

Министерство образования Российской Федерации

**САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ**

Кафедра электрической изоляции, кабелей и конденсаторов

ОСНОВНЫЕ СВОЙСТВА ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

**Материаловедение. Технология конструкционных материалов
Часть 2. Электротехнические материалы**

**Методические указания
к лабораторным работам**

**Санкт-Петербург
Издательство СПбГПУ
2003**

Министерство образования Российской Федерации

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

Кафедра электрической изоляции, кабелей и конденсаторов

ОСНОВНЫЕ СВОЙСТВА ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

Материаловедение. Технология конструкционных материалов
Часть 2. Электротехнические материалы

Методические указания
к лабораторным работам

Санкт-Петербург
Издательство СПбГПУ
2003

УДК: 621.315.6(075.4)

Основные свойства диэлектрических материалов. Материаловедение. Технология конструкционных материалов: В 2ч. Ч. 2: Электротехнические материалы: Метод. указания к лабораторным работам / Сост.: Н.М. Журавлева, А.Г. Мосейчук, Т.Н. Муравьева, Ю.А. Полонский. СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2003, 62 с.

Методические указания к лабораторным работам соответствуют государственному образовательному стандарту бакалаврской, инженерной и магистерской подготовки и предназначены для студентов вузов, обучающихся в рамках направлений 551300 и 654500 “Электротехника, электромеханика и электротехнологии” и 650900 “Электроэнергетика” и изучающих федеральную дисциплину ОПД.Ф.02 «Материаловедение. Технология конструкционных материалов. Часть 2. “Электротехнические материалы”».

Методические указания знакомят студентов с основными электрическими и механическими характеристиками диэлектрических материалов и методами их измерений, прививают навыки выполнения лабораторных работ.

Табл. 16. Ил. 24. Библиогр.: 5 назв.

Печатается по решению редакционно-издательского совета Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

ВВЕДЕНИЕ

Указания содержат описание четырех лабораторных работ. Цель их выполнения - изучение электрических и механических свойств диэлектрических электротехнических материалов: электропроводности, поляризации и диэлектрических потерь, электрического пробоя и механической прочности. Значения удельной проводимости, диэлектрической проницаемости, тангенса угла диэлектрических потерь, электрической и механической прочности являются основными характеристиками твердых электроизоляционных материалов. Задача лабораторных работ – ознакомить студентов с методами экспериментального определения этих величин и их основных зависимостей от различных внешних и внутренних факторов (температуры, частоты, строения и др.).

Каждая лабораторная работа включает следующие этапы.

1. Самостоятельная подготовка студентов к работе. Перед началом конкретной лабораторной работы студенты должны изучить соответствующие разделы данного пособия и четко представлять себе цель работы, знать схему измерительной установки, метод измерения, физическую сущность ожидаемых результатов. Должен быть подготовлен протокол измерений, содержащий таблицы для записи результатов измерений и расчета, а также основные расчетные формулы.

2. Проведение эксперимента. Эксперименты проводятся в соответствии с методическими указаниями, содержащимися в каждой работе. Включать измерительную установку можно только после собеседования с преподавателем и получения соответствующего разрешения. Любые изменения в электрической схеме производятся только при отключении ее от источника напряжения. Перед включением приборов следует убедиться в том, что они занулены. Результаты измерений проверяются преподавателем и подтверждаются его подписью на протоколе измерений.

3. Составление отчета о проделанной работе. Отчет должен содержать название и номер работы; цель работы; схему установки и (или) приборов; расчетные формулы, использованные в работе; контрольный расчет; необходимые таблицы и графики (выполняются на миллиметровой бумаге); анализ полученных результатов и соответствующие выводы. В отчете должны

быть указаны фамилии студентов, выполнявших работу, номер группы, дата выполнения. К отчету прилагается протокол измерений.

4. Защита лабораторной работы с представлением отчета. При защите работы студенты должны показать понимание физических явлений, наблюдаемых в исследованных материалах, объяснить результаты и сделать выводы.

ТЕХНИКА БЕЗОПАСНОСТИ

При выполнении работ в лаборатории электротехнических материалов студенты обязаны помнить о возможности поражения электрическим током и необходимости соблюдения правил техники безопасности.

1. Студентам запрещается:

1.1. Начинать работу без ознакомления с инструкцией для данной конкретной установки.

1.2. Прикасаться к открытым токоведущим частям установки, приборов и распределительных щитов.

1.3. Производить включение и выключение на главных щитах, находящихся в лаборатории.

1.4. Работать в лаборатории при отсутствии преподавателя или учебно-вспомогательного персонала.

1.5. Собирать или разбирать установки или производить переключение установок, находящихся под напряжением, оставлять их без наблюдения во включенном состоянии.

1.6. Включать собранную установку под напряжение без разрешения и проверки преподавателем и без предупреждения всех членов бригады.

1.7. Производить замену перегоревших предохранителей.

2. Каждый студент должен ознакомиться с инструкцией № 2 по электробезопасности для студентов, выполняющих учебные лабораторные работы в лаборатории кафедры “Электрическая изоляция, кабели и конденсаторы”.

Обязательство студента выполнять требования инструкции фиксируется записью в журнале инструктажа по технике безопасности, личной подписью студента и сотрудника, проводившего инструктаж.

3. Каждый студент должен знать правила оказания первой медицинской помощи, уметь практически оказать ее пострадавшему человеку при поражении электрическим током.

При поражении электрическим током необходимо освободить пострадавшего от воздействия напряжения. Для этого следует отключить установку или соответствующую ее часть или освободить пострадавшего от напряжения с помощью сухих электроизолирующих предметов (сухой одежды, каната, палки, доски или какого-либо другого сухого предмета, не проводящего электрический ток).

Меры первой помощи зависят от состояния, в котором находится пострадавший после освобождения его от электрического тока. Для определения этого состояния необходимо немедленно выполнить следующее:

- уложить пострадавшего на спину на твердую поверхность;
- проверить наличие дыхания (определяется по подъему грудной клетки или каким-либо другим способом);
- проверить наличие пульса на лучевой артерии у запястья или на сонной артерии на переднебоковой поверхности шеи;
- выяснить состояние зрачка (узкий или широкий); широкий зрачок указывает на резкое ухудшение кровоснабжения мозга;

Во всех случаях поражения электрическим током вызов врача обязателен независимо от состояния пострадавшего. Вызов врача скорой медицинской помощи осуществляется по телефону, расположенному в лаборатории электротехнических материалов.

Если пострадавший плохо дышит - очень резко и судорожно, или у него отсутствуют признаки жизни (дыхание и пульс), то ему надо делать искусственное дыхание и массаж сердца. Для этого пострадавшего необходимо положить на ровное место, освободить от стесняющей дыхание одежды и с помощью трубки или просто через платок (способом рот в рот) вдувать воздух в легкие. Искусственное дыхание нельзя прекращать до появления самостоятельного дыхания или до наступления смерти, что может быть установлено только врачом.

Р а б о т а 1

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ ДИЭЛЕКТРИКОВ

Ц е л ь р а б о т ы – ознакомление студентов с основными представлениями о прохождении электрического тока через диэлектрик, с методикой измерения удельных объемного ρ_v и поверхностного ρ_s сопротивлений (или соответствующих проводимостей $\gamma_v = 1/\rho_v$, $\gamma_s = 1/\rho_s$), анализ факторов, влияющих на величину электропроводности электроизоляционных материалов, ознакомление с основными типами электроизоляционных материалов.

Основные положения

Электрический ток – упорядоченное перемещение в веществе электрических зарядов под действием внешних и внутренних электрических полей. Наличие свободных носителей заряда – необходимое условие возникновения электропроводности.

В идеальном диэлектрике вообще не должно существовать свободных зарядов, заряды в нем должны быть только связанными. Однако опыт показывает, что все электроизоляционные материалы в той или иной степени способны проводить ток. Это означает, что реальный диэлектрик содержит некоторое, хотя и очень малое, количество свободных носителей заряда. Их образование происходит по разным причинам в слабых и сильных электрических полях; различаются и механизмы электропроводности в веществах, находящихся в твердом, жидком или газообразном состоянии.

В газах свободные носители заряда возникают под действием внешних ионизирующих факторов (космическое, радиоактивное излучение, высокая температура, столкновение с заряженными частицами большой энергии и др.) в результате распада нейтральных атомов и молекул на положительные ионы и свободные электроны.

В жидкости электропроводность обусловлена, прежде всего, ионами примесей и диссоциацией молекул самого диэлектрика (полярные жидкости). В случае коллоидной системы (частицы одного из компонентов очень малы и распылены в объеме другого) наблюдается молионная (электрофоретическая) проводимость, когда ток переносят заряженные молекулы или группы молекул.

В твердых диэлектриках носителями заряда являются ионы примесей, слабо связанные ионы и ионные вакансии самого материала (в полимерах и

стеклах), свободные электроны и дырки (в некоторых видах керамики, полимеров).

Электрическая проводимость (электропроводность) диэлектрика не является величиной постоянной и зависит помимо агрегатного состояния от целого ряда факторов: наличия электролитических (ионогенных) примесей, температуры, влажности, величины электрического поля и т.п. Крайне важно учитывать старение электрической изоляции – необратимое снижение диэлектрических характеристик материала в процессе его эксплуатации.

Электропроводность любого вещества обусловлена воздействием электрического поля напряженностью E на хаотическое тепловое движение заряженных частиц (носителей заряда q_i). Среднюю составляющую скорости частицы i -го типа в направлении поля называют скоростью дрейфа V_i . Величина $\mu = V_i / E$ – подвижность частицы. В результате плотность тока j через вещество может быть записана в виде суммы токов: $j = \sum_i q_i \cdot n_i \cdot V_i$, (1)

а удельная электропроводность:

$$\gamma = j/E = \sum_i q_i \cdot n_i \cdot \mu_i,$$

(2)

где n_i – концентрация носителей заряда; суммирование проводится по всем типам носителей ($i=1,2,3\dots$).

Удельная проводимость твердых и жидких диэлектриков экспоненциально возрастает с увеличением температуры вследствие повышения концентрации и подвижности носителей $\gamma = \gamma_0 e^{\Delta W / kT}$. В приведенной формуле ΔW – энергия активации электропроводности, T – абсолютная температура, $\gamma_0 \approx \gamma$ при $T \rightarrow \infty$, k – постоянная Больцмана. Поэтому зависимость $\lg \gamma(1/T)$ представляет собой прямую, ломаную или слегка искривленную (для жидкостей и полимеров) линию.

В отличие от металлов и полупроводников концентрация свободных носителей заряда n_i в диэлектриках весьма мала, поэтому для измерения электропроводности диэлектриков обычно используют чувствительные приборы – гальванометры или электрометры, способные измерять токи до 10^{-15} и даже до 10^{-17} А. Особое внимание при проведении измерений должно быть уделено устранению паразитных токов утечки, которые могут существенно повлиять на точность получаемых результатов. Поэтому основную измерительную часть цепи, в которой протекает слабый ток, тщательно

изолируют от окружающих проводников.

На рис.1 показаны пути протекания тока через плоский образец. Видно, что

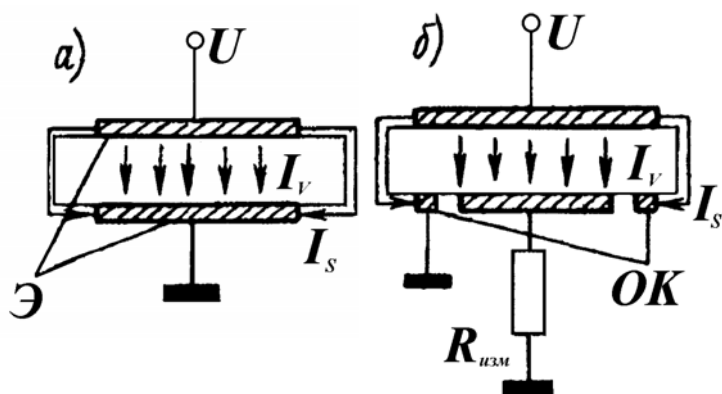


Рис. 1. Пути протекания тока в диэлектрике с плоскими электродами:
а- в случае двух электродов;
б- в случае трех электродов

часть тока проходит вне пространства между электродами (Э) – по поверхности и по искривленным направлениям за краями электродов (рис.1,а). Чтобы исключить этот ток, применяют охранное кольцо (ОК), окружающее центральный измерительный электрод. Потенциал охранного кольца должен быть равен потенциалу измерительного электрода, именно в этом случае ток утечки между ними будет отсутствовать (рис.1,б). Тогда удельное объемное сопротивление материала, с учетом размеров измерительных электродов (рис.2), может быть рассчитано по формуле: $\rho_V = R_V \cdot S / h = U \cdot S / I_V \cdot h$, (3) где I_V – измеряемый объемный ток; U – напряжение на электродах; S – площадь центрального измерительного электрода; h – толщина диэлектрика; R_V – объемное сопротивление образца.

Качество электроизоляционных конструкций в значительной степени зависит не только от объемного, но и от поверхностного сопротивления R_S .

Поверхностный ток I_S в основном определяется наличием загрязнений (пленка влаги, растворы солей, кислот), а также нарушениями структуры поверхности материала. Кроме того, поверхность диэлектрика в большей степени подвержена воздействию внешних факторов.

Для измерения поверхностного электрического сопротивления используют ту же самую систему с тремя металлическими электродами (рис. 2).

В такой системе удельное поверхностное сопротивление может быть рассчитано по формуле

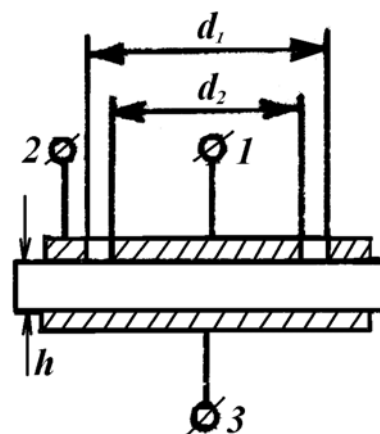
$$\rho_S = R_S \cdot \frac{\pi \cdot (d_1 + d_2)}{(d_1 - d_2)}, \quad (4)$$

где R_S – поверхностное электрическое сопротивление образца диэлектрика, заключенного между электродами; d_1 – внутренний диаметр кольцевого

электрода; d_2 – диаметр верхнего электрода.

Рис.2. Размещение трех измерительных электродов на образце:

- 1 – центральный измерительный электрод;
- 2 – охранный кольцо;
- 3 – нижний электрод

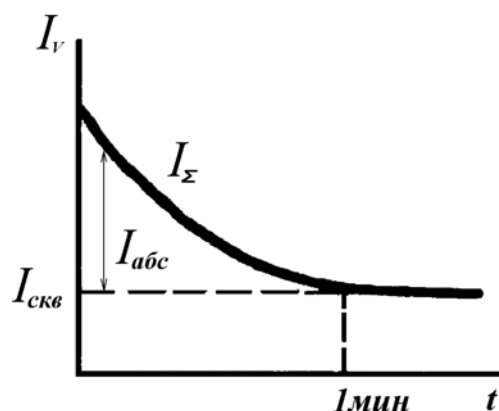


Очевидно, что удельное объемное сопротивление имеет в системе СИ размерность [Ом·м], а удельное поверхностное сопротивление – [Ом], следовательно, эти два параметра не могут быть численно сопоставлены друг с другом так же, как и удельные объемная и поверхностная проводимости.

При проведении измерений проводимости диэлектриков необходимо принимать во внимание тот факт, что при небольшом времени выдержки t образца под напряжением обычно регистрируется не только сквозной электрический ток, но и сопровождающий его ток абсорбции (или ток смещения), то есть ток, связанный с установлением замедленных видов поляризации. Поэтому в результате измерений можно получить завышенное значение проводимости (рис. 3).

Рис. 3. Зависимость измеряемого объемного тока через диэлектрик от времени:

- I_{Σ} - общий ток через диэлектрик;
- $I_{абс}$ – ток поляризации (абсорбции);
- $I_{скв}$ – сквозной ток проводимости



Электрическая проводимость диэлектрика определяется при постоянном напряжении по величине сквозного тока, истинное значение сопротивления образца вычисляется по формуле $R_{из} = U / I_{скв} = U / (I - I_{абс})$, (5) где $I_{скв}$ – сквозной ток утечки, I_{Σ} – регистрируемое значение тока, $I_{абс}$ – ток абсорбции.

