

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования

«Воронежский государственный технический университет»

Кафедра теплогазоснабжения и нефтегазового дела

## **ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ**

*МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ  
к выполнению практических занятий  
для студентов направления  
13.03.01 «Теплоэнергетика и теплотехника»  
всех форм обучения*

Воронеж 2023

УДК 621.3(07)  
ББК 31.2я7

*Составитель*  
*А. В. Николайчик*

**Электрические материалы:** методические указания к выполнению практических занятий для студентов направления подготовки 13.03.01 «Теплоэнергетика и теплотехника» всех форм обучения / ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»; сост.: А. В. Николайчик. — Воронеж: ВГТУ, 2023. — 27 с.

Методические указания содержат теоретические сведения, необходимые для выполнения практических занятий.

Предназначены для студентов бакалавриата направления подготовки 13.03.01 «Теплоэнергетика и теплотехника» всех форм обучения.

Методические указания подготовлены в электронном виде и содержатся в файле МУ\_ПЗ\_ЭМ.pdf.

Ил. 10. Табл. 9. Библиогр.: 6 назв.

**УДК 621.3(07)**  
**ББК 31.2я7**

*Рецензент — В. В. Соврасов, директор строительной компании  
ООО СК «ЭНЕРГОАЛЬЯНС»*

*Издается по решению редакционно-издательского совета  
Воронежского государственного технического университета*

## ВВЕДЕНИЕ

Цель учебно-методического пособия – приобретение студентами теоретических знаний и практических навыков по вопросам представлений о классификации, свойствах и техническом назначении материалов, используемых в электроэнергетике в соответствии с основной задачей дисциплины «Электрические материалы».

Учебно-методическое пособие раскрывает следующие компетенции:

ПК-4 — Способен организовать работы по ремонту оборудования, трубопроводов, арматуры тепловых и газовых сетей

ПК-5 — Способен организовать и выполнить работы по разработке мероприятий по регулировке и наладке энергетических сетей.

Данное пособие содержит 6 практических работ по дисциплине «Электрические материалы». Практические работы выполняются в специализированных аудиториях кафедры «Теплогазоснабжения и нефтегазового дела» факультета инженерных сетей и сооружений.

## ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА № 1

**Тема:** Определение электрической прочности жидких диэлектриков.

**Цель работы:** ознакомить со схемой аппарата АМИ-60 для испытания жидких диэлектриков, сформировать умения рассчитывать электрическую прочность жидких диэлектриков

**Оснащение:** 1. Образцы жидких диэлектриков  
2. Схема аппарата АМИ-60

### Теоретические сведения

Для повышения электрической прочности изоляции, трансформаторов, кабелей и бумажных конденсаторов применяют жидкие диэлектрики (трансформаторное и конденсаторные масла, совол, октол, «калория-2»).

Классифицируют жидких диэлектриков по нескольким признакам:

По степени горючести:

- горючие;
- негорючие;

По назначению, для:

- конденсаторов;
- контакторных устройств управления напряжением при нагрузках;
- трансформаторов;
- изоляции оборудования высокого напряжения;
- систем циркуляционного охлаждения;

— кабелей.

По химической основе:

— синтетические жидкости (полиизобутилены, разнообразные эфиры, углеводороды и др.);

— нефтяные масла.

По максимально допустимой рабочей температуре жидкие диэлектрики разделены на несколько групп для температур от 70 °С до 250 °С. Для температур до 95 градусов подходят нефтяные масла, тогда как для более высоких температур используются только синтетические ЖД.

Трансформаторное масло используют как диэлектрик в различной высоковольтной аппаратуре, трансформаторах масло является также охлаждающей средой, в масляных выключателях – дугогасящей средой.

Масло характеризуется достаточно высокой электрической прочностью (12-20 кВ/мм), малыми диэлектрическими потерями, удовлетворительной теплопроводностью (0,0015 Вт/см·град). Оно, как и другие жидкие диэлектрики, способно восстанавливать свою электрическую прочность после пробоя. Это масло можно очищать и сушить, тем самым, восстанавливая его электроизоляционные свойства.

Трансформаторное масло стареет (окисляется) под влиянием кислорода воздуха, высокой температуры и солнечного света. Процессу старения масла способствует соприкосновение его с лаковой изоляцией и металлами (особенно с медью). Масло обладает гигроскопичностью, понижающей его электрическую прочность.

Одной из наиболее важных электрических характеристик жидких диэлектриков является их электрическая прочность  $E_{пр}$ .

$$E_{пр} = U_{пр}/h \text{ (кВ/мм)}, \quad (1)$$

где  $U_{пр}$  — пробивное напряжение, кВ.;

$h$  — толщина испытываемого слоя жидкого диэлектрика (расстояние между электродами), мм.

Величина пробивного напряжения зависит от формы и размеров электродов, расстояния между ними, давления и температуры жидкого диэлектрика, характера приложенного напряжения (постоянное, переменное), степени загрязнения масла волокнами, водой и другими примесями. Снижение электроизоляционных свойств жидкого диэлектрика может привести к аварии в электрической установке, поэтому для обеспечения нормальной работы маслonaполненной аппаратуры периодически проверяют качество диэлектрика и, в первую очередь, его электрическую прочность.

Для испытания электроизоляционных жидкостей на электрическую прочность применяют аппарат АМИ – 60 (рис. 1.1)

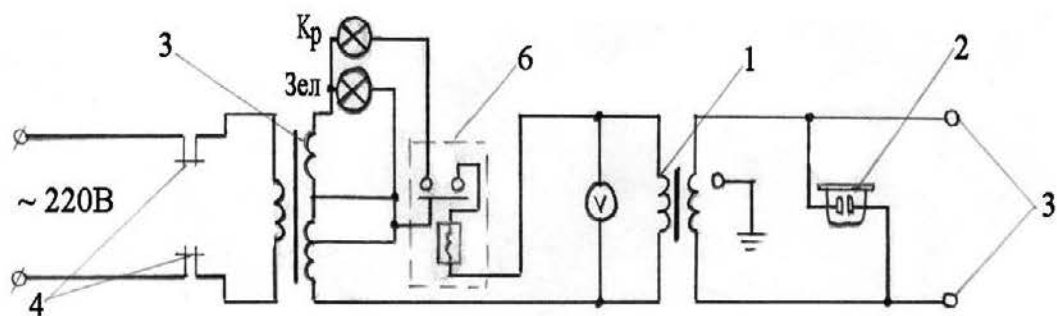


Рис. 1.1. Принципиальная схема аппарата АМИ-60 для определения электрической прочности трансформаторного масла:

1 — испытательный трансформатор; 2 — сосуд с электродами;  
 3 — высоковольтные выводы для присоединения испытываемых образцов твердых диэлектриков; 4 — блок-контакты крышки; 5 — регулировочный трансформатор; 6 — автоматический выключатель

Аппарат АМИ-60 питается от сети 220В, вторичное напряжение повышается до 60кВ.

