

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 7

ВЫБОР ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОГО МАТЕРИАЛА

ВАРИАНТЫ

1. Вариант № 1

1.1. Выбрать материал для гибкой электрической изоляции проводов, работающих в промышленных сетях с $f = 50$ Гц. Толщина изоляции $d = 0,3$ мм; напряжение пробоя $U_{пр} > 9$ кВ; потери $\text{tg}\delta < 0,001$.

1.2. Выбрать материал для межвитковой изоляции (толщиной $d = 0,2$ мм) обмоток электрических машин с удельным электросопротивлением $\rho > 1 \cdot 10^5$ МОм·м и напряжением пробоя $U_{пр} > 3$ кВ.

1.3. Выбрать электроизоляционный материал для жил высоковольтного кабеля с напряжением до 20 кВ.

1.4. Выбрать электроизоляционный материал для шайб, используемых в электрических машинах, толщиной $d = 0,8$ мм и напряжением пробоя $U_{пр} > 2,5$ кВ.

2. Вариант № 2

2.1. Выбрать электроизоляционный материал для каркаса электрической катушки с толщиной стенки $d = 3$ мм; теплостойкостью $T > 50$ °С; напряжением пробоя $U_{пр} > 90$ кВ; прочностью на изгиб $\tau > 1$ МПа; потери $\text{tg}\delta < 0,001$.

2.2. Выбрать электроизоляционный материал для шайб, используемых в электрических машинах, толщиной $d = 0,5$ мм и напряжением пробоя $U_{пр} > 1,5$ кВ.

2.3. Выбрать электроизоляционный материал для пропитки обмоток электрических машин. Теплостойкость материала: > 150 °С; электрические потери $\text{tg}\delta < 0,03$; электрическая прочность $E_{пр} > 40$ МВ/м.

2.4. Выбрать материал для межвитковой изоляции (толщиной $d = 0,2$ мм) обмоток электрических машин с удельным электросопротивлением $\rho > 1 \cdot 10^4$ МОм·м и напряжением пробоя $U_{пр} > 3$ кВ.

3. Вариант № 3

3.1. Выбрать электроизоляционный материал для каркаса электрической катушки с толщиной стенки $d = 5$ мм; теплостойкостью $T > 70$ °С; напряжением пробоя $U_{пр} > 90$ кВ; прочностью на изгиб $\tau > 70$ МПа; потерями $\text{tg}\delta < 0,001$.

3.2. Выбрать гибкий электроизоляционный материал для конструктивных деталей (с толщиной стенки $d = 0,3$ мм) масляных трансформаторов напряжением до 200 кВ, с электрической прочностью $E_{пр} > 0,15$ МВ/м.

3.3. Выбрать электроизоляционный материал для пропитки обмоток электрических машин. Теплостойкость материала: > 150 °С; электрические потери $\text{tg}\delta < 0,01$; электрическая прочность $E_{пр} > 30$ МВ/м.

3.4. Выбрать диэлектрический материал для коллекторных манжет с толщиной стенки $d = 1$ мм, сложной формы и напряжением пробоя $U_{пр} > 30$ кВ.

4. Вариант № 4

4.1. Для изготовления диэлектрической прослойки толщиной $d = 300$ мкм в мощных конденсаторах выбрать электроизоляционный материал с низкими потерями $\operatorname{tg}\delta < 0,0001$; теплостойкостью $T > 200$ °С; напряжением пробоя $U_{\text{пр}} > 9$ кВ.

4.2. Выбрать электроизоляционный материал для каркаса электрической катушки с толщиной стенки $d = 1$ мм; напряжением пробоя $U_{\text{пр}} > 6$ кВ и напряжением разрыва $\sigma_{\text{в}} > 30$ МПа.

4.3. Выбрать электроизоляционный материал для пропитки обмоток электрических машин. Теплостойкость материала: > 100 °С; электрические потери $\operatorname{tg}\delta < 0,03$; электрическая прочность $E_{\text{пр}} > 20$ МВ/м.

4.4. Выбрать диэлектрический материал для гибких прокладок толщиной $d = 0,2$ мм в электрических машинах, отвечающий следующим характеристикам: напряжение пробоя $U_{\text{пр}} > 3$ кВ; электрические потери $\operatorname{tg}\delta < 0,1$; удельное электросопротивление $\rho > 5 \cdot 10^4$ МОм·м.

5. Вариант № 5

5.1. Выбрать изоляционный материал для гибких проводов малой мощности в металлической оболочке. Толщина изоляции $d = 100$ мкм; радиус проводника $r_1 = 0,3$ мм; коэффициент удельной емкости $K = C / \ell = 0,2416[\epsilon_r / \ln(r_2 / r_1)] > 0,5$ (r_2 и r_1 - внешний и внутренний радиус проводника, ϵ_r - относительная диэлектрическая проницаемость); напряжение пробоя $U_{\text{пр}} > 500$ В.

5.2. Выбрать электроизоляционный материал для каркаса электрической катушки с толщиной стенки $d = 1$ мм; напряжением пробоя $U_{\text{пр}} > 6$ кВ и напряжением разрыва $\sigma_{\text{в}} > 30$ МПа.

5.3. Выбрать электроизоляционный материал для пропитки обмоток электрических машин. Теплостойкость материала: > 150 °С; электрические потери $\operatorname{tg}\delta < 0,01$; электрическая прочность $E_{\text{пр}} > 30$ МВ/м.

5.4. Выбрать диэлектрический материал для коллекторных манжет с толщиной стенки $d = 1$ мм, сложной формы и напряжением пробоя $U_{\text{пр}} > 20$ кВ.

6. Вариант № 6

6.1. Для изготовления диэлектрической прослойки толщиной $d = 20$ мкм в конденсаторах выбрать электроизоляционный материал с низкими потерями $\operatorname{tg}\delta < 0,06$; теплостойкостью $T > 150$ °С; напряжением пробоя $U_{\text{пр}} > 2$ кВ.

6.2. Выбрать гибкий электроизоляционный материал для конструктивных деталей (с толщиной стенки $d = 0,3$ мм) масляных трансформаторов напряжением до 500 кВ, с электрической прочностью $E_{\text{пр}} > 0,13$ МВ/м.

6.3. Выбрать электроизоляционный материал для пропитки обмоток электрических машин. Теплостойкость материала: > 100 °С; электрические потери $\operatorname{tg}\delta < 0,03$; электрическая прочность $E_{\text{пр}} > 20$ МВ/м.

6.4. Выбрать диэлектрический материал для гибких прокладок толщиной $d = 0,2$ мм в электрических машинах, отвечающий следующим характеристикам: напряжение пробоя $U_{\text{пр}} > 3$ кВ; электрические потери $\operatorname{tg}\delta < 0,1$; удельное электросопротивление $\rho > 5 \cdot 10^4$ МОм·м.

7. Вариант № 7

7.1. Выбрать конструкционный электроизоляционный материал для изготовления деталей электромашин с толщиной стенки $d = 1$ мм и, работающих при температурах до 100 °С со следующими характеристиками: потери $\text{tg}\delta < 0,03$; $U_{\text{пр}} > 13$ кВ.

7.2. Выбрать электроизоляционный материал для жил телефонного кабеля.

7.3. Выбрать листовой конструкционный диэлектрический материал толщиной $d = 10$ мм для распорок в роторах турбогенераторов с напряжением пробоя $U_{\text{пр}} > 10$ кВ.

7.4. Выбрать диэлектрический материал для твердых прокладок толщиной $d = 1$ мм в электрических машинах, отвечающий следующим характеристикам: напряжение пробоя $U_{\text{пр}} > 15$ кВ; электрические потери $\text{tg}\delta < 0,06$; удельное электросопротивление $\rho > 5 \cdot 10^4$ МОм·м.

8. Вариант № 8

8.1. Выбрать конструкционный электроизоляционный материал для изготовления деталей электромашин с толщиной стенки $d = 1$ мм и, работающих при температурах до 200 °С со следующими характеристиками: потери $\text{tg}\delta < 0,01$; $U_{\text{пр}} > 4$ кВ; предел прочности на растяжение $\sigma_{\text{в}} > 60$ МПа.

8.2. Выбрать электроизоляционный материал для каркаса электрической катушки с толщиной стенки $d = 0,3$ мм; напряжением пробоя $U_{\text{пр}} > 2$ кВ и напряжением разрыва $\sigma_{\text{в}} > 30$ МПа.

8.3. Выбрать листовой конструкционный диэлектрический материал толщиной $d = 2$ мм для электроприборов, работающих на промышленной частоте $f = 50$ Гц и напряжением до 1 кВ, со следующими характеристиками: напряжением разрыва $\sigma_{\text{в}} > 80$ МПа; удельным электросопротивлением $\rho > 100$ МОм·м; повышенной теплостойкости и прочностью.

8.4. Выбрать диэлектрический материал для прокладок толщиной $d = 1$ мм между коллекторными пластинами, отвечающий следующим характеристикам: напряжение пробоя $U_{\text{пр}} > 25$ кВ; удельное электросопротивление $\rho > 10^4$ МОм·м.

9. Вариант № 9

9.1. Для изготовления диэлектрической прослойки толщиной $d = 10$ мкм в конденсаторах выбрать электроизоляционный материал с низкими потерями $\text{tg}\delta < 0,0015$ и электрической прочностью $E_{\text{пр}} > 25$ МВ/м.

9.2. Выбрать электроизоляционный материал для шайб, используемых в электрических машинах, толщиной $d = 1$ мм и напряжением пробоя $U_{\text{пр}} > 3$ кВ.

9.3. Выбрать листовой конструкционный диэлектрический материал толщиной $d = 0,5$ мм для электроприборов, работающих на частотах до $f = 1$ МГц и напряжением до 400 В, со следующими характеристиками: напряжением пробоя $U_{\text{пр}} > 50$ кВ; электрическими потерями $\text{tg}\delta < 0,07$.

9.4. Выбрать диэлектрический материал повышенной нагревостойкости для прокладок толщиной $d = 1$ мм между коллекторными пластинами, отвечающий

следующим характеристикам: напряжение пробоя $U_{пр} > 18$ кВ; электрические потери $\text{tg}\delta < 0,04$; удельное электросопротивление $\rho > 10^4$ МОм·м.

10. Вариант № 10

10.1. Выбрать конструкционный электроизоляционный материал для изготовления деталей электромашин с толщиной стенки $d = 1$ мм и, работающих при температурах до 250 °С со следующими характеристиками: потери $\text{tg}\delta < 0,1$; $U_{пр} > 10$ кВ; прочность на изгиб $\tau > 100$ МПа.

10.2. Выбрать листовой конструкционный диэлектрический материал толщиной $d = 5$ мм для электроприборов, работающих на частотах до $f = 1$ МГц и напряжением до 400 В, со следующими характеристиками: напряжением разрыва $\sigma_b > 80$ МПа; электрическими потерями $\text{tg}\delta < 0,07$.

10.3. Выбрать электроизоляционный материал для жил кабеля с напряжением до 1 кВ с электромагнитной экранировкой.

10.4. Выбрать диэлектрический материал для прокладок толщиной $d = 1$ мм между коллекторными пластинами, отвечающий следующим характеристикам: напряжение пробоя $U_{пр} > 18$ кВ; электрические потери $\text{tg}\delta < 0,04$; удельное электросопротивление $\rho > 10^4$ МОм·м.

11. Вариант № 11

11.1. Выбрать электроизоляционный материал для жил высоковольтного кабеля с напряжением до 200 кВ.

11.2. Выбрать электроизоляционный материал для шайб, используемых в электрических машинах, толщиной $d = 2$ мм и напряжением пробоя $U_{пр} > 6$ кВ.

11.3. Выбрать листовой конструкционный диэлектрический материал толщиной $d = 2$ мм для электроприборов, работающих на промышленной частоте $f = 50$ Гц и напряжением до 1 кВ, со следующими характеристиками: напряжением разрыва $\sigma_b > 80$ МПа; удельным электросопротивлением $\rho > 10$ МОм·м

11.4. Выбрать электроизоляционный материал для герметизации узлов электрических приборов. Теплостойкость материала: > 150 °С; электрические потери $\text{tg}\delta < 0,02$; электрическая прочность $E_{пр} > 15$ МВ/м.

ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ

Асботекстолит – листовый слоистый пластик, изготавливаемый методом горячего прессования двух и более слоев асбестовой ткани, пропитанной фенолоформальдегидной смолой.

Бумага и картон – листовый или рулонный материал коротковолокнистого строения, состоящий в основном из целлюлозы. **Целлюлоза** – линейный полисахарид: $[-C_6H_7O_2(OH)_3-]_n$. Бумага может пропитываться жидкими диэлектриками. **Картон** отличается от бумаги большей толщиной и твердостью.

Винипласт – пластмасса из **поливинилхлорида** без наполнителей и пластификаторов: $[-CH_2-CHCl-]_n$. **Поливинилхлоридный пластикат** – пластифицированный поливинилхлорид.

Гетинакс – листовый слоистый пластик, получаемый горячим прессованием нескольких слоев бумаги, предварительно пропитанной фенолоформальдегидной (термореактивной - термоотверждающейся) смолой.

Дельта-древесина – один из видов древесно-слоистых пластиков; изготавливается путем прессования или склеивания шпона (в основном березового), пропитанного фенолоформальдегидной смолой.

Капрон (поликапролактан, поли-ε-капроамид) – полиамид, твердый рогоподобный продукт от белого до светло-кремового цвета, просвечивающий в тонком слое; $[-NH(CH_2)_5CO]_n$.

Компаунды – отличаются от лаков отсутствием в их составе растворителя; твердые компаунды перед употреблением нагревают до необходимой температуры с целью снижения вязкости.

Кордиерит – керамика особой нагревостойкости на основе кордиерита $2MgO \cdot 2Al_2O_3 \cdot 5SiO_2$.

Лавсан (полиэтилентерефталат) – термопластичный полимер, имеющий

строение:
$$\left[-CH_2-CH_2-O-\overset{\text{O}}{\parallel}{C}-\text{C}_6\text{H}_4-\overset{\text{O}}{\parallel}{C}-O-CH_2-CH_2- \right]_n$$

Лаки – коллоидные растворы смол, битумов, высыхающих масел.

Лакоткань – гибкий электроизоляционный материал, представляющий собой ткань, пропитанную электроизоляционным лаком.

Микалекс – твердый материал с большим содержанием наполнителя (слюды) и с легкоплавким стеклом в качестве связующего.

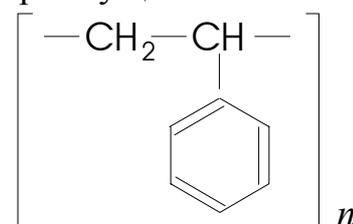
Микалента – композиционный материал из одного слоя пластинок слюды, склеенных при помощи лака между собой и подложкой (с одной или двух сторон).

Миканиты – листовые или рулонные материалы, склеенные из отдельных лепестков щипаной слюды с помощью клеящего лака или сухой смолы, иногда с применением волокнистой подложки из бумаги или ткани, которая наклеивается с одной или обеих сторон с целью увеличения прочности на разрыв и отставания лепестков слюды при изгибе.

Микафоль – композиционный материал из одного или нескольких слоев щипаной слюды, склеенных лаком между собой и бумажной или стекловолоконной подложкой, покрывающей слюду с одной стороны.

Полиметилметакрилат (плексиглас) – полимер метилового эфира метакриловой кислоты: $[-CH_2 - C(CH_3)(COOCH_3)-]_n$, прозрачный бесцветный материал.

Полистирол (ПС) – термопластичный полимер преимущественно линейного строения, получается полимеризацией стирола;



Полиуретаны (ПУР) – высокомолекулярные соединения, содержащие повторяющиеся уретановые группы $(-O - CO - NH -)$ в основной цепи макромолекулы.

Полиформальдегид (ПФ) – термопластичный материал с высокой степенью кристалличности; $[-CH_2 - O-]_n$.

Полиэтилен – термопластичный полимер белого цвета; макромолекулы имеют линейное строение с небольшим количеством боковых ответвлений; $[-CH_2 - CH_2 -]_n$.

Слюдинит – материал, получаемый из слюдинитовой бумаги (изготавливаемой из отходов мусковита, образующихся при щепке слюды и подвергаемых термообработке, в результате которой слюда теряет воду), пропитанной различными связующими материалами и склеенной со стекловолоконистой подложкой (за исключением коллекторного слюдинита).

Слюдопласты – материалы, изготавливаемые из слюдопластовой бумаги, обработанной различными связующими. При изготовлении слюдопластовой бумаги используют свойство чистых поверхностей кристаллов природной слюды прочно соединяться когезионными силами. Слюдопласты обладают большей механической прочностью, чем слюдиниты, а по структуре ближе подходят к миканитам.

Слюды – порообразующие минералы сложного и изменчивого состава, относящиеся к листовым водным алюмосиликатам. Главнейшие минералы: мусковит $K_2O \cdot 3Al_2O_3 \cdot 6SiO_2 \cdot 2H_2O$ (бесцветные или с различными оттенками) и флогопит $K_2O \cdot 6MgO \cdot Al_2O_3 \cdot 6SiO_2 \cdot 2H_2O$ (темные).

Стеатит – керамический материал, продукт спекания талька (минерал состава $3MgO \cdot 4SiO_2 \cdot H_2O$) с каолином (светлая высококачественная глина высокой чистоты) и углекислым барием.

Стеклотекстолит – листовой слоистый прессованный материал, изготовленный из двух и более слоев стеклянной ткани, пропитанной различными терморезистивными связующими.

Текстолит – слоистый прессованный материал, изготовленный из двух или более слоев хлопчатобумажной ткани, пропитанной фенолоформальдегидной смолой.

Фарфор – плотный керамический материал, непроницаемый для воды и газов, обычно белый, просвечивающий в тонком слое. Фарфор получают высокотемпературным обжигом полуфабрикатов из тонкой смеси беложгущейся глины, каолина, кварца, полевого шпата.

Фибра – материал, изготавливаемый пропиткой непроклеенной тряпичной тонкой бумаги концентрированным раствором хлорида цинка и последующим прессованием так, что отдельные слои прилипают друг к другу. Для повышения водостойкости фибра иногда пропитывается парафином или воском.

Фторопласты – техническое название полимеров *фторолефинов*. Политетрафторэтилен (фторопласт-4, фторлон-4, тефлон): молочно-белый или сероватый полупрозрачный материал $[-CF_2 - CF_2 -]_n$.

Политрифторхлорэтилен (фторопласт-3, фторлон-3, дайфлон): белое вещество $[-CF_2 - CFCl-]_n$.

Фторфлогопит – синтетическая слюда, в которой в отличие от природных флогопитов гидроксильные группы полностью заменены ионами фтора.

1. ЭЛЕКТРОННАЯ СТРУКТУРА ТВЕРДЫХ ТЕЛ

1.1. КЛАССИФИКАЦИЯ ТВЕРДЫХ ТЕЛ ПО ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ

По электропроводности γ все твердые тела можно разделить на три большие группы: *металлы*, *полупроводники*, *диэлектрики*. **Металлы** являются прекрасными проводниками электрического тока. Их удельная электропроводность при комнатной температуре находится в интервале $10^6 \div 10^8$ $(\text{Ом}\cdot\text{м})^{-1}$. **Диэлектрики** практически не проводят электрический ток — их используют в качестве *электрических изоляторов*. Удельная электропроводность диэлектриков занимает область, лежащую ниже 10^{-8} $(\text{Ом}\cdot\text{м})^{-1}$. К классу *полупроводников* относятся твердые тела, имеющие промежуточные значения γ : в интервале $10^{-8} \div 10^6$ $(\text{Ом}\cdot\text{м})^{-1}$. Такая классификация проиллюстрирована на рис. 1.

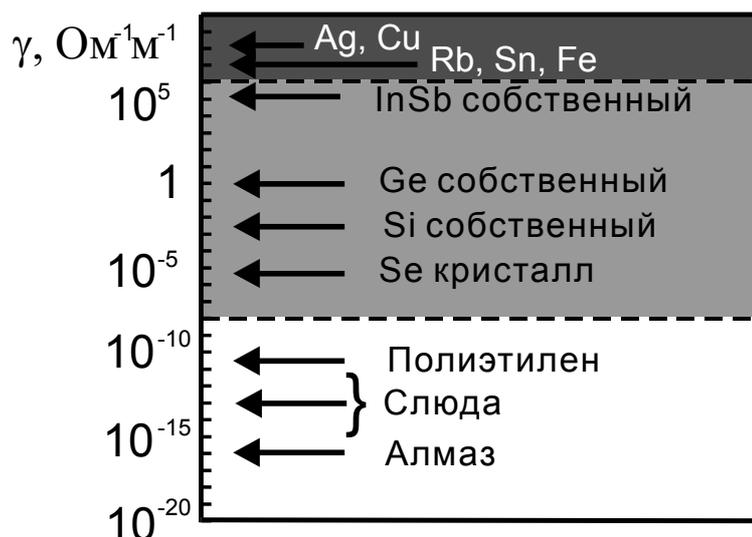


Рис. 1. Интервалы электропроводности, соответствующие различным твердым телам

(Интенсивность окраски падает от металлов к полупроводникам и диэлектрикам соответственно).

Огромное влияние на величину электропроводности оказывают примеси и дефекты. Если собственная электропроводность кремния составляет $\sim 10^{-3}$ $(\text{Ом}\cdot\text{м})^{-1}$, то электрически активные примеси могут довести ее до величины 10^5 $(\text{Ом}\cdot\text{м})^{-1}$. Удельная электропроводность полупроводника CdS в зависимости от содержания примесей и дефектов может иметь значение, лежащее в интервале $10^{-10} \div 10^5$ $(\text{Ом}\cdot\text{м})^{-1}$. Этот пример показывает, что классификация твердых тел по

электропроводности не является однозначной - при переходе от одной группы веществ к другой значения электропроводности могут перекрываться.

Различие между металлами, с одной стороны, и диэлектриками и полупроводниками - с другой, достаточно четко проявляется в ходе температурных зависимостей электропроводности. В некотором интервале температур температурная зависимость электропроводности диэлектриков и полупроводников может быть описана выражением вида

$$\gamma = \gamma_0 \exp(-E_a/k_B T); \quad E_a/k_B T \gg 1, \quad (1)$$

где γ_0 — константа; E_a — энергия активации переноса заряда; $k_B = 1,380658 \cdot 10^{-23}$ Дж/К - *постоянная Больцмана*. То есть γ возрастает по экспоненциальному закону с ростом температуры. В металлах, наоборот, удельная электропроводность уменьшается с ростом температуры.

При температурах, близких к 0 К, электропроводность многих металлов перестает изменяться и имеет конечное значение. У некоторых металлов возникает *сверхпроводящее состояние*. У диэлектриков и полупроводников электропроводность при $T \rightarrow 0$ обращается в нуль.

1.2. ЗАПОЛНЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ЗОН ЭЛЕКТРОНАМИ

Рассмотрим систему, состоящую из N атомов, достаточно далеко находящихся друг от друга, так что они не взаимодействуют друг с другом. В такой системе имеются N -кратно *вырожденные* одноэлектронные состояния, т.е. N электронов могут иметь одно и тоже значение энергии. При сближении и взаимодействии N атомов энергетические уровни электронов изменяются. Эти изменения тем больше, чем дальше от ядра находится электрон. Наибольшие изменения касаются энергии валентных электронов: происходит расщепление каждого энергетического уровня валентного электрона на N уровней. Расстояния между ними из-за очень большой величины N настолько малы, что их совокупность может считаться практически непрерывной *энергетической зоной*, имеющей конечную ширину. Поскольку каждый атом обладает

различными уровнями энергии, например, a , b и c , то каждому уровню соответствует своя зона, рис. 2.