Поскольку измерять абсорбционные токи даже замедленных видов поляризации достаточно сложно, сопротивление диэлектрика рассчитывается

как частное от деления напряжения на ток, измеренный через одну минуту после подачи напряжения, который близок по величине к сквозному току. Необходимо учесть, что более длительная выдержка образца под напряжением может приводить к его старению.

Влияние влаги. Электропроводность диэлектрических материалов в большой степени определяется содержанием влаги в объеме и на поверхности образца. Известно, что вода обладает значительной электропроводностью 10^{-3} - 10^{-4} Ом $^{-1}$ ·м $^{-1}$ и высокой относительной диэлектрической проницаемостью ($\epsilon'=81$ при 20°C и частоте менее 10^5 Гц). Кроме того, в воде легко диссоциируют молекулы многих других веществ (прежде всего электролитических примесей), что существенно увеличивает число свободных носителей заряда и, следовательно, повышает проводимость материалов. Иногда электроизоляционные материалы находятся в прямом контакте с водой, однако, чаще всего источником влаги является обычный атмосферный воздух, относительная влажность которого может меняться в широких пределах от 20 до 100%.

При соприкосновении твердого диэлектрика с окружающей средой, содержащей влагу, протекают два процесса: *адсорбция воды* на его поверхности и *абсорбция воды* внутрь материала. В целом это явление называется сорбцией.

Причина адсорбции – силы, действующие между полярными молекулами воды и молекулами поверхности диэлектрика. Эти силы могут быть притягивающими, такие поверхности называют *гидрофильными*, а могут быть и отталкивающими, тогда говорят, что поверхность *гидрофобна*. К первому типу в основном относятся полярные диэлектрики со смачиваемой поверхностью, ко второму типу – неполярные диэлектрики, чистая поверхность которых не смачивается водой. Достаточно тончайшего слоя влаги, чтобы обнаружить заметную поверхностную проводимость, которая определяется толщиной этого слоя. Адсорбция влаги на поверхности диэлектрика находится в непосредственной зависимости от относительной влажности атмосферы, поэтому относительная влажность является основным фактором, влияющим на удельную поверхностную проводимость конкретного материала. Пленка влаги – мономолекулярный слой воды – появляется при 20°C, начиная с 30% относительной влажности воздуха.

Причиной абсорбции (проникновения влаги внутрь диэлектрика) является диффузия. Поскольку эффективный *диаметр молекулы воды* составляет 2,58 Å,

то она способна диффундировать практически во все материалы. Межмолекулярная пористость различных веществ колеблется в пределах 10–50 Å, а внутримолекулярная пористость может достигать 10 Å.

Проникновение воды в электроизоляционный материал подчиняется закону Генри, согласно которому концентрация водяных паров на внутренней поверхности диэлектрика пропорциональна давлению паров на внешней стороне поверхности. Коэффициент пропорциональности называется растворимостью. Если концентрация водяного пара с обеих сторон неодинакова, происходит диффузия пара из мест с большей концентрацией в места с меньшей концентрацией.

Существует целый ряд показателей, позволяющих оценить количество поглощенной материалом влаги: влагопроницаемость, влагопоглощаемость и т.п. Однако решающим является не количество поглощенной воды, а вызванное увлажнением ухудшение электрических характеристик изоляции, которое для разных материалов при одинаковом содержании влаги различно.

Влияние влаги на диэлектрик зависит и от того, каким образом вода входит в его структуру. Существует две формы связи воды с твердыми веществами: *сорбционная и химическая*. В первом случае вода, проникающая в толщу материала в процессе сорбции, не входит в его структуру, не вызывает необратимых явлений и ее присутствие или удаление не приводит к образованию новой структуры вещества. Химическая или кристаллогидратная форма связи воды с диэлектриком приводит к получению новых веществ, различным по физическим свойствам, вызывает структурное изменение и перестройку кристаллической решетки. Промежуточное положение между сорбционной и химической формами связи занимают вещества, в которых вода связывается с материалом, образуя водородные связи. К таким диэлектрикам относятся бумага, эфиры целлюлозы и другие.

Кроме вида связи воды с материалом, большое значение имеет форма ее распределения. Форма распределения влаги в диэлектрике определяет его электрические параметры, поскольку систему с водяными включениями можно рассматривать как неоднородный диэлектрик с полупроводящими элементами. Поглощенная материалом вода может располагаться или в виде сферических образований или в виде нитей и пленок, причем наиболее благоприятной формой, вызывающей наименьшее снижение характеристик, является сфера, характерная для неполярных диэлектриков.

Лучшей влагостойкостью обладают неорганические материалы: вакуумплотная керамика, глазурованный фарфор, бесщелочное стекло, и т.п. Пористые же неорганические материалы, например асбест, мрамор, пористая керамика, а также композиционные материалы типа слюдопластов и т.п., поглощают много воды и резко снижают в связи с этим в процессе эксплуатации свои электроизоляционные характеристики.

Из органических материалов меньше всего поглощают влагу и ухудшают электроизоляционные свойства неполярные материалы, например парафин, полиэтилен, полистирол, политетрафторэтилен (тефлон или фторопласт-4). Полярные органические диэлектрики, например поливинилхлорид, термореактивные пластмассы, поглощают больше воды, чем неполярные. Особенно легко увлажняются материалы на основе целлюлозы, такие как бумага, картон, лакобумага, гетинакс, ткани, текстолиты. Эти виды изоляции можно использовать только в сухом состоянии, причем они должны защищаться от влаги лакированием, пропиткой. Однако все виды защиты лишь замедляют процесс увлажнения. Единственно надежным средством является герметизация, что не всегда возможно и целесообразно.

Как уже говорилось, электропроводность твердых изоляционных материалов обусловлена как передвижением ионов самого диэлектрика, так и ионов случайных или технологических примесей, а у некоторых материалов может быть вызвана перемещением свободных электронов. То есть в диэлектриках электропроводность обусловлена перемещением ионов, вырывааемых из кристаллической решетки под влиянием флуктуаций теплового движения. При низких температурах передвигаются слабо закрепленные ионы, в частности, ионы примесей. При высоких температурах движутся ионы основной кристаллической решетки и свободные собственные электроны. Проанализируем общую зависимость электропроводности. Число диссоциированных ионов (свободных носителей заряда) экспоненциально зависит от температуры:

$$n = n_0 \exp(-W_{\text{дис}}/kT), \quad (6)$$

где n_0 – общее число ионов в 1м^3 (концентрация ионов); $W_{\text{дис}}$ – энергия диссоциации; k – постоянная Больцмана; T – абсолютная температура.

Подвижность ионов также экспоненциально зависит от температуры, но с другой энергией активации:

$$\mu = \mu_0 \exp(-W_{\text{пер}}/kT), \quad (7)$$

где μ_0 – предельная подвижность иона; W_{nep} – энергия перемещения иона, определяющая переход его из одного неравновесного состояния в другое, то есть

$$\gamma = q \cdot n \cdot \mu_0 \exp(-(W_{dis} + W_{nep}) / kT). \quad (8)$$

Отсюда видно, что чем больше значение энергии диссоциации и энергии перемещения, тем резче изменяется проводимость при изменении температуры. Поскольку обычно $W_{dis} \gg W_{nep}$, температурная зависимость проводимости определяется главным образом изменением концентрации свободных носителей. В случае существования в диэлектрике нескольких типов ионов выражение для удельной электропроводности имеет более сложный вид:

$$\gamma = \sum_{i=1}^m A_i \exp \frac{-W_i}{kT}, \quad (9)$$

где $A_i = q_i n_{oi} \mu_{oi}$, W_i – энергия активации электропроводности, $i = 1, 2, 3 \dots$

Поэтому кривые логарифмической зависимости удельной электропроводности от температуры могут иметь изломы. При низких температурах электропроводность обусловлена в основном ионизированными примесями, при высоких температурах она становится собственной. В некоторых случаях эти изломы могут быть связаны с различной энергией диссоциации ионов основного вещества. При анализе температурной зависимости электропроводности диэлектриков необходимо учитывать и наличие влаги в них. Известно, что с повышением температуры от 20°C до 100°C происходит постепенная сушка увлажненного диэлектрика. При этом в некоторых случаях при повышении температуры наблюдается рост объемного и (или) поверхностного сопротивления, вместо ожидаемого спада.

Описание измерительной установки

При определении объемного и поверхностного сопротивления диэлектрика используют образцы, представляющие собой круглые или квадратные пластины и полосы шириной 40 мм и более и толщиной 0,1-4 мм.

Для устранения прослойки воздуха электроды должны быть напылены или притерты к поверхности диэлектрика при помощи кремнийорганического вазелина (либо трансформаторного масла). В этом случае электроды вырезают из оловянной или отожженной алюминиевой фольги толщиной 0,01÷0,03 мм. Испытуемый образец помещают в специальную контактную ячейку, которая позволяет осуществить включение образца в измерительную схему. Ячейка представляет собой систему из трех латунных электродов, укрепленных на

диэлектрическом кронштейне и снабженных прижимными пружинами (рис.4). Электроды присоединены гибкими проводами к измерительной установке. Ячейка помещается в термостат с целью исключения внешних воздействий и для осуществления нагрева испытуемого образца. На корпусе термостата установлен тумблер Т, позволяющий переключать электроды для определения объемного сопротивления образца – положение " R_V " и поверхностного сопротивления – положение " R_S ", соответственно. В первом случае напряжение подается между верхним и нижним электродами, а охранное кольцо имеет такой же потенциал, что и верхний электрод; во втором случае напряжение

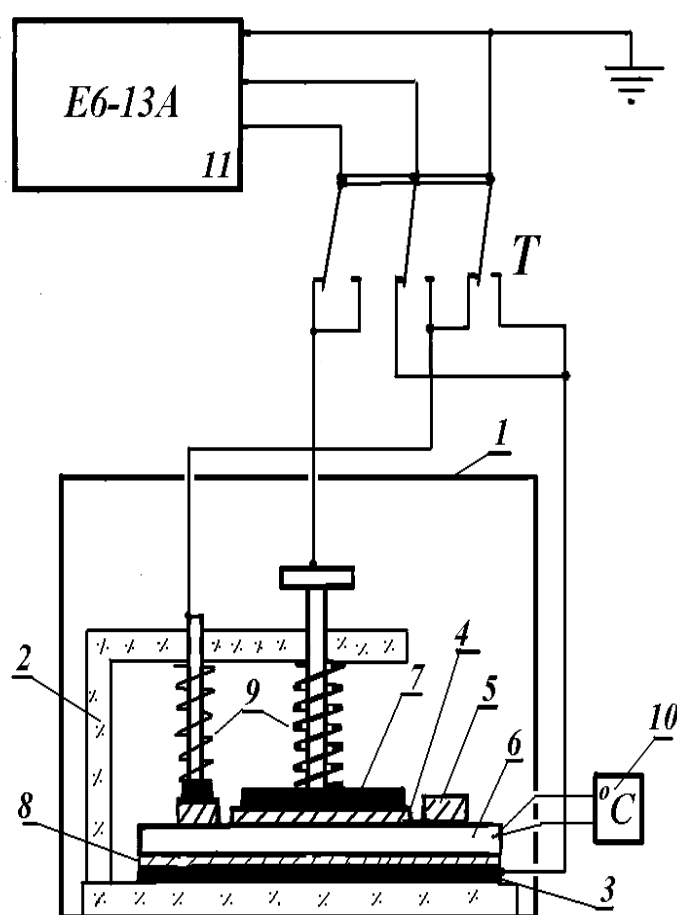


Рис. 4. Схема измерительной установки

- 1 – термостат;
- 2 – кронштейн;
- 3 – нижний латунный электрод;
- 4 – верхний, центральный фольговый электрод;
- 5 – фольговое охранное кольцо;
- 6 – испытуемый диэлектрик;
- 7 – верхний латунный электрод;
- 8 – нижний фольговый электрод;
- 9 – прижимные пружины;
- 10 – термопара и термоизмерительный прибор;
- 11 – тераомметр Е6-13

прикладывается между верхним электродом и охранным кольцом. В связи с этим **крайне важно следить за правильной установкой испытуемого образца в электродную ячейку**: верхний электрод ячейки с прижимающей пружиной должен находиться на центральном (измерительном) верхнем электроде, а малый (боковой) электрод – на охранным кольце (рис. 4). Каждый раз при смене образца необходимо

убедиться в *отсутствии перекрытия* каким-либо из верхних электродов зазора между охранным кольцом и центральным притертым электродом.

Кроме того, необходимо исключительно аккуратно обращаться с испытуемыми диэлектриками, чтобы ***не повредить притертые (или напыленные) электроды*** и не испачкать поверхность диэлектрика руками.

Порядок выполнения работы

1. Получить от преподавателей информацию о диэлектриках, которые будут испытываться. Записать в табл. 1 названия этих материалов и их состав.
2. Отобрать из эксикатора с сухими образцами исследуемые диэлектрики.
3. Определить и записать в табл. 1 геометрические размеры: толщину материала h (в месте, где нет притертых фольговых электродов), диаметр верхнего центрального электрода d_2 , внутренний диаметр охранного кольца d_1 .
4. Ознакомиться с работой тераомметра Е6-13А. ***Особое внимание*** следует ***обратить на кнопку замыкания входа прибора*** (когда она отжимается?) и на шкалы (в каких случаях используют прямые, в каких обратные, верхние и нижние). Надо пояснить знак вопроса в скобках и обратить внимание на предупреждающую надпись на столе установки!

Исследование влияния влажности на электропроводность диэлектриков

А. Определение удельного объемного и удельного поверхностного сопротивлений сухих диэлектриков при комнатной температуре

1. Поместить образец в электродную ячейку.
2. Установить ячейку в измерительную камеру (термостат).
3. Поставить переключатель "Т" в положение, соответствующее измеряемому объемному сопротивлению R_V .
4. Выбрать нужный диапазон измерений и снять показания прибора. Записать значение R_V в табл. 1.
5. Переключить тумблер "Т" в положение, соответствующее измерению поверхностного сопротивления R_S . Выбрать диапазон измерений, определить величину R_S . Записать результат в табл. 1.
6. Нажав кнопку замыкания входа прибора Е6-13А, открыть крышку термостата и достать электродную ячейку. Заменить образец на следующий.
7. Повторить измерения в соответствии с пунктами 1÷6.

8. Все образцы вернуть в эксикатор с сухими материалами.

Т а б л и ц а 1

Наименование и состав материала	h, d_1, d_2 , мм	Сухие образцы				Увлажненные образцы			
		R_V , Ом	R_S , Ом	ρ_V , Ом·м	ρ_S , Ом	R_V , Ом	R_S , Ом	ρ_V , Ом·м	ρ_S , Ом

Б. Определение объемного и поверхностного сопротивления увлажненных диэлектриков при комнатной температуре

1. Из эксикатора с повышенной влажностью отобрать образцы диэлектриков, аналогичные измеренным ранее.
2. Определить значения объемного и поверхностного сопротивлений увлажненных диэлектриков. Полученные данные занести в табл. 1.
3. Все образцы вернуть в эксикатор с повышенной влажностью.

С. Исследование зависимости удельных объемного и поверхностного сопротивлений диэлектриков от температуры

1. Установить испытуемый образец в электродную ячейку, ячейку поместить в термостат.
2. Измерить значения R_V и R_S при комнатной температуре.
3. Включить термостат в сеть; включить "нагрев".
4. Определять значения R_V и R_S через каждые 10 градусов до 100°C в режиме непрерывного нагрева.
5. Данные измерений свести в табл. 2.

Т а б л и ц а 2

Наименование материала	Т, °С	Результаты измерений		Результаты расчетов	
		R_V , Ом	R_S , Ом	$\ln R_V$	$\ln R_S$

Содержание отчета

Отчет должен включать:

1. Цель работы.
2. Принципиальную схему установки.
3. Расчетные формулы, использованные при вычислении удельных характеристик ρ_v и ρ_s .
4. Примеры численных расчетов.
5. Таблицы с экспериментальными и расчетными данными.
6. Графики зависимостей $\ln R_v = f(T)$ и $\ln R_s = f(T)$.
7. Выводы по работе, содержащие анализ полученных экспериментальных данных по следующей схеме:
 - а) влияние влажности на ρ_v и ρ_s диэлектриков;
 - б) почему это влияние различно для материалов разной структуры (проанализировать степень снижения ρ_v и ρ_s);
 - в) объяснение температурных зависимостей ρ_v и ρ_s .

