «силумин», представляющий собой сплав алюминия с кремнием, с добавкой магния и марганца. Первые являются деформируемыми прочными сплавами, пригодными для штамповки и используемыми для изготовления листов, профилей и т.п. Один из популярных сплавов Д16 имеет временную прочность 540 МПа, удлинение до разрыва 11%. Силумины пригодны только для литья, т.к. они достаточно текучи, обладают малой усадкой и не образуют горячих трещин. Прочность их невелика σв~200 МПа, удлинение до разрыва 2-4%.

        Вторые по значению - сплавы меди, а именно латуни и бронзы. Латунь является сплавом меди с цинком. Обычно для деформируемых латуней в марке, после буквы Л следует цифра, означающая процент меди. Например латунь Л63 содержит 63% меди. Если еще есть буквы и цифры - это означает наличие и содержание легирующих элементов. Из деформируемых латуней делают листы, ленты, трубы, проволоку. Один из сплавов ЛЖМц59-1-1 имеет временную прочность до 700 МПа, удлинение до разрыва 50%.

      Бронзы являются сплавами со многими другими компонентами. Обычно это олово, алюминий, кремний, цинк. Они коррозионно стойки, прочны, имеют высокие технологические характеристики. Ряд бронз обладает высокой упругостью и используется для изготовления пружин. Свинцовые бронзы обладают высокими антифрикционными свойствами и используются в подшипниках.

***5.4. Бетон. Железобетон.***

Бетон представляет собой композицию, составленную из затвердевшей смеси цемента, заполнителя, воды. Он является искусственным каменным материалом. Основное достоинство, как конструкционного материала - его дешевизна. Бетоны бывают разными, в зависимости от типов компонентов: малопористые, крупнопористые, ячеистые (по структуре заполнителя), крупнозернистые и мелкозернистые, естественные и автоклавные и т.д. Марка бетона обычно называется по прочности на осевое сжатие, например М400 означает прочность на сжатие 400 кГ/см2 (40 МПа). На растяжение прочность бетона обычно в 10-20 раз меньше. На изгиб тоже малая прочность, примерно в 5-10 раз меньше чем прочность на сжатие. Это не удивительно, ведь при изгибе одна часть испытывает сжатие, а вторая растяжение. Тот факт, что бетон практически не имеет прочности на растяжение сильно уменьшает возможности его использования. Чтобы выйти из положения и заставить работать конструкции на основе бетона на растяжение, придумали использовать армированный бетон, причем в арматуре предварительно создают натяжение при твердении. После затвердевания такая бетонная конструкция способна выдерживать и растягивающие напряжения, ведь на самом деле бетон здесь оказывается сжатым и при растягивающих нагрузках в нем лишь уменьшается давление.

**Электрические свойства бетонов**. Обыкновенный бетон является слабопроводящим материалом. В основном его проводимость определяется содержанием влаги. Увлажненный бетон может иметь электропроводность на уровне 10-3 См/м, сухой бетон до 10-8 См/м. Введение специальных электропроводящих добавок (сажа, кокс) позволяет получить проводимость до 10 См/м. Диэлектрическая проницаемость сильно зависит от типа заполнителя. Обыкновенный бетон имеет ε ~ 5-6, добавки порошка сегнетокерамики могут поднять ее до 50-60. В энергетике бетон используется и как конструкционный материал (в большей степени), и как диэлектрический материал, и как электропроводный материал.

# Лекция 6.  Проводниковые материалы

Хотя, как известно, электроэнергия передается не по проводникам, а по диэлектрическому пространству между проводниками, тем не менее, проводники необходимы для направления потоков этой энергии.

***6.1. Общие свойства проводников. Температурный коэффициент сопротивления, потери, нагрев проводников.***

**Основная характеристика проводника - это его** **электропроводность.**

       Как известно, и мы рассматривали этот вопрос на 2 лекции, в любом теле при приложении напряжения должен протекать ток в соответствии с выражением, определяющим плотность тока

 (6.1)

Здесь ni - концентрация носителей заряда i-ого сорта, qi - значение заряда, vi - скорость заряда. Для металлов носителями заряда являются электроны. Примерное количество электронов в металле составляет около 1022 шт/см3. Если оценить концентрацию атомов типичного металла, то она составит примерно те же значения. Это означает, что все атомы ионизованы и электроны не принадлежат каждому атому, а обобществлены во всем кристалле. Классическая теория металлов рассматривала электроны как идеальный газ, частицы которого сталкиваются с дефектами решетки, колебаниями атомов, за счет чего их скорость остается ограниченной в электрическом поле. До столкновения электрон должен ускоряться в течение времени τ. Можно показать, что длина свободного пробега, из классической механики, составит

 (6.2.)

Заряд, который протекает через единичную площадку в течение времени τ заполняет цилиндр длиной λ с плотностью n. Приравнивая λ n произведению плотности тока на длительность τ, получим.

|  |  |
| --- | --- |
| J = | (6.3.) |

            Из этого выражения следует закон Ома для металлов, выражение для удельной электропроводности будет иметь вид

 (6.4.)

             Если те же операции провести для переноса тепла электронным газом, то значение удельной теплопроводности ***κ*** составит

 (6.5)

           Здесь k - постоянная Больцмана, Т - температура. Отсюда можно получить, что известная из практики закономерность, что чем больше электропроводность металла, тем больше его теплопроводность имеет под собой теоретическое обоснование. Действительно, поделив выражение (6.5) на (6.4.) и дополнительно разделив на Т получим, т.н. число Лоренца

L =κ ⁄ (σ⋅Т) = 3(k/e)2,

т.е. теплопроводность и электропроводность пропорциональны друг другу. Действительно, измеренные числа Лоренца для разных металлов слабо отличаются друг от друга.

Экспериментальные значения удельной электропроводности металлов, по порядку величины составляют (108 - 107) См/м.

Для практики важно, что электропроводность металлов зависит от температуры. Экспериментально установлено в ряде случаев, что эта зависимость близка к линейной зависимости. Обычно ее приводят в виде температурной зависимости удельного сопротивления.

ρ(T)= ρ(T0)(1+ TКρ(T-T0)) (6.6)

Здесь ρ( T0) - удельное сопротивление при какой—то температуре T0, обычно это 20°С. TКρ - температурный коэффициент удельного сопротивления. Он имеет размерность 1/К (или 1/°С), для металлов TКρ всегда положителен. Оценим значимость этого фактора - температурной зависимости удельного сопротивления. Например для меди он составляет 4.3⋅10-3 1/К, что означает, что сопротивление удвоится при увеличении температуры на 232 градуса.

Для электрических проводов значение удельного сопротивления является самым важным фактором. Он определяет удельную мощность потерь электроэнергии в проводах, т.е. мощность в единице объема провода

рпотерь = j2⋅ρ (6.7.)

Проведем оценку для энерговыделения, например определим, через какое время материал проводов нагреется на 1 градус. Взяв в качестве материала проводов алюминий, ρ =2.8⋅10-8 Ом·м, для плотности тока возьмем два значения j=10-100 А/мм2. Получим для удельной мощности потерь рпотерь= (2.8-280) МВт/м3. Много это или мало? Мощность Новосибирской ГЭС составляет около 500 МВт в период максимальной мощности. Насколько быстро при этом нагреваются провода? Сопоставим с известным выражением для тепловой мощности, требуемой для нагрева материала dQ/dt=cddT/dt, где d -плотность материала d=2.7 103 кг/м3, с- теплоемкость, с= 386 Дж/(кг⋅К). Приравнивая тепловую мощность электрической мощности потерь получим

dT/dt~ (2-200) K/с

Нижняя граница, при j = 10 А/мм2 означает, что провод может нагреться примерно на 2 градуса за 1 секунду, верхняя - на 200 градусов за 1 секунду. Ясно, что второе значение плотности представляется слишком большим.

Выражение (6.7) можно привести к измеряемым величинам: току I и площади сечения провода S, пересчитав его на потери в проводе, на единице его длины (1 м)

Рпотери= I2⋅ρ/S2

В зависимости от плотности тока в проводах потери могут сильно различаться. Ясно, что при пропускании определенной мощности по линии электропередач, например для трехфазной линии Р = 3UaI, чем больше напряжение сети, тем больше мощность при том же значении тока. Поскольку потери определяются током, а передаваемая мощность произведением тока на напряжение, то выгоднее переходить на более высокие классы напряжения. Поэтому переходят на все более высокие напряжения, чтобы относительно меньшая доля энергии терялась в проводах. Однако, как будет рассказано в лекции по диэлектрическим характеристикам воздуха, невозможно бесконечно повышать напряжение.

Ясно также, что чем больше ток, тем больше мощность, причем зависимость линейная. Однако с ростом тока потери энергии растут квадратично, т.е. гораздо сильнее, чем рост передаваемой мощности. Увеличение площади сечения провода ослабляет проблему, но, с другой стороны, происходит увеличение стоимости строительства линии электропередач, т.к. стоимость цветного металла проводов значительна. Кроме того, увеличение веса проводов влечет увеличение массы опор, усложнение монтажа и т.п. В результате компромисса между увеличением потерь и увеличением строительства договорились рассчитывать провода линии на определенную компромиссную плотность тока, т.н. экономическую плотность тока. Согласно Правилам устройства электроустановок (ПУЭ), для меди она составляет 2,5 А/мм2 в случае открытых проводов при эксплуатации 1000-3000 часов в год, и снижается до 1.8 А/мм2 при эксплуатации свыше 5000 в год. Для алюминия все цифры примерно в два раза ниже. Для кабелей все определяется условиями теплоотвода через изоляцию и оболочку кабелей, в ПУЭ допустимая плотность тока нормируется для каждого вида кабелей отдельно, как правило допустимая плотность тока еще ниже.

***6.2. Материалы для проводов. Медь, алюминий.***

Из проводниковых материалов с высокой тепло- и электро- проводностью самым замечательным материалом для проводов было бы серебро. Его удельное сопротивление при комнатной температуре составляет примерно 1.4⋅10-8 Ом⋅м, теплопроводность 418 Вт/(м⋅К). Однако этот материал слишком дорог и редок, поэтому серебро используют только для ответственных контактов, т.к. оно не только идеальный проводник, но и не окисляется в процессе работы, значит не ухудшаются свойства контакта со временем. Отметим, что другие, более привычные проводники, такие как медь или алюминий окисляются кислородом воздуха, превращаясь в непроводящие окислы, ухудшая или даже предотвращая омический контакт. Для проводов именно их и используют, потому что по электропроводности их можно поставить на 2-е и 3-е место после серебра.

**Свойства меди.**

Медь - мягкий материал красноватого оттенка.

* Атомный номер – 29
* Атомная масса - 63.7
* Валентность 1 и 2
* Плотность при 20 °С 8.89 т/м3
* Удельное сопротивление при 20 °С 1.7 10-8 Ом⋅м.
* Температурный коэффициент сопротивления 4.3 10-3 1/К
* Теплоемкость 386 Дж/(кг⋅К)
* Теплопроводность ~ 400 Вт/(м⋅К)
* Температура плавления 1083 °С
* Прочность при растяжении 200 МПа

Применение меди в энергетике достаточно широко - различные проводники, кабели, шнуры, шины, плавкие вставки, обмотки трансформаторов и катушек.

**Свойства алюминия.**

Алюминий - мягкий материал светло-серого цвета.

* Атомный номер – 13
* Атомная масса – 27
* Валентность 3
* Плотность при 20 °С  2.7 т/м3
* Удельное сопротивление при 20 °С 2.8 10-8 Ом⋅м
* Температурный коэффициент сопротивления 4 10-3 1/К
* Теплоемкость 950 Дж/(кг⋅К)
* Теплопроводность ~ 200 Вт/(м⋅К)
* Температура плавления 660 °С
* Прочность при растяжении 80 МПа

Сопоставление этих материалов по наиболее важным для практики параметрам показывает, что они сильно отличаются по плотности, теплоемкости, прочности при растяжении. Любопытно, что произведение теплоемкости на плотность - мало отличается у этих материалов (~30%) Тот факт, что у алюминия мала механическая прочность вынуждает армировать алюминиевые провода стальными сердечниками. При этом ток протекает по алюминию (у стали удельное сопротивление примерно в 5-10 раз выше чем у алюминия), а механическую прочность обеспечивает сталь.

Для изготовления проводов используют алюминий, медь, бронзу, а также сочетания этих элементов со сталью. При сечении до 10-15 мм2 обычно используют однопроволочные провода, при большем сечении - много проволочные, скрученные провода. Марки проводов А, АЖ, АН, АКП, АС, Б, БрФ, М, Мк и т.п. Наиболее популярные провода для ВЛ - сталеалюминиевые марки АС, например АС 95/16 означает, что в поперечном сечении 95 мм2 алюминия и 16 мм2 стали.

***6.3. Материалы для контактов.***

**Проводники в месте контакта отличаются от проводников в объеме проводов несколькими обстоятельствами их функционирования.**

Во - первых, невозможно сделать площадь контакта такой же или большей, чем площадь сечения проводов. Поэтому плотность тока и энерговыделение всегда выше в области контакта. Во-вторых, в месте контакта возникают микропробои, а иногда и макропробои, переходящие в дугу (размыкание контактов выключателя) с локальным высоким энерговыделением, что приводит к деформации материала в области контакта, локальному расплавлению и т.п. В третьих, в контакте возникает трение при движении одной части контакта о другую. В четвертых, контактные поверхности в разомкнутом состоянии не должны взаимодействовать с окружающей средой. Поэтому материалы для контактов должны обладать особыми свойствами. Они должны быть стойкими против коррозии, стойкими против электрической эрозии и уноса материала, не свариваться, иметь высокую износостойкость на истирание, легко обрабатываться, притираться друг к другу, иметь высокую тепло и электропроводность, иметь невысокую стоимость.

**Идеальных материалов для контактов - нет.**

      Для слаботочных контактов обычно используют благородные или тугоплавкие металлы: серебро, платину, палладий, золото, вольфрам и сплавы на основе этих металлов.

**Серебро** - недостатком серебра является образование непроводящих серых пленок сульфида серебра в результате взаимодействия с влажным сероводородом. Другим недостатком является сваривание контактов ввиду малой температуры плавления серебра 960 ºС. Для улучшения свойств в серебро добавляют кадмий, медь, золото, палладий или кремний.

**Золото**, само по себе, редко используется ввиду его мягкости, хотя оно абсолютно не окисляется. В месте контакта из-за мягкости металла легко образуется эрозия, иглы из металла , унос материала. Для улучшения свойств в золото добавляют серебро (до 50%), никель и цирконий, платину. В результате можно получить неокисляемые, твердые контакты со слабой эрозией.

**Вольфрам** является одним из распространенных контактных материалов. Он лучше всех противостоит дуговым разрядам, практически не сваривается, (благодаря высокой температуре плавления), не изнашивается (благодаря высокой твердости). Однако вольфрам не стоек против коррозии и окисления, лучше всего работает в вакууме, в атмосфере водорода или азота. Кроме того, для контактов с малым нажатием вольфрам неприменим.

Для сильноточных контактов чистые металлы не применимы. Для них используют т.н. псевдосплавы, получаемые методами порошковой металлургии.

**Псевдосплав** - спеченная смесь двух порошков, один из которых является более тугоплавким. При этом более легкоплавкая компонента может расплавиться в процессе работы, но наличие каркаса из тугоплавкой компоненты удерживает жидкость за счет капиллярных сил. Легкоплавкая компонента обычно является более тепло- и электропроводной. Используют следующие псевдосплавы:

серебро-окись кадмия, серебро-графит, серебро-никель, серебро-вольфрам, медь-графит, медь-вольфрам.

Для мощных цепей контакты делают накладными, на медь укрепляют пластины из Ag+W, либо Сu+W псевдосплава.

Для мощных размыкающих контактов с большими токами дуги (до 100 кА) используют медь-графит контакты. Они хуже свариваются, однако сильно изнашиваются под действием дуги. Псевдосплав с большим количеством графита (более 5%) используется в качестве щеток в скользящих контактах.

***6.4. Материалы с малым температурным коэффициентом сопротивления. Материалы для термопар.***

             Возвращаясь к температурному коэффициенту для проводниковых резистивных материалов следует упомянуть о существовании материалов с практически нулевым температурным коэффициентом сопротивления. Это манганин, материал для точных прецизионных резисторов, и константан. В самом названии константана заложена информация о постоянстве сопротивления. Состав манганина - марганец 11.5-13.5%, никель - 2.5-3.5%, остальное - медь. Состав константана - никель - 40%, марганец 1-2%, остальное - медь.

По составу родственными являются материалы, используемые для термопар. Это хромель - сплав никеля и хрома (90% Ni + 10% Cr), алюмель - сплав никеля (94%) с алюминием, кремнием и марганцем, копель - сплав меди с кобальтом и никелем. Используются также константан и платина. Если к концам проволочки  из одного из таких материалов приварить проволочки из другого материала, получится термопара, а места спаев поддерживать при разной температуре, то на на разомкнутых концах проволочки появится ЭДС, так называемая термоЭДС. Это называется эффект Зеебека.  Значение термо-ЭДС, в зависимости от сочетаний материалов составляет примерно 1-10 мВ при разнице температур 100 К. Если поместить один спай при известной температуре, то измерение возникающего напряжения позволяет определить температуру того места, где находится второй спай.

# Лекция 7. Электропроводность полупроводников и слабопроводящих материалов.

В любом теле при приложении напряжения должен протекать ток в соответствии с выражением, определяющим плотность тока

http://sermir.narod.ru/lec/lect7-1.gif                                            (7.1)

Здесь ni - концентрация носителей заряда i-ого сорта, qi - значение заряда, vi - скорость заряда. Определяющий параметр в этом выражении - ni. Как уже упоминалось во второй лекции ni велико для металлов, т.к. нет энергетического барьера для выхода электронов, ni - очень мало для диэлектриков, т.к. энергетический барьер (ширина запрещенной зоны) составляет порядка 10 Эв. Полупроводники и слабопроводящие материалы являются промежуточным звеном. Их ширина запрещенной зоны составляет обычно от доли эВ до нескольких эВ. Удельное сопротивление полупроводников меняется в диапазоне от микроом на метр до десятков мегаом на метр.

Большой интерес к полупроводникам вызван возможностью управления их свойствами путем добавления небольших количеств других веществ, т.н. легирования. Если добавлять легко ионизирующиеся вещества, т.е. вещества легко отдающие электроны, их еще называют веществами-донорами электронов, (например к германию добавить мышьяк) то можно создать полупроводник с электронной проводимостью. В этом случае существует некоторое количество свободных электронов, за счет которых осуществляется проводимость. Такой полупроводник называется полупроводником n-типа.

Если добавлять вещества с большим сродством к электрону, т.е. вещества, легко захватывающие электроны, например к германию добавить индий, то создается полупроводник с т.н. "дырочной" проводимостью. В этом случае существует некоторое количество свободных электронных вакансий, за счет которых осуществляется проводимость. Это как бы эквивалентно появлению в полупроводнике положительных носителей заряда с примерно такими же свойствами, что и электроны, но противоположно заряженных. Такой полупроводник называется полупроводником р-типа. За счет комбинации полупроводников р- и n- типа созданы различные электронные приборы: диоды, транзисторы, тиристоры и т.п. В энергетике полупроводники напрямую мало используются, но электронные компоненты на основе полупроводников используются достаточно широко. Это любая электроника на станциях, подстанциях, диспетчерских управлениях, службах и т.п. Выпрямители, усилители, генераторы, преобразователи.

