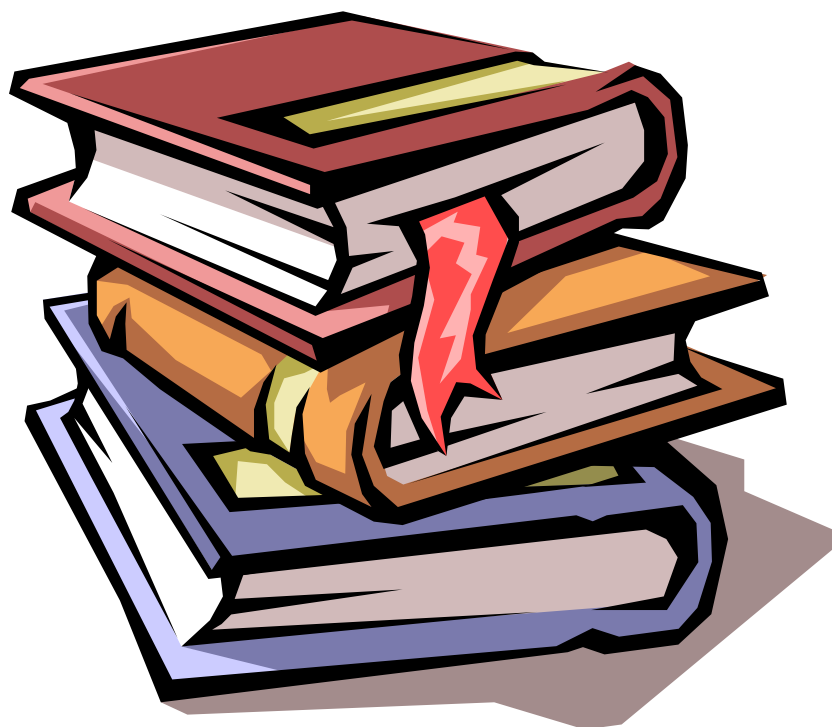


Курс лекций по специальности:

“Монтёр по защите подземных трубопроводов от коррозии”



Тема №3. Коррозия трубопроводов и методы борьбы с ней

1. Коррозия

1.1. Понятие о коррозии металлов

✓ **Коррозия металла** – разрушение металла вследствие химического или электрохимического взаимодействия их с коррозионной средой.

✓ **Коррозия металла** – физико-химический процесс, вызывающий разрушение металла или изменение его свойств в результате химического или электрохимического воздействия окружающей среды.

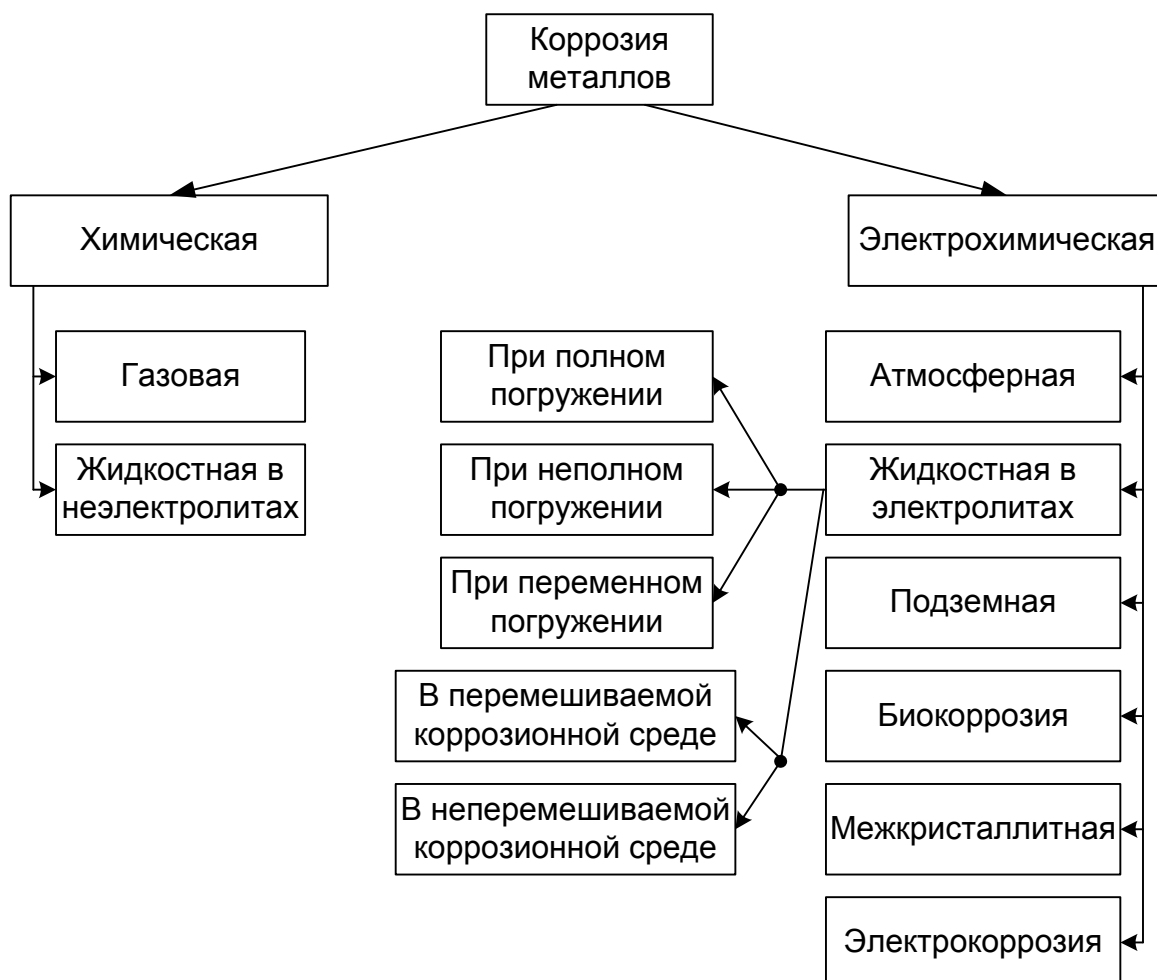
Коррозия – это привычное явление. Разрушается всё: крошится бетон, стареет и ломается пластмасса, гнётся и растрескивается дерево, ржавеет железо. Мы не можем остановить процессы коррозии, но можем их существенно замедлить.

Железо и его сплавы находятся в термодинамически неустойчивом состоянии, нежели оксиды и соли, в виде которых железо встречается в природе. Поэтому, процесс коррозии – это возврат железа в более устойчивое состояние.

Существует огромное количество классификаций коррозионных процессов, включающие разнообразные виды коррозионных разрушений. Настоящая классификация отражает и систематизирует основные виды коррозионных разрушений.

1.2. Классификация коррозионных процессов

По механизму (условиям) протекания процесса:





Химическая коррозия – взаимодействие металла с коррозионной средой, при котором окисление металла и восстановление окислительной компоненты коррозионной среды протекает в одном акте.

- а) **газовая коррозия** – коррозия металла в газах при высоких температурах.
(Пример: окисление и обезуглероживание сталей при нагревании.)
- б) **жидкостная коррозия в неэлектролитах** – коррозия в жидкостях, не проводящих электрический ток, обусловленная взаимодействием металлов с агрессивными компонентами.
(Пример: коррозия внутренних поверхностей трубопроводов, по которым транспортируются нефть, мазут, меркаптаны и другие продукты содержащие серу и её соединения)



Электрохимическая коррозия – это процесс, связанный с перемещением электрического заряда в металле и окружающей среде, то есть процесс коррозии сопровождающийся протеканием электрического тока.

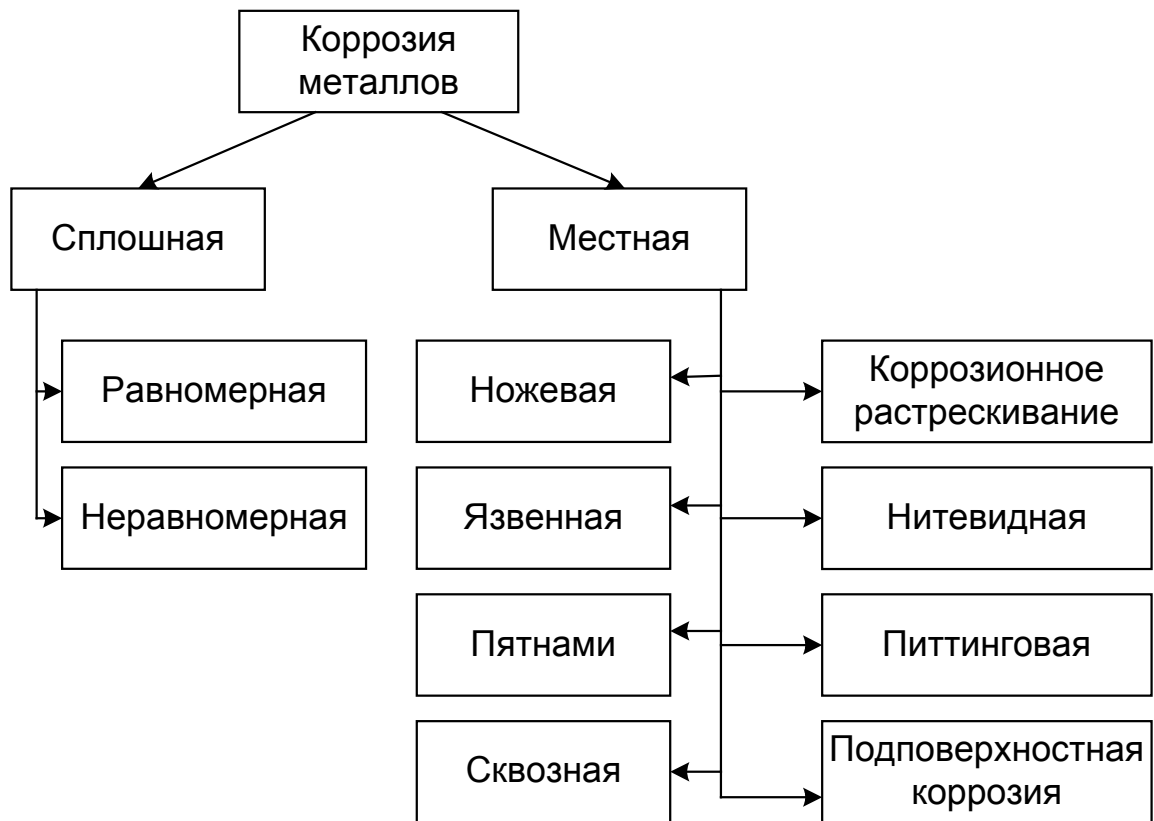
В отличие от химической коррозии здесь происходит две группы реакций – катодная и анодная.

- а) **атмосферная коррозия** – коррозия металла в атмосфере воздуха, а также любого влажного газа.
- б) **жидкостная коррозия в электролитах** – коррозия, возникающая в жидкостях, проводящих электрический ток, которая обусловлена взаимодействием металла с агрессивной средой.
(Пример: коррозия металла в морской воде, растворах кислот, щелочей и солей).
- **коррозия при полном погружении** – коррозия металла, полностью погружённого в жидкую коррозионную среду.
- **коррозия при неполном погружении** - коррозия металла, частично погружённого в жидкую коррозионную среду.
- **коррозия при переменном погружении** – коррозия металла при переменном погружении его целиком или частично в жидкую коррозионную среду.
- **коррозия в перемешиваемой среде** – это коррозия металла (трубопровода), протекающая в циркулирующей (перемешиваемой) жидкой коррозионной среде.
- **коррозия в неперемешиваемой среде** – это коррозия металла (трубопровода), протекающая в неподвижной (в отсутствии перемешивания) жидкой коррозионной среде.
- в) **подземная коррозия** – коррозия металла, средой прохождения которой является в почвенно-грунтовый электролит.
(Пример: коррозия подземных стальных трубопроводов).
- г) **биокоррозия** – коррозия металла под влиянием жизнедеятельности микроорганизмов.
(Пример: коррозия подземных стальных трубопроводов под влиянием сульфат-восстанавливающих бактерий).
- д) **межкристаллитная коррозия** – это разрушение сооружений, происходящее преимущественно по границам кристаллов (зёрен) металла под воздействием окружающей коррозионной среды и постоянных или переменных механических нагрузках.

ческих напряжений.

е) **электрокоррозия** – коррозия, возникающая под действием внешнего источника тока или под действием блуждающих токов.

По характеру коррозионного разрушения:



✓ **Сплошная коррозия** – коррозия, охватывающая всю поверхность металла.

а) **равномерная коррозия** – сплошная коррозия, протекающая с одинаковой скоростью по всей поверхности металла.

б) **неравномерная коррозия** – сплошная коррозия, протекающая с неодинаковой скоростью на различных участках по всей поверхности металла.

✓ **Местная коррозия** – коррозия, охватывающая отдельные участки поверхности металла.

а) **ножевая коррозия** – локализованный вид коррозии металла в зоне сплавления сварных соединений в сильно агрессивных средах.

б) **язвенная (коррозионная язва)** – местное коррозионное разрушение, имеющее вид отдельной раковины.

в) **коррозия пятнами** – местная коррозия металла в виде отдельных пятен.

г) **сквозная коррозия** – местная коррозия, вызвавшая разрушение металла насквозь.

д) **коррозионное растрескивание** – коррозия металла при одновременном воздействии коррозионной среды и внешних или внутренних механических напряжений растяжения с образованием транскристаллитных или межкристаллитных трещин.

е) **нитевидная коррозия** – коррозия, распространяющаяся в виде нитей, преимущественно под неметаллическими защитными покрытиями.

ж) **питтинговая (точечная) коррозия** – местная коррозия металла в виде отдельных точечных поражений.

з) **подповерхностная коррозия** - местная коррозия, начинающаяся с поверхности, но преимущественно распространяющаяся под поверхностью металла таким образом, что разрушение и продукты коррозии оказываются сосредоточенными в некоторых областях внутри металла.



Контрольные вопросы.

1. Дайте определение коррозии металла.
2. Как классифицируются коррозия по механизму (условиям) протекания процессов?
3. Какие существуют виды коррозии по характеру разрушения металла?
4. Каковы движущие силы (факторы) коррозионного растрескивания?
5. Что такое питтинговая коррозия?

1.3. Подземная (почвенно-грунтовая) коррозия подземных трубопроводов

На прошлом лекционном занятии было введено понятие подземной коррозии. Было определено, что это коррозия металла, протекающая в почвенно-грунтовом электролите.

Почва – плодородный слой, образующийся на поверхности земной коры в результате жизнедеятельности организмов, процессов гниения (разложения).

Грунт - минеральный слой, образовавшийся в результате геологического формирования и развития земной коры.

Почвенно-грунтовый электролит представляет собой пористо-капиллярную среду, с ярко выраженной структурной неоднородностью и состоит из твёрдой, жидкой и газообразной фаз. Он подразделяется на естественный (например: глина, суглинок, супесь, песок, торф) и искусственный (например: отходы, шлаки). В обиходе почвенно-грунтовый электролит называют упрощённо почва или грунт, при этом подразумевается и то и другое одновременно.

Особенность подземной коррозии заключается в том, что на процесс одновременно воздействует большое число постоянно изменяющихся факторов. Такими факторами являются:

- физико-химический состав почвенно-грунтового электролита;
- структура почвенно-грунтового электролита;
- воздушный режим;
- степень уплотнения.

Подземная коррозия носит электрохимический характер.

Коррозионная агрессивность почв и грунтов характеризуется скоростью коррозии металла в почвенно-грунтовом электролите и зависит:

- электрической проводимости;
- влажности;
- воздухопроницаемости;
- солевого состава;
- кислотность (щёлочность);
- содержания органических веществ;
- температуры.



Электропроводность – величина обратная электрическому сопротивлению. С ростом электропроводности (уменьшением электросопротивления) почвенно-грунтового электролита – возрастает его коррозионная агрессивность.

В соответствии с ГОСТ 9.602-89 коррозионная агрессивность определяется по удельному сопротивлению грунта.

Коррозионная агрессивность грунта по отношению к углеродистой и низколегированной стали [3].

| Коррозионная агрессивность грунта | Удельное электросопротивление грунта, Ом·м | Средняя плотность катодного тока, А/м ² |
|-----------------------------------|--|--|
| низкая | свыше 50 | до 0,05 |
| средняя | от 20 до 50 | от 0,05 до 0,20 |
| высокая | до 20 | свыше 0,20 |

Большую опасность представляют участки газотрассы с чередованием почв и грунтов с различной электрической проводимостью.

Влажность почв и грунтов тесно связана с воздухопроницаемостью. С увеличением влажности происходит уменьшение воздухопроницаемости. Максимальная скорость коррозии наблюдается при влажности 15-20%.

Солевой состав определяет электропроводность и отчасти кислотность почв и грунтов. Чем выше концентрация солей, тем более высокая коррозионная агрессивность почвенно-грунтового электролита.

Кислотность (щёлочность) – один из важнейших факторов, определяющий агрессивность грунтов. Кислотность или водородный показатель представляет собой отрицательный десятичный логарифм концентрации ионов водорода ($pH = - \lg [H^+]$).

Таблица №2

Характеристика кислотности грунтов и почв в зависимости от водородного показателя pH.

| Кислотность | Водородный показатель, pH |
|----------------|---------------------------|
| сильнокислые | 3,0-4,5 |
| кислые | 4,5-5,5 |
| слабокислые | 5,5-6,5 |
| нейтральные | 6,5-7,0 |
| слабощелочные | 7,0-7,5 |
| щелочные | 7,5-8,5 |
| сильнощелочные | Более 8,5 |

Содержание органических веществ. Чем выше содержание органических веществ в почвенно-грунтовом электролите, тем выше их коррозионная агрессивность.

Температура. Повышение температуры грунтов и почв ускоряет электрохимические процессы, а следовательно приводит к повышению коррозионной агрессивности.



Контрольные вопросы.

1. Приведите примеры естественного почвенно-грунтового электролита.
2. От каких факторов зависит коррозионная агрессивность грунтов?
3. Как влияет электросопротивление почвенно-грунтового электролита на его коррозионную агрессивность?
4. Почему коррозионные процессы на поверхности трубопровода, полностью погружённого в пресной воде, протекают значительно медленнее, чем на поверхности трубопровода, уложенного в грунт, имеющего влажность 15-20%?
5. При каком значении удельного электрического сопротивления говорят о высокой коррозионной агрессивности грунтов к стали?

1.4. Микро- и макрокоррозионные элементы на поверхности трубопровода



Коррозионный элемент – гальванический элемент, возникающий при взаимодействии

металла и среды, влияющей на скорость и характер коррозии металла.

✓ **Коррозионный микроэлемент (микродпара)** – коррозионный элемент, электроды которого могут быть обнаружены лишь при помощи микроскопа.

Рассмотрим работу гальванического микроэлемента (рис.1).

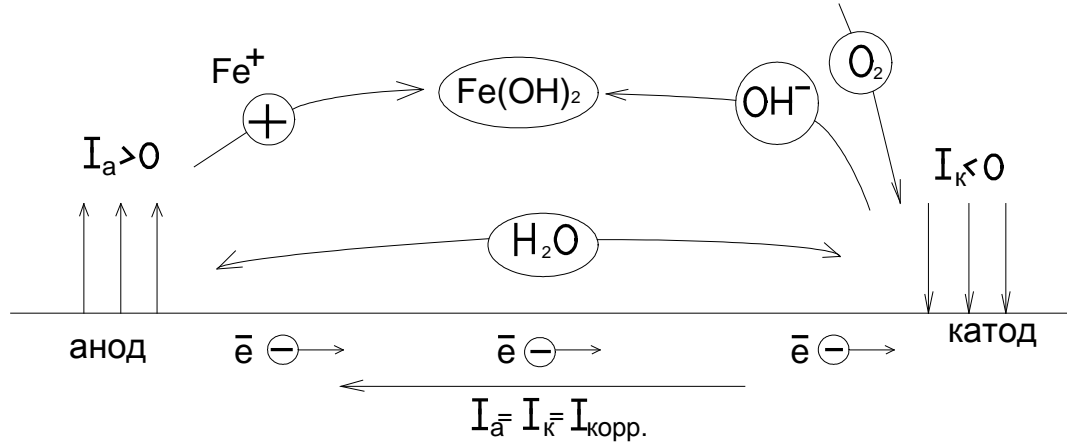
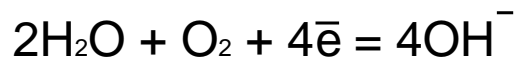


Рис.1. Коррозионный гальванический элемент на поверхности металла.
 I_a – анодный ток, I_k – катодный ток, $I_{корр}$ – ток коррозии [4].

Анодные и катодные зоны возникают из-за каких-либо неоднородностей в коррозионной среде и на металлической поверхности. Одним из признаков катода является избыток кислорода.

На катоде с участием H_2O и O_2 происходит принятие электронов:



Молекулы кислорода и воды принимают электроны на катодном участке. Для того чтобы компенсировать недостаток электронов на катодном участке, с анодного участка электроны переходят на вышеуказанный участок. Анодный участок, лишённый части электронов, не способен больше удерживать ионы железа в кристаллической решётке.

На аноде под действием молекул воды (H_2O) (m – число молекул и коэффициент в уравнении) идёт окисление железа (Fe):



Образующийся в ходе реакции гидроксид железа (II) $Fe(OH)_2$, переходит при дальнейшем окислении в более устойчивое соединение гидроксид железа (III) $Fe(OH)_3$ (ржавчину).

Коррозионные микроэлементы появляются за счёт неоднородности микроструктуры поверхности стального газопровода: наличия микрочастиц различных элементов в сплаве (Fe , C , Mn , P , S и другие), микровключений окислов, частиц пыли, нарушений микроструктуры поверхности, неоднородности состава грунта (наличие микровключений различных плотностей, химического состава, концентрации) (рис.2).

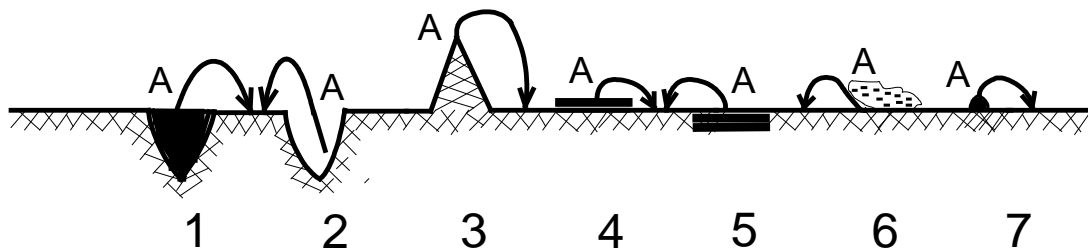


Рис.2. Причины возникновения коррозионных микропар на поверхности металлического сооружения: 1 - структурная неоднородность металла, 2 - царапины, щели, 3 - риски, 4 - наслоения, окислы, окалина, 5 - деформация, наклёп, 6 - неоднородность среды, 7 - сварной шов, А- анод.

При **структурной неоднородности (1)**, а это, например, включения и кристаллиты, анодом будет служить включения имеющие менее благородные свойства. Структурная неоднородность может вызвать межкристаллитную коррозию. При этом разрушающийся металл превращается в пористое тело, хотя внешне выглядит обыкновенно.

Дно **царапины (2)** работает анодом, особенно если царапина плотно забита грязью и продуктами коррозии, затрудняющими доставку кислорода. Острые кромки царапины являются сильным анодом, поэтому коррозия начинается на них и затем перемещается вглубь.

Заводские риски (3) возникают при волочении труб, инициируют коррозию, являясь анодом.

Под слоем **окалины (4)** протекают анодные процессы (разрушение металла), если рядом имеются чистые участки металлической поверхности, не испытывающие недостатка кислорода.

Деформированный участок (5), как правило, работает анодом. Этот участок, возникающий вследствие закаливания, наклёпа, сварки, в сущности уже другой металл со своим электрохимическим потенциалом. Растянутые волокна будут разрушаться интенсивнее, чем ненапряжённый металл.

Неоднородность среды (6). Комок глины на трубопроводе в хорошо аэрируемом песчаном грунте способен привести к возникновению пары дифференциальной аэрации с анодом под глинистой шапкой.

Сварной шов (7) может вызвать коррозию как непосредственно по шву, так и в околошовном пространстве в зависимости от электрохимических свойств материала сварочного электрода.

Исключить неоднородность – вот основной метод борьбы с коррозией.

✓ **Коррозионный макроэлемент (макропара)** – коррозионный элемент, электроды которого имеют размеры, хорошо различаемые невооружённым глазом.

Коррозионные макроэлементы возникают за счёт неоднородности макроструктуры поверхности стального газопровода при наличии макровключений (окалины, царапин, вмятин, наклёпа), а также коррозионных дефектов поперечных и продольных сварных швов, макроструктурной неоднородности физико-химических свойств почв и грунтов (состава, влажности, воздухопроницаемости).

Макровключения: окалины, царапины, вмятины, наклёп способны образовывать коррозионный элемент, механизм работы которого такой же, как и для микровключений. В свою очередь механизм работы коррозионного элемента для микровключений был рассмотрен ранее.

Рассмотрим примеры возникновения коррозионных макропар, обусловленных дифференциальной аэрацией (рис 3). Как было отмечено выше, в области повышенной концентрации

кислорода металл приобретает свойства катода, если рядом есть зона с пониженным содержанием кислорода.

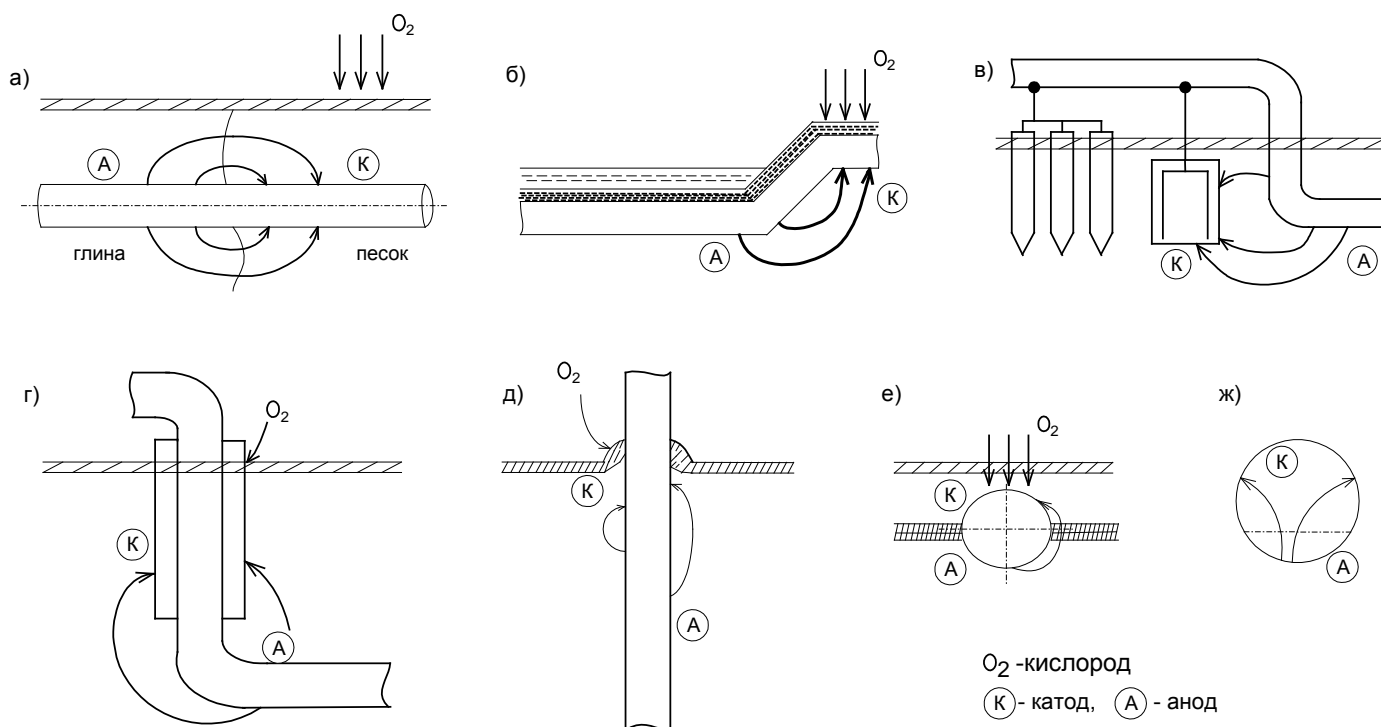


Рис. 3. Примеры протяжённых коррозионных гальванопар – макропар, возникающих в неоднородных средах.