Контрольные вопросы

1. В каких пределах лежат значения сопротивления диэлектрических материалов?
2. Почему различают объемное и поверхностное сопротивления?
3. Каковы основные виды электропроводности?
4. Из каких составляющих складывается полный ток через диэлектрик?
5. Чем определяется проводимость всех электротехнических материалов?
6. От чего зависит электропроводность диэлектриков?
7. Будет ли отличаться значение сопротивления электроизоляционного материала, измеренное на постоянном и переменном напряжении?
8. Почему вода вызывает деградацию электрических характеристик изоляции?
9. Что такое гидрофильные и гидрофобные диэлектрики?
10. Какие существуют формы связи воды в материале?
11. Чем обусловлена электропроводность диэлектрика при низкой и высокой температурах?
12. Как могут быть объяснены несколько изломов зависимости $\ln R_v = f(T)$?

Работа 2

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛЯРИЗАЦИИ ДИЭЛЕКТРИКОВ И ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОТЕРЬ

Ц е л ь р а б о т ы – ознакомление с основными представлениями о механизмах поляризации и диэлектрических потерь, изучение резонансного метода определения диэлектрической проницаемости (ε') и тангенса угла диэлектрических потерь ($\operatorname{tg}\delta$) диэлектриков, анализ основных факторов, влияющих на величину ε' и $\operatorname{tg}\delta$.

Основные положения

Поляризацией называется процесс ограниченного смещения или ориентации связанных электрических зарядов в диэлектрике под действием электрического поля. Этот процесс происходит во всем объеме и сопровождается выделением зарядов на поверхности материала у электродов, помещенных на образец диэлектрика (рис. 5). При наложении поля разноименные заряды в атомах (молекулах) диэлектрика несколько смещаются

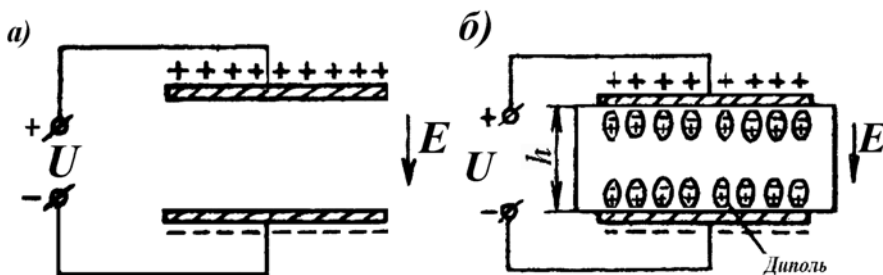


Рис. 5. Электрическое поле в конденсаторе
а- без диэлектрика;
б – с диэлектриком

друг от друга, образуя диполи с электрическим (дипольным) моментом

$p_i = q_i \cdot l_i$, где q_i – заряд i -го носителя, l_i – расстояние между зарядами.

Диэлектрик поляризуется под воздействием внешнего электрического поля в результате упругого смещения электронных оболочек (электронная поляризация), ионов кристаллической решетки (ионная поляризация) или ориентации дипольных моментов полярных групп и молекул по направлению поля (дипольная или дипольно-релаксационная поляризация), а также за счет перемещения (миграции) зарядов в полупроводящих включениях до их границ и накопления этих зарядов на границе раздела (миграционная поляризация). Поляризованный диэлектрик характеризуется дипольным моментом единицы объема – поляризованностью:

$$P = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\sum p_i}{\Delta V}, \quad (10)$$

где p_i – элементарные дипольные моменты атомов, молекул.

Поляризованность P зависит от напряженности поля E и способности вещества поляризоваться, характеризуемой величиной электрической восприимчивости вещества (χ):

$$P = \epsilon_0 \chi E, \quad (11)$$

где $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м – электрическая постоянная.

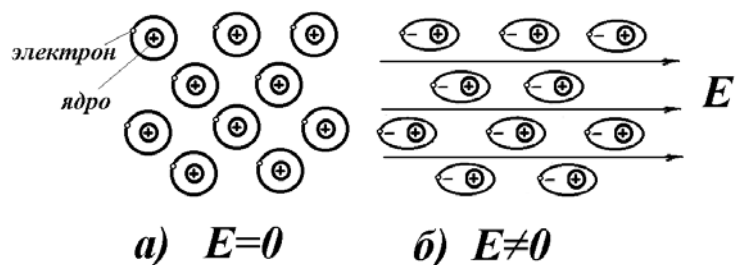
Поляризацию вещества численно характеризуют вектором электрического смещения $D = \epsilon_a E = \epsilon_0 \epsilon' E$, где ϵ_a и ϵ' – абсолютная и относительная диэлектрические проницаемости вещества соответственно.

$$\text{Между } \chi, P \text{ и } \epsilon' \text{ существует связь } \epsilon' = 1 + P/(\epsilon_0 E) = 1 + \chi. \quad (12)$$

Относительную **диэлектрическую проницаемость** ϵ можно определить как отношение емкости конденсатора с данным диэлектриком C к емкости того же конденсатора, но без диэлектрика, а с вакуумом C_0 : $\epsilon' = C / C_0$. (13)

Электронная поляризация представляет собой упругое смещение и деформацию электронных оболочек атомов, молекул и ионов (рис.6).

Рис. 6. Схема электронной поляризации между пластинами конденсатора
а—вакуум ($\epsilon' = \epsilon_0$);
б—диэлектрик ($\epsilon' > 1$)



Время установления

электронной поляризации τ составляет около $10^{-14} - 10^{-15}$ с. Таким образом, электронная поляризация устанавливается практически мгновенно. В диапазоне $0 \div 10^{14}$ Гц диэлектрическая проницаемость практически не зависит от частоты, и поляризация не связана с потерями энергии электрического поля. При частотах $10^{14} - 10^{15}$ Гц проявляются резонансные потери энергии. Величина ϵ' вещества с чисто электронной поляризацией равна квадрату показателя преломления света n ($\epsilon' = n^2$) и обычно не превышает значений 2–2,5.

Исключительно электронную поляризацию имеют неполярные вещества: газообразные (водород, кислород, азот), жидкие (нефтяные масла, октолы), твердые (парафин, церезин, полиэтилен, политетрафторэтилен и др.).

Электронная поляризация наблюдается также и во всех остальных диэлектриках, но у большинства из них на электронную поляризацию накладываются другие виды поляризации.

В ионных кристаллах и неорганических материалах (слюда, керамика) имеет место *ионная поляризация*, связанная с упругим смещением ионов (рис.7).

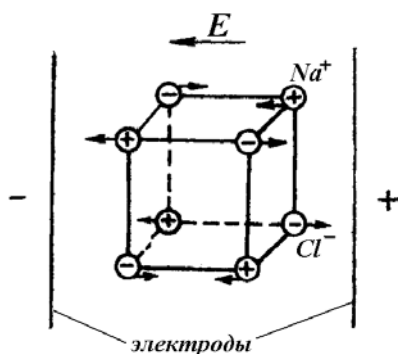


Рис. 7. Схема ионной поляризации NaCl

Время установления ионной поляризации составляет 10^{-12} – 10^{-13} с. Относительная диэлектрическая проницаемость вещества с ионной поляризацией ϵ' составляет 4–30 и более. Как и при электронной поляризации до частоты 10^{12} Гц, диэлектрическая проницаемость не зависит от

частоты и ионная поляризация не связана с потерями энергии. Только при частотах 10^{12} – 10^{13} Гц появляются резонансные потери (максимум поглощения в ИК-диапазоне).

В случае полярных диэлектриков, когда молекулы имеют несимметричное строение и обладают дипольным моментом, происходит *дипольная поляризация*. При этом виде поляризации дипольные молекулы (диполи), находящиеся в хаотическом тепловом движении, частично ориентируются под действием внешнего электрического поля (рис.8).

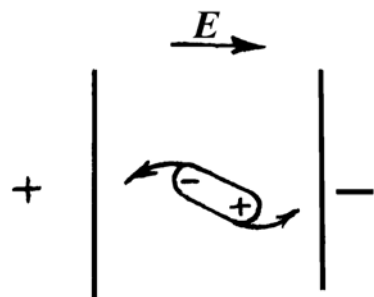


Рис. 8. Схема дипольной поляризации

Время установления дипольно-релаксационной поляризации составляет 10^{-8} – 10^{-6} с и более. Такой тип поляризации характерен прежде всего для полярных жидкостей. Этот вид поляризации может наблюдаться также у отдельных твердых веществ, состоящих из крупных полярных молекул (полярные полимеры). При этом поляризация обусловлена поворотом не самой молекулы, а имеющихся в ней полярных радикалов (ОН, NH₃ и др.) по отношению к неподвижной молекуле. Этот вид поляризации обычно называют дипольно-радикальной (или дипольно-ориентационной).

Примерами вещества с этим видом поляризации являются целлюлоза, полярность которой объясняется наличием гидроксильных групп — ОН и кислорода, поливинилхлорид, полярность которого связана с наличием хлора в молекулах полимера. К полярным диэлектрикам относятся: полярные газы (HCl , HBr , CO_2 и др.), жидкости (вода, совол, совтол, касторовое масло), твердые вещества (полярные полимеры — поливинилхлорид, полиэтилентерефталат (лавсан), целлюлоза и др.). Величина относительной диэлектрической проницаемости полярных диэлектриков обычно составляет 3–8, но иногда достигает и нескольких десятков (например, для воды $\epsilon' = 81$).

Миграционная поляризация наблюдается в некоторых диэлектриках и системах изоляции, в частности, в неоднородных диэлектриках, особенно с полупроводящими включениями. В случае диэлектрика с полупроводящими включениями этот вид поляризации заключается в перемещении (миграции) зарядов в этих включениях до их границ и накоплении зарядов на границах раздела. Процессы установления и снятия миграционной поляризации сравнительно медленны и могут продолжаться секунды, минуты и даже часы. Поэтому она обычно наблюдается лишь при весьма низких частотах.

Диэлектрическими потерями называют мощность, рассеиваемую в диэлектрике при действии на него переменного электромагнитного поля. Диэлектрические потери могут быть обусловлены как токами проводимости (потери проводимости), так и запаздыванием поляризации при изменении поля (релаксационные, миграционные и резонансные потери). Кроме того, в сильных электрических полях при наличии в диэлектрике воздушных включений наблюдаются дополнительные потери энергии (ионизационные потери).

Конденсатор с идеальным диэлектриком (без потерь) в переменном поле с круговой частотой ω имеет чисто реактивную (емкостную) проводимость $Y_{C0} = i\omega C_0$, так что на векторной диаграмме емкостный ток через конденсатор опережает напряжение U на угол $\pi/2$. В реальном конденсаторе в отличие от идеального реактивная проводимость $Y_C = i\omega C$ и ток сдвинуты по фазе на угол φ . Полный ток I можно разложить на активную $I_a = I \sin \delta$ и реактивную $I_c = I \cos \delta$ составляющие (рис.9).

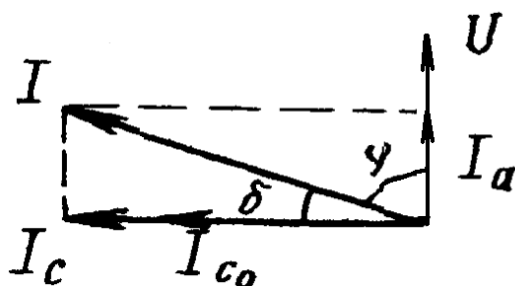


Рис. 9. Векторная диаграмма токов и напряжений в диэлектрике, находящемся в

Угол δ , дополняющий до 90° угол сдвига фаз φ между током и напряжением в емкостной цепи с реальным диэлектриком, называют **углом диэлектрических потерь**. Углом δ (а чаще $\operatorname{tg}\delta$) определяют рассеиваемую в диэлектрике мощность при переменном электромагнитном поле.

Таким образом, в случае воздействия переменного электрического поля диэлектрик характеризуется двумя основными величинами, одна из которых ϵ' определяет его способность к поляризации, вторая $\operatorname{tg}\delta$ - диэлектрические потери:

$$\epsilon' = C/C_0 = I_a/I_{C0}; \quad \operatorname{tg}\delta = I_a/I_C. \quad (14)$$

При этом для характеристики диэлектрических потерь часто используют величину ϵ'' , называемую **фактором потерь** и равную отношению активной составляющей тока I_a к реактивному току через конденсатор без диэлектрика (I_{C0}):

$$\epsilon'' = I_a/I_{C0}. \quad (15)$$

Из выражений (14) и (15) следует, что $\operatorname{tg}\delta = \epsilon''/\epsilon'$ и $\epsilon'' = \epsilon' \operatorname{tg}\delta$. С фактором потерь ϵ'' связаны удельные диэлектрические потери - полные диэлектрические потери $P = UI_a = U^2 \omega C \operatorname{tg}\delta$, отнесенные к единице объема диэлектрика:

$$p = 0,5 \epsilon_0 \epsilon'' \omega E_m^2 = \epsilon_0 \epsilon'' \omega E^2, \quad (16)$$

где $E = E_m/\sqrt{2}$ - эффективное и E_m - амплитудное значение напряженности электрического поля.

В соответствии с (15-16), величина диэлектрических потерь определяется протеканием сквозного тока в диэлектрике (потери на проводимость) и процессами поляризации (потери поляризации).

Замедленные виды поляризации: дипольно-релаксационные и миграционные процессы идут с большими затратами энергии внешнего электрического поля, при этом величины ϵ' и $\operatorname{tg}\delta$ материала существенно зависят от частоты поля и температуры.

Влияние частоты электрического поля и температуры определяется типом поляризации в веществе. Обобщенные зависимости ϵ' и ϵ'' от частоты для диэлектриков, имеющих миграционную, дипольно-релаксационную, ионную и электронную поляризации, схематически изображены на рис. 10.

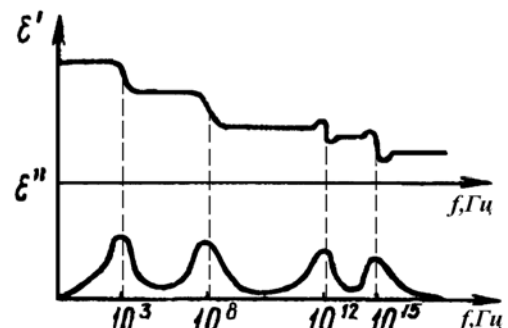
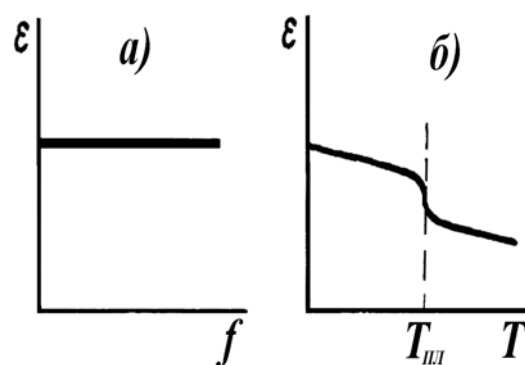


Рис.10. Обобщенная зависимость диэлектрической проницаемости вещества от частоты поляризующего поля

В случае *электронной поляризации* частота не влияет на величину диэлектрической проницаемости до 10^{15} Гц. Зависимость ϵ' от температуры определяется только изменением плотности вещества. При нагревании вещество расширяется, плотность падает, следовательно, уменьшается число атомов (ионов) и, соответственно, электронов в единице объема и ослабевает поляризация. Кривая зависимости ϵ' от температуры подобна кривой изменения плотности (рис. 11.). При переходе через

Рис.11. Влияние частоты (а) и температуры (б) на диэлектрическую проницаемость для электронной поляризации



точку плавления наблюдается скачек ϵ' .

В случае *ионной поляризации* частота поля не влияет вплоть до 10^{12} Гц. С повышением температуры расстояния между ионами увеличиваются вследствие теплового расширения материала. В большинстве случаев это сопровождается ослаблением химических сил упругой связи, поэтому поляризуемость ионов возрастает, т. е. они легче смещаются под действием электрического поля. В связи с этим величина ϵ' ионных диэлектриков обычно растет с температурой.

Для замедленных видов поляризации (*дипольной и миграционной*) влияние частоты и температуры на диэлектрические параметры оказывается более сложным. Под действием внешнего переменного электрического поля происходит ориентация полярных групп, а тепловое хаотическое движение молекул оказывает наоборот разориентирующее действие. После отключения электрического поля ориентация дипольных молекул постепенно ослабевает из-за теплового движения по экспоненциальному закону. Таким образом, происходит *релаксация* (от латинского *relaxatio*—ослабление), возврат к исходному состоянию вещества. Математически этот процесс релаксации выражается функцией

$$N_{\tau} = N_0 \exp(-\tau/\tau_0),$$

где N_0 и N_{τ} — число ориентированных диполей в начальный, т. е. в момент

отключения поля, и текущий моменты времени; τ — время, прошедшее с момента снятия поля; τ_0 — постоянная времени релаксации.