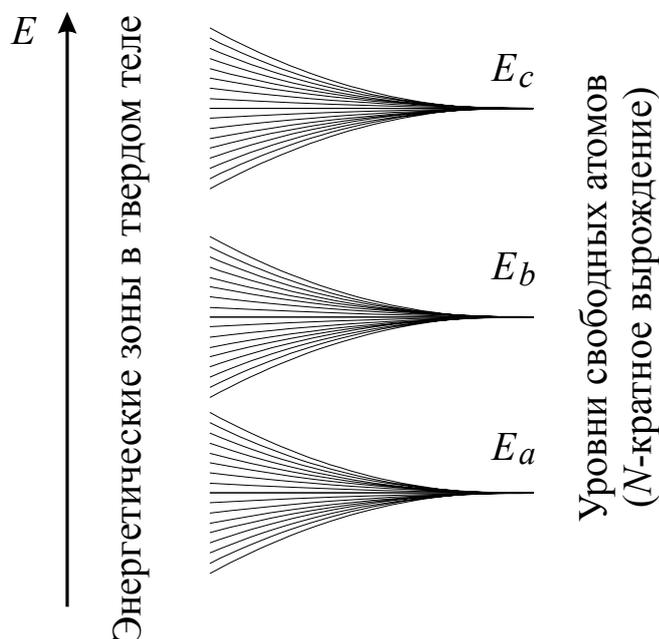


Рис. 2. Схема расщепления энергетических уровней в энергетические зоны при сближении атомов

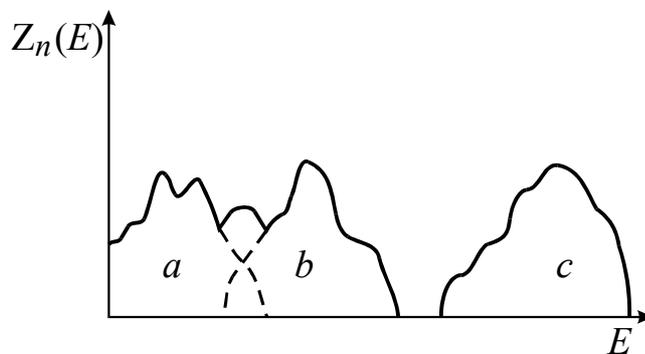


Рис. 3. Плотность энергетических состояний электронов (схематически) в зависимости от энергии

Рисунок 2 ясно показывает, что энергетические зоны могут перекрываться, т.е. состояние самой высокой энергии n -й зоны может лежать выше состояния самой низкой энергии следующей $(n + 1)$ -й зоны. Полная плотность состояний тогда получается суммированием. Это схематично изображено на рис. 3. Три зоны a , b и c по энергиям следуют одна за другой, зоны a и b перекрываются, а между зонами b и c лежит энергетическая область

(щель) без разрешенных состояний (*запрещенная зона*). Таким образом, в кристалле есть зоны *разрешенных* и зоны запрещенных энергий электрона, чередование которых демонстрирует рис. 4. Причем с увеличением энергии запрещенные зоны сужаются, а разрешенные расширяются.

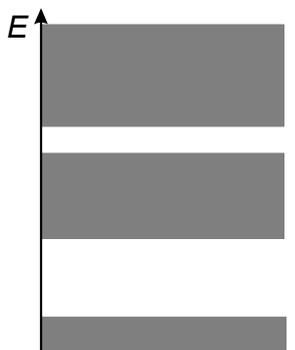


Рис. 4. Схема энергетического спектра электрона в кристалле
Разрешенные зоны показаны серым цветом.

В основе классификации электротехнических материалов лежит структура зон твердого тела при температуре $T = 0$ К. Каждая разрешенная зона содержит конечное число энергетических уровней. В соответствии с принципом Паули при ограниченном числе электронов, содержащихся в кристалле, заполненными окажутся лишь несколько наиболее низких энергетических зон. Все остальные зоны будут пусты (*свободные зоны*). Рассмотрим несколько вариантов заполнения зон электронами.

1. Последняя зона, в которой есть электроны, заполнена частично, рис. 5.

Поскольку эта зона заполняется валентными электронами, ее называют *валентной*. Под действием внешнего электрического поля электроны, занимающие уровни вблизи границы заполнения, начнут ускоряться и переходить на более высокие свободные уровни той же зоны. В кристалле потечет ток. Такие кристаллы являются хорошими проводниками, т.е. *металлами*. Типичными примерами таких металлов являются щелочные (наполовину заполненной валентной зоне при $T = 0$ К соответствуют наполовину заполненные s-орбитали атомов, например в натрии).

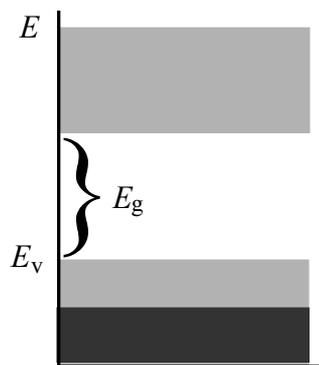


Рис. 5. Схема заполнения зон электронами в металле
Серым цветом обозначены разрешенные зоны; белым — запрещенная. Более темным цветом показано заполнение валентной зоны электронами. E_v — граница валентной зоны; E_g — ширина запрещенной зоны.

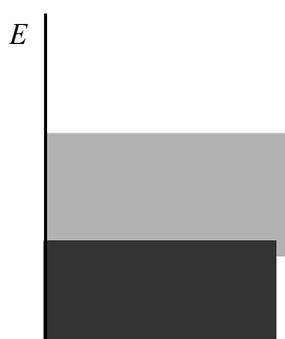


Рис. 6. Схема заполнения зон электронами в щелочноземельном металле
Светло-серым цветом обозначена свободная зона; белым — запрещенная зона; темно-серым цветом показано заполнение валентной зоны электронами. Валентная и свободная зоны перекрываются.

2. Валентная зона заполнена полностью, но она перекрывается со следующей разрешенной зоной, не занятой электронами, рис. 6. Приложение внешнего электрического поля приведет к переходу электронов на уровни свободной зоны - возникнет электрический ток. Естественно, что такой кристалл будет обладать металлической проводимостью. Типичными примерами таких металлов являются щелочноземельные (внешние s-электроны полностью заполняют валентную зону, которая перекрывается со следующей, образованной p-орбиталями этого же уровня, например в магнии).
3. Валентная зона заполнена полностью и отделена от следующей за ней свободной зоны широкой ($E_g > 2\div 3$ эВ) запрещенной зоной (*энергетической щелью*), рис. 7. Внешнее электрическое поле не может создать

электрического тока, т.к. электроны заполненной зоны не могут перейти в свободную. Такие вещества являются *диэлектриками*.

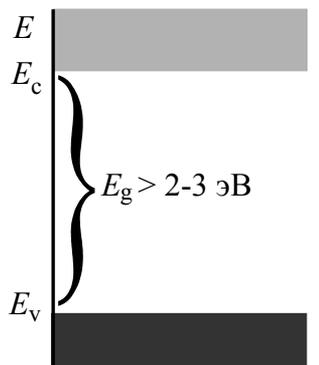


Рис. 7. Схема заполнения зон электронами в диэлектрике
Светло-серым цветом обозначена зона проводимости; белым — запрещенная зона; темно-серым цветом показано заполнение валентной зоны электронами. E_v — верхняя граница валентной зоны; E_g — ширина запрещенной зоны; E_c — нижняя граница зоны проводимости.

Пример:

Типичным диэлектриком являются ионные кристаллы поваренной соли NaCl. Ион Na^+ имеет электронную конфигурацию $1s^2 2s^2 2p^6$, а ион Cl^- — $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6$. Последней заполненной зоной является зона $3p\text{Cl}^-$ -электронов. Между ней и следующей за ней зоной $3s\text{Na}^+$ -электронов существует энергетическая щель около 9 эВ.

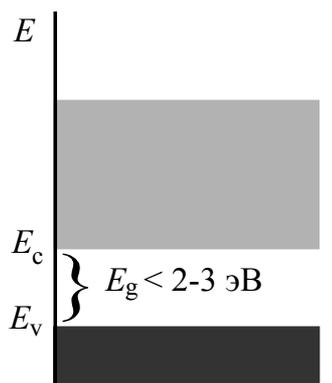


Рис. 8. Схема заполнения зон электронами в полупроводнике
Обозначения аналогичны рис. 7.

4. Если валентная зона полностью заполнена, и ширина запрещенной зоны $E_g < 2\div 3$ эВ, рис. 8, то такие вещества называются *полупроводниками*. В полупроводниках за счет тепловой энергии $k_B T$ заметное число электронов оказывается переброшенным в свободную зону (*зону проводимости*). При

наложении внешнего электрического поля возникает электрический ток, который много слабее, чем в металлах, из-за низкой концентрации носителей заряда. При очень низких температурах любой полупроводник становится диэлектриком.

Заметим, что между металлами и диэлектриками существует качественное различие, а между диэлектриками и полупроводниками — лишь количественное.

2. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА В ТВЕРДЫХ ДИЭЛЕКТРИКАХ

2.1. ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬ

Поскольку ширина запрещенной зоны у диэлектриков большая, рис. 7, то при комнатной и более низких температурах электроны из валентной зоны в зону проводимости практически не попадают. Концентрация свободных носителей в диэлектрике исключительно мала, и собственная проводимость ничтожна. Поэтому электронная проводимость (при участии как электронов, так и дырок, учитывая их природу) в диэлектрике может возникнуть лишь при наличии примеси как донорного, так и акцепторного типа, создающей разрешенные примесные уровни в запрещенной зоне. В связи с этим для электроизоляционных материалов так важна химическая чистота. Для различных диэлектриков электронная проводимость колеблется от 10^{-10} до 10^{-22} $(\text{Ом}\cdot\text{см})^{-1}$. Электронная проводимость может возникать в диэлектриках не только за счет теплового воздействия, но также за счет облучения светом с соответствующей длиной волны, быстрыми частицами, при приложении сильных электрических полей.

Температурная зависимость электронной проводимости хорошо описывается экспоненциальным законом (1), что связано с экспоненциальным изменением концентрации носителей с температурой. Подвижность меняется более медленно, и ее вклад менее существенен.

Надо отметить, что если носители заряда достаточно сильно связаны с кристаллической решеткой, то возникает, так называемая *поляронная проводимость*. Образование *полярона* связано с искажением (поляризацией) близ лежащей области кристаллической решетки носителем заряда. Носитель локализуется в этой области и движется вместе с ней, что значительно уменьшает его подвижность. При слабом взаимодействии носителя с решеткой образуется полярон большого радиуса, характеризующийся слабым искажением решетки, и следовательно, слабым влиянием на подвижность носителя. При сильном взаимодействии электрона или дырки с кристаллической решеткой может образоваться полярон малого радиуса (~ постоянной решетки). В этом случае искажения решетки очень сильны. Такой полярон очень стабилен и движется даже за счет тепловых флуктуаций в кристалле прыжками. При наложении внешнего электрического поля в этом случае возникает так называемая *прыжковая проводимость*.

В слабых полях вклад электронной проводимости очень незначителен. Однако в сильных полях в результате освобождения связанных электронов подвижность носителей возрастает. В результате ударной ионизации резко увеличивается концентрация электронов в зоне проводимости или дырок в валентной зоне. Все это приводит к росту электронной проводимости.

При напряженности поля $E > 10^7$ В/м электроны проводимости начинают ионизировать атомы. В результате ионизации образуются электроны и дырки, которые также ускоряются полем и участвуют в процессе ионизации. Таким образом, концентрация носителей заряда лавинообразно возрастает. Этот процесс называется *ударной ионизацией*.

В ряде диэлектриков доминирует ионная проводимость, связанная как с направленным перемещением ионов примеси, так и ионов самого диэлектрика. В этом случае осуществляется не только перенос электрического заряда, но и перенос вещества. Под действием внешнего электрического поля анионы движутся к аноду, а катионы к катоду. Постепенно концентрация носителей заряда уменьшается, поэтому величина ионного тока со временем спадает. Если

сделать контакты к диэлектрику (анод) из металла, ионы которого переносят в диэлектрике заряд, то в этом случае обеспечивается свободный обмен носителями заряда и электрический ток спадать не будет. При низких температурах обычно превалирует примесная ионная проводимость, а при высоких - перенос ионов основного вещества. У диэлектриков с ионным характером электропроводности соблюдаются **законы Фарадея**: количество выделившегося при электролизе вещества пропорционально количеству прошедшего через материал электричества.

Существенное влияние на электропроводность диэлектриков оказывает влажность. Присутствие даже малого количества воды способно значительно уменьшить электросопротивление изолятора. Дело в том, что растворимые в воде примеси диссоциируют на ионы. Увлажнение также может способствовать диссоциации основного вещества диэлектрика. Особенно сильно влага оказывает воздействие на волокнистые материалы, когда могут образовываться сплошные водяные пленки вдоль волокон, пронизывающие изоляцию. Поэтому гигроскопичные материалы подвергают сушке и пропитывают или покрывают лаками или компаундами.

У ряда диэлектриков выше некоторой критической температуры происходит фазовое превращение, которое связано с разупорядочением одной из ионных подрешеток. В этом случае происходит резкий скачок ионной проводимости, которая становится сравнимой с электропроводностью расплавов или концентрированных электролитов $\sim 1 \text{ (Ом}\cdot\text{см)}^{-1}$. Таким образом, кристалл переходит в особое состояние — **суперионное**. Такие кристаллы называются **суперионными проводниками**.

Проводимость твердых диэлектриков подразделяют на объемную и поверхностную. Это связано с тем, что электрические свойства поверхности в результате взаимодействия с газовой или жидкой средой (загрязнение, увлажнение и т.п.) могут сильно отличаться от свойств объемной фазы.

2.2. ПОЛЯРИЗАЦИЯ ДИЭЛЕКТРИКОВ

Известно, что при заполнении диэлектриком пространства между пластинами конденсатора, емкость последнего увеличивается в ϵ раз, рис. 9.

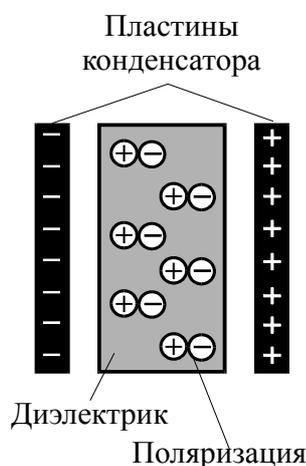


Рис. 9. Плоский конденсатор, заполненный диэлектриком
Конденсатор не подключен к источнику тока, и электропроводность диэлектрика равна нулю, т.е. электрический заряд не стекает.

Величину ϵ называют *относительной диэлектрической проницаемостью*, она зависит от свойств диэлектрика и характеризует уменьшение силы взаимодействия электрических зарядов в диэлектрике по сравнению с вакуумом. Увеличение емкости конденсатора связано с *поляризацией* диэлектрика в электрическом поле. *Поляризация* представляет собой обратимое смещение электрических заряженных частиц, входящих в состав диэлектрика, при приложении к нему электрического поля.

Если емкость конденсатора, имеющего на пластинах заряд Q и заполненного вакуумом, равна

$$C_0 = Q/U_0, \quad (2)$$

где U_0 — разность потенциалов, то после того как в зазор будет вставлен диэлектрик, его емкость примет значение

$$C = Q/U = \epsilon C_0. \quad (3)$$

Поскольку величина заряда на обкладках конденсатора не изменилась, то, следовательно, уменьшилась разность потенциалов, то есть уменьшилось поле внутри диэлектрика:

$$\varepsilon = E_0 / E, \quad (4)$$

где E — напряженность электрического поля. Это произошло за счет компенсации электрического заряда обкладок конденсатора зарядами, возникшими в диэлектрике в результате поляризации.

При поддержании постоянной разности потенциалов (напряженности поля) и введении в конденсатор изотропного диэлектрика возрастает **электрическая индукция (электрическое смещение)**, которая складывается из вектора напряженности внешнего электрического поля и вектора *поляризации* диэлектрика P :

$$\vec{D} = \varepsilon_0 \vec{E} + \vec{P} = \varepsilon_0 \varepsilon \vec{E} = \varepsilon \vec{D}_0, \quad (5)$$

где $\varepsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12}$ Кл / В·м — электрическая постоянная. Вектор электрического смещения направлен от положительного заряда к отрицательному.

Вектор поляризации представляет собой объемную плотность электрического дипольного момента диэлектрика:

$$\vec{P} = \lim_{V \rightarrow 0} \frac{1}{V} \sum_j \vec{p}_j \approx \frac{1}{V} \sum_j \vec{p}_j, \quad (6)$$

где V — объем диэлектрика; \vec{p}_j — элементарные электрические дипольные моменты, возникающие в диэлектрике под действием электрического поля (вектор электрического момента направлен от отрицательного заряда к положительному). В случае изотропного диэлектрика элементарные дипольные моменты после наложения поля будут иметь одно направление. Тогда поляризацию можно найти как

$$P = Ne r, \quad (7)$$

где N — число диполей в единице объема; e — заряд электрона (элементарный заряд); r — смещение зарядов. Поляризация возрастает с ростом напряженности электрического поля:

$$\vec{P} = \varepsilon_0 \chi_e \vec{E} = \alpha \vec{E}; \quad \chi_e = \varepsilon - 1, \quad (8)$$

где χ_e — *диэлектрическая восприимчивость*; α — *поляризуемость*. Вектора \vec{E} , \vec{D} и \vec{P} в изотропных диэлектриках имеют одно и то же направление.

В анизотропных диэлектриках диэлектрическая проницаемость является симметричным тензором второго ранга ε_{ij} ($i, j = 1, 2, 3$).

Поляризация обусловлена микроскопическими процессами, происходящими в диэлектрике под действием электрического поля. Различают *упругую и тепловую поляризации*. Если частицы связаны достаточно жестко, то силы, стремящиеся вернуть в исходное положение смещенные электрическим полем заряды, носят квазиупругий характер. Возникающие смещения обычно невелики. Однако смещения всех структурных единиц диэлектрика приводят к существенному интегральному вкладу. Такая поляризация называется *упругой (деформационной)*. После выключения поля время релаксации системы при упругой поляризации составляет $\sim 10^{-12} \div 10^{-16}$ с.

В случае слабой связи между частицами на поляризации сказывается их тепловое движение. Под действием электрического поля за счет тепловой энергии при смещении частицы преодолевают потенциальные барьеры. Возникающие смещения достаточно велики $\sim 0,5$ нм. После выключения поля вследствие дезориентирующего влияния теплового движения система возвращается (релаксирует) в исходное положение более медленно ($\tau \sim 10^{-6} \div 10^{-10}$ с), чем при упругой поляризации. Такая поляризация называется *тепловой (прыжковой, релаксационной)*.

В некоторых диэлектриках наблюдается процесс самопроизвольной ориентации диполей (*спонтанная поляризация*), наблюдаемой внутри отдельных областей (доменов) в отсутствие электрического поля. Спонтанная поляризация имеет место у материалов, называемых *сегнетоэлектриками*. В

отсутствие электрического поля электрические моменты доменов направлены беспорядочно и компенсируют друг друга. При наложении внешнего поля моменты ориентируются по полю, приводя к аномально большим значениям диэлектрической проницаемости.

При релаксационной и спонтанной поляризации происходят затраты энергии, рассеиваемой в диэлектриках в виде тепла.

К макроскопической поляризации относят *миграционную или объемно-зарядную поляризацию*. Она характерна для неоднородных диэлектриков. Накопление электрических зарядов на границах неоднородностей (слоев, пор, включений) приводит к объемно-зарядной поляризации. Эта поляризация существенно повышает электрическую емкость конденсатора, содержащего неоднородный диэлектрик. Величина смещения зарядов при миграционной поляризации может составлять макроскопическую величину ~ 1 мкм.

Классификация механизмов поляризации представлена на рис. 10.



Рис. 10. Механизмы поляризации

2.2.1. Электронная упругая поляризация

Электронная упругая поляризация наблюдается во всех диэлектриках независимо от их агрегатного состояния. Под действием электрического поля ядра атомов и электронные оболочки смещаются друг относительно друга. Из-за того, что масса ядра во много раз больше массы электрона, можно говорить в основном о смещении электронных оболочек, рис. 11. Время установления электронной упругой поляризации очень мало: $\sim 10^{-16} \div 10^{-17}$ с, поэтому она успевает устанавливаться в высокочастотных полях вплоть до оптических частот.

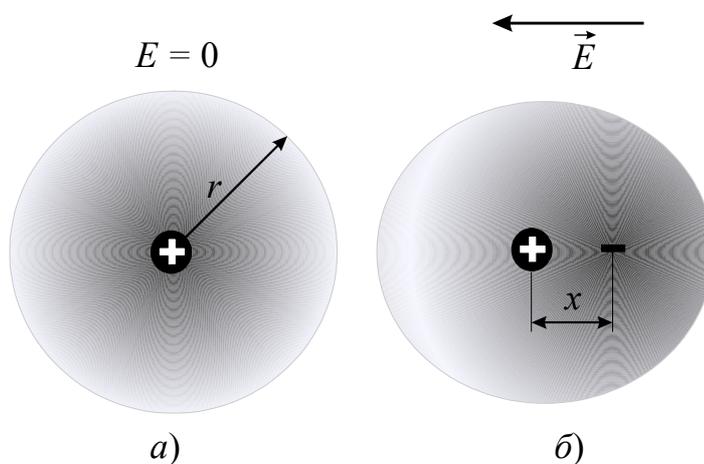


Рис. 11. Упругое смещение электронной оболочки атома под действием электрического поля
 а) атом до наложения поля; б) атом после наложения поля, x - смещение.

Поляризуемость при электронной упругой поляризации можно оценить по формуле:

$$\alpha_e = 4\pi\epsilon_0 r^3, \quad (9)$$

где r - радиус атома, рис. 11 а. Отсюда следует, что наибольшее смещение должны испытывать валентные электроны атома, как наиболее удаленные от ядра и наименее связанные с ним. Ионы также испытывают электронную поляризацию. Имеется прямая связь между поляризацией ионов и потенциалом ионизации. Чем выше энергия связи с ядром, тем меньше поляризуемость. Наименьшей поляризуемостью обладают ионы, электронная оболочка которых соответствует электронной оболочке атома благородного газа.

2.2.2. Ионная упругая поляризация

Ионная упругая поляризация имеет место в диэлектриках с ионным типом химической связи, например, в кристаллах поваренной соли, рис. 12. Время установления ионной поляризации составляет $\sim 10^{-14} \div 10^{-15}$ с, то есть такая поляризация успевает устанавливаться и в сверхвысокочастотных полях ($10^{10} \div 10^{11}$ Гц). Однако в инфракрасной области спектра наблюдается запаздывание в установлении ионной поляризации.

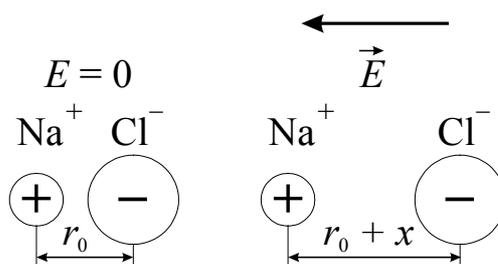


Рис. 12. Упругое смещение ионов при наложении электрического поля

Поляризуемость при упругой ионной поляризации можно оценить по формуле, рис. 12:

$$\alpha_i = 4\pi\epsilon_0 r_0^3 \frac{1}{n-1}, \quad (10)$$

где $n \approx 7 \div 11$ — показатель степени в потенциале отталкивания. Сравнение (9) и (10) указывает на то, что по порядку величины ионная и электронная упругие поляризуемости близки.

2.2.3. Дипольная упругая поляризация

Во многих диэлектриках имеются молекулы, которые обладают собственным электрическим моментом \vec{P}_0 , то есть представляют собой диполи даже в отсутствии внешнего электрического поля. Когда диполи связаны достаточно жестко (полярные кристаллы), при наложении внешнего электрического поля происходят упругие изменения в их направлении, рис. 13.

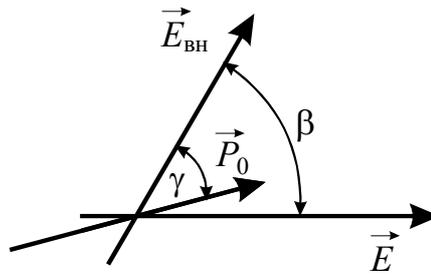


Рис. 13. Упругий поворот диполя на угол γ во внешнем электрическом поле \vec{E} , образующим угол β с внутренним полем кристалла $\vec{E}_{\text{вн}}$

Упорядоченная структура диполей в кристалле приводит к образованию внутреннего электрического поля $\vec{E}_{\text{вн}}$. Энергия диполя в этом поле равна

$$U_0 = -P_0 E_{\text{вн}} \cos \gamma \approx -P_0 E_{\text{вн}}. \quad (11)$$

В этом случае поляризуемость может быть оценена из выражения

$$\alpha_d = \frac{P_0^2}{|U_0|} \sin^2 \beta. \quad (12)$$

Видно, что поляризуемость зависит от электрического момента каждой молекулы, энергии межмолекулярных связей и направления электрического поля. Она максимальна при $\beta = 90$ и 270° . Когда внутреннее и внешнее поля перпендикулярны, поляризуемость равна нулю. Поэтому вклад упругой дипольной поляризации может обуславливать анизотропию диэлектрической проницаемости.

4.2.4. Ионная тепловая поляризация

Ионная тепловая поляризация возможна только в твердых диэлектриках и преобладает в веществах с выраженной нерегулярностью структуры и слабосвязанными ионами: стеклах, *ситаллах* и диэлектрической керамике, из-за высокой концентрации структурных дефектов.

Ситаллы — стеклокристаллические материалы, получаемые при введении в расплавленное стекло кристаллической затравки (центров кристаллизации), на которой происходит рост кристаллов основной фазы.