а) Воздухосодержание песчаного грунта выше, чем глинистого. На трубопроводе, пересекающем границу песок-глина, возникнет гальваническая пара с катодом в песке и анодом в глине.

б) Так как воздухопроницаемость воды намного меньше, чем почвы, то трубопровод, уложенный в воде или в илистом грунте, будет работать анодом, а береговой участок трубопровода – катодом. Это характерно и для болотистых трасс с островками плотной или насыпной земли и трасс с резко переменной влажностью.

в) Защитное заземление корпусов электроустановок и металлического оборудования цеха часто электрически связано или непосредственно подключено к подземным трубопроводам. При этом катодом работает заземлитель – к нему доставка кислорода облегчена, особенно за счёт различных мало заглублённых элементов, а анодом – подземный трубопровод, если к тому же он покрыт слоем изоляции и уложен в мокрый грунт.

г) Макропара неизолированной части трубы, расположенной в футляре и имеющей с ним электрический контакт, на вводе газопровода в здание и изолированной части трубы, расположенной в земле также возникает из-за различной воздухопроницаемости. Неизолированная труба будет катодом, а изолированная анодом.

д) Макропара может возникнуть на вертикально расположенном металлическом сооружении, например на трубе скважины. Верхняя часть сооружения богаче кислородом, поэтому будет работать катодом, а ближайший ниже расположенный участок – анодом.

е) При высокостоящей грунтовой воде возникает макропара “верх-низ” трубы, где нижняя часть, ввиду затруднений с доставкой кислорода, работает анодом.

ж) Если верхняя часть стенки трубы свободно омывается, и нет затруднений в доступе кислорода, а внизу под плотным слоем грязи может возникнуть мощный анод.



Контрольные вопросы.

1. Что такое коррозионный микроэлемент (микропара)?
2. Чем отличается макро - от микрокоррозионной пары?
3. Какие процессы протекают на аноде и катоде микрокоррозионного элемента?
4. На трубопроводе, пересекающем границу раздела песок-глина, возникает гальваническая пара, где будут располагаться катодный и анодный участки?
5. Имеется участок подземного трубопровода с только что отремонтированным защитным покрытием, который примыкает к участку трубопровода с неудовлетворительным состоянием защитного покрытия. На каком участке, при прочих равных условиях, возможно образование анодной зоны?

1.5. Потенциал трубопровода относительно почвы

Для рассмотрения механизма формирования потенциала трубопровода относительно почвы необходимо ввести собственно понятие “потенциала”.

✓ **Потенциал** – работа, которую совершают силы поля над единичным положительным зарядом при удалении его из данной точки на бесконечность.

На поверхности газопровода, контактирующей с почвенно-грунтовым электролитом, в местах нарушения сплошности защитного покрытия на границе “металл-электролит” устанавливается определённый электрохимический потенциал, величину которого можно определить по разности потенциалов между газопроводом и неполяризуемым медно-сульфатным электродом (МСЭ). Для стали электрохимический потенциал в среднем составляет $-0,55\text{В}$ (по МСЭ) и называется естественным потенциалом. Необходимо дать чёткое определение естественного потенциала.

✓ **Естественный потенциал металла** - это потенциал коррозии металлического сооружения уложенного в грунт, существующий до наложения электрохимической защиты.

Естественный потенциал зависит от состояния поверхности газопровода и физико-химических свойств почвенно-грунтового электролита. Островки окарины имеют более положительный, а царапины, вмятины, наклёпы более отрицательный потенциал.

При катодной поляризации на трубопроводе появляется поляризационная составляющая (наложенный потенциал).

✓ **Омическая составляющая разности потенциалов “труба- земля”**- это составляющая разности потенциалов “труба- земля”, представляющая собой величину падения напряжения в защитном покрытии и слое грунта между трубой и точкой установки электрода сравнения при протекании защитного тока.

✓ **Поляризационный потенциал** – величина, представляющая собой сумму естественного потенциала сооружения и поляризационной составляющей разности потенциалов “труба- земля” (наложенного потенциала).

$$\text{Упол.} = \text{Уест} + \text{Унал.}$$

Вместе с естественным потенциалом и омической составляющей наложенный потенциал образует суммарный потенциал:

$$\text{Усумм.} = \text{Уест.} + \text{Унал.} + \text{Уомич.}$$

Ещё одной и самой важной является запись выражения, которым чаще всего характеризуют суммарный потенциал, является:

$$U_{\text{сумм.}} = U_{\text{пол.}} + U_{\text{омич.}}$$

При измерении защитного потенциала на магистральных газопроводах (МГ) без применения специальных методик и средств измерения, какие, например, применяются при измерении поляризационного потенциала (о чём будет идти речь далее), получают величину суммарного защитного потенциала, включающую в себя омическую составляющую. Фактически омическая составляющая является переменной величиной, зависящей от величины переходного сопротивления изолированная труба – земля, плотности защитного тока и удельного сопротивления грунта. Омическая составляющая не позволяет однозначно судить по величине суммарного защитного потенциала и о степени защищённости трубопроводов на любом участке МГ. Она всегда больше вблизи СКЗ и уменьшается до минимального значения на границе защитной зоны СКЗ, таким образом, что величина суммарного потенциала приближается к величине поляризационного потенциала.



Контрольные вопросы.

1. Дайте определение естественного потенциала металла?
2. Чем отличается естественный потенциал от поляризационного потенциала?
3. Почему омическая составляющая является своего рода погрешностью при измерении защитного потенциала?
4. Может ли изменяться естественный потенциал трубопровода в течение времени его эксплуатации, почему?
5. От чего зависит величина естественного потенциала трубопровода?

2. Защита трубопроводов изоляционными покрытиями

2.1. Требования, предъявляемые к защитным покрытиям, типы и конструкции защитных покрытий.

Для защиты подземных газопроводов применяются активные и пассивные методы. К активным методам относятся катодная, дренажная и протекторная защита, а к пассивным методам защита изоляционными материалами и выбор трассы прохождения МГ. В этом разделе рассмотрим метод защиты трубопроводов изоляционными покрытиями. Защитные покрытия применяются при подземной, надземной и подводной прокладке газопроводов.

Основная функция – оградить трубопровод от контакта с почвенно-грунтовым электролитом.

Защитные покрытия должны иметь соответствующие свойства и значения следующих характеристик:

- водонепроницаемость;
- адгезия (прилипаемость);
- растяжимость (дуктильность);
- химическая стойкость;
- химическая нейтральность;
- температурная устойчивость (температура размягчения, температура хрупкости);
- биологическая стойкость;
- высокое электросопротивление.

В зависимости от применяемых материалов защитные покрытия подразделяются:

- мастичные битумные (“ТРАНКОР-ГАЗ”);
- мастичные полимерные (“FRUCS”, “Protegol”);
- ленточные полимерные (“Полилен”, “Поликен”);
- из экструдированного полиэтилена.

По условиям нанесения защитного покрытия:

- базовые;

- трассовые;
- заводские.

В зависимости от условий прокладки газопровода защитные покрытия делятся на два типа:

- нормальный;
- усиленный.

Конструкция защитных покрытий зависит от их типа. ГОСТ Р 51164-98 регламентирует типы покрытий и их конструкции, которые необходимо применять при прокладке, ремонте и реконструкции газопроводов.

В соответствии с письмом “О запрещении применения изоляционных материалов, не прошедших сертификацию” начальника Департамента по транспортировке и подземному хранению и использованию газа, запрещается применение ленточно-полимерных покрытий.

Усиленный тип защитного покрытия, согласно, следует применять на трубопроводах диаметром 820 мм и более, независимо от условий прокладки, а также на всех трубопроводах любого диаметра, прокладываемых в зонах повышенной коррозионной опасности:

- в засоленных почвах (солончаках, солонцах);
- в болотистых, заболоченных, чернозёмных и поливных почвах; на подводных переходах и в поймах рек, на переходах через автомобильные и железные дороги;
- на участках промышленных и бытовых стоков, свалок мусора и шлака;
- на участках блуждающих токов источников постоянного тока;
- на участках трубопроводов с температурой транспортируемого продукта выше 303К (+30°C);
- на территориях компрессорных станций;
- на пересечении с различными трубопроводами, включая по 350м в обе стороны от места пересечения с применением заводского или базового покрытия.

Во всех остальных случаях применяются защитные покрытия нормального типа.

В Западной Сибири преобладают болотистые и заболоченные почвы, имеется густая сеть больших и малых рек с поймами и, соответственно подводными переходами через них, тем самым в данных условиях в основном применяется усиленный тип защитного покрытия.

На линейной части МГ в настоящее время на наиболее ответственных участках применяются трубы с заводской изоляцией из экструдированного полиэтилена.

Активно внедряются новые покрытия (“FRUCS”, “Protegol”), не смотря на высокую их стоимость, они обладают соответствующими физико-химическими свойствами.

При нанесении защитных покрытий, а также в процессе их эксплуатации могут образовываться дефекты:

- а) складки (образуются вдоль оси трубопровода);
- б) гофры (образуются поперёк оси трубопровода);
- в) морщины (образуются наискось по трубопроводу);
- г) сплошные оголения большой и малой площади;
- д) пузыри;
- е) отслоения;
- ж) задиры;
- з) продавливания;
- и) трещины;
- к) шатровые пустоты (отслоение покрытия на сварных швах);
- л) пропуски изоляции;
- м) разная толщина покрытия.



Контрольные вопросы.


1. Какую функцию выполняют защитные покрытия?
2. Какие требования предъявляются к защитным покрытиям?
3. На каких участках применяется усиленный тип защитных покрытий?

4. Разрешено ли применять ленточные полимерные покрытия для капитального ремонта трубопроводов?
5. Какие дефекты на защитных покрытиях могут образовываться на МГ?

3. Электрохимическая защита трубопроводов.

3.1. Необходимость и критерии ЭХЗ.

Даже тщательно выполненное защитное покрытие в процессе эксплуатации стареет, теряет свои диэлектрические свойства, водостойкость. Повреждение изоляции может происходить при температурных перемещениях газопровода, корнями растений, при укладке газопровода в траншею. Кроме того, в покрытии остаются незамеченными дефекты при приёмо-сдаточных работах. Следовательно, изоляционные покрытия не дают 100% защиты от коррозии.

 **Электрохимическая защита** – защита от коррозии путём электрохимического регулирования потенциала коррозии поляризацией.

В соответствии с распространённой классификацией способов защиты от коррозии, защита изоляционными покрытиями относится к пассивному способу, а электрохимическая защита (ЭХЗ) относится к активному способу защиты. При этом считается, что пассивная защита – основной способ защиты, а активная защита – вспомогательный.

Достаточно эффективная защита может быть обеспечена только совместно применением защитных покрытий и электрохимической защиты.

Под критериями ЭХЗ следует понимать теоретически и экспериментально обоснованные значения физических величин, при достижении которых коррозия существенно замедляется. Такими величинами являются плотность тока и потенциал защищаемого сооружения.

1) **Плотность защитного тока (j)** – является очень хорошим параметром, с помощью которого можно было бы охарактеризовать степень защищённости трубопроводов от коррозии, так как этот параметр, в сущности, подразумевает равномерность защиты рассматриваемого участка. Однако трудно убедиться, что все токи на поверхности трубопровода имеют одинаковое направление из грунта на трубопровод. К тому же, натекающий ток, расходуется нерационально: часть защитного тока натекает на катодные, уже защищённые за счёт токов коррозии, участки. Тем самым бесполезно расходуется до 60-80% защитного тока. Поэтому достоверных данных о величине минимальной плотности тока нет. Применяют следующее приближение:

$$j_{\text{защ. min}} = (3...5) j_{\text{корр.}}$$

2) **Минимальный защитный потенциал.** Общеизвестным в мировой практике критерием защищённости является минимальный защитный потенциал, который принимается равным $-0,85\text{В}$ (по медно-сульфатному электроду сравнения). Этот критерий ввёл в практику Роберт Кун ещё в 1928 году. С тех пор уточнение этого критерия для трубопроводов коснулось в основном названия: к нему добавилось слово “поляризационный”. Проблема выделения поляризационного потенциала и исключения омической составляющей имеет большое практическое значение и связано с надёжностью электрохимической защиты МГ.

По ГОСТ Р 51164-98 регламентируется величина минимального поляризационного и минимального суммарного (с омической составляющей) потенциалов.

Минимальные защитные потенциалы

| Условия прокладки и эксплуатации трубопровода | Минимальный защитный потенциал относительно насыщенного медно-сульфатного электрода сравнения, В | |
|---|--|--------------------------|
| | Поляризационный | С омической составляющей |
| Грунты с удельным электрическим сопротивлением не менее 10 Ом·м или содержанием водорастворимых солей не более 1г на 1кг грунта или при температуре транспортируемого продукта не более 293К (20°С) | -0,85 | -0,90 |
| Грунты с удельным электрическим сопротивлением менее 10 Ом·м или содержанием водорастворимых солей более 1г на 1кг грунта, или опасном влиянии блуждающих токов промышленной частоты (50Гц), или при температуре транспортируемого продукта более 293К (20°С) | -0,95 | -1,05 |

3) **Максимальный защитный потенциал.** Необходимость ограничения защитного потенциала сверху нельзя рассматривать как вещь безальтернативную.

В целях экономии ресурса глубинных анодных заземлителей (ГАЗ) целесообразно было бы “заполяризовать” всю защищаемую сеть минимальным защитным потенциалом. Однако распределение потенциала по трубопроводной сети неравномерно: вблизи анодных заземлителей $j_{заш}$ больше, больше и защитный потенциал.

Таблица №4

| Условия прокладки и эксплуатации трубопровода | Минимальный защитный потенциал относительно насыщенного медно-сульфатного электрода сравнения, В | |
|---|--|--------------------------|
| | Поляризационный | С омической составляющей |
| При прокладке трубопровода с температурой транспортируемого продукта выше 333К (60°С) в грунтах с удельным сопротивлением менее 10 Ом·м или при подводной прокладке трубопровода с температурой транспортируемого продукта выше 333К (60°С) | -1,10 | -1,50 |
| При других условиях прокладки трубопроводов: | | |
| с битумной изоляцией | -1,15 | -2,50 |
| с полимерной изоляцией | -1,15 | -3,50 |

Существует теория, что при больших токах поляризации трубопровод приобретает большой по абсолютному значению защитный потенциал, при котором возможно выделение водорода. В атомарном состоянии водород, благодаря своим небольшим размерам, способен проникать в кристаллическую структуру металла, вызывая необратимые изменения его физико-химических свойств, что в конечном итоге может приводить к разрушению металла. Кроме того, водород в виде микропузырей проникает под изоляцию, вызывает её отслоение и ухудшает её основные свойства.

Поэтому в качестве максимального поляризационного потенциала выбран потенциал выделения водорода.

Однако на практике имеется большое количество примеров, когда защитный потенциал достигал значений -30В , при этом не наблюдалось всего вышеперечисленного.

Нужно отметить, что в американском и немецком газовых стандартах величина максимального защитного потенциала не нормирована и выбирается исходя из технико-экономических соображений при проектировании электрохимической защиты.



Контрольные вопросы.

1. Что такое электрохимическая защита?
2. Какие существуют критерии ЭХЗ?
3. Почему трудно оценить степень защищённости магистральных трубопроводов от коррозии по плотности защитного тока?
4. Каким документом регламентируются величины минимального и максимального защитного потенциала?
5. Чему равна величина максимального защитного потенциала с омической составляющей для трубопроводов с плёночным защитным покрытием, уложенных в высокоомных грунтах, с температурой транспортируемого газа ниже 60°C ?

3.2. Катодная защита трубопроводов Принцип катодной защиты

Катодную защиту применяют для предотвращения разрушения газопровода от почвенной коррозии.

Катодная защита подземных сооружений от коррозии достигается наложением электрического поля от внешнего источника тока, обеспечивающего катодную поляризацию сооружения. Поляризация осуществляется током, натекающим на трубу из грунта. Труба при этом является катодом по отношению к грунту. Принципиальная схема катодной защиты показана на рис. 4.

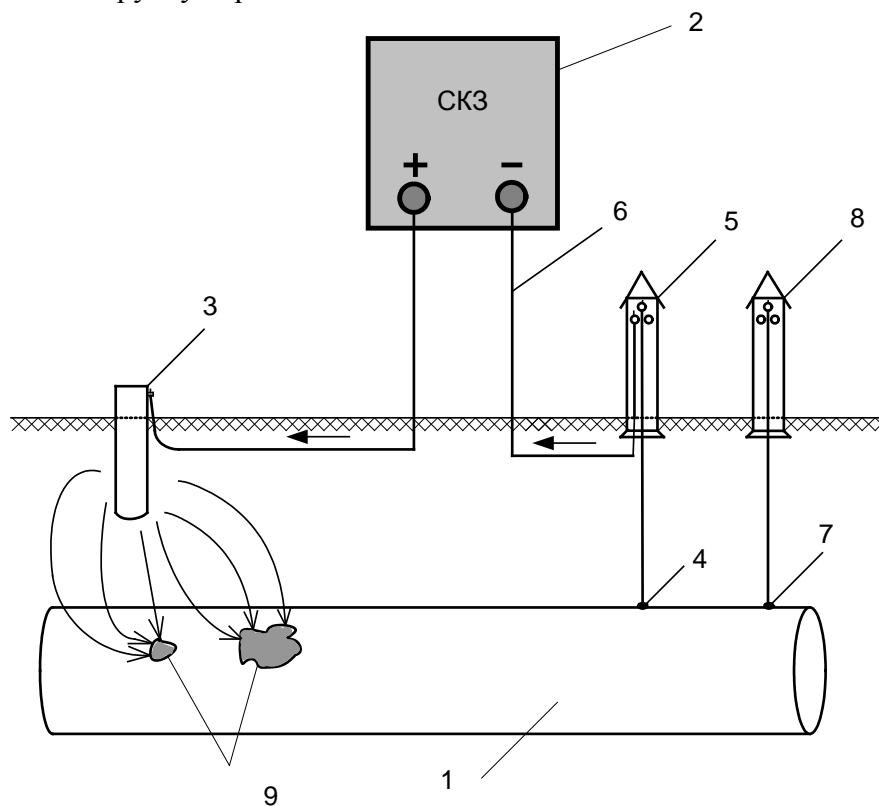


Рис. 4. Принципиальная схема катодной защиты газопровода.

- 1- газопровод; 2- внешний источник постоянного тока; 3- анодное заземление; 4- контакт дренажного кабеля с газопроводом; 5- “точка дренажа”; 6- дренажный кабель; 7- контакт катодного вывода; 8- контрольно-измерительный пункт (КИП); 9- повреждения защитного покрытия

При катодной защите отрицательный полюс источника постоянного тока 2 подключают к газопроводу 1, а положительный – к искусственно созданному аноду – заземлению 3. При включении источника тока ток от его плюса через анодное заземление стекает в грунт и через повреждённые участки изоляции 9 на трубу. Далее через точку дренажа (ТД) 5 по дренажному кабелю 6 ток возвращается к минусу источника питания. При этом на оголённых участках газопровода начнётся процесс катодной поляризации.

Установка катодной защиты (УКЗ) – комплекс сооружений, предназначенный для катодной поляризации газопровода внешним током.

В состав УКЗ входят:

- станции катодной защиты;
- анодное заземление;
- ТД и КИП;
- газопровод и объём грунта, замыкающий катодный и анодный участок;
- провода, шины, кабели;
- защитное заземление

3.3. Коррозия трубопроводов, вызываемая блуждающими токами. Дренажная защита

Блуждающим током называется ток любой электроустановки, случайно или специально использующий землю в качестве проводника.

Источниками блуждающих токов являются: электрифицированный железнодорожный (ж/д) транспорт, работающий на постоянном токе и использующий рельсы в качестве обратного провода, а также ЛЭП (линия электропередачи) постоянного тока, электросварка и токи СКЗ относительно других сооружений.

Скорость коррозии трубопровода блуждающими токами может достигать 20 мм в год.

Наиболее мощным и распространённым источником блуждающих токов для МГ является электрифицированный ж/д транспорт (рис. 5).

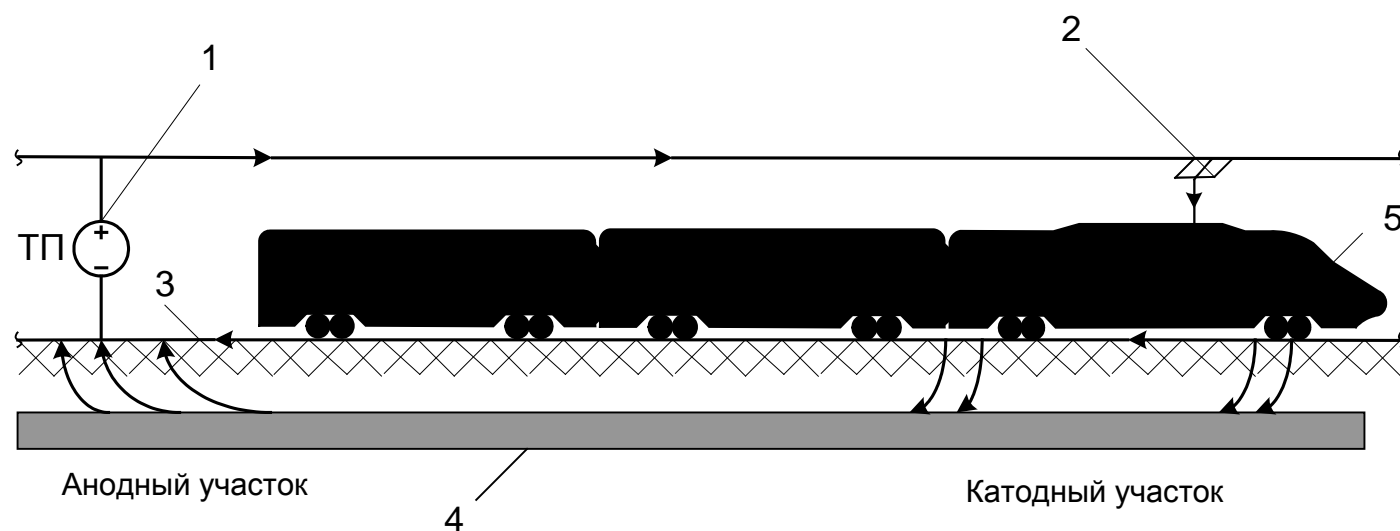


Рис. 5. Схема возникновения блуждающих токов на электрифицированном железнодорожном транспорте.

1- тяговая подстанция (ТП); 2- токоприёмник; 3- рельсы; 4- трубопровод; 5- электровоз.

Тяговый ток от положительной шины тяговой подстанции (ТП) (1) по контактному проводу поступает через токоприёмник (2) к электродвигателю электровоза (5) и далее, через рельсы (3), к отрицательной шине ТП. Причиной утечки тока в землю с рельсов является несовершенство изоляции рельсов от земли.

Величина блуждающих токов тем больше, чем меньше переходное сопротивление между рельсами и землёй, и больше продольное сопротивление между рельсами.

Ток, стекающий в землю с рельсов, может достигать 70-80% от тягового тока.

Натекающий ток на трубопровод создаёт катодную зону, в которой разрушения металла не происходит. При стекании блуждающего тока с трубопровода, создаётся анодная зона, здесь протекают коррозионные процессы.

Анодная зона возникает, как правило, вблизи места подключения отсасывающей линии ТП, а катодная зона изменяет своё положение вместе с изменением положения электровоза.

Между катодной и анодной зонами могут возникать нейтральная или знакопеременная зона.

На рис. 6 представлена эпюры разности потенциалов “рельсы – земля” и “труба – земля”.

Эпюры на данном и последующих рисунках, характеризуют относительное смещение U_p -з и U_t -з в положительную или отрицательную сторону, обусловленное поляризацией рельсов и трубопровода при протекании блуждающих токов.

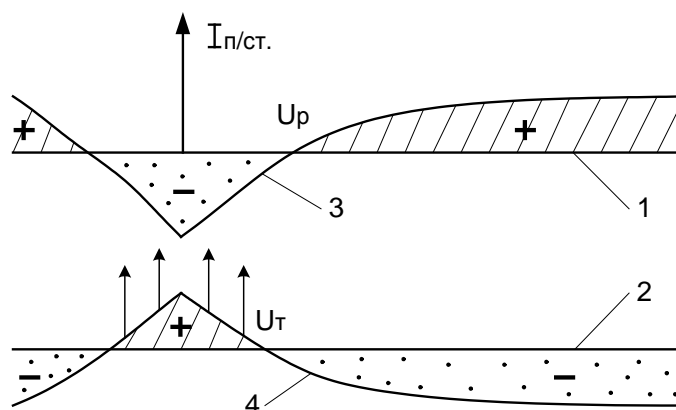


Рис. 6. Эпюры разности потенциалов “рельс – земля” и “труба – земля”, возникающие при вредном влиянии блуждающих токов от электрифицированного железнодорожного транспорта на газопровод.

U_p – разность потенциалов “рельс-земля”; U_t – разность потенциалов “труба-земля”;

$I_{п/ст.}$ – ток подстанции; 1 – рельсовая сеть; 2 – трубопровод; 3 – эпюра разности потенциалов “рельс- земля”; 4 – эпюра разности потенциалов “труба-земля”.

Мероприятия по ограничению утечек тока с рельсовой сети:

- использовать щебёночный балласт (большее удельное сопротивление);
- сделать зазор между подошвой рельса и балластом не менее 30 мм;
- использовать изолирующие фланцы и муфты;
- для соединения рельсов необходимо использовать гибкие медные провода (не менее 70 мм²);
- на станционных путях, стрелках и крестовинах требуется устанавливать обводные соединители;
- увеличивать число тяговых подстанций;
- повышать напряжение контактной сети, уменьшая тяговый ток.

Дренажная защита: назначение и принцип работы

✓ **Принцип дренажной** защиты заключается в отводе блуждающих токов с газопровода в рельсовую часть цепи тяговой подстанции.

В состав станции дренажной защиты (СДЗ) входят:

- электродренажная установка
- катодный вывод от газопровода
- контактное устройство с рельсовой цепью
- дренажный кабель

Схема электродренажной установки приведена на рис. 7.

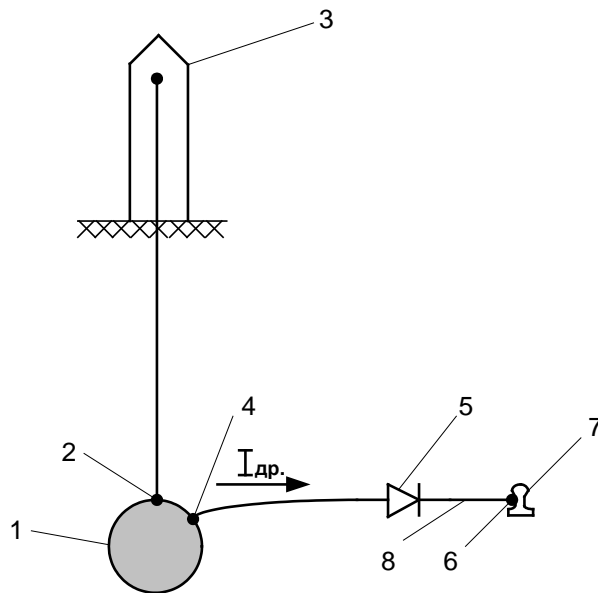


Рис.7. Принципиальная схема электродренажной защиты.

1- газопровод; 2- контакт катодного вывода; 3- катодный вывод; 4- точка дренажа на газопроводе; 5- поляризованная электродренажная установка; 6- контактное устройство с рельсовой сетью; 7- рельсовая сеть; 8- дренажный кабель.

Электродренажи подразделяются на три типа:

- прямой;
- поляризованный;
- усиленный.

✓ Прямой электродренаж

При устойчивой положительной разности потенциалов “труба - рельсы” (направление блуждающего тока с трубы в рельсы), что определяет возникновение на газопроводе устойчивого анодного участка, может применяться прямой дренаж. Данная ситуация имеет место в непосредственной близости от тяговой подстанции (ТП). Электрическая схема электродренажного устройства представлена на рис. 8. Эпюры разности потенциалов “рельс – земля” ($U_{р-з}$) и “труба – земля” ($U_{т-з}$) претерпевают изменения при использовании прямого электродренажа (см. рис. 9). В результате применения такой схемы происходит упорядоченный (организованный) отвод “избыточных” токов с трубопровода в рельсовую сеть. Однако необходимо правильно подобрать сопротивление R электродренажного, иначе подавить анодный ток на данном участке трубопровода не удастся.

Применение прямого дренажа не всегда допускается. Прямой электродренаж не применим в знакопеременных зонах, где потенциал рельсов может кратковременно менять знак с “-“ на “+”, и наоборот, даже в районе ТП. Это небезопасно, так как ток дренажа не отводится организованно с трубопровода, а будет натекает на трубопровод и затем где-то стекать с него. В результате, на данном участке трубопровода возникнет анодная зона, с протекающими в ней коррозионными процессами.