Если принять $\tau = \tau_0$, то получим $N_\tau = N_0/e$. Таким образом, время релаксации τ_0 — это время, за которое число ориентированных диполей уменьшается в e раз. Время релаксации сильно зависит от температуры — чем выше температура, тем меньше силы молекулярного сопротивления повороту диполей в вязкой среде, тем меньше время релаксации. Учет механизма релаксации, свойственного дипольной поляризации, часто отражается в широко распространенном названии этого вида поляризации — **дипольно-релаксационная** поляризация.

При низких частотах, менее $1/\tau_0$, процесс поляризации успевает следовать за изменением направления электрического поля и величина ϵ' не зависит от частоты до 10^6 Гц (рис. 12,а).

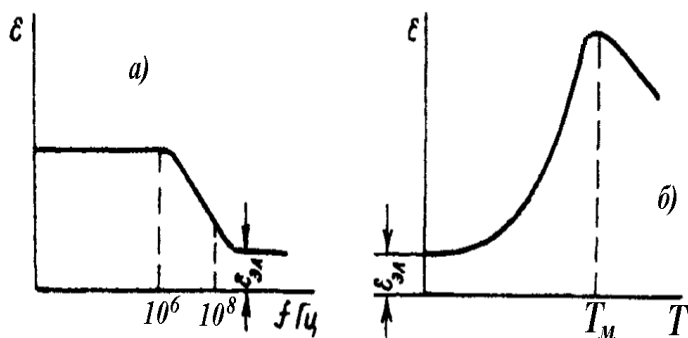


Рис.12. Зависимость диэлектрической проницаемости от частоты (а) и температуры (б) при дипольной поляризации

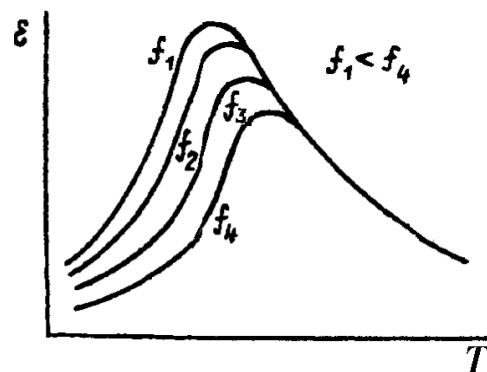
В случае высоких частот дипольные молекулы не успевают поворачиваться при быстрых изменениях направления поля, дипольная поляризация ослабевает и ϵ' снижается (рис.12,а) до значения $\epsilon'_{эл}$, обусловленного электронной поляризацией, имеющей место во всех веществах.

Зависимость ϵ' полярного диэлектрика от температуры имеет вид, показанный на рис. 12,б. В области низких температур вязкость вещества велика, диполи неподвижны и величина $\epsilon' = \epsilon'_{эл}$. При нагреве материал размягчается, так как вязкость, т. е. внутреннее трение, падает и диполи начинают поворачиваться, обуславливая рост ϵ' . В области высоких температур, выше температуры максимума (T_m), правильной ориентации диполей мешает усиливающееся тепловое движение и ϵ' начинает снижаться с ростом температуры.

Характерные семейства кривых получаются при измерении зависимости диэлектрической проницаемости сильнополярных диэлектриков от двух изменяющихся факторов — частоты и температуры (рис. 13).

Как отмечалось выше, замедленные виды поляризации протекают с затратой энергии внешнего электрического

Рис.13. Типичная температурно-частотная зависимость диэлектрической проницаемости при дипольной поляризации



поля, поскольку энергия расходуется на преодоление межмолекулярного трения. Поэтому частота и температура существенно влияют и на величину $\operatorname{tg} \delta$ полярных диэлектриков.

Дипольно-релаксационные потери при повышении **температуры** проходят через максимум. При низких температурах вязкость велика, диполи неподвижны, потерь нет; при высоких температурах вязкость низка и диполи вращаются, не испытывая трения. В общем случае на температурной зависимости может наблюдаться несколько максимумов. Например, на кривой $\operatorname{tg} \delta = f(T)$ для бумаги, пропитанной масляно-канифольным компаундом, наблюдаются два максимума—при низких температурах это максимум, свойственный самой бумаге, при более высоких—компаунда.

Если в диэлектрике имеют место два механизма потерь (на проводимость и дипольную поляризацию), то суммарная зависимость тангенса угла диэлектрических потерь от температуры может быть получена сложением кривых, описывающих потери проводимости и дипольные потери.

Рост температуры всегда приводит к росту $\operatorname{tg} \delta$ за счет увеличения потерь проводимости (рис. 14,а). Максимум на суммарной кривой потерь часто не фиксируется, так как он маскируется высокими потерями проводимости.

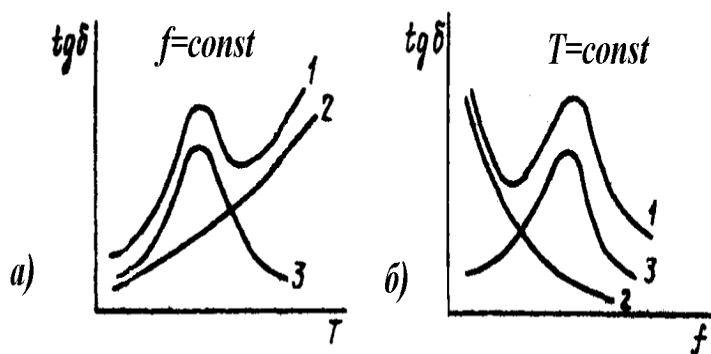


Рис. 14. Зависимость $\operatorname{tg} \delta$ диэлектрика от температуры (а) и частоты (б)

1—общие (суммарные) потери;
2—потери проводимости;

3 — дипольные потери

В случае диэлектрических потерь, обусловленных сквозной проводимостью, по мере увеличения **частоты** $\operatorname{tg} \delta$ уменьшается по гиперболическому закону

(рис. 14,б). Активная мощность потерь в этом случае не зависит от частоты. Если потери вызваны дипольной поляризацией, то $\operatorname{tg} \delta$ при росте частоты увеличивается, так как диполи чаще должны ориентироваться по полю и на это будет затрачиваться все большая энергия. Но это происходит лишь до определенной частоты, соответствующей максимуму $\operatorname{tg} \delta$, после которой диполи уже не успевают следовать за переменным напряжением и потери в диэлектрике уменьшаются. Полезно отметить, что максимум в частотной зависимости $\operatorname{tg} \delta$ характерен также и для резонансного механизма потерь, однако в последнем случае температура не влияет на положение максимума.

Конденсатор с диэлектрическими потерями можно представить в виде схемы замещения, содержащей емкость C и активные сопротивления R или r , эквивалентные теряемой мощности в реальном конденсаторе.

Известны две основные схемы замещения: последовательная (рис. 15,а) и параллельная (рис. 15,б).

При последовательной эквивалентной схеме

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{U_r}{U_c} = \frac{I \cdot r}{I / \omega C} = \omega r C, \quad (17)$$

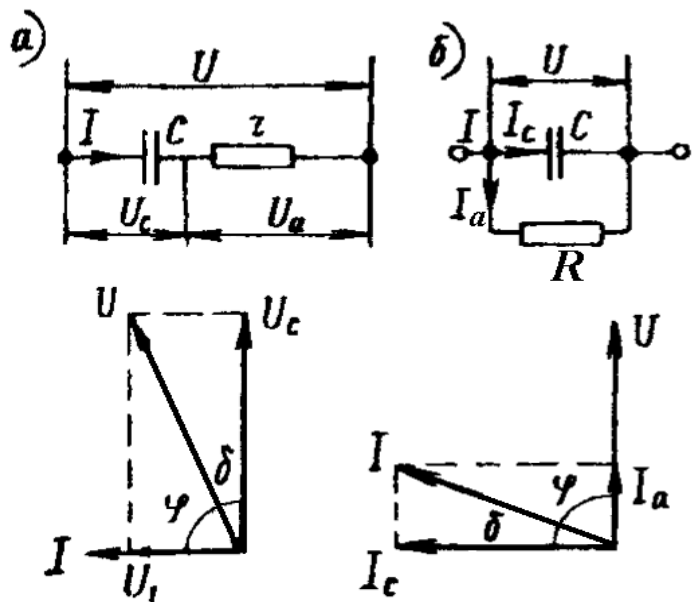
а при параллельной

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{I_r}{I_c} = \frac{U / r}{U \cdot \omega C} = \frac{1}{\omega r C}. \quad (18)$$

Рис.15. Схемы замещения, эквивалентные конденсатору с диэлектриком, обладающим потерями

Если температура диэлектрика постоянная и частота задана, то можно взять любую схему замещения – последовательную или параллельную.

Параллельная и последовательная эквивалентные схемы дают различную зависимость $\operatorname{tg} \delta$ от частоты ω . При последовательной схеме $\operatorname{tg} \delta$ увеличивается по мере роста



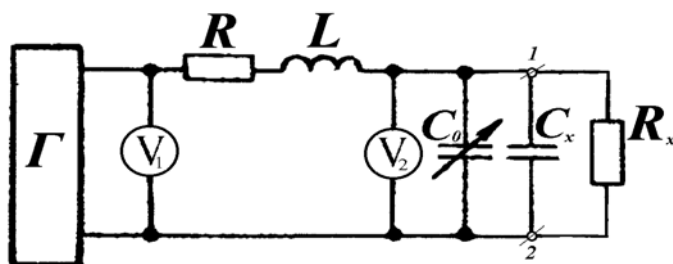
частоты прямо пропорционально ω . В случае параллельной схемы $\operatorname{tg} \delta$ уменьшается с увеличением частоты обратно пропорционально ω . Поэтому параллельную схему целесообразно использовать, если потери в реальном диэлектрике обусловлены сквозной проводимостью диэлектрика. Если же энергия рассеивается в подводящих проводах, следует применять последовательную схему замещения.

Для определения диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь электроизоляционных материалов применяют различные методы измерения. Основными из них являются: мостовые, резонансные и волновые. При невысоких частотах (10^{-2} – 10^5 Гц) обычно используют мостовые методы, на высоких (10^5 – 10^8 Гц) – резонансные, в диапазоне СВЧ (10^9 – 10^{10} Гц) – волноводные и резонансные методы.

Описание измерительной установки

В работе используется измеритель добротности типа Е9-4. Упрощенная блок-схема этого прибора приведена на рис. 16. В приборе при определении диэлектрической проницаемости (ϵ') и тангенса угла диэлектрических потерь

Рис.16. Упрощенная электрическая схема резонансного метода измерения



($\operatorname{tg} \delta$) диэлектриков использован резонансный метод, основанный на вариации проводимости за счет изменения емкости колебательного контура.

Генератор Γ обеспечивает питание последовательного колебательного контура синусоидальным напряжением с частотой от 50 кГц до 50 МГц. Вольтметр V_1 (шкала "Уровень" на панели прибора) служит для контроля и установки уровня подводимого напряжения. Сопротивление R представляет собой эквивалентное активное сопротивление колебательного контура. Сменная катушка индуктивности L позволяет выполнять измерения на различных частотах. Вольтметр V_2 (шкала Q на передней панели прибора) измеряет падение напряжения на емкости контура и проградуирован в единицах добротности (Q). Переменный воздушный конденсатор C_0 при установленной частоте приложенного напряжения и фиксированной индуктивности дает возможность настраивать колебательный контур в резонанс. Исследуемый образец материала подключается к клеммам 1 и 2. Для вычисления емкости C_x и $\operatorname{tg} \delta$ исследуемого образца диэлектрика необходимо

дважды настроить контур в резонанс: без образца, определив параметры контура C_1 и Q_1 , и с образцом, определив параметры контура C_2 и Q_2 .

Очевидно, что при параллельном подключении исследуемого образца C_x к емкости контура C_0 емкость его может быть выражена следующим образом: $C_1 = C_2 + C_x$ и $C_x = C_1 - C_2$. По величине емкости образца можно определить диэлектрическую проницаемость изоляционного материала:

- диэлектрическая проницаемость жидких диэлектриков определяется из выражения $\epsilon' = C_x / C_{x0}$;
- для твердых диэлектриков – из формулы емкости для плоского конденсатора $\epsilon' = C_x h / (\epsilon_0 S)$, где h – толщина диэлектрика; S – площадь электрода.

Тангенс угла диэлектрических потерь $\operatorname{tg} \delta_x$ исследуемого образца можно связать с добротностью контура без образца Q_1 и с образцом Q_2 :

$$Q_1 = 1 / \operatorname{tg} \delta_1; \quad Q_2 = 1 / \operatorname{tg} \delta_2. \quad (19)$$

При параллельном подключении образца к контуру $\operatorname{tg} \delta_x$ образца рассчитывается по формуле

$$\operatorname{tg} \delta_x = \frac{C_1 \cdot (Q_1 - Q_2)}{C_x \cdot Q_1 \cdot Q_2} = \frac{C_1 \cdot \Delta Q}{C_x \cdot Q_1 \cdot Q_2}. \quad (20)$$

Порядок выполнения работы

При подготовке к работе необходимо изучить резонансный метод и порядок выполнения работы. После собеседования с преподавателем ***подготовить прибор к работе:***

1. Переключатель режима работы поставить в положение “Установка нуля”.
2. Ручку “Уровень” поставить в крайнее левое положение.
3. Включить прибор, дать ему прогреться в течение 15 мин.
4. Переключатель шкалы “ Q ” поставить в положение “60”.
5. Ручками “Нуль” и “Нуль уровня” установить нули ламповых вольтметров.
6. Переключатель режима работы перевести в положение “Калибровка”.
7. Ручкой “Уровень” установить стрелку вольтметра “Уровень” против первой риски.

8. Потенциометром “60” (ручка его выведена под шлиц) установить стрелку шкалы Q на конечное деление шкалы “60”.
9. Повторить операции 4÷8 при других положениях переключателя шкалы “ Q ”.
6. Переключатель режима работы поставить в положение “Измерение”.

А. Определение диэлектрических параметров ε' , $\operatorname{tg}\delta_x$, ε'' твердых электроизоляционных материалов

Определить ε' , $\operatorname{tg}\delta_x$, ε'' твердых диэлектриков на постоянной частоте в следующем порядке:

1. Ручку уровень поставить в крайнее левое положение, переключатель шкалы “ Q ” в положение “200”.
2. К зажимам L подключить эталонную катушку, соответствующую частоте, указанной преподавателем.
3. Установить заданную преподавателем частоту f на шкале генератора Γ измерительного прибора.
4. Ручкой “Уровень” установить стрелку вольтметра “Уровень” против первой риски.
5. Медленно вращая ручку “Емкость”, добиться резонанса в контуре по максимальному отклонению стрелки вольтметра V_2 . Для повышения точности отсчета емкость на основной шкале устанавливается на ближайшее к резонансному целое деление, а более точно резонанс настраивается с помощью дополнительной подстрочной емкости. Показания подстрочной емкости суммируются с основной емкостью (с соответствующим знаком).
6. Записать значение емкости C_1 и добротности Q_1 , измеренные без образца, в табл. 3.
7. К зажимам C_x подключить испытательные электроды. Поставить между электродами один из образцов, выданных преподавателем.
8. Снова установить резонанс. Для восстановления резонанса емкость переменного конденсатора C_0 должна быть уменьшена на величину емкости исследуемого образца.
9. Записать значения емкости C_2 и добротности Q_2 в табл. 3.
10. Измерить толщину диэлектрика h и диаметр меньшего электрода D .
11. Результаты измерения D и h записать в табл. 3.
12. Эксперимент повторить с другими образцами.
13. Рассчитать C_x , ε' , $\operatorname{tg}\delta_x$, ε'' .

Т а б л и ц а 3

Наименование материала	Q_1	C_1 , Ф	Q_2	C_2 , Ф	ΔQ	C_x , Ф	D , м	h , м	ε'	$tg\delta_x$	ε''

Б. Определение диэлектрических параметров ε' , $tg\delta_x$, ε'' жидких диэлектриков

1. Подключить к зажимам C_x воздушный конденсатор.
2. Измерить добротность и емкость конденсатора.
3. Залить исследуемую жидкость в конденсатор.
4. Измерить добротность и емкость конденсатора с жидкостью.
5. Рассчитать C_x , ε' , $tg\delta_x$, ε'' исследуемой жидкости.
6. Результаты измерений и расчета записать в табл. 4.