Из полупроводниковых материалов отметим германий (он исторически был первым полупроводником наряду с окисью меди) и кремний. Последний в настоящее время является полупроводником № 1.

Рассмотрим некоторые характеристики кремния:

Плотность, кГ/м3 2300

Т плавления,°С 1400

Теплоемкость, кДж/(кг⋅К) 0.8

Теплопроводность, Вт/( м⋅К) 167

Энергия активации

(ширина запрещенной зоны) , эВ 1,1

Концентрация собственных носителей, 0.04/мкм3.

  Из других видов полупроводников можно отметить арсенид галлия, селен (фоторезисторы).

  Электропроводность технических материалов также определяется аналогично выражению (1). Отметим, что электропроводность растет с ростом температуры. Это связано с тем, что с ростом температуры электроны имеют повышенную энергию и они легче могут ионизоваться.

В металлах, как указывалось ранее, электропроводность падает с ростом температуры. Это связано с тем, что в металлах количество носителей заряда велико и не зависит от температуры, но их движение может затрудниться при взаимодействии с тепловыми колебаниями молекул металла. Если снова обратиться к формуле (7.1), то скорость V (и подвижность) должна падать с ростом температуры из-за участившихся столкновений электронов с колебаниями решетки.

***7.2. Резистивные материалы. Углеродные композиты,  бетэл, ЭКОМ, электропроводящие полимеры.***

***7.2.1 Металлические резистивные материалы***

Из металлических материалов для резисторов наибольшее распространение получили материалы на основе никеля, хрома и железа, т.н нихромы, и родственные им материалы на основе железа, хрома и алюминия, т.н. фехрали. В обозначении марки буква Х означает хром, буква Н-никель, буква Ю - алюминий. Цифра после каждой буквы - процентное содержание этого элемента (массовые проценты). Железо обычно составляет основу, его не обозначают, а его содержание составляет остальное, т.е. сколько нужно, чтобы дополнить до 100 %.

Применение этих сплавов для нагревателей и резисторов обусловлено двумя главными обстоятельствами. Во первых, их удельное сопротивление примерно в 40-60 раз превышает удельное сопротивление проводников - алюминия и меди. Это связано с нарушением структуры материала в сплаве нескольких металлов. Во вторых, на поверхности этих материалов образуется прочная, химически стойкая пленка из окислов, что обеспечивает высокую жаростойкость материалов. Температурный коэффициент удельного сопротивления нихромов положителен, т.е. с ростом температуры удельное сопротивление увеличивается. Это означает, что при использовании нихрома в качестве нагревателя мощность нагревателя по мере работы, и, соответственно прогревания самого резистивного материала, будет уменьшаться. Важно также, что температурные коэффициенты расширения у пленки оксида и у металла близки, поэтому пленка не отслаивается при включении - выключении нагревателей.

Рассмотрим конкретный пример использования нихрома для создания например, электронагревателя мощностью P = 1 кВт, на напряжение U = 220 В.

Воспользуемся известным выражением P = U2/R, отсюда R = U2/P. Используя формулу для пересчета R = ρ⋅l⁄S, где ρ-удельное сопротивление, l - длина проводника, S - площадь сечения получим l⁄S =U2/(P⋅ρ). Возьмем сплав Х20Н80. У него удельное сопротивление ρ = 1 мкОм⋅м. Тогда l⁄S = 2202⋅106/103 = 4.8⋅107 1/м. Если взять диаметр провода 1 мм, площадь составит π⋅10-6/4 м2, а требуемая длина примерно 40 м. Ясно, что это большая величина, можно взять провод из нихрома меньшего диаметра, например 0.5 мм. Для него длина нагревателя составит 10 м. Если свить в спираль диаметром 10 мм, количество витков составит 300, длина спирали при шаге 1 мм будет примерно 30 см. Ясно, что из такой спирали можно выполнить бытовой нагреватель.

Таким образом, мы с вами научились рассчитывать нагреватель в первом приближении. На самом деле при расчете еще следует учесть, что за счет температурного коэффициента при нагревании сопротивление увеличится и, следовательно мощность уменьшится. Значит, на самом деле нужно взять проводник несколько меньшей длины. Точный расчет достаточно сложен, ограничимся оценкой. Температурный коэффициент удельного сопротивления для нихромов составляет примерно 2⋅10-4 1/К. Это означает, что при нагревании на 100 К сопротивление изменится (увеличится) на 2 %. В проволочных нагревателях резистивный материал нагревается до 600-700 °С. Это приводит к росту сопротивления на 10-15%.

В качестве тренировки предлагаю рассчитать трехфазный нагреватель из нихрома. Он незначительно отличается от однофазного. При соединении спиралей в звезду выражение для мощности составит Р = 3⋅Uф⋅Iф. Каждую из ветвей можно считать независимо. Для соединения в треугольник Р = √3⋅Uл⋅Iл.

***7.2.2. Графит. Бетэл***

            Вторым по значению резистивным материалом является графит. Здесь стоит упомянуть, как изменение структуры материала ведет к принципиальным изменениям характеристик.

Например существует кристаллическая модификация углерода - алмаз. Это твердый, прозрачный, диэлектрический материал. Структура  кристаллической решетки -  тетраэдры из атомов углерода.

**Графит** - также кристаллическая модификация углерода. Это непрозрачный, мягкий, электропроводный материал. Структура у него слоеная. В слое атомы углерода соединены в бесконечные шестичленные кольца. Каждое единичное кольцо представляет собой аналог бензольного кольца. Удельное сопротивление зависит от направления измерения. Если приложить напряжение поперек слоев, электропроводность составит 104 См/м, если приложить напряжение в плоскости слоев, электропроводность достигает 2⋅106 См/м.

**Карбин** - линейная структура из цепочек углерода С=С=С=С=С или С-С≡С-С≡С-С≡С, столбики, которых связаны между собой. Это полупроводник n-типа, энергия активации 0.64 эВ, очень прочный, σp =2200 ГПа (для сравнения прочность закаленных сталей до 700 МПа), электропроводность 10-4 См/м.

В последние годы открыты новые модификации чистого углерода - т.н. **фуллерены**. Это соединения многих атомов углерода Сn , где n-60, 84 и т.д. Эти атомы соединены так, что образуется сфера из них, с пустотой внутри. Считается, что они обладают неожиданными свойствами и их исследования бурно продолжаются.

*Несколько лет назад в России был бум по получению фуллеренов. Некоторое время это был самый дорогой химический продукт, стоимость его доходила до 10 тыс. долларов за 1 грамм. Сразу несколько групп начали пытаться делать этот продукт. Появились посредники, конечные потребители были в Японии и США. Фуллерены стали находить и в пламени, и в электрическом разряде в смеси гелия с углекислым газом и в плазмотронах и т.д. Рынка еще никто не знал, предложения поставить фуллерены стали делать все мало-мальски грамотные химики. В результате менее чем за год цену сбили примерно в 100 раз. Совсем недавно появился новый способ: фуллерены стали получать с помощью электрического взрыва графитовых стерженьков, т.е. пропуская через стерженек мощный импульс тока, превращали материал в плазму, состоящую из ионизированного углерода. Оказалось, что если это делать в воде, то выход фуллеренов значительно возрастает (оставаясь все равно в пределах процента).*

Эти примеры исчерпывают известные к настоящему времени модификации чистого углерода. Видно, как структура материала принципиально меняет его свойства.

Помимо чистого углерода известно много модификаций технического углерода. Их физические характеристики также сильно меняются в зависимости от структуры и от количества разнообразных примесей. В основе их лежит структура графита, поэтому технические углероды можно считать и техническими графитами. Из них отметим сажу, кокс, коллоидный графит, силицированный графит. Сажа характеризуется очень малым размером частиц, до десятков ангстрем. Используется как наполнитель для резин, полимеров, электропроводных композиций. Взвесь порошка графита в воде называется «аквадаг» и используется для создания электропроводящих покрытий.

Тот факт, что графит имеет повышенное удельное сопротивление по сравнению с металлами позволяет применять его в промышленности для создания различных сопротивлений. Начиная с пленочных сопротивлений в радиоэлектронике, графитовой бумаги и графитовой ткани и заканчивая композиционными материалами, где частицы графита выступают в роли проводящего наполнителя. Из последних мы упомянем бетэл и более подробно остановимся на ЭКОМе.

**Бетэл** - (бетон электротехнический) - исторически один из первых российских электропроводящих композиционных материалов. Предложен в середине шестидесятых новосибирскими учеными. Эта разработка в начале восьмидесятых была награждена государственной премией. Состоит из четырех компонентов: цемент, сажа, вода, заполнитель. Главное достоинство - дешевизна исходных компонентов и простота технологии приготовления. Сделав смесь типа обычного бетона, где вместо песка использована сажа, получаем материал с удельным сопротивлением примерно 0.01-10 Ом⋅м. Это означает, что например резистор номиналом 100 Ом можно изготовить из бетонного параллелепипеда размером 10 см х 10 см х 1 м. Здесь, правда возникает проблема с вводом тока в такое сопротивление. Действительно, как сделать подходящие контакты? Решение нашли достаточно простое - аквадаг. Но к аквадагу, в свою очередь трудно присоединять контакты. Поэтому используют либо прижимные контакты к аквадагу, либо внедренные в тело композита разнообразные проволочные элементы.

Недостатки бетэла - нестабильное сопротивление, водопоглощение с последующим изменением многих параметров, (цементный камень продолжает расти в течение многих лет), малый коэффициент теплопроводности (~ 0.6 Вт/(м⋅К)). Это не дает возможности создания мощных резисторов для энергетики. Точнее резисторы такие можно создать, но они могут работать только ограниченное время.

Рассмотрим этот вопрос подробнее. Во время работы резистора в нем выделяется энергия

W = http://sermir.narod.ru/lec/lect7-2.gif, где U- напряжение, R- сопротивление, t - время. У бетэла теплопроводность низка, поэтому резистор будет просто нагреваться и выделяющаяся электрическая энергия будет превращаться в тепловую энергию.

Q =c⋅m⋅( Tкон -Tнач), где с - удельная теплоемкость материала, m - масса резистора, Tкон , Tнач - начальная и конечная температуры. Приравнивая W и Q и считая Tкон соответствующее теплостойкости или хотя бы температуростойкости материала, видно, что если нет теплопроводности (т.е. теплоотвода), то резистор за конечное может нагреться до температур, при которых он начнет разрушаться. Известны случаи, когда бетэловые резисторы взрывались в процессе включения в эксплуатацию под большую нагрузку. Предполагается, что это происходило при попадании влаги внутрь резистора, что приводило к бурному вскипанию воды внутри материала при нагреве выше точки кипения после включения резистора под нагрузку.

Опыт показывает, что бетэловый резистор можно включать только на несколько секунд.

***7.2.3 Материал «ЭКОМ» для резисторов и обогревателей***

Производственное научное предприятие “Болид” разрабатывает и изготавливает высоковольтные заземляющие резисторы, нагреватели бытового и промышленного применения на основе промышленно - выпускаемых резистивных элементов из композиционного материала “ЭКОМ”.

**Материал “ЭКОМ”** составляется из трех мелкодиспергированных компонентов: силицированный графит, окись железа, корунд и одного жидкого компонента: ортофосфорная кислота. Каждый из компонентов обеспечивает определенную функцию. Графит обеспечивает электропроводность материала за счет контактов частичек графита между собой и получения, тем самым, сплошного проводящего мостика от одного электрода к другому. Изменяя концентрацию графита, можно менять, в значительных пределах электропроводность композиционного материала. Корунд обеспечивает его теплопроводность, ввиду того, что теплопроводность корунда достаточно велика и составляет примерно 30 Вт/(м К). Для сравнения, это значение равно теплопроводности нержавеющей стали. Взаимодействие окиси железа с кислотой дает фосфат железа, являющийся связующим, обеспечивающим механическую прочность. Материал имеет следующие параметры:

|  |  |
| --- | --- |
| Параметры материала | Значения |
| Плотность | 2.6-2.7 т/м3 |
| Механическая прочность на сжатие | 50-100 МПа |
| Теплопроводность | 3-4 Вт/(м⋅К) |
| Электропроводность | 10-6÷3000 Ом⋅м |
| Температурный коэффициент удельного сопротивления | - (1.5÷2)⋅10-3 1/К |
| Температурный коэффициент линейного расширения | 10-5 1/К |
| Теплостойкость | 1100 °С |
| Температуростойкость | 300 °С |

Одиночный элемент резистора из материала ЭКОМ выпускается в виде нескольких типоразмеров. Наиболее часто применяется в изделиях элемент ЭНГФ-15х15х1 с размерами 150х150х10 мм, весом 0.6 кг, номинальным сопротивлением R=2÷20 Ом.

В каждом конкретном случае осуществляется выбор необходимого номинала и изготовление элементов в нужном количестве. В зависимости от допустимой длительности включения и способов организации теплоотвода допустимая мощность на элемент может меняться в пределах от 50 Вт до 200 Вт.

В конструкции панели ПЭГ-500 предусмотрено использование 12 элементов ЭНГФ соединенных последовательно. В конструкции электроконвектора ЭЛКОН -600 - 8 последовательно соединенных элементов. Можно показать, что при таком типе соединения происходит выравнивание мощности по элементам, что обусловлено отрицательным температурным коэффициентом сопротивления. При увеличении мощности на каком-то элементе его сопротивление уменьшается, что приводит к уменьшению падения напряжения на этом элементе, что приводит, в свою очередь, к уменьшению мощности на этом элементе.

В процессе разработки материала было перепробовано большое количество компонентов. Стоит упомянуть о подборе электропроводного компонента. Были испробованы порошки металлов, начиная с нержавеющей стали, меди и т.п. Выяснилось, что композит на основе металлических порошков меняет свое сопротивление после каждого эксперимента с протеканием более-менее значительного тока, а именно, сопротивление уменьшается. Когда разобрались, оказалось, что частички металла сплавляются в месте контактов за счет повышенной плотности тока и повышенной температуры в контактах. Перешли на материал, который теоретически плавится при температуре 3500 °С - графит.

Однако не всякий графит подходит - красивый, блестящий коллоидный графит имеет слишком высокую электропроводность, низкую адгезию к материалу (низкая прочность материала) и повышенный температурный коэффициент сопротивления. Изготовленные на основе этого материала нагреватели «разбегаются» по температуре, т.е. по мере нагревания сопротивление материала уменьшается, значит увеличивается мощность, это приводит к дополнительному нагреву, увеличению мощности и т.д. Чтобы предотвратить выход из строя, пришлось ставить термодатчики, которые отключали прибор после достижения определенной температуры.

Здесь важно также выбрать концентрацию графита. Дело в том, что сопротивление сильно зависит от его содержания. На рисунке 7.1. приведены результаты измерения сопротивления материала в зависимости от объемного содержания графита. Видно, что даже в логарифмических координатах, электропроводность меняется в значительных пределах, причем имеется пороговое значение концентрации, при котором резко увеличивается электросопротивление.

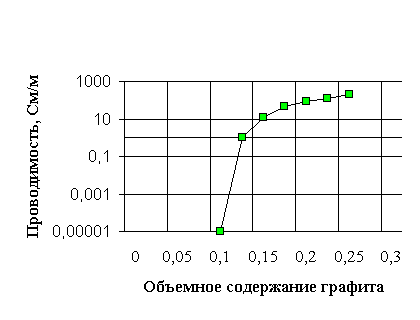


Рис.7.1. Поведение электропроводности композита ЭКОМ при изменении содержания силицированного графита.

***7.2.4. Электропроводящие полимеры***

Как известно, полимеры являются диэлектриками. Однако можно их сделать и проводниками. Для чего такие проводники? Они, в отличие от металлов, имеют высокую коррозионную стойкость, легкую обрабатываемость, малый удельный вес, эластичность, дешевизну и т.п. Для того, чтобы из диэлектрика сделать проводник используются два пути. После введения в полимер дисперсной электропроводной фазы, тем самым получается композит, в котором матрицей является полимер, а наполнителем - электропроводная добавка. Обычно используют один из видов технического углерода, чаще сажу. Трудности - плохая адгезия полимера и наполнителя. Значит трудно ввести достаточно много наполнителя, чтобы достичь высокой электропроводности. Характерное значение удельного электросопротивления при 20% содержании ацетиленовой сажи составляет 102 Ом·м.

Второй вариант электропроводящих полимеров заключается в модифицировании их структуры. Оказывается, если сделать полимер не из насыщенных углеводородов, а из ненасыщенных, то в таком полимере может быть электронная, либо дырочная электропроводность. Первым электропроводным полимером был полиацетилен, в котором чередуются одинарные и двойные связи в линейной молекуле полимера. Пока электрополимеры такого типа не вышли за пределы лабораторий. Но несомненно, у них есть будущее. В частном разговоре с создателем проводящих полимеров профессором Иошино из Японии я выяснил, что к настоящему времени (2002 год) достигнутые значения электропроводности составляют 100 - 1000 См/м, т.е. примерно на уровне графита.

***7.3. Материалы с нелинейной проводимостью. ОЦК, силит, вилит.***

Материалы с нелинейной проводимостью очень важны для энергетики. Дело в том, что с их помощью подавляются паразитные волны перенапряжений в линиях и на подстанциях. Представьте себе такое устройство, которое имеет очень высокое сопротивление, как диэлектрик, при рабочем напряжении, а при повышении напряжения начинает проводить ток, причем по мере превышения становится все более подобным проводнику. Напряжение на нем, практически невозможно поднять выше некоторого значения. Если такое устройство присоединить параллельно защищаемому аппарату, например трансформатору напряжения, то волна перенапряжений как-бы погасится на этом элементе и защищаемый аппарат не почувствует повышения напряжения. Это, вкратце, идея ограничителя перенапряжений, т.н. ОПН.

Для того, чтобы эффект был значимым, нелинейность должна быть как можно выше. **Она характеризуется коэффициентом нелинейности α: отношением статического сопротивления  Rст = U/I к динамическому сопротивлению Rд = dU/dI**



Если считать, что коэффициент α постоянен, можно получить, что ток с напряжением в нелинейном элементе связан простым степенным соотношением

http://sermir.narod.ru/lec/lect7-4.gif

где I0 , U0 ток через и напряжение в какой-либо точке. На рисунке 7.2. показана зависимость тока от напряжения для нелинейного элемента.

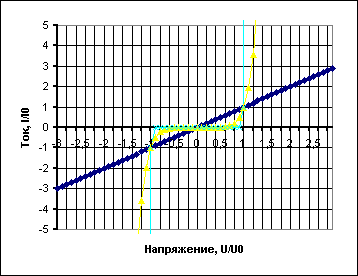


Рис.7.2. Поведение тока через нелинейный элемент в зависимости от напряжения при различных коэффициентах нелинейности, 1, 7, 50.

 Видно, что при токе большим, чем I0 напряжение практически не отличается от U0 при сильной нелинейности (50), а при коэффициенте нелинейности 7 рост напряжения заметен. Поэтому высоконелинейные элементы хорошо ограничивают перенапряжения, чем больше нелинейность, тем лучше ограничение.

http://sermir.narod.ru/lec/Warning.gif**Нелинейные элементы, у которых сопротивление сильно уменьшается с ростом напряжения называются варисторами.**

Из материалов, обладающих нелинейностью, достаточной для применения в ограничителях перенапряжений получили распространение два : карбид кремния и оксид цинка.