Испытание производят в специальном фарфоровом сосуде 3 (рис. 1.2), который заполнен жидким диэлектриком 2. Electrodes 1 изготовлены из латуни и имеют диаметр 25 мм, толщину — 8 мм. Расстояние между электродами можно изменять, вращая их. Щупом измеряют величину зазора.

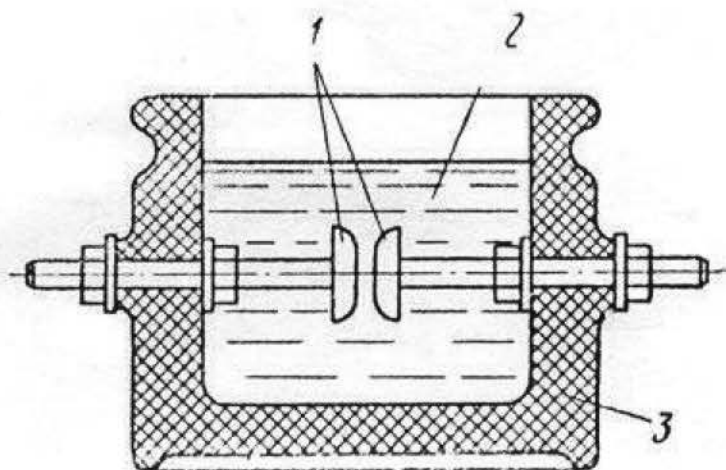


Рис. 1.2. Сосуд с электродами для определения электрической прочности жидких диэлектриков: 1 — латунные электроды; 2 — жидкий диэлектрик;  
 3 — сосуд

Перед испытанием устанавливают зазор между электродами 2,5 мм. В сосуде должно быть 500мл жидкого диэлектрика. При включении аппарата в сеть, загорается зеленая лампа. При включении автоматического выключателя 6 (рис. 1.1), подается напряжение на трансформатор 1 (при этом загорается красная лампа). Плавно повышают напряжение регулировочного трансформатора 5,

до тех пор, пока не наступит пробой жидкого диэлектрика, сопровождающийся появлением сплошной искры между электродами.

Пробивным считают наибольшее напряжение, предшествующее пробоем, которое определяется вольтметром.

Так испытывают все виды жидких диэлектриков: трансформаторное масло, конденсаторное масло, кабельное масло.

## Отчёт по работе № 1

Тема:

Цель:

### Порядок выполнения работы:

Задание № 1: Дать краткое описание и изобразить схему аппарата АМИ-60.

Задание № 2: Ответить на вопросы:

2.1. По какой формуле определяется электрическая прочность?

2.2. Какие факторы влияют на электрическую прочность трансформаторного масла?

2.3. Какими способами повышают электрическую прочность трансформаторного масла?

2.4. В каких электрических аппаратах используется трансформаторное масло?

2.5. От каких факторов зависит величина пробивного напряжения?

3. Заполните табл. 1, произведя необходимые расчёты:

Таблица 1

### Электрическая прочность диэлектрических материалов

№ п/п	Жидкий диэлектрик	h (мм)	U <sub>пр</sub> (кВ)	E <sub>пр</sub> (кВ/мм)
1	трансформаторное масло	2,5	75	
2	кабельное масло	2,5	7	
3	конденсаторное масло	2,5	27	

Выводы:

## ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА № 2

**Тема:** Определение температуры вспышки паров трансформаторного масла.

**Цель:** Ознакомить с технологией измерения температуры вспышки паров трансформаторного масла с использованием прибора Бренкена. Научить определять температуру вспышки паров трансформаторного масла по справочной литературе.

- Оснащение:** 1. Плакат: схема прибора Бренкена  
2. Образцы жидких диэлектриков.

### **Теоретические сведения**

На современных электростанциях и подстанциях имеется большее количество трансформаторного масла. Оно является горючим материалом и поэтому очень опасно в пожарном отношении.

Температурой вспышки называется температура, при которой пары масла, нагреваемого в закрытом сосуде, образуют с воздухом смесь, вспыхивающую при поднесении к ней пламени. Если масло нагреть выше температуры вспышки, то наступит такой момент, когда при поднесении пламени к маслу оно загорится. Температура вспышки паров трансформаторного масла, находящегося в закрытом тигле должна быть не ниже 135°C.

При уменьшении температуры вспышки паров масла увеличивается интенсивность его испарения, что приводит к изменению его состава и образованию вредных и взрывоопасных газов. Иногда количество газов резко увеличивается в связи с повреждениями в трансформаторе. Об этом сигнализирует газовая защита трансформатора. Чтобы предотвратить аварии в трансформаторах и масляных выключателях и выявить возможные повреждения аппаратов, периодически определяют температуру вспышки масла.

Для определения температуры вспышки нефтепродуктов используют прибор Бренкена.

Для определения температуры вспышки паров трансформаторного масла, его заливают в тигель 1, предварительно промытый бензином. Уровень масла в тигле должен быть ниже края тигля на 12 мм. Нагревают тигель с песчаной баней 2 со скоростью 10°C в минуту, затем снижают скорость нагрева до 4°C в минуту за 40°C до ожидаемой температуры вспышки. За 10°C до ожидаемой температуры вспышки по краю тигля проводят пламенем.

Моментом вспышки трансформаторного масла считается появление большого синего пламени над всей поверхностью масла.

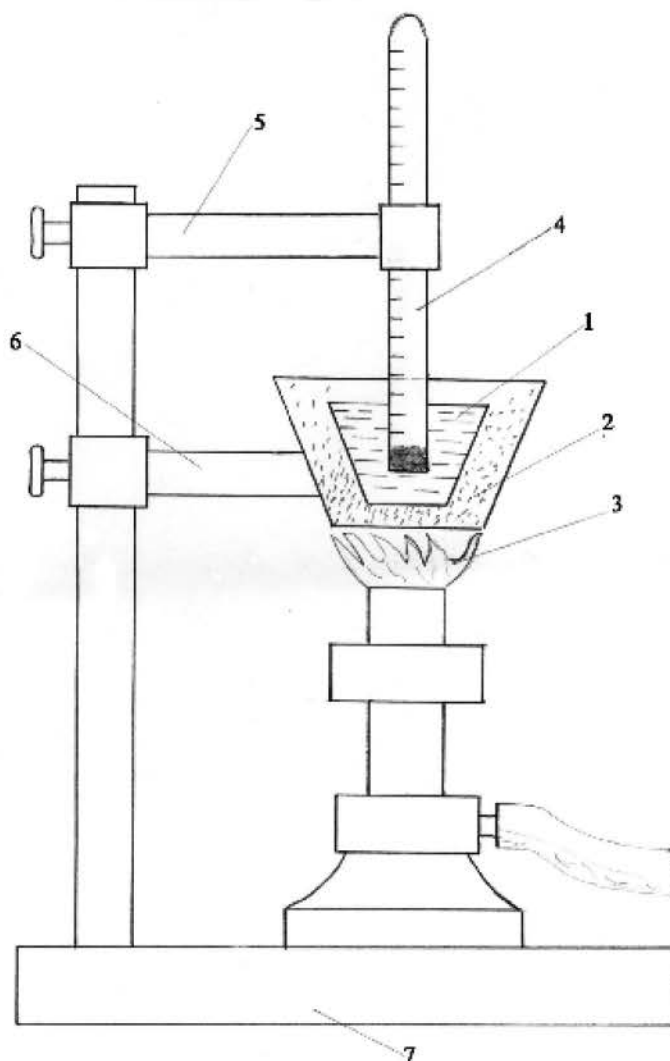


Рис. 2.1. Прибор Бренкена:

1 — стальной тигель для испытываемой жидкости; 2 — баня, заполненная сухим песком; 3 — спиртовая горелка; 4 — термометр; 5 — держатель термометра; 6 — держатель тигля; 7 — стойка прибора для крепления держателя термометра, тигля и установки горелки

## Отчёт по работе № 2

Тема:

Цель:

### Порядок выполнения работы:

1. Дать краткое описание прибора Бренкена и выполнить рисунок прибора.
2. Опишите технологию определения температуры вспышки паров трансформаторного масла с помощью прибора Бренкена.
3. Ответить на вопросы:



- 3.1. Что называется, температурой вспышки паров трансформаторного масла?
  - 3.2. К каким последствиям приводит уменьшение температуры вспышки паров трансформаторного масла?
  - 3.3. Каковы недостатки трансформаторного масла?
  - 3.4. Какие есть заменители трансформаторного масла?
4. Заполните табл. 2 (используя справочник):

Таблица 2

Значения температуры вспышки жидких диэлектриков

№ п/п	Вид жидкого диэлектрика	Температура вспышки, не менее, °С
1	Трансформаторное масло	
2	Совол	
3	Октол	

Выводы:

### ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА № 3

**Тема:** Определение электрической прочности твёрдых диэлектриков.

**Цель работы:** сформировать умения рассчитывать электрическую прочность твёрдых диэлектриков и изучить принципиальную схему установки АМИ – 60 для измерения пробивного напряжения.

**Оснащение:** 1. Принципиальные схемы установки для измерения пробивного напряжения (плакат) АМИ – 60.

2. Образцы твёрдых диэлектриков: кабельная бумага, гетинакс, стекло, пластмасса.

#### Теоретические сведения

При увеличении напряжения, приложенного к изоляции в электрической установке, может произойти электрический пробой изоляции. Через диэлектрик проходит ток очень большой величины, и в диэлектрике образуется проводящий канал с малым электрическим сопротивлением. В результате пробоя диэлектрик оказывается непригодным к дальнейшему применению. Напряжение, при котором происходит пробой, называется пробивным, обозначается  $U_{пр}$  и выражается в киловольтах.

Способность электроизоляционных материалов противостоять пробую называется электрической прочностью. Электрическая прочность  $E_{пр}$  определяется величиной пробивной напряжённости электрического поля и вычисляется по формуле

$$E_{пр} = U_{пр}/h \text{ (кВ/мм)}, \quad (1)$$

где  $h$  – толщина диэлектрика в месте пробоя, мм.

Величина электрической прочности твёрдых диэлектриков зависит от их структуры, толщины, окружающей температуры и других факторов. Электрическая прочность твёрдых диэлектриков зависит от их структуры, толщины, окружающей температуры и других факторов. Электрическая прочность ряда электроизоляционных материалов может быть повышена пропиткой их маслами, лаками или компаундами. Для обеспечения надёжности работы электрических установок рабочее напряжение ( $U_{раб}$ ) электроизоляционных материалов должно быть значительно ниже пробивного напряжения ( $U_{пр}$ ).

Для испытания твёрдых диэлектриков на пробой можно использовать аппарат АМИ-60, который также используется для определения электрической прочности трансформаторного масла.

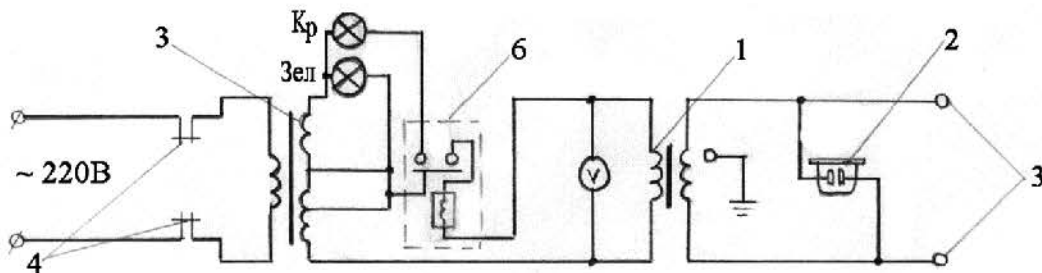


Рис. 3.1 Принципиальная схема аппарата АМИ-60: 1 — испытательный трансформатор; 2 — сосуд с электродами; 3 — высоковольтные выводы для присоединения испытываемых образцов твёрдых диэлектриков; 4 — блок-контакты крышки; 5 — регулировочный трансформатор; 6 — автоматический выключатель

Образцы для определения электрической прочности в однородном электрическом поле выполняются в виде квадратных или круглых пластин.

При подаче напряжения сети загорается лампа зелёного цвета, которая указывает на наличие напряжения на автотрансформаторе 5. Затем включают автоматический выключатель 6, и загорается лампа красного цвета, указывающая на наличие напряжения на первичной обмотке высоковольтного трансформатора.

Регулировочным трансформатором плавно увеличивают напряжение до наступления пробоя. В момент пробоя диэлектрика автоматический выключатель 6 срабатывает. В этот момент записывают показание вольтметра. Это напряжение является пробивным. Зная пробивное напряжение и толщину диэлектрика можно вычислить электрическую прочность.

## Отчёт по работе № 3

Тема:

Цель:

### Порядок выполнения

1. Изобразить схему аппарата АМИ – 60.
2. Ответить на вопросы:
  - 2.1. В чём различие в терминах: пробивное напряжение и электрическая прочность?
  - 2.2. Почему у твердых диэлектриков, пропитанных жидкими электроизоляционными материалами увеличивается электрическая прочность.
  - 2.3. Какого назначения регуляровочного трансформатора в схеме аппарата АМИ – 60 (рис. 3.1)?
  - 2.4. Какие факторы влияют на электрическую прочность твёрдых диэлектриков?
3. Вычислить  $E_{пр}$  по формуле (1) результаты вычислений записать в табл. 3.

Таблица 3

Расчетные значения электрической прочности твердых диэлектриков

№ п/п	Наименование материала	h (мм)	$U_{пр}$ (кВ)	$E_{пр}$ (кВ/мм)
1	Пластмасса	1	4	
2	Гетинакс	2	24	
3	Стекло	2	40	
4	Кабельная бумага	3	18	

Выводы:

## ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА № 4

**Тема:** Определение диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь твердых диэлектриков.

**Цель работы:** сформировать умения рассчитывать диэлектрическую проницаемость, выбирать твердые диэлектрики по значению диэлектрической проницаемости ( $\epsilon$ ) и тангенс угла диэлектрических потерь ( $\operatorname{tg} \delta$ ), используя справочную литературу.

