

A. Nazarow, B. Babaýew

# ELEKTROTEHNIKI MATERIALLAR

Ýokary okuw mekdepleri üçin okuw kitaby

*Türkmenistanyň Bilim ministrligi  
tarapyndan hödürlenildi*

Aşgabat  
Türkmen döwlet neşirýat gullugy  
2019

UOK 378:621.31

N 41

**Nazarow A., Babaýew B.**

**N 41 Elektrotehniki materiallar.** Ýokary okuw mekdepleri üçin okuw kitaby. – A.: Türkmen döwlet neşirýat gullugy, 2019.

Okuw kitabynda elektrotehniki materiallaryň dürli görnüşleri bolan dielektriklerde, metallarda, ýarymgeçirijilerde we magnit materiallarynda bolup geçýän esasy fiziki hadysalar, ol materiallaryň esasy elektrik, fiziki-himiki we mehaniki häsiýetleri beýan edilýär. Şeýle hem dürli elektrotehniki materiallary öndürmegiň tehnologiýasy barada maglumatlar berilýär.

Bu okuw kitaby elektroenergetika we elektrotehnika hünärleri boýunça okaýan ýokary okuw mekdepleriniň talyplary üçin taýýarlanyp, ondan orta hünär okuw mekdepleriniň talyplary, şeýle hem bu ugurda işleýän inženerler peýdalanyp bilerler.

TDKP № 175, 2019

KBK 31.23 ýa 73

©A. Nazarow, B. Babaýew, 2019.



**TÜRKMENISTANYŇ PREZIDENTI  
GURBANGULY BERDIMUHAMEDOW**





**TÜRKMENISTANYŇ DÖWLET TUGRASY**



**TÜRKMENISTANYŇ DÖWLET BAÝDAGY**

## TÜRKMENISTANYŇ DÖWLET SENASY

Janym gurban saňa, erkana ýurdum,  
Mert pederleň ruhy bardyr köňülde.  
Bitarap, garaşsyz topragyň nurdur,  
Baýdagyň belentdir dünýäň önünde.

*Gaýtalama:*

Halkyň guran Baky beýik binasy,  
Berkarar döwletim, jigerim-janym.  
Başlaryň täji sen, diller senasy,  
Dünýä dursun, sen dur, Türkmenistanym!

Gardaşdyr tireler, amandyr iller,  
Owal-ahyr birdir biziň ganymyz.  
Harasatlar almaz, syndyrmaz siller,  
Nesiller döş gerip gorar şanymyz.

*Gaýtalama:*

Halkyň guran Baky beýik binasy,  
Berkarar döwletim, jigerim-janym.  
Başlaryň täji sen, diller senasy,  
Dünýä dursun, sen dur, Türkmenistanym!

## SÖZBAŞY

Berkarar döwletimiziň bagtyýarlyk döwründe elektroenergetika ulgamy ýokary derejeli ösüslere we özgerişlere eýe boldy. Garaşsyz, hemişelik Bitarap Türkmenistan döwletimiziň sarp edijileriniň elektrik energiýa bolan islegi barha artýar. «Türkmenistanyň Prezidentiniň ýurdumyzy 2019–2025-nji ýyllarda durmuş-ykdysady taýdan ösdürmegiň Maksatnamasynyň», «Türkmenistanyň Prezidentiniň obalaryň, şäherçeleriniň, etraplardaky şäherleriň we etrap merkezleriniň ilatynyň durmuş-ýaşayş şertlerini özgertmek boýunça 2020-nji ýyla çenli döwür üçin milli Maksatnamasynyň» amala aşyrylmagy, täze zawod-fabrikleriň gurulmagy, täze şäherleriň, şäherçeleriň döredilmegi, ilatymyzyň ýaşayş-durmuş şertleriniň yzygiderli ýokarlandyrylmagy Türkmenistan döwletimiziň sarp edijileriniň elektrik energiýa bolan isleginiň artmagyna getirýär.

Hormatly Prezidentimiziň 2013-nji ýylyň 1-nji martynda geçen Türkmenistanyň Ministrler Kabinetiniň giňişleýin mejlisinde beren tabşyryklaryna laýyklykda işlenip taýýarlanylan, «Türkmenistanyň elektrik energetika pudagyny ösdürmegiň 2013 – 2020-nji ýyllar üçin Konsepsiýasyna» laýyklykda ýurdumyzyň ähli welaýatlarynda dürli kuwwatlykly, dünýäniň öndebaryjy kompaniýalarynyň iň kämil elektrik enjamlary bilen üpjün edilen döwrebap elektrik podstantsiýalar we elektrik stansiýalar gurlup ulanylmaga berilýär. Konsepsiýany durmuşa geçirmegiň ikinji tapgyrynda, ýagny 2017–2020-nji ýyllarda umumy kuwwatlylygy 1622 *MWt* bolan 6 sany elektrik stansiýasyny gurmak göz önünde tutulýar. Ýokarda aýdylanlar göz önüne tutulanda, 2020-nji ýylda pudagyň önümçilik kuwwatlylygy 6344 *MWt*, elektrik energiýasynyň sarp edilişi bolsa 5988 *MWt*-a ýetiriler we bu görkezijiler 2016-njy ýyla garanynda, degişlilikde, 127% we 146% möçberde artar.

Hormatly Prezidentimiz 2015-nji ýylyň 22 – 25-nji iýunynda Mary welaýatynda iş sapary bilen bolanda, türkmen halkynyň taryhyna altyn harplar bilen ýazylan wakalaryň biri bolup geçdi. Hormatly Prezidentimiz Mary Döwlet elektrik stansiýasyna baryp, bu ýerde bina ediljek, utgaşykly dolanyşykly işleýän elektrik stansiýanyň tanyşdyrylyş dabarasyna gatnaşdy hem-de elektrik stansiýany gurmak barada karara gol çekdi. Bu elektrik stansiýanyň göz önüne tutulan kuwwatlylygy 1574 *MWt* bolup, düzüminde jemi 6 sany turbinalar ýerleşdirilip, olaryň dört sanysy «Jeneral elektrik» 9FA kysymly gaz turbinalaryny, iki sany bug turbinalaryny hem-de dört sany bug gazanlaryny we kömekçi enjamlaryny özünde jemleýär.

Şeýle hem öndürjek elektrik energiýasy 220 *kW* we 500 *kW* naprýaženiýeli elektrik podstansiýalary arkaly Türkmenistanyň bitewi elektrik ulgamyna birleşdirler. Utgaşykly-dolanyşykly görnüşde işleýän elektrik stansiýalarda elektrik energiýasy gaz turbina generatorlarynda hem-de bug turbina generator ulgamlary arkaly öndürilmeli. Munuň netijesinde netijelilik 57%-e çenli ýokarlanýar. Elektrik stansiýanyň utgaşykly-dolanyşykly işlemekligi öndürilýän 1 *kWt* elektrik energiýasyny öndürmek üçin harç edilýän tebigy ýangyjy hem-de daşky gurşawa zyňlyýan galyndy gazlaryň möçberini birnäçe esse azaldar. Bu bolsa elektrik stansiýanyň düzüminde dünýä tehnologiýasynyň soňky gazanan, biziň howa şertlerimize laýyk gelýän elektrik enjamlarynyň ornaşdyrylmagy bilen baglanyşyklydyr. Bu utgaşykly dolanyşykda işleýän gaz-bug turbina elektrik stansiýasy 2018-nji ýylyň 8-nji sentýabrynda hormatly Prezidentimiziň hut özüniň gatnaşmagynda işe girizildi. Sebitde deňi-taýy bolmadyk bu elektrik stansiýa diňe bir Türkmenistan döwletimiziň elektrik energiýa bolan islegini kanagatlandyrmak bilen çäklenmän, eýsem, daşary ýurtlara elektrik energiýasyny eksport etmäge mümkinçilik berer. Bu bina edilen elektrik stansiýasy biziň döwletimizde utgaşykly-dolanyşykly işleýän elektrik stansiýalaryň ilkinjisidir. Bu ýokary kuwwatly elektrik stansiýa geljekde halkymyza hyzmat edip, diňe bir Türkmenistan döwletimiziň içerki elektrik energiýasyny sarp edijileriniň talabyny kanagatlandyrmak bilen çäklenmän, eýsem, daşary döwletlere ibermekligi meýilleşdirilýän elektrik energiýanyň mukdaryny artdyrar. Milli konsepsiýamyzda göz önünde tutulan çäreleriň durmuşa geçirilmeginde,



ilkinji nobatda, ýerli hünärmenlerimiziň, şonuň bilen birlikde, daşary ýurtly hyzmatdaşlarymyzyň tejribesi ulanylar. Şu maksat bilen, 2013–2020-nji ýyllarda ýurdumyzyň energetika ulgamyny ösdürmek we onuň ygtybarlylygyny ýokarlandyrmak üçin hünärmenleri taýýarlamak, ösen tehnologiýaly enjamlary dogry we ýerlikli ulanmak wajyp meseleleriň biri bolup durýar.

Häzirki zaman kuwwatly elektrik maşynlar, ýokary naprýaženiýeli enjamlar, ýarymgeçiriji abzallar, awtomatik gurluşlar, ýokary ýygyllykly gurnamalar, täze-täze materiallary, olary çuňňur öwrenmekligi we dogry saýlap almaklygy talap edýär. Elektroenergetikanyň çalt depginler bilen ösmegi ýokary hilli elektrotehniki materiallara hem talap güýçlenýär. Elektrotehniki gurluşlarda ulanylýan materiallaryň görnüşlerini artdyrmak, hilini yzygiderli ýokarlandyrmak talap edilýär.

«Elektrotehniki materiallar» dersiniň esasy maksady – elektrotehnikada giňden ulanylýan materiallaryň görnüşlerini, alnys tehnologiýasyny, esasy häsiýetlerini öwretmek we dürli maksatlar üçin olary saýlap almak endigini bermekden ybaratdyr. Şoňa görä «Elektrotehniki materiallar» dersini öwrenmeklik elektroenergetika bilen baglanyşykly hünärleriň inženerleri üçin zerur bolup durýar.

## ELEKTROTEHNIKI MATERIALLARYŇ TOPARLARA BÖLÜNIŞI. MADDALARYŇ IÇKI GURLUŞY

### 1.1. Elektrotehniki materiallaryň toparlara bölünşi

Elektroenergetikada ulanylýan ähli materiallara elektrotehniki materiallar diýilýär. Hemme elektrotehniki materiallar elektrik häsiýeti boýunça üç topara bölünýärler:

dielektrikler;

geçirijiler;

ýarymgeçirijiler.

Olar ulanyşlary boýunça aşakdaky ýaly görnüşde bölünýärler:

1. Elektroöörtük materiallar – polýarlanma hadysasyna ukyply bolan materiallar;

2. Geçiriji materiallar – elektrik toguny gowy geçirýän materiallar;

3. Ýarymgeçiriji materiallar – elektrik toguny geçirijiligi boýunça geçirijiler bilen dielektrikleriň arasynda ýerleşýärler. Şonuň üçin olara aramgeçirijiler hem diýilýär.

4. Magnit materiallar – daşky magnit meýdanynyň täsiri astynda magnitlenýärler.

### 1.2. Maddalaryň içki gurluşy. Himiki baglanyşyklar

Hemme maddalaryň fiziki häsiýetleri olaryň içki gurluşyna we olary düzýän atomlaryň we molekulalaryň arasynda ýüze çykyan baglanyşyklarynyň görnüşleri bilen kesgitlenilýär. Atomlaryň we molekulalaryň arasynda himiki baglanyşyklaryň 4 görnüşi bolýar:

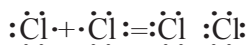
1. Kowalent baglanyşyk;

2. Ion baglanyşyk;

3. Metal baglanyşyk;

4. Molekulýar baglanyşyk.

**1. Kowalent baglanyşyk.** Bu baglanyşyk iki sany walent elektron iki atom üçin umumlaşyp, ol atomlary baglanyşdyrýar. Meselem, ýedi walentli hloruň iki atomly molekulasynda iki elektron umumlaşýar (1.1-nji çyzgy):

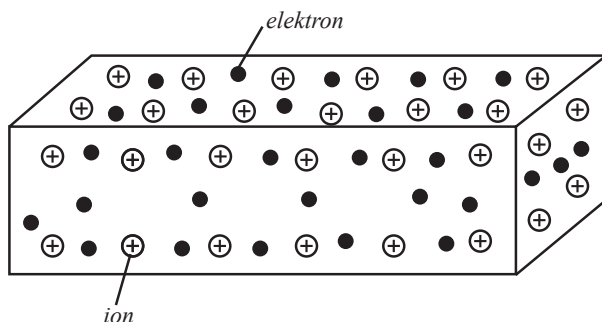


### 1.1-nji çyzgy. Hloruň molekulasynda kowalent baglanyşygyň şekillendirilişi

Ýarymgeçiriji kremnide we almazda 4 ugur boýunça 4 walent elektronlar umumlaşýarlar. Şeýlelikde, kowalent baglanyşyk aýratyn molekulalarda we gaty jisimleriň kristal gözeneginde hem bolup bilýär.

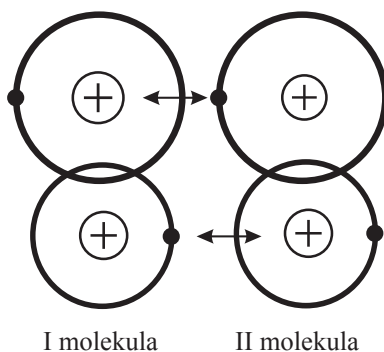
**2. Ion baglanyşyk.** Bu baglanyşyk položitel we otrisatel zarýadlanan ionlaryň arasynda ýüze çykýan Kulon dartýşma güýçleri bilen döredilýär. Ion baglanyşykly gaty jisimler ýokary mehaniki berkligi we ýokary ereme temperaturasy bilen tapawutlanýar. Olara NaCl (naha duzy), KCl, CsCl mysal bolup bilýär. Şeýlelikde, adaty şertlerde ion baglanyşykly gaty jisimler kristal maddalardyr.

**3. Metal baglanyşyk.** Bu baglanyşyk metallarda we metal galyndylarda emele gelýär. Olara düwünlerinde položitel ionlar ýerleşen kristal gözenekden we olaryň arasynda tertipsiz hereketde bolan umumlaşdyrylan elektronlardan düzülen ulgam görnüşinde seretmek bolar. Metal baglanyşyk umumlaşdyrylan elektronlar bilen atom galyndylarynyň, ýagny položitel ionlaryň arasynda ýüze çykýar. Metallarda ýokary elektrik geçirijiligiň we ýylylyk geçirijiligiň islenidik temperaturada bolmagy olarda erkin elektronlaryň köplügi bilen düşündirilýär (1.2-nji çyzgy).



### 1.2-nji çyzgy. Metallaryň gurluşy

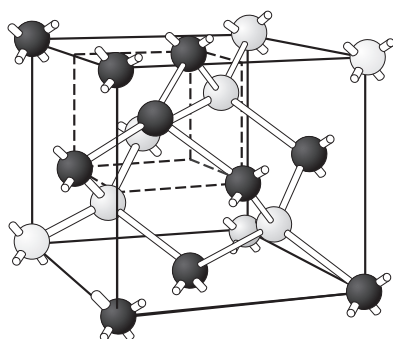
**4. Molekulýar baglanyşyk** (Wander-Waalsyň baglanyşygy). Bu baglanyşyk atomlarynyň arasynda kowalent baglanyşygy bolan molekulalaryň arasynda ýüze çykýar (*1.3-nji çyzgy*).



**1.3-nji çyzgy. Iki molekulanyň arasynda molekulýar baglanyşygyň ýüze çykyşynyň shemasy**

Islendik wagtda walent elektronlar öz ionyndan daşlaşýar, goňşy molekulanyň ionyna bolsa ýakynlaşyp, iki molekulanyň arasynda gowşak çekişme güýji döreýär. Bu baglanyşykly maddalaryň ereme temperaturasy pesdir, meselem, parafinde.

### 1.3. Kristal we amorf gurluşly materiallar

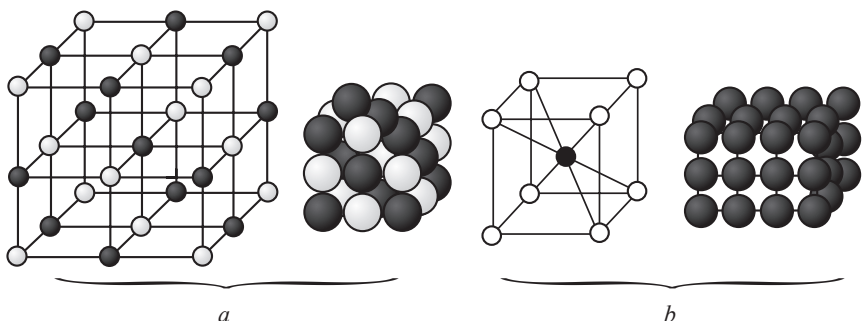


**1.4-nji çyzgy. Almazyň (kremniniň, germaniniň) kristal gurluşy**

Elektrotehniki materiallaryň köpüsi gaty jisimlerdir. Gaty jisimler özleriniň içki gurluşy boýunça kristal ýa-da amorf materiallara bölünýärler. Kristal materiallarda ony düzýän atomlar ýa-da ionlar giňişlikde, bellibir tertipde ýerleşýärler we kristal gözenegini emele getirýärler. Kristal gözeneklerde iň kiçi göwrümlü şekiller gaýtalanýarlar. Ol şekillere *elementar öýjükler*

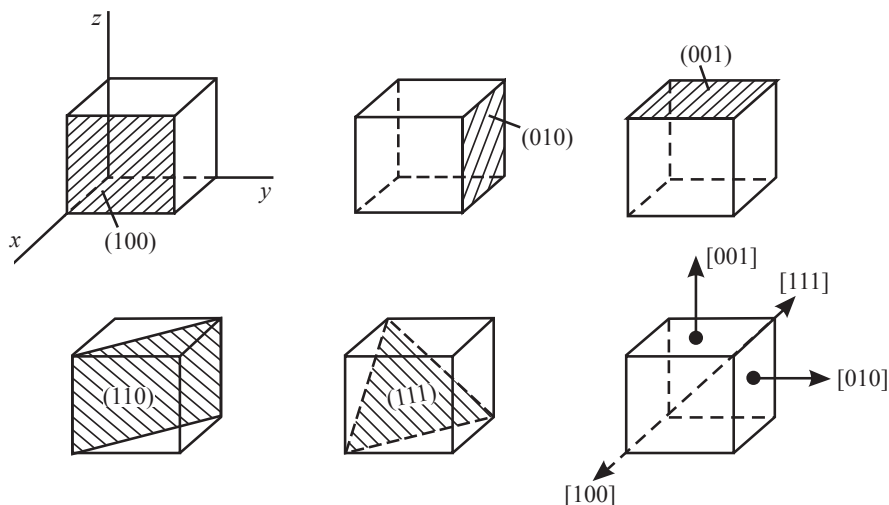
diýilýär. Elementar öýjükler örän köp dürli şekillerde bolup biler. Rus alymy E.S.Fýodorowyň kesgitlemegine görä, kristallaryň 32 sa-

ny simmetriýa synpy, 230 sany mümkin bolan topary bardyr. 1.4-nji çyzgyda almazyň (germaniniň, kremniniň) atomlarynyň, 1.5-nji çyzgyda bolsa natriý hloridiniň we seziý hloridiniň kristal gurluşlarynda ionlaryň ýerleşişleri görkezilýär. Kristal jisimler aýratyn uly kristal-monokristal ýa-da köp sanly maýda kristaljagazlardan düzülen polikristal görnüşde bolýar. Monokristallar anizotrop häsiýetlidir, ýagny olaryň köp fiziki häsiýetleri kristalyň ugruna baglydyr.



#### 1.5-nji çyzgy. Natriý hloridiniň (a) we seziý hloridiniň (b) kristal gurluşlary

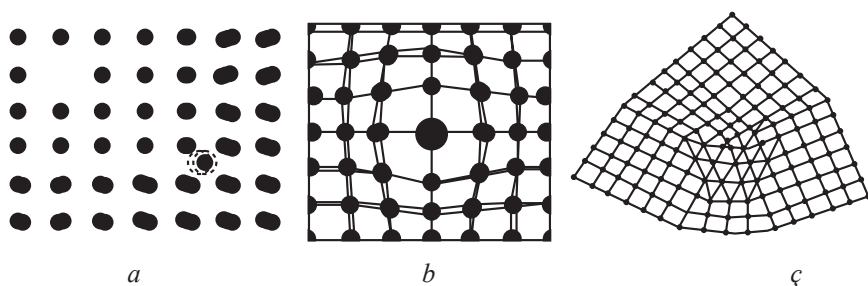
Kristallarda kristallografiki tekizlikleri we ugurlary bellemek üçin Milleriň indeksleri ulanylýar. Kub şekilli kristallar üçin ol indeksler 1.6-njy çyzgyda görkezilýär.



#### 1.6-njy çyzgy. Kristallarda kristallografiki tekizlikleriň we ugurlaryň Milleriň indeksleri bilen belgilenilişi

Onda (100) indeksler we  $z$  oklara parallel tekizligi, (010) indeksler  $x$  we  $z$  oklara parallel tekizligi, (001) indeksler bolsa  $x$  we  $y$  oklara parallel tekizligi aňladýar. Kub şekilli kristallarda  $x$  okunyň položitel ugry [100] indeksler bilen,  $y$  okunyň položitel ugry [010] indeksler bilen,  $z$  okunyň otrisatel ugry bolsa [001] indeksler bilen belgilenilýär. Kubuň diagonalyny [111] indeksler aňladýarlar.

**Kristal gözenegiň şikesleri.** Ideal dogry gurluşly kristallar tebigatda bolmaýar. Real şertlerde kristallardaky bölejikleriň periodiki ýerleşişlerinde dürli hili gyşarmalar duş gelýär. Ol gyşarmalar şikesler diýlip atlandyrylýar. Ol şikesler iki görnüşe bölünýär: dinamiki (wagtlaryn) we statiki (hemişelik) şikeslerdir. Kristala daşky mehaniki, ýylylyk, elektromagnit täsirleriň netijesinde dinamiki şikesler ýüze çykýarlar. Statiki şikesler atomlaryn (nokatlanç) we dowamly görnüşlere bölünýär. Nokatlanç şikesleriň görnüşleri bolan kristal gözenegiň düwnünde keseki atomyň ýerleşşi, boş düwn (wakansiýa) we dowamly şikes-dislokasiýasy 1.7-nji çyzgyda görkezilýär.