✓ Поляризованный электродренаж

На границе анодной и катодной зоны рельса находится точка нулевого потенциала, которая меняет своё местоположение при движении электровоза. Применять прямой электродренаж на данном участке нецелесообразно исходя из вышесказанного. В данном случае необходимо использовать поляризованный электродренаж (см. рис. 10). Используя такую схему, получаем, что при $U_{т-з} > U_{р-з}$ дренажная цепь работает, а при $U_{т-з} < U_{р-з}$ цепь автоматически разрывается, так как диод включён в обратном направлении. Эпюры разности потенциалов “рельс – земля” ($U_{р-з}$) и “труба – земля” ($U_{т-з}$) претерпевают изменения при использовании поляризованного электродренажа (см. рис. 11). Таким образом, в первом случае ток организованно отводится в рельсовую сеть, а не беспорядочно стекает с трубопровода. Во втором случае полупроводниковый диод запирается и препятствует натеканию электрического тока с рельсовой сети на трубопровод. Если временной

промежуток, когда цепь разорвана, невелик, то работа поляризованного дренажа считается эффективной. В противном случае рекомендуется применять усиленный электродренаж.

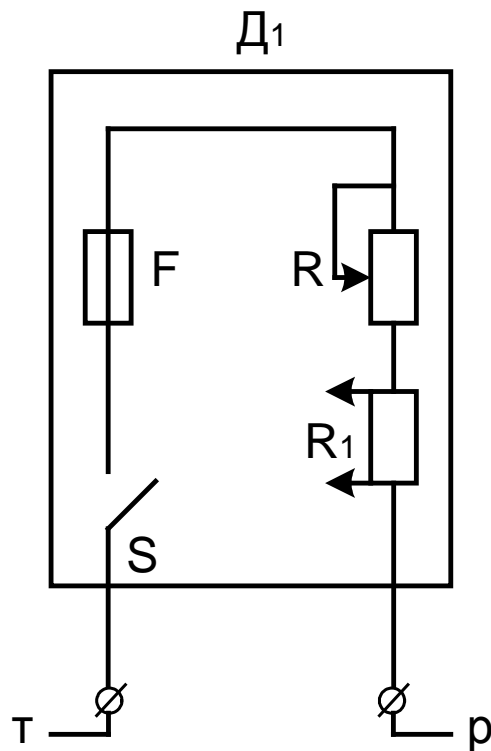


Рис. 8. Электрическая схема прямого электродренажного устройства (D_1).
 S – рубильник; F – плавкий предохранитель; R – регулировочный реостат; R_1 – шунт (калиброванное сопротивление) для измерения тока; t – трубопровод; p – рельс.

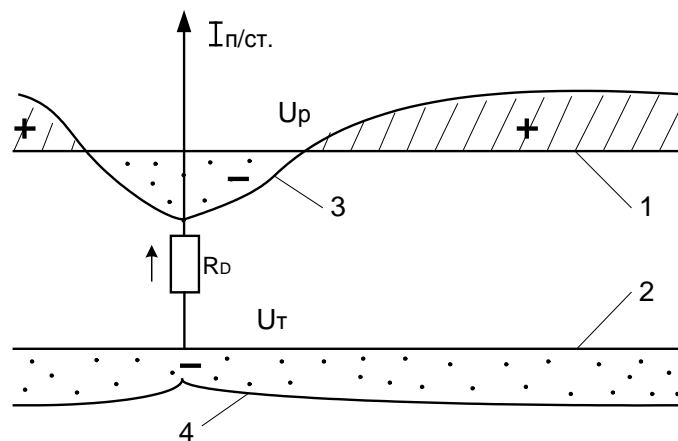


Рис. 9. Эпюры разности потенциалов “рельс – земля” и “труба – земля”, которые имеют место при использовании прямого электродренажа.
 $U_{p-з}$ – разность потенциалов “рельс-земля”; $U_{т-з}$ – разность потенциалов “труба-земля”; $I_{п/ст}$ – ток подстанции; R_D – сопротивление электродренажного устройства;
 1 – рельсовая сеть; 2 – трубопровод; 3 – эпюра разности потенциалов “рельс- земля”;
 4 – эпюра разности потенциалов “труба-земля”.

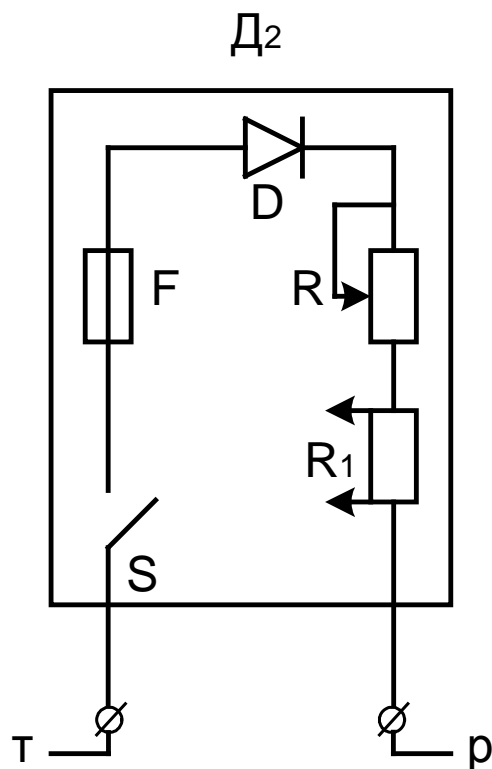


Рис. 10. Электрическая схема поляризованного электродренажного устройства (D_2).
 S – рубильник; F – плавкий предохранитель; R – регулировочный реостат; R_1 – шунт (калиброванное сопротивление) для измерения тока; D – полупроводниковый диод (блок диодов); $т$ – трубопровод; $р$ – рельс.

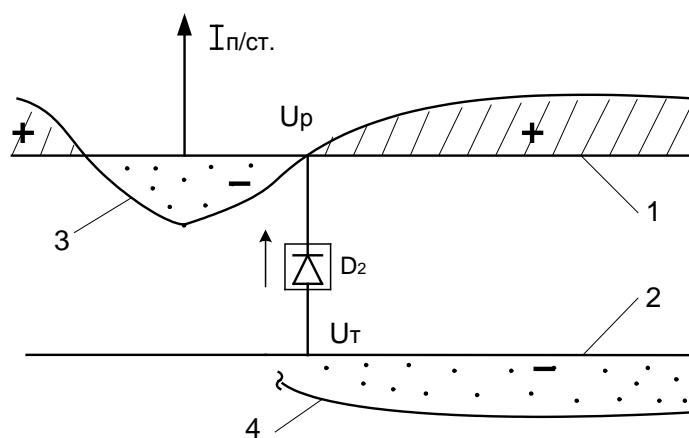


Рис. 11. Эпюры разности потенциалов “рельс – земля” и “труба – земля”, которые имеют место при использовании прямого электродренажа.
 $U_{р-з}$ – разность потенциалов “рельс-земля”; $U_{т-з}$ – разность потенциалов “труба-земля”; $I_{п/ст}$ - ток подстанции; D_2 – поляризованное дренажное устройство;
 1 – рельсовая сеть; 2 – трубопровод; 3 – эпюра разности потенциалов “рельс- земля”;
 4 – эпюра разности потенциалов “труба-земля”.

✓ Усиленный электродренаж

Усиленный поляризованный дренаж применяется для защиты газопровода, как на анодных, так и на знакопеременных участках (в том числе с небольшим преобладанием положительного U рельс-земля). Усиленный электродренаж – это фактически станция катодной защиты, у которой рельсы являются анодным заземлителем, а источником питания – электрическая сеть напряжением 220В (см. рис. 12). Эпюры разности потенциалов “рельс – земля” ($U_{р-з}$) и “труба – земля” ($U_{т-з}$) претерпевают изменения при использовании усиленного электродренажа (см. рис. 13).

Сетевой ток после преобразования и выпрямления поступает от “+” дренажа в рельсы, стекает в землю, после чего натекает на трубопровод и, далее, замыкая электрическую цепь, поступает к “-”

своего источника (электродренажного устройства). Сетевой ток совместно с дренажным током, если он протекает в данный момент в дренажной сети, защищает трубопровод от коррозии.

При устойчивой отрицательной разности потенциалов “труба – рельсы” (направление блуждающих токов с рельсов на трубопровод), определяющих возникновение на газопроводе устойчивого катодного участка, электрический дренаж неприменим.

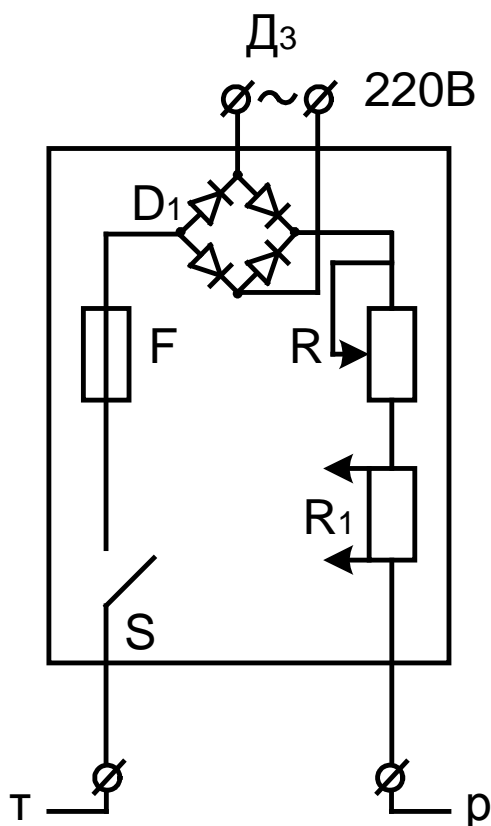


Рис. 12. Электрическая схема усиленного электродренажного устройства (D_3).

S – рубильник; F – плавкий предохранитель; R – регулировочный реостат; R_1 – шунт (калиброванное сопротивление) для измерения тока; D_1 – регулируемый выпрямитель сетевого тока; t – трубопровод; p – рельс.

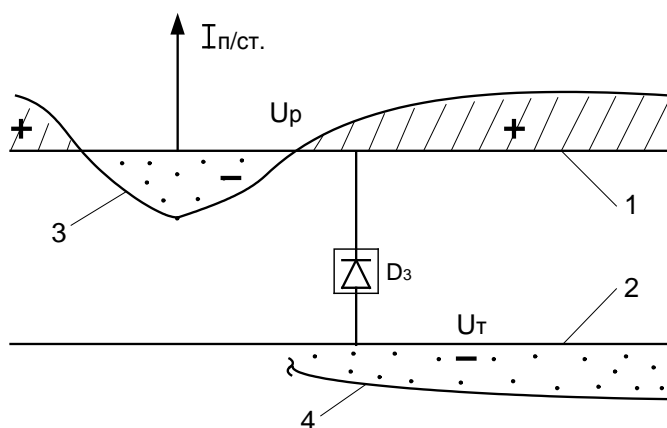


Рис. 13. Эпюры разности потенциалов “рельс – земля” и “труба – земля”, которые имеют место при использовании усиленного электродренажа.

$U_{p-з}$ – разность потенциалов “рельс-земля”; $U_{t-з}$ – разность потенциалов “труба-земля”; $I_{п/ст}$ – ток подстанции; D_3 – усиленное электродренажное устройство; 1 – рельсовая сеть; 2 – трубопровод; 3 – эпюра разности потенциалов “рельс-земля”; 4 – эпюра разности потенциалов “труба-земля”.



Контрольные вопросы.

1. Что называется блуждающими токами, и как они возникают?

2. В чём заключается принцип электродренажной защиты?
3. Нарисуйте принципиальную схему электродренажной защиты?
4. Какие существуют типы электродренажей?
5. Можно ли применять усиленный тип электродренажа на катодном участке трубопровода, почему?
6. В каком случае считается, что поляризованный электродренаж работает эффективно?
7. На анодном участке трубопровода происходит натекание или стекание блуждающих токов?
8. Нарисуйте электрическую схему усиленного электродренажа.

3.4. Протекторная защита.

Принцип протекторной защиты.

✓ **Протекторная защита** – электрохимическая защита с помощью тока гальванической пары.

✓ **Принцип протекторной защиты** заключается в подавлении тока коррозии при помощи гальванической пары, в которой протектор изготовлен из более активного металла, чем трубопровод (магний, цинк, алюминий). При этом протектор является анодом и разрушается, а трубопровод – катодом и защищается (см. рис. 14).

Протекторная защита газопроводов осуществляется, как правило, в грунтах с удельным сопротивлением до 50 Ом·м.

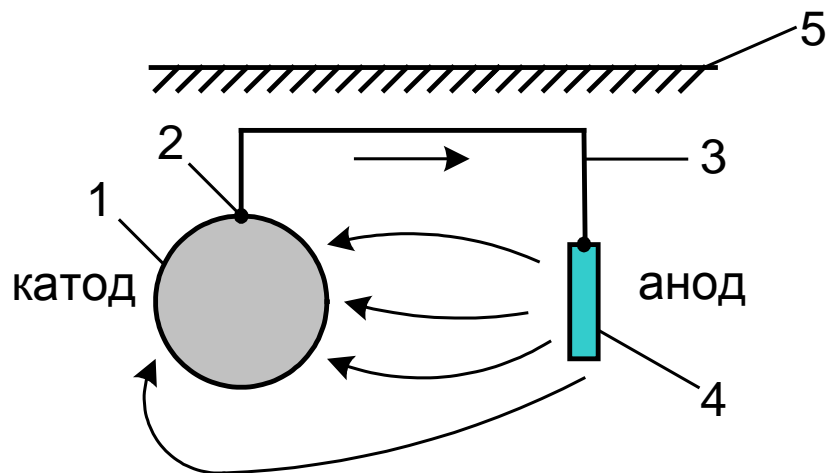


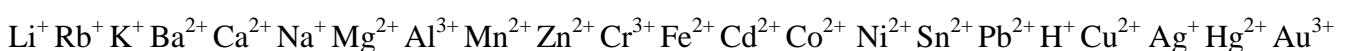
Рис. 14. Принципиальная схема протекторной защиты.

1 – газопровод; 2 – точка дренажа; 3 – изолированный провод; 4 – протектор; 5 – поверхность земли.

Стандартные электродные потенциалы

Прежде чем рассматривать устройство протекторов, необходимо рассмотреть такое понятие как стандартные электродные потенциалы. При рассмотрении нормальных равновесных потенциалов металла (т.е. металлов, помещённых в раствор собственных солей с концентрацией ионов металла, равной 1 моль/л, взятых при одинаковой температуре), видно, что металлы по величине электродного потенциалов в растворе могут быть размещены в ряд по убывающей активности.

За нулевую точку отсчёта, относительно которой измеряются величины стандартных электродных потенциалов, выбран стандартный потенциал водородного электрода. Относительно водорода располагаются все металлы:



Металлы, образующие более активные ионы располагаются левее водорода, менее активные после водорода. Чем активнее металл, тем отрицательнее у него стандартный электродный потенциал:

| Ион металла | Стандартный электродный потенциал φ° , В |
|----------------------|--|
| Mg^{2+} (магний) | -2,34 |
| Al^{3+} (алюминий) | -1,67 |
| Zn^{2+} (цинк) | -0,76 |
| Fe^{2+} (железо) | -0,44 |
| H^+ (водород) | 0,00 |
| Cu^{2+} (медь) | +0,34 |
| Au^{3+} (золото) | +1,42 |

При соединении двух металлов, занимающих в ряду напряжения разные места, образуется гальванический элемент, в котором роль анода выполняет металл с большим электроотрицательным потенциалом (менее благородный металл).

Для защиты стальных газопроводов принципиально могут быть использованы все металлы, расположенные левее железа в ряду напряжений.

В ЭХЗ практически используют протекторы из сплавов Mg (магний), Zn (цинк) и Al (алюминий), в очень ограниченном количестве могут использоваться Ca (кальций), Mn (марганец), Zr (цирконий), вводимые в состав протекторных сплавов. Цинковые и алюминиевые сплавы не нашли широкого применения в практике защиты газопроводов, так как на поверхности цинка образуется слой карбоната цинка, а на поверхности алюминия плотная оксидная плёнка. Наиболее распространёнными являются магниевые протекторы, так как магний не образует на поверхности плотных слоёв продуктов окисления и имеет приемлемый стандартный электродный потенциал.

Протектор характеризуется рабочим потенциалом при подключении его к трубопроводу и зависит от материала из которого он изготовлен, а также токопередачей, которая должна быть наибольшей и оставаться постоянной (равномерное растворение протектора).

Пример: Mg^{2+} (магний) и Fe^{2+} (медь).



$$E_{раб.} = \varphi_1^\circ - \varphi_2^\circ = (-2,34) - (-0,44) = -1,90V$$

В процессе работы протектор не должен покрываться плотным слоем продуктов коррозии и снижать величину защитного тока.

Промышленностью выпускаются несколько типов протекторов: ПМ5 (протектор магниевый $m=5kg$), ПМ10, ПМ20, ПМ5У (универсальный), ПМ10У, ПМ20У.

✓ **Комплектные протекторы с активатором** представляют собой магниевые аноды, упакованные в хлопчатобумажные мешки вместе с порошкообразным активатором.

✓ **Активатор** – смесь солей, в которую помещён протектор с целью повышения эффективности работы протекторной установки. Активатор снижает собственную коррозию протектора, снижает анодную поляризуемость, снижает сопротивление растеканию тока, устраняет причины, способствующие образованию плотных слоёв продуктов коррозии на поверхности протектора.

Наиболее распространённый состав активатора:

Na_2SO_4 (сульфат натрия) – 25%;

$CaSO_4$ (сульфат кальция) – 25%;

Бентонитовая глина – 50%.

В качестве активатора нельзя использовать коксовую мелочь!

Комплектные протекторные установки

Защита подземных газопроводов может осуществляться с помощью одиночных или групповых протекторных установок. Если состояние защитного покрытия удовлетворительное, то применяют одиночные, а если неудовлетворительное групповые протекторные установки.

Одиночные располагаются на расстоянии 3-7 метров от газопровода, глубина установки не менее 2 м и ниже уровня промерзания грунта на 0,2 м.

Групповые протекторы устанавливают на расстоянии 10-12 м от оси газопровода. Расстояние между протекторами в группе составляет 5 м. Групповые протекторные установки рекомендуется располагать через каждые 500 – 1000 метров.

Протекторная защита патронов на переходах под автомобильными и железными дорогами

В соответствии с действующими правилами переходы магистральных газопроводов через железные и шоссейные дороги осуществляются в патронах (стальных трубах, диаметр которых на 100-200 мм больше диаметра газопровода). Патрон не подвержен коррозии блуждающими токами и разрушается за счёт почвенной коррозии. Для его защиты используют групповые протекторные установки, подключённые с обеих сторон дороги. Число протекторов рассчитывают исходя из поверхности патрона и удельного сопротивления грунта (см. рис. 15).

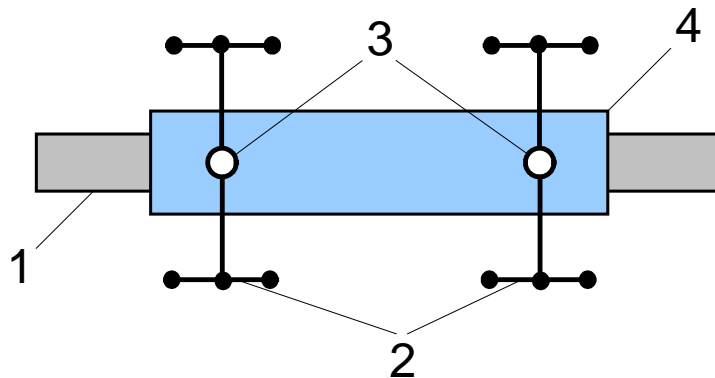


Рис. 15. Схема протекторной защиты патрона газопровода.

1 – газопровод; 2 – протекторная установка; 3 – контрольно-измерительные колонки; 4 – патрон.

Устройство протекторной защиты резервуаров

Подземные металлические ёмкости должны защищаться от действия почвенной коррозии. Блуждающие токи на подземные ёмкости практически не оказывают вредного влияния из-за небольшой длины. Перед укладкой ёмкости изолируют, а по периметру на расстоянии 2-4 метра от ёмкости устанавливают протекторы (см. рис. 16).

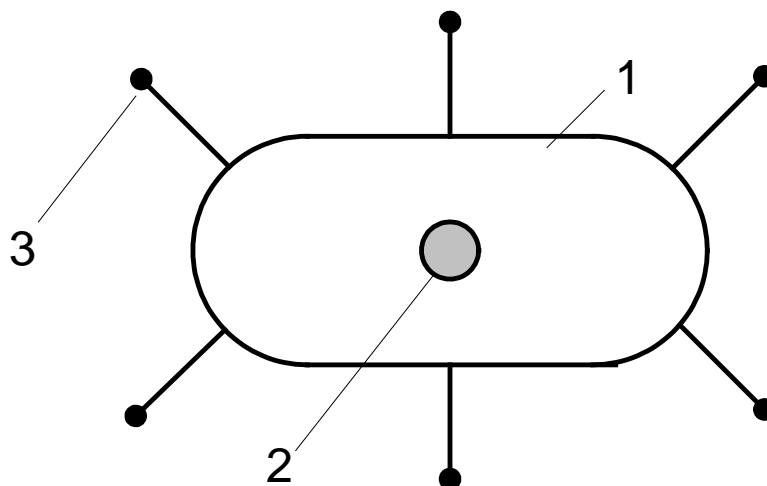


Рис. 16. Схема протекторной защиты металлической ёмкости.

1 – металлическая ёмкость; 2 – горловина ёмкости; 3 – протектор.

Автоматические протекторные установки

При определённых условиях, устройства протекторной защиты могут оказаться неэффективным, например, вблизи действующей СКЗ, в зоне блуждающих токов. Протекторы уменьшают защитную зону СКЗ и оказывают негативное влияние в знакопеременных и катодных зонах газопровода (при блуждающих токах).

Для устранения этих эффектов применяют автоматические протекторные установки, в которых протекторы соединены с газопроводом через полупроводниковые элементы (диоды, транзисторы).

1. Односторонняя поляризованная протекторная установка на диоде

Схема односторонней поляризованной протекторной установки на диоде приведена на рис. 17.

При отсутствии блуждающих токов в цепи “газопровод - протектор” протекает защитный ток. Ток стекает с протектора в грунт, натекает на газопровод и через диод, который включён в прямом направлении, замыкает электрическую цепь.

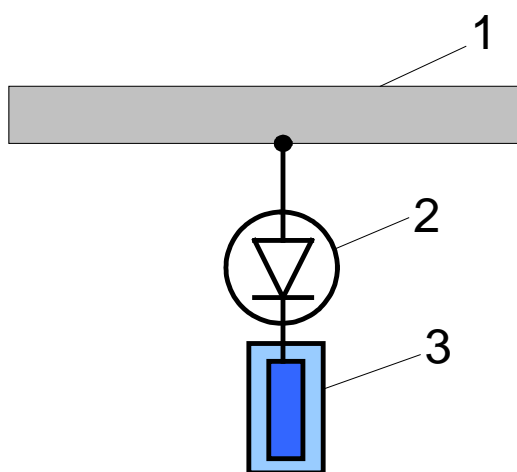


Рис.17. Принципиальная схема односторонней поляризованной протекторной установки на диоде.

1 – газопровод; 2 – полупроводниковый диод; 3 – протектор.

При появлении блуждающих токов катодного направления, защитный ток будет постоянным, пока потенциал газопровода не будет равен или больше по абсолютной величине потенциала протектора. В этом случае, при достижении потенциала отсечки протектор выключается. Газопровод защищается от блуждающего катодного тока.

Пример: Если потенциал протектора равен $-1,5\text{В}$, а потенциал трубопровода составляет $-0,80\text{В}$, то защитный ток будет нтекать на трубопровод с протектора. Если же потенциал трубопровода будет равен $-1,5\text{В}$ или больше по абсолютному значению, то электрический ток должен нтекать на протектор с трубопровода. Однако в данном случае диод включён в обратном направлении по отношению к электрическому току и разрывает электрическую цепь (см. рис. 18).

При анодном направлении блуждающего тока потенциал газопровода сдвигается в положительную сторону и защитный ток непрерывно растёт. Протектор подавляет анодные блуждающие токи.

Пример: Пусть потенциал газопровода составлял $-1,0\text{В}$. В результате протекания блуждающих токов в анодном направлении, потенциал сдвинулся в положительную сторону и теперь составляет $-0,85\text{В}$. Если предположим, что, как и в предыдущем примере, потенциал протектора был равен $-1,5\text{В}$, то электрический ток будет нтекать с протектора на трубопровод (см. рис.19). Тем самым, протектор защищает трубопровод от коррозии.

Протектор с диодом обеспечивает автоматическое действие системы и регулирует направление, но не величину защитного тока.

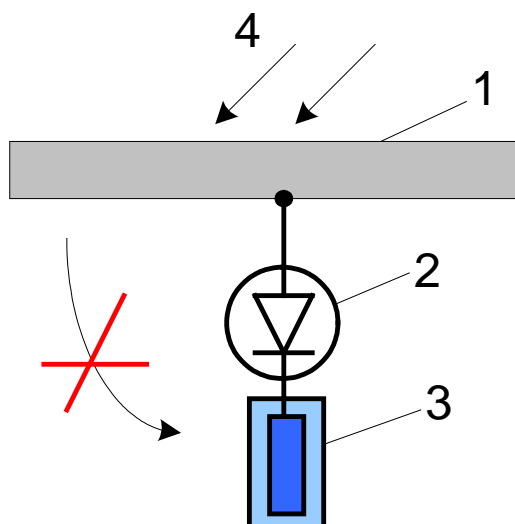


Рис.18. Схема работы односторонней поляризованной протекторной установки на диоде при протекании блуждающих токов катодного направления.
1 – газопровод; 2 – полупроводниковый диод; 3 – протектор, 4 – блуждающие токи.

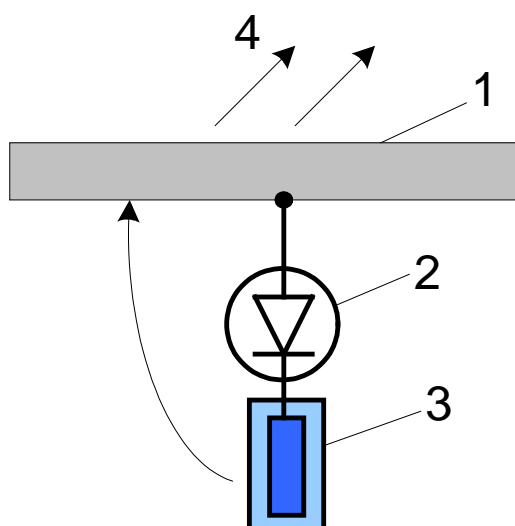


Рис.19. Схема работы односторонней поляризованной протекторной установки на диоде при протекании блуждающих токов анодного направления.
1 – газопровод; 2 – полупроводниковый диод; 3 – протектор, 4 – блуждающие токи.

2. Односторонняя поляризованная протекторная установка на транзисторе

Схема односторонней поляризованной протекторной установки на транзисторе приведена на рис. 20. Для стабилизации защитного потенциала в данном интервале, протектор соединяют с транзистором. Эмиттер соединяют с газопроводом, коллектор с протектором, а базу с управляющим электродом. Через цепь протекает защитный ток, если потенциал базы, задаваемый управляющим электродом, более отрицательный, чем потенциал эмиттера, соединённого с трубопроводом. При сближении этих потенциалов ток в цепи базы уменьшается. Для выбора уровня защитного потенциала подбирают управляющий электрод и наполнитель.

Пример: Потенциал трубопровода $-0,80\text{В}$, потенциал протектора $-2,4\text{В}$, потенциал управляющего электрода $-1,6\text{В}$. Электрический ток будет натекает с протектора на трубопровод.

Величина потенциала трубопровода будет приближаться к $-1,6\text{В}$, но не будет принимать этого значения.

Недостатком данной установки является то, что она не позволяет ограничивать “катодный” потенциал трубопровода.