**Оснащение:** 1. Схема прибора МЛЕ-1.

2. Образцы конденсаторов (слодяной, бумажный, керамический).

### Теоретические сведения

Диэлектрическая проницаемость и тангенс угла диэлектрических потерь – важнейшие характеристики электроизоляционных материалов. Диэлектрической проницаемостью (или относительной диэлектрической проницаемостью) называется отношение абсолютной диэлектрической проницаемости вещества  $\epsilon_a$  к диэлектрической постоянной  $\epsilon_0$

$$\epsilon = \frac{\epsilon_a}{\epsilon_0} . \quad (2)$$

Значение относительной диэлектрической проницаемости электроизоляционных материалов можно вычислить, сравнив емкости двух конденсаторов, одинаковых по форме и геометрическим размерам:

$$\epsilon = \frac{C_x}{C_0} , \quad (3)$$

где  $C_x$  — емкость конденсатора с испытываемым диэлектриком;

$C_0$  — емкость конденсатора при тех же геометрических размерах, но в случае, когда испытываемый диэлектрик заменен воздухом.

Значение диэлектрической проницаемости исследуемого диэлектрика можно определить, измеряя дважды емкость разборного конденсатора: когда между обкладками данный диэлектрик ( $C_x$ ) и когда между ними воздух ( $C_0$ ).

Используя для измерения плоские (пластинчатые) образцы и электроды, можно применить для вычисления формулу ёмкости плоского конденсатора

$$C_x = 0,0884 \frac{\epsilon S}{h} [нФ] , \quad (4)$$

где  $S$  — площадь образца электродов в  $см^2$ ;

$h$  — толщина диэлектрика в см.

$$\epsilon = \frac{C_x h}{0,0884 S} .$$

Диэлектрическими потерями называют мощность, рассеиваемую в диэлектрике при воздействии на него электрического поля и вызывающую нагрев диэлектрика.

Потери в диэлектрике наблюдаются как при переменном напряжении, так и при постоянном, так как в материале обнаруживается сквозной ток, обусловленный проводимостью. Для оценки способности диэлектрика рассеивать мощ-

ность в электрическом поле пользуются тангенсом угла диэлектрических потерь ( $\operatorname{tg} \delta$ ).

Углом диэлектрических потерь называют угол  $\delta$ , дополняющий до  $90^\circ$  угол фазового сдвига  $\varphi$  между током и напряжением в емкостной цепи.

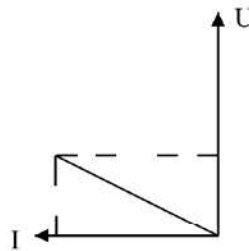


Рис. 4.1. Векторная диаграмма тока и напряжения в реальном конденсаторе

Для идеального диэлектрика  $\delta=0$ , чем больше рассеиваемая мощность, переходящая в теплоту, тем меньше угол фазового сдвига и больше угол  $\delta$ .

Большие диэлектрические потери в изоляционном материале вызывают нагрев изготовленного из него изделия, что может привести к его разрушению.

Обычно для характеристики потерь энергии используют  $\operatorname{tg} \delta$

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{P}{Q} = \frac{U \cdot I \cos \varphi}{U \cdot I \sin \varphi}, \quad (5)$$

где  $P$  — активная мощность;

$Q$  — реактивная мощность

Для измерения ёмкости  $C$  и тангенса угла потерь конденсаторов в диапазоне частот от 400 до 10 000 Гц прямым методом и методом замещения предназначен мост МЛЕ-1 (рис. 4.2).

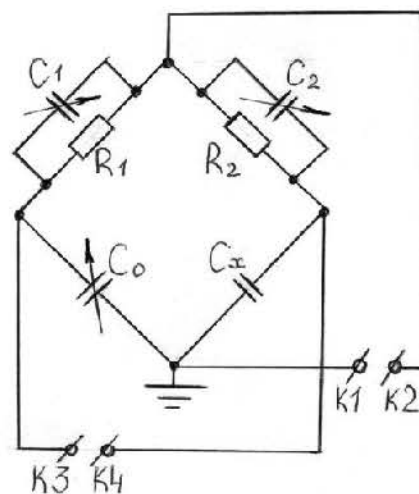


Рис. 4.2. Схема моста МЛЕ-1.

В качестве источника питания прибора может быть использован любой отдельный генератор с частотой 400-10000 Гц.

Наиболее подходящими генераторами являются ЗГ-2А или ЗГ-4.

В приборе МЛЕ-1 использован мостовой метод измерения.

Мостовая схема является уравновешенной, когда ток в измерительной диагонали равен 0. Отсчет измеряемой величины ёмкости и тангенса угла диэлектрических потерь производится в момент баланса моста.

Измеряемые величины определяют по следующим формулам:

$$C_x = \frac{R_1}{R_2} C_0; \quad (6)$$

$$C_x = M \cdot C_0; \quad (7)$$

$$M = \frac{R_1}{R_2} \quad (8)$$

где  $C_x$  — измеряемая ёмкость;

$C_0$  — эталонная ёмкость;

$C_1$  и  $C_2$  — переменные ёмкости;

$R_1$  и  $R_2$  — сопротивления резисторов.

#### Отчёт по работе № 4

Тема:

Цель:

#### Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с теоретическими сведениями.
2. Изобразить схему прибора МЛЕ-1.
3. Ответить на вопросы:
  - 3.1. По какой формуле определяется диэлектрическая проницаемость?
  - 3.2. Для каких изделий диэлектрическая проницаемость материала должно иметь большую величину?
  - 3.3. Какие параметры конденсатора необходимо знать, чтобы определить диэлектрическую проницаемость?
  - 3.4. Какой метод положен в основу работы прибора МЛЕ.
  - 3.5. Какой параметр характеризует потери энергии в конденсаторе?
  - 3.6 Чему равен угол  $\delta$  для идеального диэлектрика?
  - 3.7. К чему могут привести большие диэлектрические потери изоляционных материалов?
  - 3.8. Перечислите факторы, приводящие к увеличению  $\text{tg } \delta$  изоляционных материалов.
4. Рассчитать значение диэлектрической проницаемости и заполнить табл. 4.

Таблица 4

Расчетные значения диэлектрической проницаемости твердых диэлектриков

№ п/п	Вид диэлектрик конденсатора	Задано					Рассчитать	Найти по справочнику $\text{tg } \delta$
		$S$ , см <sup>2</sup>	$h$ , см	$C_0$ , пФ	$R_1$ , Ом	$R_2$ , Ом	$\varepsilon$	
1	Бумага	1	0,2	16	100	1000		
2	Керамика (на основе титаната кальция)	1	0,2	740	100	1000		
3	Слюда (флогопит)	1	0,2	26,5	100	1000		

**Вывод:****ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА № 5****Тема:** Определение нагревостойкости твердых диэлектриков (способ Мартенса).**Цель:** сформировать умения определять по предельно-допустимой рабочей температуре диэлектриков класс нагревостойкости и ознакомить учащихся с методикой определения нагревостойкости, используя справочную литературу.**Оснащение:** 1. Плакат: Схема аппарата Мартенса.