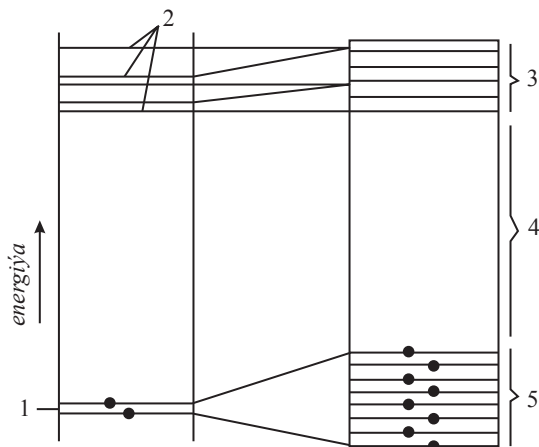
**1.7-nji çyzgy.** Kristal gözenegiň şikesleri: *a* – boş düwn (wakansiýa);  
*b* – gözenegiň düwnündäki keseki atom;  
*c* – dowamly şikes-dislokasiýa

Käbir gaty jisimlerde ony düzýän bölejikler giňişlikde tertipsiz ýerleşýärler. Şeýle hili gaty jisimlere *amorf materiallar* diýilýär. Kristal jisimlerden tapawutlylykda amorf materiallar izotrop häsiýetdedir, ýagny olaryň fiziki häsiýetleri jisimde saýlanyp alnan ugra bagly bolman, hemme ugurlar boýunça birmeňzeşdir. Amorf materiallara aýna we birnäçe plastikler mysal bolup biler. Olarda bellibir ereme temperaturasy bolman, ýeterlik derejede giň ýumşama temperatura aralygy bolýar. Derňewleriň görkezmegine görä, aýnalarda hem atomlaryň arasynda «ýakyn dereje», ýagny her atomyň ýakyn goňşularynyň kanunalaýyk ýerleşmeleri saklanýarlar.

## 1.4. Kristal gaty jisimleriniň energetik zolaklary baradaky nazaryýetiň esaslary

Belli bolşy ýaly, seýreklandirililen gazlarda, ýagny atomlar biri-birinden daş aralykda bolan her bir elementiň atomynyň elektronlarynyň bellibir energetik derejeleri bolýar. Kadaly şertlerde pes derejeler elektronlar bilen doldurylyp, daşky täsir netijesinde elektronlar ýokarky oýandyrylan derejelere geçip bilýärler.

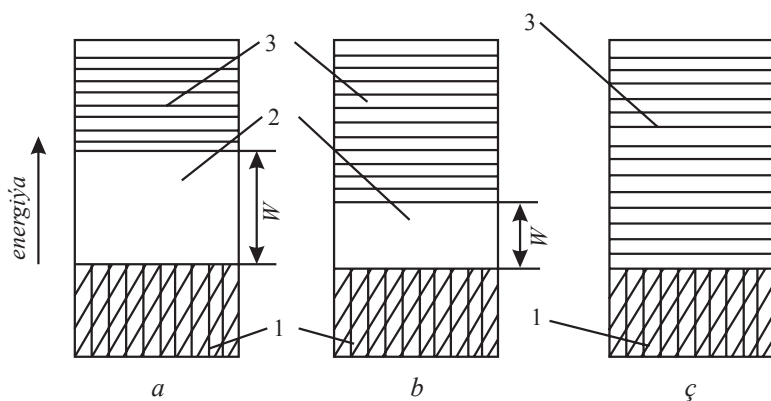
Suwuk we gaty maddalarda atomlaryň aradaşlygy kiçelip, özara täsirleri güýçlenýär. Netijede, atomlardaky doldurylan we oýandyrylan derejeler giňelip, aýratyn energetik zolaklary emele getirýärler, ýagny gaty jisimlerde atomlaryň aýratyn energetik derejelerinden energetik zolaklar emele gelýär (1.8-nji çyzgy).



**1.8-nji çyzgy.** Gaty jisimlerde aýratyn atomlaryň energetik derejelerinden energetik zolaklaryň emele gelşi. 1,2 – energetiki derejeler; 3 – geçiriji zolak; 4 – gadagan zolak; 5 – walent zolak

Gaty jisimlerde elektronlaryň alyp bilmejek energetik derejeleri gadagan zolagyny emele getirýärler. Walent elektronlaryň doldurylan derejelerinden emele gelýän zolaga *walent zolak* diýilýär. Atomlaryň oýandyrylan derejelerinden emele gelýän zolaga geçirijilik (*boş*) *zolagy* diýilýär.

Gaty jisimleriň elektrik (we beýleki) häsiýetleri olaryň zolak gurluşlaryna baglydyr. Dielektrikleriň, ýarymgeçirijileriň we metal-laryň zolak gurluşy (diagrammalary) 1.9-njy çyzgyda görkezilendir.



**1.9-njy çyzgy.** Gaty jisimleriň zolak gurluşy: *a* – dielektrik; *b* – ýarymgeçiriji, *ç* – metal. 1-walent zolak; 2-gadagan zolak; 3-geçirijilik (boş) zolagy

Bu çyzgydan görnüşi ýaly, dielektriklerde gadagan zolagyň giňligi uludyr. Ýarymgeçirijiler uly bolmadyk gadagan zolagy bilen dielektriklerden tapawutlanýarlar. Metallarda gadagan zolak ýokdur, şonuň üçin olar islendik temperaturada ýokary geçirijiliklidir. Dielektrikleriň we ýarymgeçirijileriň hem elektrik häsiýetleri olaryň zolak gurluşy bilen düşündirilýär.

## 1.5. Polýar we polýar däl molekulýar gurluşly maddalar

Belli bolşy ýaly, aýratyn molekulalaryň düzüminde položitel we otrisatel zarýadlar bolýar. Eger molekulalaryň düzümine girýän deňululykly položitel we otrisatel zarýadlaryň merkezleri bir nokatda gabat gelýän bolsa, onda şeýle molekulalara polýar däl molekula diýilýär. Eger-de molekuladaky položitel we otrisatel zarýadlaryň merkezleri gabat gelmeýän bolsa, onda ol molekula polýar ýa-da dipol molekula diýilýär. Dipol molekulalar dipol momenti  $P_e$  bilen häsiýetlendirilýär:

$$P_e = ql, \quad (1.1)$$

bu ýerde  $|q+|=|q-|$  – položitel (otrisatel) zarýadlaryň ululygy;

$l$  – položitel we otrisatel zarýadlaryň merkezleriniň aradaşlygy;

$P_e$  – näçe uly bolsa, molekulanyň şonça-da polýarlygy güýçlüdir.





## 2.1. Dielektriklerde elektrik hadysalary

Dielektrik materiallar özleriniň örän uly  $\rho$  udel garşylyklary bilen tapawutlanýarlar. Olarda adaty şertlerde udel garşylyk  $\rho=10^8\div10^{16} \text{ Om} \cdot \text{m}$  çäkdir. Kristal gurluşly dielektriklerde adaty ýagdaýlarda elektron elektrogeçirijilik aslynda ýüze çykmaýar, sebäbi ýokarda (I bapda) bellenişi ýaly, olaryň zolak gurluşynda gadagan zolagyň giňligi  $\Delta E$  has uludyr. Şoňa görä elektronlar doldurylan walent zondan erkin geçirijilik zolaga geçip bilmeýärler. Dielektriklerde daşky elektrik meýdanyň täsiri bilen birnäçe fiziki hadysalar bolup geçýär. Olar aşakdaky görnüşlere bölünýärler:

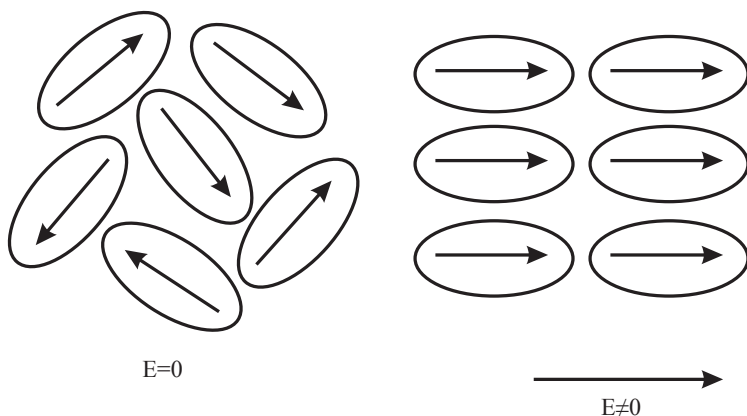
1. Polýarlanma hadysasy;
2. Elektrik geçirijilik hadysasy;
3. Dielektriklerde energiýa ýitgileri (dielektrik ýitgiler);
4. Dielektrikleriniň elektrik böwsülme hadysasy.

Bu hadysalar dielektrikleriniň esasy elektrik häsiýetlerini kesgitleýärler. Şonuň üçin olara aýratynlykda seredeliň.

## 2.2. Dielektriklerde polýarlanma hadysasy.

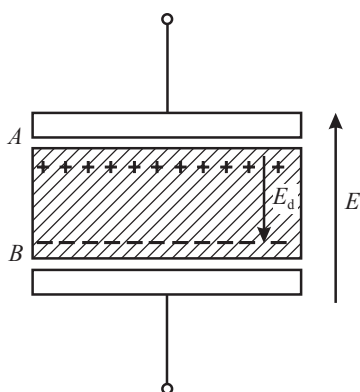
### Dielektrik syzyjylyk. Polýarlanmanyň görnüşleri

**Polýarlanma hadysasy. Dielektrik syzyjylyk.** Islendik dielektriklere daşky elektrik meýdany täsir edende, baglanyşykly zarýadlar bellibir derejede çäklendirilen ýagdaýda süýşýärler, dipol molekullar bolsa elektrik meýdanynyň ugruna görä öwrülýärler (2.1-nji çyzgy). Bu hadysa dielektriklerde polýarlanma hadysasy diýlip atlandyrylýar.



### 2.1-nji çyzgy. Dipol molekulaly dielektrikleriň polýarlanmasy

Goý, tekiz gaty dielektrik 2.2-nji çyzgyda görkezilişi ýaly, tekiz kondensatoryň elektrodларыnyň arasynda ýerleşdirilen bolsun. Eger



2.2-nji çyzgy. Dielektrikli tekiz kondensator

bu kondensatora  $U$  naprýaženiýe goýulsa, elektrodларыň arasynda  $E_d$  güýjenmeli elektrik meýdany döreýär. Bu meýdanyň täsiri bilen dielektrik polýarlanyp, onuň garşylykly  $A$  we  $B$  üstlerinde baglanyşykly  $q_b$  zarýadlar toplanýar.

Eger bu kondensatoryň elektrodларыnyň arasynda dielektrik bolman, wakuum bolan ýagdaýynda ondaky zarýady  $q_0$  bilen bellesek, onda dielektrikli kondensatorda jemleýji zarýad  $q$  aşakdaky formula bilen kesgitlener:

$$q = q_0 + q_b. \quad (2.1)$$

$q_b$  zarýad hem öz gezeginde dielektrigiň içinde elektrik meýdanyny döreder. Onuň güýjenmesini  $E_b$  bilen belläliň. Ol meýdan daşky  $E_d$  meýdanyň garşysyna ugrukdyrylan. Onda dielektrigiň içinde jemleýji elektrik meýdanyň güýjenmesi kiçeler, ýagny:

$$E' = E_d - E_b. \quad (2.2)$$

Dielektriklerin esasy parametrlerinden birine wakuuma görä dielektrik syzyjylyk ýa-da ýöne dielektrik syzyjylyk diýilýär. Ol  $\varepsilon$  bilen belgilenilýär we fiziki manysy boýunça dielektrigiň polýarlanmagy netijesinde şol dielektrikde wakuum bilen deňeşdirilende, elektrik meýdanyň güýjenmesiniň näçe esse kiçelýändigini görkezýär. Şeýlelikde,  $\varepsilon$  dielektrik syzyjylyk:

$$\varepsilon = \frac{E_d}{E} = \frac{E_d}{E_d - E_b} \quad (2.3)$$

formula bilen kesgitlenilýär. Wakuum üçin dielektrik syzyjylyk  $\varepsilon = 1$ . Berlen dielektrikde polýarlanma hadysasy näçe güýçli bolsa ( $q_b$  näçe uly bolsa),  $\varepsilon$  dielektrik syzyjylyk hem şonça uludyr. Belli bolşy ýaly, wakuumly tekiz kondensatoryň elektrik sygymy aşakdaky formula bilen kesgitlenilýär:

$$C_0 = \frac{\varepsilon_0 S}{d}. \quad (2.4)$$

Dielektrikli tekiz kondensatoryň elektrik sygymy aşakda görkezilen formula bilen kesgitlenilýär:

$$C_0 = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 S}{d}, \quad (2.5)$$

bu ýerde  $\varepsilon_0 \approx 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ F/m}$  – elektrik hemişeligi;

$S$  – elektrodalaryň meýdany,  $m^2$ ;

$d$  – dielektrigiň galyňlygy,  $m$ .

(2.4) we (2.5) formulalardan alarys:

$$\frac{C}{C_0} = \varepsilon. \quad (2.6)$$

Bu ýerde dielektrik syzyjylygy dielektrikli kondensatorda wakuumly kondensator bilen deňeşdirilende elektrik sygymyň näçe esse ulalýandygyny görkezýär.

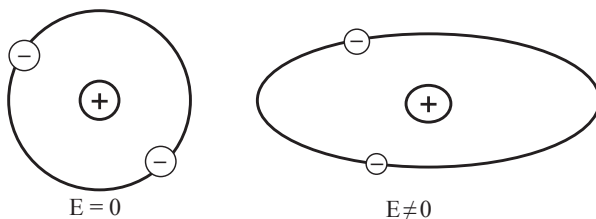
**Polýarlanmanyň görnüşleri.** Dielektriklerde polýarlanma hadysasy öwrenilende olary, esasan, iki görnüşe bölýärler:

1. Energiýa ýitgisiz, örän çalt bolup geçýän polýarlanma ( $10^{-13} \div 10^{-15} \text{ s}$ ).

2. Relaksasion polýarlanma. Olarda energiýa ýitgisi bolup, polýarlanma haýallyk bilen artýar we haýallyk bilen azalýar.

Energiýanyň ýitgisiz polýarlanmasy hem öz gezeginde iki görnüşe bölünýär: elektron we ion polýarlanma. Elektron polýarlanmada

atomlaryň we ionlaryň elektron gatlaklary maýyşgak süýnýärler we deformirlenýärler (2.3-nji çyzgy).



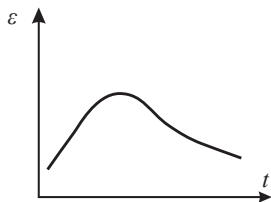
2.3-nji çyzgy. Elektron polýarlanma

Arassa elektron polýarlanmaly maddalarda dielektrik syzyjylyk  $\varepsilon=n^2$ . Bu ýerde  $n$  – maddanyň döwülme görkezijisi. Elektron polýarlanma hemme dielektriklerde bolup bilýär we ol energiýa ýitgisine bagly däldir. Şeýle-de bolsa, elektron polýarlanma temperaturanyň ýokarlanmagy bilen peselýär. Sebäbi temperaturanyň ýokarlanmagy bilen madda giňelip, onuň dykzlygy kiçelýär.

Ion polýarlanma, esasan, ion gurluşly gaty jisimlerde bolýar we özara maýyşgak baglanyşan ionlaryň süýşmesi netijesinde ýüze çykýar. Bu polýarlanma hem energiýa ýitgisiz, gysga wagtda ( $10^{-13}s$ ) bolup geçýär. Temperaturanyň ýokarlanmagy bilen ion polýarlanma güýçlenýär, sebäbi temperaturanyň ýokarlanmagy bilen ionlaryň arasyndaky maýyşgak özara täsir güýçler gowşaýar we ionlaryň arasy giňelýär.

*Dipol – relaksasion polýarlanma.* Bu polýarlanma polýar (dipol) molekulalardan düzülen gazlarda, suwuklyklarda we käbir gaty molekulýar organiki maddalarda bolup bilýär. Daşky elektrik meýdanynyň täsiri bilen polýar (dipol) molekulalar meýdanyň ugruna görä öwrülýärler (2.1-nji çyzgy). Olar öwrülende olara içki sürtülme güýçleri – şepbeşiklik güýçleri täsir edýär. Ol güýçlere garşy energiýa sarp edilýär, ýagny energiýa ýitgisi ýüze çykýar. Bu polýarlanma temperaturanyň ýokarlanmagy bilen ilki köpeliýär, soňra ýene-de temperaturanyň has ýokarlanmagy bilen peselýär. Sebäbi ilki başda temperaturanyň artmagy bilen şepbeşiklik kiçelip, dipollaryň öwrülmesi ýeňilleşýär. Soňra has ýokary temperaturalarda molekulalaryň hususy ýylylyk yrgyldyly hereketi güýçlenip, öwrülme kynlaşýar. Ýokarda belenilişi ýaly, dielektrikleriň polýarlanma derejesi dielektrik syzyjylygynyň bahasy bilen kesgitlenilýär. Şoňa görä, dipol-relaksasion

polýarlanmada dielektrik syzyjylygyň temperatura baglylygynyň grafigi maksimumdan geçýär (2.4-nji çyzgy).



**2.4-nji çyzgy. Dipol-relaksasion polýarlanmada  $\varepsilon$  dielektrik syzyjylygyň temperatura baglylyk grafiginiň umumy görnüşi**

Polýarlanmanyň bu görnüşinde daşky elektrik meýdanynyň täsiri kesilse-de, polýarlanma derejesi kem-kemden peselýär. Dipol molekulalaryň ýylylyk hereketi netijesinde polýarlanma derejesiniň başlangyç bahasyndan 2,7 esse peselme wagtyna relaksasiýa wagty diýilýär.

*Ion-relaksasion polýarlanma.* Polýarlanmanyň bu görnüşi organiki däl aýnalar da we kristal gözenegi ionlar bilen doly doldurylmadyk organiki däl maddalarda ýüze çykýar. Bu polýarlanmada maddanyň gowşak baglanyşykly ionlary daşky elektrik meýdanynyň täsiri bilen meýdanyň ugruna, kristal gözeneginiň hemişeliginden uly aralyga süýşýärler. Elektrik meýdany aýrylandan soň, olar ýene kem-kemden öz deňagramlaşan orunlaryna gaýdyp gelýärler. Şonda polýarlanma eksponensial kanun boýunça peselýär. Temperaturanyň ýokarlanmagy bilen bu polýarlanma güýçlenýär.

*Elektron-relaksasion polýarlanma.* Bu polýarlanma ýylylyk energiýasynyň hasabyna oýandyrylan artykmaç «şikesli» elektronlar we deşijekler bilen ýüze çykarylýar. Polýarlanmanyň bu görnüşi uly döwürleme görkezijili we ýokary elektronly elektrik geçirijilikli gaty jisimlerde (meselem,  $\text{Nb}^{+5}$ ,  $\text{Ba}^{+2}$ ,  $\text{Ca}^{+2}$  garyndyly titanyň dioksidinde) ýüze çykýar. Bu polýarlanmada  $\varepsilon$  dielektrik syzyjylygy uludyr we  $\varepsilon=f(t^\circ)$  baglanyşykda maksimum emele gelýär. Meselem, rutilde ( $\text{TiO}_2$ )  $\varepsilon=110$ , kalsiniň titanatynda  $\varepsilon=150$ .

*Migrasion polýarlanma.* Polýarlanmanyň bu görnüşi polýarlanmanyň goşmaça serişdeleri bolmak bilen makroskopik deňdeş däl gurluşly gaty garyndylarda ýüze çykýar. Ol materiallar elektrik meýdanynda ýerleşdirilende erkin elektronlar we ionlar geçiriji ýa-da ýarymgeçiriji bölekleriň içinde hereket edip, örän uly polýarlanan

molekula meňzeş bölegi emele getirýärler. Gatlakly materiallaryň gatlaklarynyň çäklerinde we elektrodlara ýakyn gatlaklarda zaryadlaryň toplanmasy döräp, migrasion polýarlanma ýüze çykýar.

### 2.3. Gazlarda, suwuk we gaty dielektriklerde dielektrik syzyjylyk

**Gazlarda dielektrik syzyjylyk.** Gaz halyndaky maddalar has kiçi dykyzlygy bilen tapawutlanýarlar. Şoňa görä olarda molekulalar biri-birinden has daş aralykda bolup,  $\epsilon$  dielektrik syzyjylygynyň 1-den az möçberde tapawutlanýar. Gazlarda, esasan, elektron polýarlanmanyň bolýanlygy sebäpli,  $\epsilon$  dielektrik syzyjylyk döwme görkezijiniň kwadratyna deňdir.

2.1-nji tablica

Käbir gazlaryň döwme görkezijileri we dielektrik syzyjylyklary

Gaz	Molekulasynyň radiusy, $nm$	Döwme görkezijisi, $n$	$n^2$	Dielektrik syzyjylygy, $\epsilon$
Geliý	0,112	1,000035	1,000070	1,000072
Wodorod	0,135	1,00014	1,00028	1,00027
Kislorod	0,182	1,00027	1,00054	1,00055
Argon	0,183	1,000275	1,00055	1,00056
Azot	0,191	1,00030	1,00060	1,00060
Kömürturşy gazy	0,230	1,00050	1,00100	1,00096
Etilen	0,278	1,00065	1,00130	1,00138

**Bellik.** 2.1-nji tablisada berlenler 20°C temperaturada we 760 mm sim.süt. (0,1 MPa) basyşda alnan.

Gazlarda  $\epsilon$  dielektrik syzyjylygy temperatura we basyşa baglydyr. Sebäbi gazlarda  $n$  molekulalaryň sany basyşa göni proporsional, temperatura bolsa ters proporsional üýtgeýär.