Карбид кремния SiC полупроводниковый материал со следующими свойствами

Плотность, кГ/м3 3200

Т плавления,°С отсутствует, разлагается при температуре более 2000 °С

Теплоемкость, кДж/(кг⋅К) 0.62-0.75

Теплопроводность, Вт/( м⋅К) 10-40

Энергия активации, эВ 2,8-3.1

Цвет - прозрачный, в зависимости от примесей от черного до голубого и зеленого.

Он приготавливается при высокотемпературном нагреве смеси диоксида кремния и углерода. В результате их реакции улетает кислород и вырастают кристаллы SiC. Затем их размалывают до размера 40-300 мкм. Электропроводность порошка имеет нелинейный характер, однако она нестабильна, зависит от степени сжатия, крупности помола, меняется при тряске и т.п. Поэтому порошок скрепляют связующим веществом.

http://sermir.narod.ru/lec/Warning.gif**Если в качестве связующего используют глину, то полученный материал называют тиритом. Здесь мелкоизмельченного карбида кремния 74%, остальное - глина. Смесь прессуется и обжигается при температуре 1270** °С.

**Если используют жидкое стекло (75% SiO**2 **+ 24% Na**2O + вода, что составляет **силикатный клей)  то полученный материал называют вилитом.  Здесь SiC 84%, связующего 16%. Смесь прессуется и обжигается при температуре 380** °С.

Для применения в качестве ограничителей напряжения нелинейность карбида кремния невелика - всего 7, а изготовленные из него материалы имеют еще меньшую нелинейность - от 3 до 5. Поэтому, при включении параллельно защищаемому аппарату такой ОПН либо не будет защищать, если сделать его сопротивление при рабочем напряжении большим, либо будут значительные потери на рабочем напряжении. Для решения этой проблемы последовательно с варистором в цепь устанавливают разрядник.

Вторым, в настоящее время наиболее важным материалом для варисторов, является оксид цинка с добавками оксидов висмута, кобальта, марганца, сурьмы и хрома. Технология его приготовления сложна, она включает раздельный размол компонентов, смешение со связкой, прессование, спекание с выжиганием связки, размол, вторичное спекание, вжигание электродов. В результате получается высококачественная керамика с высокой нелинейностью до 50-70. Такая нелинейность позволяет обходиться без разрядников. ОПН набирают из последовательно-параллельного соединения варисторов, заключают в диэлектрическую рубашку и присоединяют параллельно к защищаемому аппарату.

# Лекция 8. Электропроводность и потери в диэлектриках

***8.1. Диэлектрическое и резистивное состояние вещества.***

***Диэлектрические вещества******- это такие вещества, в которых возможно накопление, сохранение и распространение электрической энергии*.**

Объемная концентрация энергии (плотность энергии) определяется выражением

 (8.1)

где ε0 - диэлектрическая постоянная, ε0 = 8.85 10-12 ф/м, ε - диэлектрическая проницаемость материала, Е - напряженность электрического поля.

***Резистивные вещества******- такие вещества, в которых электрическая энергия расходуется, т.е. преобразуется в другой вид энергии, а именно в тепловую энергию*.**

Удельные потери энергии при действии постоянного напряжения определяются выражением

 (8.2)

где *ρ* - удельное электрическое сопротивление, t - длительность действия напряжения.

*Абсолютной разницы между диэлектрическим и резистивным состояниями нет, потому что в зависимости от условий одно и то же вещество может быть и диэлектриком и резистором.* Основное условие, разграничивающее поведение вещества на резистивное и диэлектрическое основано на понятии ***максвелловского времени диэлектрической релаксации****:*

*τ=ε0⋅ε⋅ρ ,*  (8.3)

Если на материал действует импульсное напряжение с длительностью импульса t , то при t<< *τ,* вещество можно считать диэлектриком, а в случае обратного неравенства материал можно считать проводящим или резистивным. Для случая переменного напряжения следует сравнивать *τ* и 1/ω, где ω - частота переменного напряжения, т.е. если *τ* >> 1/ω - это диэлектрик, а при *τ* << 1/ω - проводник.

Физический смысл максвелловского времени диэлектрической релаксации можно понять взяв плоский конденсатор с веществом, имеющим соответствующие *ε*, *ρ* (Рис.8.1)*.* Тогда можно, учитывая геометрические параметры конденсатора, найти емкость конденсатора, считая его идеальным диэлектриком и сопротивление постоянному току, считая его проводником .

  (8.4.)

Собственно говоря рис.8.1 и изображает простейшую ***схему замещения*** реального конденсатора на идеальные конденсатор и сопротивление. Другое название этой схемы - параллельная схема замещения.

***Простейшая схема замещения диэлектрика состоит из параллельного соединения емкости и сопротивления.***

Из курса ТОЭ известно, что для схемы, изображенной на рис.8 постоянная времени разряда емкости С через сопротивление R при отключенном источнике составляет RC. Используя (8.4.) можно получить RC=*τ=ε0⋅ε⋅ρ.* Отсюда следует, что физический смысл времени релаксации состоит в разряде собственной емкости через собственное сопротивление.

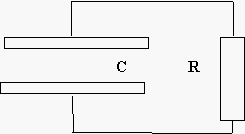


Рис. 8.1. Простейшая схема замещения диэлектрика.

Рассмотрим некоторые примеры. Хорошо очищенное от примесей трансформаторное масло обладает удельным сопротивлением до ρ = 1012 Ом·м, диэлектрической проницаемостью ε = 2.2, откуда *τ = ε0⋅ε⋅ρ ≈ 20 сек.*  Сравнивая с 1/ω *≈* 3·10-3 сек. для переменного напряжения частотой 50 Гц, можно заключить, что *τ >>* 1/ω, т.е. трансформаторное масло для этих условий является хорошим диэлектриком. Однако, как отсюда видно, для применения в устройствах постоянного напряжения трансформаторное масло малопригодно. А для загрязненного масла значение *ρ* может упасть до двух-трех порядков по величине, что приведет к *τ ≤* 0.1 сек*.,* что сравнимо с 1/ω. Ясно, что такое масло непригодно и для устройств переменного напряжения.

В качестве второго примера рассмотрим воду. В обыденной жизни обычная вода является проводником и это не требует доказательств. Однако для импульсных устройств типа емкостных накопителей энергии вода является наиболее подходящим диэлектриком. Действительно, у хорошо очищенной воды ρ ≈106 Ом·м, и при *ε* ≈ 80, значение *τ* превышает 500 мксек. Значение W для импульсов длительностью 1 мксек и менее максимально в сравнению с аналогичным параметром для других диэлектриков. Ясно, что вода может считаться хорошим диэлектриком для этого случая. Обычная водопроводная вода имеет ρ ≈10-100 Ом⋅м , следовательно она является проводником практически для любых импульсов напряжения.

Для ряда случаев схема замещения диэлектрика может представляться в виде последовательного соединения емкости и небольшого сопротивления ***r*.** При этом значения емкостей при параллельном и последовательном представлениях близки друг другу, тогда как сопротивления сильно различаются. Для хороших диэлектриков ***R>>r.***

***8.2. Особенности электропроводности для различных агрегатных состояний.***

Как уже указывалось в лекции 2, способность любых материалов проводить электрический ток определяется наличием зарядов в нем и возможностью их движения. Можно еще раз написать наиболее общую формулу, для плотности тока j верную для любых сред, за исключением вакуума.

j =Σ ni qi bi E, (8.5)

Здесь i - тип или cорт заряда, (например электроны, ионы различных молекул, молионы, заряженные частицы и т.п.), ni - концентрация зарядов i-cорта, qi - значение заряда, bi - подвижность носителей заряда.

В соответствии с выведенными ранее выражениями рассмотрим особенности электропроводности при различных агрегатных состояниях.

**Твердые диэлектрики.** Здесь носителями заряда могут быть электроны и дырки. Ионы “вморожены” и практически не имеют возможности движения bi ~10-23 м2/В⋅с. Подвижность электронов и дырок достаточно высока и может достигать be~10-3 м2/(Вc). Количество электронов и дырок определяется шириной запрещенной зоны W~5-10 эВ, тепловой энергией kT~1/40 эВ, плотностью молекул n~1027 шт/м3 и составляет пренебрежимо малую величину.

Рекомбинация носителей заряда в твердых телах не затруднена. Ясно, что по этому механизму проводимость твердых диэлектриков практически отсутствует, т.к. заметное изменение концентрации возможно лишь за времена, сопоставимые с геологическими периодами. Поскольку основную роль в выражениях (2.5),(2.7) играет экспоненциальный множитель, то лишь наличие примесей с энергетическими уровнями внутри запрещенной зоны, вблизи от края зоны с ΔW~1 эВ, дает возможность проводимости твердых тел.

**Газы.** Рекомбинация носителей не затруднена, т.к. заряды разного знака могут беспрепятственно сближаться на близкое расстояние. В оценке считаем n~1025 шт/м3, энергию ионизации W~10-20 эВ, подвижность электронов be~10-3 м2/(В⋅c), ионов bi~10-4 м2/(В⋅c), заряд e=1.6 10-19 Кл. Определяющим фактором является экспоненциальный множитель, что дает пренебрежимо малую проводимость.

          На самом деле фактором, определяющим проводимость газов является космическое излучение.  Проводимость воздуха за счет естественной ионизации составит σ ~10-14 Cм/м.

**Жидкости.**  Современные представления о проводимости диэлектрических жидкостей состоят в следующем. Здесь носителями заряда являются ионы, т.к. электроны легко прилипают к нейтральным молекулам жидкости и не могут существовать в свободном состоянии. Кроме того, в жидкости заряды могут переноситься молионами, макрочастицами и даже пузырьками. Ионизация облегчена по сравнению с газами за счет большей диэлектрической проницаемости.Рекомбинация носителей заряда в жидкости затруднена, поскольку заряды легко окружаются соседними молекулами, ориентированными соответствующими концами постоянных или индуцированных диполей к ионам.

Что касается подвижности, то она определяется движением жидкости. При этом подвижности любых ионов близки друг другу, т.к. ионы “вморожены” в жидкость и переносятся “микроструйками” жидкости.

Подвижность, связанная с движением жидкости, называется электрогидродинамической и составляет μэгд ~ (10-7 -10-8) м2/Вc., т.е. на три-четыре порядка меньше подвижности ионов в газах.

Таким образом, в жидкостях обычно проводимость больше, чем в газах и твердых телах за счет облегченной ионизации и затрудненной рекомбинации.

С другой стороны, отсутствие формы жидкости, легкость очистки дают возможность радикального уменьшения электропроводности, что невозможно сделать с твердыми диэлектриками.

***8.3. Проводимость  неоднородных диэлектриков.***

  Реальные электроизоляционные конструкции далеко не всегда состоят из однородных диэлектриков. Они могут содержать композицию из разных диэлектриков или просто иметь границу раздела. Даже в этом случае появляются новые особенности электропроводности, в частности следует учитывать не только проводимость самих диэлектриков, но и границ раздела. Само по себе наличие границы не меняет проводимость конструкции, однако поверхность неизбежно содержит химически активные элементы. В контакте с воздухом поверхность обогащается веществами, содержащимися в воздухе. Известно, что даже в контакте с чистым воздухом на ней адсорбируется вода, например на поверхности окислов может содержаться до 100 молекулярных слоев воды. В воду из воздуха могут попадать и разные другие примеси, в частности углекислый газ. Вода с углекислым газом реагирует в соответствии с реакцией:

Н2О + СО2 ↔Н2СО3 ↔Н+ + НСО3-  (8.10)

Таким образом на поверхности появляются носители заряда и поверхность изолятора приобретает дополнительную проводимость.

***Поверхностная проводимость*** **- проводимость, связанная с появлением и движением носителей заряда по поверхности.**

На поверхности оборудования, эксплуатирующегося в наружных условиях скапливаются промышленные и естественные загрязнения. Наибольшую проводимость дают цементирующиеся загрязнения в сочетании с т.н. “кислыми дождями”. При этом проводимость может достигать больших значений, фактически превращая электроизоляционную конструкцию в электропроводящую конструкцию. Например сухая поверхность загрязненного изолятора обладает некоторой проводимостью, но, в целом, конструкция является диэлектриком. Если поверхность высоковольтного загрязненного изолятора увлажнена, то она обладает высокой проводимостью. Например во влажную погоду проводимость по поверхности столь высока, что может поддерживать дуговой разряд, так на поверхности возникают электрические микродуги в тех областях, которые высыхают под действием протекающих по поверхности токов.

Для описания протекания тока по поверхности вводят понятия удельной поверхностной проводимости или ***удельного поверхностного сопротивления***.

**По определению** ***удельное поверхностное сопротивление* означает сопротивление, измеренное между электродами длиной 1 м, приложенными к поверхности на расстоянии 1 м друг от друга.**

(При измерении электроды образуют две противоположные стороны квадрата.) Размерность удельного сопротивления [ρп]=Ом или Ом/ (Ом на квадрат). Последнее является устаревшим. Характерно, что при таком способе измерения значение сопротивления не зависит от размеров электродов.

Для неоднородных диэлектриков простая схема замещения конденсатора в виде параллельно соединенных R и C не годится. Для них строят более сложные RC цепочки. Рассмотрим несколько типичных случаев неоднородных диэлектриков.

В случае однородного диэлектрика с поверхностной проводимостью параллельно RC цепочке присоединяется дополнительное сопротивление Rп= ρп⋅d/l, где d - расстояние между электродами по поверхности изолятора, l - длина границы между электродом и изолятором (рис.8.2).

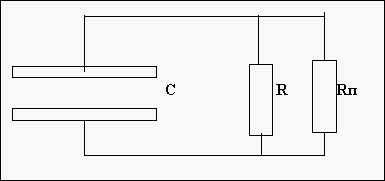


Рис.8.2. Схема замещения диэлектрика с поверхностной проводимостью.

Схема замещения неоднородного диэлектрика может содержать не только последовательные, но и параллельные цепи. Для композиционных диэлектриков, состоящих из слоев диэлектриков разного типа, например слоев бумаги, пропитанных маслом нужно учесть свойства обоих диэлектриков. Очевидно, что для бумажно-масляной изоляции можно предложить следующую схему (рис.8.3a):

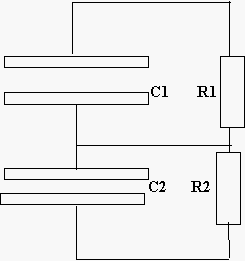
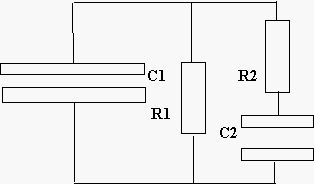
а) б) 

Рис. 8.3. Схемы замещения двухслойного диэлектрика (а) и диэлектрика с абсорбционными токами (б).

Физически эта схема моделирует каждый из слоев, имеющих разные электрические характеристики, слои масла со своими εм и ρм, слои бумаги со своими εб и ρб.

Для описания реальных диэлектриков, помимо изложенных, используется ***смешанная схема замещения***, которая для ряда сложных изоляционных объектов наиболее полно соответствует поведению изоляции. Обычно при подаче постоянного напряжения ток через диэлектрик ведет себя следующим образом (Рис.8.4.): I = I∞+ Iабс, где I∞-установившийся ток, ***Iабс- абсорбционный ток,*** который затухает во времени Iабс= Iабс0 exp(-t/τ).

***Абсорбционный ток*** **- часть тока через диэлектрик, которая экспоненциально затухает с течением времени.**

Природа абсорбционного тока сильно зависит от типа диэлектрика. Этот ток может быть связан с реальным током в составном диэлектрике, в более проводящей части диэлектрика, Этот ток приводит к зарядке менее проводящей части диэлектрика. Другой тип абсорбционного тока связан с характерными временами установления поляризации в диэлектрике. В этом случае постоянная времени цепочки R2 C2 соответствует характерному времени установления поляризации. Схема рис.3б соответствует обоим типам абсорбционного тока, причем I∞ соответствует “сквозному” току через R1 , Iабс- току в цепочке R2 C2.

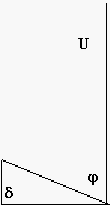
***8.4. Диэлектрические потери.***

           Термин возник из-за того, что в идеальном диэлектрике энергия может только накапливаться в виде W = ε0εΕ2/2, (на единицу объема, см.8.1.), но не теряться. В реальном диэлектрике часть энергии уходит из электрической цепи, превращаясь в другой вид энергии, а именно в теплоту. Есть два основных канала превращения энергии в тепло: потери за счет проводимости и поляризационные потери.

Потери за счет проводимости при постоянном напряжении определим из известных выражений. Из закона Ома можно определить мощность, поглощенную веществом P = U2/Rизол,а из закона Ома в дифференциальной форме (формула (8.5)) следует, что за счет обычной проводимости удельные потери мощности составят p = E2/ρ.

Для случая переменного напряжения появляются дополнительные потери, связанные с поляризацией и токами абсорбции, которые принято представлять в виде:

P =  U2ωC tgδ (8.11)

 Ir 

Ic

Рис 8.5 Векторная диаграмма токов в диэлектрике с потерями.

 где ***δ -угол диэлектрических потерь***, смысл которого можно понять из векторной диаграммы рис.8.5., tgδ = Ia/Ic - отношение активного тока к реактивному. В принципе физический смысл tgδ можно понять из общих соображений. Мощность потерь - это активная мощность, произведение активного тока на напряжение. Можно пойти от известного угла между током и напряжением ϕ P = UIcosϕ, выразив I через реактивный ток I = Iр/sinϕ, получим P = U2ωC ctgϕ, откуда видно что δ = π⁄2-ϕ.  Кроме этого понятия вводят новое - ***добротность изоляции*** Q = 1/tgδ, характеризующее количество периодов, в течение которых в диэлектрике поглощается накопленная энергия W = CU2/2.

В некоторых случаях целесообразно рассмотреть удельные диэлектрические потери

р = Е2ωεε0 tgδ.

В заключение приведем выражения для tgδ для разных схем замещения диэлектрика:

**Схема рис.8.1.**      tgδ = 1/ωRC;

Последовательная схема замещения       tgδ = ωrC;

**Схема рис.8.2.**      tgδ = (R+Rп)/ωRRпC;

**Схема рис. 8.3б** tgδ = ; τ = R2C2.

Следует отметить, что потери зависят от температуры, частоты, влажности, напряженности поля. Частотная зависимость потерь является характеристикой материала и определяется для каждого диэлектрического материала не только свойствами молекул материала, но и наличием и составом примесей. Как правило, потери имеют максимум при одной или нескольких частотах, в зависимости от типа молекул*.* Положение максимумов характеризуется собственными частотами установления поляризации. Они могут быть связаны с поворотом полярных молекул в жидком диэлектрике или с поворотом домена в сегнетоэлектрике. Например для диэлектрика, соответствующего схеме рис.8.3б потери максимальны при частоте ωм ~1/τ.Исследование частотного поведения потерь, т.н.***диэлектрическая спектроскопия*** позволяет изучать структуру веществ.

Температурная зависимость потерь обычно имеет монотонный характер, потери растут с ростом температуры, хотя у некоторых дипольных диэлектриков наблюдаются локальные максимумы, имеющие ту же природу, что и максимумы в частотной зависимости.

С ростом влажности потери также растут, зачастую весьма значительно. Это связано, как с увеличением сквозной проводимости, так и с поляризацией растворенной воды, и эмульгированной воды.