2. Образцы диэлектриков: гетинакс, стекло, непропитанная бумага, пропитанная бумага, миканит, резина, фторопласт.

**Теоретические сведения**

К основным тепловым характеристикам диэлектрика относится нагревостойкость.

*Нагревостойкость* — это способность диэлектрика функционировать при повышенных температурах или при резкой смене температур без недопустимого ухудшения его свойств. Нагревостойкость определяется температурой, при которой происходит недопустимое изменение эксплуатационных характеристик диэлектрика. При воздействии температуры выше допустимой на изоляционный материал ухудшаются его электрические и механические характеристики. Материал может размягчаться, деформироваться, его механическая прочность может уменьшаться, в некоторых случаях может разрушиться, загореться или обуглиться. Все эти изменения зависят от химического состава и структуры материала, условий эксплуатации и конструктивного выполнения изделия.

Одним из наиболее применяемых методов оценки нагревостойкости является метод Мартенса.

Испытываемые образцы, к которым приложено определенное изгибающее усилие, помещают в термостат и нагревают. Температура, при которой образец прогнется, например, на 6 мм для пластмасс от первоначального положения или сломается, является теплостойкостью по Мартенсу.



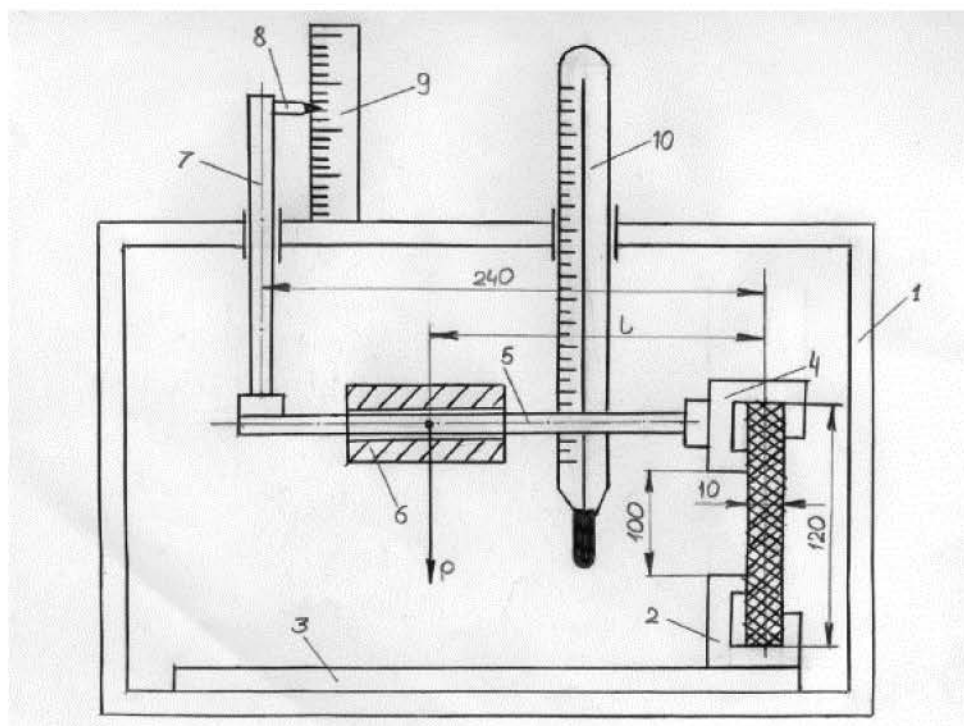


Рис. 5.1. Конструкция аппарата Мартенса:

1 — термостат; 2 — нижний зажим; 3 — основание; 4 — верхний зажим; 5 — рейка; 6 — груз; 7 — стержень; 8 — указатель; 9 — шкала; 10 — термометр

Аппарат Мартенса (рис. 5.1) представляет собой термостат 1, на основании 3 которого установлены зажимы 2 для крепления в них трех стандартных образцов. Зажимы 4 служат для крепления верхних концов образцов. С зажимом 4 соединена рейка 5, по которой может передвигаться груз 6. На конце рейки 5 укреплен стержень 7 с указателем 8, положение которого отмечается на миллиметровой шкале 9. Образец должен иметь постоянное поперечное сечение 15x10 мм и длину 120 мм. Допуск на каждый размер  $\pm 0,2$  мм. Подъем температуры внутри термостата производится терморегулятором. Для контроля за температурой аппарат имеет два термометра 10, шарики которых располагают вблизи испытываемых образцов.

Испытываемые образцы закрепляют в зажимы 2 и 4. Груз располагают на рейке 5 так, чтобы расстояние  $l$  было 150-160 мм. Вес груза 0,65 кг, вес рейки 5 кг. Устанавливают указатель 8 на шкале 9 на ноль. Затем повышают температуру в термостате 1 со скоростью 50 град/ч. По мере повышения температуры образец начинает изгибаться. Температура, при которой указатель опустится на 6 мм или образец сломается, считается нагревостойкостью.

В электрических машинах и аппаратах повышение нагревостойкости, которая обычно определяется нагревостойкостью изоляции, позволяет получить более высокую мощность при неизменных габаритах или же при сохранении мощности достичь уменьшения габаритных размеров и стоимости изделия. Повышение рабочей температуры особенно важно для крановых двигателей, самолетного электрооборудования и других передвижных устройств, где необхо-



димо уменьшить массу и габаритные размеры. В электрических печах, нагревательных приборах, в электросварочной аппаратуре, в осветительных устройствах высокая рабочая температура электрической изоляции определяется особенностями работы всего устройства.

Электротехнические материалы для электрических машин, трансформаторов и аппаратов подразделяются на классы нагревостойкости в соответствии с предельно допустимой рабочей температурой.

Таблица 5.1

Классы нагревостойкости электротехнических материалов

Класс нагревостойкости	Y	F	E	B	F	H	C
Предельно-допустимая рабочая температура, °C	90	105	120	130	155	180	выше180

### Отчёт по работе № 5

Тема:

Цель:

#### Порядок выполнения:

##### Задание № 1:

Ответить на вопросы:

- 1.1. Каким образом характеристики электрических машин и аппаратов зависят от нагревостойкости диэлектриков.
- 1.2. Дайте определение понятия нагревостойкости.
- 1.3. Изложите в чем сущность определения нагревостойкости по Мартенсу.
- 1.4. Назовите классы нагревостойкости изоляционных материалов и соответствующие им предельно-допустимые температуры.
- 1.5. 1.5. Объясните, к чему приводит повышение нагревостойкости изоляционных материалов электрических машин, аппаратов.
2. Дать краткое описание прибора Мартенса.
3. Заполнить таблицу 5.2 (используя справочник):

Таблица 5.2

Характеристики твердых диэлектриков

№ п/п	Изоляционный материал	Предельно-допустимая температура	Класс нагревостойкости
1	непропитанная бумага		
2	пропитанная бумага		
3	гетинакс		
4	стекло		
5	миканит		
6	резина		
7	фторопласт		

Выводы:

## ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА № 6

**Тема:** Определение твёрдости конструкционных материалов

**Цель работы:** Сформировать умения определять твёрдость металлов и сплавов способом Бринелля с помощью исходных данных по справочной литературе

**Оснащение:** 1. Плакат «Испытание на твёрдость».  
2. Таблица «Диаметр твёрдости».  
3. Таблица «Определение чисел твёрдости НВ (по ГОСТ 9015-59)».