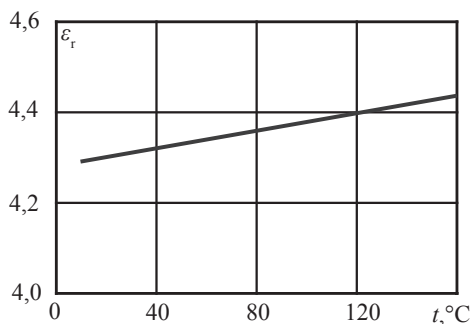
**Suwuk dielektriklerde dielektrik syzyjylyk.** Suwuk dielektrikler polýar däl we polýar (dipol) molekulalardan düzüldir. Polýar däl molekulaly dielektrik suwuklyklarda  $\epsilon$  dielektrik syzyjylyk uly däldir we  $n$  döwme görkezijiniň kwadratyna takmynan deňdir. Olarda  $\epsilon$  dielektrik syzyjylyk 2,5-den uly bolmaýar. Polýar molekulaly dielektrik suwuklyklarda bir wagtda elektron we dipol-relaksasion polýarlanma bolýar.

Ol suwuklyklaryň dielektrik syzyjylygy polýar molekularyň elektrik momentine we konsentrasiýasyna baglylykda has uludyr. 2.2-nji tablisa-da deňeşdirmek üçin polýar däl we polýar molekulary suwuklyklaryň 20°C temperaturada  $\epsilon$  dielektrik syzyjylygynyň bahalary görkezilýär.

2.2-nji tablisa

№	Suwuklyklar	Polýarlyk derejesi	Dielektrik syzyjylygy, $\epsilon$
1	Benzol	polýar däl	2,2
2	Transformator ýagy	polýar däl	2,3
3	Benzin	polýar däl	2,0
4	Sowol	polýar	4,5
5	Kastor ýagy	polýar	4,6
6	Aseton	güýçli polýar	22,0
7	Etil spirti	güýçli polýar	33,0
8	Distillirlenen suw	güýçli polýar	81,0

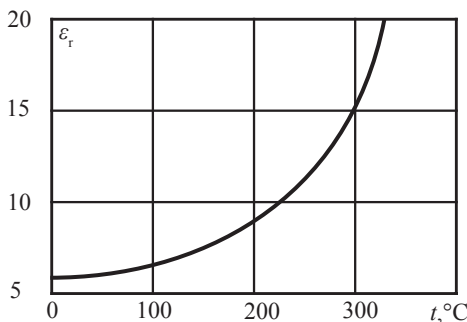
**Gaty dielektriklerde dielektrik syzyjylyk.** Gaty dielektriklerde olaryň içki gurluşyna baglylykda polýarlanmanyň hemme görnüşleri bar. Polýar däl molekulary gaty dielektriklerde hem polýar däl dielektrik molekulary suwuklyklardaky ýaly, dielektrik syzyjylyk  $\epsilon=n^2$ . Ol 2.3-nji tablisada görkezilendir. Kristallik gözenekleri doly doldurylan ion kristally gaty dielektriklerde elektron we ion polýarlanmalar bolmak bilen  $\epsilon$  dielektrik syzyjylyk temperaturanyň giň aralygynda ösýär (2.5-nji çyzygy).



2.5-nji çyzygy. KCl ionly kristallarda  $\epsilon=f(t^\circ)$  baglanyşygyň grafigi

Kristal gözenekleri doly doldurylmadyk ion kristally gaty dielektriklerde (meselem, elektrotehniki farforda) elektron we ion polýarlan-

madan başga ion-relaksasion polýarlanmanyň hem bolýanlygy sebäpli olarda  $\varepsilon$  dielektrik syzyjylyk we  $\varepsilon$ -niň temperatura koeffisiýenti has uludyr (2.6-njy çyzgy).



**2.6-njy çyzgy.** Elektrotehniki farforda  $\varepsilon=f(t^\circ)$  baglanyşygyň grafigi

2.3-nji tablisada ion kristally gaty dielektrikleriniň birnäçesiniň  $20^\circ\text{C}$  temperaturada  $\varepsilon$  dielektrik syzyjylygynyň bahalary görkezilýär.

2.3-nji tablisada

№	Kristallar	$\varepsilon$
1	Daş duzy	6
2	Korund	10
3	Rutil	110
4	Kalsiniň titanaty	150

## 2.4. İşjeň dielektrikler we olaryň ulanylyşy

Hemme dielektrikleri ulanylyşy boýunça iki topara bölýärler:

1. Elektroörtük material hökmünde we kondensatorlarda ulanylýan dielektriklere adaty (passiw) dielektrikler diýilýär.

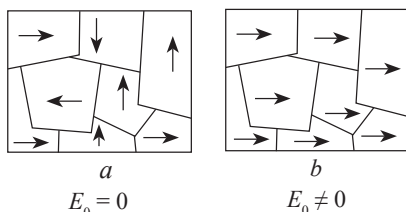
2. Fiziki häsiýetleri daşky täsirlere funksional bagly dielektriklere işjeň (aktiw) dielektrikler diýilýär.

Işjeň dielektrikleriniň fiziki häsiýetlerini daşky energetiki täsirlere bilen bellibir funksional baglanyşykda dolandyrmak bolýar. Şonuň üçin olar elektron tehnikasynda we awtomatik dolandyrylyşlarda giňden ulanylýar. İşjeň dielektriklere segnetoelektrikler, pýezoelektrikler, piroelektrikler, elektretler, suwuk kristallar we ş.m. degişlidir. Olaryň käbirine gysgaça seredip geçeliň.

**Segnetoelektrikler.** Gaty organiki däl dielektrikleriniň bir toparynda daşky elektrik meýdany täsir etmeýän ýagdaýynda öz-özünden polýarlanma bolup geçýär. Olara segnetoelektrikler diýilýär. Olarda öz-özünden polýarlanma ýüze çykýan makroskopik bölekler bar. Ol bölekler



domenler diýilýär. Her domeniň içinde polýarlanma netijesinde has uly  $P$  elektrik momenti döreýär. Daşky elektrik meýdanynyň täsir etmeýän ýagdaýynda domenleriň elektrik momenti tertipsiz ugrukdyrylan bolup, olar biri-birini kompensirleýärler.



### 2.7-nji çyzgy. Segnetoelektriklerde polýarlanmanyň şekillendirilişi:

$a$  – elektrik meýdanynyň täsiriniň ýok ýagdaýynda ( $E_0 = 0$ );

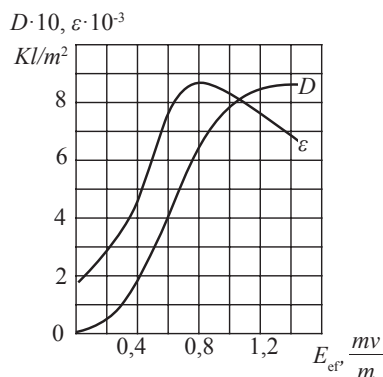
$b$  – elektrik meýdanynyň täsir edýän ýagdaýynda ( $E_0 \neq 0$ )

Daşky  $E_0$  elektrik meýdanyň täsiri bilen domenler elektrik meýdanyň ugruna görä kem-kem öwrülýärler (2.7-nji  $b$  çyzgy).

Segnetoelektriklerde her domeniň elektrik momenti  $P_d$  dipol molekulanyň elektrik momentinden münlerçe esse uludyr. Şoňa görä segnetoelektrikler örän uly dielektrik syzyjylygy bilen tapawutlanýarlar. Aşakda olaryň birnäçesi görkezilýär:

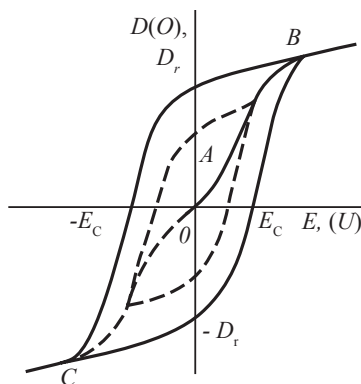
1. Segnet duzy ( $\text{NaKC}_4\text{H}_4\text{O}_6 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ )  $\varepsilon = 500 \div 600$ ;
2. Bariý titanaty ( $\text{BaTiO}_3$ )  $\varepsilon = 1500 \div 2000$ ;
3. Garyndyly bariý titanaty  $\varepsilon = 7000 \div 9000$ .

Segnetoelektrikleriň domenli gurluşynyň netijesinde olarda  $D$  elektrik induksiýa we  $E$  elektrik meýdanynyň güýjenmesiniň arasynda çyzyksyz baglanyşyk ýüze çykýar. Ol baglanyşygyň we  $\varepsilon = f(E)$  baglanyşygyň grafikleri bariniň titanaty üçin 2.8-nji çyzgyda görkezilýär.



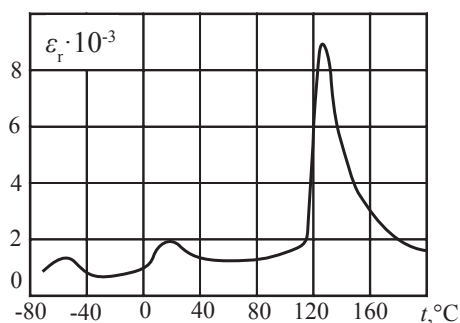
2.8-nji çyzgy. Bariý titanaty üçin  $D=f(E)$  we  $\varepsilon=f(E)$  baglanyşyklaryň grafikleri

Ondan başga-da segnetoelektriklerde domen gurluşa baglylykda üýtgeýän naprýaženiýäniň bir döwrüniň (periodynyň) dowamynynda  $D=f(U)$  baglanyşykda dielektrik gisterezis halkasy emele gelýär (2.9-njy çyzgy).



**2.9-njy çyzgy.** Segnetoelektriklerde polýarlanmanyň esasy egri çyzygy we dielektrik gisterezis halkasy

Segnetoelektriklerde bellibir temperaturada dielektrik syzyjylyk duýdansyz ýokarlanýar. Ol temperatura Kýuriniň nokady (temperaturasy) diýilýär. Bariý titanaty üçin  $\varepsilon(t^\circ)$  baglanyşyk 2.10-njy çyzgyda görkezilýär. Kýuri temperaturasyndan ýokary gyzdýrylanda segnetoelektrik häsiýet ýitirilýär. Emma olary  $t_k$  temperatura çenli gyzdýryp, ýene sowadylsa, dielektrik syzyjylyk öňki bahasyna gaýdyp gelýär. BaTiO<sub>3</sub> üçin Kýuri temperaturasy  $t_k = 125^\circ\text{C}$ .



**2.10-njy çyzgy.** Gowşak elektrik meýdanyndaky bariý titanatynda dielektrik syzyjylygyň temperatura baglylygy

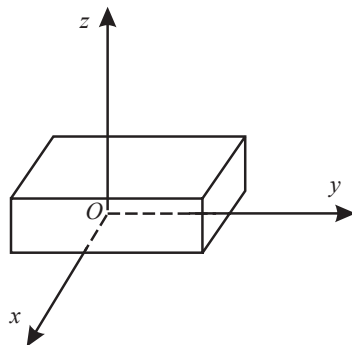
Segnetoelektrikleriň elektrotehnikada ulanylyşy barada aşakdaky mysallary getirmek bolar:

1. Segnetoelektrikleriň örän uly dielektrik syzyjylygy olary adaty (passiw) dielektrikler bilen garyşdyryp, uly dielektrik syzyjylykly dürli segnetokeramika materiallary taýýarlamaga mümkinçilik berýär. Olar bolsa kiçi göwrümlü, uly elektrik sygymly kondensatorlary ýasamakda ulanylýar.

2. Segnetoelektrikleriň  $\varepsilon$  dielektrik syzyjylygynyň goýlan naprýaženiýe çyzyksyz güýçli baglanyşygynyň esasynda ýöriteleşdirilen kondensatorlar-warikondlar ýasalýar. Warikondlar elektrik zynjyrlarynda naprýaženiýä gözegçilik etmekde ulanylýar.

**Pýezoelektrikler.** Pýezoelektrik hadysasy güýçli ýüze çykýan dielektriklere pýezoelektrikler diýilýär. Bu täsir 1880-nji ýylda doganlar Žan we Pýer Kýuriler tarapyndan açylýar. Ol kristal kwarsda we hemme segnetoelektriklerde ýüze çykýar. Pýezoelektrik häsiýet iki görnüşde ýüze çykýar: göni pýezoelektrik we ters pýezoelektrik häsiýetler. Göni pýezoelektrik hadysasynda kristala mehaniki güýç täsir edende polýarlanma ýüze çykýar we kristalyň garşylykly granlarynda elektrik zarýady döreýär.

Kwars kristalyndan granlary  $Oz$  optiki oka,  $Oy$  mehaniki oka we  $Ox$  elektrik okuna perpendikulýar edilip, tekiz plastinka kesilip alnan bolsun (2.11-nji çyzgy).



### 2.11-nji çyzgy. Kwars kristalyndan kesilip alnan nusga

Onda  $Ox$  oky boýunça ugrukdyrylan  $F_x$  mehaniki güýjüň täsiri bilen  $Ox$  oka perpendikulýar, garşydaş granlaryň üstünde  $q_x$  elektrik zarýady döreýär. Ol zarýad:

$$q_x = k F_x. \quad (2.7)$$

Bu ýerde  $k$  ululyga pýezomodul diýilýär. Ol hemme ulanylýan pýzeoelektriklerde takmynan  $k=10^{-19} \text{ Kl/V}$ .

Ters pýzeoelektrik hadysasynda daşky elektrik meýdanyň täsiri bilen kristal polýarlanýar we mehaniki deformirlenme ýüze çykyp, kristalyň ölçegi  $\frac{\Delta l}{l_0}$  üýtgeýär:

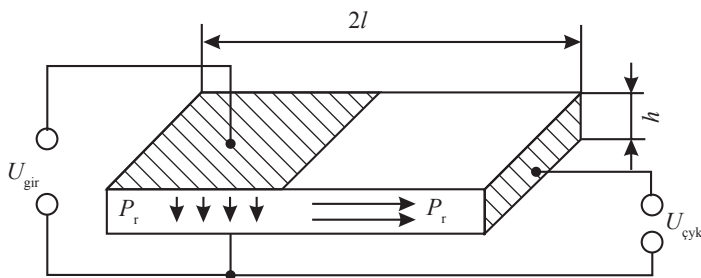
$$\frac{l - l_0}{l_0} = \frac{\Delta l}{l_0} = k E_x \text{ ýa-da } \Delta l = k l_0 E_x, \quad (2.8)$$

bu ýerde  $l_0$  we  $l$  – kristalyň  $Ox$  oky boýunça başlangyç we soňky ölçegleri.

Göni we ters pýezohadysalarda pýezomodul  $k$ -nyň birmeňzeş bolýandygyny bellemeli. Tehnikada göni pýzeoelektrik hadysasy mikrofonlarda, adaptorlarda giňden ulanylýar.

Eger pýezokristal plastinkasy üýtgeýän elektrik meýdanynda ýerleşdirilse, onda ters pýezotäsir etme boýunça elektrik meýdanyň ýygylgyna deň bolan ýygylkly yrgyldy (titreme) ýüze çykýar. Bu usul dürli ýygylkly ultrasesleri almak üçin ulanylýar. Häzirki wagtda pýezokristal hökmünde, esasan, tebigy kwars, dürli segnetoelektrikler – segnet duzy, litiniň sulfaty –  $\text{Li}_2\text{SO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ , segnetoelektrik gaty garyndylar –  $\text{PbTiO}_3$  ulanylýar.

Elektroenergetikler üçin has gyzykly gurluş – pýezotransformatordyr. Olar pes naprýaženiýeden ýokary naprýaženiýe almak üçin niýetlenen. Ol transformatoryň gurluş shemasy 2.12-nji çyzgyda berilýär.



**2.12-nji çyzgy. Ýokary woltly pýzeoelektrik transformator**

Ol transformator pýzeoelektrik materialdan plastinka görnüşde ýasalýar. Ol plastinkanyň ýarysy  $l$  yrgyldyny oýandyryjy plastinka-

nyň galyňlygy boýunça polýarlanylýar, plastinkanyň beýleki ýarysy (generator) bolsa plastinkanyň uzynlygyna ugurdaş polýarlanýar.

Oýandyryja goýlan üýtgeýän  $U_{\text{gir}}$  naprýaženiýe plastinkanyň uzynlygy boýunça rezonans mehaniki yrgyldy, öz gezeginde generator bölekde uly  $U_{\text{çyk}}$  çykyş elektrik naprýaženiýäni döredýär. Bu transformatorlary  $10 \div 500 \text{ kGs}$  ýygylklarda işleýän we transformasiýa koeffisiýenti 50 we ondan ýokary bolan görnüşlerde taýýarlamak bolýar. Olaryň transformasiýa koeffisiýenti  $2l/h$  gatnaşyga proporsional bolýar.

Bu transformatorlar elektron-şöhle turbalarda, gazrazýad abzallarda peýdalanylýar, ýokary woltly impulsalary almak üçin ulanylýar. Olarda magnit materiallar ulanylmaýar. Bu transformatorlar gurluşy boýunça sada, kiçi massaly we kiçi göwrümlidir.

## 2.5. Dielektriklerde elektrik geçirijilik. Gazlarda we suwuklyklarda elektrik geçirijilik

**Umumy düşüňjeler.** Dielektriklerde polýarlanma hadysasy bolup gutarýança baglanyşykly zarýadlaryň süýşmesi bolup geçýär, ýagny gysga wagtlaýyn elektrik togy döreýär. Ol toklara süýşme toklar diýilýär. Elektron we ion polýarlanmalarda süýşme toklar örän gysga wagtda ( $10^{-13} \div 10^{-15} \text{ s}$ ) bolup geçýär we olary ölçege abzallar bilen ölçäp hem bolmaýar.

Has haýal bolup geçýän relaksasion polýarlanmalarda ýüze çykýan süýşme toklaryna absorbsion toklar diýilýär. Hemişelik naprýaženiýelerde olar diňe elektrik zynjyr çeşmä birikdirilen we ýazdyrylan pursatlarynda ýüze çykýar. Üýtgeýän naprýaženiýede bolsa materiala täsir edýän elektrik meýdanyň hemme wagtynda dowam edýär.

Tehniki dielektriklerde az mukdarda erkin zarýadlaryň bar bolmagy olarda örän gowşak göwrümleýin elektrik togunyň ýüze çykmagyna getirýär.

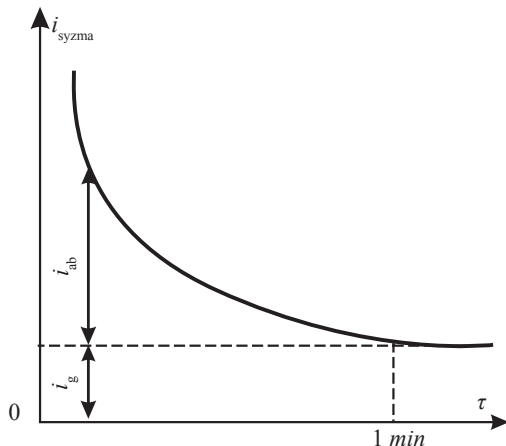
Şeýlelikde, tehniki dielektriklerde elektrik togunyň doly dykzylgy:

$$j = j_v + j_{ab}. \quad (2.8)$$

Bu ýerde:  $j_v$  – göwrümleýin toguň dykzyzlygy,  $j_{ab}$  – absorpsion toguň dykzyzlygy. Ol  $D$  elektrik süýşme wektorynyň üýtgeýiş tizligi bilen kesgitlenýär. Ýagny

$$j_{süýş} = j_{ab} = \partial D / \partial t.$$

Hemişelik naprýaženiýede dielektrikde doly toguň wagta görä üýtgemesiniň grafiginiň umumy görnüşi 2.13-nji çyzgyda görkezilen.



**2.13-nji çyzgy. Hemişelik naprýaženiýede dielektrikden akýan toguň wagta baglylygy**

Bu çyzgydan görnüşi ýaly, polýarlanma hadysasy geçip gutarandan soň dielektrikden diňe göwrümleýin tok akýar. Üýtgeýän naprýaženiýede olarda işjeň elektrik geçirijilik göwrümleýin  $i_g$  we absorpsion toklaryň işjeň düzüjileri bilen kesgitlenýär.

Dielektrigiň hakyky elektrik garşylygy adaty göwrümleýin tok bilen kesgitlenýär:

$$R_v = U / i_v. \quad (2.9)$$

$i_v$ -niň hakyky bahasyny almak üçin elektrik zynjyry çeşmä birikdirilen pursadyndan soň 1 minut garaşmaly.

Gaty dielektriklerde elektrik geçirijilik öwrenilende olaryň göwrümleýin we üst elektrik geçirijiliklerine aýratynlykda seretmek zerurdyr. Tekiz dielektriklerde deňdeş elektrik meýdanynda  $\rho_v$  göwrümleýin udel elektrik garşylyk:

$$\rho_v = R_v \cdot S / h; \quad [Om \cdot m]. \quad (2.10)$$

Göwrümleýin udel elektrik geçirijilik:

$$\sigma_v = \frac{1}{\rho_v} (1/ Om \cdot m = Om^{-1} \cdot m^{-1}; Sm/m)$$

formulalar bilen kesgitlenilýär. Bu ýerde:  $R_v$  – göwrümleýin garşylyk,  $Om$ ;  $S$  – elektrodalaryň meýdany,  $m^2$ ;  $h$  – nusganyň galyňlygy,  $m$ .

Üst udel garşylyk  $\rho_s$  aşadaky formula bilen kesgitlenilýär:

$$\rho_s = R_s \frac{d}{l}, (Om). \quad (2.11)$$

$R_s$  – ini  $d$  bolan, aradaşlygy  $l$ -e deň bolan iki parallel elektrodalaryň arasyndaky üst garşylykdur.

Üst udel elektrikgeçirijiligi:  $\sigma_s = \frac{1}{\rho_s}$ . Simensde ölçenilýär.

Gaty dielektrigiň doly elektrik geçirijiligi onuň göwrümleýin we üst elektrik geçirijilikleriniň jemine deň bolýar.

Dielektrikleriň elektrik geçirijiligi onuň agregat halyna, çyglygyna, temperatura we üst ýagdaýyna baglydyr. Gaty we suwuk dielektriklere naprýaženiýe uzak wagtlap täsir edende elektrik togy wagtyň geçmegi bilen kemelip ýa-da köpelip biler. Toguň peselmesi şol materialyň geçirijiliginiň keseki garyndylaryň ionlary bilen döredilýändigini we olaryň elektrodarda bitaraplaşýandyklaryny (neýtrallaşýandyklaryny) görkezýär. Toguň köpelmegi bolsa materialyň könelip, içki gurluşynyň bozulýandygyny – elektrik böwsülmäniň boljakdygyny aňladýar.