Увеличение напряженности поля сопровождается ростом tgδ, что объясняется ростом электропроводности. Причины этого будут подробно рассматриваться в следующем разделе.

**Специальная литература.**

1. Адамчевский И. Электрическая проводимость жидких диэлектриков. -Л.: Энергия, 1972, 295 с.

2. Электропроводность в диэлектрических жидкостях: Современные идеи и последние достижения. Электродинамические и электрохимические аспекты. = La conduction dans les liquids dielectriques. Idees modernes et progress recents. Aspects electrochimiques et electrohydrodynamiques. / Felici.: -ВЦП.№ 6 -45422.-44с. илл. -Journ. de Physique, 1976, T.37, № 1, p.61-117/.

3. Челидзе Т.Л., Деревянко А.И., Куриленко С.Д. Диэлектрическая спектроскопия гетерогенных систем. -Киев: Наукова думка, 1977, 231с.

# Лекция 9. Процессы в диэлектриках под действием сильных электрических полей

В предыдущей главе мы рассматривали электропроводность диэлектрических материалов под действием слабых электрических полей. В сильных электрических полях появляются новые процессы, ограничивающие применение диэлектриков в качестве электрической изоляции между электропроводными элементами.

http://sermir.narod.ru/lec/Warning.gif***Изоляционный промежуток - устройство, или элемент устройства, содержащий электропроводные элементы с диэлектриком между ними.***

При повышении напряженности электрического поля в любом диэлектрике, после достижения определенного уровня возникает новое физическое явление - ***электрический пробой промежутка.***   
 http://sermir.narod.ru/lec/Warning.gif***Электрический пробой - образование под действием высокого напряжения электропроводного плазменного канала в диэлектрике между электродами изоляционного промежутка.***

       При этом диэлектрик перестает быть диэлектриком и напряжение между электродами уменьшается до нуля за счет разряда заряженной емкости диэлектрика через образовавшийся канал. После отключения изоляционного промежутка с жидким или газообразным диэлектриком от источника напряжения канал разряда в жидкости и в газе исчезает и после прошествия некоторого времени напряжение можно снова подавать на устройство. Электрическая изоляция этих материалов восстанавливается. В твердых диэлектриках канал разряда разрушает сам материал и не происходит самовосстановления. Напряжение на устройстве практически невозможно подать после единичного пробоя.

http://sermir.narod.ru/lec/Warning.gif***Напряжение, при котором происходит электрический пробой промежутка называется электрической прочностью промежутка.***

http://sermir.narod.ru/lec/Warning.gif***Электрической прочностью материала называется напряженность, при которой происходит пробой материала.***

      Она зависит от материала диэлектрика, конфигурации электродов, внешних факторов, качества диэлектрика, типа воздействующего напряжения.

***9.1. Элементарные процессы в газе. Лавина, стример, лидер.***

В отличие от слабых электрических полей, в сильных электрических полях, характерных для работы электрической изоляции возникают новые явления, связанные с ионизационными процессами. Зависимость тока в газе при возрастании напряжения имеет три характерных участка (Рис.9.1.). Первый - линейная зависимость, второй - насыщение, третий участок - экспоненциальный рост. В этой области резко начинают расти и диэлектрические потери. Причина заключается в появлении носителей в промежутке за счет нового механизма - ***ударной ионизации.***

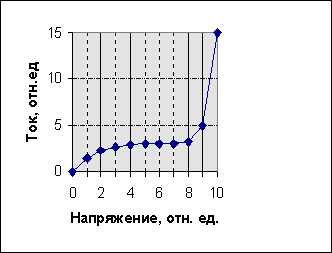


Рис.9.1. Зависимость тока в газе от напряжения.

http://sermir.narod.ru/lec/Warning.gif***Ударная*** ***ионизация* -это физическое явление увеличения числа электронов и ионов в промежутке за счет столкновения электронов с повышенной энергией с нейтральными молекулами.**

     Откуда берутся электроны с повышенной энергией? **Электроны появляются из электродов, либо в результате распада отрицательного иона, либо в результате термоионизации.** В электрическом поле на электрон действует сила, в результате чего он ускоряется и набирает энергию. После прохождения расстояния l приобретаемая энергия составит ΔW=eEl. При этом в каждом акте ионизации затрачивается энергия ионизации W. Характерные значения энергии ионизации зависят от типа молекул и составляют для некоторых молекул: для цезия - 3.88 эВ, для азота - 14.5 эВ, для кислорода - 12.5 эВ

      Ионизация электронами происходит, в том случае, если кинетическая энергия налетающего электрона mV2/2 > W по схеме e+A = A+ +e+e. Такой тип ионизации называется прямой ионизацией. Здесь А - молекула или атом газа.

      Однако возможна ионизация и при меньшей энергии налетающего электрона, если она превышает энергию возбуждения Wвозб. Такой тип ионизации называется ассоциативной ионизацией. Она происходит в два этапа, с участием возбужденных молекул A\*. Критерием начала ассоциативной ионизации является W>mV2/2> Wвозб. Возможны следующие схемы

e + A = A\*+ e, A\* + e=A+  + e + e

e + A= A\* + e, A\* + e=A + e + Wi, e + Wi + A=A+ + e

e + A=A\* , A\* + A\*=A+ + e

         Кроме ионизации молекул электронами возможна **фотоионизация**, **термоионизация и автоионизация.**

http://sermir.narod.ru/lec/Warning.gif **Фотоионизация - выбивание электронов фотонами при энергии фотона не меньше чем энергия ионизации.**

http://sermir.narod.ru/lec/Warning.gif **Термоионизация** **- появление свободных электронов и ионов за счет тепловой энергии.** Как можно оценить по выражениям (2.5.), (2.7.), она имеет заметные скорости при температуре несколько тысяч градусов.

http://sermir.narod.ru/lec/Warning.gif **Автоионизация** **- вырывание электрона из молекулы за счет действия сильного электрического поля.** Заметную роль в появлении электронов автоионизация начинает играть в полях более 10 МВ/см. В реальной электрической изоляции всегда следует учитывать контакт диэлектрика с электродами. При этом возможно зарождение новых носителей заряда с участием электрода фактически с помощью тех же процессов, т.е. фотоэффекта, автоионизации, выбивания электрона положительным ионом.

Как развиваются ионизационные процессы? Первичный электрон, двигаясь в поле до столкновения с молекулой проходит определенное расстояние, называемое длиной свободного пробега.

http://sermir.narod.ru/lec/Warning.gif ***Длина свободного пробега***, **- среднее расстояние, проходимое электроном или ионом до неупругого столкновения с молекулой.**

lион = 1/(4πnr2) (9.1.)

lэлект = 1/(πnr2) = kT/(π ·p·r2)

      где n- концентрация молекул, r- их радиус. Поскольку на каждом столкновении энергия теряется, то электрон не может бесконечно ускоряться и для каждого поля устанавливается определенная скорость V = b·E, где b - подвижность. Поскольку длина пробега иона в четыре раза меньше длины пробега электронов, то ударная ионизация ионами представляется маловероятной.

Табл.2.1. Подвижность некоторых носителей заряда в воздухе.

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Тип носителей | Подвижность носителей, 10-4 м2/(В·сек) | | |
|  | воздух | Водород | Пары воды |
| μ- | 1.4 | 6.7 | 0.47 |
| μ+ | 1.9 | 7.9 | 0,42 |

      Для сравнения оценка подвижности электронов в воздухе 0.1 м2/(В·сек). Если энергия на длине пробега достаточна, после первого столкновения в объеме появляются дополнительно 1 электрон и ион, после второго - еще 2 электрона и 2 иона и т.д. Возникает так называемая ***лавина.***

http://sermir.narod.ru/lec/Warning.gif***Электронная лавина* - экспоненциальный рост количества носителей заряда в промежутке от катода к аноду за счет ударной ионизации молекул электронами n = n0 eαd.** Коэффициент α называется **коэффициентом ударной ионизации.** Он определяется донорно-акцепторными свойствами молекул жидкости, зависит от длины свободного пробега и резко зависит от напряженности поля. Для примера α = 18 1/cм при 30 кВ/см в воздухе.

       Возникновение лавины - это еще не пробой. Необходимо, чтобы после прохождения лавины снова появился на катоде электрон. После этого возникает повторная лавина, затем еще лавина и т.д. Возникает самостоятельный многолавинный разряд. Для ***самостоятельности разряда*** необходимо вырывание электронов из катода положительными ионами, либо фотонами. Для оценки процесса вводят коэффициент γ - т.н. вторичный ионизационный коэффициент. Для плотности электронного тока можно получить выражение j = j0⋅e/(1-γ(eαd-1)).

http://sermir.narod.ru/lec/Warning.gif ***Условием самостоятельности разряда*** **является появление на катоде хотя бы одного электрона после прохождения лавины:**

1-γ(eαd-1) = 0 (9.2.)

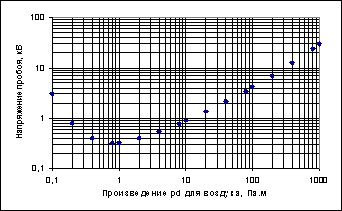


Рис.9.2. Кривая Пашена для лавинного пробоя воздушного промежутка.

 Поскольку коэффициент ударной ионизации зависит от напряженности поля, длины свободного пробега, а следовательно и давления из условия самостоятельности можно получить зависимость разрядного напряжения от внешних факторов, т.н. ***закон Пашена***

U = f(pd), или в другом виде E/p = F(pd)

       Здесь р - давление в газе, d - межэлектродный промежуток. Характерная кривая для пробоя газов приведена на рис.9.2. Она имеет минимум, значение которого и положение зависят от типа жидкости. Например для воздуха минимум пробивного напряжения составляет 300 В и он достигается вблизи ***pd***~1 Па⋅м.

        После пробоя газового промежутка он заполняется газоразрядной плазмой. В дальнейшем, в зависимости от мощности источника напряжения в промежутке развиваются различные виды разрядов. Если источник недостаточно мощен и давление невелико, то развивается ***тлеющий******разряд.*** Этот разряд происходит во всем объеме, он имеет несколько характерных зон, основные из которых - темное пространство у катода и светящийся анодный столб. В темном пространстве электроны не имеют достаточно энергии для возбуждения молекул и поэтому нет свечения. В положительном столбе свечение вызвано излучением возбужденных молекул. Анодное свечение используется в люминесцентных лампах.

В случае мощного источника напряжения в промежутке после пробоя возникает ***дуговой разряд.*** Он характеризуется узким высокотемпературным каналом с высокой плотностью тока. В промышленности используется, в частности при электросварке.

Реально закон Пашена выполняется при не очень высоких давлениях, менее 1 атм и при малых зазорах, менее 1 мм. В больших промежутках при нормальном и повышенном давлении механизм пробоя меняется. Дело в том, что по мере удлинения лавины заряд вблизи фронта развивающейся лавины нарастает, напряженность электрического поля также все более и более возрастает. При некоторой напряженности возможно распространение разряда практически без участия электродов, за счет высокой напряженности. Происходит т.н. ***лавинно-стримерный переход,*** переход разряда из многолавинной формы в стримерную форму.

http://sermir.narod.ru/lec/Warning.gif***Стример -*** *распространение с высокой скоростью в промежутке проводящего и светящегося плазменного локального образования*.

           Критерием перехода является выполнение условия αd = 20. Наглядно стример можно представить себе как светящийся шарик из плазмы, пробегающий от одного электрода к другому.

           По мере удлинения промежутка, для длинных промежутков, возможно возникновение повторных стримеров в следе первого стримера. Это происходит потому, что место где прошел стример прогревается, плотность газа уменьшается, его электрическая прочность уменьшается, и в следе стримера могут возникать и распространяться новые стримеры со своим дополнительным нагревом и т.д. В результате локального повышения температуры в нем начинается термоионизация, и возрастает электропроводность, по значению выше перехода из диэлектрического состояния в проводящее (см. лекцию 8). Возникающая структура - ***лидер*** эквивалентна продвижению электрода в виде острия вглубь промежутка и способствует пробою длинных промежутков. В линиях электропередач реализуется именно этот вид пробоя.

            Кроме того, для линий электропередач и других систем с ***резконеоднородным полем*** возникает особое явление разряда - ***корона*.** Это ионизационные процессы в локальной области вблизи электрода, чаще вблизи острых кромок электродов, где локальное электрическое поле может быть очень большим. Они приводят к потерям энергии, вносят шумы в радиочастотном диапазоне, выделяют озон и вредные оксиды азота.

             Для сверхбольших промежутков, а точнее в случае ультравысоких напряжений, возникает новое явление -***аномальный разряд****.* При напряжении положительной полярности относительно земли выше 3.3 МВ или отрицательной полярности относительно земли выше 5.5 МВ разряд в воздухе приобретает новые свойства, а именно, способность развиваться не в направлении поля, а в произвольном направлении. Это было обнаружено в экспериментах с генератором импульсных напряжений ГИН 7.0 МВ на высоковольтном стенде Сибирского НИИ Энергетики. Было замечено. что при воздействии напряжением положительной полярности 3.5 МВ на промежуток 8 м в некоторых случаях разряд не пробивал промежуток, а уходил в произвольном направлении: в сторону оврага, в облака, в сторону ЛЭП. Однажды, в середине января, в диспетчерском журнале РЭУ Новосибирскэнерго был отмечен “неизвестный случай грозовой активности”. Этот случай произошел из-за экспериментов СибНИИЭ после того, как однажды разряд повернул в сторону ЛЭП. Произошел пробой 150 метрового промежутка “ГИН- грозозащитный трос над ЛЭП”, затем пробой с троса на фазу, после чего в РЭУ «Новосибирскэнерго сработали регистраторы разряда. Подобные эксперименты указывают на предельные возможности воздуха, как изолятора и запрещают переход на повышенные классы напряжения при проектировании и строительстве линий электропередач.

Из **эмпирических зависимостей электрической прочности газов** от внешних факторов отметим следующие:

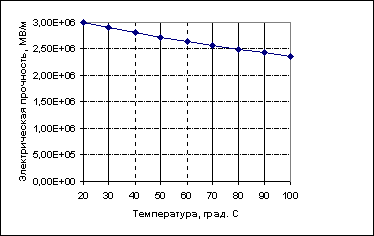


Рис.9.3. Зависимость электрической прочности воздуха при нормальных условиях от температуры

**Температурная зависимость**. Она обусловлена уменьшением плотности газов при росте температуры в условиях постоянного давления в соответствии с уравнением идеального газа PV = RT  или n = P/kT. Для атмосферных условий влияние изменения и давления и температуры можно учесть так: E = E0δ, где δ -относительная плотность δ = 0.386Р/(t + 273) (рис.9.3.).

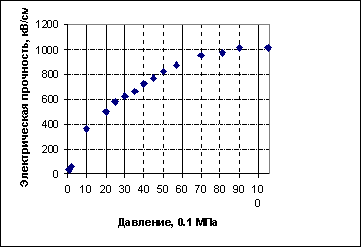


Рис.9.4. Электрическая прочность воздушного промежутка 1 мм при высоких давлениях [2]/

**Зависимость от давления.** В условиях лавинного пробоя при pd<100 зависимость E(p) полностью эквивалентна кривой Пашена при d = const, т.е. также имеет минимум. При более высоких давлениях и длинах промежутков зависимость напряженности пробоя от давления имеет вид кривой с насыщением.

**Зависимость от межэлектродного зазора.** Для лавинного пробоя - аналогична кривой Пашена при р = const. При повышенных давлениях и малых зазорах E = 30 + A/d, где А - постоянная. Экспериментальные данные по пробою микронных зазоров показывают, что пробивная напряженность доходит до 200 кВ/см.   **Зависимость от площади электродов**. Эта зависимость - чисто эмпирическая, имеет вид Е = Е0S-1/10 . Обычно эту зависимость объясняют наличием т.н. «слабых мест» на поверхности в виде неоднородностей, пленок и т.п., возрастание числа которых с ростом площади приводит к уменьшению электрической прочности.  **Зависимость от влажности.** Эта зависимость проявляется только при разряде по поверхности раздела твердого изолятора и газа и выражается в уменьшении пробивного напряжения с ростом влажности, особенно при некотором уровне влажности, когда образуется пленка на поверхности.

http://sermir.narod.ru/lec/Warning.gif**Закономерности импульсного пробоя газов**

При импульсном пробое газов увеличивается электрическая прочность относительно статического уровня. Это связано с конечным временем формирования разряда, которое, в свою очередь, обусловлено вероятностными характеристиками появления первичных электронов в промежутке, появления вторичных лавин и стримеров и т.д. Значения возникающего ***перенапряжения,*** т.е. увеличения пробивного напряжения относительно статического уровня может достигать двухкратного и более уровня.

***9******.2. Пробой жидкостей***

        Механизм электрического пробоя жидкостей вначале считался аналогичным механизму пробоя газов, считая жидкость плотным газом. Это основывалось на схожести картины разряда и на некоторой схожести разрядных зависимостей. Однако прямое, непосредственное применение газовых аналогий неправильно. Дело в том, что поведение электронов в жидкости кардинально отличается от поведения электронов в газе. Молекулы жидкости расположены столь близко друг другу, столь сильно взаимодействуют друг с другом, что электрон не может свободно двигаться и ускоряться в электрическом поле. В жидкости, кроме особо чистых сжиженных благородных газов, свободные электроны не могут существовать. При попадании свободных электронов в жидкость они сначала сольватируются, затем прилипают к нейтральным молекулам, образуя тем самым, отрицательные ионы. Поэтому понятие длины свободного пробега для жидкости невозможно ввести. Грубая оценка принципиальных ограничений электрической прочности может быть сделана из следующих соображений. Считаем, что электрон может ускоряться на протяжении межмолекулярного расстояния. Используя в качестве длины пробега lэлект межмолекулярное расстояние λ можно получить оценку предельной электрической прочности жидкости:

Eпред λ = W

           Подставляя значения λ ~ 5⋅10-10 м, W ~ 5 эВ, получим, что Eпред~ 1010 В/м. Эксперименты дают значения на 3-4 порядка меньше.

Рассмотрим характер некоторых эмпирических зависимостей электрической прочности жидких диэлектриков от различных факторов.

**Зависимость от давления** Электрическая прочность жидкостей зависит от давления достаточно слабо Е ~p1/6-1/12 . Иногда эту зависимость представляют в виде кривой с насыщением.

**Температурная зависимость**. Эта зависимость зачастую имеет достаточно сложный вид. Например для технически чистого трансформаторного масла электрическая прочность с ростом температуры от отрицательных температур до 30-40 °С уменьшается, затем возрастает в диапазоне до 50-70 °С и потом снова убывает. Для чистых жидкостей, как правило, наблюдаются три области зависимостей: при низких температурах электрическая прочность падает по мере роста температуры, затем очень слабо меняется и вблизи температуры кипения опять заметное падение. Объяснение этому будет дано ниже.

**Зависимость от межэлектродного зазора.** При малых зазорах пробивная напряженность поля резко нарастает с уменьшением зазора. Согласно экспериментальным данным в микронных зазорах пробивная напряженность доходит до 10 МВ/см.

**Зависимость от площади** Эта зависимость - чисто эмпирическая, имеет вид Е = Е0S-1/10 . Несомненно, что как и в случае пробоя газа она обусловлена вероятностными характеристиками инициирования пробоя.