В зависимости от особенностей структуры диэлектрика и типа дефектов время релаксации ионной тепловой поляризации при комнатной температуре составляет $\sim 10^{-8} \div 10^{-4}$ с. Поэтому ионная тепловая поляризация может являться основной причиной *диэлектрических потерь* на радиочастотах.

Слабосвязанные ионы в результате тепловых флуктуаций могут переходить из одного положения равновесия в другое, преодолевая потенциальные барьеры. В отсутствие внешнего электрического поля такие перемещения являются случайными, и диэлектрик остается неполяризованным. Наложение внешнего электрического поля изменяет потенциальный рельеф в дефектных областях, и появляется некоторое преимущественное направление перемещения ионов, рис. 14.

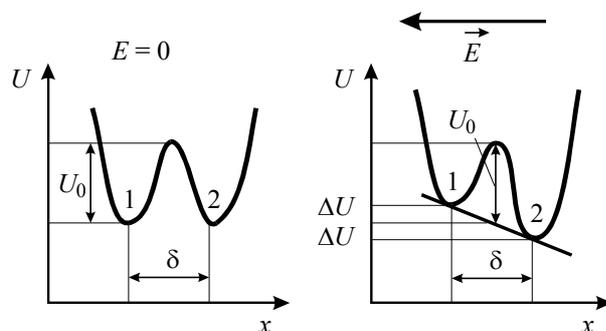


Рис. 14. Воздействие электрического поля на пространственную зависимость потенциальной энергии иона

В результате наложения внешнего поля состояние 2 становится энергетически более выгодным.

Таким образом, внешнее поле вносит такие изменения в расположение ионов по дефектным местам кристаллической решетки, что возникает индуцированная электрическим полем поляризация. Величину возникающей при этом поляризуемости можно оценить из выражения:

$$\alpha_{iT} = \frac{e^2 \delta}{12k_B T}. \quad (13)$$

Отсюда видно, что поляризуемость при ионной тепловой поляризации уменьшается с ростом температуры и не зависит от напряженности внешнего поля. Последнее связано с тем, что элементарный дипольный момент $p = e\delta$ не

зависит от поля. Зависит от поля величина поляризации P , так как от E зависит число избыточно перескакивающих через потенциальный барьер ионов.

2.2.5. Дипольная тепловая поляризация

Слабосвязанные диполи в полярных диэлектриках под действием внешнего электрического поля могут относительно легко поворачиваться. В отсутствие поля в результате теплового движения диполи ориентированы хаотично, и поляризация равна нулю. При наличии поля в процессе хаотического теплового движения часть диполей ориентируется по полю. Вследствие этого появляется новое равновесное состояние — поляризованное. С одной стороны, тепловое движение способствует ориентации диполей по полю, а с другой, препятствует ориентации по полю всех диполей. При большой напряженности поля тепловое движение почти не препятствует ориентации диполей, и большинство из них поворачивается в направлении поля. Когда подавляющее число диполей повернется вдоль поля, средний дипольный момент становится независимым от поля. Наступает насыщение.

При невысоких значениях напряженности внешнего электрического поля поляризуемость полярных молекул с дипольным моментом P_0 может быть оценена по выражению:

$$\alpha_{dT} = P_0^3 / 3k_B T. \quad (14)$$

В сильных полях средний дипольный момент не пропорционален напряженности поля. С ростом напряженности он увеличивается, стремясь к насыщению.

Время релаксации дипольной тепловой поляризации экспоненциально зависит от температуры, уменьшаясь при нагревании диэлектрика. При комнатной температуре для различных диэлектриков оно лежит в пределах $\sim 10^{-10} \div 10^{-4}$ с.

2.2.6. Электронная тепловая поляризация

Электронная тепловая поляризация характерна для твердых диэлектриков, имеющих определенного рода дефекты. Она играет существенную роль в таких технически важных диэлектриках как рутил TiO_2 , перовскит CaTiO_3 , подобных им сложных оксидах титана, циркония, ниобия, тантала, свинца, церия, висмута. Для этих поликристаллических веществ характерна высокая концентрация дефектов кристаллической структуры. Так, например, в стехиометрическом рутиле атомы титана имеют валентность, равную 4. При нестехиометрии, то есть в данном случае при наличии вакансий кислорода, возникают слабосвязанные электроны, и часть атомов титана становится трехвалентными. В результате теплового движения такие электроны хаотически переходят от одного близ лежащего к вакансии атома титана к другому, преодолевая определенный потенциальный барьер. При наложении внешнего электрического поля возникает преимущественная направленность перескоков электронов, и появляется результирующий дипольный момент.

Время релаксации электронной тепловой поляризации составляет $\sim 10^{-7} \div 10^{-2}$ с. Вклад этого вида поляризации в диэлектрическую проницаемость может быть весьма значителен и связан с сильной поляризуемостью слабосвязанных "полусвободных" электронов. Высокая поляризуемость электронов может быть понята из выражения (9), где поляризуемость при упругой электронной поляризации пропорциональна кубу расстояния. Возможность ухода электрона на относительно большие расстояния от вакансии приводит к высокой поляризуемости.

2.2.7. Связь между диэлектрической проницаемостью и поляризацией

Поляризация диэлектриков обычно имеет сложный характер и является совокупностью отдельных видов поляризации. В общем случае поляризация может быть выражена соотношением:

$$\vec{P} = \left(\sum_j n_j \alpha_j \right) \cdot \vec{E} = \alpha \vec{E}, \quad (15)$$

где α_j — поляризуемость j -го вида поляризации; n_j — плотность числа частиц, участвующих в j -м виде поляризации.

Электрическое поле, действующее на атом или молекулу внутри диэлектрика (локальное поле $\vec{E}_{\text{лок}}$) не совпадает со средним макроскопическим полем в диэлектрике. Для газов, неполярных жидкостей и кубических кристаллов

$$E_{\text{лок}} = \frac{P}{\epsilon_0 \chi_e} + \frac{P}{3\epsilon_0} = \frac{\epsilon + 2}{\epsilon - 1} \cdot \frac{P}{3\epsilon_0}. \quad (16)$$

Подстановка (16) в (15) приводит к **уравнению Клаузиуса - Мосотти**:

$$\frac{\epsilon - 1}{\epsilon + 2} = \frac{\alpha}{3\epsilon_0}. \quad (17)$$

В постоянном электрическом поле все виды поляризации, присущие данному веществу, успевают установиться. В переменном электрическом поле с ростом частоты ν начинают запаздывать наиболее медленные виды поляризации, а затем и другие виды. Это приводит к уменьшению диэлектрической проницаемости с ростом частоты, рис. 15, вплоть до $\epsilon = 1$ в полях с частотой $\nu = 10^{17} \div 10^{18}$ Гц.

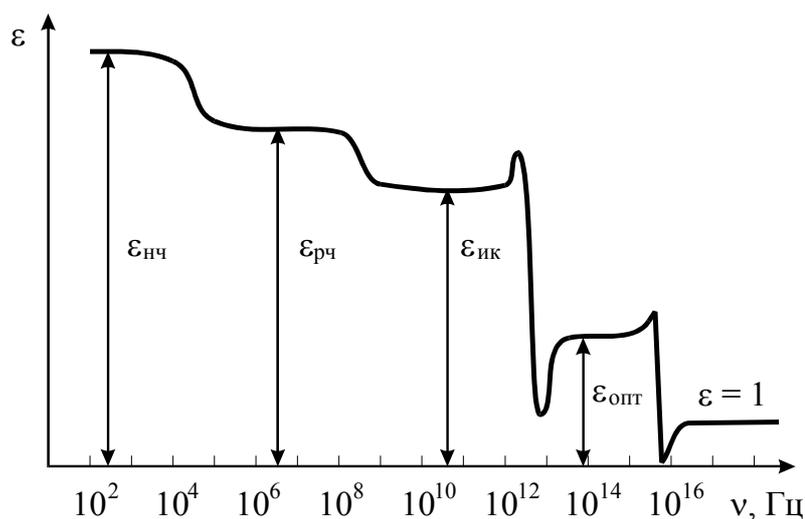


Рис. 15. Частотная зависимость диэлектрической проницаемости

В области низких частот вклад в $\epsilon_{\text{нч}}$ вносят все виды поляризации. При $\nu \sim 10^4 \div 10^5$ Гц "выключается" миграционная поляризация. В диапазоне

радиочастот $\nu \sim 10^4 \div 10^{11}$ Гц перестают носить вклад в $\epsilon_{рч}$ тепловые механизмы поляризации. При частотах $\nu \sim 10^{11} \div 10^{15}$ Гц, соответствующих инфракрасной области спектра, происходит запаздывание ионной и дипольной упругих поляризаций ($\epsilon_{ик}$ на рис. 15). В области оптических частот $\nu \sim 10^{15} \div 10^{17}$ Гц диэлектрическая проницаемость $\epsilon_{опт}$ обусловлена только электронной упругой поляризацией.

2.2.8. Сегнетоэлектрики

Существует большая группа кристаллических диэлектриков и полупроводников, у которых в определенном интервале температур и давлений в отсутствие внешнего электрического поля существует спонтанная поляризация, направление которой может быть изменено электрическим полем или механическим напряжением. Такие вещества называются *сегнетоэлектриками*. Они обладают нелинейной зависимостью поляризации от напряженности электрического поля и способностью к переполяризации.

Сегнетоэлектрики получили свое название от сегнетоэлектрической соли $\text{NaKC}_4\text{H}_4\text{O}_6 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ — минерала, для которого впервые наблюдалась нелинейность зависимости $P(T)$. Сегнетоэлектрические свойства вещества проявляются до определенной (критической) температуры (точка Кюри T_C), выше которой происходит фазовое превращение 2-го или 1-го (близкого ко 2-му) рода из полярной (сегнетоэлектрической) фазы в неполярную (параэлектрическую) фазу.

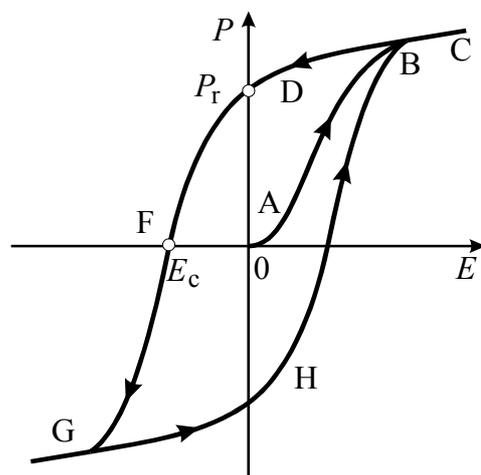


Рис. 16. Петля гистерезиса сегнетоэлектрика
 P_r - остаточная поляризация; E_c - коэрцитивная сила.

Характерной особенностью сегнетоэлектриков является наличие петли гистерезиса на зависимости $P(T)$, рис. 16. Существование **сегнетоэлектрического гистерезиса** связано с наличием **сегнетоэлектрических доменов** — объемных областей, в каждой из которых дипольные моменты ориентированы одинаково. В соседних доменах векторы поляризации направлены различно. Образование поляризации в определенном направлении связано с упорядоченным взаимодействием между диполями. Разбиение на домены происходит в результате энергетической выгоды многодоменной структуры — возрастание энергии за счет образования доменных стенок компенсируется уменьшением энергии электростатического взаимодействия между различными частями кристалла.

Приложение электрического поля к многодоменному образцу сегнетоэлектрика вызывает вначале рост его поляризации по закону близкому к линейному (участок $0A$ на рис. 16), так как слабые электрические поля не приводят к росту зародышей доменов с направлением P , совпадающим с направлением поля. При дальнейшем увеличении E начинаются процессы роста зародышей и переориентации доменов, приводящие к интенсивному росту поляризации (AB). При достижении некоторой величины напряженности поля (точка B) все домены оказываются ориентированными в направлении поля.

Дальнейший рост поляризации с увеличением поля происходит линейно (BC) за счет электронной и ионной составляющих поляризации. При уменьшении напряженности поля до нуля (CD) переориентации доменов не происходит, и сохраняется *остаточная поляризация* P_r . Продолжение прямой CB до пересечения с осью ординат даст значение *спонтанной поляризации* P_s .

Обратная переориентация доменов начинается только при $E < 0$, что приводит к уменьшению поляризации до нуля (DF). Напряженность электрического поля, при которой поляризация равна нулю, носит название *коэрцитивной силы (коэрцитивного поля)*. Дальнейшее увеличение поля вызывает полную переориентацию доменов (FG). При завершении периода изменения электрического поля завершается и гистерезисный цикл (GHС).

Поскольку поляризуемость сегнетоэлектрика зависит от внешнего поля нелинейно, то диэлектрическая проницаемость является функцией напряженности поля. Поэтому для сегнетоэлектриков вводят понятие дифференциальной относительной диэлектрической проницаемости:

$$\varepsilon_d = \frac{1}{\varepsilon_0} \frac{\partial D}{\partial E}. \quad (18)$$

Температурная зависимость диэлектрической проницаемости в параэлектрической фазе описывается законом Кюри - Вейсса:

$$\varepsilon = \frac{C}{T - T_C}, \quad (19)$$

где C - константа.

4.2.9. Пьезоэлектрики

Пьезоэлектрики — вещества (диэлектрики и полупроводники), в которых при определенных упругих деформациях (напряжениях) возникает вынужденная электрическая поляризация даже в отсутствие электрического поля — *прямой пьезоэффект*.

Следствием прямого пьезоэффекта является *обратный пьезоэффект* — появление механических деформаций под действием электрического поля. При

упругой деформации происходит смещение положительных и отрицательных ионов друг относительно друга, что приводит к возникновению электрического момента. Пьезоэффекты наблюдаются только в кристаллах не имеющих центра симметрии. Смещение частиц в кристаллах, обладающих центром симметрии, не приводит к появлению поляризованного состояния. В этом случае происходит электрическая компенсация моментов.

Механические и электрические переменные в нецентросимметричных кристаллах связаны между собой линейно. Коэффициентом пропорциональности является совокупность пьезомодулей или пьезоконстант:

$$P_i = d_{ijk} \sigma_{jk}, \quad (20)$$

где P_i — компонента поляризации; σ_{jk} — тензор напряжений; d_{ijk} — тензор пьезоэлектрических модулей третьего ранга.

К пьезоэлектрикам относятся, например, кварц, кристаллы дигидрофосфата калия KH_2PO_4 , различные виды пьезокерамики и др. Пьезоэлектрики находят применение в качестве мощных излучателей, приемников и источников ультразвука, стабилизаторов частоты, электрических фильтров высоких и низких частот, трансформаторов напряжения и тока.

2.2.10. Пироэлектрики

Пироэлектрики — кристаллические диэлектрики, у которых при нагревании или охлаждении происходит изменение поляризации. Пироэлектрики обладают спонтанной поляризацией вдоль полярной оси. При наличии полярной оси отсутствует центр симметрии. Поэтому любой пироэлектрик является пьезоэлектриком, но не наоборот.

Повышение температуры приводит к разупорядочению диполей за счет теплового движения, а следовательно, к изменению спонтанной поляризации — **первичный пироэффект**. С увеличением температуры изменяются линейные

размеры кристалла (тепловое расширение), что также приводит к изменению спонтанной поляризации — *вторичный (ложный) пироэффект*.

Первичный и вторичный пироэффекты линейно зависят от температуры:

$$\Delta P_{0i} = (\zeta'_i + \zeta''_i)\Delta T, \quad (21)$$

где P_{0i} — компоненты вектора спонтанной поляризации; ζ'_i и ζ''_i — компоненты векторов пироэлектрических коэффициентов для первичного и вторичного пироэффектов соответственно.

В качестве примеров пироэлектриков можно привести: турмалин $\text{Li}_2\text{SO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$; сегнетоэлектрические монокристаллы LiTaO_3 , LiNbO_3 , $\text{Pb}_5\text{Ge}_3\text{O}_{11}$; керамические сегнетоэлектрики BaTiO_3 , титанат-цирконат свинца; полимеры поливинилфторид $[-\text{CH}_2 - \text{CHF}-]_n$, полиакрилонитрил $[-\text{CH}_2\text{CH}(\text{CN})-]_n$. На основе пироэлектриков изготавливают высокочувствительные теплотатчики, термоэлектрические преобразователи, детекторы инфракрасного излучения малой мощности.

2.2.11. Фотополяризация

Фотополяризация — изменение поляризации под действием интенсивных световых потоков. Фотополяризация наблюдается, например, в кристаллах ниобата лития LiNbO_3 . Ниобат лития обладает широкой запрещенной зоной $\sim 3,6$ эВ. В этом случае носители заряда могут генерироваться в запрещенной зоне только за счет фотоионизации примесей. Неравномерное освещение образца приводит к тому, что в освещенной области генерируются носители, которые под действием внутреннего электрического поля перемещаются в неосвещенные области, где захватываются ловушками. В результате возникает перераспределение заряда, приводящее к электрическому полю объемного заряда. Конфигурация такого поля определяется распределением интенсивности светового потока. Явление фотополяризации может быть использовано при записи голограмм.

2.2.12. Электреты

Электреты — диэлектрики, длительное время сохраняющие поляризованное состояние после снятия внешнего воздействия, вызвавшего поляризацию. Они являются источниками электрического поля (аналоги постоянных магнитов). Электреты могут быть получены практически из любых полярных диэлектриков: органических полимерных (политетрафторэтилен, он же фторопласт-4, фторлон-4, тефлон $[-CF_2 - CF_2 -]_n$; полипропилен $[-CH_2CH(CH_3)-]_n$; поликарбонаты $[-ORO - C(O) -]_n$, где R — ароматический или алифатический остаток; полиметилметакрилат, он же плексиглас $[-CH_2 - C(CH_3)(COOCH_3) -]_n$, и др.); неорганических монокристаллических (кварц, корунд и др.), поликристаллических (керамики, ситаллы и др.), стекол. Наиболее стабильны электреты из пленочных фторсодержащих полимеров.

Стабильные электреты получают:

- нагревая, а затем охлаждая диэлектрик в сильном электрическом поле (**термоэлектреты**);
- освещая в сильном электрическом поле (**фотоэлектреты**);
- подвергая радиоактивному облучению (**радиоэлектреты**);
- поляризацией в сильном электрическом поле без нагревания (**электроэлектреты**);
- поляризацией в магнитном поле (**магнитэлектреты**);
- при застывании органических растворов в электрическом поле (**криоэлектреты**);
- механической деформацией полимеров (**механоэлектреты**);
- трением (**трибоэлектреты**);
- действием поля коронного разряда (**коронэлектреты**).

Со временем у электретов наблюдается уменьшение заряда, обычно более быстрое в первое время после изготовления. В дальнейшем заряд меняется

незначительно в течение длительного времени, например, у электрета из политетрафторэтилена время жизни $\sim 10^2 \div 10^4$ лет.

Электреты применяют как источники электрического поля (электретные телефоны и микрофоны, вибродатчики, генераторы слабых переменных сигналов, электрометры, электростатические вольтметры и др.); чувствительные датчики в дозиметрах, устройствах электрической памяти; для изготовления барометров, гигрометров, газовых фильтров, пьезодатчиков.

2.3. ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПОТЕРИ

Диэлектрические потери — электрическая мощность, поглощаемая в диэлектрике под действием приложенного к нему напряжения. Эта мощность рассеивается, превращаясь в теплоту.

Потери складываются, во-первых, из мощности, теряемой при прохождении постоянного сквозного тока утечки через сопротивление изоляции, в соответствии с законом Джоуля - Ленца — *омические потери*:

$$P_{\text{СКВ}} = UI = U^2/R = RI^2, \quad (22)$$

где U — напряжение; I — электрический ток; R — сопротивление изоляции. Во-вторых, потери при переменных токах, обусловленные процессами установления миграционной и релаксационной поляризации — собственно *диэлектрические потери*. В-третьих, *ионизационные диэлектрические потери*, связанные с ионизацией диэлектриков в газообразном состоянии, наличием газовых включений в твердых телах.

В качестве характеристики материалов обычно используются *удельные диэлектрические потери p* — потери отнесенные к единице массы, Вт/кг, или к единице объема материала (плотность мощности потерь), Вт/м³.

В переменном электрическом поле $E = E_0 \exp(i\omega\tau)$ через диэлектрик течет ток, который представляет собой сумму плотности сквозного тока $i_{\text{СКВ}}$ и плотности тока смещения $i_{\text{СМ}}$:

$$i = i_{\text{СКВ}} + i_{\text{СМ}}; \quad i_{\text{СКВ}} = \gamma E; \quad i_{\text{СМ}} = dD/d\tau. \quad (23)$$

В этом случае диэлектрическая проницаемость представляет собой комплексную функцию частоты:

$$\varepsilon(\omega) = \varepsilon'(\omega) + i\varepsilon''(\omega). \quad (24)$$

Подставляем (24) в (5), а затем в (23), и получаем, что полный ток подразделяется на активную i_a и реактивную i_r составляющие:

$$i = i_a + i i_r; \quad i_a = (\gamma + \varepsilon_0 \varepsilon'' \omega) E; \quad i_r = \varepsilon_0 \varepsilon' \omega E. \quad (25)$$

В чисто емкостной цепи ток опережает напряжение по фазе на $\pi/2$, поэтому в соответствии с векторной диаграммой тока в диэлектрике, рис. 17, полные потери составляют

$$P = UI_a = UI \cos \varphi = UI_r \operatorname{tg} \delta = U^2 \omega C \operatorname{tg} \delta; \quad \operatorname{tg} \delta = i_a / i_r, \quad (26)$$

где δ - *угол диэлектрических потерь*.

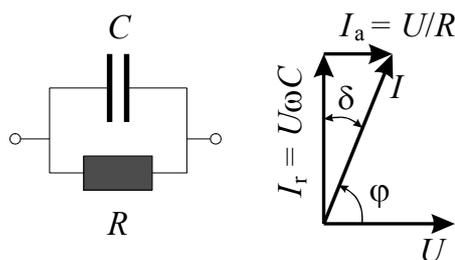


Рис. 17. Параллельная схема замещения и векторная диаграмма токов в диэлектрике с потерями

Значение $\operatorname{tg} \delta$ для лучших электроизоляционных материалов, применяемых в технике высоких частот и напряжений, составляет $\sim 10^{-5} \div 10^{-4}$. Диэлектрические потери увеличиваются с ростом температуры. Поэтому с учетом (1) условия работы электрической изоляции с ростом температуры становятся более тяжелыми. Повышение влажности также способствует росту $\operatorname{tg} \delta$.

Зависимость $\operatorname{tg} \delta$ с ростом напряжения показана на рис. 18. Резкое увеличение $\operatorname{tg} \delta$ с некоторого значения $U \equiv U_{\text{ион}}$ связано с ионизацией воздушных включений или других газов в изоляции.

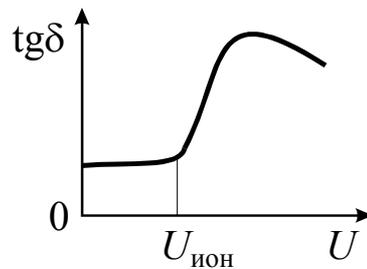


Рис. 18. Кривая ионизации электрической изоляции

Добротность изоляции обратнопропорциональна тангенсу угла диэлектрических потерь:

$$Q = 1/\operatorname{tg} \delta = \operatorname{tg} \varphi = I_r / I_a . \quad (27)$$

2.4. ПРОБОЙ ДИЭЛЕКТРИКОВ

Электрическая изоляция не может выдержать неограниченно высокого напряжения. При достижении некоторого критического значения напряжения, называемого **пробивным напряжением** $U_{\text{пр}}$, наступает **пробой**, представляющий собой разрушение диэлектрика с потерей им электроизоляционных свойств. При пробое ток утечки сильно возрастает, а сопротивление снижается, и получается короткое замыкание между проводниками в месте пробоя.

Пробивное напряжение зависит от толщины изоляции h , то есть расстояния между электродами. Чем толще слой электроизоляции, тем выше пробивное напряжение. Поэтому вводится такая характеристика как способность материала противостоять пробую - электрическая прочность $E_{\text{пр}}$. Для равномерного электрического поля:

$$E_{\text{пр}} = U_{\text{пр}} / h . \quad (28)$$

В большинстве случаев пробивное напряжение возрастает с увеличением толщины изоляции медленнее, чем по линейному закону. В особо тонких слоях начинают сказываться неоднородности структуры и электрическая прочность уменьшается. У неоднородных тонких материалов (бумага, лакоткань и т.п.) электрическая прочность уменьшается с увеличением площади электродов, что

объясняется увеличением вероятности попадания под электроды слабых мест диэлектрика.

Для надежной работы электротехнического устройства рабочее напряжение его изоляции $U_{\text{раб}}$ должно быть существенно меньше пробивного напряжения. Отношение $U_{\text{пр}}/U_{\text{раб}}$ называют **коэффициентом запаса электрической прочности изоляции**.