Belli bolşy ýaly, kondensatoryň dielektriginiň  $R$  garşylygynyň onuň  $C$  elektrik sygymyna köpeltmek hasylyna şol kondensatoryň öz-özünden zarýadsyzlanma wagtynyň hemişeligi diýilýär:

$$\tau_0 = R_{iz} \cdot C. \quad (2.12)$$

$\tau_0$ -y tejribede aşadaky formula esasynda kesgitläp bolýar:

$$U = U_0 e^{-\frac{\tau}{\tau_0}}, \quad (2.13)$$

bu ýerde  $U_0$  – ilki başdaky ( $\tau=0$ ) kondensatora goýlan naprýaženiýe;  $U-\tau$  wagt geçenden soň kondensatorda galan naprýaženiýe.

Onda (2.13) formulany logarifmläp alarys:

$$\tau_0 = \frac{\tau}{\ln \frac{U_0}{U}}, \quad (2.14)$$

$$\ln U = \ln U_0 - \frac{\tau}{\tau_0}. \quad (2.15)$$

Eger  $\frac{U_0}{U} = e = 2,73$  bolsa,  $\tau = \tau_0$ . Diýmek,  $\tau_0$  kondensatordaky ilkinji  $U_0$  naprýaženiýäniň  $e=2,73$  esse peselmegi üçin gerek bolan wagt bolýar.

Tekiz kondensatoryň içindäki tekiz dielektrigiň göwrümleýin garşylygy:

$$R_v = \rho_v \frac{h}{S}. \quad (2.16)$$

Şol tekiz kondensatoryň elektrik sygymy:

$$C = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon S}{h}. \quad (2.17)$$

Onda (2.14) formulanyň esasynda alarys:

$$\tau_0 = RC = \rho \frac{h}{S} \cdot \frac{\varepsilon_0 \varepsilon S}{h} = \rho_v \varepsilon_0 \varepsilon. \quad (2.18)$$

Bu ýerden 
$$\rho_v = \frac{\tau_0}{\varepsilon_0 \varepsilon}. \quad (2.19)$$

Şeýlelikde, tejribe boýunça  $\tau_0$  kesgitlenilse we kondensatordaky dielektrigiň  $\varepsilon$  dielektrik syzyjylygy belli bolsa, onda şol materialyň  $\rho_v$  göwrümleýin udel garşylygyny kesgitlep bolýar.

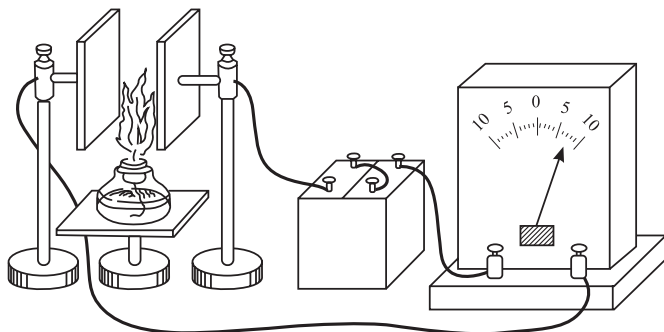
**Gazlarda elektrik geçirijilik.** Gazlar uly bolmadyk elektrik meýdanynda örän pes elektrik geçirijiligi bilen häsiýetlendirilýär. Olarda elektrik togy ionlar we erkin elektronlar tarapyndan döredilýär. Gazlaryň neýtral molekulalarynyň ionlaşmasy daşky ýagdaýlaryň täsiri bilen ýa-da molekulalaryň ýokary tizlikli zaryadlanan bölejikler bilen çakyşmasy netijesinde bolup geçýär. Daşky ýagdaýlara ýokary temperatura, rentgen, kosmiki we radioaktiw şöhleler degişlidir. Gazlarda daşky ýagdaýlaryň täsirleri bilen ýüze çykýan elektrik geçirijilige özbaşdak däl elektrik geçirijilik diýilýär.

Has ýokary naprýaženiýelerde, aýratyn hem, seýreklandirililen gazlarda zaryadlanan bölejikleriň kinetik energiýasy ýeterlik bolanda olaryň neýtral molekulalar bilen çakyşmasy netijesinde urgy-ionlaşma ýüze çykýar. Şol ýagdaýdaky gazyň elektrik geçirijiligine özbaşdak geçirijilik diýilýär.

Gazlardaky položitel we otrisatel ionlar özara birleşip, ýene neýtral molekulalary emele getirip bilýärler. Bu hadysa rekombinasiýa hadysasy diýilýär. Ol hadysa gazlarda ionlaryň üznüksiz köpelmegine päsgel berip, bellibir wagtdan soň täzeden döreýän we rekombinirlenýän ionlaryň arasynda deňagramlaşan ýagdaý ýüze çykýar.

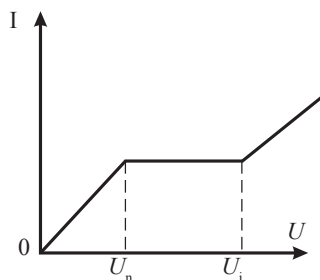


Goý, gaz iki sany parallel elektrodalaryň arasynda ýerleşen bolsun (2.14-nji çyzgy).



**2.14-nji çyzgy.** Gazlarda elektrik geçirijiligiň ýüze çykmasy

Eger-de gaz gyzdyrylyp, elektrodlara naprýaženiýe goýulsa, položitel we otrisatel ionlaryň ugrukdyrylan hereketi bilen zynjyrdak tok döredär. Gazlaryň  $I=f(U)$  wolt-ampere häsiýetnamasynyň grafiginiň umumy görnüşini 2.15-nji çyzgyda görkezilýär.



**2.15-nji çyzgy.** Gazlaryň  $I=f(U)$  wolt-ampere häsiýetnamasynyň grafigi

Ýokarky çyzgydan görnüşini ýaly, pes naprýaženiýelerde tok güýji  $I$  çyzykly ösýär, ýagny Omun kanuny ýerine ýetirilýär. Sebäbi  $U$  naprýaženiýäniň artmagy bilen elektrodlaýa ýetip bilýän ionlaryň sany köpeliýär. Soňra  $U$  naprýaženiýeniň bellibir  $U_n$  bahasyndan  $U_i$  bahasyna çenli artanda  $I$  üýtgemän  $I_d$  doýgun hala geçýär. Doýgunlyk ýagdaýynda daşky täsirleriň döreden hemme ionlary elektrodlaýa ýetip bilýär. Şonuň üçin tok üýtgemeyär. Howada kadaly şertlerde elektrodlaýyň aradaşlygy  $10\text{ mm}$  bolanda we elektrik meýdanyň güýjenmesi, takmynan,  $0,6\text{ V/m}$  deň bolanda doýgun toguň dykzlygy

örän kiçi we  $10^{-15} \text{ A/m}^2$  deňdir. Şoňa görä urgy-ionlaşma başlamasa howany ýokary hilli dielektrik hökmünde garmak bolar. Uly  $U > U_i$  naprýaženiýelerde gazlarda urgy-ionlaşma ýüze çykyp, tok ýene-de güýçli köpeliýär, ýagny özbaşdak elektrik geçirijilik başlanýar. Şonda daşky ýagdaýlaryň täsiri gerek bolmaýar. Howa üçin özbaşdak elektrik geçirijilik  $E_b = 10^5 \div 10^6 \text{ V/m}$  bolanda başlanýar.

**Suwuklyklarda elektrik geçirijilik.** Suwuklyklaryň elektrik geçirijiligi olaryň içki gurluşyna baglydyr. Polýar däl suwuklyklarda ol keseki garyndylaryň dissossirlenen molekulalarynyň konsentrasiýasyna, şol sanda çyglylyga baglydyr. Polýar suwuklyklarda elektrik geçirijilik diňe keseki garyndylara bagly bolman, suwuklygyň özüniň dissossirlenen molekulalarynyň sanyna hem baglydyr. Şonuň üçin polýar suwuklyklarda elektrik geçirijilik polýar däl suwuklyklar bilen deňeşdirilende has ýokarydyr. Polýar däl suwuklyklardan uzak wagtlap tok akanda olaryň udel garşylygy ulalýar, sebäbi olardaky erkin ionlar elektrodlaýa geçýärler. Hemme suwuklyklarda udel elektrik geçirijilik aşakdaky formula bilen kesgitlenýär:

$$\sigma = q_+ n_+ u_+ + q_- n_- u_- = q_n (u_+ n_+ + u_- n_-), \quad (2.20)$$

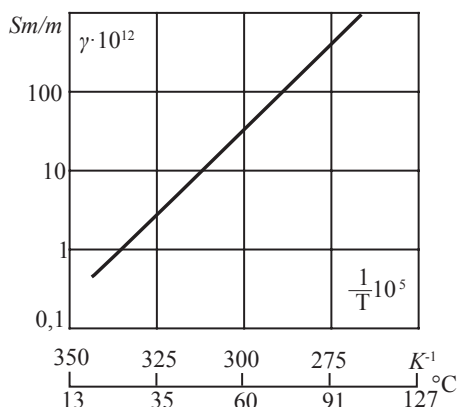
bu ýerde  $q_+$  we  $q_-$  – položitel we otrisatel ionlaryň zaryady;  $n_+$  we  $n_-$  – ol ionlaryň konsentrasiýasy;  $u_+$  we  $u_-$  – ionlaryň hereketlenijiligi.

Hemme suwuklyklarda udel elektrik geçirijilige temperaturanyň täsiri uludyr. Temperaturanyň artmagy bilen, birinjiden, suwuklygyň şepbeşikligi azalyp, ionlaryň  $u$  hereketlenijiligi artýar, ikinjiden, molekulalaryň ýylylyk dissossirlenme derejesi köpeliýär. Bu ýagdaýlarynyň ikisi hem elektrik geçirijiligiň ösmegine getirýär. Suwuklyklarda  $\sigma$  udel elektrik geçirijiliginiň temperatura baglylygyny aşakdaky formula bilen aňlatmak bolar:

$$\sigma = \sigma_0 e^{-\frac{W}{kT}}, \quad (2.21)$$

bu ýerde  $\sigma_0$  – berlen suwuklyk üçin hemişelik;  $k$  – Bolsmanyň hemişeligi;  $W$  – ionlaryň işjeňleşme energiýasy.

2.16-njy çyzgyda ýagly kanifol kompaundda udel elektrik geçirijiligiň temperatura baglylygynyň grafiki görkezilýär. Çyzgydan görnüş ýaly, ol suwuklykda  $\sigma$  udel elektrik geçirijilik temperaturanyň ýokarlanmagy bilen artýar.



**2.16-njy çyzgy. Ýagly-kanifol kompaundda  $\sigma$ -nyň temperatura baglylygynyň grafigi**

Suwuklyklarda udel elektrik geçirijiligiň  $\eta$  şepbeşiklige baglanyşygyny görkezmek üçin Stoksyň kanunyny peýdalanalyň. Ol kanun boýunça şepbeşik gurşawda hemişelik  $F$  güýjüň täsiri bilen hereket edýän togalagyň deňagramlaşan tizligi:

$$v = \frac{F}{6\pi r \eta}, \quad (2.22)$$

bu ýerde  $r$  – togalagyň radiusy;  $\eta$  – suwuklygyň dinamiki şepbeşikligi.

Hereket edýän, iona täsir edýän güýç:

$$F = qE, \quad (2.23)$$

bu ýerde  $q$  – ionyň zaryady;  $E$  – elektrik meýdanyň güýjenmesi.

Omuň kanuny boýunça udel elektrik geçirijilik:

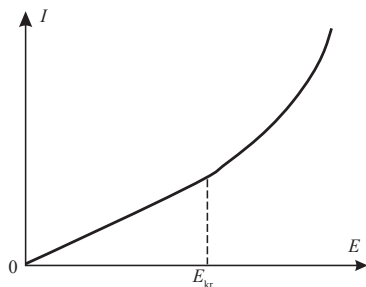
$$\sigma = n_0 q u = \frac{n_0 q v}{E}. \quad (2.24)$$

Onda (2.23) we (2.24) – formulalardan alarys:

$$\sigma \eta = \frac{n_0 q^2}{6\pi r}. \quad (2.25)$$

Bu formuladan görnüşi ýaly, eger suwuklykda  $n_0$ ,  $q$ ,  $r$  ululyklar temperatura görä üýtgemeseler, onda şol suwuklykda  $\sigma\eta = \text{const}$  hemişelik galýar. Bu tassyklama L.B.Pisaržewskiniň we P.I.Waldeniň düzgüni diýilýär. Emma bu düzgün hemme suwuklyklarda ýerine ýetirilmeýär.

2.17-nji çyzgyda suwuk dielektriklerde  $I$  toguň elektrik meýdanynyň  $E$  güýjenmesine baglylygynyň grafigi berilýär.



**2.17-nji çyzgy.** Suwuk dielektriklerde  $I$  tok güýjüniň elektrik meýdanynyň  $E$  güýjenmesine baglylygynyň grafigi

Çyzgydan görnüşi ýaly, suwuk dielektriklerde gazlardan tapawutlylykda,  $I=f(E)$  baglylykda, doýgun toga degişli gorizonta bölük, ýüze çykmaýar. Emma has ýokary hilli arassa suwuklyklarda gazlardaky ýaly gorizonta bölügiň ýüze çykmagy mümkin. Ýokarda belenilişi ýaly, suwuklyklarda udel geçirijilik ( $\rho$  udel garşylyk) ondaky molekulalaryň polýarlyk derejesine ( $\epsilon$  dielektrik syzyjylyga) bagly. Ol baglanyşyk 2.4-nji tablisada aýdyň görünýär.

2.4-nji tabisa

**20°C temperaturada käbir suwuk dielektrikleriň udel garşylygy we dielektrik syzyjylygy**

Suwuklyklar	Molekulalaryň gurluşy	$\rho, \text{Om}\cdot\text{m}$	$\epsilon_r$
Benzol	Polýar däl	$10^{11} \div 10^{12}$	2,2
Transformator ýagy, benzin		$10^{10} \div 10^{13}$	2,3 2,0
Sowol kostor ýagy	Polýar	$10^8 \div 10^{10}$	4,5 4,6
Aseton etil spirti	Güýçli polýar	$10^4 \div 10^5$	22,0 33,0
Distillirlenen suw		$10^3 \div 10^4$	81,0

## 2.6. Gaty dielektriklerde elektrik geçirijilik. Göwrümleýin we üst elektrik geçirijiligi

**Göwrümleýin elektrik geçirijilik.** Gaty dielektriklerde göwrümleýin elektrik geçirijilik dielektrigiň öz ionlary we keseki garyndylaryň ionlary bilen amala aşyrylýar. Käbir dielektriklerde bolsa

elektrik geçirijilige erkin elektronlar hem gatnaşýarlar. Berlen dielektrikde ion ýa-da elektron geçirijiligiň bardygyny bilmek üçin Faradeýiň kanuny ulanylýar. Ion geçirijilikde Faradeýiň kanunyna görä maddanyň bir elektroddan beýleki elektroda geçirilmesi ýüze çykýar:

$$(m=kq=kIt). \quad (2.26)$$

Elektron geçirijilikde bu hadysa döremeyär. Elektron geçirijilik, köplenç, has ýokary naprýaženiýelerde ýüze çykýar. Ion gurluşly dielektriklerde elektrik geçirijilik, esasan, ionlar bilen amala aşyrylýar. Pes temperaturalarda gowşak baglanyşykda bolan keseki garyndylaryň ionlary, ýokary temperaturalarda bolsa birnäçe ionlar kristal gözeneginiň düwünlerinden goparylýar we erkin hereketde bolýarlar. Neýtral atomly ýa-da molekulýar kristal gözenekli gaty dielektriklerde göwrümleýin elektrik geçirijilik diňe keseki garyndylaryň atomlarynyň konsentrasiýasyna baglydyr we olarda udel elektrik geçirijilik örän pes gaty jisimlerde hem udel geçirijilik:

$$\sigma = nqu, \quad (2.27)$$

bu ýerde  $n$  – erkin ionlaryň konsentrasiýasy;  $q$  – ionlaryň zarýady;  $u = \frac{V}{E} \left( \frac{m^2}{V \cdot \text{sek}} \right)$  – ionlaryň hereketlenijiligi.

Ion elektrik geçirijiliklerde  $n$  we  $u$  temperatura baglylykda eksponensial ütgýän bolsalar, onda:

$$n = n_0 e^{-\frac{W_n}{KT}} \quad u = u_0 e^{-\frac{W_u}{KT}}, \quad (2.28)$$

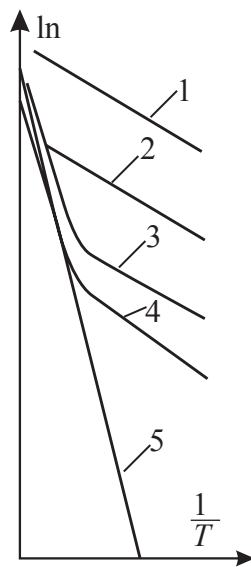
bu ýerde  $n_0$  we  $u_0$  –  $T=0$  K temperatura degişli hemişelikler;  $W_n$  – ionyň işjeňleşme energiýasy;  $W_u$  – ionyň hereketlenme energiýasy.

Şeýlelikde, (2.27) we (2.28) formulalardan alarys:

$$\sigma = \sigma_0 e^{\frac{(W_n + W_u)}{KT}}, \quad (2.29)$$

bu ýerde  $\sigma_0$  –  $n_0$  we  $u_0$  ululyklara bagly hemişelik.

Umuman, tejribeleriň görkezmegine görä  $W_n \gg W_u$ . Onda



**2.18-nji çyzgy.** Keseki garyndyly gaty dielektriklerde  $\ln \sigma = f\left(\frac{1}{T}\right)$  baglanyşygyň grafikleri:

1, 2, 3, 4 – garyndyly elektrik geçirijilik;  
5 – hususy geçirijilik

$$\sigma = \sigma_0 e^{\frac{W_n}{KT}}. \quad (2.30)$$

(4.5) formulany logarifmläp alarys:

$$\ln \sigma = \ln \sigma_0 e - \frac{W_n}{K} \cdot \frac{1}{T}. \quad (2.31)$$

Keseki garyndyly gaty dielektriklerde (2.31) formulanyň esasyn-da gurlan  $\ln \sigma = f(\frac{1}{T})$  baglanyşyklaryň grafikleri iki bölekden durýar:

Pes temperaturalarda garyndyly elektrik geçirijilik bolýar. Ony, esasan, keseki garyndylaryň ionlary döredýärler.

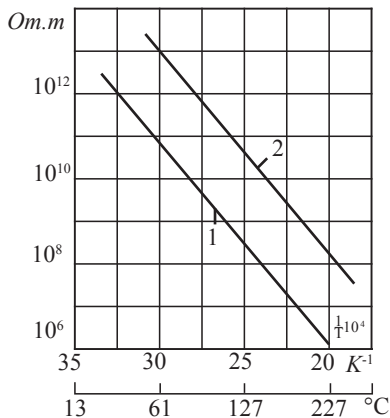
Ýokary temperaturalarda hususy elektrik geçirijilik başlanýar. Onuň sebäbi keseki garyndy ionlaryň işjeňleşme energiýasy  $W_{nk}$ , dielektrigiň hususy ionlarynyň  $W_{nh}$  işjeňleşme energiýasyndan has pesdir, ýagny  $W_{nk} \gg W_{nh}$ .

Keseki garyndyly gaty dielektriklerde  $\ln \sigma = f(\frac{1}{T})$  baglanyşyklaryň grafikleri garyndylaryň  $N_1 > N_2 > N_3 > N_4$  mukdary (sany) üçin 1.8-nji çyzgyda görkezilýär.

Udel garşylygyň  $\rho = f(\frac{1}{T})$  deňligini göz önünde tutup, (2.30) formuladan alarys:

$$\rho = \rho_0 e^{-\frac{W_n}{KT}}. \quad (2.32)$$

Ýagny udel garşylyk temperaturanyň ýokarlanmagy bilen eksponensial pesdir. Ol baglanyşygynyň grafigi radiofarfor we farfor üçin 2.19-njy çyzgyda görkezilýär.



**2.19-njy çyzgy. Radiofarforda (1) we farforda (2)  $\rho = f(1/T)$  baglanyşygyň grafikleri**

Kristal gaty dielektriklerde udel elektrik geçirijilik kristalyň dürli oklarynyň ugruna görä dürlüdür. Meselem, kwars kristalynda esasy oka parallel ugurda elektrik geçirijilik, şol ugra perpendikulýar ugurdaky elektrik geçirijilikden 1000 esse uly bolýar. Udel elektrik geçirijilik amorf materiallarda hemme ugurlar boýunça birmeňzeş bolýar we materialyň himiki düzümine, keseki garyndylara bagly bolýar. Organiki polýar däl amorf dielektrikler (meselem, polistirol) örän kiçi udel geçirijiligi bilen tapawutlanýarlar.

Kwaziamorf jisimleriň uly toparyny organiki aýnalar düzýär. Ol aýnalaryň udel elektrik geçirijiligi himiki düzüme örän berk baglanyşykda bolýar we olar birnäçe ýagdaýlarda öňünden kesgitlenen udel garşylykly materiallary almaga mümkinçilik berýär. Meselem, käbir aýnalarda 2000°C temperaturada göwrümleýin udel garşylyk  $\rho$ :

natrili pireks üçin –  $2 \cdot 10^6 \text{ Om} \cdot \text{m}$ .

kalili pireks üçin –  $8 \cdot 10^9 \text{ Om} \cdot \text{m}$ .

gurşunly aýna üçin –  $2 \cdot 10^{10} \text{ Om} \cdot \text{m}$ .

Elektrik meýdanyň güýjenmesiniň uly bahalarynda gaty dielektriklerde elektron geçirijiligiň ýüze çykmak mümkinçiligini hem göz önünde tutmak zerurdyr. Elektron geçirijiligiň ýüze çykmagy bilen  $E$  güýjenmä baglylykda elektron togy çalt artýar we Omuň kanuny bozulýar. Elektrik meýdanyň güýjenmesi  $E = 10 \div 100 \frac{\text{MV}}{\text{m}}$ -den uly bolanda udel elektrik geçirijiligiň elektrik meýdanyň  $E$  güýjenmesine baglylygy Puluň empik formulasy bilen aňladylýar:

$$\sigma_E = \sigma e^{\beta E}, \quad (2.33)$$

bu ýerde  $E$  – elektrik meýdanyň güýjenmesi;  $\sigma$  – Omuň kanuny ýerine ýetýän ýagdaýdaky udel elektrik geçirijilik;  $\beta$  – materialy häsiýetlendirýän koeffisiýent.