**Зависимость от влажности**. Эта зависимость проявляется при малой влажности, менее 0.01% и выражается в резком уменьшении пробивного напряжения с ростом содержания воды.

http://sermir.narod.ru/lec/Warning.gif**Закономерности импульсного пробоя** **жидкости**

         При импульсном пробое жидкостей также увеличивается пробивное напряжение по мере укорочения длительности импульса. Электрическая прочность в наносекундном диапазоне может превышать 10-20 МВ/см.

         Для практических целей предложено и широко используется обобщение эмпирических зависимостей в виде т.н. ***формулы Мартина*.**

**http://sermir.narod.ru/lec/lect9-62.gif (9.3)**

где постоянная M зависит от сорта жидкости и имеет размерность МВ/см. В этом выражении длительность импульса *t* следует подставлять в микросекундах, давление в атм., а площадь электродов *S* - в см2. Постоянная *А* 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, 0.3 МВ/см в случае пробоя с анода.

Для пробоя жидкостей существуют специфические зависимости электрической прочности от наличия примесей. В принципе увеличение количества таких примесей, как механические твердые частицы, пузырьки, примеси, увеличивающие электропроводность приводит к уменьшению электрической прочности. Зачастую электрическая прочность является **не *физической***характеристикой жидкости, **а** ***технологической***характеристикой жидкости и способа ее приготовления.

К настоящему времени не существует теории, позволяющей получать оценки электрической прочности из "первых принципов", т.е. из физической картины предпробивных явлений. Наиболее очевидной представляется гипотеза об ударной ионизации электронами молекул жидкости. На основе этой гипотезы разработан ряд моделей пробоя, позволяющих оценить электрическую прочность простых углеводородных жидкостей и даже предсказать характер изменения электрической прочности с разветвлением структуры молекул. Например, в одной из моделей считается , что электроны при движении в жидкости взаимодействуют с колебаниями связи С-С или С-Н. Энергия колебаний Wv= hν~10-2-10-1 эВ много меньше чем энергия ионизации 10 эВ. Если электрон набирает энергию больше Wv , то по мнению авторов, он может двигаться без потерь до достижения энергии ионизации. Подбор параметров дает возможность получить значения электрической прочности *Eпр*, близкие к экспериментальным данным. Однако при слабых изменениях внешних условий: температуры *Т*, давления *Р,* длительности импульса *t* теоретические оценки существенно расходятся с экспериментом. Согласно моделям *Eпр* является характеристикой жидкости и не зависит от *Т* и *Р,* тогда как в эксперименте *Eпр* может изменяться в несколько раз при изменении температуры и давления. Столь явное расхождение требует учета других процессов, зависящих от внешних условий.

Появление моделей, связанных с зарождением в жидкости парогазовой фазы, позволило объяснить на качественном уровне ряд зависимостей. Критерии пробоя основаны на создании условий для появления пузырьков за счет кипения жидкости при протекании тока, либо за счет кавитации под действием электростатических или кулоновских сил. Принципиальными недостатками моделей являются несоответствие эксперименту расчетных зависимостей *Eпр(t,P).* Расчетная электрическая прочность оказывается одинаковой для импульсов любой длительности, что противоречит практике. Согласно экспериментальным данным *Eпр(t)* в микро- и субмикро-секундном диапазоне меняется как *t -(1/3-1/5).* Что касается давления, то в моделях зависимость *Е(P)~P1/2*, что значительно расходится с экспериментом         *Е(P) ~ P (1/6-1/8).*

Модель развития предпробивных процессов можно представить следующим образом. Под действием электрического поля на пузырьки, заранее существующие в жидкости, в них возникают ионизационные процессы (частичные разряды) после достижении на их размере падения напряжения *Up*. После разряда поле в пузырьке уменьшается вследствие экранирования осевшими зарядами внешнего поля, что вызывает ослабление, либо прекращение ионизационных процессов. Действие электрического поля на осевший заряд приводит к движению стенки пузырька и его вытягиванию вдоль поля, а также к продвижению заряда вглубь жидкости со скоростью, определяемой подвижностью носителей заряда. При этом возможны две ситуации: поддержание разряда в виде “тлеющего разряда”, либо прекращение разряда. В первом случае на пузырьке поддерживается некоторое напряжение, по-видимому, соответствующее закону Пашена. В последнем случае напряжение на пузырьке растет, что ведет к повторному частичному разряду и движению в жидкости новой волны зарядов. Определяющий параметр - давление на стенку пузырька, обусловлен действием кулоновских сил на инжектированный заряд и ростом давления в пузырьке за счет нагрева газа в нем. Зажигание разряда в жидкости произойдет тогда, когда напряженность поля в жидкости, вблизи полюса пузырька, достигнет критического значения. Пробой произойдет после пересечения промежутка каналом разряда. Эта модель позволяет, полуколичественно, объяснить практически все экспериментальные зависимости: от давления, от температуры, от вязкости, от длительности воздействующего импульса (рис.9.5) и т.д.



Рис.9.5 Расчетная (пузырьковая модель) и эмпирическая зависимости предпробивного времени от напряженности поля

***9.3. Электрический пробой твердых диэлектриков***

[**в начало лекции**](http://sermir.narod.ru/lec/lect9.htm#%D0%AD)

            Исследования пробоя твердых диэлектриков по своему объему значительно превышают исследования всех других видов диэлектриков, что обусловлено более широким применением твердых диэлектриков. Это, в свою очередь, обусловлено их высокими электрическими характеристиками в сочетании с удовлетворительными механическими и теплофизическими характеристиками. Механизм пробоя значительно отличается для разных диэлектриков и даже для одного и того же диэлектрика при разных условиях.

http://sermir.narod.ru/lec/Warning.gif**Закономерности пробоя твердых диэлектриков**

**Температурная зависимость**. Эта зависимость зачастую имеет достаточно сложный вид. Например в некоторых случаях электрическая прочность с ростом температуры сначала увеличивается затем уменьшается, в других случаях монотонно возрастает или убывает. Последний случай обычно хорошо описывается ***моделью теплового пробоя.***

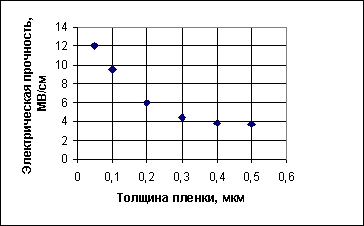


Рис.9.6. Зависимость электрической прочности пленки SiO2 от толщины [2]

**Зависимость от межэлектродного зазора.**

При малых зазорах напряженность поля пробоя резко нарастает с уменьшением зазора (рис.9.6). Современные экспериментальные данные по пробою специально выращенных бездефектных пленок показывают, что пробивная напряженность в субмикронных зазорах может доходить до 100 МВ/см.

**Зависимость от площади.** Эта зависимость - чисто эмпирическая, как в газах и жидкостях, она имеет вид Е=Е0S-1/10

**Кристаллографическая направленность.** При разряде в кристаллах, например NaCl, с “игольчатого” электрода разряд зачастую имеет вид не “дерева” или “куста”, а разветвленной структуры с ветвями, ориентированными вдоль определенных кристаллографических направлений. При этом, разряд с анодного острия предпочитает одни направления, а с катодного острия - другие.

**Закономерности импульсного пробоя**: такие же, как в случае пробоя жидкостей. Электрическая прочность в наносекундном диапазоне может превышать 10 МВ/см.

Из теорий электрического пробоя рассмотрим модель электрического пробоя, модель пробоя под действием частичных разрядов и наиболее проработанную теорию ***теплового пробоя***.

Много моделей рассматривают электрический пробой твердых диэлектриков. Считается, что электроны могут вырываться из электродов или из молекул примесей, например путем туннельного эффекта, или термоионизации и попадают в зону проводимости. Там они ускоряются и набирают энергию, достаточную для выбивания новых электронов из заполненной зоны. Выделяющаяся энергия приводит к разрушению и появлению канала разряда. В случае чисто «электрического» механизма не должно быть температурной зависимости Е(Т).

Реальные диэлектрики отличаются от идеальных, прежде всего наличием в теле диэлектрика микропор, в особенности на поверхности раздела “электрод-диэлектрик”. Это является одним из главных факторов ухудшения свойств электрической изоляции в процессе эксплуатации, т.н. ***старения диэлектриков*.**

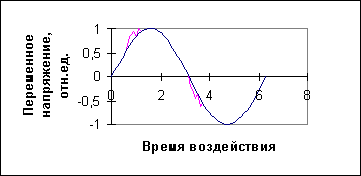


Рис.9.7. Зона частичных разрядов на подъеме и спаде напряжения.

http://sermir.narod.ru/lec/Warning.gif***Старение диэлектриков*** - ухудшение характеристик диэлектриков при их эксплуатации.

Основной механизм старения диэлектриков - воздействие частичных разрядов. Дело в том, что в энергетике на диэлектрики действуют, как правило, переменные электрические поля. При этом при действии переменного напряжения определенной амплитуды в газовых или воздушных порах возникают ***частичные разряды.****(рис.9.7)*

http://sermir.narod.ru/lec/Warning.gif***Частичный разряд*** - локальный лавинный разряд в газовой поре диэлектрика.

         Каждый разряд оказывает слабое воздействие на диэлектрик за счет образования активных радикалов, излучения, повышенной температуры. Интенсивность ЧР зависит от напряженности поля. Однако разряды обычно возникают на каждом полупериоде синусоидального напряжения, поэтому с течением времени их действие нарастает. Это ведет к постепенному разложению материала, росту давления в поре, появлению проводящих частиц (обуглероживанию), и в конце концов к зарождению ***дендрита.***

http://sermir.narod.ru/lec/Warning.gif***Дендрит*** - древовидное образование в теле диэлектрика, имеющее повышенную проводимость и приводящее к прогрессирующему разрушению диэлектрика. Характерен для любых видов твердых диэлектриков, канал дендрита обладает повышенной проводимостью, имеет размер от 1 мкм до 10-20 мкм.

        Интенсивность роста дендрита зависит от напряженности поля и она определяет зависимость времени жизни от напряженности и частоты воздействующего напряжения. Поведение органических и неорганических диэлектриков различается. На переменном напряжении неорганика практически не стареет, т.к. в ней не происходит разложения материала и обуглероживание каналов дендритов. На постоянном напряжении неорганика (содержащая ионы) стареет за счет перемещения ионов разного знака к разным электродам. Органика на переменном напряжении стареет за счет ЧР, на постоянном напряжении практически не стареет.

http://sermir.narod.ru/lec/Warning.gif***Водный триинг*** (водный дендрит) - образование разветвленной микроструктуры в виде объемной сетки или микрокустов в теле диэлектрика, состоящей преимущественно из воды. Характерен для полиэтиленовой изоляции кабелей, работающих во влажных условиях. Растет от точек входа воды вглубь промежутка под действием напряжения и воды. Диаметр водного дендрита - доли микрон. При разрастании структуры триинга до размеров половины промежутка или более, происходит пробой промежутка.

Обычно механизм выхода их строя твердой изоляции под действием напряжения представляется следующим. В порах возникают частичные разряды, они постепенно разрушают диэлектрик в прилегающей области, затем их амплитуда растет и, по достижению некоторого значения, скачкообразно происходит образование микродендрита. Затем ЧР происходят уже в дендрите, и после определенных воздействий, дендрит скачкообразно прорастает дальше вглубь промежутка. В конце концов происходит пробой всего промежутка. Для влажных условий водные дендриты начинают играть превалирующую роль, приводя к пробою при сравнительно низких напряжениях.

По сути дела, **тепловой пробой** возникает вследствие увеличения электропроводности диэлектрика с ростом температуры, которую обычно представляют в виде σ = σ(Τ0)⋅exp(a⋅(Τ−Τ0)), где a- температурный коэффициент зависимости. Механизм возникновения представляется следующим образом. Энерговыделение W в среде с напряженностью E и удельной проводимостьюσ в течении времени Δτ определяется джоулевыми потерями W = σE2Δτ. Это приводит к росту температуры ΔТ в соответствии с выражением W = с⋅d⋅ΔΤ, где с ⋅ удельная теплоемкость, d - плотность диэлектрика. Рост температуры сопровождается ростом электропроводности, что приводит к росту энерговыделения и т.п. В результате возникает ничем не ограниченный (при мощном источнике) рост температуры. Считается, (чисто математически) что пробой произойдет при достижении бесконечной температуры. Для одного частного случая, когда пренебрегается теплоотводом от диэлектрика во внешнюю среду получено известным российским ученым академиком Фоком выражение

Е = (с⋅d/(a ⋅σ(Т0)⋅ t))1/2 (9.4)

Это выражение определяет температурную зависимость электрической прочности E(T0), ввиду зависимости σ(Т0).

Экспериментально тепловой пробой твердых диэлектриков выявляется не только по виду температурной зависимости, но и по внешнему виду канала разряда. В этом случае обычно канал разряда расположен в центре образца и он имеет аккуратные гладкие стенки, характерные для проплавления диэлектрика.

Литература

1.Ушаков В.Я. *Импульсный электрический пробой жидкостей.-*Томск: Изд-во ТГУ, 1975, 254 с.

2. Воробьев Г.А. Физика диэлектриков, область сильных полей.: Изд-во Томского Университета, Томск 1977, 252 с.

3. Райзер Ю.П. Физика газового разряда: учебное руководство.-М.:Наука.Гл.ред.физ.-мат. Лит.,1987.-592 с.

3. Коробейников С.М. Пузырьковая модель инициирования импульсного пробоя жидкостей. В кн. Сборник научных трудов НГТУ, из-во НГТУ, 1996, В.2, 1997, В.1.

## Лекция 10. Газообразные  и жидкие  диэлектрики

## *10.1. Газообразные диэлектрики.*

### *10.1.1. Основные характеристики.*

Основные характеристики газов, как диэлектриков, это диэлектрическая проницаемость, электропроводность, электрическая прочность. Кроме того, зачастую важны теплофизические характеристики, в первую очередь теплопроводность.

Диэлектрическую проницаемость газов очень просто рассчитать по формуле ε = 1+n(α+μ2⁄3kT)/ε0, где n- число молекул с поляризуемостью α и дипольным моментом μ в единице объема. Обычно значение ε близко к 1, отличие от единицы можно обнаружить в 3-4 знаке после запятой. Причина этого - малое число молекул в газовой фазе n.

Электропроводность газов обычно не хуже 10-13 См/м, причем, как было показано во второй лекции, основным фактором вызывающим проводимость в не очень сильных полях, является ионизирующее излучение. Вольт-амперная характеристика имеет три характерные зоны - омическое поведение, насыщение, экспоненциальный рост. Диэлектрические потери незначительны и их стоит учитывать только в третьей области.

Электрическая прочность у газов, сравнительно с прочностью жидкостей и твердых диэлектриков, невелика и сильно зависит как от внешних условий, так и от природы газа. Обычно пробивные характеристики разных газов сопоставляют при нормальных условиях (н.у.). Эти условия - давление 1 атм, температура 20 °С, электроды, создающие однородное поле, площадью 1 см2, межэлектродный зазор 1 см. Воздух при н.у. имеет электрическую прочность 30 кВ/см. Коэффициент ***к***, показывающий отношение электрической прочности газа к электрической прочности воздуха составляет для некоторых газов, используемых в технике: водород - ***к*** = 0.5, гелий - ***к*** = 0.2, элегаз ***к*** = 2.9, фреон-12 - ***к*** = 2.4, перфторированные углеводородные газы ***к***  = (4-10),.

Теплопроводность газов ***λ*** также невелика по сравнению с теплопроводностью твердых тел и жидкостей, наибольшее ее значение λ= 0.2 Вт/(м⋅К) - у водорода. Для наиболее популярных газов λ= 0.03 Вт/(м⋅К)--воздух, λ= 0.012 Вт/(м⋅К) - элегаз. Для сравнения - у алюминия λ= 200 Вт/(м⋅К).

Максимальные температуры эксплуатации газов определяются либо разложением молекул газа (характерно для сложных молекул), либо увеличением электропроводности до перехода из диэлектрического до резистивного состояния за счет ионизации и диссоциации молекул газа под действием тепловой энергии. Характерные температуры для второго варианта - порядка и более тысячи градусов.

### *10.1.2. Электроотрицательные газы, применение газообразных диэлектриков.*

Наибольшее применение из газов в энергетике имеет воздух. Это связано с дешевизной, общедоступностью воздуха, простотой создания, обслуживания и ремонта воздушных электроизоляционных систем, возможностью визуального контроля. Объекты, в которых применяется воздух в качестве электрической изоляции - линии электропередач, открытые распределительные устройства, воздушные выключатели и т.п.

Электроотрицательными называются газы, молекулы которых обладают сродством к электрону, это означает, что при захвате электрона и превращении молекулы в отрицательный ион выделяется энергия. Этот процесс приводит к явлению  ***прилипания электронов***, и уменьшению, тем самым, эффективного коэффициента ударной ионизации на значение ***коэффициента прилипания η*** ***αэфф = α−η***. Поэтому электроотрицательные газы имеют повышенную электрическую прочность. Из электроотрицательных газов с высокой электрической прочностью наибольшее применение нашел элегаз SF6.. Свое название он получил от сокращения “электрический газ”. Уникальные свойства элегаза были открыты в России, его применение также началось в России. В 30х годах известный ученый Б.М. Гохберг исследовал электрические свойства ряда газов и обратил внимание на некоторые свойства шестифтористой серы SF6. Электрическая прочность при атмосферном давлении и зазоре 1 см составляет Е = 89 кВ/см. Молекулярная масса составляет 146, характерным является очень большой коэффициент теплового расширения и высокая плотность. Это важно для энергетических установок, в которых проводится охлаждение каких-либо частей устройства, т.к. при большом коэффициенте теплового расширения легко образуется конвективный поток, уносящий тепло. Из теплофизических свойств: температура плавления = -50 °С при 2 атм, температура кипения (возгонки) = -63°С. Низкие значения последних параметров означают возможность применения элегаза при низких температурах.

Из других полезных свойств отметим следующие: химическая инертность, нетоксичность, негорючесть, термостойкость (до 800°С), взрывобезопасность, слабое разложение в разрядах, низкая температура сжижения. В отсутствие примесей элегаз совершенно безвреден для человека. Однако продукты разложения элегаза в результате действия разрядов (например в разряднике или выключателе) токсичны и химически активны.

Комплекс свойств элегаза обеспечил достаточно широкое использование элегазовой изоляции. В устройствах элегаз обычно используется под давлением в несколько атмосфер для большей компактности энергоустановок, т.к., как вы знаете, электрическая прочность увеличивается с ростом давления. На основе элегазовой изоляции созданы и эксплуатируются ряд электроустройств, из них кабели, конденсаторы, выключатели, компактные ЗРУ (закрытые распределительные устройства). Наиболее широкое применение элегаз нашел за рубежом, в особенности в Японии. Например, использование элегаза позволяет в десятки раз уменьшить размеры распредустройств, что очень актуально при высокой стоимости земли для размещения энергохозяйства. Это выгодно даже несмотря на высокую стоимость элегаза - более 10$ за 1 килограмм.

## *10. 2. Жидкие диэлектрики.*

## *10.2.1. Общие свойства.*

С электрофизической точки зрения наиболее важными характеристиками жидкостей являются диэлектрическая проницаемость, электропроводность и электрическая прочность.