Т а б л и ц а 4

Наименование образца	Q_1	C_1 , Ф	Q_2	C_2 , Ф	ΔQ	C_x , Ф	ε'	$tg\delta_x$	ε''
Воздушный конденсатор C_{x0}									
Конденсатор с маслом C_x									

В. Определение зависимости диэлектрических параметров ε' , $tg\delta_x$, ε'' твердых диэлектриков от частоты

Для исследования зависимости ε' , $tg\delta_x$, ε'' диэлектриков от частоты необходимо повторить измерения C и Q твердых диэлектриков при частотах, указанных преподавателем, и результаты измерений и расчетов внести в табл. 5.

Т а б л и ц а 5

Наименование материала	f , Гц	Q_1	C_1 , Ф	Q_2	C_2 , Ф	ΔQ	C_x , Ф	D , м	h , м	ε'	$tg\delta_x$	ε''

Построить графики зависимостей ε' , $tg\delta_x$, ε'' от частоты для исследованных образцов.

Г. Определение зависимости диэлектрических параметров ε' , $\operatorname{tg}\delta_x$, ε'' твердых диэлектриков от температуры

1. Подготовить прибор к работе согласно указаниям п. А.
2. Измерить толщину диэлектрика h и диаметр внешнего электрода D .
3. Результаты измерения D и h записать в табл. 6.
4. Ручку “Уровень” поставить в крайнее левое положение, переключатель шкалы “ Q ” в положение “200”.
5. К зажимам L подключить эталонную катушку, соответствующую частоте, указанной преподавателем.
6. Установить заданную преподавателем частоту f .
7. Ручкой “Уровень” установить стрелку вольтметра “Уровень” против первой риски.
8. К зажимам C_x подключить измерительную ячейку. Тумблер “Ячейка” установить в положение “0”.
9. Ручкой “Емкость” установить в контуре резонанс по максимальному отклонению стрелки вольтметра V_2 . Для повышения точности отсчета емкость на основной шкале устанавливается на ближайшее целое деление, а более точно резонанс подгоняется с помощью подстрочной емкости. Показания подстрочной емкости суммируются с основной емкостью (с соответствующим знаком).
10. Записать значение емкости C_1 и добротности Q_1 в табл. 6.
11. Тумблер “Ячейка” установить в положение “1”.
12. Снова установить резонанс.
13. Записать значения емкости C_2 и добротности Q_2 в табл. 6.
14. Включить тумблер “Сеть”.
15. Тумблер “ $T, ^\circ\text{C}$ ” перевести в положение “100”. Через каждые $10\text{ }^\circ\text{C}$ повторять измерения пп. 12÷13. Нагрев производить до температуры, указанной преподавателем.
16. По достижении предельно допустимой температуры тумблер “ $T, ^\circ\text{C}$ ” перевести в положение “0”.
17. Повторить измерение температурной зависимости на другой частоте.
18. Рассчитать C_x , ε' , $\operatorname{tg}\delta_x$, ε'' .
19. Результаты расчета записать в табл. 6.

Т а б л и ц а 6

Наимено- вание материала	T , °C	Q_1	C_1 , Ф	Q_2	C_2 , Ф	ΔQ	C_x , Ф	D , м	h , м	ε'	$\operatorname{tg}\delta_x$	ε''

Построить графики зависимостей ε' , $\operatorname{tg}\delta_x$, ε'' от температуры.

Содержание отчета

Отчет должен включать:

1. Цель работы.
2. Принципиальную схему установки.
3. Расчетные формулы, использованные при вычислении относительной диэлектрической проницаемости ε' , тангенса угла диэлектрических потерь $\operatorname{tg}\delta$, фактора потерь ε'' .
4. Примеры численных расчетов.
5. Таблицы с экспериментальными и расчетными данными.
6. Графики зависимостей $\varepsilon' = f(f)$, $\operatorname{tg}\delta = f(f)$, $\varepsilon'' = f(f)$, $\varepsilon' = f(T)$, $\operatorname{tg}\delta = f(T)$ и $\varepsilon'' = f(T)$.
7. Выводы по работе, содержащие анализ полученных экспериментальных данных по следующей схеме:
 - а) сопоставление полученных значений ε' , $\operatorname{tg}\delta$, ε'' для исследуемых материалов различной природы с указанием характерных для них видов поляризации;
 - б) объяснение зависимостей $\varepsilon' = f(f)$, $\operatorname{tg}\delta = f(f)$, $\varepsilon'' = f(f)$;
 - в) объяснение зависимостей $\varepsilon' = f(T)$, $\operatorname{tg}\delta = f(T)$, $\varepsilon'' = f(T)$.

Контрольные вопросы

1. Что такое поляризация диэлектриков?
2. Какие основные виды поляризации диэлектриков имеют место?
3. Как оценивается поляризация?
4. Чему равна напряженность между обкладками плоского конденсатора с диэлектриком?
5. Что такое поляризованность и электрическое смещение?

6. Чем отличаются напряженность деполяризующего и основного поля?
7. Каковы отличительные признаки основных видов поляризации?
8. Что такое ϵ' , $\tan\delta$, ϵ'' , как они между собой связаны?
9. Что такое диэлектрические потери?
10. Каковы причины возникновения диэлектрических потерь?
11. Что такое комплексная диэлектрическая проницаемость?
12. Какие эквивалентные схемы используются для реального диэлектрика с потерями энергии и когда?
13. Что такое время релаксации?
14. Как изменяется со временем поляризованность P при внезапном включении напряжения?
15. Как будут изменяться ϵ' и ϵ'' в полярном диэлектрике с изменением частоты?
16. Как изменяются ϵ' и ϵ'' с изменением температуры и частоты при всех видах поляризации?
17. Как изменяется $\tan\delta$ в диэлектриках с воздушными включениями при повышении напряжения?
18. В чем сущность резонансного метода?
19. Как измерить емкость и добротность диэлектрика резонансным методом?
20. Как определяется ϵ' твердых и жидких диэлектриков?

Внимание! Не на все вопросы имеются ответы в данном пособии.

Работа 3 ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ ДИЭЛЕКТРИКОВ

Ц е л ь р а б о т ы – закрепить теоретические знания физических основ явления пробоя и ознакомиться с методикой определения кратковременной электрической прочности газообразных, жидких и твердых диэлектриков.

Основные положения

Диэлектрик, находясь в электрическом поле, теряет свойства электроизоляционного материала, если напряженность поля превысит некоторое критическое значение. Это явление носит название пробоя диэлектрика, или нарушения его электрической прочности. При пробое наблюдается местное увеличение проводимости (из-за резкого увеличения

концентрации свободных носителей) и рост сквозного тока (рис.17), завершающийся образованием проводящего канала пробоя в диэлектрике. Если пробой происходит в газообразном или жидком диэлектрике, то в силу подвижности носителей заряда в таких материалах после снятия напряжения

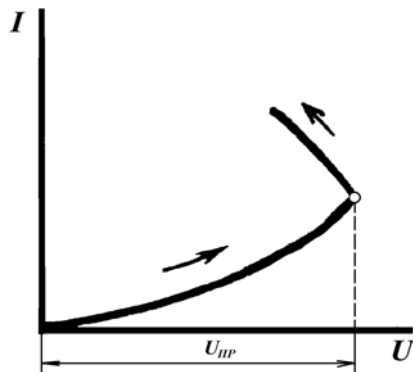
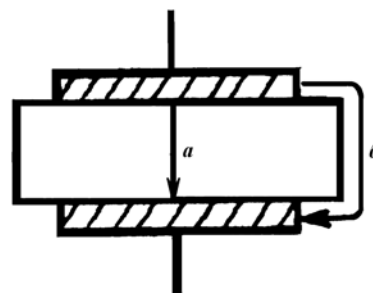


Рис.17. Зависимость тока через диэлектрик от приложенного напряжения

пробитый участок диэлектрика может восстановить (при ограниченной мощности и длительности работы источника напряжения) свои электроизоляционные свойства. Для твердого диэлектрика такое восстановление отсутствует — след пробоя имеет вид проплавленного, прожженного сквозного канала неправильной формы, образующего практически короткое замыкание между электродами.

Образование в диэлектрике проводящего канала под действием электрического поля называется **пробоем**, напряжение, вызывающее пробой, — **пробивным напряжением** ($U_{пр}$), а соответствующая напряженность электрического поля — **электрической прочностью** ($E_{пр}$) диэлектрика. В некоторых случаях при напряжении более низком, чем $U_{пр}$, развивается поверхностный электрический разряд, не распространяющийся на значительную глубину материала. Действительно, электрическая прочность высококачественных твердых диэлектриков выше, чем жидких, и, тем более, выше, чем газообразных (при нормальном давлении). Поэтому, если расстояние между ближайшими друг к другу точками электродов по поверхности диэлектрика лишь немного превосходит его толщину, то канал пробоя развивается не сквозь изоляцию (рис.18,а), а в прилегающем к ней жидком или газообразном слое (рис.18,б).

Рис.18.Схема протекания тока при пробое диэлектрика
а — сквозной пробой;
б — поверхностный пробой



Это явление называется **поверхностным пробоем**, а напряжение, при котором он происходит, – **поверхностным пробивным напряжением**. Электрическая прочность является важнейшей характеристикой электроизоляционного материала. В простейшем случае (однородное электрическое поле и однородный диэлектрик): $E_{пр} = U_{пр} / d$, (21) где $U_{пр}$ – пробивное напряжение; d – толщина диэлектрика.

В системе СИ размерность $E_{пр}$ – [В/м]. Однако на практике $U_{пр}$ измеряют в [кВ], толщину в [мм]. Тогда электрическую прочность можно представлять в кВ/мм=МВ/м= 10^6 В/м.

Если в процессе эксплуатации напряженность поля превысит $E_{пр}$ диэлектрика, то электротехническое устройство, в котором использован данный электроизоляционный материал, выйдет из строя. Поэтому для надежной работы изоляции ее рабочее напряжение ($U_{раб}$) должно быть существенно меньше, чем $U_{пр}$, а $E_{раб}$ меньше, чем $E_{пр}$. Отношение $U_{пр}/U_{раб}$ называют **коэффициентом запаса электрической прочности** электроизоляционного материала.

Определение электрической прочности диэлектриков

Для вычисления электрической прочности диэлектрика необходимо измерить его $U_{пр}$. Для сопоставимости результатов, полученных разными лабораториями, введены стандарты (ГОСТы) на условия испытаний (*форму, размеры и материал электродов; вид и длительность приложения напряжения; параметры окружающей среды и пр.*)

Длительность приложения напряжения. Установлены методы определения $U_{пр}$ при переменном (промышленной и повышенной частоты), импульсном и постоянном токе. По длительности приложения напряжения различают *импульсные, кратковременные и длительные* испытания на пробой.

Импульсное воздействие применяют для оценки стойкости изоляции к перенапряжениям, а также с целью изучения физического механизма быстро протекающих процессов электрического пробоя.

При *кратковременных* испытаниях переменное или постоянное напряжение повышают автоматически (либо плавно – с фиксированной скоростью, либо ступенями - за время от нескольких секунд до минут). Момент

пробоя диэлектрика фиксируют по резкому увеличению тока или спаду напряжения, определяя величину кратковременного пробивного напряжения $U_{\text{пр кр}}$.

В случае *длительных* испытаний, применяемых для исследования надежности изоляции и изучения процессов электрического старения, оценивают время жизни от момента подачи напряжения ($U_{\text{исп}} < U_{\text{пр}}$) до пробоя диэлектрика.

Форма электродов. Пробивное напряжение пропорционально напряженности электрического поля только при условии его однородности, степень которой определяет форма электродов. Электрическое поле является наиболее однородным в случае применения так называемых *электродов Роговского*, поверхности которых описываются уравнениями Роговского и соответствуют форме эквипотенциальных линий поля. На практике, особенно для сравнительных испытаний, используют электроды более простой формы: диски с закругленными краями или шары. Если размер сфер много больше длины разрядного промежутка (толщины диэлектрика), то получают относительно однородное (или слабо неоднородное) поле.

В неоднородном поле (например: электроды типа шар-игла или игла-игла) $U_{\text{пр}}$ всегда меньше, чем в однородном поле, при прочих равных условиях, так как в этом случае на элемент диэлектрика приходится большая электрическая нагрузка. Именно поэтому технологические нарушения типа складок при намотке ленточной изоляции, пылинок и пр. повышают вероятность пробоя. При вычислении электрической прочности в условиях неоднородного поля вводят поправочный коэффициент $a > 1$. Тогда: $E_{\text{пр}} = (a \cdot U_{\text{пр}}) / d$. (22)

Величина коэффициента a зависит от формы, размера электродов и расстояния между ними. Отмечено и влияние материала, из которого сделаны электроды. Поэтому значение поправочного коэффициента должно указываться в стандарте на материал.

Обработка результатов измерения. Величина пробивного напряжения диэлектрика определяется электрической прочностью наиболее слабого участка. Величина $E_{\text{пр}}$ электроизоляционного материала существенно зависит от местных изменений толщины диэлектрика, наличия дефектных мест (неоднородностей, полупроводящих включений, пустот и пр.), а также от состояния поверхности электродов. Поскольку перечисленные факторы случайны, то и электрическая прочность диэлектрика также является случайной

величиной, при определении которой наблюдается значительный разброс значений. Поэтому испытания на пробой производят путем многократных измерений на больших партиях образцов (выборках) с последующей статистической обработкой экспериментальных результатов.

Установлено, что распределение кратковременной электрической прочности диэлектрических материалов подчиняется **нормальному закону**, реже – **экстремальному закону Вейбулла**. В соответствии с нормальным законом распределения по результатам измерения $U_{пр}$ выборки из n образцов рассчитывают значения их $E_{пр}$, а затем – среднюю величину электрической

прочности диэлектрика $\overline{E_{пр}}$ [кВ/мм] :

$$\overline{E_{пр}} = \frac{\sum_{i=1}^n E_i}{n}. \quad (23)$$

Разброс значений электрической прочности характеризуют среднеквадратическим отклонением:

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (E_i - \overline{E_{пр}})^2}{n - 1}}. \quad (24)$$

Если испытания проводились на одних и тех же электродах при постоянном расстоянии между ними (или при одной и той же толщине диэлектрика), то о степени однородности материала можно судить по величине **коэффициента вариации** $K_{вар}$ (тем точнее, чем больше выборка):

$$K_{вар} = \frac{S}{\overline{E_{пр}}} \cdot 100\%. \quad (25)$$

Согласно стандарту, при $K_{вар} < 15\%$ материал считается **относительно (более) однородным**, а результаты измерения – **достоверными**. При $K_{вар} > 15\%$ качество диэлектрика неудовлетворительно (**материал неоднороден**) и для получения достоверных результатов необходимо увеличивать выборку.

Однако в любом случае ограниченное число измерений приводит к тому, что найденные $E_{пр}$ и S будут случайными величинами. Известно, что отклонение средних значений от истинного или генерального среднего подчиняется распределению Стьюдента (t-распределение). Тогда отклонение от средней величины электрической прочности при данной доверительной вероятности p определяется, как:

$$\Delta E = t \cdot \frac{S}{\sqrt{n}}, \quad (26)$$

где t – величина критерия Стьюдента для n измерений.

Для вероятности $p = 95\%$ имеем:

n	5	6	7	8	9	10
t	2,78	2,57	2,45	2,37	2,31	2,26

Окончательное значение электрической прочности (определенное, например, по 5 пробоям) с вероятностью 95% будет находиться в пределах:

$$E = \overline{E_{np}} \pm \Delta E = \overline{E_{np}} \pm 2,78 \frac{S}{\sqrt{n}}. \quad (27)$$

Механизм пробоя диэлектриков.

Кратковременная электрическая прочность электроизоляционных материалов определяется прежде всего их физическим состоянием и структурой.

Пробой газов. Пробой газообразных диэлектриков носит чисто *электрический* характер и происходит вследствие ударной и фотонной ионизации, заключающейся в лавинообразном расщеплении нейтральных атомов (молекул) газа на электроны и ионы.