Электрическая прочность высококачественных твердых диэлектриков, как правило, выше, чем жидких и, тем более, газообразных при нормальном давлении.

Различают несколько видов пробоя: *чисто электрический, тепловой, электромеханический, электрохимический и ионизационный*. **Чисто электрический или собственный пробой** представляет собой непосредственное разрушение структуры диэлектрика силами электрического поля. Этот вид пробоя развивается практически мгновенно $\sim 10^{-8} \div 10^{-7}$ с, и не обусловлен тепловой энергией. Это чисто электронный процесс, когда из немногих начальных электронов в твердом теле создается электронная лавина. В неоднородных электрических полях пробивное напряжение однородного диэлектрика меньше, чем в однородных.

Электрическая прочность твердых диэлектриков практически не зависит от температуры до некоторого ее критического значения, когда наблюдается заметное снижение электрической прочности. В этом случае наступает **тепловой пробой**, который связан с нагревом изоляции в электрическом поле. Процесс идет следующим образом. После подачи напряжения на диэлектрик в нем начинает выделяться теплота потерь, и он разогревается. Повышение температуры приводит к росту потерь, а следовательно, к еще большему разогреву. В конце концов, в диэлектрике происходят существенные изменения (расплавление, обугливание и т.п. в зависимости от природы материала), и его собственная электрическая прочность снижается настолько, что происходит пробой. Тепловой пробой может иметь локальный характер, при котором средняя температура всего объема изолятора существенно не изменяется. Таким образом, тепловой пробой существенно зависит от отвода

выделяющегося в диэлектрике тепла в окружающую среду, поэтому электрическая прочность при тепловом пробое является не только характеристикой материала, но и самого изделия. Пробивное напряжение при тепловом пробое существенно зависит от времени приложения напряжения. Если это время невелико, то диэлектрик не успевает разогреться и пробой не наступает. С ростом частоты электрического напряжения и ростом окружающей температуры пробивное напряжение уменьшается.

Электромеханический пробой подготавливается механическим разрушением материала (образованием макроскопических трещин) силами электрического поля (давлением электродов).

Электрохимический пробой связан с химическим изменением материала в электрическом поле, например, прораствание металлических **дендритов** (древовидных кристаллитов) в результате *электролиза*. Этот вид пробоя имеет существенное значение при повышенных температурах и высокой влажности воздуха. Электрохимический пробой может иметь место при высоких частотах, если в закрытых порах материала происходит ионизация газа, сопровождающаяся тепловым эффектом и восстановлением оксидов металлов переменной валентности, например, в керамике. Развитие электрохимического пробоя требует много времени, поскольку он связан явлением электропроводности диэлектрика. Он во многом зависит от материала электродов.

Ионизационный пробой объясняется действием на диэлектрик химически агрессивных веществ, образующихся в газовых порах диэлектрика при частичных разрядах, а также *эрозией* диэлектрика на границе пор ионами газа.

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЙ СПРАВОЧНИК (В ТРЕХ ТОМАХ)

ПОД ОБЩЕЙ РЕДАКЦИЕЙ
профессоров Московского Энергетического института
В. Г. Герасимова, П. Г. Грудинского, В. А. Лабунцова,
И. Н. Орлова (главный редактор), **М. М. Соколова,**
А. М. Федосеева, А. Я. Шихина и инж. **И. В. Антика**

СЕДЬМОЕ ИЗДАНИЕ, ИСПРАВЛЕННОЕ И ДОПОЛНЕННОЕ

ТОМ I

ОБЩИЕ ВОПРОСЫ. ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ



МОСКВА · ЭНЕРГОАТОМИЗДАТ · 1985

Для основных электрических и магнитных величин должны применяться следующие обозначения:

Латинский алфавит

- A — плотность тока линейная; потенциал магнитный векторный
 B — индукция магнитная
 B, b — проводимость реактивная
 C — емкость
 c — скорость распространения электромагнитных волн (c_0 — в вакууме)
 D — смещение электрическое
 E — напряженность электрического поля
 E, e — электродвижущая сила (ЭДС)
 F — магнитодвижущая сила (МДС)
 f — частота колебаний (f_0 — резонансная)
 G, g — проводимость активная
 H — напряженность магнитного поля; передаточная функция
 I, i — ток
 J — плотность тока
 k — коэффициент связи
 L — индуктивность собственная
 M — индуктивность взаимная; намагниченность
 m — магнитный момент; число фаз многофазной системы цепей
 N — коэффициент размагничивания
 n — коэффициент трансформации; отношение чисел витков
 P — мощность; активная мощность; поляризованность
 p — момент электрический; мощность удельная; число пар полюсов
 Q — добротность; мощность реактивная
 Q, q — заряд
 R, r — сопротивление электрическое; сопротивление активное
 S — мощность полная
 T — период колебаний
 U, u — напряжение
 W — энергия электромагнитная
 w — число витков; энергия электромагнитная удельная
 X, x — сопротивление реактивное
 Y, y — проводимость полная
 Z, z — сопротивление полное

Греческий алфавит

- A — постоянная ослабления
 α — коэффициент ослабления (Нп/м)
 B — постоянная фазы
 β — коэффициент фазы (рад/м)
 Γ — постоянная передачи
 γ — коэффициент распространения; проводимость удельная электрическая
 δ — коэффициент затухания (c^{-1}); угол потерь
 ϵ_a — абсолютная диэлектрическая проницаемость
 ϵ_r — относительная диэлектрическая проницаемость
 ϵ_0 — электрическая постоянная
 θ — декремент колебаний логарифмический

- κ — восприимчивость магнитная
 λ — длина электромагнитной волны; коэффициент мощности
 μ_a — абсолютная магнитная проницаемость
 μ_r — относительная магнитная проницаемость
 μ_0 — магнитная постоянная
 Π — вектор Пойнтинга
 ρ — коэффициент отражения; плотность электрического заряда объемная; сопротивление электрическое удельное
 σ — плотность электрического заряда поверхностная; проводимость электрическая удельная
 τ — плотность электрического заряда линейная; постоянная времени
 Φ — магнитный поток
 ϕ — потенциал электрический; сдвиг фаз между напряжением и током
 χ — восприимчивость диэлектрическая
 Ψ — потокосцепление
 Ω, ω — частота колебаний угловая

Примеры применения индексов

- Z_B — волновое сопротивление
 r_{BT} — внутреннее сопротивление
 Z_c — характеристическое сопротивление
 $u_{вх}$ — входное напряжение
 $u_{вых}$ — выходное напряжение
 $C_{дин}$ — емкость динамическая
 $z_{диф}$ — индуктивность дифференциальная
 r_k — сопротивление короткого замыкания
 W_M — энергия магнитная
 I_m — амплитудное значение тока
 I_{max} — максимальное значение тока
 I_{min} — минимальное значение тока
 I_Σ — суммарный ток
 U_ϕ — фазное напряжение
 r_x — сопротивление холостого хода
 $a_* = a/a_0$ — отнесенная к базисному значению (a_0) величина

Список литературы

- 2.1. Единицы физических величин. ГОСТ 8.417-81 (СТ СЭВ 1052-78) (см. также РД 50-160-79. Методические указания. Внедрение и применение СТ СЭВ 1052-78).
- 2.2. ГСССД 1-76. Фундаментальные физические константы.
- 2.3. ГОСТ 1494-77. (СТ СЭВ 3231-81). Электротехника. Буквенные обозначения основных величин.
- 2.4. Бурдун Г. Д. Справочник по Международной системе единиц. М.: Изд-во стандартов, 1980. 232 с.
- 2.5. Глебов Г. Д. Единицы физических величин в электронике. М.: Высшая школа, 1983. 87 с.
- 2.6. Машкович В. П. Защита от ионизирующих излучений: Справочник. М.: Энергоатомиздат, 1982. 296 с.
- 2.7. Олейникова Л. Д. Единицы физических величин в энергетике (Точность воспроизведения и передачи): Справочное пособие. М.: Энергоатомиздат, 1983. 232 с.
- 2.8. Периодическая система элементов Д. И. Менделеева. — В кн.: Химический энциклопедический словарь. М.: Советская энциклопедия, 1983, с. 432—434.
- 2.9. Сена Л. А. Единицы физических величин и их размерности. М.: Наука, 1977. 335 с.
- 2.10. Чертов А. Г. Единицы физических величин. М.: Высшая школа, 1977. 287 с.
- 2.11. Стоцкий Л. Р. Физические величины и их единицы. Справочник. М.: Просвещение, 1984. 239 с.

3.8. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В ДИЭЛЕКТРИКАХ

Поляризация диэлектриков

Основными электрическими процессами, возникающими в диэлектриках под воздействием приложенного напряжения, являются процессы поляризации, электропроводности и пробоя диэлектриков.

Поляризация представляет собой обратимое смещение электрически заряженных частиц, входящих в состав диэлектриков. Различают следующие основные виды поляризации: электронная, ионная, дипольная, спонтанная и некоторые другие.

Процесс поляризации диэлектриков описывается уравнением Клаузиуса—Мосотти

$$\frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 2} = \frac{n_0 \alpha}{3\epsilon_0},$$

где ϵ_r — относительная диэлектрическая проницаемость диэлектрического материала; n_0 — число частиц (молекул, ионов) в 1 м^3 материала; $\alpha = \alpha_{\text{э}} + \alpha_{\text{и}} + \alpha_{\text{д}}$ — поляризуемость частицы (молекулы, иона); $\alpha_{\text{э}}$ — электронная поляризуемость; $\alpha_{\text{и}}$ — ионная поляризуемость; $\alpha_{\text{д}}$ — дипольная поляризуемость; ϵ_0 — электрическая постоянная.

Уравнение Клаузиуса—Мосотти устанавливает связь между практической характеристикой материала — относительной диэлектрической проницаемостью ϵ_r , физической постоянной материала α и числом поляризующихся частиц в единице объема диэлектрика n_0 .

Поляризованностью P , Кл/м², называется величина

$$P = \epsilon_0 \chi_r E = \epsilon_0 (\epsilon_r - 1) E,$$

где χ_r — относительная диэлектрическая восприимчивость; E — напряженность электрического поля.

Электронная поляризация представляет собой процесс упругого смещения электронов (электронных орбит) относительно ядра во всех атомах диэлектрика. Процесс электронной поляризации происходит за время 10^{-15} — 10^{-16} с. Электронная поляризация имеет место во всех диэлектриках.

Электронная поляризуемость α_0 зависит от структуры частицы. Чем больше радиус молекул или иона, тем больше α_0 и ϵ_r данного диэлектрика.

В пропорциональной зависимости от числа частиц n_0 в единице объема диэлектрика находится и ϵ_r . С нагреванием, когда плотность диэлектрика уменьшается, наблюдается уменьшение ϵ_r неполярного диэлектрика (рис. 3.26, кривая 1).

У диэлектриков с чисто электронной поляризацией ϵ_r численно равна квадрату показателя преломления света.

Ионная поляризация представляет собой упругое смещение под действием электрического поля ионов относительно центров их равновесия. Поляризация ионного смещения происходит за время, сравнимое со временем собственных колебаний ионов, и составляет 10^{-13} — 10^{-14} с.

Интенсивность процесса ионной поляризации в уравнении Клаузиуса—Мосотти

$$\alpha_{и} = 2e^2/b,$$

где e — заряд иона; b — коэффициент упругой связи между ионами.

С повышением температуры ионного диэлектрика $\alpha_{и}$ возрастает в связи с ослаблением упругих сил в ионном диэлектрике и увеличением амплитуды колебаний иона. Поэтому интенсивность процесса ионной поляризации возрастает с повышением температуры. В ионных диэлектриках одновременно с поляризацией ионного смещения развивается также процесс электронной поляризации. Эффект поляризации у большинства ионных диэлектриков возрастает с повышением их температуры.

Электронная и ионная поляризация — вид деформационной поляризации, не вызывающий потерь энергии в диэлектриках. Процессы поляризации, вызывающие затраты энергии, относятся к релаксационным видам поляризации.

Дипольная поляризация протекает в полярных диэлектриках под действием электрического поля. Этот вид поляризации представляет собой ориентацию — поворот полярных молекул в направлении действующего электрического поля.

Поляризуемость полярных молекул определяется выражением

$$\alpha_{д} = \mu^2/3kT,$$

где μ — начальный электрический момент полярной молекулы; k — постоянная Больцмана; T — абсолютная температура.

При повышении температуры диэлектрика интенсивность дипольной поляризации возрастает в связи с ослаблением межмолекулярных сил и понижением коэффициента внутреннего трения. Поэтому с повышением температуры вначале ϵ_r полярных диэлектриков увеличивается (рис. 3.26, кривая 2). С дальнейшим ростом температуры интенсивность хаотического теплового движения полярных молекул начинает преобладать над ориентирующим действием электрического поля и эффект дипольной поляризации понижается. Это в свою очередь вызывает уменьшение ϵ_r полярных диэлектриков.

Для ориентации полярных молекул в процессе дипольной поляризации требуются промежутки времени, значительно большие по

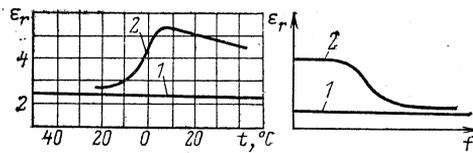


Рис. 3.26. Зависимость ϵ_r от температуры и частоты для электроизоляционных жидкостей: 1 — неполярная жидкость; 2 — полярная жидкость

сравнению со временем для процессов деформационных поляризаций. Естественно, диэлектрическая проницаемость полярных диэлектриков в сильной степени зависит от частоты электрического поля (рис. 3.26). При низких частотах полярные молекулы успевают совершить свой поворот за время одного полупериода переменного напряжения. При этом ϵ_r практически равна ϵ_r при постоянном напряжении. С дальнейшим ростом частоты время одного полупериода сокращается и ряд полярных молекул выпадает из процесса дипольной поляризации. При этом диэлектрическая проницаемость ϵ_r диэлектрика резко снижается, достигая (при очень больших частотах) значения $\epsilon_{r\infty}$, обусловленного только электронной поляризацией диэлектрика. Критическая частота f_0 , с которой начинается резкое снижение эффекта дипольной поляризации, может быть определена по формуле

$$f_0 = kT/8\pi\eta r^3,$$

где r — эквивалентный радиус модели полярной молекулы; η — динамическая вязкость; k — постоянная Больцмана; T — абсолютная температура.

Дипольная поляризация ярко выражена у полярных газов и жидкостей (касторовое масло, совок и др.). В твердых полярных диэлектриках дипольная поляризация представляет собой не ориентацию самих полярных молекул, а поворот имеющихся в молекулах полярных радикалов, например гидроксильных групп в молекулах целлюлозы, бакелита и др. Этот вид дипольной поляризации иногда называется структурной поляризацией [3.21, 3.24].

Значения диэлектрической проницаемости полярных диэлектриков зависят от размеров полярных молекул и значений их начального электрического момента. Чем меньше размер полярной молекулы — диполя и больше ее начальный момент μ , тем больше ϵ_r данного диэлектрика. У полярных диэлектриков одновременно имеют место дипольная и электронная поляризации. Вследствие этого суммарный эффект поляризации полярных диэлектриков, а следовательно, и значения их диэлектрических проницаемостей намного выше, чем у неполярных диэлектриков (табл. 3.13).

Дипольная поляризация вызывает потери энергии в диэлектрике, так как электрическое поле затрачивает энергию на поворот полярных молекул (диполей). Эта энергия рассеивается в полярных диэлектриках в виде теплоты, которая вызывает нагрев последних. Потери мощности в диэлектриках, работающих в переменном поле, оцениваются тангенсом угла диэлектрических потерь

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{\gamma}{\omega \epsilon_0 \epsilon_r},$$

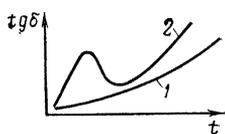
Таблица 3.13. Относительные диэлектрические проницаемости характерных диэлектриков

Неполярные диэлектрики		Полярные диэлектрики	
Название	ϵ_r при 20 °С	Название	ϵ_r при 20 °С
Четыреххлористый углерод	2,23	Касторовое масло	4,5—4,8
Бензол	2,218	Совол	5,0—5,2
Парафин	2,0—2,2	Бакелит	4—5
Политетрафторэтилен	1,9—2,0	Галовакс	5,0
		Глифтал	8—9

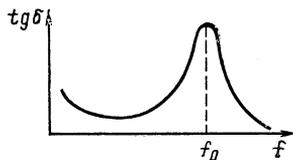
где γ — удельная активная проводимость; ω — угловая частота; ϵ_0 — электрическая постоянная; ϵ_r — относительная диэлектрическая проницаемость.

На рис. 3.27 показаны зависимости этой характеристики от температуры для неполярной и полярной жидкостей.

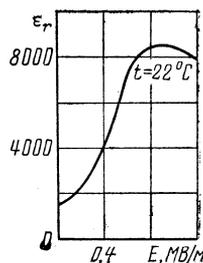
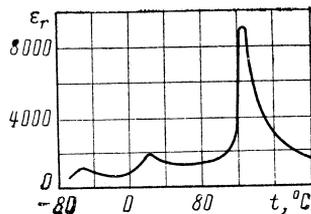
У тщательно очищенных неполярных диэлектриков диэлектрические потери обусловлены преимущественно токами проводимости, величины которых возрастают с повышением температуры диэлектрика. В связи с этим возрастает и $\text{tg } \delta$. У полярных диэлектриков наблюдается максимум $\text{tg } \delta$ при такой вязкости диэлектрика, когда в процессе дипольной поляризации принимает участие наибольшее количество полярных молекул. Понижение $\text{tg } \delta$ с дальнейшим повышением температуры обусловлено ростом интенсивности беспорядочного теплового движения полярных молекул. Вторичный подъем вызван увеличением тока проводимости в диэлектрике (рис. 3.27).

Рис. 3.27. Зависимость $\text{tg } \delta$ от температуры для электроизоляционных жидкостей: 1 — неполярная жидкость; 2 — полярная жидкость

На рис. 3.28 представлена частотная зависимость $\text{tg } \delta$ для полярной жидкости. Максимум $\text{tg } \delta$ здесь соответствует частоте f_0 , при которой начинается снижение ϵ_r (см. рис. 3.26). Это объясняется тем, что большинство полярных молекул при этой частоте выходит из процесса дипольной поляризации.

Рис. 3.28. Зависимость $\text{tg } \delta$ от частоты для полярной электроизоляционной жидкости

Еще один вид релаксационной поляризации наблюдается в неорганических стеклах, а также в ионных кристаллических диэлектриках с неплотной упаковкой ионов (муллит в фарфоре и др.). В этих диэлектриках слабо связанные ионы, находящиеся в состоянии хаотических тепловых колебаний, перебрасываются электрическим полем. Этот процесс получил название *миграционной поляризации*. Переброс слабо связанных ионов вызывает дополнительную потерю энергии.

Рис. 3.29. Зависимость ϵ_r сегнетоэлектрика от напряженности электрического поляРис. 3.30. Зависимость ϵ_r сегнетоэлектрика (BaTiO_3) от температуры

Самопроизвольная (спонтанная поляризация) представляет собой процесс самопроизвольной ориентации диполей, наблюдаемой внутри отдельных областей (доменов) диэлектрика в отсутствие электрического поля. Самопроизвольная поляризация имеет место у материалов, называемых сегнетоэлектриками.

В отсутствие электрического поля электрические моменты отдельных областей (доменов) диэлектрика направлены беспорядочно и взаимно уравновешивают друг друга. Наложение на диэлектрик электрического поля вызывает ориентацию диполей в направлении поля. При этом интенсивность поляризации резко возрастает, вследствие чего наблюдается сильный рост диэлектрической проницаемости сегнетоэлектрика. Этот процесс продолжается до определенной напряженности электрического поля, а затем наступает насыщение (рис. 3.29). Дальнейшее повышение напряженности не увеличивает интенсивности поляризации, и рост ϵ_r прекращается. Диэлектрическая проницаемость сегнетоэлектриков имеет также ярко выраженный максимум при вполне определенной температуре (рис. 3.30). Эта температура называется сегнетоэлектрической точкой Кюри (θ_K). Наличие спонтанной поляризации обуславливает anomalно большие значения ϵ_r у сегнетоэлектриков (сегнетова соль, титанат бария и др.). Процесс самопроизвольной поляризации сопровождается затратой энергии, рассеиваемой в диэлектриках в виде теплоты.

Электропроводность диэлектриков

Все диэлектрики, хотя и в незначительной степени, обладают электропроводностью.

В отличие от проводников у диэлектриков наблюдается изменение тока со временем (рис. 3.31) вследствие спадания тока абсорбции. Последний обусловлен наличием релаксационных поляризаций в диэлектрике. С некоторого момента под воздействием постоянного напряжения в диэлектрике устанавливается только ток проводимости. Значение последнего определяет проводимость диэлектрика.

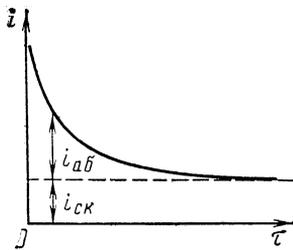


Рис. 3.31. Зависимость тока в диэлектрике от времени

В газообразных диэлектриках (воздух, азот, водород и др.) ток проводимости обусловлен направленным перемещением положительно и отрицательно заряженных ионов и электронов.

В жидких диэлектриках ток проводимости создается ионами и электрически заряженными коллоидными частицами (молионы). Источником ионов являются различные примеси в диэлектрике: вода, органические кислоты и т. п. В полярных электроизоляционных жидкостях на ионы могут диссоциировать молекулы самого жидкого диэлектрика. Электропроводность полярных электроизоляционных жидкостей всегда несколько выше электропроводности неполярных жидких диэлектриков.

В электроизоляционных технических жидкостях наблюдается также молионная или электрофоретическая (электрофорез) электропроводность. В этом случае ток проводимости обусловлен направленным перемещением электрически заряженных коллоидных частиц различных примесей: воды, смолистых веществ и др. Коллоидные частицы различных загрязнений перемещаются в электроизоляционной жидкости под действием электрического поля. С повышением температуры жидкого диэлектрика его вязкость падает и направленное перемещение ионов и молионов облегчается. Проводимость жидких диэлектриков изменяется (рис. 3.32) по экспоненциальному закону

$$\gamma = \gamma_0 e^{AT},$$

где γ_0 и A — постоянные величины, зависящие от состава жидкого диэлектрика; T — абсолютная температура.

С ростом напряжения, приложенного к жидкому диэлектрику, изменение тока проводимости (рис. 3.33) носит приблизительно такой же характер, как и у газообразных диэлектриков. В тщательно очищенных электроизоляционных жидкостях отчетливо наблюдается область насыщения. Понижение электропроводности жидких диэлектриков достигается их тщательной очисткой (фильтрование, сушка, обработка адсорбентами и др.).

В твердых диэлектриках электропровод-

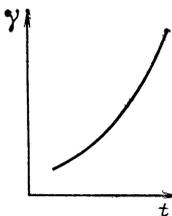
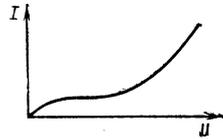


Рис. 3.32. Зависимость удельной проводимости жидкого диэлектрика от температуры

Рис. 3.33. Зависимость тока от напряжения в жидком диэлектрике



ность складывается из ионной и электронной электропроводностей, причем электронная электропроводность, как правило, наблюдается в сильных электрических полях.

Ток проводимости в твердых диэлектриках обусловливается направленным перемещением ионов примесей и ионов самого диэлектрика. В диэлектриках с атомными и молекулярными решетками ток проводимости обусловлен только ионами различных примесей. У таких диэлектриков (парафин, полиэтилен, политетрафторэтилен и др.) проводимость весьма мала, и эти материалы обладают большими значениями удельного объемного и поверхностного сопротивления: $\rho_V = 10^{15} \div 10^{17}$ Ом·м; $\rho_S = 10^{13} \div 10^{14}$ Ом. Такими же большими удельными сопротивлениями обладают высокополимерные аморфные диэлектрики, например полистирол и полипропилен, у которых ток проводимости обусловлен преимущественно ионами примесей.

С течением времени ионная проводимость твердого диэлектрика понижается в связи с уменьшением ионов примесей, которые, дойдя до электродов, нейтрализуют свои заряды. В ионных кристаллических диэлектриках (слюда и др.) ток проводимости составляют не только ионы примесей, но ионы самой кристаллической решетки. Последние могут быть сорваны электрическим полем с мест, где они были слабо закреплены (междуузлия), а также из узлов кристаллической решетки при одновременном воздействии на нее электрического поля и высокой температуры.

В аморфных диэлектриках (неорганические стекла) ионная электропроводность обусловлена электролизом различных окислов, входящих в состав самих стекол. Особенно сильно повышается электропроводность стекол при содержании в них окислов одновалентных металлов (Na_2O , K_2O и др.). Введение же окислов двухвалентных металлов (BaO , CaO и др.) приводит к снижению проводимости в стеклах.