Elektrik böwsülmäniň ýüze çykmagyna ýakyn elektrik meýdanyň güýjenmelerinde ol baglanyşyk Ý.I.Frenkeliň has takyk formulasy bilen aňladylýar:

$$\sigma_E = \sigma e^{\beta \sqrt{E}}. \quad (2.34)$$

**Gaty dielektriklerde üst elektrik geçirijilik.** Gaty dielektriklerde üst elektrik geçirijilik çyglylyk we hapalyk sebäpli ýüze çykýar. Ol çyg we hapa gatlagyň galyňlygyna bagly. Şeýle hem materialyň özüne hem bagly bolýar. Dielektrigiň üstünde çyglylyk (suw) gatla-

gynyň emele gelmegi howanyň çyglylygyna baglydyr. Dielektriklerde üst udel garşylygyň birden peselmesi çyglylyk 70÷80%-den uly bolanda ýüze çykýar. Üst elektrik geçirijiligi polýar dielektriklerde ýokary bolýar, sebäbi olaryň üstüne dürli hapalar aňsat ýelmeşýär. Eger-de polýar material suwda az kem ereýän bolsa, olaryň üstünde geçiriji elektrolit emele gelip, üstde udel garşylyk has peselýär.

Üst udel garşylygyny köpeltmek üçin dielektrigiň üstüni arasalamak işleri (suw bilen dürli eredijileri ýuwmak) geçirilýär. Şonda olaryň üst udel garşylyklary münlerçe esse artýar. Ony 2.5-nji tablisadan görmek bolar.

2.5-nji tablisa

Dielektrik	$\rho_s$ , Om.m arassalanmadyk üstde	$\rho_s$ , Om.m arassalanan üstde
Aýna	$2 \cdot 10^8$	$1 \cdot 10^{11}$
Kwars	$2 \cdot 10^8$	$1 \cdot 10^{12}$
Mikaleks	$1 \cdot 10^9$	$1 \cdot 10^{13}$

Ondan başga-da çygly howada keramikanyň we aýnanyň üstüne kremnili organiki lak çalnanda olaryň üst udel garşylyklary ep-esli artýar.

Umuman, polýar däl we üsti tekiz, ýylmanan materiallarda üst udel elektrik geçirijilik kiçi we üst udel garşylyk  $\rho_s$  uly bolýar.

## 2.7. Dielektriklerde dielektrik ýitgileri.

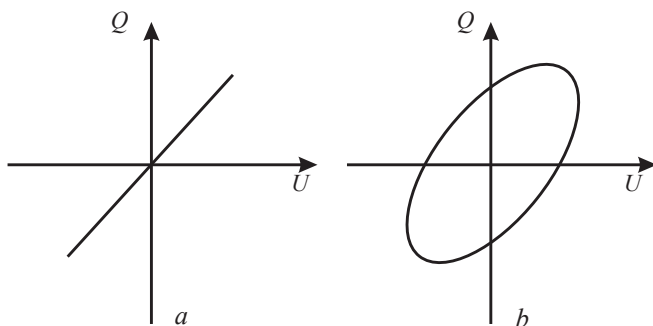
### Dielektrik ýitgileriniň görnüşleri

**Umumy düşüňjeler. Ýitgi burçy. Ýitgili dielektrigiň ekwiwalent shemasy.** Dielektriklerde dielektrik ýitgileri diýlip, dielektrikde elektrik meýdany täsir edende, onda dargaýan we ony gyzdymaga sarp bolýan energiýanyň kuwwatyna aýdylýar. Dielektrik ýitgileri hemişelik we üýtgeýän naprýaženiýelerde bolup bilýär. Hemişelik naprýaženiýelerde energiýa ýitgileri göwrümleýin we üst elektrik geçirijilige bagly bolýar, ýagny göwrümleýin  $\rho_v$  we  $\rho_s$  üst udel garşylyklar pes bolsa ýitgi artýar. Üýtgeýän naprýaženiýelerde polýarlanma netijesinde ýüze çykýan absorbsion toklaryň işjeň düzüjile-



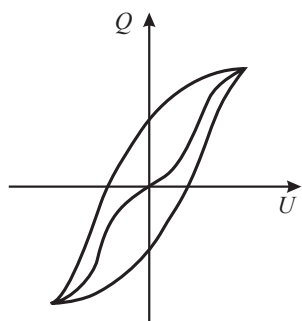
ri goşmaça energiýa ýitgilerini döredýär. Dielektriklerde dielektrik ýitgilerini häsiýetlendirmek üçin adatça  $\delta$  ýitgi burçy ýa-da onuň  $\operatorname{tg}\delta$  funksiýasy ulanylýar. Üýtgeýän toguň ideal ýitgisiz kondensatory zynjyrlarynda tok naprýaženiýeden fazasy boýunça  $\varphi=90^\circ$  öňe gitmeli. Emma, hakykatda, real ýagdaýlarda energiýa ýitgileri sebäpli  $\varphi<90^\circ$  bolýar. Şol ýagdaýda  $\varphi$  burçuny  $90^\circ$ -a çenli doldurýan  $\delta$  burça ýitgi burçy diýilýär. Ýagny  $\delta=90^\circ-\varphi$ . Dielektrik ýitgileri näçe köp bolsa, şonça-da  $\delta$  ýitgi burçy we  $\operatorname{tg}\delta$  uly bolýar. Dielektrik ýitgiler köp bolanda material güýçli gyzmak bilen bolup, hatardan çykyp bilýär. Şonuň üçin bu hadysa hökmany suratda çyzgyda göz önünde tutulmalydyr. Yrgyldyly konturda kondensatordaky köp dielektrik ýitgiler konturdaky işjeň garşylygy artdyryp, yrgyldysy konturdaky elektromagnit yrgyldynyň pessaylamagyna getirýär.

Üýtgeýän toguň zynjyryndaky kondensatoryň dielektriginde dielektrik ýitgiler bolmadyk ýagdaýynda ondaky  $Q$  zaryadyň  $U$  naprýaženiýä baglylygy  $Q=f(U)$  bir periodyň dowamynda çyzykly bolýar. Eger-de kondensatoryň dielektriginde energiýa ýitgileri bilen baglanyşykly haýal relaksasion polýarlanma bolýan bolsa, onda bir periodyň dowamynda  $Q=f(U)$  baglanyşygyň grafiki ellips şekilde bolýar. Bu baglanyşyklaryň grafikleri 2.20-nji *a*, *b* çyzgylarda görkezilýär.



**2.20-nji çyzgy. *a* – ýitgisiz, *b* – ýitgili dielektriklerde  $Q=f(U)$  baglylygynyň grafikleri**

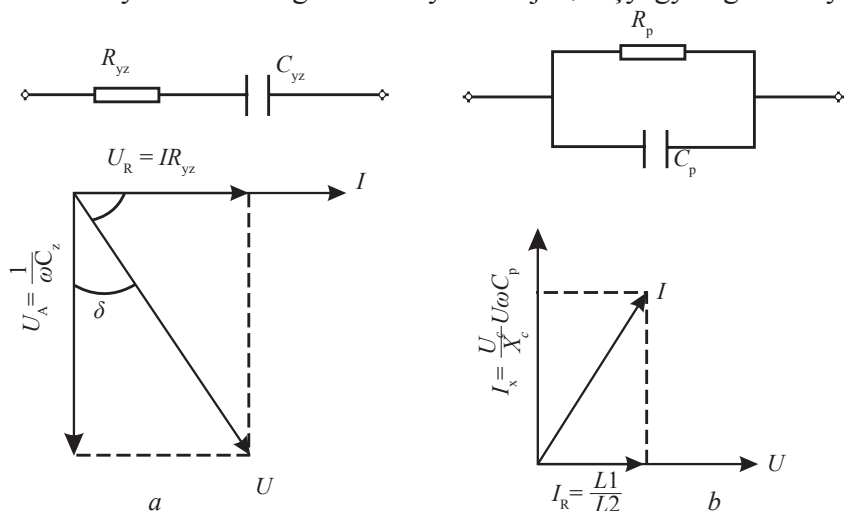
Segnetoelektriklerde  $Q=f(U)$  baglanyşykda gisterezis halkasy emele gelýär. Onuň içki meýdany materialyň göwrüm birliginde bir periodyň dowamyndaky energiýa ýitgilerine proporsionaldyr.



**2.21-nji çyzgy.** Segnetoelektriklerde  $Q=f(U)$  baglanyşykda gisterezis halkasy

Üýtgeýän toguň zynjyrlarynda dielektriklerde dielektrik ýitgileri öwrenilende ýitgili dielektrikli real kondensator ýitgisiz (ideal) kondensatorly we işjeň garşylygy özünde saklaýan ekwiwalent shemalar bilen çalşyrylýar. Ekwiwalent shemalarda ideal kondensator  $C_x$  we işjeň garşylyk  $R$  özara yzygider ýa-da parallel birikdirilýär. Bu shemalar saýlanyp alnanda şol shemanyň işjeň kuwwaty öwrenilýän kondensatoryň dielektriginde dargaýan energiýanyň kuwwatyna deň bolmalydyr. Tok bolsa fazasy

boýunça naprýaženiýeden şol bir  $\varphi$  burça deň öňe gitmelidir. Ol shemalar we olaryň wektor diagrammalary 2.22-nji *a*, *b* çyzgyda görkezilýär.



**2.22-nji çyzgy.** *a* – yzygider, *b* – parallel ekwiwalent shemalar we deňişli wektor diagrammalar

Yzygider shemanyň wektor diagrammasyndan alarys:

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{IR_{yz}}{I \frac{1}{\omega C_{yz}}} = \omega C_{yz} R_{yz} . \quad (2.35)$$

Bu ýerden

$$R_{yz} = \frac{\operatorname{tg} \delta}{\omega C_{yz}} . \quad (2.36)$$

Onda yzygider shemada energiýa ýitgisiniň kuwwaty:

$$P_a = I^2 R_{yz} = \frac{I^2 \operatorname{tg} \delta}{\omega C_{yz}} = \frac{U^2}{I^2} \cdot \frac{\operatorname{tg} \delta}{\omega C_{yz}} = \frac{U^2 \operatorname{tg} \delta}{(R_2 + X_c^2) \omega C_x} =$$

$$= \frac{U^2 \operatorname{tg} \delta}{\omega C_x \left(1 + \frac{R^2}{X_c^2}\right) X_c^2} = \frac{U^2 \omega C_x \operatorname{tg} \delta}{1 + \operatorname{tg}^2 \delta} \quad (2.37)$$

$$\text{Ýagny: } P_a = \frac{U^2 \omega C_x \operatorname{tg} \delta}{1 + \operatorname{tg}^2 \delta} \quad (2.38)$$

Parallel ekwiwalent shemanyň wektor diagrammasyndan alarys:

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{\frac{U}{R_p}}{\frac{U}{\omega C_p}} = \frac{1}{R_p \omega C_p} \quad (2.39)$$

$$\text{Bu ýerde } R_p = \frac{1}{\omega C_p \operatorname{tg} \delta} \quad (2.40)$$

Onda parallel ekwiwalent shemada işjeň kuwwat:

$$P_a = U \cdot I_R = U \cdot \frac{U}{R} = \frac{U^2}{\frac{1}{\omega C_p \operatorname{tg} \delta}} = U^2 \omega C_p \operatorname{tg} \delta \quad (2.41)$$

Ýokary hilli dielektriklerde  $\operatorname{tg}^2 \delta \ll 1$ . Şoňa görä (2.41) formuladan yzygider ekwiwalent shema üçin hem energiýa ýitgileriň kuwwaty:

$$P_a = U^2 \omega C \operatorname{tg} \delta \quad (2.42)$$

Bu formuladan görnüşi ýaly, dielektriklerde dielektrik ýitgiler goýlan  $U$  naprýaženiýäniň kwadratyna,  $\omega = 2\pi f$  ýygylyga, dielektrik syzyjylyga we  $\operatorname{tg} \delta$  bagly bolýar. Şoňa görä-de ýokary naprýaženiýede we ýokary ýygylyklarda işleýän elektrotehniki gurluşlarda ulanylýan dielektrik materiallarda kiçi  $\varepsilon$  dielektrik syzyjylyk we kiçi  $\operatorname{tg} \delta$  bolmaly. Dielektrik ýitgileriniň temperatura baglylygy ol ýitgileri döredýän fiziki hadysalaryň temperaturasyňa bagly bolýar. Meselem, energiýa ýitgilerine relaksasion polýarlanma ýa-da göwrümleýin elektrik geçirijilik bolsa, onda dielektrik ýitgileri temperaturanyň ýokarlanmagy bilen artýar:

$$P_{a,b} = A e^{-\frac{b}{T}}, \quad (2.43)$$

bu ýerde  $A, b$  – berlen material üçin hemişelik ululyklar.

**Dielektrik ýitgileriň görnüşleri.** Dielektriklerde dielektrik ýitgilerini olaryň aýratynlyklary we fiziki tebigaty boýunça 4 görnüşe bölýärler:

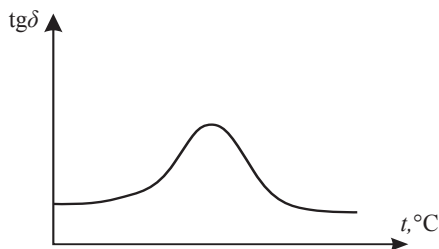
1. Polýarlanma bilen baglanyşykly ýüze çykýan dielektrik ýitgiler;

2. Göwrümleýin elektrik geçirijilik bilen baglanyşykly ýüze çykýan dielektrik ýitgiler;

3. Ionlaşma bilen baglanyşykly ýüze çykýan dielektrik ýitgiler;

4. Materiallaryň deňdeş dældigi bilen baglanyşykly döreýän dielektrik ýitgiler.

Polýarlanma bilen baglanyşykly dielektrik ýitgileri dipol gurluşly dielektriklerde we kristal gözenegi doly doldurylmadyk ion gurluşly dielektriklerde has aýdyň ýüze çykýar. Dipol gurluşly dielektriklerde (meselem, polýar suwuklyklarda)  $\text{tg}\delta$ -niň temperatura baglylygynyň grafiginde maksimum emele gelýär (2.23-nji çyzgy).

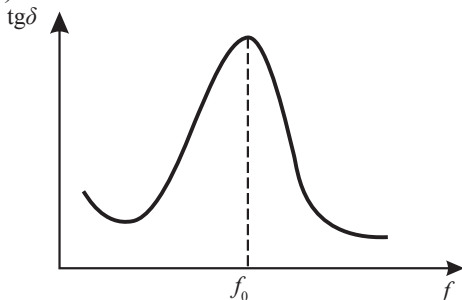


**2.23-nji çyzgy.** Polýarlanma bilen bagly dielektrik ýitgilerinde  $\text{tg}\delta=f(t^\circ)$  baglanyşygyň grafigi

Şol maksimuma degişli temperaturada dielektrigiň bölejikleriniň (dipollaryň) relaksasion wagty dielektrige goýlan üýtgeýän elektrik meýdanynyň peridy (döwri) bilen takmynan gabat gelýär. Şol ýagdaýda polýarlanma güýçlenýär we şoňa görä dielektrik ýitgi ( $\text{tg}\delta$ ) hem artýar. Temperatura  $t_{\text{max}}$ -dan ýokary bolanda bölejikleriň relaksasion wagty goýlan naprýaženiýäniň ýarym peridyndan has pes bolýar. Bölejikleriň ýylylyk hereketi güýçlenip, olaryň arasyndaky özara täsir güýçler gowşaýar. Netijede, energiýa ýitgileri ( $\text{tg}\delta$ ) ýene peselýär.

Segnetoelektriklerde dielektrik ýitgiler olardaky öz-özünden polýarlanan domenleriň elektrik meýdanyň ugruna polýarlanmasy bilen bagly bolup, Kýuri temperaturasyndan pes temperaturalarda has ýokary bolýar. Kýuri temperaturasyndan ýokary temperaturalarda ýitgiler peselýär, çünki domen gurluş dargaýar. Polýarlanma bilen baglanyşykly energiýa ýitgilerine rezonans ýitgileri diýilýär. Ol ýitgi gazlarda we gaty jisimlerde hem bolup bilýär. Rezonans ýitgiler uly ýygylklarda ýüze çykýar. Haçan-da täsir edýän üýtgeýän naprýaženiýäniň  $\omega$  ýygylgy maddanyň bölejikleriniň (atomlaryň, molekulalaryň) hususy yrgyldysynyň  $\omega_0$  ýygylgy bilen gabat gelse, elektrik

meýdanynyň energiýasynyň intensiw siňdirilmesi bolup geçýär. Şonda  $\text{tg}\delta=f(\omega)$  baglanyşygyň grafiginde ýiti maksimum emele gelýär (2.24-nji çyzgy).



**2.24-nji çyzgy. Rezonans energiýa ýitgilerinde  $\text{tg}\delta=f(\omega)$  baglanyşygyň grafigi**

Göwrümleýin elektrik geçirijilik bilen döredilýän dielektrik ýitgiler göwrümleýin we üst  $\sigma_v$ ,  $\sigma$  üst udel elektrik geçirijilikler uly bolan dielektriklerde ýüze çykýar. Ýitgileriň bu görnüşinde  $\text{tg}\delta$

$$\text{tg}\delta = \frac{1,8 \cdot 10^{10}}{\epsilon \cdot f \cdot \rho} \quad (2.44)$$

formula bilen kesgitlenýär.

Dielektrik ýitgileriň kuwwatynyň temperatura baglylygy

$$P_a = Ae^{-\frac{b}{T}} \quad (2.45)$$

formula bilen aňladylýar. Bu ýerde  $A, b$  – berlen material üçin hemişelik.

Ionlaşma bilen baglanyşykly dielektrik ýitgiler gazlarda ýüze çykýar. Ýitgileriň bu görnüşinde dielektrik ýitgileriň kuwwaty

$$P_{a,i} = A_1 \cdot f(U-U_i) \quad (2.46)$$

formula bilen kesgitlenýär.

Bu ýerde  $A_1$  – hemişelik koeffisiýent;  $f$  – elektrik meýdanynyň ýygyllygy;  $U$  – gaza täsir edýän naprýaženiýe;  $U_i$  – ionlaşmanyň başlanmagyna degişli naprýaženiýe. Ol gazyň basysyna bagly bolup, basyşyň artmagy bilen artýar. Çünki gazlarda urgy – ionlaşma zarýad görterijileriň  $\lambda$  erkin ýolunyň uzynlygyna bagly bolýar.

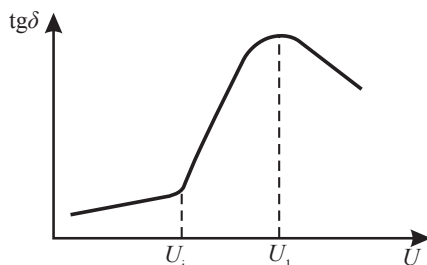
Materiallaryň deňdeş dälidigi bilen ýüze çykýan dielektrik ýitgiler gatlakly dielektriklerde, plastmassalarda, öýjükli keramikalarda, mikanitlerde, mikalekslerde ýüze çykýar. Ýitgileriň bu görnüşini hasaplamak üçin bellibir formula ýok.

## 2.8. Gazlarda, suwuklyklarda we gaty dielektriklerde dielektrik ýitgiler

**Gazlarda dielektrik ýitgiler.** Gazlarda urgy-ionlaşma başlanmanka pes naprýaženiýelerde dielektrik ýitgiler örän pes bolýar. Şol ýagdaýda gaza ideal dielektrik hökmünde garamak bolýar. Hakykattan hem, olarda  $\rho = 10^{16} \text{ Om}\cdot\text{m}$ ,  $\varepsilon = 1$  we  $f = 50 \text{ Gs}$  bolanda

$$\operatorname{tg}\delta = \frac{1,8 \cdot 10^{10}}{\varepsilon \cdot f \cdot \rho} \quad (2.47)$$

formula boýunça  $\operatorname{tg}\delta = 4 \cdot 10^{-8}$  örän kiçi bahada bolýar. Emma  $U > U_i$  ýokary naprýaženiýelerde urgy-ionlaşma ýüze çykyp, ýitgi we  $\operatorname{tg}\delta$  birden ýokarlanýar. Bu hadysa gaty jisimlerde gazly öýjükleriň barlygyny bilmek üçin ulanylýar. Gazly öýjükler bolan ýagdaýynda şol gaty dielektrikde  $\operatorname{tg}\delta = f(U)$  baglanyşygyň grafigi 2.25-nji çyzgydaky ýaly görnüşde bolýar.



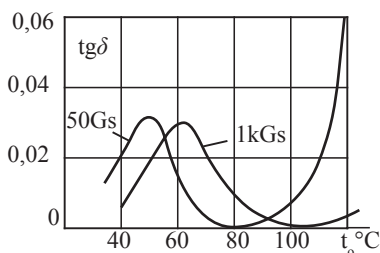
**2.25-nji çyzgy.** Gazly öýjükli gaty dielektriklerde  $\operatorname{tg}\delta = f(U)$  baglanyşygyň grafigi

Elektrik geçiriji ulgamlaryň daşyndaky howanyň ionlaşmasy liniýanyň peýdaly täsir koeffisiýentini kiçeldýändigini bellemeli.

**Suwuk dielektriklerde dielektrik ýitgiler.** Polýar däl molekulaly suwuklyklarda, keseki dipol molekulaly garyndylar bolmasa, olarda elektrik geçirijilik pes bolup, relaksasion polýarlanma bolmaýar. Şoňa görä bu suwuklyklarda hem  $\operatorname{tg}\delta$ -ni hasaplamak üçin (2.47) formulany ulanmak bolar.