### Методические указания

Твёрдостью называют способность материала сопротивляться проникновению в него более твёрдого тела, не получающего при этом остаточной деформации. Высокой твёрдостью должны обладать инструменты, а также многие детали конструкций. Твёрдость металла определяется наиболее распространёнными способами Бринелля.

Способ Бринелля основан на вдавливании в испытываемую поверхность стального закалённого шарика. Число твёрдости НВ – это отношение нагрузки, действующей на стальной шарик, к площади поверхности сферического отпечатка.

$$HВ = \frac{F}{S} = \frac{H}{\text{мм}^2} \text{ (МПа)} . \quad (9)$$

Для определения площади  $S$  измеряют диаметр отпечатка и подсчитывают площадь по формуле

$$S = \frac{\pi D}{2} (D - \sqrt{D^2 - d^2}) \text{ мм}^2 , \quad (10)$$

где  $F$  — нагрузка (Н);  
 $D$  — диаметр шарика (мм);  
 $d$  — диаметр отпечатка (мм).

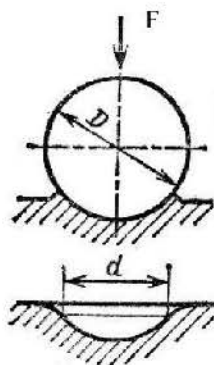


Рис. 6.1 Схема испытания на твёрдость

ГОСТ 9012-59 устанавливает зависимость между диаметром шарика, нагрузкой, продолжительностью выдержки под нагрузкой материала и толщиной испытываемого образца (табл. 6.3).

Твёрдость по способу Бринелля определяют на специальном рычажном прессе (рис. 6.2).

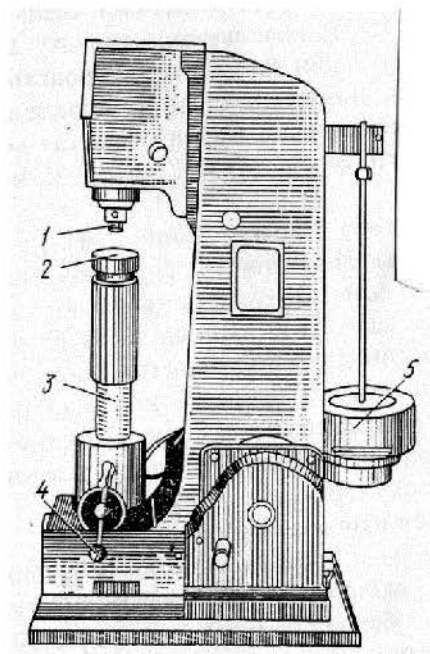


Рис. 6.2. Рычажный пресс для определения твёрдости:

1 — оправка с шариком; 2 — столик; 3 — винт; 4 — рукоятка; 5 — груз

Испытываемый образец устанавливают на столике 2 (рис. 6.2) и вводят его в соприкосновение со стальным шариком 1. Включив двигатель пресса, создают нужное давление  $F$  (для черных металлов оно равно 3000 кг, для цветных металлов – 1000 кг). Для испытания используют стальные закалённые шарики диаметрами 2,5; 5 и 10 мм.

Нагрузку прикладывают плавно, повышая её до требуемой величины. Доведя нагрузку до необходимой величины, выдерживают её в течение 10 – 15 сек (для чёрных металлов), 10-180 сек (для цветных металлов), а затем снимают и измеряют диаметр отпечатка  $d$ , после этого рассчитывают твёрдость испытываемого материала. Для точного измерения диаметра отпечатка пользуются микроскопом, если его нет, то измеряют при помощи специальной лупы:

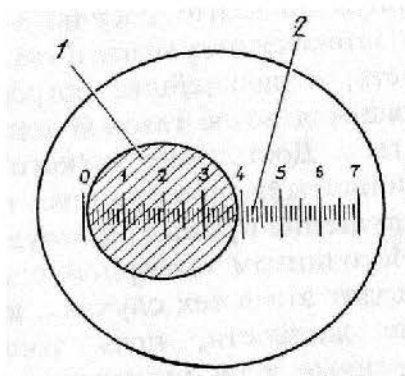


Рис. 6.3. Лупа с мерной сеткой: 1 — лунка; 2 — мерная сетка (диаметр отпечатка  $d = 3,9$  мм)

Испытание проводят дважды и затем определяют средний диаметр отпечатка по формуле

$$d_{\text{ср}} = \frac{d_1 + d_2}{2}. \quad (11)$$

Твёрдость материалов, определяемая способом Бринелля, не должна превышать 450 НВ.

### Отчёт по работе № 6

Тема:

Цель:

### Порядок выполнения работы

1. Изобразить схему испытания конструкционных материалов на твердость способом Бринелля.
2. Дать краткой описание пресса для определения твёрдости конструкционных материалов.
3. Ответить на вопросы
  - 3.1. Что понимают под твёрдостью материалов?
  - 3.2. В каких единицах измеряют твёрдость материалов?
4. С помощью исходных данных (табл. 6.2) и справочной (табл. 6.3) рассчитать твёрдость конструкционных материалов и примерный предел прочности  $G_B$

**$G_B \approx 0,36$  НВ - для стали,  $G_B \approx 0,5$  НВ - для сплавов меди**

**$G_B \approx 0,4$  НВ – для сплавов алюминия**

Результаты вычислений записать в табл. 6.1.