***Диэлектрическая проницаемость*** является истинной характеристикой жидкостей и характеризуется дипольным моментом и поляризуемостью молекул. В качестве примера - у ***неполярного диэлектрика*** гексана дипольный момент отсутствует, поляризация имеет чисто электронный характер и, вследствие этого, диэлектрическая проницаемость мала ε ≤ 2. Трансформаторное масло, являясь смесью веществ, имеет в своем составе небольшое количество полярных молекул, обладающих дипольным моментом. Поэтому ε возрастает до ~ 2,2-2,4. Касторовое масло имеет больше полярных молекул, следовательно больше ε ~4,5. Этиловый спирт, глицерин, вода являются представителями ***полярных*** веществ, диэлектрическая проницаемость составляет 24, 40, 81 соответственно.

Для неполярных жидкостей ε < 3 диэлектрическая проницаемость можно рассчитать, зная концентрацию и поляризуемость молекул. Для этого применяется формула Клаузиуса-Моссотти (ε-1) ⁄(ε+2) = nα⁄3ε0 .

***Электропроводность*** жидкостей определяется ионизацией молекул, наличием в жидкости примесей особого сорта: ионофоров и ионогенов, возникновением электрогидродинамических течений, как уже рассматривалось во второй лекции. Кроме того, в жидкостях возникают т.н. ***двойные электрические слои.***

http://sermir.narod.ru/lec/Warning.gif**Двойной электрический слой - образование в жидкости, на границе с другими телами (электроды, диэлектрики, несмешивающиеся жидкости), заряженных слоев с повышенной электропроводностью, причем поверхность раздела и объем жидкости приобретают заряды разного знака.**

Образование двойных слоев актуально для технических жидких диэлектриков, например для транспорта по трубам горючих диэлектрических сред типа нефти, конденсата и т.д. Устранение двойных слоев может быть осуществлено только при тщательной очистке диэлектрических жидкостей от ионизирующихся примесей.

***Очистка диэлектрических жидкостей*** может осуществляться дистилляцией, в.т.ч. под вакуумом, частичной кристаллизацией, адсорбцией, ионным обменом. При этом, как правило, уменьшается электропроводность, диэлектрические потери, возрастает ***электрическая прочность.***

http://sermir.narod.ru/lec/Warning.gif***Основной примесью, дающей проводимость жидких диэлектриков является вода*, а основными примесями, уменьшающими электрическую прочность являются микрочастицы, микропузырьки и вода.** Поэтому в практике энергосистем для регенерации трансформаторного масла его фильтруют, обезгаживают вакуумированием, осушают с помощью пропускания через объем, заполненный адсорбентами (***цеолитами****,* либо ***силикагелем****)*.

***Цеолиты*** - твердые вещества естественного или искусственного происхождения, обладающие большой удельной поверхностью за счет пор молекулярных размеров и возможностью адсорбции примесей в этих порах. ***Силикагель*** - пористый адсорбент для поглощения влаги и полярных примесей. Он обладает меньшей избирательностью по отношению к разным примесям и меньшей удельной поверхностью по сравнению с цеолитами.

Электропроводность жидкостей наиболее радикально (до 6 порядков величины по сравнению с данными из справочников) возрастает после применения нового способа очистки- ***электродиализа.***

***Электродиализ -*** способ удаления ионов из промежутка за счет пропускания постоянного тока при использовании ионообменных мембран, проводимость которых осуществляется только одним видом ионов: в катионообменной носители заряда - катионы, ее располагают у катода, в анионообменной носители заряда - анионы, ее располагают у анода.

За счет различных способов очистки жидкостей в исследованиях удавалось получить электропроводность не выше электропроводности лучших твердых диэлектриков, а именно до 10-19 См/м.

***Электрическая прочность*** - также, как и электропроводность, в значительной степени является технологической характеристикой жидкого диэлектрика и электродов, способов приготовления и эксплуатации изоляционного промежутка. На нее влияют не только те примеси, которые определяют электропроводность, но и форма и материал электродов, длительность импульса, наличие пузырьков. Есть несколько наиболее общих и очевидных приемов увеличения электрической прочности: дегазация жидкости, пропускание через адсорбент, пропускание через фильтр с субмикронными размерами пор. Некоторые из этих способов используются в энергосистемах для осушки и регенерации масла.

Двадцать-тридцать лет назад велись споры, является ли электрическая прочность “истинной” характеристикой жидкости. Этот вопрос достаточно принципиален. Дело в том, что если измеренная электрическая прочность является истинной характеристикой, то практически бессмысленны попытки ее увеличения. Если электрическую прочность считать технологической характеристикой, следствием протекания определенных ***предпробивных******процессов***, то резонно, что воздействием на эти процессы можно управлять электрической прочностью. Как указывалось в лекции 9, электрический пробой является следствием цепочки событий, которые весьма чувствительны как к примесям, так и к свойствам границы раздела “электрод-жидкость”. Поэтому пробоем можно управлять.

*Для примера рассмотрим эксперименты по пробою на постоянном напряжении замечательной диэлектрической жидкости - перфтортриэтиламина (С2F5)3N. Первые измерения свежезалитой жидкости без специальной очистки жидкости и электродов дали значения электрической прочности Епр= 60-70 кВ/см, причем с ростом числа пробоев электрическая прочность слабо возрастает до 70-80 кВ/см. Если жидкость подвергнуть операциям дегазирования, обезвоживания и фильтрации, то можно получить 200-300 кВ/cм. После дополнительного проведения тренировочной серии в 20-30 маломощных разрядов электрическая прочность достигала 550-600 кВ/см.*

### *10.2.2. Используемые и перспективные жидкие диэлектрики.*

Наиболее распространенный в энергетике жидкий диэлектрик - это *трансформаторное масло.*

http://sermir.narod.ru/lec/Warning.gif**Трансформаторное масло*,* - очищенная фракция нефти, получаемая при перегонке, кипящая при температуре от 300 °С до 400 °С.** В зависимости от происхождения нефти обладают различными свойствами и эти отличительные свойства исходного сырья отражаются на свойствах масла. Оно имеет сложный углеводородный состав со средним весом молекул 220-340 а.е., и содержит следующие основные компоненты.

|  |  |
| --- | --- |
| 1. Парафины | 10-15% |
| 2. Нафтены или циклопарафины | 60-70% |
| 3. Ароматические углеводороды | 15-20% |
| 4. Асфальто-смолистые вещества | 1-2 % |
| 5. Сернистые соединения | < 1% |
| 6. Азотистые соединения | < 0.8% |
| 7. Нафтеновые кислоты | <0.02% |
| 8. Антиокислительная присадка (ионол) | 0.2-0.5% |

Каждый из компонентов масла играет определенную роль при эксплуатации. Парафины и циклопарафины обеспечивают низкую электропроводность и высокую электрическую прочность. Ароматические углеводороды уменьшают старение масла и увеличивают стойкость к частичным разрядам в объеме масла. Асфальто-смолистые, сернистые, азотистые соединения и нафтеновые кислоты являются примесями и не играют положительной роли. Асфальто-смолистые соединения ответственны за возникновение осадка в масле и за его цвет. Сернистые, азотистые соединения и нафтеновые кислоты ответственны за процессы коррозии металлов в трансформаторном масле.

Углеводороды парафинового ряда, кроме высокой химической устойчивости обладают высокой температурой вспышки и рядом других положительных качеств, но теряют текучесть (застывают) уже при комнатной температуре и поэтому не допускается большого содержания парафинов. Более того, нефти с их большим содержанием (грозненская, сураханская) для приготовления масел не применяются.

Нафтеновые углеводороды менее устойчивы, чем парафины и легко окисляются. Типичной нафтеновой нефтью является доссорская нефть, из которой готовится лучшее трансформаторное масло.

Ароматические углеводороды разделяются на углеводороды симметричного строения (бензол, нафталин, антрацен) и ароматики с длинными боковыми цепями(толуол). Первые являются одним из наиболее трудно окисляемых веществ. Эти ароматики являются ценной составной частью масла, так как защищают его от окисления. Вторые весьма легко соединяются с кислородом, причем их способность к самоокислению растет с увеличением числа и длины боковых цепей.

*Первой операцией приготовления трансформаторного масла из нефти является фракционная перегонка под вакуумом. При перегонке нефть путем испарения разделяется на ряд фракций, каждая из которых содержит близкие по температуре кипения и сходные по свойствам углеводороды. Cначала от нефти отделяются наиболее легкие углеводороды: бензин, лигроин, керосин; затем перегоняются более тяжелые фракции , так называемый соляровый дистиллят, из которого и готовится масло. Перегонка не обеспечивает однородного состава масла, так как в дистиллят попадает целый ряд смежных фракций. Кроме того, в нем имеются вредные примеси, ухудшающие свойства масла и сокращающие срок службы. Для получения полноценного продукта погон нефти подвергается очистке от нефтяных кислот, смол, серы и ненасыщенных соединений. Эта операция называется рафинированием. Дистиллят в течение определенного времени обрабатывается крепкой серной кислотой, которая окисляет все непредельные соединения и смолы и превращает их в нерастворимый кислый гудрон, который выпадает в осадок. Кислый гудрон, находясь в контакте с маслом, разрушает основные углеводороды. Поэтому для уменьшения причиняемого им вреда обработка кислотой производится при возможно более низкой температуре и гудрон удаляется из масла как можно скорее. Общее количество кислоты достигает 12-14% от веса дистиллята. Для нейтрализации избытка серной кислоты, оставшейся в масле, и для удаления нафтеновых кислот масло обрабатывается водным раствором щелочи (едкого натра); образовавшиеся при этом соли, мыла и эмульсии отделяются отстаиванием. Оставшееся в масле незначительное количество солей и мыл ведет к его окислению, поэтому после отстоя масло должно быть тщательно промыто водой. Для полного удаления влаги промытое масло подвергается сушке продувкой воздуха. Окончательная очистка масла производится обработкой его при температуре 70-80°С отбеливающей землей (адсорбент). Отбеливающие земли или глины удаляют последние остатки смол и кислот и масло получает свой приятный соломенный цвет.*

**Основные физико-химические свойства масла.**

Из основных характеристик масла отметим, что оно горючее, биоразлагаемое, практически не токсичное, не нарушающее озоновый слой. **Плотность** масла обычно находится в диапазоне (0.84-0.89)⋅103 кг/м3. **Вязкость** является одним из важнейших свойств масла. С позиций высокой электрической прочности желательно иметь масло более высокой вязкости. Для того, чтобы хорошо выполнять свои дополнительные функции в трансформаторах (как охлаждающая среда) и выключателях (как среда, где движутся элементы привода), масло должно обладать невысокой вязкостью, в противном случае трансформаторы не будут надлежащим образом охлаждаться, а выключатели- разрывать электрическую дугу в установленное для них время.

Поэтому выбирают компромиссное значение вязкости для различных масел. Кинематическая вязкость для большинства масел при температуре 20 °С составляет 28-30⋅10-6 м2/с. http://sermir.narod.ru/lec/Warning.gif**Температурой застывания** называется температура, при которой масло загустевает настолько, что при наклонении пробирки с охлажденным маслом под углом 45° его уровень останется неизменным в течение 1 мин. В масляных выключателях температура застывания имеет решающее значение. Свежее масло не должно застывать при температуре -45°С; в южных районах страны разрешается применять масло с температурой застывания -35°С. Для эксплуатационных масел допускается ряд отступлений от нормированной температуры застывания в зависимости от того, находится ли масло в трансформаторе или выключателе, работает в закрытом помещении или же на открытом воздухе. Для специальных арктических сортов масла температура застывания уменьшается до -(60-65) °С, однако при этом понижается и температура вспышки до 90-100°С.

http://sermir.narod.ru/lec/Warning.gif**Температурой вспышки** называется температура нагреваемого в тигле масла, при котором его пары образуют с воздухом смесь, воспламеняющуюся при поднесении к ней пламени. Вспышка происходит настолько быстро, что масло не успевает прогреться и загореться. Температура вспышки трансформаторного масла не должна быть ниже 135°С. Если нагреть масло выше температуры вспышки, то наступает такой момент, когда при поднесении пламени к маслу оно загорается. http://sermir.narod.ru/lec/Warning.gifТемпература, при которой масло загорается и горит не менее 5 сек., **называется температурой воспламенения масла**.  http://sermir.narod.ru/lec/Warning.gifТемпература, при которой происходит возгорание в закрытом тигле, в присутствии воздуха, без поднесения пламени, называется **температурой самовоспламенения.** Для трансформаторного масла она составляет 350-400 °С.

Из других теплофизических характеристик отметим сравнительно небольшую **теплопроводность** λ от 0.09 до 0.14 Вт/(м⋅К), уменьшающуюся в зависимости от температуры. **Теплоемкость,** наоборот,увеличивается с ростом температуры от 1.5 кДж/(кГ⋅К) до 2.5 кДж/(кГ⋅К). **Коэффициент теплового расширения масла** определяет требования к размерам расширительного бака трансформатора и составляет примерно 6.5⋅10-4 1/К.

**Удельное сопротивление** масла нормируется при температуре 90°С и напряженности поля 0.5 МВ/м, и оно не должно превышать 5⋅1010 Ом⋅м для любых сортов масел. Отметим, что удельное сопротивление, как и вязкость, сильно падают с ростом температуры (более чем на порядок при уменьшении температуры на 50 °С). **Диэлектрическая проницаемость** масла невелика и колеблется в пределах 2.1-2.4. **Тангенс угла диэлектрических потерь** определяется наличием примесей в масле. В чистом масле он не должен превышать 2⋅10-2 при температуре 90°С и рабочей частоте 50 Гц. В окисленном загрязненном и увлажненном масле tgδ возрастает и может достигать более чем 0.2. **Электрическая прочность** масла определяется в стандартном разряднике с полусферическими электродами диаметром 25.4 мм и межэлектродным расстоянием 2.5 мм. Пробивное напряжение должно составлять не менее 70 кВ, при этом в разряднике электрическая прочность масла будет не менее 280 кВ/см.

**Поглощение и выделение газов маслом**. Масло способно поглощать и растворять весьма значительные количества воздуха и других газов. По имеющимся данным в 1 см3 масла при комнатной температуре растворяется: азота 0.086 см3; кислорода 0.16 см3; углекислоты 1.2 см3. При этом кислород, не только растворяется, но и химически соединяется с маслом, образуя продукты окисления. Выделение газов из масла очень часто является признаком зарождающегося дефекта в обмотке трансформатора. В настоящее время разработан и используется способ определения дефектов в трансформаторе по наличию растворенных в масле газов, т.н. *хроматографический анализ.*

Существует большой разрыв между сроком службы трансформатора и сроком службы масла. Трансформатор может работать без ремонта 10-15 лет, а масло уже через год требует очистки, а через 4-5 лет - регенерации. Мерами, позволяющими продлить срок эксплуатации масла, являются:

1) защита масла от соприкосновения с наружным воздухом путем установки расширителей с фильтрами, поглощающими кислород и воду, а также вытеснение из масла воздуха;

2) снижение перегрева масла в условиях эксплуатации;

3) регулярные очистки от воды и шлама;

4) применение для снижения кислотности непрерывной фильтрации масла;

5) повышение стабильности масла путем введения антиокислителей.

Антиокислительная присадка специально вводится в масло для предотвращения его окисления под действием локальных высоких температур и реакций с проводниковыми и диэлектрическими материалами. Обычно в качестве присадки используют ионол, реже применяются и другие добавки.

*О роли этой присадки можно судить по следующему реальному случаю, происшедшему в одной их энергосистем Урала. На станцию поступило импортное трансформаторное масло. Оно имело лучшую прозрачность по сравнению с отечественным маслом, меньший tgδ, более высокое пробивное напряжение в стандартном испытательном разряднике. Без дальнейшей проверки им заполнили трансформатор. Однако не прошло и года после начала эксплуатации трансформатора, как он вышел из строя. Произошла авария. После вскрытия обнаружили, что масло сильно потемнело, tgδ оказался значительно выше нормы, а электрическая прочность значительно ниже нормы. Проведенный анализ показал, что причиной выхода было ускоренное старение масла, т.к. оно не содержало никакой антиокислительной присадки и, в силу тщательной очистки, не содержало естественных примесей - ингибиторов окислительных процессов.*

**Очистка, сушка и регенерация масла.** Очисткой масла называется такая операция, с помощью которой загрязненное или окисленное масло приводится в пригодное для эксплуатации состояние. После хорошей очистки масло должно полностью восстановить свои начальные свойства, т.е. должно быть совершенно прозрачно, не должно содержать кислот, осадков, воды, угля и других загрязнений. Причины изъятия масла из эксплуатации могут быть двух родов. Если масло во время эксплуатации оказалось лишь загрязненным различными постоянными веществами и не претерпело глубоких изменений, то для его восстановления достаточно прибегнуть к одному из описываемых ниже методов механической очистки.

**К механическим методам очистки** относятся:

1) отстой;  
2) центрифугирование;  
3) фильтрование;  
4) промывка.

           Все эти методы имеют целью удалить из масла главным образом воду, механические загрязнения, нерастворимый шлак и уголь. Другой причиной изъятия масла из эксплуатации служит его старение под действием высокой температуры, кислорода воздуха, мощных частичных разрядов. Такое масло претерпевает столь глубокие изменения, что для восстановления его свойств необходимо применить один из следующих методов химической очистки (регенерации):

1) сернокислотный метод;  
2) щелочноземельный метод;  
3) обработку адсорбентами.

Очистка масла непосредственно в трансформаторах и выключателях может производиться периодически или после аварии при резком снижении пробивного напряжения, появления угля и прочих ненормальных явлениях или в результате данных хроматографического анализа. Как правило, трансформаторы и выключатели в этих случаях выводятся из работы и отключаются от сети.

Из родственных трансформаторному маслу по свойствам и применению жидких диэлектриков стоит отметить конденсаторные и кабельные масла.

**Конденсаторные масла**. Под этим термином объединена группа различных диэлектриков, применяемая для пропитки бумажно-масляной и бумажно-пленочной изоляции конденсаторов. Наиболее распространенное **конденсаторное масло** по ГОСТ 5775-68 производят из трансформаторного масла путем более глубокой очистки. Отличается от обычных масел большей прозрачностью, меньшим значением tgδ (более, чем в десять раз). **Касторовое масло** растительного происхождения, оно получается из семян клещевины. Основная область использования - пропитка бумажных конденсаторов для работы в импульсных условиях. Плотность касторового масла 0,95-0,97 т/м3, температура застывания от -10 °С до -18 °С. Его диэлектрическая проницаемость при 20°С составляет 4,0 - 4,5, а при 90°С - ε = 3,5 - 4,0; tg δ при 20°С равен 0,01 - 0,03, а при 100°С  tg δ = 0,2 - 0,8; Епр при 20°С равно 15 - 20 МВ/м. Касторовое масло не растворяется в бензине, но растворяется в этиловом спирте. В отличие от нефтяных масел касторовое не вызывает набухания обычной резины. Этот диэлектрик относится к слабополярным жидким диэлектрикам, его удельное сопротивление при нормальных условиях составляет 108 - 1010 Oм⋅м.

**Кабельные масла** предназначены для пропитки бумажной изоляции силовых кабелей. Основой их также является нефтяные масла. От трансформаторного масла отличаются повышенной вязкостью, увеличенной температурой вспышки и уменьшенными диэлектрическими потерями. Из марок масел отметим МН-4 (маловязкое, для заполнения кабелей низкого давления), С-220 (высоковязкое для заполнения кабелей высокого давления), КМ-25 (наиболее вязкое).