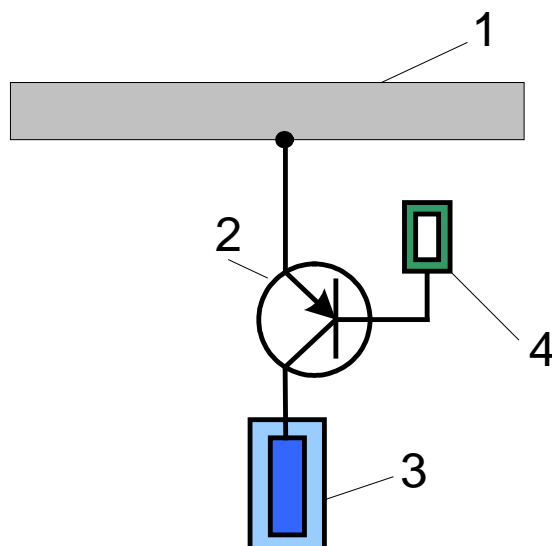


Рис.20. Принципиальная схема односторонней поляризованной протекторной установки на транзисторе.

1 – газопровод; 2 – биполярный транзистор (р-п-р типа); 3 – протектор;
4 – управляющий электрод.

3. Сдвоенная поляризованная протекторная установка на диоде и транзисторе

При защите сооружений (трубопроводов) в поле знакопеременных блуждающих токов промышленной частоты, если необходимо ограничение анодного и катодного потенциалов сооружения, используют сдвоенные поляризованные протекторные установки на диодах и транзисторах (см. рис. 21).

Установка состоит из двух протекторов: эффективного анода и катода. Автоматическая работа устройства заключается в поддержании защитного интервала потенциалов, осуществляется за счёт управляющего электрода.

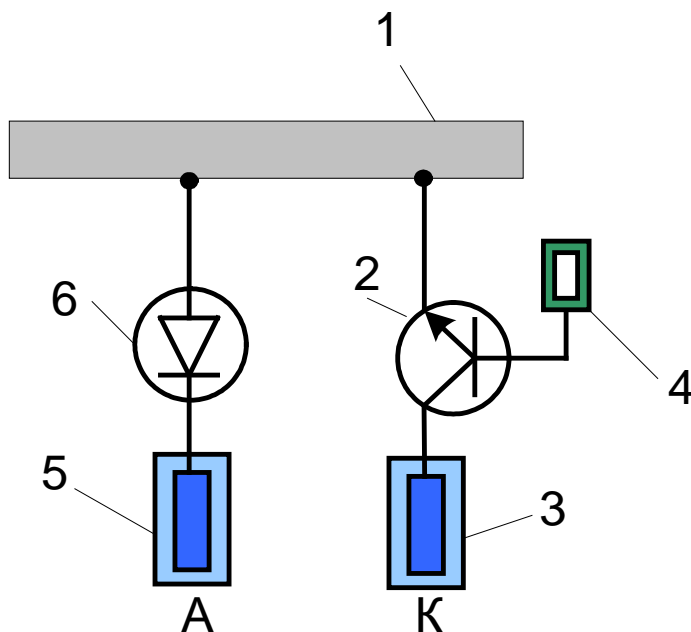


Рис.21. Принципиальная схема поляризованной протекторной установки на диоде транзисторе.

1 – газопровод; 2 – биполярный транзистор (п-р-п типа); 3 – протектор эффективный катод (К); 4 – управляющий электрод; 5 - эффективный анод (А); 6 – полупроводниковый диод.

Рассмотрим принцип работы установки.

Сооружение (газопровод) поляризуется анодной составляющей блуждающего тока, при этом потенциал сооружения положительнее потенциала протектора (эффективного анода). В этом случае протектор, подключённый через диод, катодно поляризует сооружение до потенциала, равного потенциалу протектора за вычетом падения напряжения на диоде. Данный случай уже был рассмотрен выше. За счёт разности потенциалов между вспомогательным электродом и сооружением возникает сигнал отрицательной полярности, поступающий на базу транзистора и отключающий протектор (эффективный катод). То есть в этом случае работает часть установки с диодом, другая часть с транзистором при этом отключена.

Сооружение поляризуется катодной составляющей блуждающего тока, при этом потенциал сооружения отрицательнее потенциала протектора (эффективный анод). В этом случае диод в цепи протектора автоматически закрывается и отключает протектор от сооружения. Между вспомогательным электродом и сооружением, потенциал которого отрицательнее вспомогательного электрода, возникает сигнал положительной полярности, поступающий на базу транзистора. Транзистор открывается и происходит анодная поляризация защищаемого сооружения, т.е. снижение избыточного катодного потенциала сооружения до потенциала, равного потенциалу вспомогательного электрода. В этом случае работает часть установки с транзистором, другая часть с диодом при этом отключена. **Недопустимо чтобы обе части поляризованной протекторной установки работали вместе.**

4. Сдвоенная поляризованная протекторная установка на двух транзисторах

Если потенциал эффективного анода лежит в области более отрицательных значений, чем допустимый защитный потенциал трубопровода, то вместо диода в цепь анода следует ставить транзистор. Регулировка работы катода и анода осуществляется с помощью двух вспомогательных (управляющих) электродв (см. рис. 22).

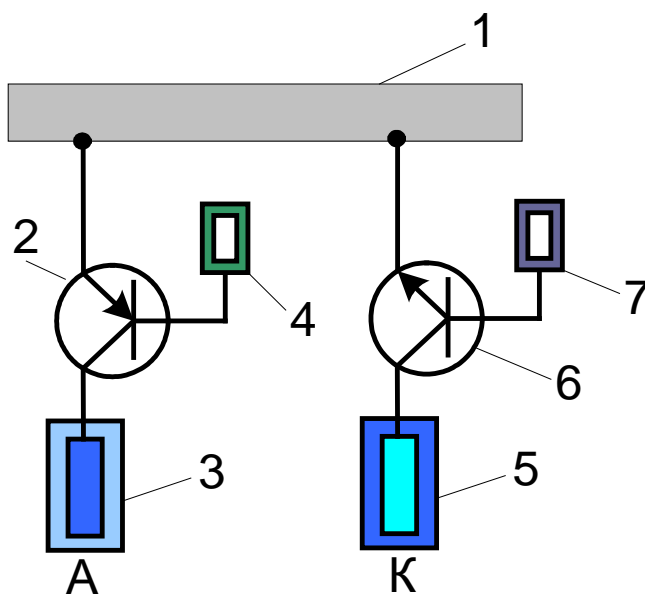


Рис.22. Принципиальная схема поляризованной протекторной установки на диоде и транзисторе.

1 – газопровод; 2 – биполярный транзистор (р- n- р типа); 3 – протектор эффективный катод (А); 4 – управляющий электрод анода; 5 - эффективный анод (К); 6 – биполярный транзистор (n-р- n типа); 7 – управляющий электрод катода.

Как и в предыдущем случае при катодном или анодном смещении потенциала трубопровода, вызванном блуждающими токами, в работу включается соответственно одна или другая часть установки. При анодной поляризации трубопровода блуждающими токами включается в работу часть установки с эффективным анодом, при этом другая часть не работает, так как на р-п переход транзистора (6) подаётся напряжение обратной полярности, и он при этом запирается. Аналогично

протекают процессы и при катодной поляризации трубопровода блуждающими токами. Данная установка позволяет поддерживать защитный потенциал в узком диапазоне.

4. Сдвоенная поляризованная протекторная установка на двух транзисторах и с одним управляющим (вспомогательным) электродом.

Если допустимо изменение защитного потенциала сооружения (трубопровода) в более широком интервале, то регулировка работы катода и анода может осуществляться общим вспомогательным электродом (см. рис. 23).

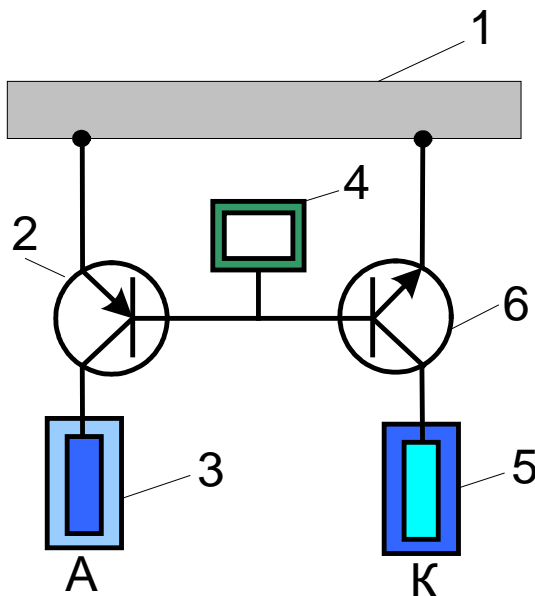


Рис.23. Принципиальная схема поляризованной протекторной установки на двух транзисторах с общим управляющим (вспомогательным) электродом.
1 – газопровод; 2 – биполярный транзистор (р- n- р типа); 3 – протектор эффективный катод (А); 4 – общий управляющий электрод; 5 - эффективный анод (К); 6 – биполярный транзистор (n-р- n типа).



Контрольные вопросы.

1. В чём заключается принцип протекторной защиты?
2. Можно ли применять протекторную защиту в высокоомных грунтах, почему?
3. По какому принципу металлы располагаются в ряду напряжений?
4. Какой металл будет являться анодом в гальванических парах: медь - железо, железо - цинк, магний - цинк?
5. В чём заключаются основные функции активатора?
6. Что такое поляризованные протекторные установки, с какой целью они применяются?

Тема №2. Материаловедение

1. Электрические явления в электротехнических материалах

1.1. Электропроводность материалов

Одним из электрических явлений, имеющих место во всех электротехнических материалах, является электропроводность. Известно, что каждый материал, будь то проводник, полупроводник или диэлектрик, проводит электрический ток, т.е. в нём имеет место явление электропроводности.

Проводниковые материалы (серебро, медь, алюминий и др.) очень хорошо проводят электрический ток; **полупроводники** (германий, кремний и др.) проводят ток в меньшей мере, чем проводниковые материалы. **В диэлектриках** же наблюдаются очень малые токи, даже если приложить к ним высокие напряжения (от 1000В и выше).

Величина, с помощью которой количественно оценивается электропроводность материалов, называется удельным электрическим сопротивлением и обозначается греческой буквой ρ (ро). Эта величина определяется согласно формуле, даваемой в электротехнике для подсчёта общего сопротивления материала:

$$R = \rho \frac{l}{S} \quad (1)$$

где R - электрическое сопротивление образца материала, Ом;

l - длина материала, м;

S - площадь поперечного сечения материала, мм²;

ρ - удельное электрическое сопротивление материала.

Из формулы (1) вытекает формула для непосредственного подсчёта удельного электрического сопротивления данного материала:

$$\rho = R \frac{S}{l} \quad (2)$$

Величина ρ характеризует способность материала пропускать электрический ток через свой объём, поэтому она получила название **удельного объёмного сопротивления** и обозначается ρ_v .

Удельное объёмное сопротивление является одной из электрических характеристик материалов.

Удельное объёмное сопротивление может быть положено в основу распределения всех электротехнических материалов на три основные группы:

- проводники $10^{-8} - 10^{-4}$ Ом·м;
- полупроводники $10^{-4} - 10^8$ Ом·м;
- диэлектрики $10^8 - 10^{18}$ Ом·м и выше.

Величина, определяющая электрическое сопротивление материала при протекании тока по его поверхности называется **удельным поверхностным сопротивлением** и обозначается ρ_s . Единицы измерения - Ом.

Однако более удобной для рассмотрения физических процессов, происходящих в электротехнических материалах является величина обратная удельному электрическому сопротивлению – удельная проводимость (γ):

$$\gamma = \frac{1}{\rho} \quad (3)$$

Аналогично удельным электрическим сопротивлениям различают величину удельных проводимостей: объёмную (γ_v) и поверхностную (γ_s), причём размерность первой величины γ_v (Ом·м)⁻¹, а второй γ_s (Ом)⁻¹. Физическая сущность этих величин состоит в том, что они показывают, насколько один материал лучше или хуже другого проводит электрический ток. Чем больше заряженных частиц в материале, тем большей проводимостью обладает данный материал, и наоборот. В зависимости от того какие заряженные частицы – электроны или ионы – создают электрический ток, различают материалы с электронной и ионной проводимостью.

1.2. Электропроводность проводников

Проводниковые материалы (медь, алюминий, железо и др.) относятся к материалам кристаллического строения. Они имеют кристаллическую решётку, в узлах которой расположены ионы. Металлический проводник состоит из положительных ионов, которые лишь колеблются около своих узлов, и из хаотически движущихся электронов. В случае кубической решётки расстояния между ионами по всем трём направлениям одинаковы. Валентные электроны положительно заряженных ионов становятся свободными и передвигаются в разных направлениях, распределяясь равномерно по всему объёму кристалла (см. рис. 1).

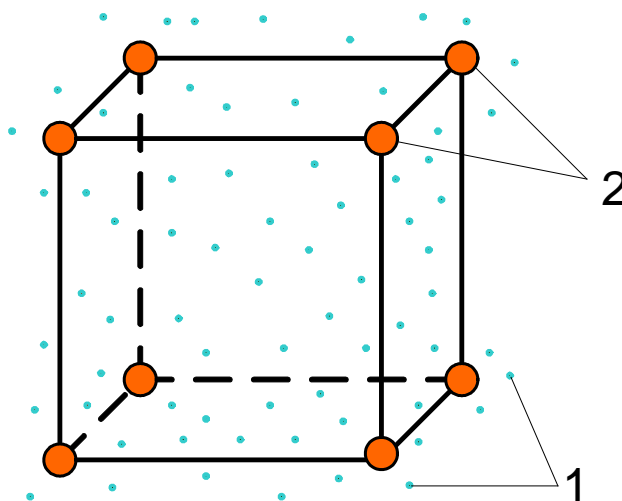


Рис. 1. Кубическая кристаллическая решётка.

1 – валентные электроны; 2 – ионы в узлах кристаллической решётки

Если к концам металлического проводника приложить электрическое напряжение, то хаотическое движение электронов превратится в упорядоченное (направленное) движение, то есть создаётся электрический ток. Так как количество свободных электронов велико, то электрический ток будет увеличиваться во столько раз, во сколько повысится напряжение. Величина удельной проводимости (γ) и удельного электрического сопротивления (ρ) при изменении напряжения остаётся постоянной, что является характерным свойством всех металлических проводников.

Это свойство выражает линейную зависимость тока от напряжения:

$$I = \frac{U}{R} = GU \quad (4)$$

где R – электрическое сопротивление проводника;

G – проводимость проводника;

U – величина приложенного напряжения;

I – сила тока.

С повышением температуры проводникового материала сопротивление его увеличивается, а с понижением температуры оно понижается. Нагрев проводника повышает энергию ионов, составляющих кристаллическую решётку металла, в результате чего колебания их в узлах решётки усиливаются. Это усиление колебаний затрудняет движение электронов, которые чаще сталкиваются с ионами и в меньшем количестве участвуют в создании электрического тока. Ток уменьшается, хотя напряжение остаётся неизменным. Это свидетельствует об увеличении сопротивления проводника.

Температурная зависимость сопротивления проводника выглядит следующим образом:

$$R_t = R_0[1 + \alpha(t - t_0)] \quad (5)$$

где R_t – сопротивление при температуре t ; R_0 – сопротивление проводника при температуре t_0 ;

α – температурный коэффициент сопротивления.

Формула для удельных электрических сопротивлений выглядит аналогично:

$$\rho_t = \rho_0[1 + \alpha(t - t_0)] \quad (6)$$

На величину электрического сопротивления металлических проводников оказывают влияние различные примеси. Проводниковые материалы, очищенные от примесей, обладают более низкими сопротивлениями, чем материалы, загрязнённые примесями.

1.3. Электропроводность полупроводников

Наиболее распространёнными полупроводниковыми материалами являются кремний и германий.

Проводимость полупроводниковых материалов значительно меньше, чем металлических проводников. Это объясняется тем, что в полупроводниках электроны связаны с атомами и становятся свободными лишь при определённых условиях.

Область, в которой располагаются валентные электроны (электроны, участвующие в образовании химических связей) называется **валентной зоной**. Область повышенной энергии, где электроны создают электрический ток, называется областью или **зоной проводимости** (см. рис. 2а).

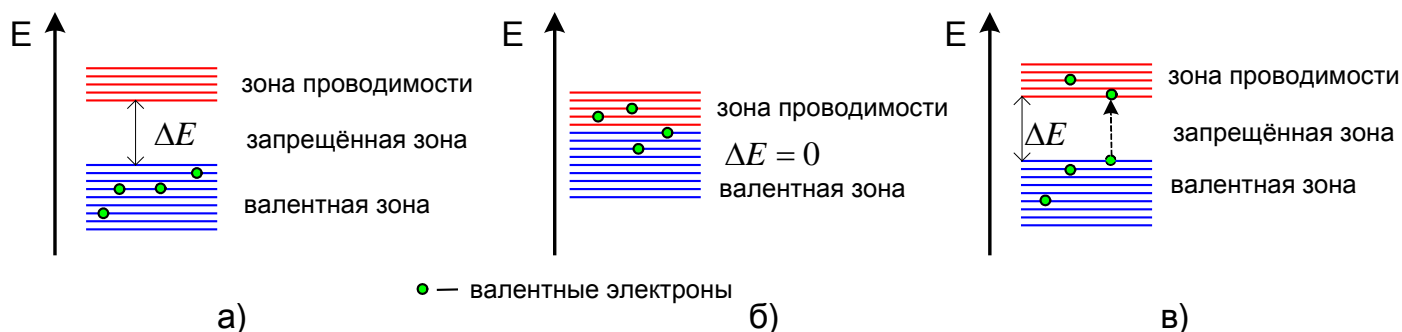


Рис. 2. Зонная структура и переходы валентных электронов: а) и в) – в полупроводнике б) – в металле. E – энергия системы; ΔE - ширина запрещённой зоны.

Каждая из двух вышеуказанных зон состоит из набора близкорасположенных энергетических уровней. Внутри зоны электроны перемещаются свободно, так как такое перемещение не требует больших энергий. Энергетический промежуток между верхним краем (потолком) валентной зоны и нижним краем (дном) зоны проводимости (ΔE) называется **шириной запрещённой зоны**.

В металлах ширина запрещённой зоны равняется нулю, так как валентная зона и зона проводимости перекрываются и это, по сути, будет одна общая зона (см. рис. 2б). Именно способность валентных электронов в металлах к свободному перемещению по всему объёму кристалла и обуславливает их высокие электрическую проводимость и теплопроводность.

Переход электронов в полупроводниках из валентной зоны в зону проводимости может произойти в результате нагрева полупроводникового материала внешним источником тепла, что повышает энергию электронов (см. рис. 2в). Этим самым электроны переводятся из одной энергетической области в другую, где они свободно движутся под действием приложенного напряжения.

Для многих полупроводников достаточно невысокой температуры, например комнатной, чтобы перевести некоторое количество электронов из валентной зоны в зону проводимости. Дальнейшее повышение температуры усиливает процесс такого перехода, и проводимость полупроводника увеличивается.

Забегая вперёд нужно сказать, что если ширина запрещённой зоны очень велика (больше 4эВ; 1эВ = $1,6 \cdot 10^{-19}$ Дж), то электрическую проводимость в веществе (нагреванием или облучением) возбудить практически невозможно (рис. 3.).

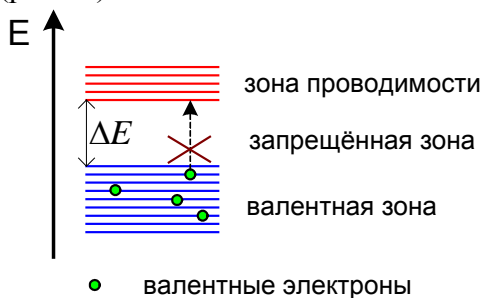


Рис. 3. Зонная структура и переходы валентных электронов в диэлектрике. E – энергия системы; ΔE - ширина запрещённой зоны ($\Delta E \sim 4\text{эВ}$).

Такие материалы быстрее расплавятся, чем в них появится электронная проводимость. Эти вещества называются **диэлектриками**.

Электропроводность, обусловленная в полупроводниках электронами, называется **электронной (n -проводимость)**, так как носителями тока являются электроны. Кроме того, в полупроводниках может иметь место **дырочная (p – проводимость)**, носителями тока, при которой являются дырки.

Полупроводник обладает **собственной проводимостью**, которая обусловлена движением его собственных носителей тока – электронов или дырок. При введении в структуру полупроводника примесей возникает **примесная проводимость**, которая может быть, как и собственная проводимость, дырочной или электронной.

Более подробно о типах проводимости в полупроводниках будет изложено в разделе: «Электротехника с основами промышленной электроники».

1.4. Электропроводность диэлектриков

У диэлектрика проводимость весьма мала. По своему характеру она может быть электронной и ионной. Многие диэлектрики, имеющие в своём составе ионные соединения, например, стекло, фарфор и другие, обладают ионной электропроводностью. В этих диэлектриках движущими заряженными частицами, создающими электрический ток, являются положительные и отрицательные ионы. Такой вид электропроводности может встречаться и у жидких диэлектриков.

Диэлектрики по своему физическому состоянию разделяются на газообразные, жидкие и твёрдые; по структуре – на кристаллические и аморфные и по своей химической природе – на органические и неорганические. Каждая из этих групп диэлектриков обладает своими несколько отличными свойствами. Однако всем им присущи следующие физические процессы.

Все диэлектрики в электрическом поле поляризуются, что связано с упорядочением внутри диэлектрика заряженных частиц. Во всех диэлектриках под действием переменного напряжения происходит рассеивание электрической энергии, переходящей в тепловую. В сильных электрических полях диэлектрики могут быть разрушены, пробиты. Место пробоя в диэлектрике обладает большой проводимостью.

1.4.1. Поляризация диэлектриков

Электрическую поляризацию можно представить, рассмотрев пример: диэлектрик (1), помещённый в конденсатор между металлическими электродами обкладками (2) (рис. 4).

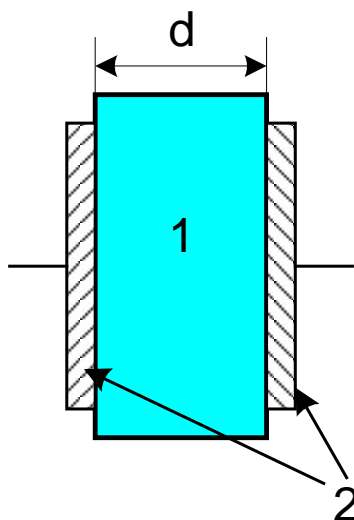


Рис. 4. Диэлектрик между обкладками конденсатора.

Если такой конденсатор подключить к источнику постоянного напряжения, то на обкладках конденсатора появятся электрические заряды, которые обусловят электрическое поле в диэлектрике. Под действием сил этого поля электроны в атомах диэлектрика сместятся относительно ядра и образуют с ним связанные положительные и отрицательные заряды. Эти упруго связанные заряды называются **диполями** (рис. 5.). Диполи внутри диэлектрика выстраиваются в цепочки и связывают противоположные заряды, находящиеся на электродах конденсатора.

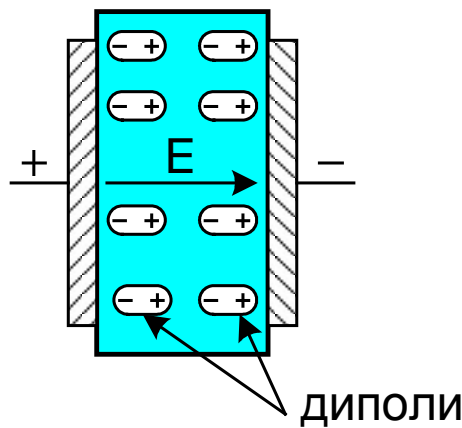


Рис. 5. Электронная поляризация в диэлектрике.
 E – напряжённость электрического поля.

Возникает электронная поляризация диэлектрика.

Электрическая поляризация диэлектриков - это сложный процесс, включающий в несколько явлений, зависящих от физической и химической природы диэлектрика. В каждом диэлектрике могут не возникнуть все виды поляризации, но один из них обязателен для всех диэлектриков.

Этим видом поляризации и является электронная поляризация. Диполи, образованные под действием сил электрического поля, появляются в диэлектрике мгновенно, если приложить к нему напряжение, и также мгновенно исчезают, если напряжение снять. Следует отметить, что до того, как к диэлектрику приложили напряжение, в нём не было готовых диполей.

Молекулы диэлектрика могут ещё содержать в своём составе положительные и отрицательные ионы, связанные электрическими силами взаимодействия. При этих условиях в молекуле образуется пара из ионов разных знаков, т.е. электрический диполь (рис. 6.). Электрический момент (μ) этого диполя равен:

$$\mu = q \cdot l, \quad (7)$$

где q - электрический заряд одного иона;

l - расстояние между ионами.

Направление электрического момента принимается от отрицательного знака к положительному и обозначается стрелкой.

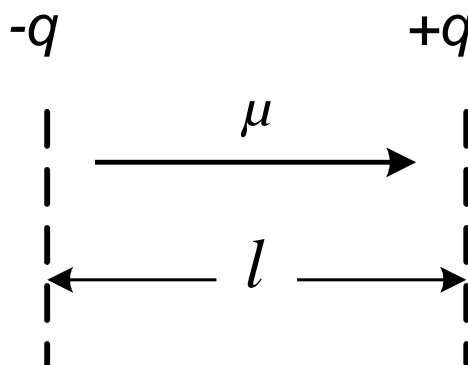


Рис. 6. Электрический диполь

Молекулы, не имеющие таких диполей, называются **неполярными** или **нейтральными**, а молекулы, у которых имеются такие диполи, – **дипольными**. Такие диполи называются **твёрдыми**, в отличие от **упругих** диполей, которые возникают при электронной поляризации.

Если подвергнуть воздействию электрического поля диэлектрик, имеющий дипольные молекулы, то эти твёрдые диполи повернутся под углом к направлению электрического поля и тем самым дополнительно к электронной поляризации создадут ещё поляризацию дипольную (рис. 7.). Большой стрелкой, указано направление электрического поля, напряжённостью E . Малыми стрелками обозначены твёрдые диполи, которые ориентированы (повёрнуты) под одним и тем же углом к направлению электрического поля.

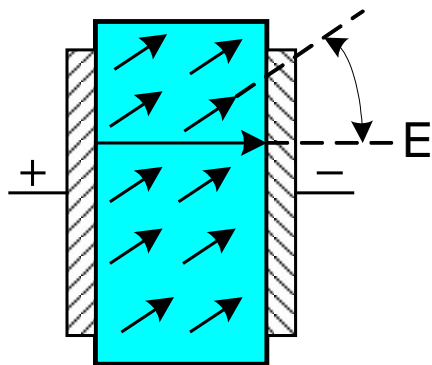


Рис. 7. Дипольная поляризация диэлектрика.

Во многих диэлектриках могут оказаться в качестве примесей ионы, слабо связанные силами взаимодействия с собственными молекулами или атомами диэлектрика. Под действием внешнего электрического поля эти ионы пройдут через весь диэлектрик и, остановившись вблизи его поверхности у электродов, образуют так называемый объёмный заряд (рис. 8.). Таким образом, на поверхностях диэлектрика, обращённых к электродам, с течением времени накопятся электрические заряды: у отрицательного электрода – положительные, а у положительного – отрицательные. В результате такой поляризации образуются объёмные заряды, и поляризация называется объёмнозарядной.

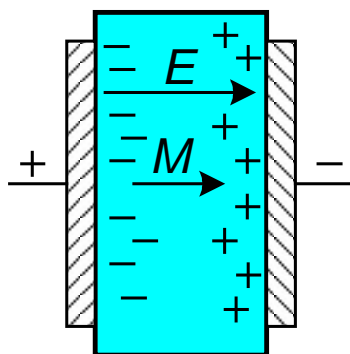


Рис. 8. Объёмнозарядная поляризация диэлектрика

E – напряжённость электрического поля;
 M – общий (суммарный) момент диполей.

Общий (суммарный) момент диполей равен:

$$M = Q \cdot h, \quad (8)$$

где Q – электрический заряд (на поверхности диэлектрика у электрода);
 h – толщина диэлектрика.

В некоторых керамических диэлектриках, например титанате бария (BaTiO_3), имеются электрические диполи, обусловленные собственной структурой диэлектрика. Эти диполи могут быть направлены в разные стороны, например, перпендикулярно или противоположно диполям соседней области (рис. 9.). Такие области называют доменами. Домены с одинаково направленными в них диполями, существуют без какого – либо внешнего электрического воздействия.

Действие же сил электрического поля в направлении диполей какого – либо домена обуславливает преимущество этого домена. Он начинает расти за счёт своих соседей, и в конце концов весь диэлектрик становится поляризованным преимущественно в этом направлении. Такая поляризация называется **самопроизвольной**.