Таблица 6.1

## Результаты проводимых вычислений

№ образца	Наименование материала образца	Условия испытания			Диаметр отпечатка			НВ Н/мм <sup>2</sup> (МПа)	Г <sub>В</sub> Н/мм <sup>2</sup> (МПа)
		D, мм	F, кг	Время выдержки	d <sub>1</sub>	d <sub>2</sub>	d <sub>ср</sub>		
1									
2									
3									

Выводы:

Таблица 6.2

## Варианты задания

№ о образца	Наименование металла образца	Условия испытания			Варианты					
		D, мм	F, кг	Время выдержки	I d <sub>1</sub> /d <sub>2</sub>	II d <sub>1</sub> /d <sub>2</sub>	III d <sub>1</sub> /d <sub>2</sub>	IV d <sub>1</sub> /d <sub>2</sub>	V d <sub>1</sub> /d <sub>2</sub>	VI d <sub>1</sub> /d <sub>2</sub>
1	Сталь	10	3000	10 с	3,24	4,52	5,32	3,00	4,41	3,84
					3,22	4,54	5,30	3,02	4,43	3,86
2	Медный сплав	10	1000	30 с	4,41	4,64	3,93	3,86	4,63	4,99
					4,43	4,66	3,95	3,88	4,65	4,99
3	Алюминиевый сплав	10	1000	60 с	5,07	5,11	4,70	4,53	5,15	5,11
					5,09	5,13	4,70	4,51	5,17	5,13

Таблица 6.3

## Определение чисел твёрдости НВ (по ГОСТ 9015-59)

Диаметр отпечатка d <sub>ср</sub>	Число твёрдости по Бринеллю при нагрузке Р (кг), равной			Диаметр отпечатка d <sub>ср</sub>	Число твёрдости по Бринеллю при нагрузке Р (кг), равной		
	3000	1000	500		3000	1000	500
1	2	3	4	5	6	7	8
2.89	448	130	35.0	3.28	345	115	28.8
2.90	444	129	34.8	3.29	343	114	28.6
2.91	441	128	34.6	3.30	341	114	28.4
2.92	438	128	34.3	3.31	339	113	28.2
2.93	436	127	34.1	3.32	337	112	28.1
2.94	432	126	33.9	3.33	335	112	27.9
2.95	429	125	33.7	3.34	333	111	27.7
2.96	426	124	33.4	3.35	331	110	27.6
2.97	423	123	33.2	3.36	329	110	27.4
2.98	420	123	33.0	3.37	326	109	27.2
2.99	417	122	32.7	3.38	325	108	27.1
3.00	415	121	32.5	3.39	323	108	26.9
3.01	412	120	32.3	3.40	321	107	26.7

Продолжение табл. 6.3

3.02	409	120	32.1	3.41	319	106	26.6
3.03	406	119	31.9	3.42	217	106	26.4
3.04	404	118	31.7	3.43	315	105	26.2
3.05	401	117	31.5	3.44	313	104	26.1
3.06	398	117	31.3	3.45	311	104	25.9
3.07	395		31.1	3.46	309	103	25.8
3.08	393		30.9	3.47	307	102	25.6
3.09	390		30.7	3.48	306	102	25.5
3.10	388		30.5	3.49	304	101	25.3
3.11	385		30.3	3.50	302	101	25.2
3.12	383		30.1	3.51	300	100	25.0
3.13	380		29.9	3.52	298	99.5	24.9
3.14	378		29.7	3.53	297	98.9	24.7
3.15	375		29.5	3.54	295	98.3	24.6
3.16	373		29.3	3.55	293	97.7	24.5
3.17	370		29.2	3.56	292	97.2	24.3
3.18	368			3.57	290	69.6	24.2
3.19	366			3.58	288	96.1	24.0
3.20	363			3.59	286	95.5	23.9
3.21	361			3.60	285	95.0	23.7
3.22	359			3.61	283	94.4	23.6
3.23	356			3.62	282	93.9	23.5
3.24	354			3.63	280	93.3	23.3
3.25	352			3.99	230	76.6	19.2
3.26	350			4.00	229	76.3	19.1
3.27	347	116	29.0	4.01	228	75.9	19.0
3.64	278	92.8	23.2	4.02	226	75.5	18.9
3.65	277	92.3	23.1	4.03	225	75.1	18.8
3.66	275	91.8	22.9				
3.67	274	91.2	22.8				
3.68	272	90.7	22.7				
3.69	271	90.2	22.6	4.04	224	74.3	18.7
3.70	269	89.7	22.4	4.05	223	74.3	18.6
3.71	268	89.2	22.3	4.06	222	73.9	18.5
3.72	266	88.7	22.2	4.07	221	73.5	18.4
3.73	265	88.2	22.1	4.08	219	73.2	18.3
3.74	263	87.7	21.9	4.09	218	72.9	18.2
3.75	262	87.2	21.8	4.10	217	72.4	18.1
3.76	260	86.8	21.7	4.11	216	72.0	18.0
3.75	262	87.2	21.8	4.10	215	72.4	18.1
3.76	260	86.8	21.7	4.11	214	72.0	18.0
3.77	259	86.3	21.6	4.12	215	71.7	17.9
3.78	257	85.8	21.5	4.13	214	71.3	17.8
3.79	256	85.3	21.3	4.14	213	71.0	17.7
3.80	255	84.9	21.2	4.15	212	70.6	17.6
3.81	253	84.4	21.1	4.16	211	70.2	17.6
3.82	252	84.0	21.0	4.17	210	69.9	17.5
3.83	250	83.5	20.9	4.18	209	69.5	17.4
3.84	249	83.0	20.8	4.19	208	69.2	17.3
3.85	248	82.6	20.7	4.20	207	68.8	17.2

Продолжение табл. 6.3

3.86	246	81.1	20.5	4.21	205	68.5	17.1
3.87	245	81.7	20.4	4.22	204	68.2	17.0
3.88	244	81.3	20.3	4.23	203	67.8	17.0
3.89	242	80.8	20.2	4.24	202	67.5	16.9
3.90	241	80.4	20.1	4.25	201	67.1	16.8
3.91	240	80.0	20.0	4.26	200	66.8	16.7
3.92	239	79.6	19.9	4.27	199	66.5	16.6
3.93	237	79.1	19.8	4.28	198	66.2	16.5
3.94	236	78.7	19.7	4.29	198	65.8	16.5
3.95	235	78.3	19.6	4.30	197	65.5	16.4
3.96	234	77.9	19.5	4.31	196	65.2	16.3
3.97	232	77.5	19.4	4.32	165	64.9	16.2
3.98	231	77.1	19.3	4.33	164	64.6	16.1
4.34	193	64.2	16.1	4.69	164	54.5	13.6
4.35	192	63.9	16.0	4.70	163	54.3	13.6
4.36	191	63.6	15.9	4.71	162	54.0	13.5
4.37	190	69.6	15.8	4.72	161	53.8	13.4
4.38	189	63.0	15.8	4.73	161	53.5	13.4
4.39	188	62.7	15.7	4.74	160	53.3	13.3
4.40	187	62.4	15.6	4.75	159	53.0	13.3
4.41	186	62.1	15.5	4.76	158	52.8	13.2
4.42	185	61.8	15.4	4.77	157	52.6	13.1
4.43	185	61.5	15.4	4.78	157	52.3	13.1
4.44	184	61.2	15.3	4.79	156	52.1	13.0
4.45	183	60.9	15.2	4.80	156	51.9	13.0
4.46	182	60.6	15.2	4.81	155	51.7	12.9
4.47	181	60.4	15.1	4.82	154	51.4	12.9
4.48	180	60.1	15.0	4.86	154	51.2	12.8
4.49	179	59.8	15.0	4.84	153	51.0	12.8
4.50	179	59.5	14.9	4.85	153	50.7	12.7
4.51	178	59.2	14.8	4.86	152	50.5	12.6
4.52	177	59.0	14.7	4.87	152	50.3	12.6
4.53	176	58.7	14.7	4.88	151	50.1	12.5
4.54	175	58.4	14.6	4.89	150	49.8	12.5
4.55	174	58.1	14.5	4.90	150	49.6	12.4
4.56	174	54.9	14.5	4.91	149	49.4	12.4
4.57	173	57.6	14.4	4.92	148	49.2	12.3
4.58	172	57.3	14.3	4.93	148	49.0	12.3
4.59	171	57.1	14.3	4.94	147	48.8	12.2
4.60	170	56.8	14.2	4.95	146	48.6	12.2
4.61	170	56.5	14.1	4.96	146	48.4	12.1
4.62	169	56.3	14.1	4.97	145	48.2	12.0
4.63	168	56.0	14.0	4.98	144	47.9	12.0
4.64	167	55.8	13.9	4.99	144	47.7	11.9
4.65	167	55.5	13.9	5.00	143	47.5	11.9
4.66	166	55.3	13.8	5.01	143	47.3	11.8
4.67	165	55.0	13.8	5.02	142	47.1	11.8
4.68	164	54.8	13.7	5.03	141	46.9	11.7
5.04	140	46.7	13.7	5.39	141	40.4	10.1
5.05	140	46.5	11.6	5.40	121	40.2	10.1