Проводимость стекол и других твердых диэлектриков показывает заметную зависимость от температуры:

$$\gamma = Ae^{-B/T},$$

где A и B — постоянные, зависящие от состава и структуры твердого диэлектрика; T — абсолютная температура, К.

Проводимость твердых кристаллических диэлектриков с ионными связями хорошо описывается двучленной формулой

$$\gamma = \gamma_1 e^{-B_1/T} + \gamma_2 e^{-B_2/T}.$$

Первый член этой формулы исчезающе мал при низких температурах, а второй — исчезающе мал при высоких температурах.

В ионных кристаллических диэлектриках ток проводимости обусловлен перемещением ионов одного знака. Так, в кристалле NaCl под действием электрического поля движутся только положительно заряженные ионы натрия.

При высоких температурах в токе проводимости принимают участие и ионы другого знака.

В области сильных электрических полей в твердых диэлектриках наблюдается также электронная электропроводность, которая изменяется согласно выражению

$$\gamma = \gamma_n e^{bE},$$

где γ_n — проводимость в конце области насыщения; b — коэффициент, зависящий от температуры.

В области очень сильных электрических полей (предпробойная область) электрическая проводимость твердых кристаллических диэлектриков более точно описывается формулой Я. И. Френкеля

$$\gamma = \gamma_n e^{-\frac{1}{kT} \sqrt{\frac{e^2 E}{4\pi\epsilon_0 \epsilon_r}}},$$

где k — постоянная Больцмана; e — заряд электрона; ϵ_r — относительная электрическая проницаемость материала; E — напряженность электрического поля.

При высоких температурах может наблюдаться также входение электронов в твердый диэлектрик с поверхности металлических электродов.

Пробой диэлектриков

При напряженности электрического поля, превосходящей предел электрической прочности диэлектрика, наступает пробой. Пробой представляет собой процесс разрушения диэлектрика, в результате чего диэлектрик теряет электронизоляционные свойства в месте пробоя.

Напряжение, при котором происходит пробой диэлектрика, называют пробивным напряжением $U_{пр}$, а соответствующее значение напряженности электрического поля называется электрической прочностью диэлектрика $E_{пр}$.

Для равномерного электрического поля электрическая прочность диэлектрика определяется по формуле

$$E_{пр} = U_{пр}/d,$$

где d — толщина диэлектрика в месте пробоя.

Пробой газообразных диэлектриков см. § 3.7.

Пробой жидких диэлектриков — явление сложное, что объясняется сложным составом жидких диэлектриков и сильным влиянием загрязнений на развитие пробоя. На рис. 3.34 показана зависимость изменения электрической

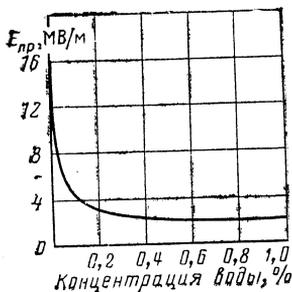


Рис. 3.34. Изменение электрической прочности трансформаторного масла от содержания в нем воды

Рис. 3.35. Зависимость пробивного напряжения жидкого диэлектрика от времени воздействия на него электрического поля

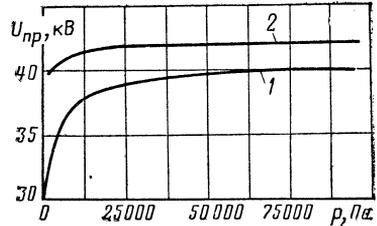
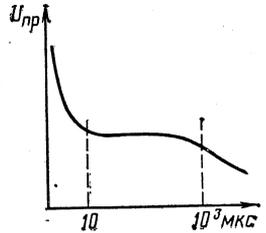


Рис. 3.36. Зависимость пробивного напряжения трансформаторного масла от давления при 50 Гц:

1 — невакуумированное масло; 2 — вакуумированное масло

прочности трансформаторного масла от содержания влаги. Наиболее резкое снижение электрической прочности жидких диэлектриков вызывает эмульсионная вода. С повышением температуры эмульсионная вода переходит в растворенную; при этом жидкий диэлектрик становится более однородным и электрическая прочность его повышается.

Другие загрязнения (волокна, смолистые вещества и др.) подобно воде понижают электрическую прочность жидких диэлектриков.

Чистота поверхности электродов оказывает существенное влияние на электрическую прочность жидких диэлектриков.

Большая продолжительность воздействия электрического поля на жидкий диэлектрик вызывает резкое снижение пробивного напряжения (рис. 3.35).

Конфигурация электрического поля и полярность электродов также вызывают изменение пробивных напряжений жидких диэлектриков (см. § 13.3).

Пробивное напряжение жидких диэлектриков повышается с увеличением давления (рис. 3.36). Зависимость пробивного напряжения от давления заметно уменьшается с повышением степени очистки электронизоляционных жидкостей, что указывает на большое влияние газообразных примесей.

При импульсных воздействиях напряжения на слой жидкого диэлектрика зависимость пробивного напряжения от давления практически не наблюдается. С увеличением плотности жидкого диэлектрика его электрическая прочность линейно возрастает.

Влияние температуры на пробивные напряжения жидких диэлектриков различно в зависимости от их химического состава и степени загрязнения примесями. Заметные изменения электрической прочности с температурой наблюдаются у электронизоляционных жидкостей сложного химического состава, особенно при

наличии в них загрязнений (влага, газы и др.). По мере приближения к температуре кипения электрическая прочность жидких диэлектриков резко понижается. Наибольший практический интерес представляют теории, посвященные процессам пробоя технических электроизоляционных жидкостей. В большинстве этих теорий (авторы Н. Н. Семенов и А. Ф. Вальтер, Эдлер и др.) пробой жидких диэлектриков рассматривается как тепловой процесс, в результате которого в слое жидкого диэлектрика образуются газовые или паровые каналы. Паровая и газовая фазы в жидком диэлектрике возникают при нагреве его токами проводимости, повышенные значения которых наблюдаются в наиболее загрязненных частях диэлектрика. При критических значениях напряженности электрического поля в газовых и паровых каналах начинает развиваться процесс ударной ионизации газа, завершающийся пробоем.

Пробой твердых диэлектриков представляет собой или чисто электрический процесс (электрическая форма пробоя), или тепловой процесс (тепловая форма пробоя). В основе электрического пробоя лежат явления, в результате которых в твердых диэлектриках имеет место лавинное возрастание электронного тока, подобно тому как это наблюдается в процессе ударной ионизации в газообразных диэлектриках.

Характерными признаками электрического пробоя твердых диэлектриков являются:

1. Независимость или очень слабая зависимость электрической прочности диэлектрика от температуры и длительности приложенного напряжения (до 10^{-7} — 10^{-8} с).

2. Электрическая прочность твердого диэлектрика в однородном поле не зависит от толщины диэлектрика (до толщин 10^{-4} — 10^{-5} см).

3. Электрическая прочность твердых диэлектриков находится в сравнительно узких пределах: 10^8 — 10^9 В/м; причем она больше, чем при тепловой форме пробоя.

4. Перед пробоем ток в твердом диэлектрике увеличивается по экспоненциальному закону, а непосредственно перед наступлением пробоя наблюдается скачкообразное возрастание тока.

5. При наличии неоднородного поля электрический пробой происходит в месте наибольшей напряженности поля (краевой эффект).

Тепловой пробой имеет место при повышенной проводимости твердых диэлектриков и больших диэлектрических потерях, а также при подогреве диэлектрика посторонними источниками теплоты или при плохом теплоотводе. Процесс теплового пробоя твердого диэлектрика состоит в следующем. Вследствие неоднородности состава отдельные части объема диэлектрика обладают повышенной проводимостью. Они представляют собой тонкие каналы, проходящие через всю толщину диэлектрика. Вследствие повышенной плотности тока в одном из таких каналов будут выделяться значительные количества теплоты. Это повлечет за собой еще большее нарастание тока вследствие резкого уменьшения сопротивления этого участка в диэлектрике. Процесс нарастания теплоты будет продолжаться до тех пор, пока не произойдет тепловое разрушение ма-

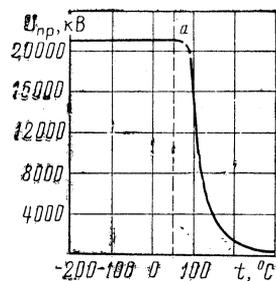


Рис. 3.37. Зависимость пробивного напряжения от температуры для электротехнического фарфора (а — точка перехода к тепловоому пробую)

териала (расплавление, науглероживание) по всей его толщине по ослабленному месту.

Характерными признаками теплового пробоя твердых диэлектриков являются:

1. Пробой наблюдается в месте наименьшего теплоотвода от диэлектрика в окружающую среду.

2. Пробивное напряжение диэлектрика снижается с повышением температуры окружающей среды.

3. Пробивное напряжение снижается с увеличением длительности приложенного напряжения.

4. Электрическая прочность уменьшается с увеличением толщины диэлектрика.

5. Электрическая прочность твердого диэлектрика уменьшается с ростом частоты приложенного переменного напряжения.

При пробое твердых диэлектриков часто наблюдаются случаи, когда до определенной температуры имеет место электрический пробой, а затем в связи с дополнительным нагревом диэлектрика наступает процесс теплового пробоя диэлектрика (рис. 3.37).

Аналогичный переход электрической формы пробоя в тепловую происходит в зависимости от времени выдержки твердого диэлектрика под напряжением.

Согласно выводам теории теплового пробоя твердых диэлектриков (В. А. Фок, Н. Н. Семенов) можно подсчитать пробивные напряжения для простых электроизоляционных конструкций (пластины) по формулам:

а) для постоянного напряжения

$$U_{пр} = \sqrt{\frac{33,6k_{п}}{a\gamma_0}} \varphi(c);$$

б) для переменного напряжения

$$U_{пр} = \sqrt{\frac{60,5k_{п}}{ae_r f \operatorname{tg} \delta}} 10^6 \varphi(c),$$

где $\varphi(c)$ — функция величины

$$c = \frac{k_0 h}{k_0 + k_0 \Delta} \frac{k_0}{k_d};$$

k_0 — коэффициент теплоотдачи в окружающую среду; k_0 — коэффициент теплопроводности материала электродов; k_d — коэффициент теплопроводности диэлектрика; h — половина толщины диэлектрика; Δ — толщина электрода; a — температурный коэффициент диэлектрических потерь ТК ($\epsilon_r \operatorname{tg} \delta$); ϵ_r — относительная диэлектрическая проницаемость твердого диэлектрика (при температуре окружающей среды); $\operatorname{tg} \delta$ — тангенс угла диэлектрических по-

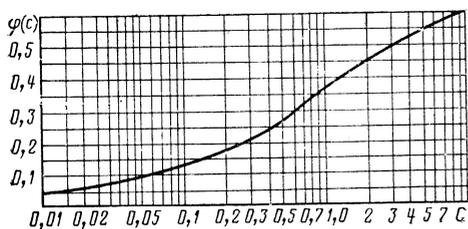


Рис. 3.38. Значение функции $\varphi(c)$. К расчету пробивного напряжения твердого диэлектрика при тепловом пробое (по В. А. Фоку)

твердого диэлектрика (при температуре окружающей среды); i — частота.

По известным значениям k_0 , h , k_d , k_a , Δ вычисляют значение c и, воспользовавшись графиком (рис. 3.38), находят $\varphi(c)$.

При неограниченном возрастании c функция $\varphi(c)$ стремится к пределу, равному 0,66.

Раздел 13

ЭЛЕКТРОИЗОЛЯЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

СОДЕРЖАНИЕ

13.1. Основные определения и классификация электроизоляционных материалов	390	13.7. Электроизоляционные составы (компаунды)	393
13.2. Нагревостойкость электроизоляционных материалов	381	13.8. Электроизоляционные ленточки	396
13.3. Жидкие и полужидкие диэлектрики	384	13.9. Электроизоляционные намотанные изделия	397
13.4. Полимерные органические диэлектрики	385	13.10. Электроизоляционные материалы на основе слюды	398
13.5. Электроизоляционные бумаги и картоны	388	13.11. Электрокерамические материалы	400
13.6. Слоистые электроизоляционные пластмассы	390	Список литературы	400

13.1. ОСНОВНЫЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ И КЛАССИФИКАЦИЯ ЭЛЕКТРОИЗОЛЯЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Электроизоляционными материалами называют диэлектрические материалы, с помощью которых осуществляется изоляция частей электрооборудования, находящихся под разными электрическими потенциалами. По сравнению с проводниковыми материалами (проводники) электроизоляционные материалы обладают значительно большим электрическим сопротивлением. Характерным свойством электроизоляционных материалов является возможность создания в них электростатического поля.

Согласно агрегатному состоянию электроизоляционные материалы делятся на газообразные, жидкие и твердые. Особенно большой является группа твердых электроизоляционных материалов (полимеры, пластмассы, керамика и др.).

Согласно химическому составу электроизоляционные материалы делятся на органические и неорганические. Основным элементом в молекулах всех органических электроизоляционных материалов является углерод. В неорганических диэлектриках углерода не содержится. Наибольшей нагревостойкостью обладают неорганические электроизоляционные материалы (слюда, керамика и др.).

По расположению частиц, составляющих электроизоляционные материалы, последние делятся на материалы кристаллической и аморфной структуры.

С точки зрения электрического состояния молекул электроизоляционные материалы делят на неполярные и полярные. *Неполярные* электроизоляционные материалы состоят из электрически нейтральных атомов и молекул, которые до воздействия на них внешнего электрического поля не обладают электрическими моментами. Нейтральные атомы и молекулы приобретают электрические моменты только

под действием высшего электрического поля — в процессе деформационных поляризации. Неполлярными электроизоляционными материалами являются: полиэтилен, фторопласт-4, полистирол, парафин и др. Среди неполярных электроизоляционных материалов выделяют группу кристаллических материалов (слюды, кварц, отдельные виды керамики и др.), в которых каждая пара ионов составляет неполярную молекулу. Каждый ион находится в колебательном тепловом движении около своего центра равновесия — узла кристаллической решетки.

Полярные электроизоляционные материалы состоят из полярных молекул — постоянных диполей. Последние вследствие асимметрии своего строения обладают начальным электрическим моментом — до воздействия на них электрического поля. При воздействии электрического поля полярные молекулы ориентируются, стремясь расположить свои оси в направлении действующего на них электрического поля. К полярным электроизоляционным материалам относятся: совол, соволт, поливинилхлорид, бакелиты и др. Полярные электроизоляционные материалы обладают повышенными значениями относительной диэлектрической проницаемости, несколько повышенной проводимостью и гигроскопичностью по сравнению с неполярными электроизоляционными материалами.

Многочисленную группу твердых электроизоляционных материалов делят еще на ряд подгрупп в зависимости от их состава, струк-

туры и технологических особенностей этих материалов; так, выделяют электрокерамические материалы, полимерные материалы, лаки, компаунды, изоляционные материалы на основе слюды и др. Основные электрические и физико-механические характеристики жидких и твердых электроизоляционных материалов приводятся в соответствующих таблицах данного раздела справочника.

13.2. НАГРЕВОСТОЙКОСТЬ ЭЛЕКТРОИЗОЛЯЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Электроизоляционные материалы, применяемые в электрических машинах, трансформаторах и аппаратах, разделяются по их нагревостойкости на семь классов согласно табл. 13.1 и 13.2.

Согласно современным воззрениям наиболее типичными процессами теплового старения электроизоляционных материалов являются:

- 1) выделение низкомолекулярных летучих веществ, которые образуются в процессе старения;
- 2) окисление, вызывающее появление хрупкости материала;
- 3) развитие процесса полимеризации молекул, которая в начале может улучшать электрические характеристики, а затем вызывать снижение эластичности, появление хрупкости материала и разрушение его под воздействием механических усилий;

Таблица 13.1. Нагревостойкость электроизоляционных материалов (ГОСТ 8865-70)

Класс нагревостойкости ¹	Температура ² , °С	Характеристика основных групп электроизоляционных материалов, соответствующих данному классу нагревостойкости ³
У	90	Непропитанные и не погруженные в жидкий электроизоляционный материал волокнистые материалы из целлюлозы, хлопка и шелка, а также соответствующие данному классу другие материалы и другие сочетания материалов ⁴
А	105	Пропитанные или погруженные в жидкий электроизоляционный материал волокнистые материалы из целлюлозы, хлопка или шелка, а также соответствующие данному классу другие материалы и другие сочетания материалов ⁴
Е	120	Синтетические органические материалы: пленки, волокнистые материалы, смолы, компаунды, а также соответствующие данному классу другие материалы и другие сочетания материалов
В	130	Материалы на основе слюды (в том числе на органических подложках), асбеста и стекловолокна, применяемые с органическими связующими и пропитывающими составами, а также соответствующие данному классу другие материалы и другие сочетания материалов
Ф	155	Материалы на основе слюды, асбеста и стекловолокна, применяемые в сочетании с органическими связующими и пропитывающими составами, а также соответствующие данному классу другие материалы и другие сочетания материалов
Н	180	Материалы на основе слюды, асбеста и стекловолокна, применяемые в сочетании с кремнийорганическими связующими и пропитывающими составами, кремнийорганические эластомеры, а также соответствующие данному классу другие материалы и другие сочетания материалов ⁴
С	Более 180	Слюда, керамические материалы, стекло, кварц, применяемые без связующих составов или с неорганическими или элементоорганическими связующими составами, а также соответствующие данному классу другие материалы и другие сочетания материалов

¹ Нагревостойкость — способность электроизоляционного материала выполнять свои функции при воздействии рабочей температуры в течение времени, сравнимого с расчетным сроком нормальной эксплуатации электрооборудования, в котором применяется данный электроизоляционный материал.

² Указанные в таблице температуры являются предельно допустимыми для электроизоляционных материалов при их длительном использовании (в течение ряда лет) в электрических машинах, трансформаторах и аппаратах, работающих в нормальных эксплуатационных условиях. Температуры в наиболее нагретом месте изоляции не должны превышать указанных предельно допустимых температур при работе электрооборудования в номинальном режиме при предусмотренной для этого режима максимальной температуре охлаждающей среды, указанной в соответствующих ГОСТ или ТУ.

³ С электроизоляционными материалами данного класса допускается совместное применение материалов предшествующих классов при условии, что под действием температуры, допускаемой для материалов более высокого класса, электрические и механические свойства комплексной изоляции не должны претерпевать изменений, могущих сделать изоляцию непригодной для длительной работы.

⁴ Другие сочетания материалов, для которых установлена возможность их работы при температуре, соответствующей данному классу.

Таблица 13.2. Ориентировочное распределение электроизоляционных материалов по классам нагревостойкости¹

Класс нагревостойкости	Электроизоляционные материалы ²	Связующие, пропитывающие и покровные составы, применяемые при производстве указанных материалов	Связующие, пропитывающие и покровные составы, применяемые при производстве электрических машин, трансформаторов и аппаратов с использованием указанных материалов
У	<p>Текстильные материалы на основе хлопка, натурального шелка, регенерированной целлюлозы, ацетилцеллюлозы и полиамидов; целлюлозные электроизоляционные бумаги, картоны и фибра</p> <p>Пластические массы с органическими наполнителями</p>	<p>Не применяются</p> <p>Мочевиноформальдегидные смолы</p>	<p>Не применяются</p> <p>Не требуются</p>
А	<p>Материалы класса У, если они пропитаны изоляционным составом или погружены в жидкие диэлектрики (масло и др.). Ацетобутилатцеллюлозные, ацетилцеллюлозные, деацетатные пленки</p> <p>Пленкоэлектротекстолит на основе ацетилцеллюлозной пленки</p> <p>Лакоткани, лакобумаги и лакочулки на основе хлопчатобумажной пряжи, натурального шелка, регенерированной целлюлозы, ацетатцеллюлозы или полиамидных волокон</p> <p>Изоляция эмалированных проводов</p> <p>Слоистые пластики на основе целлюлозных бумаг и тканей</p> <p>Полиамидные пленки Полиамидные литьевые смолы Асбестоцемент, пропитанный органическим составом, не вытекающим при 110 °С Древеснослоистые пластики</p> <p>Термореактивные компаунды на основе акриловых и метакриловых эфиров (без наполнителей)</p>	<p>Не применяются</p> <p>Клеящие составы, соответствующие данному классу нагревостойкости</p> <p>Масляные, смоляные, масляно-смоляные лаки</p> <p>Масляно-смоляные лаки, соответствующие данному классу нагревостойкости Термореактивные смолы фенолформальдегидного типа — — Битум, каменноугольный пек и др. Фенолформальдегидные смолы —</p>	<p>Лаки на основе натуральных смол (шеллак, копалы и др.), эфирцеллюлозные лаки, соответствующие данному классу нагревостойкости; термопластичные компаунды (битумные и др.) с температурой размягчения, обеспечивающей отсутствие вытекания при рабочих температурах только в неподвижных обмотках</p> <p>Нефтяные и синтетические изоляционные жидкости, соответствующие данному классу нагревостойкости</p> <p>Не требуются</p>
Е	<p>Пленки и волокна из полиэтилентерефталата</p> <p>Материалы на основе электроизоляционного картона и полиэтилентерефталатной пленки. Стеклолакоткани и лакоткани на основе полиэтилентерефталатных волокон</p> <p>Термореактивные синтетические смолы в компаунды (эпоксидные, полиэфирные, полиуретановые). Термореактивные компаунды на основе акриловых и метакриловых эфиров с неорганическим наполнителем.</p>	<p>Клеящие и пропитывающие составы соответствующей нагревостойкости</p> <p>—</p> <p>—</p>	<p>Термопластичные компаунды с температурой размягчения, обеспечивающей отсутствие вытекания их при рабочих температурах только в неподвижных обмотках. Составы, применяемые для изоляции класса В (см. ниже)</p> <p>Не требуются</p>
В	<p>Материалы на основе шпанданной слюды, слюдопластов и слюдинтов, в том числе с бумажной или тканевой органической подложкой</p> <p>Стеклоткани и стеклолакочулки</p> <p>Асбестовые волокнистые материалы, в том числе с органическими волокнами</p> <p>Изоляция эмалированных проводов</p>	<p>Битумно-масляные лаки; природные и синтетические смолы, не модифицированные и модифицированные растительными маслами, и лаки на их основе</p> <p>Лаки: битумно-масляно-смоляные, эскапоновые, эпоксидные, полиуретановые, а также на основе алкидных смол, модифицированных маслом</p> <p>Шеллак, бакелитоглифталевые и эпоксидные лаки, а также синтетический каучук</p> <p>Лаки на основе полиэтилентерефталатных смол и другие синтетические лаки</p>	<p>Битумно-масляно-смоляные лаки (на тугоплавом масле), лаки на основе природных и синтетических смол, модифицированных растительными маслами, соответствующие данному классу нагревостойкости</p> <p>То же</p> <p>»</p> <p>»</p>

Продолжение табл. 13.2

Класс нагревостойкости	Электроизоляционные материалы ²	Связующие, пропитывающие и покровные составы, применяемые при производстве указанных материалов	Связующие, пропитывающие и покровные составы, применяемые при производстве электрических машин, трансформаторов и аппаратов с использованием указанных материалов
В	<p>Пластмассы с неорганическим наполнителем. Слоистые пластики на основе стекловолокнистых и асбестовых материалов. Термореактивные синтетические компаунды (эпоксидные, полиэфирные, полиуретановые) с минеральным наполнителем и отвердителем, соответствующими данному классу нагревостойкости</p> <p>Асбестоцемент, пропитанный органическим составом, не вытекающим при 135 °С</p>	<p>Термореактивные смолы фенолформальдегидного типа, меламиноформальдегидные, фенолфурольные, эпоксидные и полиэфирные</p> <p>Битум каменноугольный пек и другие составы с последующей термообработкой</p>	<p>Не требуются</p> <p>»</p>
F	<p>Материалы на основе шипаной слюды, слюдинитов и слюдопластов без подложки или с неорганической подложкой</p> <p>Стекловолоконистые и асбестовая изоляция проводов. Стеклоткани и стеклоленточки</p> <p>Слосные пластики на основе стекловолоконистых и асбестовых материалов</p> <p>Стекловолоконистая и асбестовая изоляция проводов</p>	<p>Соответствующие данному классу нагревостойкости смолы и лаки: модифицированные и немодифицированные алкидные, эпоксидные, полиуретановые, кремнийорганические и др.</p> <p>То же</p> <p>Кремнийорганические, эпоксидные и другие лаки, соответствующие по нагревостойкости</p>	<p>Соответствующие данному классу нагревостойкости смолы и лаки: модифицированные алкидные, эпоксидные, полиэфирные, полиуретановые, кремнийорганические и др.</p> <p>Не требуются</p> <p>Соответствующие данному классу нагревостойкости смолы и лаки: алкидные, эпоксидные, полиуретановые и кремнийорганические</p>
H	<p>Материалы на основе шипаной слюды без подложки или с неорганической подложкой. Стекловолокнистая изоляция проводов. Стеклоткани и стеклолакоточки</p> <p>Слоистые пластики на основе стекловолоконистых и асбестовых материалов. Пластические массы с неорганическим наполнителем. Асбестоцемент. Кремнийорганические эластомеры без подложек и с неорганическими подложками</p> <p>Асбестовые материалы (пряжа, ткани, бумаги)</p>	<p>Соответствующие данному классу нагревостойкости кремнийорганические и другие лаки и смолы</p> <p>То же</p> <p>Не применяются</p>	<p>Соответствующие данному классу нагревостойкости кремнийорганические лаки</p> <p>Не требуются</p> <p>Соответствующие данному классу нагревостойкости кремнийорганические лаки</p>
C	<p>Слюда. Стекло бесцелочное и стекловолоконистые материалы. Электротехническая керамика. Кварц. Асбестоцемент непротитанный. Шифер электротехнический</p> <p>Материалы на основе шипаной слюды без подложки или со стекловолоконистой подложкой</p> <p>Микалекс. Политетрафторэтилен. Полиимиды</p>	<p>Не применяются</p> <p>Неорганические составы и элементоорганические смолы с повышенной нагревостойкостью</p> <p>Не применяется</p>	<p>Не требуются</p> <p>Не требуется</p>

¹ Классификация электроизоляционных материалов, приведенных в таблице, является ориентировочной и будет уточняться по мере накопления опытных данных и показателей эксплуатации.