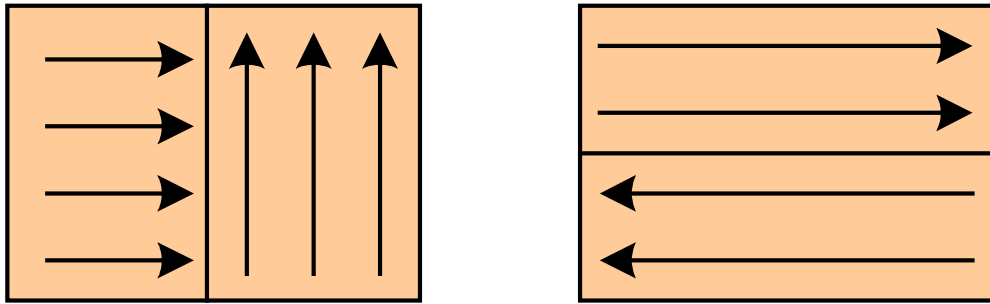


Рис. 9. Домены в диэлектрике.

Таким образом, мы выяснили, что у диэлектриков существуют различные механизмы поляризации, которые обуславливаются природой самого диэлектрика.

Под действием сил электрического поля электрического поля происходят процессы поляризации. Чем интенсивнее поляризуется диэлектрик, тем больше ёмкость созданного из него конденсатора. Если взять плоский конденсатор, то его ёмкость определяется по формуле:

$$C = \frac{\varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot S}{4 \cdot \pi \cdot h}, \quad (9)$$

где S – площадь одного из электродов конденсатора, м^2 ;

h – толщина диэлектрика, м.

Величина ε – называется **диэлектрической проницаемостью среды** (диэлектрика). Эта величина для всех диэлектриков разная, и чем она больше, тем больше ёмкость конденсатора.

Диэлектрическая проницаемость вакуума ε_0 принимается равной единице. Величину диэлектрической проницаемости можно выразить как отношение емкостей конденсаторов с одинаковыми геометрическими размерами, но в конденсаторе ёмкостью C_0 диэлектриком служит вакуум:

$$\varepsilon = \frac{C}{C_0}, \quad (10)$$

Величина диэлектрической проницаемости количественно определяет свойство диэлектрика поляризоваться и поэтому является одной из основных электроизоляционных характеристик материалов.

Самые высокие величины ε имеют специальные керамические диэлектрики, у которых ε может достигать нескольких тысяч. Из этих керамических конденсаторов изготавливают конденсаторы.

Рассмотрим зависимость диэлектрической проницаемости от температуры диэлектрика. На электронную поляризацию температура не оказывает влияния, поэтому в диэлектриках, обладающих только электронной поляризацией, величина ε при изменении температуры диэлектрика остаётся постоянной.

В случае же дипольных диэлектриков величина диэлектрической проницаемости изменяется с изменением температуры. При низких температурах вязкость жидкого дипольного диэлектрика большая и диполи ни могут повернуться по направлению действия сил электрического поля. На кривой (рис. 10.) до температуры t_1 в диэлектрике имеет место только электронная поляризация. Начиная с температуры t_1 и выше, в диэлектрике начинает развиваться процесс дипольной поляризации. В связи с этим наблюдается увеличение ε . При температуре выше t_2 под действием тепловой энергии диполи из ориентированного состояния переходят в хаотическое тепловое движение, в связи с чем, величина диэлектрической проницаемости материала несколько снижается.

У керамических диэлектриков с самопроизвольной поляризацией (сегнетоэлектрики) величина ε с повышением температуры изменяется очень своеобразно в результате того, что кристаллическая структура диэлектрика при его нагревании может перейти в другую. Температура, при которой совершается переход в другую кристаллическую структуру с резким одновременным изменением величины диэлектрической проницаемости, называется температурой Кюри (Θ_K). Такое изменение хорошо иллюстрируется кривой (рис. 11.). Величина ε сегнетоэлектрика при приближении к температуре Кюри резко падает.

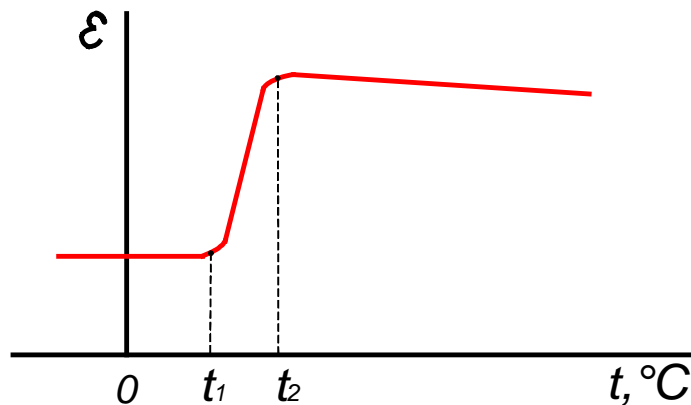


Рис.10. Зависимость диэлектрической проницаемости ε диэлектрика от температуры.

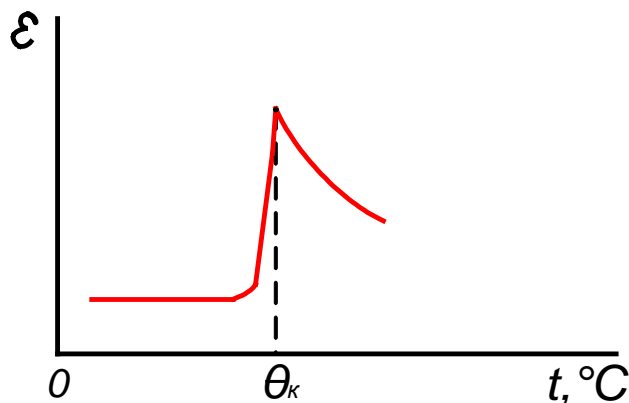


Рис. 11. Зависимость диэлектрической проницаемости ε сегнетоэлектрика от температуры.

1.4.2. Пробой диэлектриков

Диэлектрики применяются в качестве электроизоляционных материалов в электрических установках, машинах и аппаратах, где они подвергаются действию высокого напряжения. Поэтому в данных условиях для диэлектрика появляется опасность быть разрушенным – пробитым. Пробой диэлектрика вызывает соединение друг с другом проводников, находящихся под высоким напряжением, и может привести к повреждению электротехнических устройств.

Величина напряжённости электрического поля ($E_{np.}$), при которой произошёл пробой диэлектрика, называется его **электрической прочностью**:

$$E_{np.} = \frac{U_{np.}}{h}, \quad (11)$$

где $U_{np.}$ – пробивное напряжение (напряжение пробоя);

h – толщина диэлектрика.

Эта величина и служит характеристикой диэлектрика для оценки возможности использования его в условиях высокого напряжения.

Сам процесс пробоя может произойти в результате нагрева диэлектрика проходящим через него электрическим током, когда сопротивление диэлектрика непрерывно уменьшается. Уменьшение сопротивления от нагрева диэлектрика вызывает увеличение тока, что в свою очередь обуславливает ещё большее повышение температуры и т.д., до тех пор, пока электрический ток не достигнет такой величины, при которой диэлектрик термически разрушится. В этом случае пробой в диэлектрике называют **тепловым**. Место пробоя в диэлектрике представляет сквозной канал с повышенной проводимостью.

Пробой диэлектрика может произойти и в результате увеличения количества свободных электронов под действием электрического поля высокой напряжённости. Количество свободных электронов с повышением напряжённости быстро нарастает, и процесс нарастания электронов заканчивается пробоем диэлектрика. Такая форма пробоя получила название **электрического пробоя**, так как в основе лежат чисто электрические процессы.

При электрическом пробое, происходящем в весьма короткие отрезки времени воздействия напряжения, наблюдаются значительно более высокие величины $E_{пр.}$ диэлектрика, чем при тепловом пробое (рис. 12.).

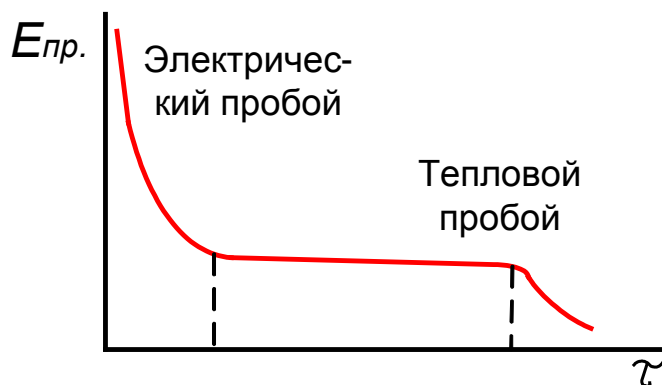


Рис. 12. Зависимость электрической прочности диэлектрика от времени воздействия электрического напряжения при электрическом и тепловом пробое.

Электрическая прочность диэлектрика в случае электрического пробоя не зависит от температуры (рис. 13.), так как малые отрезки времени, порядка микросекунд, не обеспечивают развития теплового пробоя. По этой же причине электрический пробой при длительном воздействии напряжения должен происходить в области низких температур. Тепловой пробой непосредственно зависит от температуры диэлектрика.

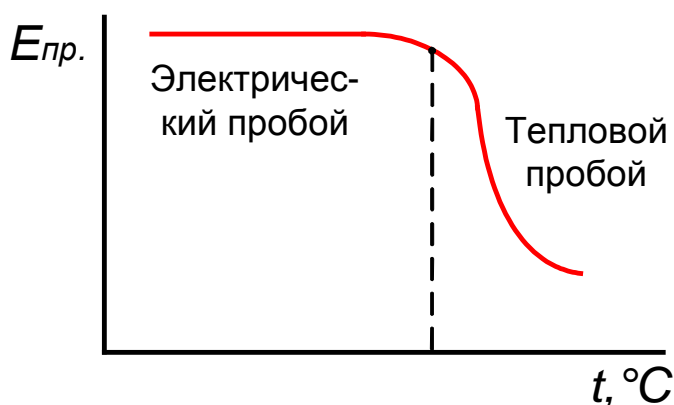


Рис. 12. Зависимость электрической прочности диэлектрика от температуры при электрическом и тепловом пробое.

2. Основные характеристики электротехнических материалов

В предыдущем разделе нами уже были рассмотрены основные характеристики электротехнических материалов, такие как удельное электрическое сопротивление, диэлектрическая проницаемость и электрическая прочность. В этом разделе рассмотрим механические и тепловые характеристики электротехнических материалов.

2.1. Механические характеристики электротехнических материалов

Для оценки свойств электротехнических материалов, кроме электрических характеристик, необходимо также знать механические характеристики.

К основным механическим характеристикам относятся:

- предел прочности материала при растяжении (σ_p);
- предел прочности материала при сжатии (σ_c);
- предел прочности материала при статическом изгибе (σ_u);
- удельная ударная вязкость материала ($\sigma_{y\delta}$).

Методы измерения этих характеристик у металлов общеизвестны. Методы определения для электроизоляционных материалов обладают некоторой специфичностью.

Предел прочности при растяжении определяют на образцах установленной формы (рис. 13), при которой обеспечивается равномерное распределение растягивающего усилия по площади сечения – в средней части образца. Для определения этой характеристики образцы своими утолщёнными концами закрепляются в стальных зажимах (захватах) испытательной машины (рис.14). Один из захватов машины неподвижен (нижний) а к другому прикладывается растягивающее усилие P , которое плавно нарастает с определённой скоростью до момента разрыва образца.

Предел прочности материала при растяжении (σ_p) вычисляется по формуле:

$$\sigma_p = \frac{P_p}{S_0} \quad [\text{кг/м}^2], \quad (12)$$

где P_p – разрушающее усилие при разрыве образца материала, кг;
 S_0 – площадь поперечного сечения образца до испытания, м².

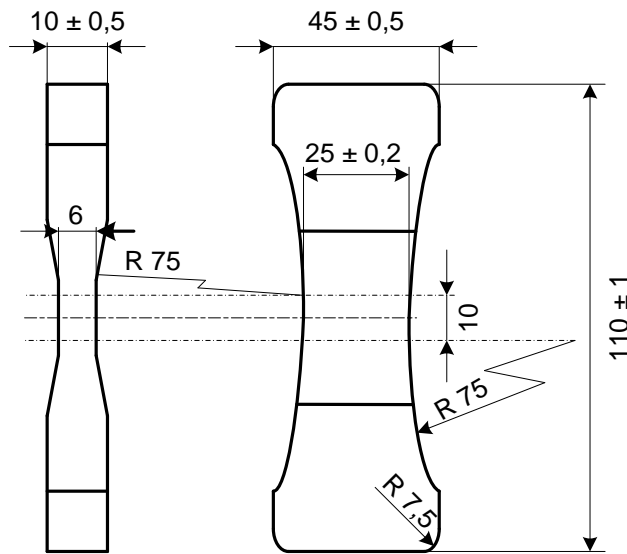


Рис. 13. Образец пластмассы для определения предела прочности при растяжении.

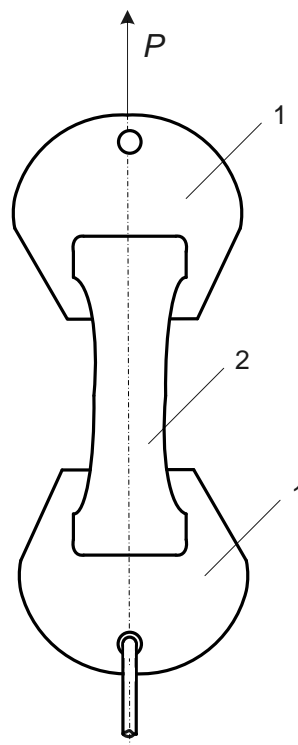


Рис.14. Образец электрокерамического материала, помещённый в зажимы испытательной машины для испытания на разрыв: 1 – стальные зажимы; 2 – образец материала.

Относительное удлинение при растяжении определяется одновременно с определением предела прочности материала при растяжении. Для этого измеряют первоначальную длину образца (l_0) и удлинение его (Δl_0) при разрыве. Тогда величина относительного удлинения при растяжении (e_p) определится по формуле:

$$e_p = \frac{\Delta l_p}{l_0} \cdot 100 \%, \quad (13)$$

l_0 и Δl_0 должны быть измерены в одних и тех же единицах. Эта характеристика (e_p) позволяет оценивать растяжимость, эластичность материалов.

Предел прочности при сжатии определяется на образцах, имеющих преимущественно форму цилиндров. Так, у формованных и прессованных пластмасс эта характеристика определяется на образцах, представляющих собой цилиндры высотой $15 \pm 0,5$ мм и диаметром $10 \pm 0,5$ мм. Верхнее и нижнее основания образца должны быть строго перпендикулярны к оси цилиндра.

Образец 2 располагается между стальными плитами 1 и 3 испытательного пресса (рис. 15). Во избежание неравномерного распределения сжимающей нагрузки по сечению образца одна из плит пресса должна быть самоустанавливающейся.

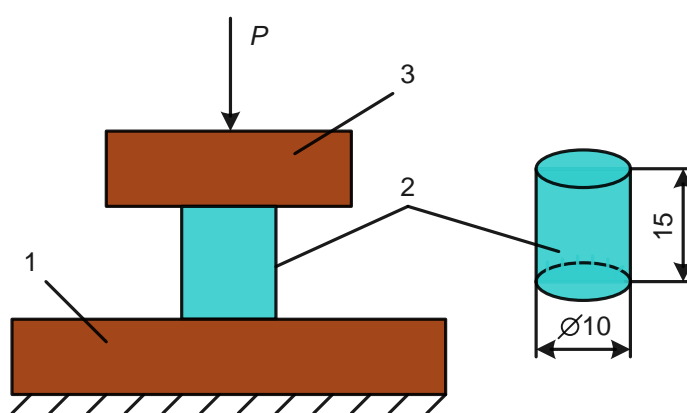


Рис. 15. Образец пластмассы, помещённый между стальными плитами пресса для испытания на сжатие.

Сжимающую нагрузку повышают с определённой скоростью до момента разрушения образца материала.

Предел прочности материала при сжатии (σ_c) вычисляют по формуле:

$$\sigma_c = \frac{P_c}{S_0} \text{ [кг/м}^2\text{]}, \quad (14)$$

где P_c – разрушающее усилие при сжатии образца материала, кг;

S_0 – площадь поперечного сечения образца материала до его испытания, м².

Предел прочности при статическом изгибе определяется на образцах, представляющих собой бруски прямоугольного или круглого сечения. Для определения предела прочности при статическом изгибе образец 2 помещают в испытательную машину (рис.16), где он своими концами свободно опирается на две стальные опоры 3. Изгибающее усилие P_u , прикладываемое к середине образца (бруска) 2, плавно увеличивают с таким расчётом, чтобы напряжения в сечении бруска возрастали со скоростью $1 \cdot 10^6 - 1,5 \cdot 10^6$ кг/м² в минуту. Изгибающее усилие, передаваемое через стальной наконечник 1, доводят до величины, при которой происходит разрушение образца или при которой дальнейшее возрастание изгибающего усилия не имеет места (материал течёт).

Предел прочности материала при статическом изгибе (σ_u) вычисляется по формуле:

$$\sigma_u = 1,5 \frac{P_u L}{bh^2}, \text{ [кг/м}^2\text{]}, \quad (15)$$

где P_u – изгибающее усилие, кг;

L – расстояние между стальными опорами в испытательной машине, м;

b – ширина образца, м;

h – толщина образца, м.

Для большинства материалов (пластмассы) применяют бруски сечением $10 \times 15 \text{ мм}^2$, длиной 120 мм. Образцы электрокерамических материалов оформляют в виде цилиндров диаметром 20 мм, длиной 120 мм.

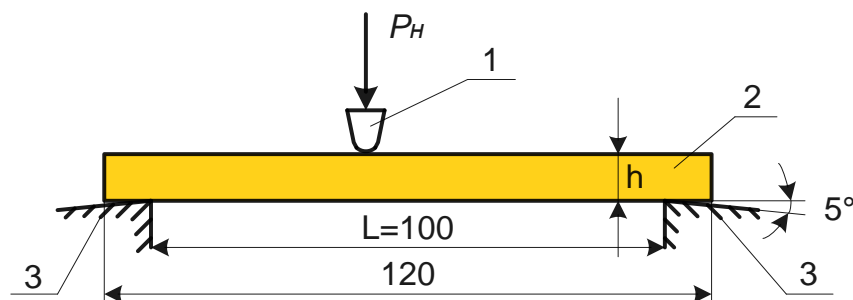


Рис.16. Образец пластмассы, помещённый в испытательную машину для испытания на статический изгиб.

Удельная ударная вязкость (предел прочности материала при динамическом изгибе) позволяет оценить сопротивляемость материала к удару. Чем меньше величина удельной ударной вязкости, тем более хрупок данный материал.

Удельная ударная вязкость определяется с помощью испытательного прибора (копра), где образец материала 2 (брусок) свободно опирается своими концами на две стальные опоры 5 копра (рис. 17). Расстояние между опорами равно 70 мм. Копёр снабжён тяжёлым стальным маятником 1 с бойком (ребром) 4. Последний имеет форму клина с углом 15° при вершине, закруглённым по радиусу 3 мм. Маятник может вращаться вокруг стальной оси 3. Его центр тяжести совпадает с серединой бойка. Стальной маятник весом G , поднятый на высоту h_1 , освобождают, и он при падении ударом бойка (ребра) 4 разрушает образец материала при ударном изгибе. Затратив при этом часть своей энергии, маятник взлетает на высоту h_2 .

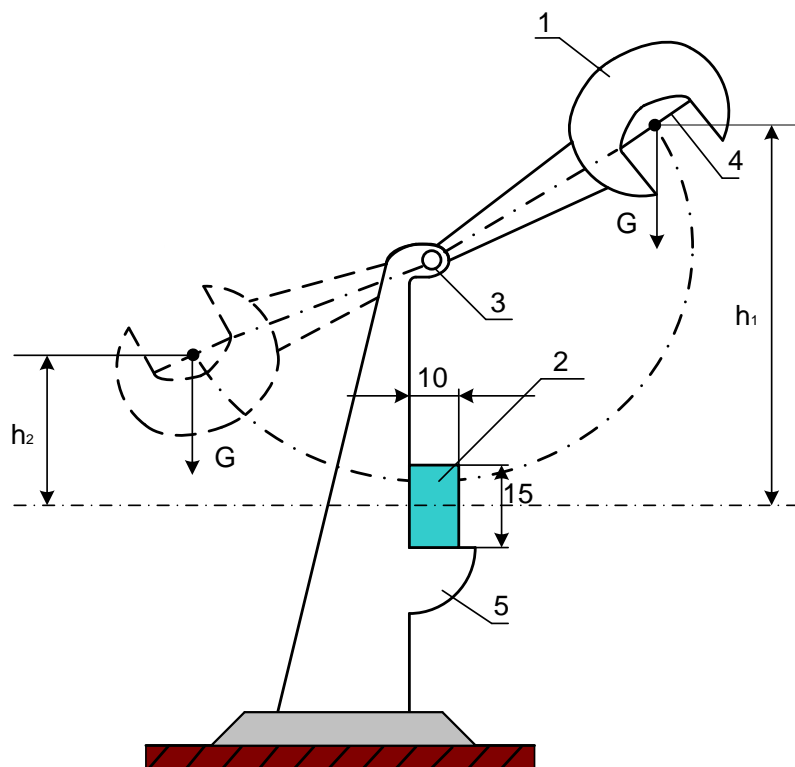


Рис. 17. Маятниковый копёр с образцом пластмассы для испытания материала на ударный изгиб (вид сбоку).

При этом энергия, затраченная на разрушение образца материала, равна произведению силы G на разность высот:

$$G (h_1 - h_2) \text{ [кг} \cdot \text{м]}.$$

Удельную ударную вязкость ($\sigma_{y\delta}$) вычисляют как отношение работы, затраченной при разрушении образца, к площади поперечного сечения образца (S_0):

$$\sigma_{y\delta} = \frac{G(h_1 - h_2)}{S_0} \text{ [кг} \cdot \text{м/м}^2\text{]} \quad [16].$$

Для определения удельной ударной вязкости пластмасс применяют образцы в виде брусков сечением $10 \times 15 \text{ мм}^2$, длиной 120 мм. Они располагаются на полках копра своей узкой стороной. Для испытания керамических материалов применяют образцы цилиндрической формы диаметром 10 мм, длиной 100 мм. Поверхность испытуемых образцов должна быть гладкой, на ней не должны оставаться какие – либо следы обработки. Испытания должны производиться при температуре $20 \pm 5^\circ\text{C}$.

2.2. Тепловые характеристики электроизоляционных материалов

Основными тепловыми характеристиками электроизоляционных материалов являются:

1. **Температура вспышки паров** жидких диэлектриков (масла). Испытание заключается в измерении температуры вспышки паров испытуемой жидкости (в смеси с воздухом) с помощью прибора с огневым нагревом.
2. **Температура размягчения** определяется у материалов аморфного строения (смолы, битумы). У материалов кристаллического строения (например, металлы) переход из твёрдого в жидкое состояние происходит при чётко выраженной температуре плавления. У аморфных же материалов переход из твёрдого состояния в жидкое происходит постепенно – в широком интервале температур. Ввиду большого применения аморфных диэлектриков необходимо каким - либо образом определять их температуру размягчения – переход из твёрдого состояния в размягчённое – (полужидкое).
3. **Теплостойкость** материалов. Испытание на теплостойкость заключается в одновременном воздействии на образцы нагрева и изгибающего усилия, которые начинают деформировать образец. Данное испытание производят в аппарате Мартенса.
Значения теплостойкости для некоторых материалов (по Мартенсу):

| | |
|------------|--------------|
| фибра | 55 - 65°C |
| полистирол | 80 - 85 °C |
| гетинакс | 150 - 180°C. |

4. **Нагревостойкость** – это способность электроизоляционного материала длительно выдерживать предельно допустимую температуру.
5. **Морозостойкость** позволяет оценить способность материала противостоять действию низких температур. Известно, что при низких температурах электроизоляционные материалы (резины, лаковые плёнки и др.) растрескиваются, теряют гибкость. У многих электроизоляционных материалов морозостойкость определяют по степени снижения их эластичности и механической прочности. Так у плёночных материалов морозостойкость определяется по появлению трещин при изгибании образцов (полосок) вокруг стального стержня диаметром 3 мм после выдержки их при низких температурах (-50) – (-80) °C

3. Проводниковые материалы и изделия

3.1. Проводниковые материалы с малым удельным сопротивлением

Группу проводниковых материалов составляют чистые металлы и их сплавы. Эти материалы обладают электронной проводимостью.

Чтобы получить проводниковые материалы с малым удельным сопротивлением, их подвергают тщательной очистке от примесей посредством разложения металла в электролитической ванне при помощи постоянного тока.

На электропроводность металлических проводников оказывает также влияние механическая обработка металла (прокатка, волочение), вызывающие остаточную деформацию кристаллов, что затрудняет перемещение электронов в металле. Чтобы вернуть деформированным кристаллам металла прежнюю форму, металл нагревают (отжигают) при оптимальной температуре, при которой происходит перекристаллизация. В результате отжига электропроводность металла повышается, а механическая прочность уменьшается. К холодной прокатке или волочению проводников прибегают

в тех случаях, когда необходимо повысить прочность на разрыв и твёрдость металлических проводниковых изделий – проводов для воздушных линий, троллейных проводов, шин и др.

3.2. Благородные металлы, медь, алюминий, железо и их сплавы

3.2.1. Благородные металлы, применяемые в электротехнике

Платина относится к группе благородных металлов, не окисляющихся при комнатной температуре. Окисление платины Pt наблюдается от температуры 540°C и выше. Введение в платину небольших количеств иридия Ir (3 – 6%) или родия Rh (5 – 12%) резко повышает стойкость её к окислению при температурах до 900°C и выше. Платина также обладает высокой стойкостью по отношению к различным химическим реагентам (концентрированным кислотам и щелочам). Основные свойства платины: плотность 21,44 г/см³; температура плавления 1773°C; удельное сопротивление 10,5·10⁻⁸ Ом·м.

Приведённые характеристики относятся к мягким (отожжённым) проводниковым изделиям из платины. Твёрдые сорта изделий из платины обладают удельным сопротивлением 10,8·10⁻⁸ Ом·м.

Благодаря высокой пластичности проводниковой платины из неё изготавливают фольгу толщиной до 5 мкм (микрон) и проволоку диаметром до 3мкм, применяемую в качестве подвесов и струн в электрометрах. Платиновая проволока применяется также для изготовления электронагревательных элементов, надёжно работающих при температуре до 1200 °С в лабораторных печах.

Для измерения высоких температур (1500 °С) применяют термопары из платиновой и платинородиевой проволок.

Из чистой платины, и особенно из её сплавов с иридием, родием, осмием и другими металлами, изготавливают контакты для выключающих автоматов мощности (реле и т.п.).

Серебро, как и платина, относится к группе благородных металлов, но окисление серебра наблюдается уже при температурах от 200°C и выше. Серебро обладает высокой пластичностью, позволяющей получать из него тонкую фольгу и проволоку диаметром до 5 мкм. Основные свойства мягкого (отожжённого) серебра следующие: плотность 10,5 г/см³; температура плавления 961°C; удельное сопротивление 1,56·10⁻⁸ Ом·м.

У твёрдых сортов изделий из серебра удельное сопротивление равно 1,6·10⁻⁸ Ом·м.

Проводниковое серебро применяется как материал для электрических контактов в электрических выключающих аппаратах малых мощностей. Из проводникового серебра изготавливают провода, работающие при повышенных температурах. Методом электролиза серебро наносится на медные провода (в цепях высокой частоты) с целью создания малого электрического сопротивления току высокой частоты, проходящему по поверхности провода.

3.2.2. Проводниковая медь и её свойства. Проводниковые сплавы на основе меди

Медь является главным проводниковым материалом вследствие своей высокой электропроводности, пластичности и стойкости к атмосферной коррозии. По электропроводности медь стоит на первом месте после серебра.

Из меди может быть получена (волочением) проволока диаметром 0,02 – 0,015мм и лента толщиной до 0,1мм. В нормальной атмосфере медь устойчива к коррозии. Медные провода в воздухе медленно окисляются, покрываясь тонким слоем оксида меди (CuO). Образовавшаяся оксидная плёнка препятствует дальнейшему окислению меди. Коррозию меди вызывают: сернистый газ (SO₂), пары азотной кислоты (HNO₃), сероводород (H₂S), аммиак (NH₃), оксид азота (NO) и некоторые другие реагенты.

Медь имеет характерный красновато-оранжевый цвет и обладает температурой плавления, равной 1083°C. У изделий из мягкой отожженной меди (марка ММ) плотность 8,90 г/см³; удельное сопротивление 1,75·10⁻⁸ Ом·м. У изделий из твёрдой неотожженной меди (марка МТ) плотность 8,96 г/см³; 1,78·10⁻⁸ – 1,82·10⁻⁸ Ом·м. Следует заметить, что провода меньшего диаметра обладают большей прочностью на разрыв и меньшим относительным удлинением.