Второй тип жидких диэлектриков ***-*** ***трудногорючие и негорючие*** ***жидкости***. Жидких диэлектриков с такими свойствами достаточно много. Наибольшее распространение в энергетике и электротехнике получили *хлордифенилы.* В зарубежной литературе они называются *хлорбифенилами*. Это вещества, имеющие в своем составе двойное бензольное кольцо, т.н. ди(би)фенильное кольцо и присоединенные к нему один или несколько атомов хлора. В России применяются диэлектрики этой группы в виде смесей, в основном смеси пентахлордифенила с трихлордифенилом. Коммерческие названия некоторых из них - «совол», «совтол», «калория-2».

Хлордифенилы являются хорошими диэлектриками. У них повышена диэлектрическая проницаемость ε = 5-6 по сравнению с трансформаторным маслом из-за полярности связи электроотрицательного хлора с дифенильным кольцом. Тангенс угла диэлектрических потерь tgδ ненамного выше, чем у масла, электрическая прочность также высока. Применение этих диэлектриков было обусловлено как этими свойствами, так и, главным образом, их негорючестью. Поэтому в пожароопасных условиях (шахты, химические производства и т.п.) использовали трансформаторы и другие электрические аппараты, заполненные хлордифенильными диэлектриками.

Однако у всего класса этих веществ имеются два очень существенных недостатка - высокая токсичность и сильное влияние на озоновый слой. Хотя токсичность является очевидным недостатком, но наибольшее негативное влияние на применение хлордифенилов оказал второй его недостаток.

*Дело в том, что, как вы знаете, над поверхностью Земли, на высоте более 100 км существует мощный слой озона О3, который играет чрезвычайно важную роль в защите жизни на Земле от жесткого космического излучения. В последнее время этот слой стал истончаться, появились т.н. «озоновые дыры». Это явление связывают с хозяйственной деятельностью человека, причем основными «врагами» озона считают вещества, содержащие хлор и бром, которые взаимодействуют с озоном и, тем самым, разрушают его. Поэтому мировая общественность забила тревогу, требуя запретить применение таких веществ. Было проведено несколько конференций, обсуждавших эту проблему, и в 1976 году был принят т.н. «Монреальский Протокол». Согласно ему, все вещества, которые могут попасть в ионосферу, были проверены на взаимодействие с озоном и разделены на группы, по степени взаимодействия. Наиболее опасные вещества, в.т.ч. фреоны (хладоагенты в бытовых холодильниках) и хлордифенилы были ограничены в производстве, начиная с 1980 г., а к 2000 году их не должно быть и в эксплуатации. Наша страна подписала протокол, поэтому сейчас их не производят у нас в стране, в силу чего в ряде мест возникли проблемы с трансформаторами, ранее заполненными хлордифенилами. Поскольку они негорючи и использовались в силу этого для ответственных пожароопасных условий, найти им замену нелегко. Наиболее типичная ситуация - в трансформаторе понизился (за счет утечек) уровень жидкого диэлектрика. Просто добавить другое масло невозможно, т.к. хлордифенилы не смешиваются с маслами и неясно поведение такой композиции в условиях эксплуатации.*

Возникшая после запрета хлордифенилов проблема поиска подходящего пожаробезопасного жидкого диэлектрика до сих пор не решена. В каждой стране ее пытаются решать по своему. В Великобритании пытаются внедрять диэлектрики на основе эфиров *пентаэритрита* (фирменное название Мидель 7221, Мидель 7131), в Германии - диэлектрики на основе эфиров *фталевой* кислоты (Bayelectrol, *диоктилфталат*). В России и некоторых других странах наиболее перспективными для применения считаются силиконы (силоксаны) или *кремнийорганические жидкости*. Это громадный класс жидкостей с различными электро- и теплофизическими характеристиками. Хорошо очищенные жидкости обладают ε=2.5-3.5, tgδ<10-3 , ρ>1012 Ом⋅м. Обычно у этих соединений повышенная, по сравнению с маслом, температура вспышки. Некоторые жидкости, на основе модифицированных полиметилэтилсилоксанов имеют температуру вспышки около 300°С. К недостаткам силоксанов относится то, что исследованные кремнийорганические жидкости не могут обеспечить пожаробезопасность и, следовательно, не могут полностью заменить хлордифенилы. Кроме того, они в несколько раз дороже трансформаторного масла.

Очень интересен класс *фторорганических жидкостей.* В зарубежной литературе они называются перфторуглероды. По сути, это эквивалент обычным органическим жидкостям, только вместо атома водорода везде находится атом фтора. Например есть аналоги органическим соединениям, таким как пентан С5H12 - перфторпентан С5F12, гексан С6H14- перфторгексан С6F14, триэтил(пропил,бутил)амин - перфтортриэтил(пропил,бутил)амин и т.п. Существует даже перфтортрансформаторное масло. (В отличие от настоящего трансформаторного масла перфтортрансформаторное масло при нормальных условиях является твердым веществом и используется в качестве морозостойкой смазки). Наличие фтора на месте водорода означает, что вещество полностью окислилось, ведь фтор является самым сильным окислителем, более сильным, чем кислород. Поэтому фторуглеродные жидкости инертны по отношению к любым воздействиям, в.т.ч. стабильны под действием электрического поля и температуры. Поскольку они ни с чем не взаимодействуют, они не растворяют масла, резину, воду и т.п. Высокие характеристики фторуглеродных жидкостей важны для применений. Замена атома H на атом F приводит к новым свойствам и новым возможностям:

- негорючесть;

- высокая термическая и химическая стабильность;

- инертность по отношению к металлам, твердым диэлектрикам и резинам;

- нетоксичность, отсутствие цвета и запаха;

- возможность подбора жидкостей с различными точками кипения и

замерзания;

- низкая растворимость воды и высокая растворимость газов;

- отсутствие растворимости любых нефторированных материалов;

- высокий коэффициент температурного расширения.

Проведенные нами исследования поведения некоторых жидкостей при постоянном и переменном напряжении показывают, что по электрофизическим параметрам: удельное сопротивление, tg δ, электрическая прочность, они значительно превосходят аналогичные показатели любых других жидкостей, включая минеральные масла. Они нетоксичны, неокисляемы, имеют низкую вязкость, в.т.ч. в низкотемпературной области. Ряд жидкостей имеют точку замерзания -70 °С и ниже. Основное препятствие к более широкому использованию - сравнительно высокая цена. Это препятствие может быть устранено. В настоящее время имеется задел по разработке новой, более дешевой технологии получения перфторуглеродов.

Приведем численные значения некоторых электрофизических параметров. Диэлектрическая проницаемость ε = 1.8-2, tgδ < 10-4, ρ > (1012-1015) Ом⋅м, электрическая прочность - до 500 кВ/см. Важной особенностью является достаточно высокая электрическая прочность в газообразном (парообразном) состоянии - до 200-300 кВ/cм, т.к. фторуглеродные молекулы имеют высокое сродство к электрону, т.е. они являются электроотрицательными веществами. Из других свойств отметим не только негорючесть, но и термостабильность до температуры более 400 °С. Хотя теплопроводность фторуглеродов в два-три раза ниже, чем у трансформаторного масла, однако исключительно высокий коэффициент температурного расширения приводит к возникновению мощных конвективных потоков. При этом конвективный теплоотвод оказывается в 3-4 раза выше, чем у трансформаторного масла. Главный недостаток - дороговизна - они дороже трансформаторного масла в несколько десятков раз.

К настоящему времени в энергетике эти жидкости не нашли широкого применения. За рубежом применяются для охлаждения мощных выпрямителей и инверторов, преобразующих переменный ток в постоянный ток, для СВЧ устройств. Предполагаемое создание компактных пожаробезопасных *испарительных трансформаторов* для электротранспорта и компактных ЗРУ возможно только на основе перфторуглеродных жидкостей.

## Лекция 11. ТВЕРДЫЕ ДИЭЛЕКТРИКИ

## *11.1. Общие характеристики твердых  диэлектриков.*

Твердые диэлектрики - это чрезвычайно широкий класс веществ, содержащий вещества с радикально различающимися электрическими, теплофизическими, механическими свойствами. Например, диэлектрическая проницаемость меняется от значения, незначительно превышающего 1, до более чем 50000, в зависимости от типа диэлектриков: неполярный, полярный, сегнетоэлектрик. В главе 1 приводились определения различных типов диэлектриков. Вкратце коснемся этих определений применительно к твердым диэлектрикам.

***Неполярный диэлектрик*** - вещество, содержащее молекулы с преимущественно ковалентной связью.

***Полярный диэлектрик*** - вещество, содержащее дипольные молекулы или группы, или имеющее ионы в составе структуры.

***Сегнетоэлектрик*** - вещество, имеющее в составе области со спонтанной поляризацией.

Механизмы поляризации у них резко различаются:

- чисто электронная поляризация у неполярных диэлектриков типа полиэтилена, полистирола, при этом ε-мала, не более 3, диэлектрические потери тоже малы;

- ионная поляризация у ионных кристаллов типа NaCl или дипольная у полярных диэлектриков типа льда, при этом ε может находиться в пределах от 3-4 до 100, диэлектрические потери могут быть весьма значительны, в особенности на частотах вращения диполей и других резонансных частотах;

- доменная поляризация у сегнетоэлектриков - при этом ε максимальна и может достигать 10000-50000, диэлектрические потери могут быть весьма значительны, в особенности на резонансных частотах и в области повышенных частот.

Особенности механизмов проводимости в твердых диэлектриках - концентрация носителей очень мала, подвижность ионов в гомогенных материалах очень мала, подвижность электронов в чистых материалах велика, в технически чистых - мала. Механизмы электропроводности различны в разных веществах. Ионная проводимость реализуется у полидисперсных диэлектриков (картон, бумага, гетинакс, дерево) и ионных кристаллов. В первом случае ионы передвигаются по границам раздела, образованным слипшимися дисперсными частицами. Появление носителей заряда сильно связано с влажностью этих материалов и определяется, как рассматривалось в лекциях 2 и 9 диссоциацией примесей и полярных групп основного вещества на поверхности раздела. В случае ионных кристаллов, в проводимости участвуют ионы основного вещества, примесей, дефекты структуры. Электронная проводимость реализуется у титанатов бария, стронция и т.д., электронная, дырочная и ионная проводимость у полимеров.

Добавим некоторые термины, специфичные для твердых диэлектриков:

http://sermir.narod.ru/lec/Warning.gif***химическая стойкость-* способность выдерживать контакты с разными средами (кислота - кислотостойкость, щелочь - щелочестойкость, озон - озоностойкость, масло - маслостойкость, вода - водостойкость);**

http://sermir.narod.ru/lec/Warning.gif***трекингостойкост*ь- способность противостоять действию дуги;**

http://sermir.narod.ru/lec/Warning.gif***дендритостойкость* - способность противостоять образованию дендритов.**

## *11.2. Виды диэлектриков. Применение твердых диэлектриков в энергетике.*

## [в начало лекции](http://sermir.narod.ru/lec/lect11.htm#%C2%A0%D0%AD)

Все диэлектрические материалы можно разделить на группы, используя разные принципы. Например, разделить на неорганические и органические материалы.

Неорганические диэлектрики: стекла, слюда, керамика, неорганические пленки (окислы, нитриды, фториды), металлофосфаты, электроизоляционный бетон. Особенности неорганических диэлектриков - негорючи, как правило, свето-, озоно, - термостойки, имеют сложную технологию изготовления. Старение на переменном напряжении практически отсутствует, склонны к старению на постоянном напряжении.

Органические диэлектрики: полимеры, воски, лаки, резины, бумаги, лакоткани. Особенности органических диэлектриков - горючи (в основном), малостойки к атмосферным и эксплуатационным воздействиям, имеют (в основном) простую технологию изготовления, как правило, более дешевы по сравнению с неорганическими диэлектриками. Старение на постоянном напряжении практически отсутствует, на переменном напряжении стареют за счет частичных разрядов, дендритов и водных триингов.

Применение в энергетике:

- линейная и подстанционная изоляция - это фарфор, стекло и кремнийорганическая резина в подвесных изоляторах ВЛ, фарфор в опорных и проходных изоляторах, стеклопластики в качестве несущих элементов, полиэтилен, бумага в высоковольтных вводах, бумага, полимеры в силовых кабелях;

- изоляция электрических приборов - бумага, гетинакс, стеклотекстолит, полимеры, слюдяные материалы;

- машин, аппаратов - бумага, картон, лаки, компаунды, полимеры;

- конденсаторы разных видов- полимерные пленки, бумага, оксиды, нитриды.

С практической точки зрения в каждом случае выбора материала электрической изоляции следует анализировать условия работы и выбирать материал изоляции в соответствии с комплексом требований. Для ориентировки целесообразно разделить основные диэлектрические материалы на группы по условиям применения.

**1. Нагревостойкая электрическая изоляция.** Это в первую очередь изделия из слюдяных материалов, некоторые из которых способны работать до температуры 700 °С. Стекла и материалы на их основе (стеклоткани, стеклослюдиниты). Органосиликатные и металлофосфатные покрытия. Керамические материалы, в частности нитрид бора. Композиции из кремнийорганики с термостойким связующим. Из полимеров высокой нагревостойкостью обладают полиимид, фторопласт.

**2. Влагостойкая электрическая изоляция.** Эти материалы должны быть гидрофобны (несмачивание водой) и негигроскопичны. Ярким представителем этого класса является фторопласт. В принципе возможна гидрофобизация путем создания защитных покрытий на других негидрофобных диэлектриках.

**3. Радиационно стойкая изоляция.** Это, в первую очередь, неорганические пленки, керамика, стеклотекстолит, слюдинитовые материалы, некоторые виды полимеров (полиимиды, полиэтилен).

**4. Тропикостойкая изоляция.** Материал должен быть гидрофобным, чтобы работать в условиях высокой влажности и температуры. Кроме того, он должен быть стойким против плесневых грибков. Лучшие материалы: фторопласт, некоторые другие полимеры, худшие - бумага, картон.

*Новосибирская фирма выполняет заказ по поставке в одну из тропических стран прибора для обнаружения взрывчатых веществ. В высоковольтном блоке прибора используется изолятор из фторопласта. При изготовлении работник произвольно заменил дорогой фторопласт более дешевым поливинилхлоридом, обладающим соответствующими электрофизическими характеристиками, но не обладающим необходимой гидрофобностью. В результате при испытаниях произошли ложные срабатывания и фирма потерпела убытки.*

**5. Морозостойкая изоляция.** Это требование характерно, в основном для резин, т.к. при понижении температуры все резины теряют эластичность. Наиболее морозостойка кремнийорганическая резина с фенильными группами (до -90°С).

**6. Изоляция для работы в вакууме (космос, вакуумные приборы).** Для этих условий необходимо использовать вакуумно-плотные материалы. Пригодны некоторые, специально приготовленные керамические материалы, малопригодны полимеры.

## *11.3. Свойства наиболее применяемых диэлектриков.*

## [в начало лекции](http://sermir.narod.ru/lec/lect11.htm#%C2%A0%D0%AD)

***11.3******.1. Полимерные материалы.***

Полимеры, как правило, являются хорошими диэлектриками. Они обладают низкими диэлектрическими потерями, высоким удельным сопротивлением, высокой электрической прочностью, высокой технологичностью и, как правило, невысокой ценой. Кроме того, на основе полимеров с дисперсными добавками различной электропроводности, теплопроводности, магнитной проницаемости, диэлектрической проницаемости, твердости и т.п. можно получать разнообразные композиционные материалы с широким спектром свойств. По технологическим признакам полимерные материалы делятся на 2 класса - термопласты и реактопласты.

**Термопласты -** размягчаются при нагревании, что позволяет использовать простую технологию термопрессования. При этом гранулы исходного полимера помещают в камеру термопласт - автомата, нагревают до температуры размягчения, прессуют и охлаждают. Так делают мелкие диэлектрические детали. Для крупногабаритных изделий, типа кабелей, полутвердый расплав выдавливают через фильеру вместе с внутренним электродом кабеля.

Наиболее распространенным диэлектриком этого класса является **полиэтилен** H-(CH2)nH. Полиэтилен производят путем полимеризации газа этилена при повышенных давлениях и температурах. В основном используются две технологии. Исторически первой была технология получения полиэтилена при высоком давлении до 250 МПа и температуре до 300 °С с помощью инициирующих агентов-окислителей. При этом получается т.н. полиэтилен высокого давления ПЭВД, для которого используется и другое название - полиэтилен низкой плотности (ПЭНП). В настоящее время более распространена технология получения полиэтилена с помощью катализаторов при невысоком давлении до 1 МПа, невысокой температуре до 80 °С. При этом получается т.н. полиэтилен низкого давления ПЭНД, для которого используется и другое название - полиэтилен высокого плотности (ПЭВП). Главное отличие полученных продуктов с физико-химической точки зрения - повышенная водостойкость ПЭНД по сравнению с ПЭВД. Другие характеристики практически одинаковы: удельное сопротивление 1014-1015 Ом⋅м, удельное поверхностное сопротивление 1015 Ом, диэлектрическая проницаемость 2.2-2.4, тангенс угла диэлектрических потерь 10-4, электрическая прочность 45-55 кВ/мм, теплопроводность 0.3-0.4 Вт/(м⋅К), теплоемкость 2 кДж/(кг⋅К), плотность 920-960 кг/м3. Класс нагревостойкости Y. Полиэтилен широко используют в качестве силовой электрической изоляции в кабелях, в особенности т.н. "сшитый" полиэтилен. (В зарубежной литературе - cross-linked polyethylene). Его получают либо облучением высокоэнергетичными частицами (электронами, фотонами, тяжелыми частицами), либо вулканизацией. При этом образуется пространственная сетка, подобно тому, как это реализуется в резине. Модифицированный материал может эксплуатироваться при температуре до 200 °С, кроме того, он становится более стойким по отношению к агрессивным средам и растворителям, механически более прочным, его удельное сопротивление повышается примерно на два порядка.

Из других термопластичных полимеров, используемых в энергетике в виде электроизоляционных пленок отметим полипропилен, поливинилхлорид, лавсан.

Рядом уникальных свойств обладает **фторопласт** (политетрафторэтилен). Он химически инертен, не растворяется в растворителях, вплоть до температуры 260 °С, абсолютно не смачивается водой, не гигроскопичен. Недостатки - не стоек под действием радиации, обладает хладотекучестью.

**Реактопласты** - при нагревании не размягчаются, после достижения некоторой температуры начинаются разрушаться. Изделия из них обычно делают различными способами. Одна из распространенных дешевых технологий заключается в следующем. Сначала готовят пресс-порошки полимера. Затем пресс порошок засыпают в пресс-форму и прессуют при определенном давлении и температуре. При этом возникает сцепление между деформированными частицами, и после охлаждения материал готов к использованию. Возможно проведение полимеризации из исходных компонентов в заранее подготовленных формах. Так делают изделия из эпоксидных полимеров, кремнийорганической резины.

Достаточно дешевы и технологичны реактопласты на основе фенолформальдегидных полимеров (бакелит) и аминоформальдегидных полимеров. Их электрофизические характеристики невысоки.

**Эпоксидные полимеры** обладают хорошей механической прочностью, удовлетворительными электрофизическими характеристиками. Они являются полярными диэлектриками, некоторые марки эпоксидных материалов имеют диэлектрическую проницаемость до 16. Высокая полярность приводит к слабой водостойкости. Главное преимущество эпоксидных компаундов - простота технологии приготовления. Компаунды холодного отвержения получают смешиванием эпоксидной смолы, отвердителя и пластификатора. В период времени до начала твердения (от минут до часов) жидкую композицию можно заливать в требуемую форму. Часто компаунд используют для ремонта диэлектрических деталей в качестве клея.