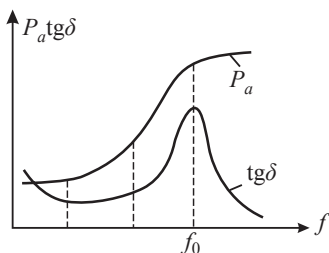
Polýar molekulaly suwuklyklarda dielektrik ýitgiler suwuklygyň şepbeşikligine we oňa goýlan naprýaženiýäniň ýygylýgyna güýçli bagly bolýar. Dipol molekulalar elektrik meýdanynyň ugruna görä öwrülme bilen sürtülme güýjüne (şepbeşiklige) garşy energiýa sarp edýärler. Şonda ýylylyk energiýasy bölünip çykýar. Eger şepbeşiklik has ýokary bolsa we dipol molekulalar elektrik meýdanyň üýtgemesi-

ne ýetişip bilmeseler, dipol polýarlanma has peselip dielektrik ýitgiler hem azalýar. Dielektrik ýitgiler şepbeşiklik az bolup, sürtülme güýji peselende-de azalýarlar. Şeýlelikde, polýar suwuklyklarda  $\text{tg}\delta$ -niň temperatura we ýyglyga baglylygy ýüze çykýar. Ol baglylyk ýaglykanifol kompaund üçin 2.26-njy çyzgyda görkezilýär. Ol çyzgydan görnüşi ýaly,  $f$  ýyglygyň we temperaturanyň artmagy bilen dielektrik ýitgiler maksimuma tarap süýşýär.



**2.26-njy çyzgy.** Ýagly-kanifol kompaundda dürli ýyglyklarda  $\text{tg}\delta=f(t_0)$  baglanyşygyň grafikleri

Onda  $\text{tg}\delta$ -niň in kiçi bahasy şepbeşikligiň in kiçi bahalary alýan temperaturasy bilen gabat gelýär. Şonda dipollaryň öwrülmesini sürtülmesiz bolup geçýär diýip hasap edip bolýar. Ondan soňra  $\text{tg}\delta$ -niň ýene artmagyny suwuklykda temperaturanyň ýokarlanmagy bilen düşündirmek bolýar. Suwuk dielektriklerde dipol-relaksasion polýarlanmada dielektrik ýitgileriniň kuwwaty  $P_a$  polýarlanma meýdanynyň üýtgemegine ýetişýän ýagdaýlarynda ýyglygyň artmagy bilen ulalýar. Has uly ýyglyklarda bolsa polýarlanmanyň ýetişmedik ýagdaýynda  $P_a$  hemişelik galýar (2.27-nji çyzgy).



**2.27-nji çyzgy.** Dipol suwuklyklarda  $P_a$  ýitgi kuwwatynyň we  $\text{tg}\delta$ -niň elektrik meýdanyň ýyglygyna baglylygy

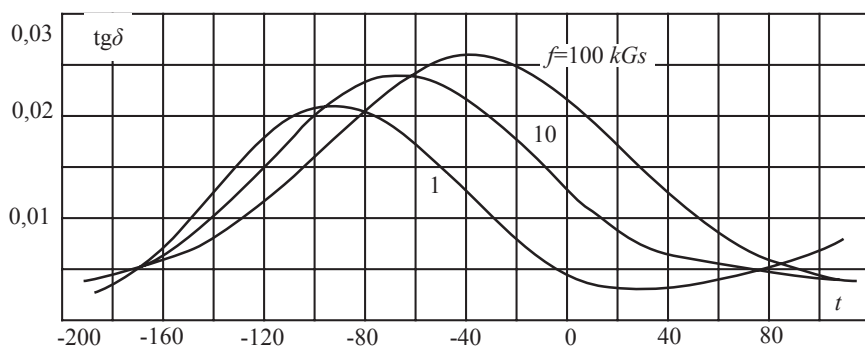
**Gaty dielektriklerde dielektrik ýitgileri.** Gaty dielektriklerde dielektrik ýitgileri olaryň içki gurluşyna bagly bolup, olarda dielek-

trik ýitgileriň hemme görnüşleri bolup biler. Şol sebäpli amatlylyk üçin gaty dielektriklerde dielektrik ýitgileri öwrenilende olary 4 topara bölýärler:

1. Molekulýar gurluşly dielektrikler;
2. Ion gurluşly dielektrikler;
3. Segnetoelektrikler;
4. Deňdeş däl gurluşly dielektrikler.

Molekulýar gurluşly dielektriklerde dielektrik ýitgiler molekularyň görnüşine bagly. Polýar däl molekuly dielektriklerde, keseki garyndylar bolmasa dielektrik ýitgiler örän pes bolýarlar. Olara serezin, polýar däl polimerler: polietilen, ftoroplast-4, polistirol degişlidir. Şoňa görä olar ýokary ýygyllykly gurluşlarda ulanylýar.

Polýar molekuly dielektriklere, esasan, organiki maddalar: kagyz, karton, polýar polimerler – organiki aýna, ebonit, bakalit we ş.m degişlidir. Bu materiallarda dipol – relaksasion polýarlanma ýüze çykyp, uly dielektrik ýitgiler döreýär we ol ýitgiler temperatura güýçli bagly bolýarlar. Ol baglylyk dürli ýygyllyklarda guradylan kagyz üçin 2.28-nji çyzygyda berilýär. Ol baglanyşyklarda maksimum we minimum dielektrik ýitgiler döreýär.



**2.28-nji çyzygy. Guradylan kagyzda  $\text{tg}\delta=f(t_0)$  baglylyk**

Ion gurluşly gaty dielektriklerde dielektrik ýitgiler ion kristallaryň doldurylyş aýratynlyklaryna bagly. Doly dykyz doldurylan ion kristally maddalarda keseki garyndylar bolmasa, dielektrik ýitgiler örän az bolýar. Ýokary temperaturalarda bu materiallarda göwrümleýin elektrik geçirijilik bilen bagly dielektrik ýitgiler ýüze çykýar.



Bu görnüşli dielektriklere köp sanly kristal organiki däl himiki birleşmeler degişlidir. Meselem, ultrafarforuň düzümine girýän korund ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), daş duzy we ş.m. degişlidir.

Kristal gözenegi doly doldurylmadyk ion kristally dielektriklerde ion-relaksasion polýarlanmanyň ýüze çykmagy bilen dielektrik ýitgiler ýokarlanýar. Bu materiallara farforuň düzümine girýän mullit, kiçi giňelme koeffisiýentli keramikanyň düzümine girýän kordierit we ş.m. degişlidir. Bu hilli materiallarda  $\text{tg}\delta$  temperaturanyň artmagy bilen ulalýar.

Ion gurluşly amorf materiallara degişli organiki aýnada dielektrik ýitgiler polýarlanma we elektrikgeçirijilik hadysalaryna bagly bolýar. Dielektrik ýitgileriň mehanizmi boýunça aýnany iki topara bölmek bolar:

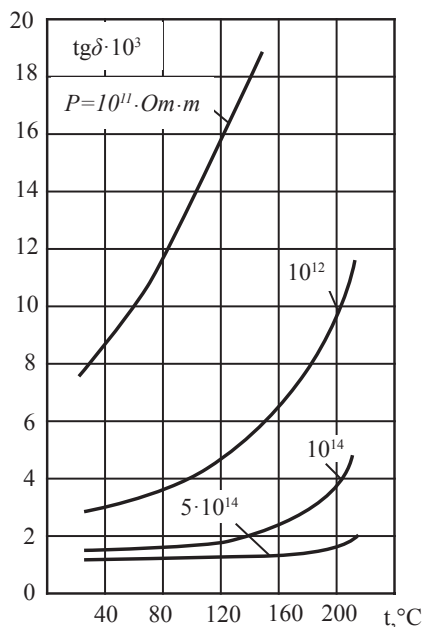
a)  $\text{tg}\delta$  temperatura gowşak bagly, emma ýygylýga göni proporsional baglylykda ýokarlanýar.

b)  $\text{tg}\delta$  temperatura baglylykda eksponensial düzgün boýunça ýokarlanýar, emma ýygylýga gowşak bagly bolýar.

1-nji toparda ýitgiler relaksasion polýarlanma bilen döredilýär we olar hemme tehniki aýnalarda güýçli bolýar.

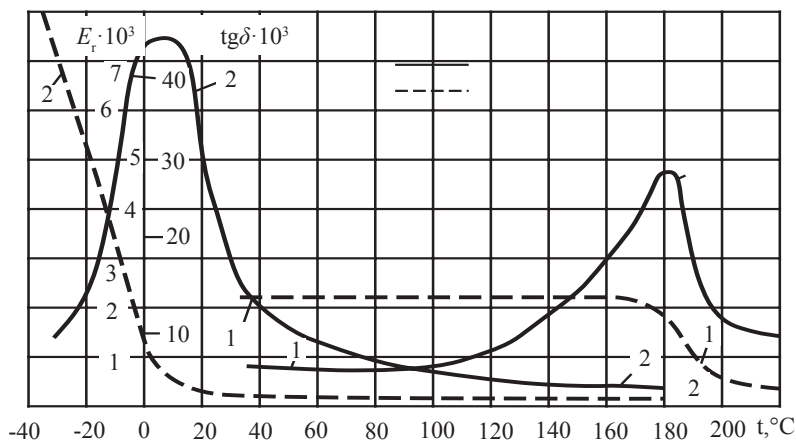
2-nji toparda dielektrik ýitgiler, esasan, elektrik geçirijilik bilen bagly ýüze çykýar. Bu ýitgiler, adaty,  $50^\circ - 100^\circ\text{C}$  temperaturalardan ýokary bolanda ýüze çykýar. 2.29-njy çyzgyda dürli udel garşylykly aýnada 1MGs ýygylýkda  $\text{tg}\delta$ -niň temperatura baglylygynyň grafikleri görkezilýär.

Segnetoelektriklerde dielektrik ýitgiler, adaty dielektrikler bilen deňeşdirilende, has köp bolýar. Öz-özünden polýarlanma bolýan temperaturalarda  $\text{tg}\delta$  az üýtgeýär we Kýuri temperaturasyndan ýokarda birden kiçelýär. Çünki öz-özünden



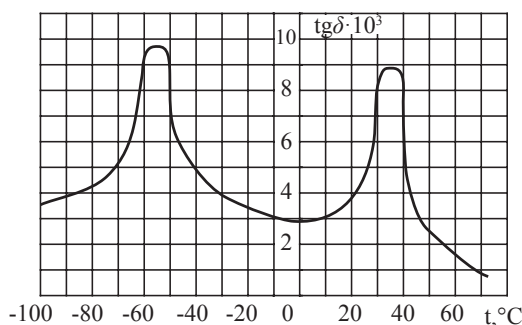
**2.29-njy çyzgy.** Dürli udel garşylykly aýnada 1 MGs ýygylýkda we  $t_0 = 50^\circ\text{C}$ -de  $\text{tg}\delta = f(t_0)$  baglanyşygyň grafikleri

polýarlanma ýok bolýar. 2.30-njy çyzgyda dürli görnüşli bariý titana-ty üçin  $\text{tg}\delta=f(t_0)$  we  $E=f(t_0)$  baglylygyň grafikleri görkezilýär.



**2.30-njy çyzgy.** Dürli görnüşli bariniň titanaty üçin  $\text{tg}\delta=f(t_0)$  we  $E=f(t_0)$  baglanyşygyň grafikleri

Deňdeş däl gurluşly gaty dielektriklere azyndan iki dürli madda-laryň mehaniki garyndylary degişlidir. Deňdeş däl materiallara ilki-başda keramika degişli bolýar. Keramikanyň düzüminde kristal, amorf we gaz halyndaky fazalar bolup bilýär. Ýagly-kanifolly kompaund siňdirilen kagyza  $\text{tg}\delta=f(t_0)$  baglylygyň grafiginde iki maksimum bar: *birinjisi* (pes temperaturada) kagyzyň özünde dipol-relaksasion ýitgi-ler bilen hasiýetlendirilýär, *ikinjisi* (has ýokary temperaturada) siňdi-rilýän kompaundda dipol-relaksion ýitgiler bilen şertlenen.



**2.31-nji çyzgy.** Ýagly-kanifolly kompaund siňdirilen kagyza  $\text{tg}\delta$ -niň temperatura baglylygy

## 2.9. Dielektriklerde elektrik böwsülme hadysasy.

### Gazlarda we suwuklyklarda elektrik böwsülme

**Umumy düşünjeler.** Eger dielektrige täsir edýän elektrik meýdanyň güýjenmesi  $E$  bellibir maksimal bahadan uly bolsa, dielektrik özüniň elektroörtük häsiýetini ýitirip, geçirijä öwrülýär. Bu hadysa dielektrigiň elektrik böwsülmesi diýilýär. Elektrik böwsülmäniň ýüze çykmagy üçin ýeterlik bolan naprýaženiýäniň  $U_b$  bahasyna böwsülme naprýaženiýesi diýilýär. Ol, köplenç, kilowoltlarda aňladylýar.

Böwsülme naprýaženiýä degişli elektrik meýdanyň  $E_b$  güýjenmesine şol dielektrigiň elektrik berkligi diýilýär:

$$E_b = \frac{U_b}{h}, \quad (2.48)$$

bu ýerde  $h$  – dielektrigiň galyňlygy. Olaryň ölçeg birlikleri:

$$1 \frac{MV}{m} = 1 \frac{kV}{mm} = 10^6 \frac{V}{m}.$$

**Gazlarda elektrik böwsülme.** Gazlarda köp bolmadyk položitel we otrisatel ionlar, şeýle hem elektronlar daşky elektrik meýdanyň täsiri bilen goşmaça tizlik alyp, alamatlaryna görä meýdanyň ugruna ýa-da onuň tersine ugrukdyrylan hereket edýärler. Şonda zaryadlanan bölejikler goşmaça energiýany alýarlar:

$$W = q \cdot U_\lambda, \quad (2.49)$$

bu ýerde.  $q$  – zaryad;  $U_\lambda$  –  $\lambda$  erkin ýoluň uzynlygynda naprýaženiýäniň peselmesi.

Eger elektrik meýdan ýeterlik derejede deňdeş bolsa, onda

$$U_\lambda = E \cdot \lambda, \quad (2.50)$$

bu ýerde  $E$  – elektrik meýdanyň güýjenmesi.

Bu ýerden

$$W = E \cdot q \cdot \lambda. \quad (2.51)$$

Zaryadlanan bölejigiň bu goşmaça energiýasy çaknyşma netijesinde şol çaknyşylan molekula geçirilýär. Eger bu energiýa ýeterlik bolsa, onda ol molekula oýandyrylan hala geçýär ýa-da ionlaşýar,

ýagny položitel iona we erkin elektrona dargaýar. Eger molekulalaryň ionlaşma energiýasyny  $W_i$  bilen bellesek, onda molekulalaryň ionlaşma şerti

$$W \geq W_i \text{ ýa-da } E \cdot q \cdot \lambda \geq W_i. \quad (2.52)$$

Adatça, ionlaşma energiýasyny ionlaşma potensial bilen häsiýetlendirýärler:

$$U_i = \frac{U_b}{q}. \quad (2.53)$$

Ionlaşma potensial dürli gazlarda  $4 \div 25 V$  aralykda bolýar. Şoňa laýyklykda ionlaşma energiýasy  $W_i = 4 \div 25 eV$  aralykda bolýar.

Her bir gaz üçin berlen temperaturada we basyşda  $q$  we  $\lambda$  hemişelik bolýar. Şonuň üçin her bir gazda urgy ionlaşma elektrik meýdanynyň güýjenmesiniň bellibir  $E_i$  bahasynda başlanýar. Oňa başlangyç  $E_i$  güýjenme diýilýär. Eger  $e=1,6 \cdot 10^{-19} K$ ;  $m=9,11 \cdot 10^{-31} kg$  bahalar ulanylsa, onda:

$$v = \sqrt{\frac{2eW}{m}} = 600 \sqrt{U} \frac{km}{s}. \quad (2.54)$$

Eger bu formulada gazlaryň ionlaşma potensiallary ulanylsa, onda elektronyň tizligi  $v = 1000 km/s$ -den ýokary bolanda gaz molekulalary ionlaşýar. Emma položitel ionlar neýtral molekulalar bilen çaknyşanlarynda olary gönümel ionlaşdyryp bilmeýärler. Bu ionlaryň massasynyň uly we  $u$  hereketlenijiliginiň pesdigi bilen düşündirilýär. Emma položitel ionlar metal elektrodlaryň üstünden elektronlary goparyp bilýärler.

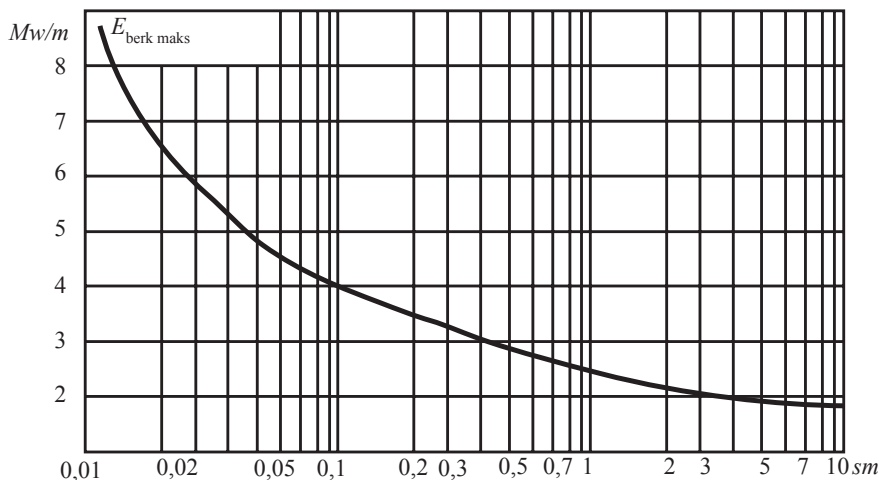
Kähalatlarda elektron molekulany ionlaşdyrman, ony oýandyrylan hala geçirip bilýär. Soňra bu oýandyrylan molekula alan artykmaç energiýasyny şöhle – foton görnüşde şöhlelendirýär. Bu fotony başga bir molekula özüne siňdirip ionlaşýar. Bu hili ionlaşma fotoionlaşma hadysasy diýilýär.

Şeýlelikde, urgy ionlaşma we fotoionlaşma netijesinde toplum görnüşde elektronlaryň we položitel ionlaryň konsentrasiýasy birden köpelip, gazyň elektrik böwsülmesi ýüze çykýar.

Gazlarda elektroböwsülme hadysasy elektrik meýdanynyň deňeçerlik derejesine bagly. Deňdeş elektrik meýdany iki sany tegelek, tekiz elektrodlaryň arasynda ýa-da aradaşlyklary olaryň dia-

metrleri bilen deňräk bolan iki sferalaryň arasynda almak bolar. Şeýle meýdanda böwsülme örän çalt bolup geçýär we temperatura hem-de basyşa baglylykda bellibir naprýaženiýede başlanýar. Ilkibaşda elektrodalaryň arasynda uçgun döreyär, soňra çeşmäniň kuwwaty ýeterlik bolsa, onda ol uçgun duga özgerýär.

Elektrodalaryň aradaşlygy örän kiçi bolanda howanyň elektrik berkligi has uly bolýar. Ol baglanyşyk üçin  $f=50 \text{ Gs}$ ,  $t^\circ=20^\circ\text{C}$  we  $p=0,1 \text{ MPa}$  bolanda  $E_b=f(h)$  baglanyşyk 2.32-nji çyzgyda görkezilýär.



**2.32-nji çyzgy.** Birmeňzeş meýdanda howanyň elektrik berkliginiň elektrodalaryň aradaşlygyna baglylygy

Mysal üçin, howada  $t=20^\circ\text{C}$ ,  $p=0,1 \text{ Mpa}$  we aralyk  $h=1 \text{ sm}$  bolanda elektrik berklik  $E_b = 3 \frac{\text{MV}}{\text{m}}$  bolýar. Emma şol bir şertlerde  $h=5 \text{ mkm}$  bolanda  $E_b=70$  ony elektrodalaryň örän kiçi aralygynda zaryadlanan bölejikleriň neýtral molekulalar bilen çaknyşyp ýetişmeýändikleri bilen düşündirip bolýar. Gazyň elektrik berkligi onuň  $d$  dykzlygyna – basyşyna güýçli bagly bolýar. Şoňa görä howanyň  $U_b$  böwsülme naprýaženiýesi hasaplananda

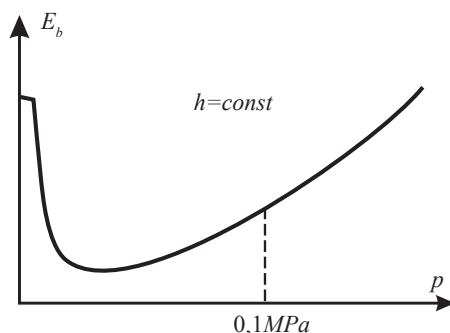
$$U_b = U_{bo} \cdot \delta \quad (2.55)$$

formula ulanylýar. Bu ýerde  $U_{bo}$  – kadaly şertlerde ( $t^\circ=20^\circ\text{C}$ ,  $p=0,1 \text{ Mpa}$ ) böwsülme naprýaženiýe;  $U_b$  – berlen temperaturada we basyşdaky böwsülme naprýaženiýe;  $\delta$  – howanyň göräleýin (otnositel) dykzlygy aşakdaky formula bilen kesgitlenýär:

$$\delta = 0,386 \frac{p}{t^{\circ} + 273}, \quad (2.56)$$

bu ýerde  $t$  – temperatura  $^{\circ}\text{C}$ ;  $p$  – basyş, *mm.sim.süt*; adaty şertlerde  $\delta=1$ .

Adaty temperaturada gazyň  $E_b$  elektrik berkliginiň basyşa baglylygynyň grafigi 2.33-nji çyzgyda berilýär.



### 2.33-nji çyzgy. Gazyň elektrik berkliginiň basyşa baglylygy

Bu çyzgydan görnüşi ýaly, örän pes basyşlarda elektrik berklik  $E_b$  uly bolýar, sebäbi seýreklandirililen gazlarda zarýadlanan bölejikleriň molekulalar bilen çaknyşmak ähtimallygy kiçelýär. Şonda basyşyň artmagy bilen  $E_b$  kem-kem peselip, berlen gaz üçin minimal bahany alýar. Ol hadysa gazly elektron - wakuum abzallarda giňden ulanylýar. Minimumdan soň basyşyň artmagy  $E_b$ -niň ýene güýçli ýokarlanmagyna getirýär. Şol sebäpli uly basyşdaky gazlar ýokary woltly gurluşlarda (kabellerde, kondensatorlarda) elektroörtükleriň elektrik berkligini ýokarlandyrmak üçin ulanylýar. Wakuumyň ýokary elektrik berkligi bolsa, ýokary naprýaženiýeli we ýokary ýygyllykly kondensatorlary ýasamak üçin ulanylýar.