Проволока и шины из мягкой меди используются преимущественно для изготовления изолированных обмоточных и монтажных проводов.

Проводниковые изделия (проволока) из твёрдой меди (МТ) применяется, как правило, неизолрованными – в качестве проводов воздушных линий электропередачи и шин для электрических аппаратов, а также для коллекторов электрических машин. В этих случаях от проводниковых изделий требуется повышенная механическая прочность, твёрдость, сопротивление истиранию.

Для изготовления всех проводниковых изделий применяются две марки меди М0 и М1, отличающиеся только содержанием кислорода. В меди обеих марок содержание других примесей допускается в равных количествах: висмут, сурьма, мышьяк, никель, олово – не более 0,002% каждого; железо, свинец, сера, цинк – не более 0,005% каждого.

Таким образом, медь марки М0 содержит не менее 99,95% чистого металла. Из этой меди изготавливают тонкую медную ленту и провода малого диаметра. Медь марки М1 содержит не менее 99,90% чистого металла и является основой для изготовления большинства проводниковых материалов.

Из **сплавов на основе меди** наибольшее применение в электротехнике получили бронзы и латуни.

Бронзами называют сплавы на основе меди с оловом, кремнием, алюминием, кадмием, бериллием и другими металлами, специально вводимые с целью получения определённых свойств сплава. Наиболее сложные по форме детали отливают из бронзы. Другие характерные свойства бронз – это повышенная твёрдость (по сравнению с медью), большое сопротивление истиранию, упругость и антикоррозионная стойкость.

Бронзы применяются для изготовления проводов связи, антенных проводов, щёткодержателей в электрических машинах, пружин и различных контактов в электрических приборах и аппаратах. В электротехнике стараются применять бронзы, обладающие проводимостью, приближающейся к проводимости проводниковой меди. Такими бронзами является кадмиевая и кадмиево – оловянистая.

Марки бронз обозначаются буквами Бр (бронза), за которыми следуют другие буквы и цифры, показывающие, какие легирующие элементы и в каком количестве содержатся в данной бронзе. Например БрОЦС6-6-3, содержит легирующие добавки: олово 5-7%, цинк 5-7%, свинец 2-4%.

Кроме бронз, в электротехнике нашли широкое применение сплавы меди с цинком, известные под названием **латуни**. Наибольшее содержание цинка может достигать до 45%, но латуни, обладающие максимальной пластичностью, содержат 30% цинка. Благодаря высокой пластичности латуней из них изготавливают изделия, получаемые горячей или холодной прокаткой и волочением: листы, ленты, прутки, проволоку и др.

Деформированная латунь (штампованная) подвержена коррозии во влажной атмосфере в значительно большей степени, чем медь. Для повышения коррозионной стойкости латуней в них вводят легирующие элементы: алюминий, никель, марганец и др. Такие латуни называют **специальными**. Марки латуней обозначаются буквой Л (латунь), за которой следуют буквы и цифры, указывающие содержание меди и других компонентов. Например Л62, содержит медь 60–63,5%, цинк 36,5 - 40%. Из латуней изготавливают различного рода зажимы и контакты для электрических аппаратов, а также электроды и крепёжные детали.

3.2.3. Проводниковый алюминий и его свойства

Алюминий относится к группе лёгких металлов. Плотность литого алюминия равна 2,6 г/см³, т. е. алюминий в 3,3 раза легче меди. Благодаря своей доступности, сравнительно высокой электропроводности, стойкости к атмосферной коррозии и хорошей обрабатываемости алюминий широко применяется в электротехнике. Недостатком алюминия является сравнительно низкая прочность при разрыве и повышенная мягкость, что несколько ограничивает его применение. Алюминий имеет серебристо-белый цвет и температуру плавления 657 °С.

Алюминий на воздухе очень быстро покрывается тонкой плёнкой оксида (Al₂O₃)? Которая надёжно защищает металл от дальнейшей коррозии. Эта оксидная плёнка обладает значительным электрическим сопротивлением, поэтому в местах соединения алюминиевых проводов могут образоваться большие переходные сопротивления. Зачистку мест соединений алюминиевых проводов обычно производят под слоем вазелина во избежание их окисления на воздухе.

Из реагентов, непосредственно действующих на алюминий, следует отметить хлор, пары азотной, серной, уксусной и некоторых других кислот и щелочей. Чем выше химическая чистота

алюминия, тем лучше сопротивляется коррозии. Поэтому для защитных оболочек кабелей взамен свинца применяют особо чистые сорта алюминия, получаемые трёхкратной электролитической очисткой. В этих сортах алюминия содержание примесей не превышает 0,01-0,03%.

Для изготовления алюминиевой фольги и электродов электролитических конденсаторов применяют проводниковый алюминий марки А00 с содержанием металла не менее 99,7%. Для изготовления большинства проводниковых изделий применяют алюминий марок А0 и А1 с содержанием чистого металла 99,6% и 99,5%.

Из проводникового алюминия изготавливают волочением и прокаткой проводниковые изделия – проволоку и шины. Алюминиевая проволока выпускается двух марок: АМ (отожжённая, мягкая) и АТ (неотожжённая, твёрдая). Алюминиевая голая проволока выпускается диаметром от 0,8 до 5мм. Из алюминия изготавливаются специальные сорта проволоки диаметром до 0,05мм. Алюминиевые шины изготавливают сечением от $3 \times 10 \text{ мм}^2$ до $20 \times 60 \text{ мм}^2$.

Проводниковые изделия (проволока, шины) из отожжённого алюминия выпускается преимущественно изолированными – в виде обмоточных и монтажных проводов. Провода из твёрдого, неотожжённого алюминия применяются, как правило, неизолированными – для кабелей воздушных линий электропередачи и шин для электрических аппаратов и распределительных устройств.

3.2.4. Проводниковые железо и сталь

Железо и сталь – наиболее дешёвые и доступные проводниковые материалы, обладающие высокой механической прочностью при разрыве, но их применение ограничивается следующими недостатками. Железо и сталь имеют низкую коррозионную стойкость, легко окисляются на воздухе - “ржавеют”, и обладают повышенным удельным сопротивлением по сравнению с медью и алюминием. Для изготовления стальной проволоки применяют сталь с содержанием углерода от 0,1 до 0,15%, имеющей следующие свойства: плотность $7,8 \text{ г/см}^3$; температура плавления $1392 - 1400^\circ\text{C}$. Для защиты от атмосферной коррозии стальные провода покрывают тонким слоем цинка.

Стальная проволока находит применение в воздушных линиях связи и электропередачи небольших мощностей. Стальные провода используются также в качестве сердечников в сталеалюминиевых проводах (рис. 18) для повышения их механической прочности на разрыв.

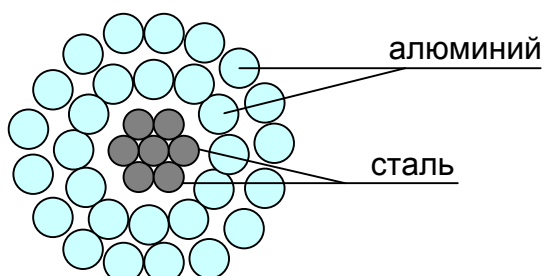


Рис. 18. Поперечное сечение сталеалюминиевого провода.

Стальная проволока и шины применяются, кроме того, в качестве сердечников в биметаллических проводниках (рис.19), дающих значительную экономию проводниковой меди. Биметаллические шины применяются в электрических аппаратах (рубильники, контакторы и др.).

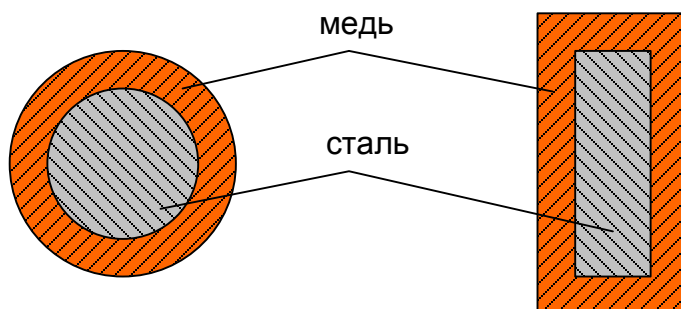


Рис. 19. Поперечное сечение биметаллического провода.

Для изготовления проводов, работающих под постоянным напряжением, стараются применять технические сорта железа с наименьшим содержанием примесей, так как последние повышают удельное сопротивление железа. Наилучшим материалом для изготовления проводников постоянного тока является мартеновское железо армко, перерабатываемое в проволоку и шины. В железе армко содержится углерода – не более 0,03%, сумма всех примесей (углерод, сера, фосфор и др.) – не более 0,16%.

3.3. Проводниковые материалы с большим удельным сопротивлением

В ряде случаев применение проводниковых материалов в электро- и радиотехнических устройствах от них требуются особые свойства, отличающиеся от свойств обычных проводниковых материалов – меди, алюминия и других чистых металлов. Такие материалы представляют собой сплавы различных металлов: меди, никеля, железа, хрома и др. Эти сплавы применяются для изготовления: точных (прецизионных) сопротивлений, пусковых и регулирующих реостатов, нагревательных приборов и электрических печей сопротивления.

Общим свойством этих сплавов является высокое удельное сопротивление (от $42 \cdot 10^{-8}$ до $150 \cdot 10^{-8}$ Ом·м), поэтому они называются сплавами высокого электрического сопротивления.

В каждом из указанных выше случаев применения эти сплавы должны иметь дополнительные характерные свойства, определяемые назначением изделия, в котором они используются. Так сплавы первой группы, из которых изготавливаются точные сопротивления, должны иметь весьма малый температурный коэффициент удельного сопротивления (α), малую термоэлектродвижущую силу (ТЭДС) при контакте с медью и постоянство величины сопротивления во времени. От материалов второй группы требуются: малый температурный коэффициент сопротивления, способность переносить механические сотрясения и сильный нагрев. Кроме того, эти материалы должны быть недефицитными и дешёвыми. Жаростойкие сплавы, применяемые для электрических печей и нагревательных устройств, должны обладать высокой жаростойкостью, т. е. устойчивостью против окисления при высокой температуре (800-1200°C), малым температурным коэффициентом сопротивления и хорошими механическими свойствами при высокой температуре. Все проводниковые сплавы должны обладать хорошей пластичностью, чтобы из них можно было легко изготовить ленты и проволоку.

3.3.1. Сплавы типа манганина и константана

Материалы для точных сопротивлений изготавливаются из медноникелемарганцевых сплавов с высоким содержанием меди. Такие сплавы получили название «манганины». Наиболее распространён манганин состава: 86% Cu, 12% Mn и 2% Ni.

Весьма важным свойством таких сплавов является небольшая ТЭДС $(2-8) \cdot 10^{-5}$ мкВ/°С при контакте с медью, что обуславливает почти полное отсутствие термоэлектрических токов в цепях с манганиновыми сопротивлениями. Промышленностью выпускается манганиновая проволока голая и с эмалевой изоляцией диаметром 0,03-1,00мм и проволока диаметром 0,05-1,00мм, изолированная эмалью и шёлковой изоляцией. Максимально допустимая температура для манганина 200-300°C, но уже начиная с 60°C, наблюдается небольшое изменение его свойств. Поэтому точные сопротивления из манганина не рекомендуется нагревать выше 60°C.

На основе сплава меди и марганца, но без содержания никеля разработаны материалы типа манганина, содержащие алюминий (сплав изабеллин) и алюминия с железом (сплав новоконстант). Они отличаются более низкими температурными коэффициентами сопротивления по сравнению с манганином и очень малой термоэлектродвижущей силой. Недостатком же таких сплавов является непостоянство их свойств во времени вследствие некоторой неоднородности этих сплавов. Поэтому они применяются лишь в пусковых и регулирующих реостатах, а не в точных сопротивлениях.

Для различного рода точных реостатов применяются медноникелевые сплавы. Одним из основных свойств таких сплавов является весьма низкий температурный коэффициент сопротивления и высокая термоэлектродвижущая сила в контакте сплавов с медью. В практике получили распространение два таких сплава – константан и никелин. Высокая термоэлектродвижущая сила этих сплавов даёт возможность применять их для изготовления термопар. С помощью медноконстантановых термопар можно измерять температуры до 400°C. Константан при нагреве на воздухе, особенно при высокой температуре (400°C и выше), окисляется и на его поверхности

образуется в качестве межвитковой изоляции, например в реостатах при небольших напряжениях между витками. Константан и никелин поддаются прокатке и волочению в проволоку диаметром от 0,02 до 5,0мм, применяемую для изготовления регулировочных и нагрузочных сопротивлений и реостатов, способных работать при температурах не выше 400°С.

3.3.2. Жаростойкие проводниковые сплавы

Электрические нагревательные устройства и печи имеют весьма высокую рабочую температуру – до 900-1200°С. В качестве материалов для электрического нагрева в этом случае описанные выше сплавы, а также чистые металлы непригодны. Чистые металлы и большинство сплавов при высокой температуре интенсивно окисляются, так как образующиеся на них оксидные плёнки испаряются и не защищают металл от окисления. Кроме того, металлы обладают весьма большим положительным температурным коэффициентом сопротивления порядка $(4-7) \cdot 10^{-3} \text{ 1/}^\circ\text{C}$, в результате чего величина электрического сопротивления нагревательных элементов при высоких температурах может вырасти в несколько раз. Поэтому в устройствах с высокой рабочей температурой применяются специальные жаростойкие сплавы высокого сопротивления. Наиболее широко используются для этих целей сплавы двух типов: двойные сплавы никеля и хрома, получившие название **нихромов**, и тройные сплавы железа, хрома и алюминия, которые называются **фехраль** и **хромаль**.

Из нихрома изготавливают проволоку диаметром 0,01мм и выше. При нагревании нихромовых лент и проволоки на их поверхности образуется защитная плёнка из оксидов хрома и никеля, которые устойчивы при высоких температурах. Положительным свойством нихромов является их достаточная для эксплуатации механическая прочность при высокой температуре. Нихромы обладают более высокими температурными коэффициентами сопротивления, чем манганин и константан, но значительно меньшими по сравнению с чистыми металлами. Нихромовые проволока и ленты могут быть использованы до температур 900- 1100°С.

Основное применение фехралевых и хромалевых проволоки и лент – в электронагревательных приборах. В настоящее время проволока из фехраля и хромалья покрывается изоляционной эмалью и выпускается также для сопротивлений. Максимально допустимая рабочая температура для сопротивлений, изготовленных из фехралевой проволоки, составляет 800-850°С. Проволока и ленты из хромалья допускают нагрев до 1100-1200°С.

3.3. Применение проводниковых материалов

К проводниковым (кабельным) изделиям относятся обмоточные и монтажные провода, а также установочные провода и кабели.

Обмоточные провода – медные и алюминиевые – выпускаются с эмалевой, волокнистой и плёночной изоляцией. Эти проводниковые изделия широко применяются для изготовления обмоток в электрических машинах, аппаратах и приборах.

Изоляция проводов из органических эмалей имеет меньшую толщину по сравнению с волокнистой изоляцией обмоточных проводов. Это обеспечивает лучшее заполнение обмотки проводниковым металлом, однако тонкие эмалевые покрытия в большей степени подвержены механическим повреждениям. Кроме того в эмалевом покрытии всегда имеется небольшое количество сквозных отверстий, обусловленных несовершенством технологии эмалирования проволоки. Поэтому обмотки, выполненные эмалированными проводами, пропитываются электроизоляционными лаками.

Монтажные провода применяются для соединения различных элементов и приборов в электрической и радиотехнической аппаратуре. Жилы монтажных проводов изготавливаются из меди и алюминия. Изоляция монтажных проводов выполняется из изоляционной резины или полихлорвинилового пластиката, а также из хлопчатобумажной, шёлковой и капроновых волокон – в виде обмоток и оплётки. Для лучшего распознавания проводов в монтируемых устройствах их изоляционные оболочки окрашивают в различные цвета.

Установочные провода и шнуры применяются в электрических силовых и осветительных установках. Провода и шнуры изготавливаются из медных и или алюминиевых жил с изоляцией из резины или полихлорвинилового пластиката. Защитными покровами проводов и шнуров служат оплётки из волокнистых материалов (хлопчатобумажная или шёлковая пряжа), пропитанная или не

пропитанная противогнилостными составами. В некоторых конструкциях проводов применяется оплётка из стальных оцинкованных проволок. Провода и шнуры с полихлорвиниловой изоляцией выпускается без защитных оболочек. Шнуры выпускаются двухжильными, а провода – одно-, двух-, трёх-, четырёх- и многожильными.

Силовые кабели с резиновой изоляцией применяются для передачи и распределения электрической энергии в электроустановках напряжением до 0,5; 3; 6кВ переменного тока. Кабели с резиновой изоляцией выпускаются одно-, двух-, трёхжильными с сечением жил от 1 до 500мм². Жилы состоят из проволок, изготовленных из отожжённой меди (ММ). Каждая жила изолирована электроизоляционной резиной и прорезиненной тканью (фазная изоляция).

В многожильных кабелях изолированные жилы скручены друг с другом и заключены в общую защитную оболочку, которая изготавливается из свинца, полихлорвинилового пластиката или из специальной светостойкой резины. С целью повышения электрической прочности кабелей на напряжения 3 и 6кВ на скрученные изолированные жилы накладывают ещё общую поясную изоляцию из резины (рис. 20).

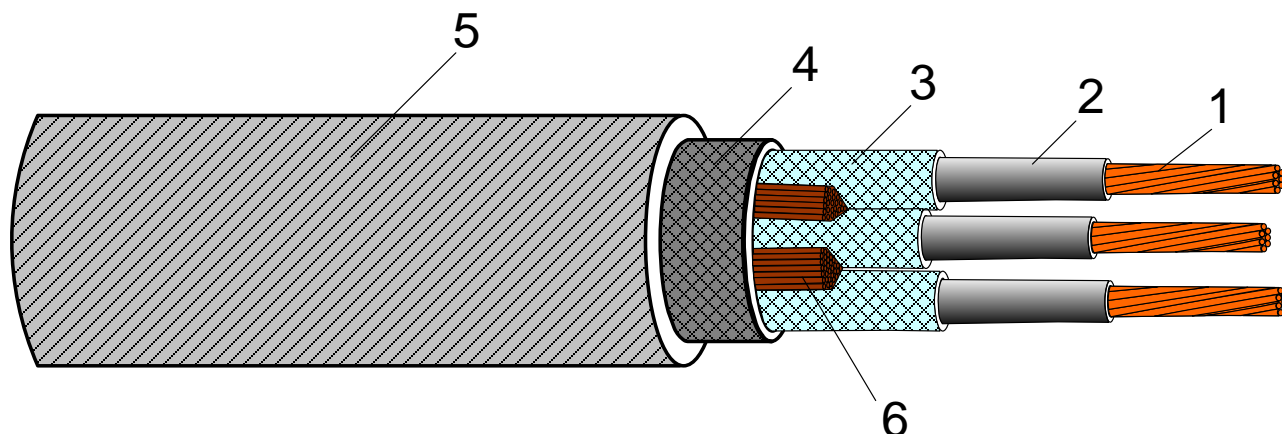


Рис.20. Силовой кабель с резиновой изоляцией в свинцовой оболочке (небронированный – марка СРГ):

1 – медная многопроволочная жила, 2 – изоляция из вулканизированной резины, 3 – покрытие (обмотка) из прорезиненной ленты, 4 – поясная изоляция, 5 – свинцовая оболочка, 6 – междуфазное заполнение.

Большинство кабелей с резиновой изоляцией имеет броневой покров из стальных лент или плоских стальных проволок.

Силовые кабели с бумажной пропитанной изоляцией выпускают на напряжение 1,3,6,10,20 и 35кВ. Жилы изготовляют из отожжённой медной (ММ) или алюминиевой (АМ и АТ) проволоки. Жилы могут иметь круглую, секторную или сегментную форму (рис. 21).

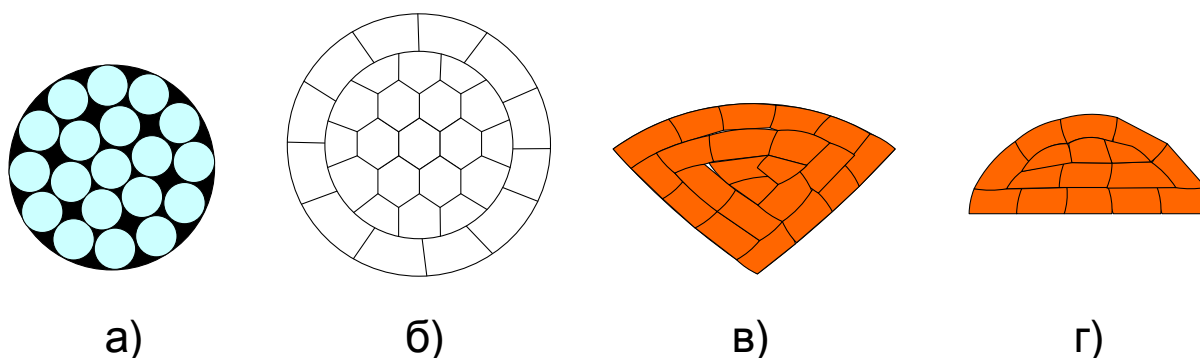


Рис. 21. Сечения многопроволочных кабельных жил:

а) – круглая неуплотнённая жила, б) – круглая уплотнённая жила, в) – секторная уплотнённая жила трёхжильного кабеля, г) – сегментная уплотнённая жила двухжильного кабеля.

В одножильных кабелях применяются жилы круглой формы, в двухжильных, как правило, - сегментные жилы, а в трёх- и четырёхжильных кабелях применяются секторные жилы. Сегментная и секторная формы жил обеспечивают наиболее плотную упаковку их в кабеле. С этой же целью круглые жилы делают уплотнёнными (рис. 21).

Каждая из жил имеет изоляцию, состоящую из нескольких слоёв кабельной бумаги, пропитанной вязким составом (брайтстоком), состоящим из минерального масла и растворённой в нём канифоли. В кабелях на напряжение до 1кВ в качестве изоляции жил применяют кабельную бумагу, пропитанную битумом.

В электроустановках ЭХЗ могут применяться все марки кабелей, регламентированные нормативно – технической документацией.

3.4. Маркировка силовых кабелей

Маркировка силовых кабелей обычно включает буквы, указывающие на материал, из которого изготовлены жила, изоляция, оболочка и тип защитного покрова. Медные токопроводящие жилы в маркировке кабелей не отмечаются специальной буквой, а алюминиевая жила обозначается буквой **А**, стоящей в начале маркировки.

Следующая буква марки кабеля указывает на материал изоляции, причём бумажная пропитанная изоляция не имеет буквенного обозначения, полиэтиленовая обозначается буквой **П**, поливинилхлоридная – буквой **В**, **Р** – резиновая оболочка.

Далее следует буква, соответствующая типу защитной оболочки: **А** – алюминиевая, **С** – свинцовая, **П** – полиэтиленовый шланг, **В** – оболочка из поливинилхлорида, **Р** – резиновая оболочка.

Последние буквы указывают на тип защитного покрова. Буква **Г** указывает на отсутствие в конструкции кабеля брони и защитного наружного слоя. Буква **Б** указывает, что кабель имеет броню. Индекс **н** после индекса брони или ленты означает, что наружный покров - негорючий состав из стеклянной пряжи, **Шп** – (наружный покров) полиэтиленовый шланг, **Шв** – (наружный покров) поливинилхлоридный шланг, **Шпс** – (наружный покров) шланг из самозатухающего полиэтилена.

Например: **АВВГ** – кабель с алюминиевыми жилами, с поливинилхлоридной изоляцией жил, в поливинилхлоридной оболочке, без защитного покрова.

ВВГ – медный кабель с изоляцией из поливинилхлорида, оболочкой из поливинилхлорида, без защитного покрова.

ПВГ – медный кабель с изоляцией из термопластичного полиэтилена, оболочкой из поливинилхлорида, без защитного покрова.

ААШв – кабель с алюминиевыми жилами в алюминиевой оболочке и защитным покровом в виде шланга из поливинилхлорида.

Маркировка кабелей отличается многообразием букв, которые отвечают различным конструкциям кабелей. Более подробно познакомиться с маркировкой силовых кабелей можно в справочной литературе. Нашей задачей в данном разделе являлось рассмотрение основных принципов, положенных в основу маркировки силовых кабелей.

4. Диэлектрики

4.1. Газообразные диэлектрики

4.1.1. Значение газообразных диэлектриков

К газовым диэлектрикам относятся все газы, в том числе воздух, представляющий собой смесь газов. Многие газы используются в качестве диэлектриков в газонаполненных кабелях, конденсаторах, воздушных выключателях высокого напряжения и в других электрических устройствах. Воздух окружает все электрические установки и во многом определяет надёжность их работы. Провода линии электропередачи высокого напряжения, закреплённые на мачтах с помощью фарфоровых изоляторов, на всём протяжении изолированы друг от друга только слоем воздуха.

Иногда воздух оказывается внутри твёрдой изоляции, где находится он в очень невыгодных условиях, так как на газовые включения внутри твёрдой изоляции действуют повышенные силы электрического поля. Известно, что у всех газообразных диэлектриков диэлектрическая проницаемость немного больше единицы, а у твёрдых диэлектриков она в пределах от 2 до 10. Таким образом, газовые включения (например воздух) в твёрдой изоляции будут находиться под воздействием напряжённостей электрического поля, в 2-10 раз превосходящих напряжённости в твёрдой изоляции. Это вызовет ионизацию газов, т. е. образование в нём большого количества электрически заряженных частиц – электронов и ионов, что превращает газ из диэлектрика в проводник и ослабляет изоляцию всей системы.

Ионизация газов часто влечёт за собой пробой всей твёрдой изоляции, что может вызвать выход из строя электрической машины, кабеля, аппарата и т. д. Вместе с тем газообразные диэлектрики имеют незначительные диэлектрические потери, в силу чего широко применяются в эталонных и других конденсаторах с малыми потерями энергии на переменном напряжении. Поэтому изучение электрических явлений в газообразных диэлектриках, особенно в воздухе, представляет большой практический интерес.

4.1.2. Электропроводность газов

Во всех газах ещё до воздействия на них электрического напряжения всегда имеется некоторое количество электрически заряженных частиц – электронов и ионов, которые находятся в беспорядочном тепловом движении. Это могут быть заряженные частицы газа, или заряженные частицы твёрдых и жидких веществ – примесей, находящихся в газе, например в воздухе.

Образование электрически заряженных частиц в газообразных диэлектриках вызывается:

- ионизацией газа внешними источниками энергии (например, радиоактивным излучением);
- в результате выхода электронов с поверхности металлических электродов при их нагревании или воздействии лучистой энергии;

Находясь в беспорядочном тепловом движении, некоторая часть противоположно заряженных частиц (электронов и положительно заряженных ионов), воссоединяются друг с другом и образует электрически нейтральные атомы и молекулы газа. Этот процесс называется восстановлением или рекомбинацией.

Если между металлическими электродами заключить какой-то объём газа, то при приложении к электродам электрического напряжения на заряженные частицы в газе будут действовать электрические силы – напряжённости электрического поля. Под действием этих сил электроны и ионы будут перемещаться от одного электрода к другому, создавая электрический ток в газе. Ток в газообразном диэлектрике будет тем больше, чем больше заряженных частиц образуется в нём в единицу времени и чем большую скорость они приобретают под действием сил электрического поля.

Изменение величины тока в зависимости от напряжения, описывается в виде вольтамперной характеристики (рис. 22).

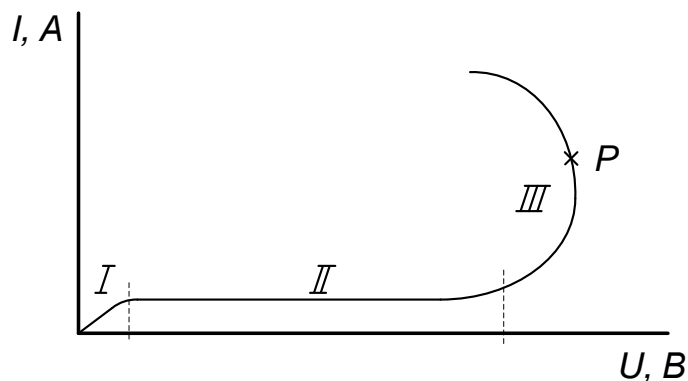


Рис. 22. Вольтамперная характеристика для слоя воздуха.