Из других полимеров-реактопластов отметим диэлектрический материал с высокой механической прочностью - **капролон,** с большим диапазоном рабочих температур (-100°С до +250°С) - **полиимиды** и композиты на их основе.

***11.3.2. Бумага и картон.***

Важным преимуществом этих материалов является то, что они производятся из возобновляемого сырья, а именно из древесной массы. Технология приготовления состоит из варки щепы и опилок в щелочном растворе с добавками. Целлюлозные волокна разделяются, полученная пульпа загущается удалением некоторого количества воды, из нее удаляются металлические примеси. Затем следует прокатка между вальцами, при повышенных давлении и температуре. Чем выше плотность бумаги, тем выше как механическая, так и электрическая прочность бумаги. Самые тонкие и прочные бумаги используются для изготовления конденсаторов. Достаточно отметить, что плотность конденсаторных бумаг достигает 1.6 т/м3, т.е. более, чем в 1.5 раза превышает плотность воды. При этом электрическая прочность бумаги толщиной 10 мкм, пропитанной трансформаторным маслом, составляет до 10 МВ/см.

Электротехнический картон используется в качестве диэлектрических дистанцирующих прокладок, шайб, распорок, в качестве изоляции магнитопроводов, пазовой изоляции вращающихся машин и т.п. Картон, как правило, используется после пропитки трансформаторным маслом. Электрическая прочность пропитанного картона достигает 40-50 кВ/мм. Поскольку она выше прочности трансформаторного масла, для увеличения электрической прочности трансформаторов зачастую устраивают в среде масла специальные барьеры из картона. Маслобарьерная изоляция обычно имеет прочность Е=300-400 кВ/см. Недостатком картона является гигроскопичность, в результате попадания влаги уменьшается механическая прочность и, резко уменьшается электрическая прочность (в 4 и более раз)

***11.3.3. Материалы для изоляторов.***

В последнее время бурно развивается производство изоляторов для ВЛ на основе **кремнийорганической резины**. Этот материал относится к каучукам, основное свойство которых - эластичность. Это позволяет изготовлять из каучуков не только изоляторы, но и гибкие кабели. В энергетике используются разные типы каучуков: натуральные каучуки, бутадиеновые, бутадиен-стирольные, этиленпропиленовые и кремнийорганические.

Основу кремнийорганических резин составляют полиорганосилоксаны:

|  |
| --- |
| R R |
| |            |  НО-Si-O-{-Si-O-}nH |
| |            |          R R |

Где R - одинаковые, либо разные органические радикалы. В зависимости от типа этих радикалов меняются свойства кремнийорганической резины. Иногда в основной цепи чередуются не только кремний и кислород, но и бор (боросилоксановые каучуки), углерод (силкарбоновые каучуки), азот (силоксазановые каучуки). Получают кремнийорганическую резину из исходного каучука с помощью вулканизации, т.е. сшивки в пространственные комплексы исходных молекул. При этом химическая связь возникает либо по концевым H и OH группам, либо по радикалам. Реакция протекает за счет радиационного облучения, либо за счет химических агентов при повышенной температуре. Как правило, с завода-изготовителя поступает готовая к вулканизации масса.

Свойства чистых кремнийорганических резин неудовлетворительны, в первую очередь ввиду низкой прочности и недостаточной свето-озоностойкости. В настоящее время изоляторы делают из композиционных материалов на основе кремнийорганических каучуков. В качестве усиливающих активных наполнителей используют нанопорошки двуокиси кремния (аэросил, белая сажа) и двуокиси титана. Из электрофизических и теплофизических свойств композиционного материала отметим:

диэлектрическая проницаемость ε = 2.9-3.6;

удельное объемное сопротивление 1012-1013 Ом⋅м;

удельное поверхностное сопротивление 1012-1014  Ом;

тангенс угла диэлектрических потерь 5⋅10-4-2⋅10-3;

электрическая прочность 18-24 кВ/мм,

теплоемкость 1.2-1.5 кДж/(кГ⋅К);

плотность 1100-1600 кГ/м3;

прочность на разрыв 4-6 МПа.

Резюмируя свойства кремнийорганических резин, отметим, что они имеют удовлетворительные электрофизические свойства, высокую теплоемкость, сравнительно невысокую механическую прочность. Из других свойств выделим, то, что они стойки к действию озона, света и масла, морозостойки (- 50÷-90)°С и нагревостойки (180÷250)°С, влагонепроницаемы, но газопроницаемы, масло-бензонестойки.

**Электротехнический фарфор** является искусственным минералом, образованным из глинистых минералов, полевого шпата и кварца в результате термообработки по керамической технологии. К числу наиболее ценных его свойств относится высокая стойкость к атмосферным воздействиям, положительным и отрицательным температурам, к воздействию химических реагентов, высокие механическая и электрическая прочность, дешевизна исходных компонентов. Это определило широкое применение фарфора для производства изоляторов. Основные характеристики:

диэлектрическая проницаемость 7;

удельное объемное сопротивление 1011 Ом⋅м;

удельное поверхностное сопротивление 109-1012  Ом;

тангенс угла диэлектрических потерь 2⋅10-2;

электрическая прочность 25-30 кВ/мм,

теплопроводность 1.0-1.2 Вт/(м⋅К);

теплоемкость 1.2-1.5 кДж/(кг⋅К);

плотность 2300-2500 кг/м3;

прочность на разрыв 90 МПа.

Сравнивая данные по фарфору и кремнийорганическим резинам, можно выделить, что недостатками фарфора являются хрупкость, высокая плотность, низкая теплопроводность, высокие диэлектрические потери.

**Электротехническое стекло** в качестве материала для изоляторов имеет некоторые преимущества перед фарфором. В частности у него более стабильная сырьевая база, проще технология, допускающая большую автоматизацию, возможность визуального контроля неисправных изоляторов.

*Дело в том, что при пробое изолятора в гирлянде, его диэлектрическая "юбка" разрушается и падает на землю в случае выполнения юбки из стекла, тогда как при пробое фарфорового изолятора юбка остается целой. Поэтому неисправные стеклянные изоляторы видны невооруженным глазом, тогда как диагностика вышедших из строя фарфоровых изоляторов возможна только с помощью специальных приборов, например приборов ночного видения "Филин".*

По химическому составу стекло является набором окислов кремния, бора, алюминия, натрия, кальция и т.п. По термодинамическому состоянию оно представляет собой сильно загустевшую жидкость вследствие переохлаждения. Обычное, щелочное стекло непригодно для изготовления изоляторов ввиду растрескивания, помутнения и т.п. в условиях эксплуатации. Для этой цели разработано специальное малощелочное стекло. Его характеристики:

диэлектрическая проницаемость 7;

удельное объемное сопротивление 1012 Ом⋅м;

удельное поверхностное сопротивление 1014  Ом;

тангенс угла диэлектрических потерь 2.4⋅10-2;

электрическая прочность 48 кВ/мм,

теплопроводность 0.92 Вт/(м⋅К);

теплоемкость 1 кДж/(кг⋅К);

плотность 2500 кг/м3;

прочность на разрыв 90 МПа.

К недостаткам стекла, точнее способа его производства, относится большая энергоемкость получения материала, т.к. стекло длительно варят при высоких температурах.

***11.******3.4. Слюдяные материалы.***

**Слюда** является основой большой группы электроизоляционных изделий. Главное достоинство слюды - высокая термостойкость наряду с достаточно высокими электроизоляционными характеристиками. Слюда является природным минералом сложного состава. В электротехнике используют два вида слюд: мусковит КАl2(АlSi3О10)(ОН)2 и флогопит КMg3(АlSi3О10(ОН)2. Высокие электроизоляционные характеристики слюды обязаны ее необычному строению, а именно - слоистости. Слюдяные пластинки можно расщеплять на плоские пластинки вплоть до субмикронных размеров. Разрушающие напряжения при отрыве одного слоя от другого слоя составляют примерно 0.1 МПа, тогда как при растяжении вдоль слоя - 200-300 МПа. Из других свойств слюды отметим невысокий tgδ, менее чем 10-2; высокое удельное сопротивление, более 1012 Ом⋅м; достаточно высокую электрическую прочность, более 100 кВ/мм; термостойкость, температура плавления более 1200°С.

Слюда используется в качестве электрической изоляции, как в виде щипаных тонких пластинок, в.т.ч. склееных между собой (миканиты), так и в виде слюдяных бумаг, в.т.ч. пропитанных различными связующими (слюдиниты или слюдопласты). Слюдяная бумага производится по технологии, близкой к технологии обычной бумаги. Слюду размельчают, готовят пульпу, на бумагоделательных машинах раскатывают листы бумаги.

Миканиты обладают лучшими механическими характеристиками и влагостойкостью, но они более дороги и менее технологичны. Применение - пазовая и витковая изоляция электрических машин.

Слюдиниты - листовые материалы, изготовленные из слюдяной бумаги на основе мусковита. Иногда их комбинируют с подложкой из стеклоткани (стеклослюдинит), или полимерной пленки (пленкослюдинит). Бумаги, пропитанные лаком, или другим связующим, обладают лучшими механическими и электрофизическими характеристиками, чем непропитанные бумаги, но их термостойкость обычно ниже, т.к. она определяется свойствами пропитывающего связующего.

Слюдопласты - листовые материалы, изготовленные из слюдяной бумаги на основе флогопита и пропитанные связующими. Как и слюдиниты, они также комбинируются с другими материалами. По сравнению со слюдинитами они обладают несколько худшими электрофизическими характеристиками, но обладают меньшей стоимостью. Применение слюдинитов и слюдопластов - изоляция электрических машин, нагревостойкая изоляция электрических приборов В заключение раздела хотелось бы привести сравнительные данные по электрической прочности в нормальных условиях некоторых распространенных газообразных, жидких и твердых диэлектриков.

|  |  |
| --- | --- |
| Название диэлектрика | Электрическая прочность, кВ/см (50 Гц) |
| Воздух | 30 |
| Элегаз | 89 |
| водород | 15 |
| гелий | 6 |
| C14F24 | 300 |
| трансформаторное масло | 280 |
| конденсаторное масло | 300 |
| кабельное масло | 200 |
| касторовое масло | 350 |
| Полиметилметакрилат  Полиэтилен | 150-250  450-550 |
| слюда | 100-250 (70-160) |
| поливинилхлорид | 150-350 |
| фенопласт элекроизоляц. | 130-180 |
| Фарфор (стеатит) | 400 |
| Электрокартон | 400-500 (пропитанный) |
| Гетинакс | 40-50 |
| Cтекло (кварц) | 300-400 |
| Кремнийорганическая резина  Фторопласт | 300  200-350 |

## Лекция 12. Магнитные материалы

***12.1. Общие характеристики магнитных материалов.***

         Магнитные свойства имеются у любых материалов. Они обусловлены реакцией материала на магнитное поле. Как уже рассматривалось в третьей лекции, магнитную индукцию в любом материале можно связать с напряженностью магнитного поля в нем

B = μ0⋅μ⋅H (12.1)

http://sermir.narod.ru/lec/Warning.gif**Глобально, по отношению к магнитному полю, материалы можно разделить на три класса - диамагнетики, парамагнетики, ферромагнетики.** Последние можно еще поделить на собственно ферромагнетики, антиферромагнетики и ферримагнетики.

**Диамагнетики** имеют магнитную проницаемость чуть меньше 1. Отличаются тем, что выталкиваются из области магнитного поля.

**Парамагнетики** имеют магнитную проницаемость чуть более 1. Подавляющее количество материалов являются диа- и пара- магнетиками.

**Ферромагнетики** обладают исключительно большой магнитной проницаемостью, доходящей до миллиона.

Для ферромагнитных материалов выражение (12.1) справедливо с большими оговорками. Оно верно для слабых магнитных полей. По мере усиления поля проявляется явление гистерезиса, когда при увеличении напряженности и при последующем уменьшении напряженности значения В(Н) не совпадают друг с другом. При этом выражение (12.1) имеет смысл только для подъем напряженности в течение первого цикла намагничивания. В литературе различают несколько определений магнитной проницаемости.

**Начальная магнитная проницаемость** **μн** - значение магнитной проницаемости при малой напряженности поля.

**Максимальная магнитная проницаемость μmax** - максимальное значение магнитной проницаемости, которое достигается обычно в средних магнитных полях.

Из других основных терминов, характеризующих магнитные материалы, отметим следующие.

**Намагниченность насыщения**  - максимальная намагниченность, которая достигается в сильных полях, когда все магнитные моменты доменов ориентированы вдоль магнитного поля.

**Петля гистерезиса** - зависимость индукции от напряженности магнитного поля при изменении поля по циклу: подъем до определенного значения - уменьшение, переход через нуль, после достижения того же значения с обратным знаком - рост и т.п.

**Максимальная петля гистерезиса** - достигающая максимальной намагниченности насыщения.

**Остаточная индукция Bост**- индукция магнитного поля на обратном ходе петли гистерезиса при нулевой напряженности магнитного поля.

**Коэрцитивная сила Нс** - напряженность поля на обратном ходе петли гистерезиса при которой достигается нулевая индукция.

При каждом цикле перемагничивания часть магнитной энергии, запасаемой в материале (W = BH/2) теряется, т.е. переходит в тепло. Эти потери называются потерями на перемагничивание и они пропорциональны площади кривой гистерезиса. Для материалов, используемых в энергетике, в особенности для трансформаторов, потери энергии желательно уменьшить, т.е. уменьшить площадь кривой. Это может быть достигнуто, если коэрцитивная сила будет как можно меньше.

http://sermir.narod.ru/lec/Warning.gif**Материалы с малой коэрцитивной силой, меньше 40 А/м называются магнитомягкими материалами.**

Мощность потерь на перемагничивание в таких материалах можно оценить по выражению

PH = η⋅ Bnmax⋅f⋅V (12.2)

где η - коэффициент, зависящий от материала, Bmax- максимальная индукция за цикл, f- частота, V - объем тела, n, - показатель, меняющийся в диапазоне от 1.6 до 2..

Другая составляющая потерь связана с вихревыми токами, возникающими в переменных магнитных полях.

PH=ξ⋅ B2max⋅f2⋅V (12.3)

На высоких частотах важны, в первую очередь, потери на вихревые токи, т.к. они пропорциональны второй степени частоты.

Иногда в справочниках приводят значения тангенса магнитных потерь. Физический смысл его такой же, как и у тангенса угла диэлектрических потерь, а именно

P= L⋅I2⋅ w⋅ tg δm   (12.4)

или для удельных потерь

Pуд= μ0⋅μ⋅H2 w⋅ tg δm (12.5)

http://sermir.narod.ru/lec/Warning.gif**Материалы с большой коэрцититивной силой (более 1000 А/м) называются магнитотвердыми материалами**. Они используются в качестве постоянных магнитов.

***12******.2. Виды магнитных материалов. Применение магнитных материалов в энергетике. Свойства наиболее применяемых материалов.  Электротехнические стали. Ферриты. Магнитодиэлектрики.***

           Магнитомягкие материалы используются в энергетике в качестве разнообразных магнитопроводов в трансформаторах, электрических машинах, электромагнитах и т.д.

Для уменьшения потерь на гистерезис выбирают материалы с пониженной коэрцитивной силой, а для уменьшения вихревых токов магнитопроводы собирают из отдельных пластин и используют металлы с повышенным удельным сопротивлением. Дело в том, что ЭДС самоиндукции, благодаря которой возникают вихревые токи, пропорциональна площади поперечного сечения контура. При рассечении площади n изолированными пластинами в каждой пластине наводится уменьшенная в n раз ЭДС. Мощность потерь при протекании вихревого тока пропорциональна квадрату напряжения (ЭДС) и обратно пропорциональна удельному сопротивлению. Поэтому уменьшение ЭДС в каждой из отдельных пластин и использование металлов с повышенным удельным сопротивлением приводит к уменьшению общих потерь.

Основой наиболее широко используемых в электротехнике магнитных материалов является **низкоуглеродистая электротехническая сталь**. Она выпускается в виде листов, толщиной от 0.2 мм до 4 мм, содержит не выше 0.04% углерода и не выше 0.6% других примесей. Максимальное значение магнитной проницаемости μmax ~ 4000, коэрцитивной силы Нс~ 65-100 А/м. Наблюдается интересная закономерность: чем чище железо и чем лучше оно отожжено - тем выше магнитная проницаемость и тем ниже коэрцитивная сила. Для особо чистого железа эти параметры составляют: более 1 миллиона и менее 1 А/м, соответственно.

Добавлением в состав кремния достигается повышение удельного сопротивления стали с 0.14 мкОм·м для нелегированной стали до 0.6 мкОм·м для высоколегированной стали. Это дает уменьшение потерь.

Электротехническую сталь маркируют следующим образом: первая цифра-структура (1-горячекатанная изотропная, 2-холоднокатанная изотропная, 3- холоднокатанная анизотропная с ребровой структурой), вторая цифра- содержание кремния (0-до 0.4%, 1 - до 0.8%. 2 - до 1.8%, 3-до 2.8%, 4 - до 3.8%, 4 - до 4.8%), третья цифра - тип нормируемых магнитных характеристик (0- удельные потери при В=1.7 Тл, f=50 Гц, 1- удельные потери при В=1.5 Тл, f=50 Гц, 2- удельные потери при В=1 Тл, f=400 Гц, 6- В при Н=0.4 А/м, 7- В в средних полях при Н=10 А/м ). Четвертая цифра в старых справочниках означала номер материала. В современных справочниках четвертая и пятая цифры являются одним числом, означающим численную характеристику нормируемого параметра.

Если к железу добавить никель, то полученные материалы будут обладать повышенной магнитной проницаемостью (до 100000 у 79НМ, 79% никеля и небольшое количество марганца). Такие сплавы называются **пермаллои**, они используются для изготовления сердечников малогабаритнгых силовых и импульсных трансформаторов. Практически такие же результаты по магнитной проницаемости можно получить, добавляя к железу кремний (9.5%) и алюминий(5.6%). Такие сплавы называются **альсиферами**.

Добавки к железу и никелю молибдена, хрома, меди приводит к еще большему росту начальной магнитной проницаемости, более 100 тысяч. Такие материалы используются в миниатюрных магнитных устройствах.

Практически отсутствуют потери на вихревые токи в ферритах. Дело в том, что ферриты представляют собой оксидную керамику МеО+Fe2O3, которая является диэлектриком, либо полупроводником. Типичное удельное сопротивление феррита 103-104 Ом.м. Это на 9-10 порядков превышает сопротивление металлов. Ясно, что вихревые токи в таком материале не возникнут. Магнитная проницаемость у ферритов обычно ниже, чем у стали и не превышает нескольких сотен, хотя есть ферриты с проницаемостью до нескольких тысяч (20000НМ, 1000НМ). Применение в энергетике магнитомягких ферритов - высокочастотные трансформаторы, в ряде материалов потери малы вплоть до частот гигагерцового диапазона. Однако при этом и магнитная проницаемость уменьшается до десятков (9ВЧ, 50ВЧ3).

Большую роль играют ферриты с прямоугольной петлей гистерезиса (ППГ). Они используются в качестве логических элементов в ЗУ, в качестве термодатчиков. Основной параметр - коэффициент прямоугольности петли гистерезиса, представляющий собой отношение остаточной индукции к максимальной, измеренной при Н = 5 Нс. Желательно, чтобы этот коэффициент был ближе к 1.