5.06	139	46.3	11.6	5.41	121	40.0	10.0
5.07	138	46.1	11.5	5.42	120	39.9	9.97
5.08	138	45.9	11.5	5.43	120	39.7	9.94
5.09	137	45.7	11.4	5.44	119	39.6	9.90
5.10	137	45.5	11.4	5.45	119	39.4	9.86
5.11	136	45.3	11.3	5.46	118	39.2	9.82
5.12	135	45.1	11.3	5.47	118	39.1	9.78
5.13	135	45.0	11.3	5.48	117	38.9	9.73
5.14	134	44.8	11.2	5.49	117	38.8	9.70
5.15	134	44.6	11.2	5.50	116	38.6	9.66
5.16	133	44.4	11.1	5.51	116	38.5	9.62
5.17	133	44.2	11.1	5.52	115	38.3	9.58
5.18	132	44.0	11.0	5.53	114	38.2	9.54
5.19	132	43.8	11.0	5.54	114	38.0	9.50
5.20		43.7	10.9	5.55	114	37.9	9.46
5.21		43.5	10.9	5.56	113	37.7	9.43
5.22		43.3	10.8	5.57	113	37.6	9.38
5.23		43.1	10.8	5.58	112	37.4	9.35
5.24		42.9	10.7	5.59	112	37.3	9.31
5.25		42.8	10.7	5.60	111	37.1	9.27
5.26		42.6	10.6	5.61	111	37.0	9.24
5.27		42.4	10.6	5.62	110	36.8	9.20
5.28		42.2	10.6	5.63	110	36.7	9.17
5.29	126	42.1	10.5	5.64	110	36.5	9.14
5.30	126	41.9	10.5	5.65	109	36.4	9.10
5.31	125	41.7	10.4	5.66	109	36.3	9.07
5.32	125	41.5	10.4	5.67	108	36.1	9.03
5.33	124	41.4	10.3	5.68	108	36.0	9.00
5.34	124	41.2	10.3	5.69	107	35.8	8.97
5.35	123	41.0	10.3	5.70	107	35.7	8.93
5.36	123	40.9	10.2	5.71	107	35.6	8.90
5.37	122	40.7	10.2	5.72	106	35.4	8.86
5.38	122	40.5	10.1	5.73	106	35.3	8.83
5.74	105	35.0	8.79	5.87	100	33.4	8.36
5.75	105	34.9	8.76	5.88	99.9	33.3	8.33
5.76	105	34.9	8.73	5.89	99.5	33.2	8.29
5.77	104	34.7	8.69	5.90	99.2	33.1	8.26
5.78	104	34.6	8.66	5.91	98.8	32.9	8.23
5.79	103	34.5	8.63	5.92	98.4	32.8	8.20
5.80	103	34.3	8.59	5.93	98.0	32.7	8.17
5.81	103	34.2	8.56	5.94	97.7	32.6	8.14
5.82	102	34.1	8.53	5.95	97.3	32.4	8.11
5.83	102	33.9	8.49	5.96	96.9	32.3	8.08
5.84	101	33.8	8.46	5.97	96.6	32.2	8.05
5.85	101	33.7	8.43	5.98	96.2	32.1	8.02
5.86	101	33.6	8.40	5.99	96.9	32.0	7.99
				6.00	99.5	31.8	7.96



## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Легостаев, Н. С. Материалы электронной техники : учебное пособие / Легостаев Н. С. — Томск : Эль Контент, Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 2012. — 184 с. — ISBN 978-5-4332-0023-4. — URL: <http://www.iprbookshop.ru/13943.html>
2. Горелик, С. С. Материаловедение полупроводников и диэлектриков: учебник для вузов : рекомендовано МО РФ / С. С. Горелик. — 2-е изд., перераб. и доп. — Москва : МИСИС, 2003 (М. : ППП "Типография "Наука", 2003). — 480 с. : ил. — Библиогр.: с. 472-475. — ISBN 5-87623-018-7 : 708-00;
3. Богородицкий, Н. П. Электротехнические материалы / Н. П. Богородицкий, В. В. Пасынков, Б. М. Тареев. — Л.: Энергоатомиздат, 1985.
4. Привалов, Е. Е. Электротехнические материалы систем электроснабжения : учебное пособие / Е. Е. Привалов. — Москва|Берлин : Директ-Медиа, 2016. — 266 с. — ISBN 978-5-4475-7619-6. — URL: <http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=436753>
5. Справочник по электротехническим материалам / Под ред. Ю. В. Корицкого, В. В. Пасынкова, Б. М. Тареева. — Л.: Энергоатомиздат; т.1, 1986; т.2, 1987; т.3, 1988;
6. Никулин, Н. В. Электроматериаловедение : [учеб. для ПТУ] / Н. В. Никулин. — 3-е изд., испр. и доп. — Москва : Высш. шк., 1989. — 190,[2] с. : ил.; 20 см.; ISBN 5-06-000286-1 : 20 к.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	3
Практическая работа № 1. Определение электрической прочности жидких диэлектриков .....	3
Практическая работа № 2. Определение температуры вспышки паров трансформаторного масла.....	6
Практическая работа № 3. Определение электрической прочности твёрдых диэлектриков .....	9
Практическая работа № 4. Определение диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь твердых диэлектриков .....	11
Практическая работа № 5. Определение нагревостойкости твердых диэлектриков (способ Мартенса).....	15
Практическая работа № 6. Определение твёрдости конструкционных материалов .....	18
Библиографический список .....	25

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ  
к выполнению практических занятий  
для студентов направления  
13.03.01 «Теплоэнергетика и теплотехника»  
всех форм обучения

**Составитель**  
**Николайчик** Алексей Вячеславович

Издается в авторской редакции

Подписано к изданию 03.04.2023.  
Уч.-изд. л. 1,4.

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»  
394006 Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84