Deňdeş däl elektrik meýdanynda elektrik böwsülme deňdeş meýdandaky böwsülmeden has tapawutly bolýar. Deňdeş däl elektrik meýdany iki sany ujy çiş elektrodларыň aralygynda, çiş bilen tekiz elektrodларыň arasynda, iki elektrik geçiriji simleriň arasynda we ş.m. ýüze çykyp bilýär. Çiş we tekiz elektrodlarda böwsülme naprýaženiýe şol elektrodларыň zarýadларыnyň alamatларыna hem bagly bolýar. Ol

baglanyşyk howa üçin  $p=0,1 \text{ Mpa}$  basyşda 2.34-nji çyzgyda görkezilýär.

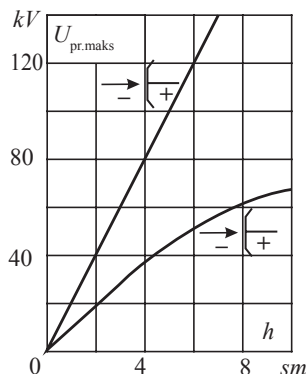
Birmeňzeş däl elektrik meýdanynda  $U_b$  böwsülme naprýaženiýe howada elektrodla-ryň  $h$  aradaşlygyna we ýyglylygyna-da bagly bolýar. Bu baglanyşyklar 2.35-nji çyzgyda görkezilýär.

Howada göräleýin çyglylyk hem elek-troörtükleriň arasyndaky zarýadsyzlanma naprýaženiýä uly täsir edýär. Meselem, çyg-lygyň 60%-den 80÷90% çenli artmagy ke-ramiki elektroörtüklerde (izolýatorlarda)  $U_b$  böwsülme naprýaženiýe, takmynan, 2 esse peselýär.

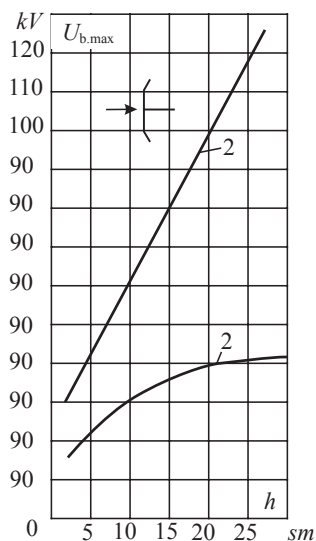
### Suwuklyklarda elektrik böwsülme.

Adaty şertlerde suwuklyklaryň elektrik berkligi gazlaryň elektrik berkliginden uly bolýar. Absolýut arassa suwuklyklary al-mak mümkin däl. Şoňa görä suwuklyklaryň böwsülme nazaryýetini düzmek hem örän kyn bolýar. Suwuklygyň böwsülmesine, esasan, keseki garyndylar sebäp bolýarlar. Ol garyndylar suw, gaz we gaty bölejikler (süýümler, gurum) bolup bilýär.

Gazlaryň böwsülme nazaryýetini örän ýokary derejede arassalanan suwuklyklarda hem ulanmak bolýar. Elektrik meýdanynyň güýjenmesiniň has uly bahalarynda metal elektrodlardan elektronlaryň bölünmesi bo-lup bilýär. Ol elektronlar gazlardaky ýaly urgy netijesinde suwuklygyň öz moleku-lasyny hem dargadyp biler. Bu ýagdaýda suwuklyklaryň elektrik berkliginiň gazlar bilen deňeşdirilende has uly bolýandygyny, olarda elektronlaryň erkin ýolunyň has ki-çi bolýandygy bilen şertlendirilýär. Düzü-



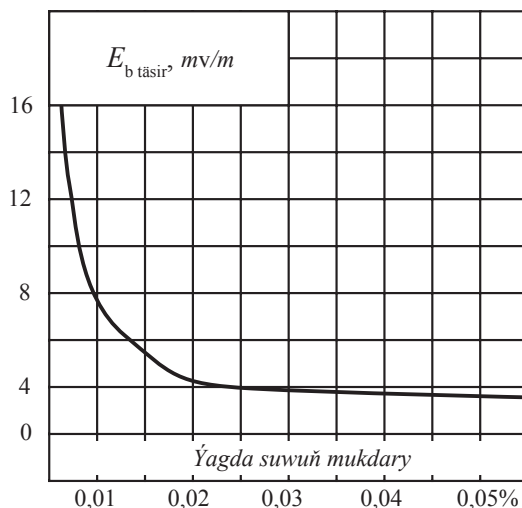
**2.34-nji çyzgy.** Deňeş däl elektrik meýdanynda ho-wada  $p=0,1 \text{ Mpa}$  basyşda,  $U_b$  böwsülme naprýaže-niýäniň elektrodlaýnyň aradaşlygyna baglylygynyň grafikleri



**2.35-nji çyzgy.** Howada  $U_b$  böwsülme naprýaženiýäniň dürli ýyglyklarda ( $f_1=50 \text{ Gs}$ ,  $f_2=3,85 \cdot 10^4 \text{ Gs}$ ) elektrodlaýnyň  $h$  aradaşly-gyna baglylygy

minde gaz düwmeleri bolan suwuklygyň böwsülmesini gazyň aňsat ionlaşmasy we şol ýeriň gyzmagy netijesinde elektrodларыň arasynda geçiriji gaz kanalynyň emele gelmegi bilen düşündirilýär.

Transformator ýagynda aýratyn suw damjalarynyň bolmagy kadaly temperaturada onuň elektrik berkligini gowşadýar (2.36-njy çyzgy).



**2.36-njy çyzgy.** Transformator ýagynda elektrik berkligiň suw damjalarynyň mukdaryna baglylygy

Elektrik meýdanyň täsiri bilen güýçli polýar suwuklyk bolan suwuň şar şekilli damjalary polýarlanyp, ellips şekilini alýar we biri-biri bilen çekişip, elektrodларыň arasynda elektrik geçirijiligi ýokarlanan zynjyry emele getirýär we şolaryň üsti bilen böwsülme ýüze çykýar. Gurum we süýüm bölejikleri hem suwuklygyň elektrik berkligini peseldýär. Şoňa görä suwuk dielektrikleri keseki garyndylardan arassalamak olaryň elektrik berkligini has ýokary galdyrmaga mümkinçilik berýär. Meselem, arassalanmadyk transformator ýagynyň elektrik berkligi  $E_b = 4 \frac{MV}{m}$ , gowy arassalanandan soň onuň elektrik berkligi  $E_b = 20 \div 25 \frac{MV}{m}$ -e çenli ýokarlanýar.

**Gaty dielektrikleriň elektrik böwsülmesi.** Gaty dielektrikleriň elektrik böwsülmesiniň 4 görnüşi bolýar:

1. Makroskopiki deňdeş dielektrikleriň böwsülmesi;
2. Deňdeş däl dielektrikleriň böwsülmesi;

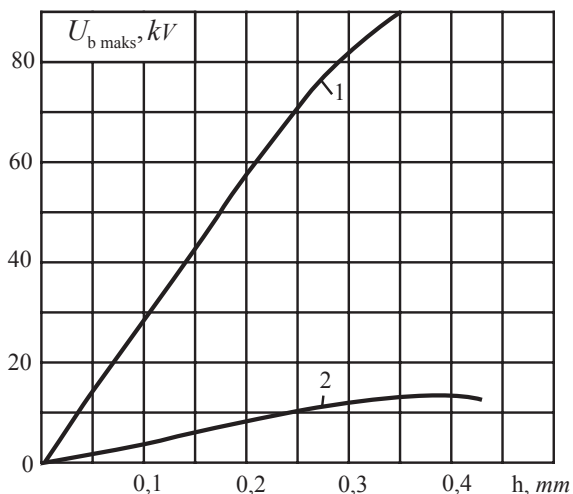


3. Ýylylyk (elektrik ýylylyk) böwsülmesi;

4. Elektrohimiki böwsülme.

Elektrik böwsülmäniň bu görnüşleriniň hersine aýratynlykda seredeliň.

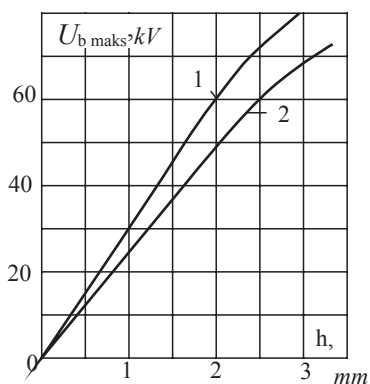
Makroskopiki deňdeş dielektrikleriň elektrik böwsülmesi örän gysga wagtda ( $10^{-7} - 10^{-6} s$ ) bolup geçýär, özem ýylylyk energiýa bagly bolmaýar. Haçan-da gaty jisimde ilki başdaky köp bolmadyk elektronlar bilen täze elektronlar çogdumy döredilse, onda bu böwsülme öz tebigaty boýunça arassa elektron hadysasy bolýar. Şonda elektronlar bellibir kritiki tizlik bilen urgy netijesinde kristal gözeneginde maýyşgak yrgyldyny oýandyryrlar we täze elektronlaryň goparylmagyna getirýär. Ýagny gaty jisimde urgy-ionlaşma ýüze çykýar. Onda elektrik geçirijilik dielektrik ýitgileri netijesinde jisimiň gyzmasy täsir etmeýär. Deňdeş materiallarda böwsülme naprýaženiýe deňdeş we deňdeş däl elektrik meýdanlarda uly tapawutly bolýar. Ol tapawut tehniki aýnanyň bir görnüşü üçin 2.37-nji çyzgyda görkezilýär.



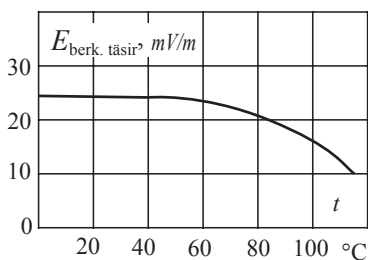
**2.37-nji çyzgy. Tehniki aýnanyň bir görnüşinde birmeňzeş  
(1) we deňdeş däl (2) elektrik meýdanlarynda böwsülme naprýaženiýäniň  
 $h$  galyňlyga baglylygy ( $f = 50 Gs$ )**

Deňdeş däl dielektrikleriň elektrik böwsülmesi gazly öýjükleri bolan tehniki dielektriklerde ýüze çykýar. Ol hem gysga wagtda bo-

lup geçýär. Birmeňzeş däl dielektriklerde böwsülme naprýaženiýesi adatça uly bolmaýar, ol birmeňzeş we birmeňzeş däl meýdanlarda kân tapawut etmeýär (2.38-nji çyzgy).



**2.38-nji çyzgy.** Elektrotehniki farforda deňdeş (1) we deňdeş däl (2) elektrik meýdanda  $U_b$ -niň  $h$  galyňlyga baglylygy



**2.39-nji çyzgy.** Elektrotehniki farforda ( $f = 50$  Gs) elektrik berkligiň temperatura baglylygy (A-elektrik böwsülme çägi, B-ýylylyk böwsülmesi)

2.34 we 2.35-nji çyzgylardan görnüşi ýaly,  $h$  galyňlygyň ulalmagy bilen birmeňzeş we birmeňzeş däl meýdanlarda  $U_b$  böwsülme naprýaženiýe peselýär. Sebäbi galyňlygynyň artmagy bilen materialyň deňdeş dällik derejesi artýar. Gaty dielektriklerde (keramika, kagyz, karton we ş.m)  $U_b$  böwsülme naprýaženiýesi elektrodalaryň meýdanyna hem bagly bolýar, ýagny  $U_b$  meýdanyň ulalmagy bilen kiçelýär. Sebäbi meýdanyň ulalmagy bilen bu ýerde hem deňdeş dällik artýar. Gaty dielektriklerde böwsülme naprýaženiýesi bellibir temperatura çenli temperatura bagly bolmaýar (2.39-nji çyzgy).

Megerem, şol temperaturadan soň ýylylyk böwsülme başlaýar. Elektrik berkligi ýokary gaty materiallara howa boşluksyz, dykyz materiallar (slýuda, aýna we gowy ýag siňdirilen kagyz we ş.m) degişli bolýar.

Ýylylyk böwsülmesi dielektriklerde dielektrik ýitgileriniň hasabyna ýüze çykýan ýylylyk mukdarynyň tä-

siri bilen materialyň gyzmagy, eremegi ýa-da çişmesi netijesinde ýüze çykýar. Ol böwsülmede böwsülme naprýaženiýe materialyň ýylylyk häsiýetlerine, sowadylyş şertlerine, ýygylgy we daşky temperatura bagly bolýar. Meselem, organiki materiallarda (polietilen, polistirol, organiki aýna) organiki däl (kwars, keramika) materiallara garanyňda  $U_b$  böwsülme naprýaženiýesi has pes bolýar.

Goý, deňdeş dielektrigiň plastinkasy iki sany tekiz elektrodларыň arasynda ýerleşdirilen bolsun (2.40-njy çyzgy).

Eger ol elektrodlara üýtgeýän  $U$  naprýaženiýe berilse, onda şol dielektrikde ýüze çykýan dielektrik ýitgileriniň kuwwaty:

$$P_a = U^2 \cdot \omega \cdot C \cdot \operatorname{tg} \delta, \quad (2.57)$$

bu ýerde  $U$  – elektrodlara goýlan üýtgeýän naprýaženiýe;  $\omega = 2\pi f$  – ýyglylyk;  $C$  – şol tekiz kondensatoryň elektrik sygymy.

Bu energiýa ýitgileriniň bir bölegi dielektrigiň gyzmagyna sarp bolýar. Onuň başga bir bölegi bolsa dielektrikden metal elektrodларыň üsti bilen daşky gurşawa geçirilýär. Ol geçirilýän energiýanyň kuwwaty:

$$P_t = 2 \cdot \sigma \cdot S(t - t_0), \quad (2.58)$$

bu ýerde  $\sigma$  – metal dielektrik aralygynda ýylylyk geçirijilik koeffisiýenti;  $S$  – elektrodларыň meýdany;  $t$  – dielektrigiň temperaturasy;  $t_0$  – daşky gurşawyň temperaturasy.

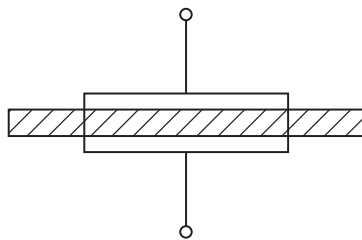
Goýlan naprýaženiýäniň bellibir  $U_0$  bahasynda  $P_a = P_t$  deňlik ýüze çykýar. Eger goýlan naprýaženiýe  $U_0$  bahadan ýokary bolanda  $P_a > P_t$  bolmak bilen dielektrik gyzyp,  $U$ -nyň belli bir bahasynda dielektrigiň böwsülmesi ýüze çykýar. Oňa ýylylyk (elektrik ýylylyk) böwsülmesi diýilýär. Şoňa degişli naprýaženiýäniň bahasyna bolsa ýylylyk böwsülme naprýaženiýesi diýilýär.

Hasaplamalaryň netijesinde  $U_b$  naprýaženiýe aşakdaky formula bilen kesgitlenýär:

$$U_b = K \cdot \sqrt{\frac{\sigma \cdot h}{f \cdot \varepsilon \cdot \operatorname{tg} \delta_0 \cdot \alpha}}, \quad (2.59)$$

bu ýerde  $K = 1,15 \cdot 10^5$  – san koeffisiýent;  $h$  – dielektrigiň galyňlygy,  $m$ ;  $\alpha$  –  $\operatorname{tg} \delta$ -niň temperatura koeffisiýenti. Ol  $\operatorname{tg} \delta = \operatorname{tg} \delta_0 \cdot e^{\alpha(t-t_0)}$  formulanyň esasynda kesgitlenýär.

Elektrik-himiki böwsülme – böwsülmäniň bu görnüşi ýokary temperaturalarda we ýokary çyglylyklarda ýüze çykýar. Naprýaženiýäniň uzak wagtlap täsir etmegi bilen material könelyär we materialyň elektrik garşylygy peselýär. Bu ýagdaý dielektrikleriň öz hi-



**2.40-njy çyzgy.** Deňdeş gaty dielektrigiň iki tekiz elektrodларыnyň arasynda ýerleşdirilişi

miki durnuklylygyna we elektrodlara hem bagly bolýar. Şeýlelikde, elektrik-himiki böwsülmäniň ýüze çykmagy üçin köp wagt gerek bolýar. Ol böwsülmäniň organiki materiallarda köp duş gelýändigini bellemeli.

## 2.10. Dielektrikleriň fiziki-mehaniki we ýylylyk häsiýetleri

Bellibir maksat bilen dielektrik materiallary saýlanyp alnanda, diňe elektrik häsiýetleri göz önünde tutulman, eýsem, olaryň fiziki-mehaniki, ýylylyk häsiýetleri, şeýle hem olara daşky gurşawyň täsirleri göz önünde tutulmalydyr we hasaba alynmalydyr.

**Dielektrikleriň çyglylyk häsiýetleri.** Belli bolşy ýaly, dielektrik materiallaryň elektrik häsiýetlerine olaryň düzümindäki we üstündäki suwlar we suw buglary örän uly täsir edýär. Şol sebäpli elektroörtük materiallarynyň çyglylygyny, suw siňdirijiligini we suw geçirijiligini hasaba almak zerur bolýar.

Atmosfera howasy hemişe özüniň düzüminde suw buglaryny saklaýar. Köp halatlarda dielektriklere suw buglary howadan geçýär we ol howanyň çyglylygyna bagly bolýar. Howanyň çyglylygy iki görnüşde kesgitlenýär: absolýut we otnositel (göräleýin) çyglylyk. Absolýut çyglylyk howanyň göwrüm birligindäki suwuň mukdary –  $m$  massasy bilen kesgitlenýär. Ölçeg birligi  $\frac{g}{m^3}$ .

Otnositel çyglylyk aşakdaky formula bilen kesgitlenýär:

$$\varphi_h = \frac{m}{m_d} \cdot 100 = \frac{P}{P_d} \cdot 100 \%, \quad (2.60)$$

bu ýerde  $m$  – berlen temperaturada, howada absolýut çyglylyk;  $m_d$  – şol temperaturada doýgun buguň absolýut çyglylygy;  $P$  – berlen temperaturada, howada suw bugunyň basyşy;  $P_d$  – şol bir temperaturada doýgun buguň basyşy.

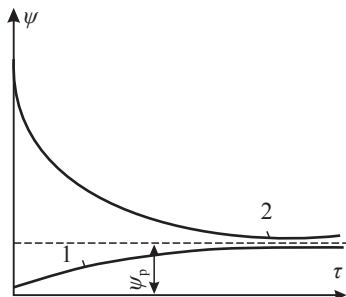
Adaty şertlerde ( $t=20^\circ\text{C}$ ) howanyň otnositel çyglylygy  $60\div 70\%$  hasap edilýär.  $t=20^\circ\text{C}$  temperaturada doýgun buguň absolýut çyglylygy  $m_d=17,3 \frac{g}{m^3}$ . Onda şol temperaturada howanyň otnositel çyglylygy

$\varphi_h = 65\% = 0,65$  bolsa, onda (2.60) formula esasynda howanyň absol-  
ýut çyglylygy:

$$m = \varphi_h \cdot m_d = 0,65 \cdot 17,3 = 11,25 \frac{\text{g}}{\text{m}^3}. \quad (2.61)$$

Ýagş ýagýan wagtlarynda howanyň çyglylygy  $\varphi_h = 98\%$ -e ýetip bilýär.

**Materiallaryň özüne suw siňdirijiligi.** Elektroörtükli materia-  
lyň bir bölegi bellibir çyglylykly gurşawda we temperaturada ýer-  
leşdirilende, uzak wagtyň dowamynda ol deňagramlaşan çyglylykly  
hala geçer. Eger gury materialyň bölegi bellibir  $\varphi$  oňnositel çyglylygy  
bolan howada ýerleşdirilse, onda ol howadan çyglylygy özüne siňdi-  
rip, onuň  $\psi$  çyglylygy  $\tau$  wagtyň geçmegi bilen artyp, asimptotiki  $\psi_d$   
deňagramlaşan çyglylyga ýakynlaşýar (2.41-nji çyzgy).



**2.41-nji çyzgy.** Elektroörtükli materialyň bölegi çyglylandyrylanda  
we guradylanda onuň  $\psi$  çyglylygynyň  $\tau$  wagta baglylygy.  
1-çyglylandyrylanda, 2-guradylanda

$\psi_d$  deňagramlaşan çyglylyk dürli materiallar üçin dürli bolýar.  
Ol öýjükli, süýümlü materiallarda köp bolýar. Şonuň üçin dokma we  
kagyz materiallary üçin bellibir kondission çyglylyk diýilýän deňag-  
ramlaşan çyglylyk bellenilýär. Meselem, kabel kagzy üçin kondis-  
sion çyglylyk  $\psi = 8\%$  hasap edilýär.

**Materiallaryň suw buglaryny geçirijiligi.** Köp elektroörtükli  
materiallar öz üstünden suw buglaryny geçirmäge ukyply bolýarlar.  
Materialyň öz üstünden geçirýän suw bugunyň mukdary aşakdaky  
formula bilen kesgitlenýär:

$$m = \Pi \frac{(P_1 - P_2) \cdot S \cdot \tau}{h}, \quad (2.62)$$

bu ýerde:  $\Pi$  – materialyň çyg geçirijilik koeffisiýenti;  $S$  – materialyň bug geçirýän üstüniň meýdany;  $P_1$  we  $P_2$  – materialyň iki gapdalynyň suw bugunyň basyşy;  $\tau$  – wagt;  $h$  – materialyň galyňlygy (2.62) formula görä:

$$\Pi = \frac{mh}{(P_1 - P_2) \cdot S \cdot \tau}. \quad (2.63)$$

$\Pi$  dürli materiallar üçin dürli bolýar. Meselem, serezin üçin  $\Pi=1,5 \cdot 10^{-16} \text{ sek}$ ; polistirol üçin  $\Pi=6,2 \cdot 10^{-15} \text{ sek}$ .