В области слабых электрических полей (область I на графике) ток проводимости в газе возрастает пропорционально величине приложенного напряжения. С дальнейшим ростом напряжения (область II на графике) пропорциональность между током и напряжением нарушается. В этой области ток проводимости не зависит от напряжения. Здесь происходит накопление энергии заряженными частицами газа – электронами и ионами. С дальнейшим повышением напряжения (область III на графике) скорость заряженных частиц резко возрастает, вследствие чего происходят частые соударения их с нейтральными частицами газа. При этих упругих соударениях электроны и ионы передают часть накопленной ими энергии нейтральным частицам газа. При этом образуются новые свободные электроны и положительно заряженные ионы. Процесс образования новых пар заряженных частиц посредством соударения называется **процессом ударной ионизации газа**. В области ударной ионизации (область III на графике) ток в газе интенсивно возрастает при малейшем повышении напряжения.

Газообразные диэлектрики могут использоваться при напряжениях, исключая процесс ударной ионизации в газе. В этом случае газы являются хорошими диэлектриками, у которых удельное объёмное сопротивление очень велико. Поэтому газы, в частности воздух, используются в качестве диэлектриков в образцовых конденсаторах и в газонаполненных кабелях.

4.1.3. Пробой газов

Развитие процесса ударной ионизации приводит к пробоею слоя газа (точка P на рис.22). В момент пробоя ток в газе резко возрастает, а напряжение стремится к нулю. Пробой газа происходит в виде искрового разряда, т.е. искры, соединяющей металлические электроды, помещённые в газовой среде.

Пробой газообразных диэлектриков подчиняется закону Пашена:

$$U_{пр} = A \cdot p \cdot h,$$

где $U_{пр}$ – пробивное напряжение;

A – постоянная величина;

p – давление газа;

h – расстояние между электродами в газе.

Согласно закону Пашена величина пробивного напряжения любого газа пропорциональна произведению давления газа на расстояние между электродами (рис.23).

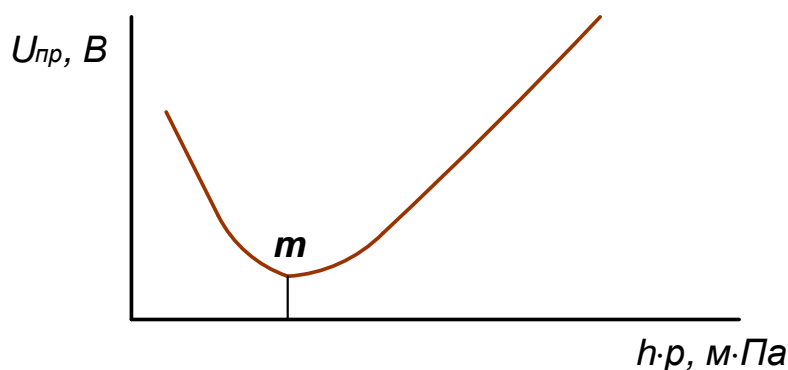


Рис. 23. Зависимость пробивного напряжения воздуха от произведения давления воздуха на расстояние между электродами.

Таким образом, величина пробивного напряжения газа растёт с ростом давления газа и расстояния между электродами (правая часть U - образной кривой рис.23). С уменьшением же давления и расстояния между электродами пробивное напряжение газа уменьшается, но пройдя минимум (точка m), начинает снова возрастать в области разреженного газа или в области малых расстояний между электродами (левая часть U - образной кривой рис.23). Это объясняется тем, что в области разреженного газа (вакуума) резко уменьшается количество атомов и молекул, являющихся объектами ионизации, а значит, и в процесс ударной ионизации происходит при более высоких напряжениях. Вакуум обладает высокими электроизоляционными свойствами, и это широко используется в электровакуумных приборах.

В области малых расстояний между электродами пробой газа также происходит при повышенных значениях пробивного напряжения. Это объясняется сокращением длины пути, на котором заряженные частицы уже не могут накапливать энергию, необходимую для процесса ударной ионизации. Чтобы такой процесс имел место необходимо приложить более высокое напряжение. Значит слой газа меньшей толщины обладает большей электрической прочностью, чем слой газа большей толщины.

Наибольшей электрической прочностью обладают газы: элегаз (SF_6) и фреон (CCl_2F_2), а наибольшей теплопроводностью и теплоёмкостью обладает водород (H_2). Поэтому водород широко используется в качестве охлаждающей среды (вместо воздуха) в электрических машинах большой мощности. Во избежание попадания внутрь корпуса машины воздуха и образования гремучего газа внутри машины поддерживается всё время избыточное давление водорода.

Электрическая прочность любого из газов меньше электрической прочности жидких и твёрдых диэлектриков. Поэтому расстояния между голыми металлическими частями высокого

напряжения в воздухе всегда выбираются несколько большими, чем расстояния между электродами в жидкой или твёрдой изоляции.

Пробой газообразного диэлектрика в воздухе при наличии однородного электрического поля происходит сразу в виде искры. Этот искровой разряд может переходить в дугу при достаточной мощности источника тока.

Пробой же газообразного диэлектрика в неоднородном электрическом поле происходит через ряд промежуточных стадий. При напряжении значительно меньше пробивного, у поверхности электрода с малым радиусом (острие, провод малого диаметра и др.) в воздухе возникает так называемый коронирующий разряд - электрическая корона. Электрическая корона сопровождается жужжанием и образованием в воздухе газов: озона (O_3) и оксидов азота (N_xO_y). С дальнейшим повышением напряжения коронирующий разряд переходит в кистевой. При этом около электрода с меньшим радиусом образуется ряд светящихся веточек-кистей, указывающих на дальнейшее электрическое разрушение воздуха. По достижении величины пробивного напряжения $U_{пр}$ одна из кистей развивается в искру, которая в момент пробоя перекрывает весь слой газа от одного электрода до другого.

Пробой слоя газа в однородном электрическом поле происходит при более высоком напряжении по сравнению с пробоем того же газового слоя в неоднородном поле.

4.1.4. Пробой газа на границе с твёрдым диэлектриком

В предыдущем разделе мы рассмотрели явление пробоя газа при отсутствии в нём твёрдых диэлектриков. На практике же часто встречаются случаи пробоя газа на границе с твёрдым диэлектриком. Примером этого является поверхностное перекрытие искрой фарфорового изолятора, представляющее пробой слоя воздуха у поверхности твёрдого диэлектрика.

Во всех случаях пробоя воздуха на границе с твёрдым диэлектриком величина пробивного напряжения, как правило, меньше по сравнению с пробивным напряжением для такого же расстояния в газе при отсутствии твёрдого диэлектрика.

Понижение пробивного напряжения газа при наличии в нём твёрдого диэлектрика вызывается искажением электрического поля заряженными частицами на поверхности твёрдого диэлектрика и различием диэлектрических проницаемостей твёрдого диэлектрика и окружающего воздуха. Поэтому при конструировании изоляторов стараются им придать такую форму, при которой искровой разряд проходил бы не у поверхности изолятора, а в слое воздуха, удалённом от неё. Это также исключает возможность повреждения поверхности изолятора электрической дугой, в которую обычно переходит искровой разряд.

4.2. Жидкие диэлектрики

4.2.1. Жидкие электроизоляционные материалы

В качестве жидких электроизоляционных материалов в электротехнических установках применяют нефтяные электроизоляционные масла и жидкие синтетические диэлектрики – совол и кремнийорганические жидкости. Наиболее широкое применение из всех этих материалов имеют нефтяные минеральные масла. По характеру использования нефтяные масла могут быть разделены на три группы:

- 1) масла для высоковольтных трансформаторов высоковольтных выключателей;
- 2) кабельные масла;
- 3) конденсаторные масла.

Совол применяется в бумажно-масляных конденсаторах, в некоторых случаях он служит основным жидким веществом при изготовлении жидких диэлектриков с высокой диэлектрической проницаемостью ($\epsilon = 8$), употребляемых в конденсаторах.

За последнее время разработаны и применяются другие **синтетические жидкие диэлектрики** из кремнийорганических и фторорганических веществ, отличающихся устойчивостью против окисления при повышенных температурах (200-250°C).

Нефтяные масла получают в результате фракционной перегонки нефти, поэтому химический состав масел определяется составом самой нефти, который является весьма сложным.

4.2.2. Минеральные электроизоляционные масла

В трансформаторах высокого напряжения нефтяное масло является одновременно электроизоляционным материалом и веществом, отводящим тепло от нагретых частей трансформатора (обмоток, магнитных сердечников) к стенкам его кожуха (бака).

В первом случае оно служит изоляцией, дополнительно к твёрдой изоляции высоковольтных и низковольтных обмоток. Масло заполняет пространство между этими обмотками и тем самым повышает изоляцию всего трансформатора. Выполняя роль изоляции, масло должно обладать высокой электрической прочностью и не создавать значительных диэлектрических потерь.

Во втором случае масло должно обладать способностью циркулировать от нагретых частей к холодным, т.е. иметь невысокую вязкость при температурах, обусловленных работой трансформатора.

В высоковольтных выключателях применяется то же самое масло, что и в трансформаторах. Здесь масло выполняет не только функцию жидкого диэлектрика, изолирующего части выключателя с высоким напряжением от его кожуха, но главным образом оно является веществом, посредством которого электрическая дуга, возникающая между контактами выключателя при отключении сети, быстро гасится. Процесс гашения электрической дуги состоит в следующем. Под действием высокой температуры дуги масло разлагается и выделяются газы: водород, ацетилен, метан. Эти газы образуют пространство вокруг электродов с дугой. Давление в газовом пространстве в результате выделения газов увеличивается, вследствие чего дуга прекращает своё горение.

Большие количества электроизоляционных нефтяных масел используются также в производстве силовых кабелей с бумажной изоляцией. В зависимости от конструкции кабелей масла могут быть разделены по вязкости, величине $\text{tg}\delta$ (тангенса угла диэлектрических потерь)* и температуре застывания на следующие три группы:

- 1) масла с малой вязкостью (МН-2);
- 2) масла средней вязкости (С-110 и С-220);
- 3) масла вязкие (П-28).

Маловязкое масло МН-2 применяется в маслonaполненных кабелях низкого и среднего давления (до 3 атм.). Малая вязкость масла для таких кабелей необходима, чтобы обеспечить подпитку кабеля маслом через сравнительно небольшие каналы в нём при всех эксплуатационных температурах.

Средневязкие масла С-110 и С-220 предназначаются для пропитки и заполнения маслonaполненных высоковольтных кабелей на напряжение 110кВ и выше при давлении около 14атм.

Наиболее вязкое масло применяется для кабелей с бумажной изоляцией до 35кВ. у которых пропитывающим жидким веществом является масло П-28 с растворённой в нём канифолью.

Масла в кабелях соприкасаются с металлами – медью, свинцом, являющимися катализаторами их окисления, поэтому необходимо, чтобы они обладали высокой химической устойчивостью против окисления в эксплуатационных условиях. Кроме того, в высоковольтных маслonaполненных кабелях недопустимы газовые пузырьки, ослабляющие электрическую прочность изоляции кабеля. В маслonaполненных кабелях с высоким давлением процесс ионизации, в результате которого выделяется водород, отсутствует или значительно ослаблен давлением.

* Примечание: Величина $\text{tg}\delta$ называется тангенсом угла диэлектрических потерь, так как она определяет мощность, теряемую в диэлектрике, работающем под переменным напряжением. Эта величина является характеристикой каждого диэлектрика и выражается формулой:

$$\frac{I_a}{I_p} = \text{tg}\delta$$

где I_a – ток активный, I_p - ток реактивный.

Для радиотехнических материалов величина $\text{tg}\delta$ должна быть порядка 10^{-4} , а для электротехнических материалов не должна превышать 10^{-2} . Величина $\text{tg}\delta$ зависит от температуры диэлектрика и частоты приложенного переменного напряжения.

4.2.3. Очистка и осушка электроизоляционных масел

Несмотря на меры предохранения масла от окисления, оно всё же окисляется и со временем в нём появляются твёрдые и жидкие продукты окисления и вода. Поэтому находящееся в эксплуатации масло необходимо время от времени очищать от примесей и воды и даже регенерировать.

Существует несколько способов очистки масла от примесей и воды. Воду из масла можно удалить путём испарения, нагревая масло до температуры кипения воды. Однако следует учесть, что всякое нагревание масла при наличии хорошего доступа воздуха портит его. Поэтому сушку масла производят в специальных установках под вакуумом. Этим во-первых, устраняется в значительной степени воздух, и следовательно кислород, и во-вторых, понижается температура кипения воды, т.е. снижается вредное действие на масло его нагревания.

От твёрдых примесей масло можно очистить при помощи центрифуги, где твёрдые частицы, имеющие больший удельный вес, чем масло, отбрасываются к стенкам центрифуги и удаляются. Масло также подвергается разделению на тонкие плёнки, поэтому имеется опасность его окислить, так как для лучшей очистки и понижения вязкости масло через центрифугу пропускают в нагретом состоянии. В современных центрифугах удаление примесей из масла производят при наличии вакуума.

Процесс очистки масла центрифугой от загрязняющих его твёрдых частичек примесей (процесс осветления) называется **кларификацией**. Удаление центрифугой воды носит название **пурификации** масла.

От воды и твёрдых частичек примесей масло можно также очистить посредством картонного фильтра, прогоняя масло через фильтр насосом, который создаёт давление. Такая установка называется **фильтрпрессом**. Фильтрпресс обеспечивает хорошую очистку масла от примесей и от влаги и по обслуживанию он значительно проще центрифуги.

Регенерацию масла осуществляют при помощи адсорбентов – веществ, обладающих способностью поглощать продукты старения масла и влагу. Кроме природных адсорбентов, в качестве которых используют мелкораздробленную землю и глины, применяют силикагель и оксид алюминия. Очистку масла производят двумя способами: **контактным** и **перколяцией**. Контактный способ состоит в том, что в нагретое масло вводится адсорбент и смесь тщательно фильтруется. При перколяции очистка масла происходит непрерывно. Нагретое до 80-100°C масло поступает в металлический цилиндр снизу через сетчатое дно его, на которое закладывают определённый слой адсорбента. При такой подаче масла фильтр не забивается мелкими частицами адсорбента и воздух быстрее вытесняется из цилиндра.

В случае сильно постаревшего масла регенерацию природными отбеливающими глинами совмещают с химическими способами очистки. Таким является **щелочно-земельный метод**. Масло обрабатывают 3-5% раствором едкого натра (NaOH), перемешивают и отстаивают, затем спускают образовавшуюся эмульсию и непрореагировавшую щёлочь. После этого масло промывают дистиллированной водой, обрабатывают отбеливающей глиной и пропускают через фильтрпресс или центрифугу.

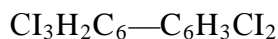
Более полное химическое восстановление масла осуществляется по **кислотно-щелочно-земельному методу**. В этом случае в регенерируемое масло вводят 0,5-1,0% крепкой серной кислоты, которая связывает все нестойкие соединения и переводит их в кислый гудрон. Отстоявшееся после этого масло для нейтрализации органических кислот и остатков серной кислоты обрабатывают щёлочью. Затем масло промывают дистиллированной водой и обрабатывают адсорбентами, после чего фильтруют или пропускают через центрифугу.

Следует отметить один крупный недостаток всех нефтяных электроизоляционных масел, состоящий в их горючести и в выделении из них под действием дуги газообразных продуктов распада (водорода, этилена, метана и др.), способных образовать взрывоопасные смеси. Поэтому в шахтах, на морских судах нефтяные масла в трансформаторах заменяют негорючей синтетической жидкостью – соволом или трансформаторы с маслом заменяют трансформаторами с сухой изоляцией.

4.2.4. Синтетические жидкие диэлектрики

Из синтетических диэлектриков наибольшее применение получили совол и «калория-2».

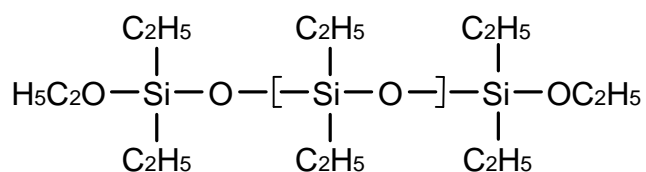
Совол – жидкий синтетический диэлектрик, который получают из дифенила. Совол описывается химической формулой:



Совол является полярным диэлектриком, его диэлектрическая проницаемость $\epsilon = 5,0 - 5,2$ и совпадает с величиной диэлектрической проницаемости изоляционных бумаг. Поэтому совол применяется в бумажных конденсаторах в качестве пропитывающего вещества. Совол является негорючим веществом, что составляет его главное преимущество перед нефтяным маслом. Однако у него есть ряд недостатков, ограничивающих его применение. У совола высокая температура замерзания (-8°C), кроме того он обладает высокой вязкостью. Большим недостатком является и то, что совол является токсичным веществом, в результате наличия в нём хлора и его выделения.

Применяется совол преимущественно в высоковольтных бумажных конденсаторах.

Из кремнийорганических жидкостей наибольшее распространение в качестве диэлектрика получила жидкость, известная под названием «калория-2». Это вещество принадлежит к группе полиэтилсилоксановых жидкостей, молекулы которых представляют собой линейные цепочки типа:



Такая жидкость выгодно отличается от совола по ряду характеристик. Её температура застывания ниже -60°C , температура вспышки $+145^\circ\text{C}$, лучше электрические характеристики. Однако электрическая прочность жидкости «калория-2» несколько ниже прочности нефтяного масла.

Кремнийорганическая жидкость «калория-2» применяется в бумажных конденсаторах в качестве пропитывающего жидкого диэлектрика, обладающего высокой стабильностью характеристик в широком интервале температур от -60°C до $+100^\circ\text{C}$.

4.3. Твёрдые органические диэлектрики

4.3.1. Полимеризационные синтетические диэлектрики

К полимеризационным диэлектрикам, широко применяемым в электротехнике и радиотехнике, относится полистирол, полиэтилен, поливинилхлорид, эскапон и другие.

Полистирол – твёрдый прозрачный материал. Он обладает высокими электроизолирующими свойствами и стоек к озону, кислотам, щелочам.

Из полистирола изготавливают каркасы катушек, диэлектрические антенны, изоляционные панели, основания и изоляторы для электроизмерительных приборов и радиоаппаратуры. На основе полистирола изготавливают также электроизоляционные лаки. Способом вытягивания размягчённого полистирола через узкую щель – фильеру получают гибкие полистирольные плёнки и нити.

Полистирольные плёнки обладают такими же высокими диэлектрическими характеристиками, как и полистирол в толстом слое. Стироплёнка широко применяется для изоляции жил высокочастотных кабелей и в производстве конденсаторов.

Полиэтилен – непрозрачный термопластичный материал светло-серого цвета, несколько жирный на ощупь. Диэлектрические характеристики и химическая стойкость полиэтилена находятся на таком же высоком уровне, что и у полистирола. В отличие от полистирола полиэтилен обладает гибкостью, что позволяет его применять в качестве основной изоляции высокочастотных кабелей. Из более твёрдых сортов полиэтилена изготавливают негибкие изоляционные изделия: каркасы катушек, панели и многое другое.

Полиэтилен поступает в промышленность в виде гранул. Из полиэтилена изделия получают методом литья под давлением, горячим прессованием и методом экструзии (горячее непрерывное выдавливание). Метод экструзии применяются при нанесении полиэтиленовой изоляции на провода, а также при изготовлении изоляционных шлангов и труб. Изделия из полиэтилена могут быть сварены между собой.

Все полиэтиленовые изделия не стойки к солнечному свету. Для повышения стойкости в полиэтилены вводят краситель – сажу.

Поливинилхлорид (полихлорвинил) в исходном состоянии представляет собой порошок белого цвета, из которого получают горячим прессованием или горячим выдавливанием механически прочные изделия, стойкие к минеральным маслам, многим растворителям, щелочам, кислотам. Поливинилхлорид – термопластичный материал негорючий материал.

Горячим прессованием порошкообразного поливинилхлорида получают твёрдый материал – винипласт – в виде листов, плёнки, пластин, труб и стержней светло-коричневого цвета. Под действием электрической дуги винипласт выделяет большое количество газообразных веществ, которые гасят дугу, поэтому из него изготавливают корпуса трубчатых разрядников. Недостатком винипласта являются его малая морозостойкость -25°C и недостаточно высокая теплостойкость (65°C).

Для получения гибкой полихлорвиниловой изоляции проводов, кабелей и изоляционных трубок порошок поливинилхлорида смешивают с пластификаторами – густыми маслообразными жидкостями. Кроме пластификаторов вводят, вводят ещё красители, наполнители и термостабилизаторы. Полученная смесь пропускается несколько раз через нагретые стальные вальцы. В результате такой обработки получают гибкий рулонный материал – полихлорвиниловый пластикат. Из размягчённого (при нагреве) пластиката на провода наносится слой гибкой изоляции. Из полихлорвиниловых пластикатов изготавливают также изоляционные трубки и защитные гибкие шланги для высокочастотных и монтажных проводов и кабелей.

Эскапон – твёрдый прозрачный материал. Он получается в результате термической полимеризации синтетического каучука без применения вулканизирующих веществ (серы и др.), которые обычно используются при изготовлении резин. Твёрдый эскапон и изделия из него хорошо поддаются механической обработке, он обладает высокой химической стойкостью по отношению к растворителям, щелочам и кислотам.

Из эскапона изготавливают изоляционные изделия для радиоаппаратуры. На основе эскапона получают ряд электроизоляционных лаков и заливочных составов (компаунды).

4.3.2. Битумы

Битумы представляют собой твёрдые или жидкие высоковязкие вещества чёрного цвета. Все битумы размягчаются при нагревании, т. е. являются термопластичными материалами. Различают битумы нефтяные (искусственные), получающиеся в результате перегонки нефти, и природные (ископаемые) битумы, называемые асфальтами и асфальтитами. Природные битумы тоже образовались из нефти, но в естественных условиях. Природные битумы обычно загрязнены минеральными примесями – песком, известью и др. – и содержат серу.

По химическому составу все битумы представляют собой сложную смесь нефтяных смол, твёрдых и жидких углеводородов и некоторых других веществ (карбенов, асфальтенов). Карбены и асфальтены сообщают битумам твёрдость и повышают температуру размягчения. Карбены, содержащие частицы углерода, снижают электроизоляционные свойства битумов.

В электротехнике применяются только твёрдые сорта битумов с температурой размягчения от 70°C и выше. Природные битумы (асфальтиты) обладают более высокой температурой размягчения ($150-220^{\circ}\text{C}$), чем нефтяные битумы.

Битумы хорошо совмещаются с минеральными и растительными маслами. Введение минеральных масел в битумы придаёт последним эластичность и делает их морозостойкими. Совместимость битумов с растительными маслами используется при изготовлении асфальто-масляных электроизоляционных лаков.

Характерными свойствами битумов являются их химическая инертность и стойкость к воде. Битумы и асфальты – доступные и дешёвые материалы. Они широко используются в электротехнике для изготовления электроизоляционных пропиточных и заливочных составов – компаундов и масляно-битумных лаков различного назначения.

При строительстве первых магистральных газопроводов в СССР диаметром 1020, 1220мм для изоляции широко применялись покрытия на основе битумов. В настоящее время применение защитных покрытий на основе битумов вновь приобрело свою актуальность. Разрабатываются новые покрытия, в которые представляют собой многокомпонентные композиции, состоящие из битума, полимеров, каучука и пластификаторов. Такие покрытия имеют удовлетворительные эксплуатационные характеристики и, благодаря этому получили широкое применение в газовой промышленности. Примером таких покрытий является «ТРАНСКОР-ГАЗ», основой которого

является битумно-полимерная мастика «ТРАНСКОР-ГАЗ». Для изготовления мастики применяются нефтяные битумы, атактический дивинилстирольный термоэластопласт, пластификатор. На основе данной мастики разработано и применяется материал рулонный армированный мастичный «РАМ». Вышеуказанные покрытия могут наноситься как ручным, так и механизированным способом.

4.3.3. Электроизоляционные лаки

Лаки представляют собой коллоидные растворы различных плёнкообразующих веществ в специально подобранных органических растворителях. Плёнкообразующими называются такие вещества, которые в результате испарения растворителей, окисления и полимеризации способны образовывать твёрдую плёнку.

К плёнкообразующим веществам относятся смолы (природные и синтетические), растительные высыхающие масла, эфиры целлюлозы и др. В качестве растворителей применяются легко испаряющиеся (летучие) жидкости: бензол, толуол, ксилол, бензин, лаковый керосин, спирты, ацетон, скипидар и др. Кроме лаковой основы и растворителей, в состав лака могут ещё входить пластификаторы и сиккативы. Пластификаторы – вещества, придающие лаковой плёнке эластичность; к ним относятся касторовое масло, жирные кислоты льняного масла и другие маслообразные жидкости. Сиккативы представляют собой жидкие и твёрдые вещества, вводимые в некоторые лаки, чтобы ускорить их высыхание. Сиккативы представляют собой соли жирных и смоляных кислот ряда металлов (кобальта, свинца, марганца).

При сушке слоя лака, нанесённого на какую-либо поверхность, содержащиеся в нём органические растворители улетучиваются (испаряются), а плёнкообразующие вещества в результате процессов полимеризации образуют твёрдую лаковую плёнку. Эта плёнка может быть гибкой (эластичной) или негибкой и хрупкой, в зависимости от выбора плёнкообразующих веществ в лаковой основе.

По своему назначению электроизоляционные лаки делятся на **пропиточные, покровные и клеящие**.

Пропиточные лаки применяются для пропитки обмоток в электрических машинах и аппаратах с целью цементации – соединения витков обмотки друг с другом, а главное, с целью устранения пористости в волокнистой структуре (и другой) изоляции обмоток. Пропиточный лак, проникая в поры изоляции обмоток, вытесняет оттуда воздух и после своего отверждения делает обмотку влагостойкой. При этом повышается электрическая прочность изоляции обмотки и её коэффициент теплопроводности. Одной из главных характеристик пропиточного лака является его пропитывающая способность.

Покровные лаки применяют для создания на поверхности уже пропитанных обмоток или металлических и пластмассовых деталей, влагостойких или маслостойких лаковых покрытий. К покровным лакам относятся эмальлаки, применяемые для изоляции листов электротехнической стали в магнитопроводах.

Клеящие лаки применяют для склеивания различных электроизоляционных материалов: листочков слюды, керамики, пластмасс и др. Основное требование предъявляемое к клеящим лакам, состоит в том, чтобы эти лаки обладали высокой адгезией (прилипаемостью) по отношению к склеиваемым материалам.

Приведённая классификация лаков не всегда может быть строго выдержана, так как один и тот же лак может применяться в качестве пропиточного и покровного или в качестве покровного и клеящего.

По способу сушки лаки делятся на две группы: **лаки воздушной (холодной) сушки** и **лаки печной (горячей) сушки**.

У лаков воздушной сушки образование плёнки происходит при комнатной температуре. К лакам воздушной сушки относятся шеллачные, эфиروцеллюлозные и некоторые другие.

У лаков печной сушки отверждение плёнки возможно лишь при температурах значительно выше комнатной (от 100°C и выше). В лаках печной сушки применяются терморезактивные плёнкообразующие вещества (глифталевые, резольные и другие смолы), отверждение которых обусловлено процессами полимеризации, требующими повышенных температур. Лаки горячей сушки, как правило, обладают более высокими механическими свойствами и электрическими характеристиками.

Согласно применённой лаковой основе лаки делятся на **смоляные, масляные, масляно-битумные и эфиро-целлюлозные**.

Смоляные лаки представляют собой растворы природных или синтетических смол в органических растворителях. К смоляным лакам относятся шеллачные, глифталевые, бакелитовые, поливинилацеталевые (метальвин, винифлекс), кремнийорганические и др. на основе различных смол или их композиций.

Масляные лаки представляют собой растворы растительных (высыхающих или полувывсыхающих) масел в органических растворителях.

К высыхающим маслам относятся тунговое и льняное масло. Масляные лаки применяют для пропитки электроизоляционных лакотканей, эмалирования обмоточных проводов и как покровные лаки, отличающиеся стойкостью к влаге и минеральным маслам. Примеры: лаки №152 и 802.

Масляно-битумные лаки представляют собой растворы масляно-битумных смесей в органических растворителях (скипидар, толуол, ксилол и др.). Для этого применяют битумы нефтяные и природные (асфальты). Из растительных масел применяется главным образом льняное масло. Плёнки этих лаков имеют чёрный цвет. Они обладают высокими электроизоляционными свойствами и отличаются эластичностью и большей водостойкостью по сравнению с масляными лаками. Плёнки масляно-битумных лаков термопластичны и легко растворяются в минеральных маслах и ряде растворителей.

Масляно-битумные лаки (№ 441,447,458,462 и др.) широко применяются в электротехнике главным образом в качестве дешёвых пропиточных лаков для обмоток электрических машин.