² Перечисленные материалы являются основными, но они не исчерпывают многообразия электроизоляционных материалов, появляющихся в связи с новыми разработками. Нагревостойкость одного и того же материала может быть различной в зависимости от того, какие функции он выполняет в электрической машине или аппарате.

4) гидролитическая деструкция за счет взаимодействия остаточной влаги с электроизоляционным материалом под действием теплоты;

5) химическое разрушение компонентов с образованием химических активных веществ, например хлористого водорода.

Наиболее полную картину теплового старения электроизоляционных материалов дает кривая старения материала, представляющая собой зависимость определенных свойств материала от температуры его старения (кривая жизни). Согласно стандарту МЭК (публикация 216-1 и 216-2) для определения нагревостойкости того или иного материала вводится харак-

теристика, называемая температурным индексом (ТИ).

Температурный индекс есть число, соответствующее температуре (°С), взятой из «кривой жизни», при которой срок службы материала равен 20 000 ч. Этот промежуток времени был выбран, чтобы получить приближенное представление о температуре, которая обычно обеспечивает достаточный срок службы материала при работе его в большинстве типов электрооборудования.

В настоящее время ведутся работы по уточнению «кривых жизни» электроизоляционных материалов, по которым будут определены их температурные индексы (ТИ).

13.3. ЖИДКИЕ И ПОЛУЖИДКИЕ ДИЭЛЕКТРИКИ

Таблица 13.3. Основные свойства жидких и полужидких электроизоляционных материалов

Показатель	Нефтяное масло		Негорючие синтетические жидкости		ПЭСЖ-Д (кремний-органическая жидкость)	Касторовое масло	Вазелин конденсаторный нефтяной
	трансформаторное ¹	для конденсаторов	Совол	Совтол-10			
Плотность при 20 °С, кг/м ³	880—890	900—920	1540—1560	1530—1540	990—1000	950—970	820—840
Цвет	Соломенно-желтый	Соломенно-желтый	Бесцветный	Бесцветный	Бесцветный	Бледно-желтый	Соломенно-желтый
Зольность, %, не более	0,005	0,0015	—	—	—	0,008	0,004
Кислотное число, КОН на 1 кг масла ² , не более	0,01—0,05	0,01—0,015	0,015	0,01	0,05—0,07	0,03—0,05	0,03—0,04
Температура застывания, °С, не выше	—45	—45	+5	—7	—60	—(15—18)	Температура каплепадения 37—40 °С
Температура вспышки паров, °С, не ниже	+135	+135	+200	+200	+150	+240	—
Температурный коэффициент расширения, °С ⁻¹	0,00063—0,00068	0,00067	0,00065	0,00060	0,0003	—	—
Вязкость при 20 °С, 10 ⁻⁶ м ² /с	28—30	35—40	290 ³	650	70—80	—	—
Вязкость при 50 °С, 10 ⁻⁶ м ² /с	9,0—9,6	6—9	9 ³	25	—	26—28	28—30 ³
Удельное объемное сопротивление при 20 °С, Ом·м	10 ¹² —10 ¹³	10 ¹² —10 ¹³	10 ¹² —10 ¹³	10 ¹¹ —10 ¹²	10 ¹⁰ —10 ¹²	10 ¹⁰ —10 ¹¹	10 ¹² —10 ¹³
Относительная диэлектрическая проницаемость при 20 °С	2,1—2,4	2,1—2,3	5,0—5,2	4,5—4,8	2,6—2,8	4,5—4,8	3,8—4,0
Тангенс угла диэлектрических потерь при 20 °С и 50 Гц	0,001—0,003	При 100 °С 0,003—0,005	0,02 ⁴ —0,03	0,005—0,008	0,0002—0,003	0,008—0,015	0,0002
Электрическая прочность при 20 °С и 50 Гц, МВ/м	15—20	20—25	20—22 ⁴	20—22 ⁴	18—20	12—16	20—22
Цена 1 кг	28—32 коп.	24—26 коп.	75—96 коп.	1 р. 11 к.	7 р. 60 к.	1 р. 99 к.	35 коп.

¹ Трансформаторное масло выпускается четырех марок: ТК; Т-750; Т-1500; ПТ (ГОСТ 982-80). Характеристики этих масел укладываются в пределы, приведенные в таблице.

² Все электроизоляционные жидкости (масла) не должны содержать водорастворимых кислот, щелочей и механических примесей.

³ Вязкость при 90 °С.

⁴ Электрическая прочность при 65 °С.

13.4. ПОЛИМЕРНЫЕ ОРГАНИЧЕСКИЕ ДИЭЛЕКТРИКИ

Т а б л и ц а 13.4. Основные свойства синтетических полимерных диэлектриков (термопластичных пластмасс)

Наименование диэлектрика	Плотность, кг/м ³	Разрушающее напряжение при				Теплостойкость по Мартенсу, °С	Холодостойкость, °С	Водопоглощение за 24 ч, %	Электрические параметры при 20 °С				Общая характеристика и цена за 1 кг
		растяжения, МПа	сжатия, МПа	статическом изгибе, МПа	ударном изгибе, кДж/м ²				ρ_v , Ом·м	ϵ_r при 50 Гц	tg δ при 50 Гц	$E_{пр}$, МВ/м	
Полистирол ²	1050—1070	35—70	85—100	80—90	6—15	75—85	—(60—70)	0,00—0,02	10 ¹³ —10 ¹⁵	2,4—2,6	(2—3) × 10 ⁻⁴	25—40 ⁴	Прозрачный термопластичный материал. Применяется для изготовления каркасов катушек, оснований, изоляционных пленок ⁴ , нитей и лаков. 66—90 коп.
Полиэтилен ³	920—960	12—40 ⁴	—	1,2—3,8	Не ломается	50—65	—(65—70)	0,00—0,005	10 ¹³ —10 ¹⁵	2,2—2,4	(2—6) × 10 ⁻⁴	35—60 ⁴	Непрозрачный термопластичный материал. Применяется для изготовления деталей (полиэтилен высокой плотности), а также гибкой изоляции проводов, кабелей (полиэтилен низкой плотности). 65 коп.—1 р. 10 коп.
Фторопласт-3	2100—2180	27—30 ⁵	80—150	60—80	16—20	70—75	—(180—190)	0,00—0,01	10 ¹⁴ —10 ¹⁵	2,8—3,0	(10—15) × 10 ⁻³	15—20 ⁴	Роговидный негорючий материал ⁷ , при 20 °С не растворяется, устойчив в интервале температур от —180 до +100 °С. 9—11 руб.
Фторопласт-4 ⁷	2100—2200	35—40 ⁸	20—25	11—14	120—150	200—250	—(195—200)	0,00	10 ¹⁶ —10 ¹⁷	1,9—2,2	(1—3) × 10 ⁻⁴	35—50 ⁶	Твердый негорючий материал, используемый в виде плат, а также в конденсаторах, проводах в виде лент ⁶ и суспензии, наносимой на провод с последующим горячим обжатием. 5 р. 50 к.—8 р. 00 к.
Поликапролакт-ам ⁹ (капрон)	1130—1150	50—60	50—60	60—85	105—160	50—55	—(10—20)	1,3—1,4	10 ¹⁰ —10 ¹¹	3,6—5,0	(12—27) × 10 ⁻³	15—18	Твердый материал с повышенной дуговой стойкостью. Применяется для изготовления каркасов катушек изоляционных пленок и нитей
Полиуретан ⁸	1170—1200	50—60	60—80	60—80	40—50	60—65	—(30—35)	0,0—0,2	10 ¹² —10 ¹³	4—5	(8—12) × 10 ⁻³	20—25	То же, но материал с повышенной водостойкостью. Применение: пористые пластмассы и лаки. 2 р. 50 к.—4 р. 35 к.
Лавсан ⁹	1300—1400	12—20	—	—	—	Температура размягчения 230—250 °С	—(55—60)	0,1—0,5	10 ¹² —10 ¹³	3,0—3,5	(2—6) × 10 ⁻²	80—120	Прозрачный материал: Применяется в виде изоляционных пленок в электромашинных (пазовая изоляция) низкого напряжения и конденсаторах, 1 р. 20 к.—1 р. 32 к. ¹⁴

Наименование диэлектрика	Плотность, кг/м ³	Разрушающее напряжение при				Теплостойкость по Мартену, °С	Холодостойкость, °С	Водопоглощение за 24 ч, %	Электрические параметры при 20 °С				Общая характеристика и цена за 1 кг
		растяжения, МПа	сжатия, МПа	статическом изгибе, МПа	ударном изгибе, кДж/м ²				ρ_D , Ом·м	ϵ_r при 50 Гц	tg δ при 50 Гц	$E_{пр}$, МВ/м	
Винипласт ¹⁰	1350—1400	40—60	90—150	10—12	150—180	25—35	—(25—40)	0,8—1,0	10 ¹⁰ —10 ¹¹	3,2—4,0	(1—5) × 10 ⁻²	15—30	Электронизолирующие детали с высокой механической прочностью (пласты основания и др.), очень стойкие к удару. Дугогасящий материал. 1 р. 60 к. Электронизолирующие детали (основания, панели, трубки для разрядников), шкафы и др. Дугогасящий материал. 1 р. 20 к.—1 р. 40 к. Гибкие рулонные материалы. Применяемые для изоляции, а также для защитных оболочек проводов и кабелей изоляционные шланги и трубки. 1 р. 73 к. Твердый рогаобразный материал с высокими антифрикционными свойствами. 1 р. 70 к.
Полиметилметакрилат ¹¹	1180—1200	45—55	70—85	60—65	10—12	50—80	—(60—70)	0,2—0,3	10 ¹¹ —10 ¹²	3,5—3,9	(2—6) × 10 ⁻²	20—40	
Поливинилхлорид (пластикаты) ¹²	1260—1600	10—20	—	—	Не ломается	—	—(35—50)	0,1—0,3	10 ¹⁰ —10 ¹²	6—8	(5—8) × 10 ⁻²	6—15	
Полиформальдегид ¹³	1430	65—70	30	100—108	90—150	80—100	—(40—45)	0,3—0,4	10 ¹² —10 ¹³	3,7—4,0	(1—4) × 10 ⁻³	20—22	

¹ Эту характеристику называют также ударной вязкостью.

² Полистирол выпускается блочный (пластины, листы, бруски) и эмульсионный — в виде порошка, из которого прессуют или отливают (под давлением) различные электроизоляционные детали. Из полистирола изготавливают полистирольные пленки и ленты толщиной 20—100 мкм. Основные характеристики блочного и эмульсионного полистирола укладываются в пределы, приведенные в таблице. У изделий температура размягчения полистирола 95—105 °С. У ударопрочных сортов полистирола предел прочности при ударном изгибе составляет 40—50 кДж/м².

³ Полиэтилен выпускается в виде гранул, блоков, а также пленок, лент и нитей. Различают полиэтилены высокого (ВД), среднего (СД) и низкого (НД) давления. Последний отличается большей плотностью, повышенной механической прочностью и теплостойкостью, но менее эластичен по сравнению с полиэтиленом ВД. Полиэтилен перерабатывается в изделия методом литья под давлением (каркасы, катушки, панели и др.), прессования и экструзии (горячее шприцевание). Вследствие содержания от 60 до 90 % (НД) кристаллической фазы полиэтилены имеют ярко выраженную температуру плавления (105—140 °С). Полиэтилены при комнатной температуре не растворяются ни в одном из растворителей.

⁴ У тонких (0,02—0,09 мм) полистирольных пленок (стироплекса) $E_{пр} = 100 \div 120$ МВ/м. Предел прочности при растяжении у стиropленок равен 50—80 МПа. У полиэтиленовых пленок $E_{пр} = 35 \div 70$ МВ/м, а предел прочности при растяжении 20—40 МПа.

⁵ У тонких пленок и лент, полученных из фторопласта-3, $E_{пр} = 80 \div 100$ МВ/м, а предел прочности при растяжении 30—40 МПа.

⁶ У тонких пленок и лент, полученных из фторопласта-4, $E_{пр} = 100 \div 120$ МВ/м, а предел прочности при растяжении 12—30 МПа.

⁷ Фторопласт-3 при 300—315 °С и выше разлагается с выделением мономера газа. Температура плавления 200—220 °С. При механических нагрузках применяется при температурах 70 °С. У фторопласта-4 процесс денодимеризации начинается с 400 °С и выше. Максимальная рабочая температура фторопласта-4

250 °С. У фторопласта-4 наблюдается текучесть при 20 °С (холодная текучесть) при механических напряжениях, превышающих 3 МПа. У фторопласта-3 холодная текучесть отсутствует. У всех фторопластов отмечается низкая коррозийная стойкость.

⁸ Температура плавления капрона 210—220 °С. Рабочие температуры капрона не должны превосходить 100 °С. Температура плавления полиуретана 175—180 °С.
⁹ Лавсан (пленки) используется также в композициях со слюдой или стеклотканью в качестве газовой изоляции в электрических машинах в интервале температур от —55 до +120 °С.

¹⁰ Винипласт — материал на основе поливинилхлорида (без пластификаторов) — изготавливается в виде пленок, листов и плит толщиной 0,3—20 мм, а также труб, стержней, уголков. Винипласт — термолластичный негорючий материал, хорошо сваривается, поддается механической обработке, очень стоек к химическим и хлорированным углеводородам (бензол, толуол, хлорбензол и др.) частично растворяется. Температура разложения его 150—160 °С.

¹¹ Полиметилметакрилат выпускается в виде органического стекла (органическое стекло СО) и порошка, из которого получают (горячим прессованием или литьем под давлением) различные детали, стойкие к минеральным маслам, бензину и щелочам. При 250—300 °С материал разлагается, при воздействии электрической дуги выделяет газы, вызывающие гашение дуги, поэтому полиметилметакрилат применяется в трубчатых разрядниках. Органическое стекло штампуются при 80—120 °С.

¹² Данные таблицы относятся к гибким электронизолирующим пластинкам (светотермостойким), применяемым для изоляции проводов и кабелей, для изоляционных шлангов и трубок для липких изоляционных лент.

¹³ Электронизолирующие и конструкционные детали из полиформальдегида изготавливают литьем под давлением.

¹⁴ 2 р. 67 к за 1 кг лавсановой пленки толщиной 8—10 мкм.

Таблица 13.5. Основные свойства электротехнических термореактивных пластмасс

Наименование или марка пластмассы	Плотность, кг/м ³	Разрушающее напряжение при			Теплостойкость по Мартенсу, °С (не менее)	Водопоглощаемость за 24 ч, %	Электрические параметры при 20 °С				Общая характеристика и цена за 1 кг
		растяжения, МПа	статическом изгибе, МПа	ударном изгибе, кДж/м ²			ρ_v , Ом·м	ϵ_r	tg δ при 50 Гц	$E_{пр}$, МВ/м	
03-010-02, 04-010-12, 09-200-07, Ж1-010-40, Ж5-010-78	1400—1450	35—50	60—70	4—6	125—135	0,20—0,30	10^6 — 10^7	6—9	0,08—0,15	8—10	Материалы на основе новолачных смол с органическими и минеральными наполнителями. Применение: конструкционные детали в электрических аппаратах и приборах и изоляционные детали в устройствах низкого напряжения. 39—70 коп.
Э2-330-02, Э1-340-02, Э3-340-65, Э9-342-73, Э10-342-63, Э3-340-61, Э6-014-30, Э11-342-61	1800—1900	25—55	35—50	3,5—6	150—200	0,03—0,09	10^{10} — 10^{11}	6—8	0,01—0,03	15—18	Материалы на основе резольных смол с органическими или минеральными (слюда, кварцевая мука) наполнителями. Применение: электроизоляционные детали (основания, панели и др.) в электрических аппаратах и приборах. 44—58 коп.
КМК-218, ПК-9, ПК-10, КФ-9, КФ-10, ВПМ-1В, ВПМ-1К, КЭП-1, КЭП-2	1500—2000	20—70	50—90	6—60	250—350	0,08—0,3	10^{12} — 10^{13}	3,5—5,5	0,005—0,028	5—8	Материалы на основе кремнийорганических смол и минеральных наполнителей. Применение: изоляционные изделия повышенной термостойкости и дуговой стойкости. 3 р. 55 к.
У1-301-07, У5-301-41, У4-080-02	1450—1950	30—35	80—90	9—10	140—195	0,2—0,4	10^7 — 10^8	8—10	0,07—0,08	3—4	Материалы на основе модифицированных резольных смол и волокнистых наполнителей; отличаются повышенной механической прочностью. Применение: конструкционные и изоляционные детали. 63 к.—1 р.
АГ-4В, АГ-4С, АГ-4НС	1700—1900	50—60	150—400	50 200 250	280—300	0,02 0,02 0,02	10^{10}	7—8	0,03—0,05	13—15	Материалы на основе модифицированной формальдегидной смолы, стеклотекстолита АГ-4В или стеклонитей, обладают высокой термостойкостью и механической прочностью при хороших электрических характеристиках.—2 р. 10 к.—3 р. 55 к.

13.5. ЭЛЕКТРОИЗОЛЯЦИОННЫЕ БУМАГИ И КАРТОНЫ

Т а б л и ц а 13.6. Основные свойства электроизоляционных бумаг и картонов

Материал	Марка	Толщина, мкм	Плотность, кг/м ³	Разрывное усилие, Н, не менее	Воздухопроницаемость, мл/мин	Электрические параметры при 50 Гц и 20 °С		Общая характеристика и область применения	Цена за 1 кг
						tg δ при 50 Гц	U _{пр} , В		
Бумага конденсаторная	КОН-1	10, 11, 12, 13, 15, 22, 30	100	Разрывная длина 8000 м ¹	3—5	0,0014—0,0016	300—600	Применяется в бумажных конденсаторах	1 р. 56 к.— 2 р. 21 к.
	КОН-2	4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15—22, 30	1170	8000—8500 м	2—50 ²	0,0016—0,0018	240—680	То же, но с повышенной плотностью	2 р. 43 к.— 10 р. 43 к.
	МКОН-03	10—15; 18, 20	800	800 м	7	0,0009	320—470	С улучшенными электрическими характеристиками	2 р. 70 к.— 4 р. 05 к.
	МКОН-1	8—20, 30	1000	8000 м	3—5	0,0010—0,0012	340—620	То же	2 р. 70 к.— 5 р. 20 к.
	МКОН-2	6—20, 30	1170	8000 м	2—30	0,0012—0,0015	300—680	» »	2 р. 10 к.— 7 р. 20 к.
	МКОН-3	6—15	1130	850 м	—	0,0012—0,0015	310—520	» »	2 р. 33 к.— 7 р. 70 к.
Бумага кабельная	К-080	80	780	40/85	40	Не нормируется То же » »	Не нормируется То же » »	Кабельная обыкновенная. Применяется для изоляции жил кабелей напряжением до 35 кВ включительно	43—46 коп.
	К-120 К-170	120 170	780 780	60/130 85/172	40 40				
	КМП-120	120	780	65/145	40	» »	» »	Кабельная упрочненная. Область применения та же, что и бумаг К	63 коп.
	КВМ-080 КЭМ-120	80 120	770 770	35/75 65/145	25 25	0,022 0,022	» » » »	Кабельная высковольтная многослойная. Применяется для изоляции жил кабелей напряжением от 110 до 500 кВ	94 коп.— 1 р. 07 к.
	КВМСУ-080 КВМСУ-120	80 120	1100 1100	45/98 65/137	6 6	0,0026	То же	Область применения та же, что и бумаг КВМ	1 р. 15 коп.
	Бумага кабельная полупроводящая ³	КПУ-080 КПУ-120	80 120	900 970	34/18 55/120	25 25	$\rho_V = 10^3—$ $10^5 \text{ Ом} \cdot \text{м}$		Бумага с содержанием сажи. Применяется для экранирования жил кабелей
КПДУ-080 КПДУ-120		80 120	970 970	40/85 55/120	20 20				
Бумага телефонная	КТ-50	50	800	20/60	—	Не нормируется	Не нормируется	Применяется для изоляции жил телефонных кабелей	53 коп.

Бумага крепированная	ЭКТМ	440	130	44—46 (в продольном направлении)	—	Не нормируется	44 МВ/м ²	Применяется для изоляции отдельных узлов маслонаполненных аппаратов	80 коп.
Картон электроизоляционный (для работы в воздушной среде) ⁶	ЭВС	0,20; 0,25; 0,30; 0,35; 0,40 мм	1250	34—127 МПа	—	Не нормируется	12 МВ/м ⁴	—	93 коп.
	ЭВП	0,10; 0,15; 0,20; 0,25; 0,30	1250	34—127 МПа	—	То же	12 МВ/м ⁴	Картон каландрированный выпускается в листах и в рулонах (ЭВ, ЭВС) или только в рулонах (ЭВП, ЭВТ). Применяется для работы в воздушной среде (каркасы катушек, прокладки и др.) с последующей пропиткой лаками	84 коп.
	ЭВТ	0,10; 0,15; 0,20 0,25; 0,30; 0,35; 0,40; 0,50 мм	1150	31—120 МПа	—	» »	12—13 МВ/м ⁴		86 коп.
	ЭВ	Те же размеры и 0,6; 1,0; 1,25; 1,5; 1,75; 2,0; 2,5; 3,0 мм	1200	25—90 МПа	—	» »	8—11 МВ/м ⁴		72—82 коп.
Картон электроизоляционный для аппаратов с масляным заполнением ⁶	А	2,0; 2,5; 3,0 мм	900—1000	40 МПа	Не нормируется	» »	40—50 ⁵	Эластичный гибкий картон. Применяется в трансформаторах напряжением до 700 кВ включительно (цилиндры и др.)	74 коп.
	Б	1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 3,0; 4,0; 5,0; 6,0 мм	950—1000	50 МПа			51—85 ⁵	Плотный. Применяется в аппаратах напряжением до 220 кВ	70 коп.
	В	2,0; 2,5; 3,0 мм	1250	60 МПа			55—70 ⁵	Картон твердый с малой сжимаемостью. Применяется в продольной изоляции трансформаторов и др.	76 коп.
	Г	0,5; 1,0; 1,5	900—1000	36 МПа			48—57 ⁵	Картон с повышенным сопротивлением расслаиванию	56—70 коп.
Фибра листовая	ФЭ	От 0,4 до 1,7 (через 0,1 мм); 2,0; 2,2; 2,5; 3,0	1100—1200	Вдоль: 70 МПа	То же	» »	3,5—7,5 МВ/м ⁴	Фибра электроизоляционная (прокладки, шайбы)	1 р. 83 коп.

¹ Для конденсаторных бумаг приведены наименьшие значения разрывной длины (м), т. е. длины, при которой наступает разрыв бумаги данной толщины под действием собственного веса.

² Большие значения воздухопроницаемости относятся к конденсаторным бумагам меньшей толщины (4—5 мкм).

³ Меньшие значения разрывных усилий кабельных бумаг (числитель) относятся к образцам, вырезанным в поперечном направлении полотна бумаги. Разрывное усилие прикладывается к полосе бумаги шириной 15 мм.

⁴ Для фибры и картонов при работе этих материалов в воздушной среде нормируются значения электрической прочности.

⁵ Для картонов марок А, Б, В и Г приведены испытательные напряжения, которые прикладываются к образцам картона в течение 1 м. Большие значения напряжения относятся к образцам большей толщины.