Под воздействием внешних факторов (например: ультрафиолетовое и радиационное излучения) развивается начальная ионизация атомов (молекул) газа с образованием незначительного количества свободных электронов и ионов, которые находятся в беспорядочном тепловом движении. При наложении электрического поля свободные заряженные частицы (главным образом, электроны) получают добавочную скорость и начинают движение в направлении поля, приобретая дополнительную энергию:

$$W = q \cdot U_{\lambda}, \quad (28)$$

где q - заряд частицы; U_{λ} – разность потенциалов на длине свободного пробега (λ). Если электрическое поле однородно, то: $U_{\lambda} = E \cdot \lambda$, (29)

где E – напряженность поля в газе, λ – длина свободного пробега электронов (среднее расстояние между двумя соударениями), зависящая от давления газа.

Отсюда: $W = E \cdot q \cdot \lambda. \quad (30)$

Если приобретенная энергия W достаточно велика, то в случае соударения заряженной частицы с нейтральным атомом (молекулой) газа происходит либо *возбуждение* – переход электрона на более удаленную орбиту, либо *ионизация* – расщепление атома (молекулы) на электроны и *положительные* ионы. Так, например, при разряде в воздухе образуются следующие

положительные ионы: O^+ , O_2^+ , N^+ , N_2^+ , NO^+ . В некоторых случаях (например, в кислороде, углекислом газе, парах воды и др.) электрон, встречаясь с нейтральным атомом (молекулой), соединяется с ним, образуя *отрицательный* ион. Следует отметить, что в инертных газах (аргоне, неоне, гелии, криптоне, ксеноне, а также в азоте) подобного явления не наблюдается.

$$\text{Условия возникновения ударной ионизации: } E \cdot q \cdot \lambda \geq W_{\text{ион}}, \quad (31)$$

где: $W_{\text{ион}}$ – энергия ионизации, характеризуемая потенциалом $U_{\text{ион}} = W_{\text{ион}} / q$.

Для различных газов $W_{\text{ион}} = (4 - 25)$ эВ при выбивании одного электрона. Установлено, что электрон ионизирует молекулы газа, если скорость его движения превышает 1000 км/с.

Одновременно развивается и фотонная ионизация за счет поглощения нейтральными атомами (молекулами) энергии фотонов, испускаемых возбужденными, но не ионизованными, частицами. Появившиеся вследствие указанных процессов свободные электроны в свою очередь также ионизируют или возбуждают нейтральные атомы (молекулы), а положительные ионы выбивают электроны при ударах о катод. Число свободных носителей в газе лавинообразно нарастает, что приводит к образованию проводящих каналов – **стримеров**: отрицательного (состоящего из двигающихся от катода к аноду электронов и отрицательных ионов) и положительного (представляющего собой направленный от анода к катоду поток положительно заряженных ионов). Проводящие каналы в газе развиваются практически мгновенно. Происходит электрический пробой.

Электрическая прочность газов в нормальных условиях невелика и в значительной мере зависит от их химического состава, условий эксперимента и внешних факторов: формы распределения электрического поля, расстояния между электродами, давления, влажности, температуры и частоты переменного поля. $E_{\text{пр}}$ газообразных диэлектриков резко снижается при увеличении степени неоднородности поля: наблюдается развитие частичных разрядов в виде короны с последующим переходом в искровой разряд и дугу при увеличении напряжения. Так, для воздуха (который служит внешней изоляцией во многих видах электротехнических конструкций: трансформаторах, конденсаторах, линиях электропередачи) при нормальном давлении в однородном электрическом поле при газовом промежутке порядка 1–10 мм $E_{\text{пр}} = 3$ кВ/мм, в неоднородном – 0,5 кВ/мм. Газы, содержащие *галогены* (J, Br, Cl, F), как,

например, фреон CF_2Cl_2 или элегаз SF_6 , имеют электрическую прочность, которая в 2,5 – 3,0 раза выше, чем у воздуха или азота.

На электрическую прочность газа влияет **длина разрядного промежутка**. При малых расстояниях между электродами наблюдается значительное увеличение электрической прочности, связанное с отсутствием условий для развития лавин вследствие малой длины пробега свободных носителей заряда. Так, если для воздуха в нормальных условиях при разрядном промежутке 1–10 мм $E_{пр} = 3$ кВ/мм, то при расстоянии между электродами в 0,005 мм $E_{пр}$ возрастает до 70 кВ/мм (при 50 Гц).

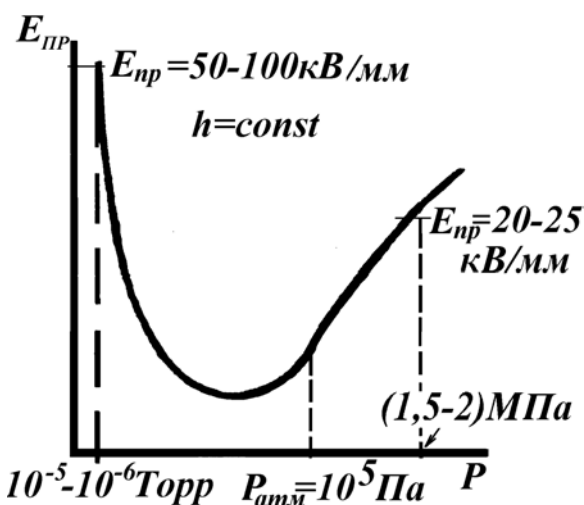
Особое практическое значение имеет зависимость электрической прочности газов от **давления** (рис 19).

Как отмечалось, энергия, накопленная электроном при движении в электрическом поле и необходимая для развития ударной и фотонной ионизации, зависит от средней длины свободного пробега носителя λ и определяется плотностью газа. При большом давлении и, соответственно, повышенной плотности газа расстояние между отдельными атомами

Рис.19. Зависимость $E_{пр}$ газа от давления

(молекулами) сокращается, т.е. уменьшается λ .

Поэтому энергию, необходимую для ионизации, электрон приобретает при более высокой напряженности поля. При уменьшении давления вначале наблюдается снижение электрической прочности газа, так как облегчаются условия лавинообразования (растет λ). Когда же разряжение достигнет высокой степени (глубокий вакуум), электрическая прочность начинает снова возрастать, что объясняется уменьшением числа атомов (молекул) газа в единице объема и, следовательно, снижением вероятности столкновения электронов с нейтральными частицами. В этих условиях пробой может произойти вследствие вырывания электронов из



поверхности электрода силой электрического поля (холодная эмиссия). Электрическая прочность вакуума имеет достаточно высокие значения.

Пробой жидких диэлектриков. Процессы, происходящие в жидкостях при пробое, сложны и зависят, главным образом, от их **химического состава и степени чистоты**. К максимально чистым жидкостям применяют теорию чисто **электрического пробоя**. В этом случае при высоких значениях электрического поля может происходить вырывание электронов из металлических электродов с последующим развитием ударной ионизации. В нормальных условиях электрическая прочность чистых жидких диэлектриков существенно превосходит электрическую прочность газов вследствие более высокой плотности и, соответственно, значительно меньшей длины свободного пробега электронов. Для таких жидкостей в лабораторных условиях получены значения $E_{пр} = (50-70) \text{ кВ/мм}$, а при малых зазорах – $(150-250) \text{ кВ/мм}$. Технически чистые жидкости имеют $E_{пр} = (20-25) \text{ кВ/мм}$. В них постоянно присутствуют растворенные и нерастворенные примеси, которые подразделяют на естественные (вода, газы, твердые частицы и пр.) и искусственные, т.е. преднамеренно внесенные в жидкий диэлектрик при его производстве (например, антиокислители, сорбенты и т.д.).

Пробой жидкостей, содержащих **газовые включения**, объясняют местным перегревом (за счет энергии, выделяющейся в относительно легко ионизирующихся пузырьках газа), который, в конечном счете, приводит к вскипанию жидкого диэлектрика и образованию газового канала между электродами.

Изоляционные жидкости часто содержат **воду**, которая, не смешиваясь с жидким диэлектриком, присутствует в нем в виде мелких капель. Под воздействием электрического поля капли воды (сильно полярного вещества) поляризуются, приобретая форму эллипсоидов, и ориентируются по полю, образуют цепочку с повышенной проводимостью, по которой и происходит пробой. Содержание даже 0,01% воды в электроизоляционном масле снижает его $E_{пр}$ в 5–6 раз. Поэтому при использовании жидких диэлектриков их подвергают тщательной термо-вакуумной сушке и дегазации.

К жидкостям, имеющим **высокую электропроводность**, применима теория **теплого пробоя**. После приложения электрического поля такой жидкий диэлектрик разогревается за счет диэлектрических потерь. С ростом температуры его удельное объемное сопротивление снижается, что приводит к

дальнейшему возрастанию сквозного тока и, соответственно, стимулирует непрерывный рост температуры вплоть до вскипания изоляционной жидкости и последующего пробоя.

Электрическая прочность технических жидких диэлектриков имеет тенденцию к снижению по мере увеличения их полярности и соответствующего возрастания способности к диссоциации. Электрическая прочность чистых масел снижается с ростом температуры из-за увеличения длины свободного пробега электронов вследствие уменьшения плотности жидкости. Однако в жидких диэлектриках, содержащих воду, с ростом температуры происходит сушка, поэтому электрическая прочность увеличивается, образуя характерный максимум примерно при 80 °С.

Необходимо учитывать, что по мере увеличения числа пробоев в одном и том же объеме жидкости наблюдается снижение $E_{пр}$ вследствие образования продуктов ее разрушения, в частности, сажи в случае углеродсодержащих жидкостей. Поэтому для обеспечения удовлетворительной воспроизводимости результатов необходимо после каждого пробоя менять пробы испытуемого жидкого диэлектрика, а также ограничивать величину тока и время его протекания.

Пробой твердых диэлектриков. Различают три основных формы пробоя твердых диэлектриков: *электрический, электротепловой (тепловой) и электрохимический.*

Электрический пробой чаще всего имеет место при кратковременном воздействии напряжения (в частности, импульсного характера), а механизм его развития определяется *степенью однородности* диэлектрика

Физическая сущность электрического пробоя высокооднородных, не содержащих газовые включения твердых диэлектриков, к которым относятся монокристаллы щелочногалоидных соединений, вакуумплотная керамика, кварцевое стекло, органические пленки из полистирола и фторопласта-4 и др., – практически мгновенно развивающаяся ударная ионизация с непосредственным разрушением структуры изоляционного материала. Для этого механизма пробоя характерна заметная разница значений пробивного напряжения в однородном и неоднородном электрических полях. Электрическая прочность высокооднородных изоляционных материалов наиболее высока (достигает нескольких сотен кВ/мм) и слабо зависит от температуры и частоты приложенного поля.

Электрический пробой неоднородных (технических) твердых диэлектриков с открытой пористостью (пористая керамика, непропитанная бумага, мрамор и пр.) также отличается быстротечностью и начинается с пробоя воздушных включений. Пробивные напряжения неоднородных материалов, как правило, невысоки и мало отличаются друг от друга в однородном и неоднородном полях. Электрическая прочность диэлектриков с открытой пористостью сравнима с $E_{пр}$ воздуха и составляет (3–5) кВ/мм. Электрическая прочность твердых диэлектриков с закрытой пористостью на порядок выше и составляет (10–30) кВ/мм.

Уплотнение бумаги способствует некоторому увеличению ее пробивных характеристик. Однако в целлюлозных материалах всегда присутствуют сквозные воздушные каналы: механическая нагрузка, необходимая для преобразования открытой пористости в закрытую, приводит к морфологическим нарушениям в диэлектрике в процессе его производства. Поэтому для повышения электрической прочности бумажной изоляции применяется ее термо-вакуумная сушка и пропитка, т.е. замена воздуха электрически более прочными диэлектрическими жидкостями. При этом $E_{пр}$ пропитанной бумаги более высока, чем $E_{пр}$ непосредственно жидкого диэлектрика, так как волокнистая структура целлюлозной основы осложняет формирование канала пробоя.

В большинстве случаев при увеличении толщины твердого диэлектрического материала его электрическая прочность снижается вследствие возрастания дефектности. Однако и при переходе к особо тонким слоям (лаковые пленки, напыленные диэлектрики и пр.) $E_{пр}$ падает из-за неизбежного влияния неоднородностей структуры.

Электротепловой (тепловой) пробой развивается в том случае, когда количество тепла, выделяющееся в диэлектрике в единицу времени за счет диэлектрических потерь, превышает количество тепла, которое может отводиться в данных условиях в окружающую среду. При этом нарушается тепловое равновесие (тепловой баланс) и, как следствие, инициируется *термостарение* изоляционного материала, приводящее к дальнейшему снижению его диэлектрических свойств. Процесс приобретает лавинообразный характер, а в диэлектрике происходят необратимые морфологические изменения: расплавление, растрескивание, обугливание и т.д. Если за время приложения напряжения твердый диэлектрик с тепловым механизмом пробоя

не успевает прогреться, то пробоя не будет, т.е. тепловой пробой развивается длительно и может быть вызван местным перегревом материала вследствие локального увеличения диэлектрических потерь или ухудшения условий теплоотвода. Теплоотвод за счет теплопроводности окружающей среды, как правило, имеет место для кабелей, вмонтированных в стену вводов. Условия работы подвесных и опорных изоляторов, керамических конденсаторов, каркасов катушек индуктивности таковы, что теплоотвод обуславливается конвекцией воздуха. Поэтому при тепловом механизме пробоя электрическая прочность твердых диэлектриков существенно зависит от условий их эксплуатации и снижается с ростом температуры окружающей среды и частоты поля (способствующих увеличению диэлектрических потерь изоляционного материала).

В случае длительных испытаний пробой в твердых диэлектриках обеспечивается не только термостарением, но и параллельно развивающимися процессами *электрического* старения. При этом в органических диэлектриках разрушение материала происходит под действием частичных разрядов в газовых порах и прослойках как в толще изоляции, так и на границе с электродом. В неорганических диэлектриках развиваются сложные электронно-ионные процессы, приводящие к появлению дополнительных дефектов и росту тока проводимости, а, следовательно, и к увеличению диэлектрических потерь.

Электрохимический пробой происходит в результате сложных физико-химических процессов (**электрохимическое старение**), обусловленных длительным воздействием электрического поля и приводящих к необратимому снижению сопротивления изоляции. При переменном напряжении низких частот в диэлектрике происходит ионизация остаточных воздушных включений вследствие развития частичных разрядов. Ионизация связана с выделением озона и окислов азота, вызывающих постепенное химическое разрушение органического диэлектрика. При *постоянном напряжении* электрохимическое старение обусловлено электролитическими процессами, протекающими особо интенсивно при повышенных температуре и влажности. Данный вид пробоя свойственен не только органическим материалам (пропитанная бумага, резина и пр.), но и некоторым неорганическим диэлектрикам, например, керамике, содержащей диоксид титана.

Каждый из указанных видов пробоя может иметь место в одном и том же диэлектрике в зависимости от его *макроструктуры, геометрии, а также*

условий эксплуатации. Наиболее сложными процессами обусловлен пробой композиционных и неоднородных материалов: пористой керамики, бумажно-масляной, стекловолоконистой, слюдосодержащей изоляции и др.

В общем случае формы пробоя твердых электроизоляционных материалов можно проиллюстрировать обобщенной зависимостью $U_{пр}$ от времени приложения напряжения (t) (рис. 20), имеющей три участка, соответствующих электрическому (I), электротепловому (II) и электрохимическому старению (III).

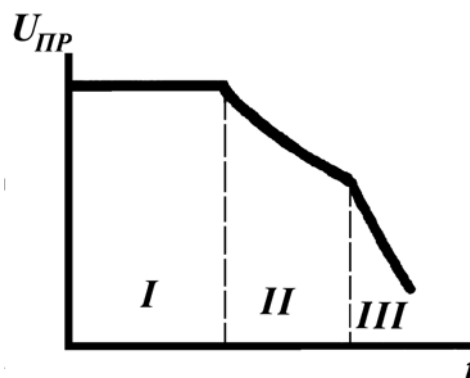


Рис.20. Обобщенная зависимость $U_{пр}$ от времени

Описание измерительной установки

Упрощенная схема измерительной установки для определения электрической прочности диэлектриков представлена на рис. 21.