Эфиро-целлюлозные лаки представляют собой растворы эфиров целлюлозы в смеси растворителей (этилацетат, ацетон, спирты и др.). Плёнки этих лаков прозрачны, имеют характерный блеск и обладают стойкостью к минеральным маслам, бензину и озону. Адгезионная способность эфиро-целлюлозных лаков небольшая. Они плохо соединяются с металлами и применяются преимущественно для лакирования хлопчатобумажных оплётков проводов с резиновой изоляцией – для защиты резины от действия бензина, минеральных масел и озона. Данные лаки являются лаками воздушной сушки.

4.3.4. Электроизоляционные эмали

Эмали представляют собой лаки с введёнными в них мелкоизмельченными (мелкодисперсными) частицами – пигментами.

К пигментам относятся неорганические вещества, преимущественно оксиды и соли металлов (оксиды цинка, железный сурик, литопон* и др.) и их смеси. Пигментирующие вещества, введённые в лак, тщательно перетираются краскотёрочных машинах до получения однородной массы. В процессе отверждения эмалей пигменты вступают в химическую реакцию с лаковой основой, образуя плотное с повышенной твёрдостью покрытие.

Электроизоляционные эмали являются покровными материалами. Ими покрывают лобовые части обмоток электрических машин и аппаратов с целью защиты их от смазочных масел, влаги, электрических дуг и от других воздействий.

Основой многих электроизоляционных эмалей являются масляно-глифталевые лаки, характеризующиеся высокой клеящей способностью и повышенной нагревостойкостью. На масляно-глифталевых лаках изготавливаются эмали следующих марок: СПД – эмаль горячей сушки (105°C). Покрытия из этой эмали имеют серый цвет и обладают стойкостью к минеральным маслам и к электрическим искрам. СВД – эмаль холодной сушки, образует покрытие серого цвета, стойкие к минеральным маслам. КВД – эмаль холодной сушки, образует покрытия красно-коричневой окраски, стойкие к электрическим дугам.

Некоторое применение находят эмали на основе перхлорвиниловых лаков. Покрытия из таких эмалей (марки ХСГ-26, ХСЭ-26 и др.) отличаются влагостойкостью и хорошими электроизоляционными свойствами. Эти эмали применяются для защиты от влаги пластмассовых и деревянных деталей в электрических аппаратах при температурах не выше 80°C.

Наибольший интерес представляют электроизоляционные эмали на основе кремнийорганических лаков, отличающиеся очень высокой нагревостойкостью (180-200°C). Из этой группы следует отметить эмаль ПКЭ-14, представляющую собой кремнийорганический лак К-48, в который введены оксид титана TiO_2 и железный сурик Fe_2O_3 . Плёнки этой эмали отличаются повышенной маслостойкостью до 180°C. Широкое применение имеет также эмаль ПКЭ-15 тоже горячей сушки.

Из кремнийорганических эмалей холодной сушки находят широкое применение эмали ПКЭ-19 и ПКЭ-22. Покрyтия из них отличаются нагревостойкостью и стойкостью против плесневых грибов, что является одним из основных требований к материалам.

*Литопон – смесь серноокислого бария с сернистым цинком, придаёт эмали белый цвет.

4.3.5. Гибкие электроизоляционные материалы

К гибким изоляционным материалам относятся **синтетические плёнки** из высокополимерных диэлектриков (**полистирол, полиэтилен, фторопласт-4** и др.), а также **лакированные ткани** (шёлковые, капроновые, хлопчатобумажные и стеклянные). Лакированные электроизоляционные ткани больше известны под названием лакотканей.

Гибкие электроизоляционные материалы широко применяются в электротехнике и радиотехнике. Синтетические плёнки из полистирола, полиэтилена, фторопласта-4 находят главное применение в качестве изоляции высокочастотных проводов и кабелей, так как диэлектрические потери в этих материалах очень малы. Плёнки из фторопласта-4, отличающиеся высокой нагревостойкостью (до 250°C), находят применение в качестве изоляции монтажных проводов, предназначенных для работы при повышенных температурах, а также в условиях низких температур (до -100°C).

Электроизоляционные **плёнки**, получаемые из триацетата целлюлозы и полиэтилентерефталата (лавсан) и лакированные ткани (лакоткани) находят широкое применение в качестве пазовой изоляции в электрических машинах, а также в качестве различных электроизоляционных прокладок а электрических аппаратах и приборах.

Триацетатцеллюлозные (триацетатные) плёнки представляют собой гибкие материалы, которые применяются для изоляции обмоточных проводов. Они имеют высокие диэлектрические характеристики. Отрицательными свойствами триацетатных плёнок является их невысокая прочность к надрыву и недостаточно высокая стойкость к электрической короне, что ограничивает их применение в электрических машинах и аппаратах высокого напряжения.

Плёнки из полиэтилентерефталата представляют собой прозрачные электроизоляционные плёнки, получаемые из полиэфирной синтетической смолы – полиэтилентерефталата (лавсан, хостафан). Данные плёнки применяются в качестве пазовой изоляции электрических машин и в производстве конденсаторов.

Лакоткани – гибкие рулонные материалы, состоящие из какой-либо тканевой основы, пропитанной электроизоляционным лаком. Пропиточный лак по отверждении образует на лакоткани гибкую плёнку, которая обеспечивает материалу высокие электроизоляционные способности. Тканевая же основа сообщает лакоткани высокую механическую прочность. Лакоткани находят очень большое применение в электротехнике в качестве пазовой и межвитковой изоляции в электрических машинах низкого напряжения, а также в качестве изоляции катушек и отдельных групп проводов (жгуты) в электрических аппаратах и приборах.

В соответствии с применённой тканевой основой лакоткани делятся на хлопчатобумажные, шёлковые, капроновые и стеклянные (стеклоткани).

В качестве основ хлопчатобумажных лакотканей применяются тонкие прочные ткани (перкаль и др.). Основами шёлковых лакотканей являются тонкие ткани из натурального шёлка (эксельсиор и др.). Для некоторых сортов эластичных лакотканей с повышенной механической прочностью используют капроновые ткани. Для лакотканей с повышенной нагревостойкостью применяют стеклянные ткани, изготавливаемые из электроизоляционных стёкол. Нагревостойкие стеклянные ткани обычно пропитывают кремнийорганическими лаками с повышенной нагревостойкостью (до 180°C). Хлопчатобумажные, шёлковые и капроновые ткани пропитывают светлыми масляными лаками или реже чёрными (масляно-битумными) лаками.

Липкие изоляционные ленты изготавливаются на хлопчатобумажных тканой или стеклянной тканях. Прорезиненная изоляционная лента представляет собой хлопчатобумажную (миткалевую) ленту, пропитанную вязким резиновым составом. Прорезиненная липкая лента применяется при монтажных работах для изоляции мест соединений проводов в сетях и устройствах низкого напряжения. Следует также отметить значительное применение в устройствах низкого напряжения липкой полихлорвиниловой ленты. Эта лента может применяться до температур 60-65°C, при более высоких температурах она начинает размягчаться.

5. Полупроводниковые материалы

5.1. Общие свойства полупроводниковых материалов

По величине электрического сопротивления полупроводники занимают промежуточное положение между проводниками и диэлектриками. Они составляют обширную область материалов, отличающихся друг от друга большим многообразием химического состава и отдельными специфическими свойствами, которые определяют их место в технике.

По химической природе технические полупроводники можно распределить на следующие три главные группы:

1. Кристаллические полупроводники, построенные из атомов и молекул одного элемента. Такими материалами являются широко используемые в данное время германий (Ge), кремний (Si) и селен (Se), а также те одноатомные вещества, которые могут быть введены в основные материалы в качестве активных примесей: фосфор (P), мышьяк (As), бор (B), олово (Sn), индий (In).
2. Оксидные полупроводники, т. е. материалы из оксидов металлов. Главные из них: оксиды меди (Cu_2O), цинка (ZnO), кадмия (CdO), титана (TiO_2), никеля (NiO) и др.
3. Соединения серы (S), селена (Se), и теллура (Te) с медью, кадмием, свинцом и др. Такие вещества называются сульфидами, селенидами и теллуридами.

Каждый полупроводниковый материал обладает электронной и дырочной проводимостями, причём число освободившихся электронов равно числу дырок. Под действием внешнего электрического напряжения эти свободные электроны движутся по направлению от положительного к отрицательному полюсу источника, а образовавшиеся в результате освобождения электронов дырки (в атомах) движутся в противоположном направлении (рис.24).

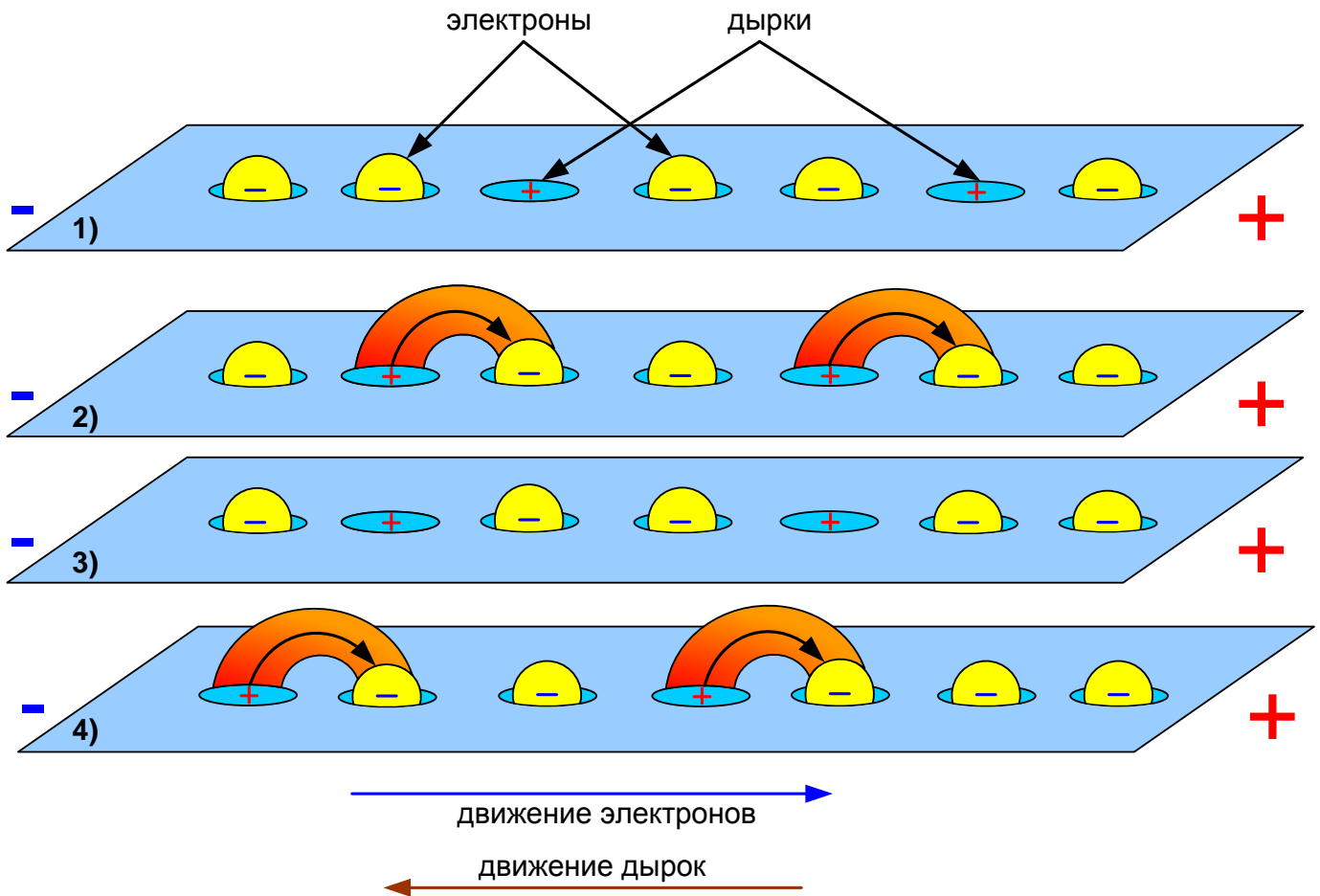


Рис. 24. Движения электронов и дырок в полупроводнике во внешнем электрическом поле.

При движении под действием электрического поля электроны и дырки встречают различного рода препятствия, поэтому теряют энергию и рассеиваются, т.е. отклоняются от направления своего пути. Такие явления получили название **рассеяние носителей тока** (рис. 25).

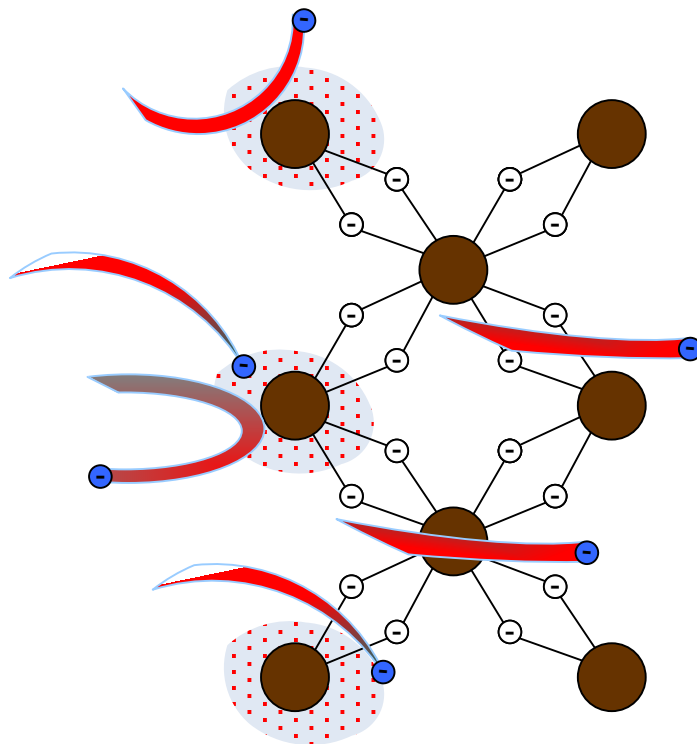


Рис. 25. Рассеяние носителей тока (электронов) при их движении под действием электрического поля.

Чем чище материал, тем выше подвижность электрона или дырки. Повышение температуры обуславливает уменьшение подвижности, так как при этом усиливается тепловое движение частиц и столкновения электронов с атомами вещества учащаются. Однако с повышением температуры проводимость полупроводника всё же увеличивается, так как увеличивается число носителей тока т. е. повышается концентрация электронов и дырок.

В чистых полупроводниках, не имеющих примесей, собственная проводимость при невысоких температурах (комнатных) невелика. Кристаллическая структура кремния приведена на рис. 26. Поэтому в большинстве технических полупроводниковых материалов желаемую величину проводимости можно получить лишь введением в них определённых примесей.

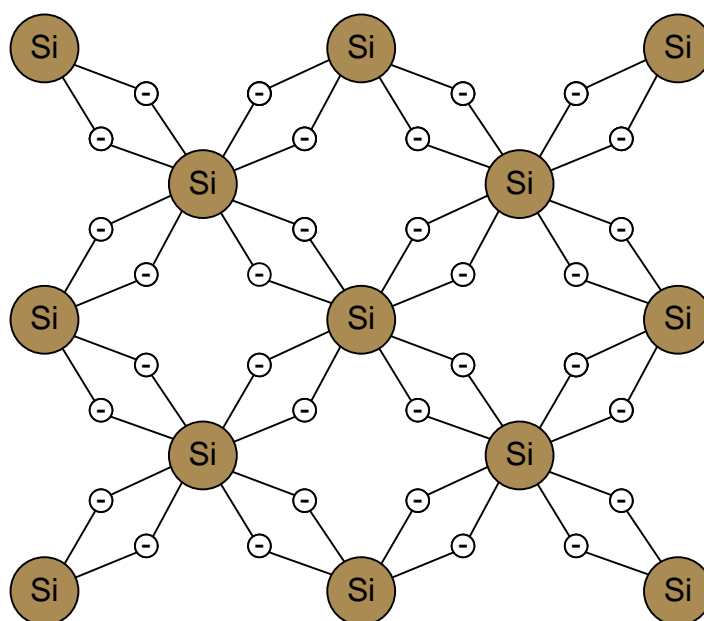


Рис.26. Кристаллическая структура кремния

Повышение проводимости с помощью примесей можно проследить на примере одноатомного кристаллического полупроводника, например, кремния. Известно, что кремний обладает четырьмя

валентностями. Если в кристалл кремния ввести атомы с пятью валентностями, например атомы мышьяка или фосфора (рис. 27), то в нём появляются свободные электроны, по одному от каждого атома примеси, так как четыре из пяти электронов этих атомов будут связаны с четырьмя электронами германия, а пятый электрон мышьяка или фосфора при сравнительно невысоком нагреве полупроводника станет свободным, т.е. покинет свой атом.

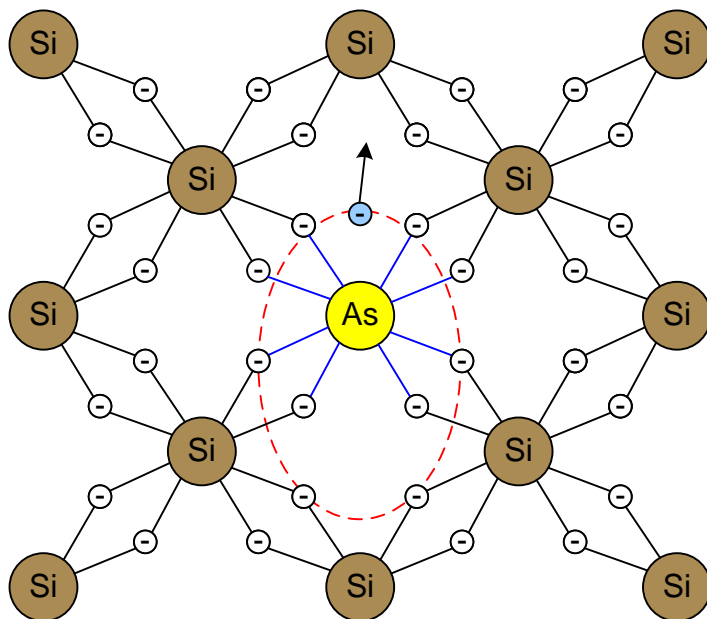


Рис. 27. Кристаллическая структура кремния с введённой примесью мышьяка.

Если же примесными атомами в кремнии будут атомы с тремя валентными электронами, например атомы индия, то три из четырёх электронов кремния будут связаны с атомом примесного индия. Для связи с четвёртым электроном кремния у индия появляется необходимость получить недостающий электрон от другого соседнего атома кремния. Атом индия может осуществлять связь только с тремя соседними атомами, а связь с четвёртым атомом осуществляется лишь одним электроном (рис 28). При этих условиях атом индия захватывает электрон у одного из соседних атомов кремния и становится отрицательным ионом. Электрон, захваченный индием, создавать ток не будет, образовавшаяся же дырка послужит причиной перехода в неё электрона от соседнего атома кремния, в котором тем самым снова получится дырка. Таким образом, образовавшаяся в начале процесса дырка будет переходить от одного атома кремния к другому, от этого к следующему и т.д. Под действием напряжения это движения будет упорядочено и возникнет так называемый дырочный ток.

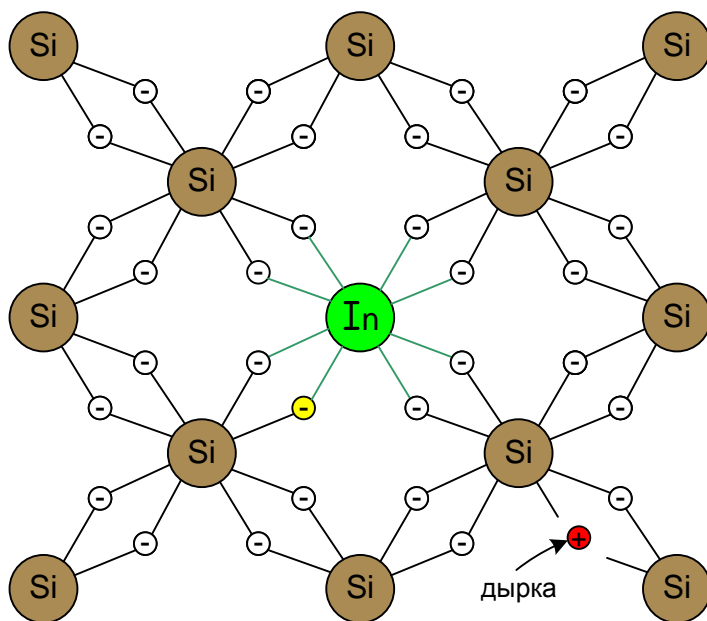


Рис. 28. Кристаллическая структура кремния с введённой примесью индия.

Следовательно, примеси в полупроводнике при невысоких температурах будут увеличивать электрический ток по сравнению с током в чистом полупроводниковом материале, хотя концентрация примесных атомов и не будет высокой.

При невысоких температурах можно ожидать, в зависимости от валентности атомов примеси, электронную или дырочную проводимость. При нагревании же полупроводника в нём будет значительно увеличиваться собственная проводимость, когда количество собственных свободных электронов и дырок равно. При этом исчезает различие в типе проводимости. Это означает, что если благодаря примесям кремний при низких температурах имел преимущественно дырочную проводимость, то при высоких температурах её преобладание исчезнет (рис.29).

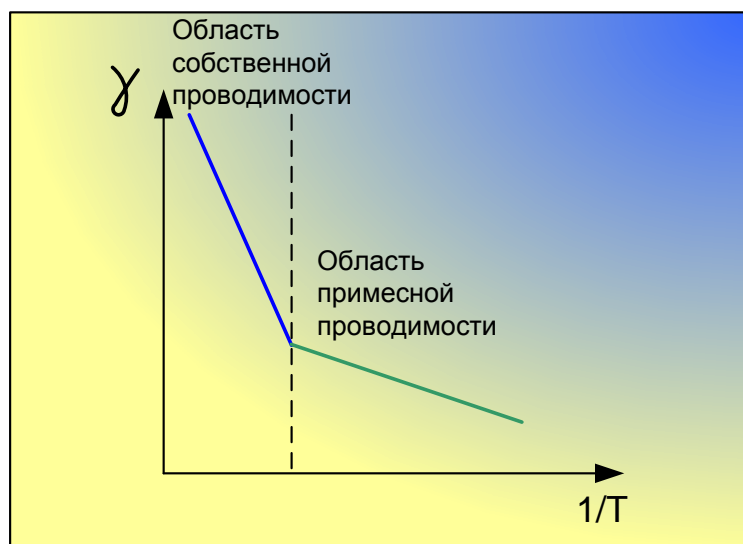
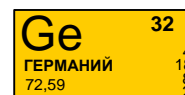


Рис.29. Области проводимости полупроводников при изменении температуры

5.2. Основные полупроводниковые материалы

Основными полупроводниковыми материалами с электронной или дырочной проводимостью, широко используемыми для изготовления различных элементов электротехнических и радиотехнических устройств, являются германий (Ge), кремний (Si), селен (Se), карбид кремния (SiC) и некоторые другие. Некоторые из этих материалов представляют один большой кристалл, из которого вырезают по определённым направлениям пластинки для изготовления каких-либо элементов. Такие полупроводниковые материалы и изготовленные из них элементы называются **монокристаллическими**. Из них наибольшее применение получили германий и кремний. Однако большинство полупроводниковых материалов представляют собой смесь множества малых кристалликов (разной величины) единичных кристалликов одного и того же, беспорядочно спаянных друг с другом. Такие материалы и изготовленные из них элементы получили наименование **поликристаллических**. Представителем их является весьма широко распространённый в технике селен и селеновые выпрямители, а также отдельные виды полупроводниковых материалов, получаемых металлокерамическими методами.



Германий – элемент четвёртой группы Периодической системы элементов Д. И. Менделеева, металл ярко-серебристого цвета, имеющий кубическую кристаллическую структуру. Температура плавления германия 958,5°C. В природе он встречается часто, но в малых количествах. Полученный на заводах в результате различных химических операций германий не является веществом, годным для использования в полупроводниковых элементах, так как требует очистки от нерастворимых примесей. Наиболее широко применяемым способом очистки является метод зонной плавки.

Германий как полупроводниковый материал широко используется не только для диодов и триодов, из него изготавливаются фотосопротивления, мощные выпрямители на большие токи, различные датчики, применяемые для измерения напряжённости магнитного поля, детектирования и модуляции сигналов, термометры сопротивления для низких температур и т.д.



Кремний, как известно, весьма широко распространен в природе. Он, как и германий, является элементом четвёртой группы системы Менделеева и имеет такую же кристаллическую кубическую структуру.

Полированный кремний приобретает металлический блеск. Его температура плавления значительно выше, чем у германия: она равна 1420°C. Собственная проводимость кремния весьма мала. Химически чистый кремний получается из галоидных соединений (SiCl₄, SiI₄) или из силана (SiH₄). Монокристаллы кремния получают, как и в случае германия, вытягиванием из расплава или с помощью бестигельного зонного плавления.

Кремний, как и германий, широко применяется для изготовления многочисленных полупроводниковых элементов. В кремниевом выпрямителе достигаются более высокие обратные напряжения и рабочая температура, чем в германии. Из кремния изготавливаются точечные и плоские триоды, фотоэлементы для превращения солнечной энергии в электрическую и др.



Селен принадлежит к группе редких элементов.

Он встречается в виде малой примеси в медных рудах и в серном колчедане. При электролитическом рафинировании меди селен вместе с другими примесями обнаруживается в шламе, откуда он и извлекается, а затем методом фракционной разгонки в высоком вакууме очищается от примесей, в частности от галоидов. В твёрдом состоянии он может быть кристаллическим и аморфным. Кристаллический селен (серый селен) является полупроводником р-типа и может быть отнесён к примесным полупроводникам, так как он не обладает собственной проводимостью. На графике зависимости проводимости от обратной температуры отсутствует излом, характерный для перехода от примесной к собственной проводимости (рис. 30). Аморфный же селен принадлежит к группе диэлектриков.

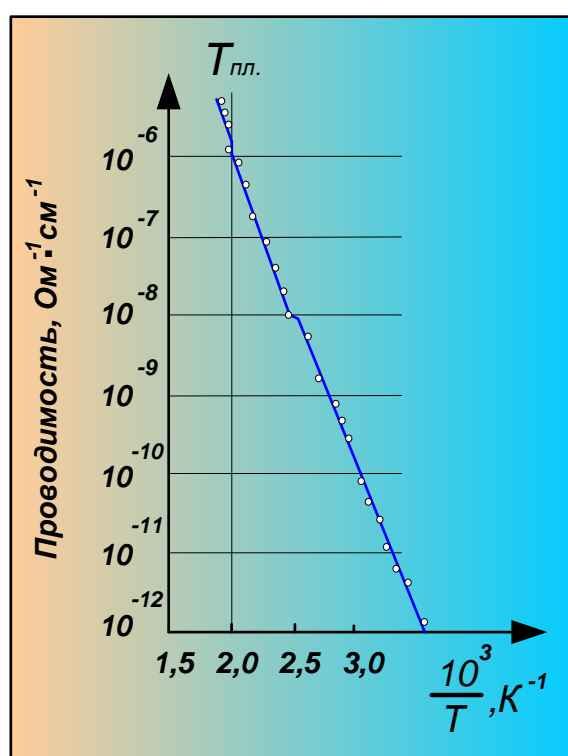


Рис.30. Зависимость проводимости поликристаллического селена от температуры.

Электрическое сопротивление серого селена уменьшается при введении в него примесей, что используется для увеличения прямых токов в выпрямителях. В качестве таких примесей применяются галоиды (Cl₂, Br₂, I₂). Наконец следует отметить, что при освещении селена ток возрастает, что даёт возможность использовать его для изготовления фотосопротивлений.

Селен используется для изготовления фотоэлементов, преобразующих световую энергию в электрическую. Особенно же широко применяется он для изготовления многочисленных селеновых выпрямителей.

В качестве материала для изготовления нелинейных сопротивлений особенно широкое применение получил поликристаллический материал – **карбид кремния (SiC)**. Из карбида кремния изготавливают вентильные разрядники для линий электропередач – устройства, соединяющие линию электропередачи с землёй. В них диски из нелинейного материала (карбида кремния) пропускают ток под действием волн, возникающих в линии перенапряжений, в результате чего восстанавливается нормальная работа линии, а при нормальном напряжении на линии сопротивления дисков возрастают, и ток утечки с линии на землю прекращается. Различают два вида карбида кремния, по цвету: зелёный и чёрный, отличающиеся ещё друг от друга по типу проводимости, а именно: зелёный карбид кремния является полупроводником электронного (n – типа), чёрный – полупроводником дырочного (p – типа).