⁶ Для картонов и фибры приведены значения предела прочности образцов материала при растяжении (МПа).

⁷ В масле при 90 °С.

13.6. СЛОИСТЫЕ ЭЛЕКТРОИЗОЛЯЦИОННЫЕ ПЛАСТМАССЫ

Таблица 13.7. Основные размеры и области применения слоистых электроизоляционных пластмасс

Материал	Марка	Номинальная толщина листов, мм	Площадь листов, мм ²	Преимущественное назначение и цена за 1 кг
Гетинакс	I	0,2; 0,25; 0,35; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9; 1,0; 1,2; 1,3; 1,4; 1,5; 1,6; 1,7; 1,8; 1,9; 2,0; 2,3; 2,5; 2,8; 3,0; 3,5; 3,8; 4; 4,3; 4,5; 5,0; 6; 6,3; 6,5; 7; 7,3; 7,5; 8; 8,5; 9; 9,5; 10; 10,5; 11; 11,5; 12; 12,5; 13; 13,5; 14; 14,5; 15; 16; 17; 18; 19; 20; 21; 22; 23; 24; 25; 26; 27; 28; 29; 30; 31; 32; 33; 34; 35; 36; 37; 38; 39; 40; 42; 44; 46; 48; 50	550×700 650×930 930×1030 930×1430	Для работы на воздухе при нормальных климатических условиях при 50 Гц и напряжении до 1000 В или в трансформаторном масле. 1 р. 00 к. — 3 р. 95 к.
	II	0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9; 1; 1,2; 1,3; 1,4; 1,5; 1,6; 1,7; 1,8; 1,9; 2,0; 2,3; 2,5; 2,8; 3,0; 3,3; 3,5; 3,8; 4; 4,3; 4,5; 5,5; 6; 6,3; 6,5; 7; 7,5; 8; 8,5; 9; 9,5; 10; 10,5; 11; 11,5; 12; 12,5; 13; 13,5; 14; 14,5; 15; 16; 17; 18; 19; 20; 21; 22; 23; 24; 25; 26; 27; 28; 29; 30; 31; 32; 33; 34; 35; 36; 37; 38; 39; 40; 42; 44; 46; 48; 50	То же	То же с более широкими допусками по толщине; коробление не нормируется. 90 коп. — 1 р. 90 к.
Гетинакс	III	5; 5,5; 6; 6,3; 6,5; 7; 7,3; 7,5; 8; 8,5; 9; 9,5; 10; 10,5; 11,5; 12; 12,5; 13; 13,5; 14; 14,5; 15; 16; 17; 18; 19; 20; 21; 22; 23; 24; 25; 26; 27; 28; 29; 30; 31; 32; 33; 34; 35; 36; 37; 38; 39; 40; 42; 44; 46; 48; 50	» »	Для работы в условиях повышенной влажности при 50 Гц и напряжении до 1000 В 1 р. 00 к.
	V	5; 5,5; 6; 6,5; 7; 7,5; 8; 8,5; 9	» »	То же, что марка I при 50 Гц и напряжении выше 1000 В
	V—I, V—II	Выпускаются той же толщины, что и гетинакс марки III	» »	Для работы в трансформаторном масле при 50 Гц и напряжении выше 1000 В или на воздухе в нормальных климатических условиях. 1 р. 90 к. — 2 р. 65 к.
	VI	0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9; 1,0; 1,1; 1,2; 1,3; 1,4; 1,5; 1,6; 1,7; 1,8; 1,9; 2; 2,3; 2,5; 2,8; 3; 3,3; 3,5; 3,8	» »	Для работы на воздухе в нормальных климатических условиях при 10 ⁶ Гц и напряжении до 1000 В. 1 р. 90 к.—2 р. 65 к.
	VII	0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9; 1; 1,1; 1,2; 1,3; 1,4; 1,5; 1,6; 1,7; 1,8; 1,9; 2; 2,3; 2,5; 2,8; 3; 3,3; 3,5; 3,8	» »	То же, но с улучшенным тангенсом угла диэлектрических потерь и с пониженной стойкостью к кратковременному нагреву. 1 р. 90 к.—1 р. 40 к.
	VIII	0,8; 0,9; 1,0; 1,2; 1,3; 1,4; 1,5; 1,7; 1,8; 1,9; 2; 2,3; 2,5; 2,8; 3,0; 3,3; 3,5; 3,8	» »	Для работы в нормальных климатических условиях при 10 ⁶ Гц и напряжении до 1000 В — для изготовления печатных плат. 2 р. 65 к.
Текстолит	A	0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9; 1,0; 1,2; 1,4; 1,5; 1,6; 1,8; 2; 2,2; 2,5; 3; 3,5; 3,8; 4; 4,3; 4,5; 5; 5,5; 5,6; 6; 6,5; 7; 7,5; 8; 8,5; 9; 9,5; 10; 10,5; 11; 11,5; 12; 12,5; 13; 13,5; 14; 14,5; 15; 16; 17; 18; 19; 20; 21; 22; 23; 24; 25; 26; 28; 30; 32; 33; 35; 36; 38; 40; 42; 45; 48; 50	Не менее 450×600	Для работы в трансформаторном масле и на воздухе при 50 Гц с повышенными электрическими характеристиками. 2 р. 75 к.—3 р. 55 к.
	B	Выпускается той же толщины, что и текстолит марки A	То же	Для работы на воздухе при частоте 50 Гц с повышенными механическими характеристиками. 2 р. 80 к.—3 р. 85 к.
	Г	Выпускается той же толщины, что и текстолит марки A	» »	Для работы в трансформаторном масле и на воздухе, не с расширенными допусками по толщине и короблению. 3 р. 20 к.—5 р. 85 к.

Продолжение табл. 13.7

Материал	Марка	Номинальная толщина листов, мм	Площадь листов, мм ²	Преимущественное назначение и цена за 1 кг
Текстолит	ВЧ	0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9; 1; 1,2; 1,4; 1,5; 1,6; 1,8; 2; 2,2; 2,5; 2,8; 3; 3,5; 3,8; 4; 4,3; 4,5; 5; 5,5; 6; 6,5; 7; 7,5; 8,0	Не менее 450×600	Для работы на воздухе в нормальных климатических условиях при 10° Гц. 10 р. 60 к.—10 р. 80 к.
Стекло- текстолит	СТ	1,5; 1,6; 1,8; 2; 2,3; 2,5; 2,8; 3; 3,5; 4; 4,5; 5; 5,5; 6; 7; 8; 9; 10; 11; 12; 13; 14; 15; 16; 18; 20; 22; 25; 28; 30	(450—980)× ×(600—1480)	Для работы при напряжении до 1000 В и 50 Гц на воздухе при нормальных климатических условиях (до 130 °С). 2 р. 80 к.
	СТ-I	0,5; 0,6; 0,8; 1; 1,2; 1,4; 1,5; 1,6; 1,8; 2; 2,3; 2,5; 2,8; 3; 3,5; 4; 4,5; 5; 5,5; 6; 6,5; 7; 8; 9; 10; 11; 12; 13; 14; 15; 16; 18; 20; 22; 25; 28; 30	То же	То же, но с более однородной внутренней и поверхностной структурой в исходном состоянии и после механической обработки. 3 р. 35 к.—4 р. 00 к.
	СТ-II	0,5; 0,6; 0,8; 1; 1,2; 1,4; 1,5; 1,6; 1,8; 2; 2,3; 2,5; 2,8; 3; 3,5	» »	С повышенной жесткостью при рабочих температурах. Для работы при напряжении до 1000 В и 50 Гц на воздухе в нормальных климатических условиях. 4 р. 60 к.
	СТЭФ	1,5; 1,6; 1,8; 2; 2,3; 2,5; 2,8; 3; 3,5; 4; 4,5; 5; 5,5; 6; 6,5; 7; 8; 9; 10; 11; 12; 13; 14; 15; 16; 18; 20; 22; 25; 28; 30; 35; 40; 50	» »	Для работы при напряжении выше 1000 В и 50 Гц в нормальных условиях на воздухе, а также до 1000 В во влажной атмосфере при 35 °С. 4 р.
	СТЭФ-I	0,5; 0,6; 0,8; 1; 1,2; 1,6; 1,8; 2; 2,3; 2,5; 3; 3,5; 4; 4,5; 5; 5,5; 6; 6,5; 7; 8; 9; 10; 11; 12; 13; 14; 15; 16; 18; 20; 22; 25; 28; 30; 35; 40; 50	» »	То же, но с более однородной внутренней и поверхностной структурой в исходном состоянии и после механической обработки. 4 р. 00 к.—6 р. 20 к.
	СТ-Б	Выпускается той же толщины, что стеклотекстолит марки СТ, но с расширенными допусками по толщине	» »	Для работы при напряжении до 1000 В на воздухе в нормальных условиях до 130 °С. 2 р. 80 к.—3 р. 25 к.
	СТВК СТК	От 0,35 до 30 Те же толщины, что у СТЭФ-I	» »	Для работы в условиях повышенной влажности (относительная влажность воздуха 95 % при температуре 35 °С) при напряжении до 1000 В и 50 Гц. 8 р. 80 к.—11 р. 50 к.
Асботек- столит	АСТ-A	6; 8; 10; 12; 15; 16; 18; 20; 22; 23; 25; 28; 30; 32; 35; 37; 38; 40; 42; 44; 46; 48; 50; 52; 55; 58; 60	(450—1000)× ×(600—2480)	Материал на основе асбестовой ткани и бакелитовой смолы. Нагревостойкость 130 °С. Применяется для клиньев и распорок, в роторах турбогенераторов и другом электрооборудовании. 2 р. 30 к.
	АСТ-Б	Те же размеры	То же	То же, но с более однородной структурой и повышенными механическими свойствами. 3 р. 05 к.
Дельта- древесина	ДСП-В-3	1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 3,0; 4,0; 5,0; 6,0; 7,0; 8,0; 10; 12; 15; 20; 25; 30; 35; 40; 45; 50; 55; 60	(700—5600)× ×(800—1200)	Для конструкционных и электроизоляционных деталей, работающих в трансформаторном масле; для работы на открытом воздухе (растяжки троллейных проводов) требуют защиты от влаги. 1 р. 40 к.
	ДСП-Б-Э	15; 20; 25; 30 35; 40; 45; 50; 55; 60	(700—5600)× ×(1000—1200)	То же, но обладает менее высокой механической прочностью и несколько пониженными электрическими характеристиками. 81 коп.

Таблица 13.8. Физико-механические свойства слоистых электронизоляционных пластмасс

Материал	Марка	Плотность, кг/м ³	Ударная вязкость ¹ , кДж/м ² , не менее	Разрушающее напряжение, МПа, при		Тепло- стойкость по Мар- тенсу, °С, не менее	Теплопровод- ность, Вт/(м·°С)
				растяжении не менее	статическом изгибе ² не менее		
Гетинакс	I	1350—1450	20/11,8	98	122	150	0,170—0,175
	II	1350—1450	20/11,8	98	122	150	
	III	1300—1400	18/—	80	118	150	
	V-I; V-II	1280—1400	18/11,8	88	122	150	
	VI	1300—1400	—	88	—	—	
	VII	1350—1450	—/10	98	—	—	
	VIII	1300—1400	—/10	88	—	—	
Текстолит	A	1300—1450	12—26	33—40 ⁵	83—90 ⁵	135—150	0,146—0,162
	B	1300—1450	15—31	45—54	83—107	135—150	
	BЧ	1300—1450	—	45—88	— ⁴	—	
	Г	1300—1450	15—28	35—49	70—140	78—89	
Ст. клотекстолит ³	СТ	1600—1850	15/—	70	93	185	0,178—0,182
	СТ-I	1600—1850	19/—	75	98	185	
	СТ-II	1600—1850	25/—	107	274	185	
	СТЭФ	1600—1850	60/—	196	—	185	
	СТЭФ-I	1600—1850	63/—	215	294	185	
	СТК	1600—1850	50/—	90	—	250	
	СТВК	1600—1850	—	79	98	250	
	СТ-6	1600—1855	15/—	70	93	185	
Асботекстолит	АСТ-А	1550	20	75	93	155	—
	АСТ-Б	1650	20	80	107	155	
Дельта-древеси- на	ДСП-В-Э	1300—1400	30	137	180	140	0,164—0,168
	ДСП-Б-3	1300—1400	80	255	274	150	

¹ В числителе указаны значения для гетинакса толщиной 10 мм и более, в знаменателе — от 1,0 до 9,5 мм.

² Ударная вязкость и разрушающее напряжение при статическом изгибе определяются в направлении, перпендикулярном слоям — у всех слоистых материалов.

³ При определении механических характеристик у стеклотекстолита образцы этого материала вырезают вдоль утка ткани.

⁴ У этих материалов разрушающее напряжение при статическом изгибе не определяется из-за малой толщины материалов.

⁵ Для текстолита толщиной 10 мм.

Таблица 13.9. Электрические свойства слоистых электронизоляционных пластмасс

Материал	Марка	Электрические параметры при 20 °С			E _{пр} , перпендикулярно слоям, МВ/м
		ρ_V , Ом·м	ϵ_r при 50 Гц	tg δ при 50 Гц	
Гетинакс	I	10^{-8} — 10^{10}	6—8	0,04—0,06	12—20
	II	10^9 — 10^8	6—8	0,05—0,08	12—22
	III	10^8 — 10^{10}	6—8	0,03—0,06	13—23
	V-I; V-II	10^9 — 10^{10}	6—8	0,02—0,04	20—28
	VI	10^8 — 10^9	6—7 ¹	0,04—0,06 ¹	20—35
	VII	10^9 — 10^{10}	6—7 ¹	0,03—0,04 ¹	22—35
	VIII	10^9 — 10^{11}	6—7 ¹	0,02—0,03 ¹	25—35
Текстолит	A	10^8 — 10^9	7—8	0,06—0,19	При 90 °С 5—10 При 90 °С 3—6 При 90 °С 5—10
	B	10^7 — 10^8	7—8	—	
	BЧ	10^8 — 10^{10}	6—8 ¹	0,05—0,06 ¹	
	Г	10^8 — 10^9	5—6	—	
Стеклотекстолит	СТ	10^8 — 10^9	7—9	—	При 90 °С 6—8 (в масле) 7—9; 7—12 12—16 20—22 20—27 8—14 8—10 7—9
	СТ-I	10^8 — 10^9	7—8	—	
	СТ-II	10^{10} — 10^{11}	7—8	—	
	СТЭФ	10^{11} — 10^{12}	7—8	0,02—0,03	
	СТЭФ-I	10^{11} — 10^{12}	7—8	0,02—0,03	
	СТК	10^{10} — 10^{11}	6—7	0,04—0,06	
	СТВК	10^{10} — 10^{11}	6—7	0,006—0,009	
	СТ-Б	10^8 — 10^9	7—8	—	
Асботекстолит	АСТ-А, АСТ-Б	10^6 — 10^7	7—8	—	1,0—1,5
Дельта-древеси- на	ДСП-В-Э	10^2 — 10^{10}	7—8	0,06—0,2	6—9
	ДСП-Б-Э	10^2 — 10^9	7—8	0,08—0,3	5—8

¹ При частоте 10^6 Гц.

13.7. ЭЛЕКТРОИЗОЛЯЦИОННЫЕ СОСТАВЫ (КОМПАУНДЫ)

Таблица 13.10. Основные свойства электроизоляционных составов (компаундов)

Классификация по назначению	Марка или обозначение компаунда	Составляющие части	Температура размягчения, °С	Холодостойкость, °С (не выше)	Объемная усадка при охлаждении, % (не более)	Электрические характеристики			Общая характеристика и области применения	Цена за 1 кг
						ρ_V , Ом·м	$E_{пр}$, МВ/м	$\text{tg } \delta$ при 50 Гц		
Пропиточные	225 ¹	Битум ухтинский, каннфоль, масло льняное обезвоженное	98—102 ²	—25	8,0—8,5	10^{11} — 10^{12}	20—22	0,02—0,03	Блестящая аморфная водостойкая масса черного цвета. Применяется для пропитки обмоток электрических машин и аппаратов (пропитка при 160 °С под давлением). Нагревостойкость 105 °С То же, но менее эластичная масса. Применяется для пропитки катушек (при 140—150 °С) под давлением. Нагревостойкость 105 °С Аморфная масса желтого цвета, обладающая хорошей адгезией, высокой механической прочностью и водостойкостью. Применяется для пропитки обмоток трансформаторов и аппаратов То же, но отвердевший компаунд обладает большей эластичностью Пропитка обмоток электрических машин и аппаратов, длительно работающих при 180 °С в условиях высокой влажности Термореактивная масса. Обеспечивает высокую цементацию и малое время сушки. Нагревостойкость 120 °С. Применяется для пропитки обмоток электрических машин и аппаратов	1 р. 15 к.
	Битумный ³	Битум марок БН-V, БН-III-VB и специальный	95—100 ²	—22	8,5—9,5	10^{10} — 10^{11}	15—20	0,03—0,05		35 коп.
	КГМС-1 ⁴	Непредельный полиэфир № 1, стирол, перекись бензола, гидрохинон	250	—60	6—7	10^{11} — 10^{12}	18—22	0,02—0,04		2 р. 30 к.
	КГМС-2 ⁴	Непредельный полиэфир № 2, стирол, перекись бензола, гидрохинон	250	—60	8—10	10^{11} — 10^{12}	18—20	0,02—0,04		2 р. 90 к.
	К-43	Состав на основе полиметилфенилсилоксана и линолеата свинца	Не размягчается ⁷	—60	5—8	10^{12} — 10^{13}	35—50	0,005—0,008		3 р. 15 к.
	КП-10	Смесь полиэфиров с полиэфиракрилатами и сиккативом. Компаунд холодного отверждения	То же	—50	—	10^{10} — 10^{11}	20—22	0,02—0,3		2 р. 10 к.
Пропиточные	КП-18	То же, но в другом соотношении	То же	—50	—	10^{10} — 10^{11}	28—32	0,02—0,04	То же, но более стабилен. Нагревостойкость 130 °С Термореактивные массы. Нагревостойкость 130 °С. Применяется для пропитки обмоток электрических машин и аппаратов То же, но с меньшей вязкостью и большей пропитывающей способностью Компаунды горячего отверждения ступенями при 90 и 120 °С. Нагревостойкость 180 °С	1 р. 80 к.
	Д-1 Д-112	Составы на основе эпоксидной смолы ЭД-16 и отвердителей	Не размягчается	—50	0,5—1	10^{10} — 10^{12}	28—30	0,01—0,02		4 р. 60 к.
	Д-61	Состав на основе эпоксидной смолы ЭД-20 и отвердителей	То же	—50	0,5—1	10^{11} — 10^{12}	45—50	0,01—0,02		2 р. 10 к.
	К-67, К-67Ф	Состав на основе алигвинилсиликонов	>	—60 —60	5—6 6—8	10^{12} — 10^{13} 10^{11} — 10^{12}	22 20	0,015 0,06		2 р. 50 к.
Пропиточно-заливочные ⁷	МБК-1	Метакриловый эфир	250	—60	0,5	10^{10} — 10^{11}	10—12	0,05—0,08	Пропитка обмоток электрических машин и заливка катушек и блоков электрических аппаратов ⁶	2 р. 50 к.

Классификация по назначению	Марка или обозначение компаунда	Составляющие части	Температура размягчения, °С	Холодостойкость, °С (не выше)	Объемная усадка при охлаждении, % (не более)	Электрические характеристики			Общая характеристика и области применения	Цена за 1 кг
						ρ_V , Ом·м	$E_{цр}$, МВ/м	$tg \delta$ при 50 Гц		
Пропиточно-заливочные ⁷	МБК-2	Метакриловый эфир и пластификатор То же	200	-60	0,5	10^9-10^{10}	15-18	0,03-0,04	То же, но для получения более эластичной пропитки ⁶ То же, но для получения резино-подобной эластичной пропитки или заливочного блока ⁸ Применяется для литой изоляции трансформаторов тока до 10 кВ, работающих при температуре до 120 °С Применяется для литой изоляции трансформаторов тока до 10 кВ, работающих при температуре 120 °С, отверждение компаунда при 20 °С То же, но отверждение компаунда происходит при 120 °С. Кратковременно может работать при 150 °С	3 р. 60 к.
	МБК-3		200	-60	0,5	10^9-10^{10}	10-12	0,03-0,04		3 р. 85 к.
	ЭПК-5 ⁹	Эпоксидная смола Э-37, полиэфир № 220, фталевый ангидрид, пылевидный кварц	120 ⁹	-40 ¹²	0,6-1,0	$10^{12}-10^{13}$	25-30	0,01-0,03		3 р. 50 к.
	К-168 ¹⁰	Эпоксидная смола ЭД-16, полиэфир МГФ-9, гексаметилендиамин	120 ¹⁰	-60	0,5-1,5	$10^{10}-10^{13}$	25-30	0,06-0,09		5 р. 20 к.
	К-293 ¹¹	Эпоксидная смола, полиэфир МГФ-9, пылевидный кварц, дибутилфталат	150 ¹¹	-60	1-2	$10^{10}-10^{12}$	20-25	0,05-0,08		6 руб.
Заливочные	К-30К	Полиуретановый компаунд с наполнителем — пылевидным кварцем	Не размягчается	-80	2-3	$10^{10}-10^{12}$	21-23	0,05-0,08	Эластичная масса. Применяется для заливки различных узлов электрических приборов и аппаратов, работающих при температуре до +150 °С То же, но при температуре до 120 °С Твердая хрупкая масса с высокой клеящей способностью. Применяется при температуре до +150 °С Нагревостойкая (до 200 °С), водостойкая эластичная масса белого цвета. Применяется для герметизации узлов электрических приборов и аппаратов Нагревостойкая (до 200 °С), водостойкая твердая масса с хорошей адгезией к металлам, стеклам и керамике. Применяется для герметизации электрических узлов и аппаратов	2 р. 90 к.
	К-31	То же, но без наполнителя	То же	-80	3-4	$10^{12}-10^{13}$	27-29	0,07		2 р. 70 к.
	ЭК-3	Эпоксидная смола ЭД-16 с отвердителем	150	-50	1-2	$10^{12}-10^{13}$	45-47	0,03		4 р. 10 к.
	Виксинт К-18	Кремнийорганический компаунд	150	-60	2-3	$10^{10}-10^{12}$	15-18	0,01-0,02		4 руб.
	Т-10 ⁹	Эпоксидно-кремнийорганический компаунд с наполнителем	150	-60	1-2	$10^{12}-10^{14}$	20-25	0,005		3 руб.

Заливочные компаунды для кабельных муфт и воронок	МК-45	Капфоль, минеральное масло (автол или цилиндрическое масло)	45—48 ¹³	—8	6—7	10 ⁹ —10 ¹⁰	12—18	—	Заливка кабельных соединительных и концевых муфт на 35 кВ и прошивка концов кабелей на рабочем напряжении до 3 кВ	1 р. 44 к.
	МБ-70	Битумы марок БН-V и БН-III	70—73 ¹³	—10	8—9	10 ⁹ —10 ¹¹	14—16	—	Заливка соединительных муфт и концевых воронок до 10 кВ, проложенных в земле или установленных в неотапливаемых помещениях (до —10 °С)	32 коп.
	МБ-90	Битумы марок БН-V и БН-III или Г и БН-III	90—92 ¹³	—10	8—9	10 ⁹ —10 ¹¹	14—16	—	Заливка соединительных и концевых воронок до 10 кВ, установленных в отапливаемых помещениях	35 коп.
	МБМ-1	Битумы марок БН-V, БН-III и масло трансформаторов	55—62 ¹³	—35	7—8	10 ⁹ —10 ¹¹	15—17	—	То же, но в наружных электроустановках с температурой до —35 °С	18 коп.
	МБМ-2	То же, но в другом соотношении	55—60 ¹³	—45	7—8	10 ⁹ —10 ¹¹	15—17	—	То же, но в наружных электроустановках с температурой до —45 °С	18 коп.

¹ Этот компаунд известен под маркой 225-Д. Отвержденный компаунд 225 имеет плотность 980—1000 кг/м³. Наибольшая допустимая рабочая температура обмоток, пропитанных этим компаундом, 105 °С.

² Температура размягчения по методу «кольца» и «шара».

³ Отвержденный битумный компаунд имеет плотность 990—1050 кг/м³. Наибольшая допустимая рабочая температура компаунда 105 °С.

⁴ Компаунды КГМС-1 и КГМС-2 в исходном состоянии представляют собой жидкости с высокой пропитывающей способностью (110—120 листов микалентной бумаги). Предварительно высушенные обмотки пропитываются этими компаундами при комнатной температуре (в тренировочном режиме). Отверждение (полимеризация) компаундов производится при 60—100 °С. В отвержденном состоянии компаунды КГМС-1 и КГМС-2 являются термореактивными веществами, размягчающимися только с поверхности (при 250 °С). Они могут длительно работать при температурах от —60 до +120 °С (класс нагревостойкости Е).