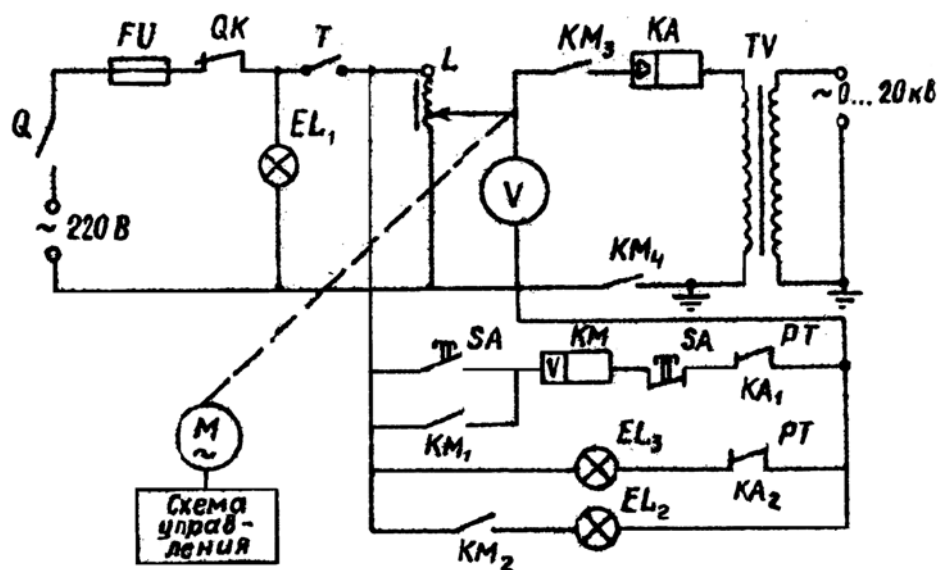


Рис.21. Схема установки для определения $E_{пр}$ диэлектриков

Схема установки включает в себя следующие элементы:

Q - пакетный выключатель, FU - предохранитель, QK - контакты на двери высоковольтной камеры, EL₁- сигнальную лампу на высоковольтной камере; L - автотрансформатор для регулировки напряжения, KM₃ - контакты магнитного пускателя, TV - высоковольтный трансформатор, SA - контакты на

автотрансформаторе, фиксирующие нулевое положение движка; КМ - катушка магнитного пускателя; КМ₁ и КМ₂ - контакты магнитного пускателя; EL₂ - сигнальная лампа «Напряжение подано» на контакты реле тока КА₁ и КА₂, EL₃ - сигнальная лампа «Пробой», V - вольтметр переменного напряжения, М - электродвигатель со схемой управления, Т - выключатель электропитания установки, КА - реле тока.

В начальный момент времени движок автотрансформатора выведен и напряжение на входе и выходе высоковольтного трансформатора равно нулю. После запуска электродвигателя напряжение на входе TV начинает возрастать по линейному закону, а вольтметр V показывает его величину. Рост напряжения будет происходить до тех пор, пока не произойдет пробой испытуемого образца в высоковольтной цепи TV. При этом ток пробоя приводит к резкому увеличению тока в первичной цепи высоковольтного трансформатора, это вызывает срабатывание реле тока, контакты которого отключают напряжение в высоковольтной цепи и возвращают движок автотрансформатора в исходное «нулевое» положение. После выполненного испытания необходимо механически вернуть реле тока в исходное положение.

Порядок выполнения работы

Подготовка к работе. При подготовке к работе следует изучить лабораторную установку, последовательность операций при ее включении и отключении (*“Техника эксперимента”*), а также инструкцию *“Техника безопасности”* для лиц, работающих с высоким напряжением.

После собеседования с преподавателем и получения допуска к работе, что *подтверждается подписью в журнале по технике безопасности*, можно приступить к проведению эксперимента.

**ВКЛЮЧЕНИЕ УСТАНОВКИ И РАЗЛИЧНЫЕ ПЕРЕКЛЮЧЕНИЯ
ПРОИЗВОДИТЬ ТОЛЬКО С РАЗРЕШЕНИЯ ПРЕПОДАВАТЕЛЯ!**

Проведение эксперимента

Определение коэффициента передачи. Для определения коэффициента передачи (K) испытательной установки необходимо произвести градуировочные измерения и рассчитать величину коэффициента передачи:

$K = U_2 / U_1$, где U_1 – напряжение, измеряемое вольтметром V в первичной цепи высоковольтного трансформатора, при котором пробивается определенная величина зазора между шаровыми разрядниками, присоединенными к вторичной обмотке трансформатора; U_2 – истинное напряжение пробоя шарового разрядника, соответствующее данному зазору. Величины U_2 предварительно определяются с помощью специального вольтметра высокого напряжения. В настоящей работе использован шаровой разрядник с диаметром шаров 6,25 см (при этом известно, что электрическая прочность воздуха в однородном поле относительно постоянна и хорошо изучена для комнатных условий измерения). Значения пробивного напряжения воздуха (U_2) для указанных шаров при различном расстоянии между ними (h) приведены в табл. 7.

Т а б л и ц а 7

h , мм	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
U_2 , кВ	3,29	5,70	7,96	10,21	12,38	14,55	16,70	18,70	20,78	22,70

П р и м е ч а н и е: в табл. 10 даны эффективные значения пробивных напряжений воздуха между сферами диаметром 6,25 см.

Пробой газов.

А. Определение электрической прочности воздуха в квазиоднородном поле.

Градуировка измерительной схемы по шаровому разряднику

1. Убедиться, что пакетный выключатель ПВ и тумблер Т выключены.
2. Установить оси шаровых электродов на единой вертикали.
3. Вращением регулятора нониусного устройства установить шкалу на нулевое деление.
4. Сблизить электроды до соприкосновения между собой и закрепить нижний электрод.
5. Присоединить к шарам разрядника вывод от высоковольтного трансформатора и нулевой провод.
6. С помощью нониуса установить зазор между электродами $h = 1$ мм.
7. Согласно разделу “Техника эксперимента” произвести пробой воздуха. По шкале вольтметра измерить величину напряжения U_1 . Опыт провести при зазорах от 1 до 7 мм (через каждый мм).
8. Полученные результаты занести в табл.8.

Т а б л и ц а 8

Измеренные величины		Табличные значения	Расчетные величины		
h , мм	U_1 , В	U_2 , кВ	K	$U_{\text{пр}}$, кВ	$E_{\text{пр}}$, кВ/мм

Здесь: U_1 – отсчет по шкале вольтметра; U_2 – пробивное напряжение заданного зазора h между сферами, взятое из табл. 10; K – коэффициент передачи ($K=U_2/U_1$); $U_{\text{пр}}$ – пробивное напряжение воздушного зазора h , рассчитанное по формуле $U_{\text{пр}}=K_{\text{ср}}U_1$; $E_{\text{пр}}$ – электрическая прочность воздуха, рассчитанная по формуле $E_{\text{пр}}=U_{\text{пр}}/h$.

Б. Определение электрической прочности воздуха в неоднородном поле

1. Убедиться, что пакетный выключатель ПВ и тумблер Т выключены.
2. Для получения неоднородного поля заменить нижний сферический электрод игольчатым. Выставить соосность этих электродов по вертикали.
3. Произвести пробой воздуха в неоднородном поле при зазорах (h) от 1 до 7 мм (через каждый мм).
4. Полученные результаты занести в табл. 9.

Т а б л и ц а 9

Измеренные величины		Расчетные величины	
h , мм	U_1 , В	$U_{\text{пр}}$, кВ	$E_{\text{пр}}$, кВ/мм

Здесь: U_1 – отсчет по вольтметру; $U_{\text{пр}}$ – пробивное напряжение;
 $E_{\text{пр}}$ – электрическая прочность воздуха.

По результатам эксперимента:

1. Рассчитать значения K , $K_{\text{ср}}$, $U_{\text{пр}}$ и $E_{\text{пр}}$ при пробое в квазиоднородном электрическом поле.
2. Рассчитать значения $U_{\text{пр}}$ и $E_{\text{пр}}$ при пробое в неоднородном поле.
3. Построить графики зависимостей $U_{\text{пр}}=f(h)$ и $E_{\text{пр}}=f(h)$ для различных форм поля.
4. Проанализировать влияние формы поля и расстояния между электродами (h) на электрическую прочность воздуха, объяснив полученные результаты.

Пробой жидких диэлектриков

1. Убедиться, что пакетный выключатель ПВ и тумблер Т выключены.
2. Записать марку и свойства испытуемой жидкости в таблицу.
3. Записать величину разрядного промежутка (h) между электродами испытательной ячейки, заполненной изоляционной жидкостью.
4. Присоединить к электродам испытательной ячейки вывод от высоковольтного трансформатора и нулевой провод.
5. Произвести пробой жидкости, наблюдая за появлением электрической искры через прозрачную стенку ячейки. Записать значение напряжения U_1 (отсчет по вольтметру) в табл. 10.

Т а б л и ц а 10

Наименование жидкости	Номер опыта	h , мм	U_1 , В	$U_{пр}$, кВ
....				

6. При неизменном расстоянии между электродами повторить пробой 6 раз. После каждого пробоя сделать выдержку около 2 минут, удалив из разрядного промежутка пузырьки газа и продукты сгорания масла при помощи легкого покачивания ячейки.

По результатам эксперимента:

1. Рассчитать значения $U_{пр} = K_{ср} U_1$.
2. Провести статистическую обработку результатов эксперимента. Для этого отбросить максимальное и минимальное значения $U_{пр}$, а для оставшихся четырех точек рассчитать $\overline{U_{пр}}$ и среднеквадратическое отклонение S_U , используя которые, рассчитать $\overline{E_{пр}}$ и S_E .
3. Проанализировать и объяснить полученные результаты. Сравнить электрическую прочность газа (воздуха) и электроизоляционного масла.

Пробой твердых диэлектриков

1. Убедиться, что пакетный выключатель Q и тумблер Т выключены.
2. Присоединить к ячейке с плоскими электродами вывод высоковольтного трансформатора и нулевой провод.

3. Поместить исследуемый образец (по указанию преподавателя) между электродами и осуществить пробой.

А. Исследование влияния структуры электроизоляционных материалов на их электрическую прочность

1. Определить пробивное напряжение твердых органических диэлектриков (конденсаторной целлюлозной бумаги и полимерной пленки) по результатам 10 измерений U_1 для каждого материала.
2. Провести статистическую обработку результатов эксперимента, рассчитав значения: $U_{пр}$, $E_{пр}$, $\overline{E_{пр}}$, $K_{вар}$ и доверительные границы $E_{пр}$ каждого материала при доверительной вероятности 95%. Измеренные и расчетные величины записать в табл. 11.

Таблица 11

Наименование материала				
Номер опыта	h , мм	U_1 , В	$U_{пр}$, кВ	$E_{пр}$, кВ/мм

Внизу таблицы привести значения рассчитанных величин:

$$\overline{E_{пр}} = \quad S = \quad K_{вар} = \quad \Delta E_{пр} =$$

3. Проанализировать влияние структуры на электрическую прочность твердых диэлектриков, сравнив характеристики пленки и бумаги. Объяснить полученные результаты.

Б. Исследование влияния пропитки на электрическую прочность целлюлозных материалов

1. Определить пробивное напряжение сухой и пропитанной электроизоляционным маслом кабельной бумаги по результатам 10 измерений U_1 для каждого материала.
2. Провести статистическую обработку результатов эксперимента, рассчитав значения $U_{пр}$, $E_{пр}$, $E_{ср}$, $K_{вар}$ и доверительные границы $E_{пр}$ каждого материала при доверительной вероятности 95%.

Измеренные и расчетные величины записать в табл. 12.

Т а б л и ц а 12

Наименование материала				
Номер опыта	h , мм	U_1 , В	$U_{пр}$, кВ	$E_{пр}$, кВ/мм

$$\overline{E_{пр}} = \quad S = \quad K_{вар} = \quad \Delta E_{пр} =$$

3. Проанализировать влияние пропитки на электрическую прочность целлюлозных материалов, сравнив значения $E_{пр}$ сухой и пропитанной кабельной бумаги.
4. Проанализировать влияние толщины на электрическую прочность твердых диэлектриков, сравнив значения $E_{пр}$ непропитанных конденсаторной (эксперимент А) и кабельной (эксперимент Б) бумаги. Объяснить полученные результаты.

В. Исследование влияния числа слоев на электрическую прочность твердых диэлектриков.

1. Определить пробивное напряжение от 1 до 13 слоев сухой конденсаторной бумаги (толщина одного слоя бумаги: $h = 10$ мкм). Записать измеренные (U_1) и расчетные (толщина n слоев, $U_{пр}$, $E_{пр}$) значения характеристик целлюлозного материала в табл. 13.

Т а б л и ц а 13

Число слоев, n	Толщина n слоев, мм	U_1 , В	$U_{пр}$, кВ	$E_{пр}$, кВ/мм
.....				

2. Построить зависимости $U_{пр}=f(n)$ и $E_{пр}=f(n)$.
3. Объяснить полученные результаты.

Содержание отчета

Отчет должен включать:

1. Цель работы.
2. Принципиальную схему установки.
3. Расчетные формулы, использованные при вычислении K , $K_{ср}$, $U_{пр}$ и $E_{пр}$
4. Примеры численных расчетов.
5. Таблицы с экспериментальными и расчетными данными.
6. Графики зависимостей: $U_{пр}=f(h)$ и $E_{пр}=f(h)$ для различных форм поля;
 $U_{пр}=f(n)$ и $E_{пр}=f(n)$.

7. Статистическую обработку результатов эксперимента в тех случаях, когда это возможно.
8. Выводы по работе, содержащие анализ результатов каждого из проведенных экспериментов.

Контрольные вопросы

1. Каковы физические основы явления пробоя газообразных диэлектриков?
2. Каковы физические основы явления пробоя жидких диэлектриков?
3. Каковы физические основы явления пробоя твердых диэлектриков?
4. Что такое фотонная ионизация?
5. Как влияет форма и размер электродов на величину E_{np} диэлектриков?
6. Как влияет величина разрядного промежутка на E_{np} диэлектриков?
7. Как влияет структура материала на его электрическую прочность?
8. Чем вызвано различие E_{np} для разных материалов?
9. Какова методика определения электрической прочности диэлектриков?

Работа 4 ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ ТВЕРДЫХ ДИЭЛЕКТРИКОВ

Ц е л ь р а б о т ы –ознакомиться с методом определения предела механической прочности на разрыв диэлектриков на примере целлюлозной электроизоляционной бумаги; проанализировать связь указанной характеристики с толщиной и плотностью природного полимера (кабельная и конденсаторная бумага); изучить влияние исходного сырья и особенностей технологического цикла производства материала на его прочностные параметры.

При выборе твердого материала для изготовления электрической изоляции того или иного электротехнического устройства необходимо полное представление не только об электрических свойствах диэлектрика, но и о широком спектре его физических характеристик, в частности, о механической прочности.

Основные положения

Механическая прочность – свойство тела, характеризующееся способностью противостоять разрушению под воздействием механических сил. Для его количественной оценки введено несколько характеристик. Одной из таких характеристик является значение механических напряжений, при которых в данных условиях происходит разрушение образца. Эту величину называют пределом прочности или разрушающим напряжением. Разрушающее напряжение может определяться при различных видах деформации: растяжение, сжатие, изгиб и т.д (соответственно определяют прочность на разрыв, сжатие и т.п.). Механическое напряжение представляет собой отношение деформирующей силы, приложенной к испытываемому образцу, к площади его поперечного сечения: $\sigma = F/S$.

Величина разрушающего напряжения, помимо свойств материала, зависит от температуры и времени действия деформирующей силы, от скорости деформации, от размеров и конфигурации образца испытываемого материала. Поэтому при сравнении прочности разных материалов по значениям разрушающего напряжения необходимо производить определение этой величины при одних и тех же условиях. Второй механической характеристикой материала является максимальное значение деформации, развивающееся к моменту разрыва – максимальная относительная деформация. Относительной деформацией называют отношение величины деформации к исходной длине образца, выраженное в процентах: $\Delta l/l_0$. Данный параметр так же зависит от вида и скорости деформации, от температуры и строения материала.

При испытаниях материалов на разрыв (или сжатие) производится построение деформационной кривой, представляющей собой зависимость механического напряжения от величины относительной деформации (рис.22).

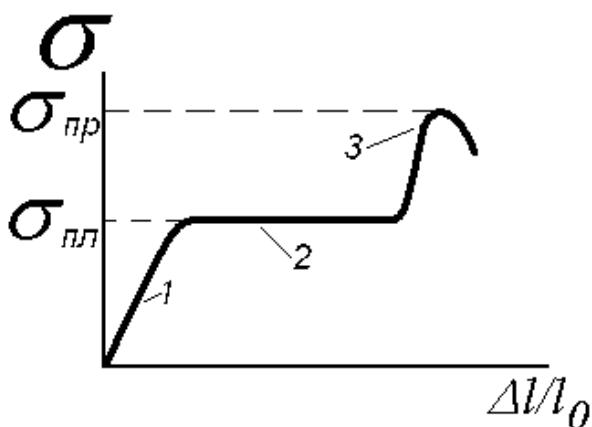


Рис.22. Упрощенная деформационная механическая кривая твердого тела

Деформационная кривая имеет несколько характерных участков:

1. Участок **упругой деформации**, на котором наблюдается обратимая деформация материала, линейно возрастающая под действием внешней нагрузки и подчиняющаяся закону Гука;

2. Участок **пластической деформации** (или *течения*), на котором под действием незначительного увеличения механического напряжения происходит заметная по величине пластическая (необратимая) деформация, величину механических напряжений, при которой появляется участок течения, называют **пределом пластичности** материала ($\sigma_{пл}$);
3. Участок **предразрывной деформации** с последующим разрушением целостности материала. Максимальную величину напряжений в образце, при котором возникает разрыв, называют **пределом прочности** ($\sigma_{пр}$).