⁵ Теплостойкость (термозластичность пленки компаунда К-43) на медной подложке при 200 °С 150—350 ч; tg δ при 180 °С 0,013—0,035. Пропитка обмоток производится при 55—65 °С в тренировочном режиме.

⁶ Пропитку обмоток производят предварительно вакуумированным составом, нагретым до 50—60 °С.

⁷ Компаунды МБК могут применяться в интервале температур от —60 до +105 °С (без наполнителя) и от —60 до +120 °С с наполнителем (пылевидный кварц). В отвержденном состоянии наибольшей механической прочностью при растяжении (7 МПа) обладает компаунд МБК-1. В исходном состоянии компаунды МБК представляют собой жидкости, которые превращаются в твердые термореактивные вещества при 20 °С (с введением отвердителей) или при 70—90 °С (без введения отвердителей). В исходном состоянии компаунды МБК инертны по отношению к меди, устойчивы против растрескивания и обладают высокими

влаго-, водостойкостью и механической прочностью. Компаунд МБК-1 в отвержденном состоянии образует твердую неэластичную аморфную массу, а компаунды МБК-2 и МБК-3 образуют твердые эластичные массы. Компаунды МБК в жидком состоянии разрушают резиновые материалы, поэтому последние не могут применяться при заливке этими компаундами.

⁸ Теплостойкость по Мартенсу отвержденного компаунда 70 °С. Нагревостойкость 120 °С.

⁹ Эпоксидно-полиэфирные компаунды с кварцевым наполнителем. Плотность 1700—1800 кг/м³. Водопоглощаемость за 10 сут при 20 °С 0,094—0,090 %. Относительная диэлектрическая проницаемость отвержденного компаунда 5—6, ударная вязкость отвержденного компаунда 4—6 кДж/м². Заливку компаунда производят в предварительно нагретые стальные формы, смазанные кремнийорганической смазкой К-10. Отверждение компаунда происходит в течение 20—32 ч при 120 °С в зависимости от габаритов заливаемых компаундом изделий.

¹⁰ Нагревостойкость при 120 °С (класс нагревостойкости Е). Компаунд К-168 отверждается (при 20 °С) в течение 18—24 ч; «срок жизни» приготовленного компаунда 20—35 мин. Отвержденный компаунд стоек к воде, грибковой плесени и обладает высокой механической прочностью.

¹¹ Нагревостойкость 120 °С (класс нагревостойкости Е). Компаунд К-293 отверждается при 120 °С в течение 2 ч. «Срок жизни» приготовленного компаунда находится в пределах 30—240 мин. В отвержденном состоянии компаунд обладает высокой стойкостью к воде и грибковой плесени и имеет высокую механическую прочность.

¹² Холодостойкость —40 °С в толстом слое (30—50 мм), в тонких же слоях (на медных пластинах) — 60 °С.

¹³ Температура каплепадения (по Убеллоде).

13.8. ЭЛЕКТРОИЗОЛЯЦИОННЫЕ ЛАКОТКАНИ

Т а б л и ц а 13.11. Основные свойства электроизоляционных лакокотканей

Марка лакокоткани	Основа лакокоткани	Пропиточный состав	Номинальная толщина, мм	Разрушающее напряжение при растяжении, Н/см (по основе), не менее	ρ_{10} Ом·м, не менее	$U_{пр}$ кВ, не менее ¹		Нагревостойкость, °С	Цена за 1 м (при ширине 0,7—0,9 м)
						при 15—40 °С и относительной влажности 45—75 %	после 24 ч пребывания во влажной атмосфере		
ЛХМ-105	Хлопчатобумажная	Масляный лак	0,15; 0,17 0,24; 0,30	38—60	10 ¹¹	4—9,5	1,6—4,8	До 105 °С	1 р. 65 к.
ЛХМС-105	То же	То же	0,17; 0,20	44—60	10 ¹¹	4,5—7,6	2,1—4,1	До 105 °С	1 р. 75 к.
ЛХММ ² -105	» »	» »	0,17; 0,20; 0,24	44—58	10 ¹¹	4,8—9,2	2,0—4,2	До 105 °С	2 р. 80 к.
ЛХБ-105	» »	Битумно-масляный лак	0,17; 0,20; 0,24	44—58	10 ¹¹	4,5—9,2	2,0—3,6	До 105 °С	1 р. 70 к.— 2 р. 80 к.
ЛШМ-105	Шелковая	Масляный лак	0,08; 0,10; 0,12; 0,15	16—24	10 ¹¹	1,0—8,5	1,4—3,8	До 105 °С	5 р. 80 к.
ЛШМС-105	»	То же	0,04; 0,05 0,06	11—22	10 ¹²	1,0—9,3	2,0—4,2	До 105 °С	5 р. 70 к.
ЛКМ-105	Капроновый шелк	» »	0,10; 0,12; 0,15	24—38	10 ¹¹	3,6—7,8	1,7—4,2	До 105 °С	5 р. 00 к.
ЛСМ-105/120	Стекланная	» »	0,15; 0,17; 0,20; 0,24	85—120	10 ¹¹	3,2—8,0	1,5—4,2	До 120 °С	1 р. 10 к.
ЛСММ ² -105/120	То же	» »	0,17; 0,20; 0,24	95—120	10 ¹¹	4,0—9,2	2,3—4,6	До 120 °С	1 р. 90 к.
ЛСЛ-105/120	» »	Гутадиенстирольный латекс	0,15; 0,17; 0,20; 0,24	85—120	10 ¹²	3,2—8,4	1,3—3,5	До 120 °С	85 коп.
ЛСЭ-105/130	» »	Состав на основе синтетического каучука	0,12; 0,15; 0,17; 0,20; 0,24	70—120	10 ¹²	2,6—9,6	1,7—3,6	До 130 °С	1 р. 10 к.
ЛСБ-120/130	» »	Битумно-масляно-алкидный лак	Те же толщины	70—120	10 ¹²	2,6—10	1,9—4,1	До 130 °С	1 р. 20 к.
ЛСП-130/155	» »	Полиэфирно-эпоксидный лак	0,08; 0,10; 0,12; 0,15; 0,17	35—95	10 ¹⁰	0,8—9,0	0,8—3,5	До 155 °С	1 р. 65 к.
ЛСК-155/180	» »	Кремнийорганический лак	0,06; 0,08; 0,10	35—45	10 ¹²	1,2—9,0	0,8—5,0	До 180 °С	1 р. 25 к.— 2 р. 35 к.
ЛСК-2	» »	Кремнийорганическая эмаль	0,12; 0,15; 0,17; 0,20	70—150	10 ¹¹	2,5—7,5	1,3—4,2	До 180 °С	2 р. 60 к.
ЛСКР-180	» »	Состав на основе кремнийорганического каучука	Те же толщины	70—150	10 ¹²	0,7—4,9	0,6—2,7	До 180 °С	2 р. 15 к.
ЛСК-5	» »	Полупроводящая кремнийорганическая эмаль	0,12; 0,15; 0,20	70—100	Не бо- лее 10 ⁶	—	—	До 180 °С	2 р. 60 к.

¹ Значения пробивных напряжений при электродах диаметром 6 мм. Меньшие значения пробивного напряжения относятся к ослабленным местам в образцах лакокотканей наименьшей толщины.

² ЛХММ — хлопчатобумажная маслостойкая; ЛСММ — маслостойкая стекланная.

13.9. ЭЛЕКТРОИЗОЛЯЦИОННЫЕ НАМОТАННЫЕ ИЗДЕЛИЯ

Таблица 13.12. Размеры намотанных электроизоляционных изделий

Классификация по основе	Наименование и марка изделия	Основные размеры, мм					
		Внутренний диаметр	Промежуточные значения внутреннего диаметра (кратные)	Толщина стенки, мм	Длина, мм	Промежуточные значения длины (кратные)	Цена за 1 кг
Бумажно-бакелитовые	Трубки ТБ	6—30	8; 10; 12; 14; 15; 16; 18; 20; 22; 24; 25; 26; 28; 30	1,5—10	200—1000	5	2 р. 70 к.— 3 р. 15 к.
	Цилиндры ЦБ	105—500 510—1200	5 10	2,0—20 4—25	1010—2200 1010—2200	10 10	2 р. 20 к.
Текстолитовые на бакелитовом связующем	Трубки ТХ Цилиндры ЦХ1 и ЦХ2	10—80 85—400	2 или 5 5	2,5—10 4—20	630 630 и 830	— —	16 руб. 10 р. 20 к.— 11 р. 50 к. (ЦХ1) 4 р. 95 к. (ЦХ2)
	Стержни	Наружный диаметр 8—60	8; 13; 18; 25; 40; 50; 60	—	200; 350; 500; 550	—	3—9 руб.
Стеклотекстолитовые на эпоксидном связующем	Трубки ТСЭФ	10—20	2 или 5	2—5	650; 750	—	8 р. 10 к.
	Цилиндры ЦСЭФ	22—80 85—400	2 или 5 5	2—10 3—20	650; 750; 650; 750;	— —	10 р. 50 к. 5 р. 40 к.
	Цилиндры ЦСЭФВ	410—600 90—140	10 5	4—20 10—20	850 275—840	— 40	6 руб.

Таблица 13.13. Основные свойства намотанных электроизоляционных изделий

Классификация ¹	Наименование изделий	Марка	Физико-механические параметры				Электрические параметры при 20 °С		
			Плотность, кг/м ³	Разрушающее напряжение, МПа		Водопоглощаемость, %	ρ_S Ом	$tg \delta$ при 50 Гц	$E_{пр}$ МВ/м
				при изгибе	при сжатии вдоль оси				
Бумажно-бакелитовые	Трубки	ТБ	1050—1100	78—90	40—50	3,5—4,5	10^8 — 10^{10}	0,02—0,03	4—14
	Цилиндры	ЦБ	1050—1100	78—90	—	2,5—4,0	10^8 — 10^{10}	0,02—0,03	6—12
Текстолитовые на бакелитовом связующем	Трубки	ТХ	1050—1100	80—90	45—55	2,5—5,0	10^8 — 10^{10}	0,02—0,05	6—10
	Цилиндры	ЦХ1, ЦХ2	1050—1100	80—90	45—55	1,5—4,0	10^8 — 10^{10}	0,01—0,04	8—12
	Стержни	—	1250—1400	98—118	40—98 ²	0,8—0,9	10^8 — 10^{10}	—	8—9 ³
Стеклотекстолитовые на эпоксидном связующем	Трубки	ТСЭФ	1400	180	70	0,8—0,9	10^{10} — 10^{11}	0,02—0,03	3,0—4,5
	Цилиндры	ЦСЭФ	1450	—	—	—	10^{10} — 10^{11}	0,03—0,04	3,0—5,0
		ЦСЭФВ	1550	—	80	—	10^{10} — 10^{11}	0,01—0,02	3,5—5,0

¹ По нагревостойкости бумажно-бакелитовые и текстолитовые изделия относятся к классу А (до 105 °С). Стеклотекстолитовые изделия на эпоксидном связующем относятся к классу Е (до 155 °С), стеклотекстолитовые изделия на кремнийорганическом связующем — к классу Н (до 180 °С).

² Текстолитовые стержни испытывают на растяжение ($\sigma_p = 40 \div 95$ МПа). Большие значения предела прочности при растяжении относятся к изделиям диаметром 8 мм.

³ У текстолитовых стержней определяется электрическая прочность в направлении параллельном слоям.

13.10. ЭЛЕКТРОИЗОЛЯЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ НА ОСНОВЕ СЛЮДЫ

Таблица 13.14. Основные свойства клееных электроизоляционных материалов на основе натуральной слюды

Материал	Марка	Толщина, мм	Электрические параметры при 20 °С			Область применения	Цена за 1 кг
			$\rho_v, \text{Ом}\cdot\text{м}$	$\text{tg } \delta$	$E_{\text{пр}} \text{ МВ/м}$		
Миканит коллекторный	КФШ, КФГ, КФП, КФП-1, КФШ-1, КФС	0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9; 1,0; 1,1; 1,2; 1,3; 1,4; 1,5	$10^{10}-10^{12}$	0,01—0,03	19—20	Твердые электроизоляционные прокладки между коллекторными пластинами в электрических машинах	12—37 руб.
		0,7; 0,8; 0,9; 1,0 до 1,5	$10^{10}-10^{12}$	0,01—0,03	19—22		18—38 руб.
		0,4; 0,5; 0,6	$10^{10}-10^{12}$	0,01—0,03	19—22		18—38 руб.
Миканит коллекторный на аммофосе	КФА	0,7; 0,8; 0,9; 1,0; 1,1; 1,2	$10^{11}-10^{12}$	0,008—0,01	20—23	То же, но в электрических машинах нагревостойкого исполнения (выше 180 °С)	24—47 руб.
Миканит прокладочный	ПМГ, ПФГ, ПСГ, ПФК	0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9; 1,0; 1,5; 2,0; 3,0; 5,0	$10^{11}-10^{12}$	0,03—0,05	16—20	Твердые электроизоляционные прокладки и шайбы в электрических машинах и аппаратах	8—17 руб.
Миканит формовочный	ФМГ, ФМГА, ФФГ, ФФА, ФМП, ФМПА, ФФП, ФФПА, ФМК, ФФК, ФФКА	0,4; 0,45; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9; 1,0; 1,5 0,15; 0,2; 0,25; 0,3 (0,4; 0,5 для ФФП и ФФПА) 0,15; 0,2; 0,25 0,3; 0,35; 0,4; 0,45; 0,5	10^9-10^{11}	—	25—40	Электроизоляционные изделия фасонного профиля (конусы, манжеты коллекторные и др.), получаемые горячим прессованием из формовочного миканита	26—108 руб.
Миканит гибкий	ГМС, ГФС, ГМЧ, ГФЧ, ГФК, ГМ-ББ, ГФ-ББ, ГМЧ-ББ, ГФЧ-ББ	0,15; 0,2; 0,25; 0,3; 0,35; 0,4; 0,45; 0,5	$10^{11}-10^{12}$	0,03—0,08	16—28	Пазовая и межвитковая изоляция, а также гибкие прокладки в электрических машинах	26—78 руб.
		0,2; 0,25 0,3; 0,4 0,5					
Стекломиканит гибкий	ГФС-Т, ГФК-Т, ГФС-ТТ, ГФЭ-ТТ, ГФЭ-ТТ-1, ГФК-ТТ, ГФК-ТТ-1	0,2; 0,25; 0,3; 0,5; 0,25; 0,3; 0,35; 0,4; 0,6	10^9-10^{11}	—	14—17	То же, но с повышенной нагревостойкостью (класс В — на глифталево-лаке; класс F — на полиэфирном лаке; класс С — на кремнийорганическом лаке)	22—44 руб.
		0,3; 0,4; 0,5; 0,6					
Микафолий	МФГ-Б, МФШ-Б, ММГ-Б, ММШ-Б, МФГ-Т, МФГ-С, МФП-Т, МФП-С, МФК-Т, МФК-С, ММГ-Т, ММГ-С, ММК-Т, ММК-С	0,15; 0,2; 0,25; 0,3 0,2; 0,25; 0,3	10^9-10^{11}	—	14—18	Формирующийся в нагретом состоянии материал (изоляционные гильзы, трубки и др.)	17—58 руб.
Микалента	ЛФЧ-Б, ЛФК-Т, ЛФЧ-ББ, ЛФС-ББ, ЛФС-ТБ, ЛФЧ-ТБ, ЛФК-Т, ЛФК-ТТ, ЛФК-ТС, ЛМЧ-ТБ, ЛМС-ББ, ЛМЧ-ТБ, ЛМК-ТТ, ЛМК-ТС, ЛМР-СС	0,08; 0,1; 0,13; 0,14; 0,15; 0,17; 0,21	$10^{10}-10^{11}$	0,03—0,05	9—20	Гибкий при комнатной температуре материал, выпускаемый в роликах шириной 10, 15, 20, 25, 30 и 35 мм	20—82 руб.
Микалекс	—	4; 5; 6; 8; 10; 12; 15 и более	$10^{10}-10^{12}$	0,002—0,04 при 10^6 Гц	12—18	Твердый дугостойкий материал на основе молотой слюды и стекла	1—2 руб.

Таблица 13.15. Основные свойства слюдинитовых электроизоляционных материалов

Материал	Марка	Толщина, мм	Электрические параметры при 20 °С		Область применения	Цена за 1 кг
			$\rho_{V'}$ Ом·м	$E_{пр'}$ МВ/м		
Слюдинит коллекторный	КСШ	0,45; 0,5; 0,55; 0,6; 0,65; 0,7; 0,75; 0,8; 0,85; 0,9; 0,95; 1,0; 1,05; 1,1; 1,2	10^{10} — 10^{11}	28—35	Электроизоляционные прокладки между пластинами в коллекторах электрических машин	16 руб.
Слюдинит гибкий	ГСП Г ₁ СП, Г ₁ СК Г ₁ СКН Г ₂ СП, Г ₂ СК Г ₂ СКН ГСП-ПЛ-10 ГСП-ПЛ-20 ГСП-ПЛ-60	0,15; 0,2; 0,25; 0,3 0,10; 0,15 0,10; 0,12; 0,15 0,20; 0,25 0,35 0,15; 0,20 0,2; 0,25 0,25; 0,3	10^{11} — 10^{12}	17—26	Пазовая и межвитковая изоляция электрических машин	9—18 руб.
Стеклослюдинит формовочный нагревостойкий	ФСКН-1 ФСКН-2	0,1; 0,12 0,1; 0,12; 0,15			Пазовая изоляция и электроизоляционные прокладки длительной нагревостойкости при 300 °С	17—26 руб.
Стеклослюдинитовые пропитанные ленты	ЛСК-ТТ, ЛСК-СС ЛСЭП-934-ТПЛ ЛСЭП-934-СПл ЛСК-110-СПл ЛСК-110-ТПл Л ЭК-5-СПл, ЛСЭК-5-ТПл ЛСЭК-5-ТТ, ЛСЭК-5-СТ	0,15; 0,17 0,09; 0,1; 0,13 0,11; 0,13 0,08; 0,09; 0,1; 0,13; 0,15 0,13; 0,15 0,13; 0,15 0,11; 0,13; 0,15; 0,17	10^{10} — 10^{11}	10—40	Гибкий при комнатной температуре материал, выпускаемый в роликах шириной 15, 20, 25, 30 и 35 мм	12—20 руб.
Стеклослюдинитовые непропитанные ленты	Выпускаются 40 марок, отличающихся толщиной, видом подложки (лавсановая, микрокалентная бумага, стеклоткань и др.) и покрышки	0,09; 0,11; 0,13; 0,15	10^9 — 10^{11}	10—20	Материал с повышенной гибкостью при комнатной температуре, выпускаемый в роликах шириной от 15 до 800 мм	10—30 руб.

Таблица 13.16. Основные свойства слюдопластовых электроизоляционных материалов

Материал	Марка	Толщина, мм	Электрические параметры при 20 °С		Область применения	Цена за 1 кг
			$\rho_{V'}$ Ом·м	$E_{пр'}$ МВ/м		
Слюдопласт коллекторный	КИФШ, КИФШ-1, КИФШ-2, КИФП, КИФК, КИФН-С	0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9; 1,0; 1,1; 1,2	10^{10} — 10^{11}	22—24	Электроизоляционные прокладки между пластинами в коллекторах электрических машин	7 р. 70 к.— 9 р. 80 к.
Слюдопласт прокладочный	ПИФШ, ПИВША, ПИФТ	0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9; 1,0; 1,2; 1,5	10^{11} — 10^{12}	20—26	Твердые электроизоляционные прокладки и шайбы в электрических машинах и аппаратах	6 р. 20 к.— 7 р. 60 к.
Слюдопласт формовочный прессованный	ФИФК-АПЛ, ФИФ-АПЛ	0,25; 0,3; 0,35	10^{11} — 10^{12}	32—55	Электроизоляционные изделия фасонного профиля, получаемые горячим прессованием	9 р. 50 к.
Слюдопласт гибкий теплоустойчивый	ГСФК-АФ	0,15; 0,3	10^{11} — 10^{12}	18—20	Пазовая изоляция электрических машин нагревостойкого исполнения	13 р. 10 к.

Продолжение табл. 13.16

Материал	Марка	Толщина, мм	Электрические параметры при 20 °С		Область применения	Цена за 1 кг
			$\rho_{V'}$ Ом·м	$E_{ПР'}$ МВ/м		
Слюдопласто- фольий	ИФГ-Б, ИФГ-БП, ИФГ, ИФГ-П	0,15; 0,2; 0,3	10^{10} — 10^{11}	22—25	Рулонный и листовой материал, формуемый в нагретом состоянии, для изоляции роторных стержней и других частей электрических машин	6 р. 80 к.— 10 р. 20 к.
Слюдопласто- лента	ЛИФЧ-ББ, ЛИФГ-ББ	0,11; 0,13; 0,15; 0,17	10^{10} — 10^{11}	18—22	Гибкий материал для витковой изоляции электрических машин до 6 кВ	7 р. 60 к.
Стеклослудо- пластовая лента	ЛИПЭФ-Т	0,13	10^{10} — 10^{11}	18—20	То же, но с повышенной нагревостойкостью (класс В)	12 р. 40 к.
Стеклослудо- пластовая лента нагревостой- кая	ЛИФК-Т ЛИФК-ТТ ЛИФК-ТС	0,1; 0,12 0,17; 0,19 0,15; 0,17; 0,19	10^{10} — 10^{11}	12—14	То же, но с повышенной нагревостойкостью (класс Н)	17 р. 10 к.— 22 р. 00 к.

13.11. ЭЛЕКТРОКЕРАМИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ

Таблица 13.17. Основные свойства изоляторных электрокерамических материалов

Материал	Плотность, кг/м ³	Механические параметры ¹			ТК ² ли- нейного расшире- ния, 10 ⁻⁶ °С ⁻¹	Электрические параметры при 20 °С			
		Разру- шающее напряже- ние при растяже- нии, МПа	Разру- шающее напряже- ние при статиче- ском изги- бе, МПа	Ударная вязкость, кДж/м ²		$\rho_{V'}$ Ом·м	ϵ_r	$\text{tg } \delta$ при 50 Гц	$E_{ПР'}$ МВ/м
Электрофар- фор	2200	30—55	60—110	1,8—2,2	(3,5—5,0)	10^{11} — 10^{12}	5—8	0,022—0,025	30—32
Ультрафар- фор УФ-46 и УФ-53	3200	50—60	200—250	2,5—2,8	(5,0—5,5)	10^{12} — 10^{13}	8,0—8,8	0,0005—0,001	30—36
Стеатит ³ СК-4, ТК-21	3000	60—70	170—190	3,0—3,5	(6,0—6,4)	10^{13} — 10^{14}	6,5—7,0	0,001—0,003	40—42
Кордиерит ⁴	2800	—	70—88	2,0—3,0	(2,0—2,3)	10^9 — 10^{10}	5—6	—	4,5—6,0

¹ Приведенные значения механических характеристик относятся к неглазурованным образцам. У образцов фарфора и стеатита, покрытых глазурью, значения механических характеристик превышают приведенные в среднем на 15—20 % (при правильно подобранных глазурах).

² Значения ТК расширения даны для интервала температур 20—100 °С.

³ Стеатиты по сравнению с фарфорами и кордиеритом обладают меньшей устойчивостью к резкой смене температур, т. е. менее термостойки.

⁴ Кордиеритовая керамика обладает заметным водопоглощением (7—11 %), но отличается большой стойкостью к электрическим дугам и находит главное применение в электрических аппаратах.

Список литературы

13.1. Богородицкий Н. П., Пасынков В. В., Тарев Б. М. Электротехнические материалы. Л.: Энергия, 1977. 352 с.

13.2. Справочник по электротехническим материалам/Под ред. Ю. В. Корицкого, В. В. Пасынкова, Б. М. Тареева. М.: Энергия, 1974. Т. 1. 584 с. Т. 2. 616 с.

13.3. Электротехнические материалы (справочник)/В. Б. Березин, Н. С. Прохоров, Г. А. Рыков, А. М. Хайкин. М.: Энергоатомиздат, 1983. 504 с.

13.4. Технология производства электроизоляционных материалов и изделий/О. В. Бобылев, Н. В. Никулин, П. В. Русаков, В. И. Цыганов. М.: Энергия, 1977. 432 с.

13.5. Корицкий Ю. В. Электротехнические материалы. М.: Энергия, 1976. 320 с.

13.6. Электрорадиоматериалы/Б. М. Тареев, Н. В. Короткова, В. М. Петров, А. А. Преображенский. М.: Высшая школа, 1978. 380 с.

13.7. ГОСТ 21515-76. Материалы диэлектрические. Термины и определения.