Форма и конкретный вид деформационной кривой определяется механическими свойствами различных материалов. Так, крутизна наклона участка упругой деформации I зависит от величины модуля упругости (модуля Юнга). Чем больше модуль упругости, тем большие напряжения необходимо создать в материале для достижения одних и тех же величин деформаций. Материалы, в которых значительные механические напряжения вызывают небольшие упругие деформации, называют **жесткими**. Примером жестких материалов могут служить вещества кристаллической структуры – металлы, стекла, керамики, некоторые виды полимеров и др. Наоборот, если малые механические напряжения вызывают существенные по величине деформации в образце, то такие материалы называют **эластичными**, а в том случае, если удлинение достигает очень больших величин (до нескольких раз), – **высокоэластичными** (рис.23).

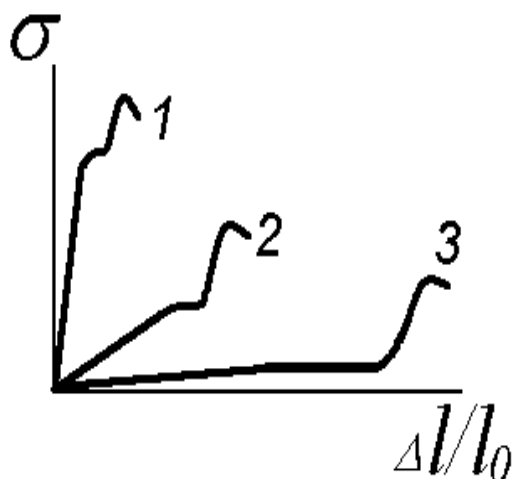


Рис.23. Кривые деформации для жесткого (1), эластичного (2) и высокоэластичного (3) материала

В жестких материалах участок пластической деформации 2 либо слабо выражен, либо вообще отсутствует (для **хрупких** материалов). Материалы, у которых наблюдаются значительные пластические деформации при небольших механических нагрузках, называют **пластичными** (или **мягкими**). К таким материалам относятся вещества с

аморфным строением: это некоторые металлы (свинец и др.), очень многие полимеры. Участок разрушения 3 характеризуется структурной перестройкой материала под действием предельно высоких механических напряжений, при этом может наблюдаться даже некоторое упрочнение материала.

Механические свойства органических твердых диэлектриков (прежде всего полимеров) определяются химической природой молекул вещества, прочностью химических связей в них и силой межмолекулярного взаимодействия молекул друг с другом. При разрыве жесткоцепных полимеров значение относительной деформации не превышает долей процента, а при развитии высокоэластической деформации в гибкоцепных полимерах – достигает сотен процентов. Макромолекулы целлюлозы относятся к полужесткоцепным.

Для оценки предела прочности материала рассчитывают теоретическую прочность. В полимерах механическая прочность, определенная экспериментально как напряжение, вызывающее разрушение образца, во много раз меньше ее теоретического предельного значения. Это различие обусловлено наличием в реальной структуре полимера дефектов, связанных с технологией производства материала, и дефектов, появившихся в результате изготовления образца для испытаний и в процессе самих испытаний. При подготовке образцов чаще всего возникают поверхностные дефекты. Они наиболее опасны. Причина снижения прочности образца состоит не в том, что дефект уменьшает его реальное поперечное сечение (дефект, как правило, несоизмеримо мал по сравнению с толщиной образца), а в том, что в вершине дефекта концентрируются дополнительные внутренние перенапряжения. Чем более острой является вершина дефекта, тем больше концентрация напряжений. При этом под действием этих сверхнапряжений дефект получает возможность расти за счет разрыва межмолекулярных связей.

Чем тоньше образец, тем меньше площадь его поверхности, следовательно, меньше вероятность нахождения на ней дефекта. Поэтому для разрушения тонких образцов требуется большее напряжение, чем для толстых образцов. Вместе с тем в тонких образцах расширяется кривая распределения (разброса) значений прочности. Это обусловлено тем, что даже малый дефект в тонком образце может оказаться опаснее, чем в толстом, и заметно снизить его прочность.

Деформируя образец, мы подводим к нему механическую энергию, которая накапливается в материале в виде энергии упругой деформации. Если этой энергии достаточно для разрушения образца, то на наиболее опасном микродефекте начинает зарождаться трещина, которая затем разрастается, разделяя образец на части. Это основная или, как говорят, магистральная трещина.

В процессе роста трещины энергия, запасенная в образце, тратится в двух направлениях. Во-первых, она идет на образование новой поверхности. Во-вторых, энергия затрачивается на всевозможные процессы перемещения структурных элементов на пути движения трещины. Движение структурных элементов приводит к рассеянию энергии за счет внутреннего трения и переходу ее в теплоту. Наиболее простым случаем является разрушение при полном отсутствии рассеяния энергии, когда вся запасенная энергия образца идет на образование новой поверхности.

Теория разрушения материалов, в которых энергия разрушения идет только на образование новой поверхности, носит название теории Гриффита. Известно, что наименьшие деформации, приводящие к разрушению, наблюдаются у полимера тогда, когда он переходит из стеклообразного в хрупкое состояние. В этом состоянии перемещение структурных элементов оказываются наименьшими, и следовательно, минимально и рассеивание энергии в виде теплоты. Поэтому теорию Гриффита часто называют теорией хрупкого разрушения.

В соответствии с теорией хрупкого разрушения предел прочности при растяжении (сжатии) может быть рассчитан как:

$$\sigma_{np} = \sqrt{\frac{2\alpha E}{\pi l_0}}, \quad (32)$$

где α – удельная энергия той поверхности, которая возникла при разрыве;
 E – модуль упругости (модуль Юнга); l_0 – длина микродефекта.

Эта формула правильно описывает ряд закономерностей, в частности влияние глубины дефекта (или специально сделанного надреза) на прочность.

Сложная надмолекулярная структура органических полимеров обуславливает наличие микродефектов различной степени опасности, которые беспорядочно распределены по объему материала. Таким образом, разным материалам присущи различные механизмы образования трещин.

Методика определения предела механической прочности бумаги на разрыв

В качестве образцов для исследования выбраны:

1. Кабельная электроизоляционная бумага ($h_{\text{ср}}=120$ мкм), изготовленная из древесины лиственницы и сосны;
2. Конденсаторная бумага ($h = 10$ мкм);
3. Целлюлозная бумага, отбеленная хлорсодержащими препаратами ($h=100$ - 200 мкм).

Подготовка образцов

Испытуемая бумага нарезается в виде прямоугольных полос длиной $l = 120$ мм и шириной $b = 15$ мм. Для проведения каждого эксперимента необходимо подготовить по 10 шт. образцов всех исследуемых видов бумаги с целью последующей статистической обработки полученных результатов.

Определение предела механической прочности на разрыв

Исследуемые образцы бумаги последовательно закрепляются в зажимном устройстве разрывной машины Шоппера (рис. 24), снабженной механическим приводом. В момент разрыва образца по показанию стрелки на неподвижной шкале фиксируется значение разрывного усилия на образце F_p . Шкала разрывной машины проградуирована в устаревших единицах [кг.силы], которые необходимо перевести в систему СИ – в [Н].

Предел прочности на разрыв определяется по формуле

$$\sigma_p = F_p / S = F_p / (b \cdot h), \quad [\text{Н/м}^2 = \text{Па}]. \quad (33)$$

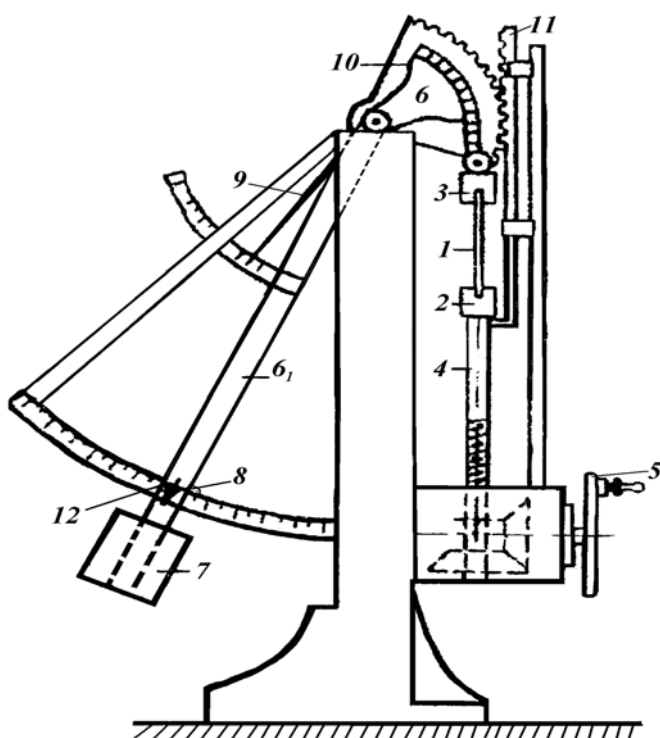


Рис. 24. Схема устройства разрывной машины фирмы Шоппер:

1 – исследуемый образец; 2,3 – зажимное устройство; 4 – вертикальный винт; 5 – маховик; 6 – короткое плечо криволинейного рычага; 6₁ – длинное плечо рычага; 7 – сменный груз; 8 – собачка; 9 – стрелка верхней подвижной шкалы для отсчета удлинения; 10 –

зубчатый сектор; 11 – рейка; 12 – стрелка нижней неподвижной шкалы для отсчета статической

нагрузки на образец в момент разрыва последнего

Значение толщины конкретного образца бумаги h определяется при помощи микрометра в месте разрыва или задается преподавателем.

Статистическая обработка полученных результатов

После каждого опыта проводится статистическая обработка результатов. По методике и формулам (23-25), приведенным в работе 3, при этом определяются значения: $\overline{F}_p$, $\overline{\sigma}_p$, $\Delta\sigma_p$ и $K_{\text{вар}}$ (%).

Порядок выполнения работы

А. Предел механической прочности на разрыв целлюлозной бумаги, изготовленной из древесины лиственницы и сосны ($h_{\text{ср}}=120$ мкм). В качестве результатов рекомендуется использовать данные испытаний, выдаваемые преподавателем и полученные ранее при заводских испытаниях и в НИР кафедры, приводимые например в виде табл. 14.

Т а б л и ц а 14

F_p , Н	17,9	18,0	18,1	18,4	18,9	18,8	18,8	18,0	18,2	18,4	сосна
F_p , Н	10,2	10,8	12,1	11,5	10,0	12,9	12,7	11,0	11,2	10,0	лиственница

$$\overline{F}_p = \dots, \overline{\sigma}_p = \dots, \Delta\sigma_p = \dots, K_{\text{вар}} = \dots$$

Определить предел прочности на разрыв бумаги из древесины сосны и лиственницы. Провести статистическую обработку результатов эксперимента. Сравнить и объяснить различия в механической прочности бумаги на основе сопоставления параметров исходного сырья и особенностей технологического цикла производства бумаги.

Б. Предел прочности на разрыв кабельной и конденсаторной диэлектрической бумаги. Записать результаты в табл. 15.

Т а б л и ц а 15

F_p , Н											Кабельная
-----------	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	-----------

$h_{\text{МКМ}}$											$h_{\text{ср}} = 120 \text{ мкм}$
$F_p, \text{ Н}$											конденсатор- ная
$h_{\text{МКМ}}$											$h_{\text{ср}} = 10 \text{ мкм}$

$$\overline{F_p} = \dots, \overline{\sigma_p} = \dots, \Delta\sigma_p = \dots, K_{\text{вар}} = \dots$$

Определить предел прочности на разрыв. Провести статистическую обработку результатов. Объяснить различия в механических характеристиках диэлектрической бумаги различного назначения.

С. Предел прочности на разрыв целлюлозной бумаги до и после отбеливания хлором ($h = 120 \text{ мкм}$). Записать результаты в табл. 16.

Т а б л и ц а 16

$F_p, \text{ Н}$	12,2	12,1	12,7	12,5	12,4	12,8	12,9	12,0	12,0	12,1	без обработки хлором
$F_p, \text{ Н}$											с обработкой хлором

$$\overline{F_p} = \dots, \overline{\sigma_p} = \dots, \Delta\sigma_p = \dots, K_{\text{вар}} = \dots$$

Определить предел прочности на разрыв. Провести статистическую обработку результатов. Объяснить различия в механических характеристиках испытанных бумаг.

Содержание отчета

Отчет должен включать:

1. Цель работы.
2. Принципиальную схему установки.
4. Расчетные формулы, использованные при вычислении $\overline{F_p}$, $\overline{\sigma_p}$, $\Delta\sigma_p$ и $K_{\text{вар}}$.
5. Примеры численных расчетов.

6. Таблицы с экспериментальными и расчетными данными.
7. Статистическую обработку результатов эксперимента.
8. Выводы по работе, содержащие подробный анализ результатов каждого из проведенных экспериментов.

Контрольные вопросы

1. Что называют механической прочностью?
2. Что такое механическое напряжение в испытуемом образце?
3. Как определить относительную деформацию?
4. Что такое кривая деформации материала?
5. Назовите основные участки деформационной кривой.
6. Чем различаются деформационные кривые жесткого, эластичного и высокоэластичного материалов?
7. В чем разница между упругими и пластическими деформациями?

Библиографический список

1. Богородицкий Н.П., Пасынков В.В., Тареев Б.М. Электротехнические материалы: Учеб. для вузов.– Л.: Энергоатомиздат, 1985. – 304 с.
2. Тареев Б.М. Физика диэлектрических материалов. М.: Энергоиздат, 1982. – 320 с.
3. Пасынков В.В., Сорокин В.С. Материалы электронной техники: Учеб. для вузов. – СПб.: Изд-во «Лань», 2001. – 368 с.
4. Казарновский Д.М., Тареев Б.М. Испытание электроизоляционных материалов и изделий. – Л.: Энергия, 1980. – 214 с.
5. Справочник по электротехническим материалам: В 3 т. / Под ред. Ю.В. Корицкого и др. М.: Энергоатомиздат, 1986 - 1987. Т.1.1986. 368с.; Т.2.1987. 464 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	3
Техника безопасности.	4
Работа 1. Исследование электропроводности диэлектриков	6
Работа 2. Исследование поляризации диэлектриков и диэлектрических потерь.	18
Работа 3. Исследование электрической прочности диэлектриков.	34
Работа 4. Определение механической прочности твердых диэлектриков	53
Библиографический список	62

ОСНОВНЫЕ СВОЙСТВА ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ.
МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ. ТЕХНОЛОГИЯ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ
Часть 2. Электротехнические материалы

Методические указания к лабораторным работам

Составители: *Журавлева Наталья Михайловна,*
Мосейчук Алексей Григорьевич,
Муравьева Татьяна Николаевна,
Полонский Юрий Александрович

Редактор *Е.А. Пряникова*
Технический редактор *А.И. Колодяжная*
Оригинал-макет подготовлен составителями

Директор Издательства СПбГПУ *А.В. Иванов*

Свод. темплан 2002 г.

Лицензия ЛР № 020593 от 07.08.97.
Налоговая льгота – Общероссийский классификатор продукции
ОК 005-93, т.2; 95 3005 – учебная литература

Подписано в печать	Формат 60х84/16
Усл.печ.л. 3,75.	Уч.-изд.л. 3,75.
Заказ	С 62
Тираж 500.	

Санкт-Петербургский Государственный политехнический университет.
Издательство СПбГПУ, член Издательско-полиграфической ассоциации
вузов Санкт-Петербурга.
Адрес университета и издательства: 195251, Санкт-Петербург,
Политехническая, 29

Отпечатано на ризографе RN – 2000 FP
Поставщик оборудования – фирма “Р - ПРИНТ”
Телефон: (812) 110-65-09
Факс: (812) 315-23-04