**Gaty dielektrikleriň mehaniki häsiýetleri.** Dielektrikler bel-libir maksat bilen ulanylanda, olardan dürli elektrotehniki önümler öndürilende we göçürilende olaryň mehaniki häsiýetleri örän uly rol oýnaýar. Fizikadan belli bolşy ýaly, materialyň mehaniki häsiýetlerine onuň süýnmäge, gysylmaga we egrelmäge berkligi, olaryň portlugy, maýyşgaklygy we ş.m degişlidir. Şoňa görä-de materiallara baha berlende we saýlananda bu häsiýetleri göz önünde tutmak zerurdyr.

**Şepbeşiklik.** Ol suwuk we ýarym suwuk elektroörtükli materiallar üçin esasy mehaniki häsiýetleriň biridir. Şepbeşiklik (içki sürtülme) suwuklygyň ýa-da gazyň bir böleginiň beýleki goňşy bölegine görä hereketine garşy ugrukdyrylan içki sürtülme güýjüdür. Ol mukdar taýdan dinamiki şepbeşikligiň koeffisiýenti ýa-da içki sürtülmäniň koeffisiýenti diýlip atlandyrylýan  $\eta$  ululyk bilen häsiýetlendirilýär. Ölçegleriň halkara ulgamynda dinamiki şepbeşikligiň ölçeg birligi  $Pa \cdot s$ . Kinematiki şepbeşiklik  $\nu$  dinamiki şepbeşikligiň  $\rho$  dykzylyga bolan gatnaşygyna deň:

$$\nu = \frac{\eta}{\rho}. \quad (2.64)$$

Onuň halkara ulgamda ölçeg birligi  $m^2/s$ .  $\eta$  ululyk temperatura-nyň artmagy bilen eksponensial düzgün boýunça kiçelýär:

$$\eta = Ae^{\frac{W}{kT}}, \quad (2.65)$$

bu ýerde  $A$  – berlen suwuklyk üçin hemişelik;  $W$  – molekulalaryň işjeňleşme energiýasy;  $k$  – Bolsmanyň hemişeligi.

## 2.11. Dielektrikleriň ýylylyk häsiýetleri

Dielektrikleriň esasy ýylylyk häsiýetlerine gyzgyna çydamlylyk, sowuga çydamlylyk, ýylylyk geçirijilik we ýylylyga giňelme häsiýetler deňşlidir.

**Gyzgyna çydamlylyk.** Kadaly şertlerde ulanmak möhletine deňräk wagtda ýokary temperaturanyň täsirinde öz häsiýetlerini rugsat berilmeyän möçberde üýtgetmän saklap bilmek ukybyna materialyň gyzgyna çydamlylygy diýilýär. Organiki däl materiallarda düzgün boýunça gyzgyna çydamlylyk olarda  $tg\delta$ -niň we udel garşylygyň görnetin üýtgemegi bilen kesgitlenýär. Organiki materiallaryň gyzgyna çydamlylygyny kesgitlemegiň öňden bári belli usulyna Martensiň usuly diýilýär. Ol usul boýunça sintetiki-organiki materiallarda  $1 K/min$  tizlik bilen gyzdyrylanda  $5 Mpa$  deň bolan  $F$  egrediji güýç göze görnetin deformasiýa döretmeli. Bu usul boýunça kesgitlenen gyzgyna çydamlylyk polistiroly üçin  $70-85^{\circ}C$ , getinaks üçin  $150-180^{\circ}C$ .

Russiýada öndürilýän elektrotehniki materiallar (GOST-8865-70 boýunça) gyzgyna çydamlylygy boýunça aşakdaky toparlara bölünýär:

Gyzgyna çydamlylyk klasy:

Y      A      E      B      F      H      C.

Olaryň maksimal iş temperaturasy  $^{\circ}C$ -lerde:

90      105      120      130      155      180       $>180$ .

Meselem,  $Y$  – topara ýag siňdirilmedik organiki süýümlerden örülen we dokalan mata, kagyz, karton deňşlidir.  $C$  – topara arassa organiki däl materiallar deňşli bolýarlar (slýuda, aýna, kwars, asbest).

**Ýylylyk geçirijilik.** Materialyň ýylylyk geçirijiligi onuň  $\sigma_T$  ýylylyk geçirijilik koeffisiýenti bilen häsiýetlendirilýär. Materialyň üstünden geçýän ýylylyk akymynyň kuwwaty  $\Delta P_T$  Furýeniň deňlemesi bilen kesgitlenýär:

$$\Delta P_T = \sigma_T \frac{dT}{dl} \Delta S, \quad (2.65)$$

bu ýerde  $\sigma_T$  – materialyň ýylylyk geçirijilik koeffisiýenti,  $\left(\frac{Wt}{m \cdot K}\right)$ ;  $\Delta S$  – ýylylyk akymyna perpendikulýar üstüň meýdany;  $\frac{dT}{dl}$  – temperatura gradiýenti.

Birnäçe dielektrikler üçin  $\sigma_T$ -niň bahalary 2.6-njy tablisada berilýär.

2.6-njy tablisa

**Birnäçe dielektrikleriň ýylylyk geçirijilik koeffisiýentiniň bahalary**

Material	$\gamma T'$ $Wt/$ ( $m \cdot K$ )	Material	$\gamma T'$ $Wt/$ ( $m \cdot K$ )
1	2	3	4
Howa (uly bolmadyk giňişlikde) .	0,05	Eredilen kwars. ....	1,25
Bitumlar. ....	0,07	Farfor. ....	1,6
Kagyz. ....	0,10	Steatit. ....	2,2
Laklanan mata. ....	0,13	Titanyň dioksidi. ....	6,5
Tekstolit. ....	0,25	Kristallik kwars. ....	12,5
Getinaks. ....	0,35	Alýuminiň oksidi. ....	30,0
Suw. ....	0,58	Magniniň oksidi. ....	36,0
		Berilliniň oksidi. ....	218,0

**Ýylylyga giňelme.** Dielektrikleriň hem ýylylyga giňelmesine, beýleki materiallardaky ýaly, çyzykly giňelmäniň temperatura koeffisiýenti bilen baha berilýär. Onuň ölçeg birligi  $K^{-1}$ .

$$\ell TK = \alpha_\ell = \frac{1}{\ell_0} \cdot \frac{d\ell}{dT} . \quad (2.66)$$

Birnäçe dielektrikler üçin  $2e$ -niň bahalary 2.7-nji tablisada berilýär.

**Käbir dielektrikler üçin çyzykly giňelmäniň temperatura koeffisiýentiniň bahalary**

2.7-nji tablisa

Material	$\gamma T'$ $Wt/$ ( $m \cdot K$ )	Material	$\gamma T'$ $Wt/$ ( $m \cdot K$ )
Poliwinilasetat. ....	265	Poliwinilformal. ....	64.0
Poliwinilhlorid. ....	160	Epoksid smolalar. ....	55.0
Polietilen. ....	145	Slýuda. ....	37.0
Sellýulozanyň asetaty. ....	120	Silikat aýna. ....	9.2
Neýlon. ....	115	Toýun keramika. ....	7.0
Politetraftoretlen. ....	100	Steatit. ....	6.6
Polimetilmetakrilat. ....	70	Farfor. ....	3.5
Polistirol. ....	68	Eredilen kwars. ....	0.35



ELEKTROÖRTÜKLI  
MATERIALLAR**3.1. Elektroörtükli materiallar barada  
umumy düşüňjeler. Gaz halyndaky we suwuk  
elektroörtükli materiallar**

**Elektroörtükli materiallar barada umumy düşüňje.** Dielektrik materiallar elektrotechnikada, esasan, elektroörtükli materiallar hökmünde giňden ulanylýar. Elektroörtükli materiallaryň wezipesi – berlen elektrotehniki gurluşyň elektrik shemasynda göz önünde tutulmadyk ugurlar boýunça elektrik togunyň akmaýlygyny gazanmakdyr. Şonuň üçin elektroörtükli material hökmünde ulanylýan dielektrikleriň örän uly udel garşylygy bolmaly. Bu ýerden görnüşi ýaly, elektroörtükli materialsyz hiç hili elektrotehniki gurluş bolup bilmez. Elektroörtükli materiallar agregat hallary boýunça gaz halynda, suwuk we gaty hallarda bolup bilýär. Himiki tebigaty boýunça olar organiki we organiki däl materiallara bölünýär.

Organiki maddalara uglerodnyň birleşmeleri degişlidir. Olaryň himiki düzümine ugleroddan başga wodorod, kislorod, azot, galogenler we beýleki elementler hem girip bilýär. Organiki maddalar özleriniň aýratyn mehaniki häsiýetleri bilen örän inçe süýümleri, ýuka plýonkalary we dürli şekilli önümleri taýýarlamaga mümkinçilik berýär. Şonuň üçin olar elektrotechnikada we durmuşda örän giňden ulanylýar. Emma organiki elektroörtükli materiallaryň gyzgyna çydamlylygynyň pes bolýanlygyny bellemeli.

Organiki däl materiallar çeyje we maýyşgak bolman, köplenç, port bolýar. Ýöne olaryň gyzgyna çydamlylygy organiki materiallar bilen deňeşdirilende has ýokary bolýar. Şonuň üçin olar ýokary iş temperaturasy bolan elektroörtükli materiallar talap edilýän ýerlerde giňden ulanylýar.

**Gaz halyndaky elektroörtükli materiallar.** Gaz halyndaky elektroörtükli materiallara seredilende ilki başda howany göz önünde tutmaly. Köp ýerlerde, meselem, daşy elektroörtüksiz elektrik liniýalaryň arasynda howa ýeke-täk elektroörtük hökmünde hyzmat edýär. Elektrotehnikada giňden ulanylýan gazlaryň birnäçesiniň esasy häsiýetleri 3.1-nji tablisada berilýär.

### Gazlaryň häsiýetleri

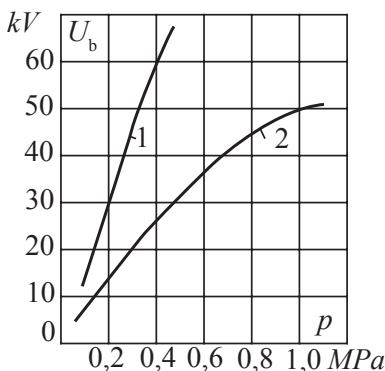
3.1-nji tablica

Häsiýetleri	Howa	Azot (N <sub>2</sub> )	Kislorod (O <sub>2</sub> )	Wodorod (H <sub>2</sub> )	Ar- gon (Ar)	Metan (CH <sub>4</sub> )	Ele- gaz (SF <sub>6</sub> )	Ge- liý (He)
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Molekulýar mas-sasy	28,96	28,01	32,0	2,01	39,94	16,0	146,0	4,0
Gaýnama tempe-raturasy, <i>K</i>	79,0	77,4	90,2	20,4	87,5	111,7	166,0	4,2
Dykyzlygy, $\frac{kg}{m^3}$	1,29	1,25	1,4	0,09	1,78	0,72	6,39	0,18
Ýylylyk geçiri-jilik koeffisiýen-ti, mWt/mK	24,0	24,0	24,0	166,0	16,3	26,0	-	142,0
Udel ýylylyk sy-gymy, $\frac{mWt}{mk}$	1,005	1,06	0,915	14,20	0,52	2,18	0,62	5,2
Dinamiki şepbe-şikligi, $mkPa \cdot s$	19	18	21	9,5	21	12	15	19
Elektrik berkligi, $\frac{kV}{mm}$	7÷10	10	-	-	-	-	25	-

Azot köp häsiýetleri boýunça howa bilen meňzeş, emma onuň düzüminde turşadyjy kislorod ýok. Şonuň üçin ol köp halatlarda howanyň dereginde ulanylýar.

Elektrotehnikada wodorod hem giňden ulanylýar. 3.1-nji tablisadan görnüşi ýaly, wodorod iň ýeňil gaz, örän ýokary ýylylyk geçirijiligi we ýylylyk sygymy bilen tapawutlanýar. Şonuň üçin elektrik maşynlaryny sowatmakda howanyň deregine wodorody ulanmaklyk elektrik maşynlaryň peýdaly täsir koeffisiýentini we kuwwatyny ýokarlandyrmaga mümkinçilik berýär.

Inert gazlar argon, neon, geliý we beýlekiler, hem-de natriý, si-map buglary gazorazrýad abzallary doldurmak üçin giňden ulanylýar. Sebäbi olaryň elektrik berkligi howa bilen deňeşdirilende 17 esse kiçi bolýar. Şoňa görä, ol abzallar has kiçi naprýaženiýelerde işläp bilýärler. Ylymda we tehnikada suwuk geliniň örän giňden ulanylýandygyny bellemeli. Ol  $T_s = 4,216\text{ K}$  temperaturada suwuk halyna geçýär. Elektrotehnikada uly molekulýar massaly gazlar hem köp ulanylýar. Meselem,  $\text{SF}_6$  (6 ftorly kükürt) – elegaz. Onuň elektrik berkligi howanyňkydan 2,5 esse uly. Howadan 5,1 esse agyr. Ol  $800^\circ\text{C}$ -e çenli gyzdýrylanda dargamaýar we  $2\text{ Mpa}$  basyşa çenli suwuk hala geçmeýär. Şonuň üçin ol uly basyşly kondensatorlarda, öçürijilerde giňden ulanylýar. Howanyň we elegazyň  $U_b$  böwsülme naprýaženiýesiniň absolýut basyşa baglylygynyň grafikleri 3.1-nji çyzgyda görkezilýär.



**3.1-nji çyzgy.** Elegazda (1) we howada (2)  $U_b$  böwsülme naprýaženiýäniň absolýut basyşa baglylygy

## 3.2. Suwuk elektroörtükli materiallar

**Transformator ýagy.** Ol elektrotehnikada suwuk elektroörtükleriň arasynda has köp ulanylýanydyr. Transformatorlarda ol iki wezipäni ýerine ýetirýär. *Birinjiden*, süýümli elektroörtükleriň howa öýjüklerini, sarymlaryny we beýleki boşluklaryny doldurmak bilen elektrik berkligi ýokarlandyrýar. *Ikinjiden*, transformatoryň sarymlarynda we magnit serdeçniklerinde ýitgi netijesinde bölünip çykyan ýylylyk energiýanyň daşky gurşawa çykarylmagyny has ýokarlandyrýar.

ýar. Sebäbi transformator ýagynyň ýylylyk geçirijiligi (sowadyjylygy) howa bilen deňeşdirilende 25–30 esse ýokary bolýar. Transformator ýagy polýar däl molekulaly suwuklyk. Ony basgançakly arassalamak we ýuwmak usuly bilen nebitden alýarlar. Onuň esasy häsiýetleri:

Dielektrik syzyjylygy:  $\varepsilon = 2,1 \div 2,3$ ;

Udel garşylygy:  $\rho = 10^{10} \div 10^{13} \text{ } \Omega \cdot \text{m}$ ;

Ýitgi burçy:  $\text{tg}\delta = 0,002$ ;

Elektrik berkligi:  $\varepsilon_b = 25 \div 50 \frac{\text{kV}}{\text{mm}}$ ;

Şepbeşikligi:  $\eta = 170 \cdot 10^{-4} P_a \cdot s$ ;

Doňma temperaturasy:  $-45^\circ\text{C}$ ;

Ýanma temperaturasy:  $135 \div 140^\circ\text{C}$ ;

Dykyzlygy:  $d = 850 \div 900 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ ;

Göwrüme giňelme koeffisiýenti:  $\beta_v = 650 \cdot 10^{-6} K^{-1}$ ;

Ýylylyk geçirijilik koeffisiýenti:  $\gamma = 1 \frac{\text{mWt}}{\text{mk}}$ ;

Udel ýylylyk sygymy:  $C = 1,5 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot K}$ .

Transformator ýagynyň elektrik berkligi ýokarda bellenişi ýaly, onuň düzümindäki suwuň mukdaryna bagly bolup, özem birden peselip hem bilýär. Eger onuň düzüminde, suwdan başga, süýümlü garyndylar hem bar bolsa, elektrik berkligiň peselmesi has hem güýçlenýär. Şonuň üçin «Elektrostansiýalaryň tehniki ulanylyş Düzgüni» boýunça transformator ýagynyň arassalygynyň we elektrik berkliginiň kesgitlenen we rugsat edilýän kadalary bolmaly. Ol ulanylýan ýagdaýynda ýygy-ýygydan barlanylyp we arassalanylyp durmalydyr.

Ondan başga-da transformator ýagy işlände wagtyň geçmegi bilen hatardan çykýar. Hatardan çykan ýagdaýynda onuň reňki garalýar, ondan hapalaýjy önümler – kislotalar, smolalar bölünip çykýar. Olaryň ýagda eremedikleri gabyň düýbünde çökündi emele getirip, daşky gurşawa ýylylyk geçirilmesini peseldýär. Onda bölünip çykan kislotalar bolsa tegekleriň sarymlarynyň elektroörtüklerini zaýalalýar. Ondan başga-da ýagýň könelmegi bilen onuň şepbeşikligi artyp, elektroörtüklik häsiýetleri ýaramazlaşýar.

Transformator ýagyndan başga elektrotehnika senagatynda nebitden alynýan kondensator ýagy we kabel ýaglary hem giňden ulanylýar.

*Kondensator ýagy* – kagyz kondensatorlarynda kagyz dielektrige siňdirmek üçin ulanylýar. Onuň esasy häsiýetleri:

Dykyzlygy:  $d = 860 \div 890 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ .

Doňma temperaturasy:  $-45^\circ\text{C}$ .

Dielektrik syzyjylygy:  $\varepsilon = 2,1 \div 2,3$  ( $f=1 \text{ kGs}$  ýygylýkda);

Elektrik berkligi:  $E_b = 20 \frac{\text{kV}}{\text{mm}}$ .

Kabel ýaglary güýç kabelleriň kagyz örtüklerine siňdirmek üçin ulanylýar. Şonda elektroörtügiň elektrik berkligi we ýylylyk geçirijiligi ýokarlanýar. Iş naprýaženiýesi  $35 \text{ kV}$  bolan KM-25 markaly siňdirilýän ýag ulanylýar.  $110 \div 220 \text{ kV}$  güýç kabellere guýmak üçin MH-4 kysymly guýulýan kabel ýaglary ulanylýar. Hemme nebitden alynýan suwuk elektroörtükli materiallar ýangyç bolup, olar ulanylýan ýerlerinde ýangyn howpuny döredýär. Ondan başga-da çalt könelýär we hapalanýar. Bu ýetmezçilikleri aýyrmak ýa-da azaltmak üçin köp halatlarda sintetiki suwuk dielektrikler ulanylýar.

**Sintetik suwuk dielektrikler.** Hlorlanan difeniller: pentahlordifenil  $\text{C}_{12}\text{H}_5\text{Cl}_5$  (onuň başgaça ady sowol). Ol  $f = 50 \text{ Gs}$ -de  $\varepsilon=5$ . Diýmek, kondensator ýagy sowol bilen çalşyrylsa, onuň göwrümini 2 esse kiçeltmek bolýar. Ol ýangyç däl, ýöne güýçli zäherli. Onuň şepbeşikligi transformatorlar üçin ýokary. Onuň bu ýetmezçiligini aýyrmak üçin oňa 10% trihlorbenzol ( $\text{C}_6\text{H}_3\text{Cl}_3$ ) goşulýar we oňa sowtol diýilýär.

Sowol we sowtoldan başga kremni-organiki we ftoro-organiki sintetik suwuk dielektrikler hem ulanylýar. Olar örän kiçi  $\text{tg}\delta$ -si we ýokary gyzgyna çydamlylygy ( $200 \div 250^\circ\text{C}$ ) bilen tapawutlanýarlar. Emma bu suwuklyklaryň bahasy gymmat. Kā halatlarda elektroörtükli materiallar taýýarlananda dürli ösümlikleriň çigidinden alynýan ösümlik ýaglarynyň hem ulanylýandygyny bellemeli. Ösümlik ýaglaryna lýon ýagy, kastor ýagy, tungaw ýagy, ýurdumyzda köp öndürilýän pagta ýagy, günebakar ýagy we künji ýagy degişlidir. Bu ýaglaryň kăbiriniň çalt guramak (bugarmak) häsiýeti bar. Şonuň üçin ol ýaglar erediji hökmünde elektroörtükli laklary taýýarlamakda giňden ulanylýar.

### 3.3. Gaty elektroörtükli materiallar. Organiki polimerler. Sintetik smolalar

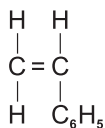
**Organiki polimerler barada umumy düşüňjeler.** Elektrotehnikada giňden ulanylýan gaty elektroörtükleriň köpüsi ýokary molekulýar organiki materiallardyr. Olaryň molekulalary köp bolup, molekulýar massalary, takmynan, milliona ýetýär. Tebigatda duş gelýän ýokary molekulýar maddalara sellýuloza, ýüpek, belok, kauçuk, kani-  
fol we başgalar degişlidir.

Emeli ýol bilen alynýan ýokary molekulýar materiallar iki gör-nüşe bölünýär:

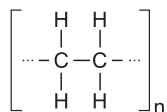
1. Ýokary molekulýar materiallary himiki ýol bilen täzeden iş-  
lenip alynýan emeli materiallar. Meselem, sellýulozadan sellýuloza  
efirini almak;

2. Sintetik ýokary molekulýar materiallar.

Olar pes molekulýar maddalardan alynýar. Himiki tebigaty bo-  
ýunça ol materiallar polimerlerdir. Polimeriň her bir molekulasyňy  
monomer diýlip atlandyrylýan maddalaryň has ýönekeý molekula-  
larynyň uly toplumynyň özara birleşmesi emele getirýär. Monomer-  
lerden polimer emele gelme reaksiýasyna polimerleşme reaksiýasy  
diýilýär. Polimerleşmeden soň gaz halyndaky ýa-da suwuk halynda-  
ky maddalar gaty hala geçip bilýärler. Meselem,  $C_8H_8$  – stirol suwuk  
uglewodorodyň molekulýar gurluşy aşakdaky ýaly aňladylýar:



Ol (monomer) polimerleşmeden soň polistirol diýip atlandyryl-  
ýan gaty polimer madda özgerýär. Onuň molekulýar gurluşy aşakda-  
ky ýaly aňladylýar:



Bu ýerde  $n$  – polimerleşme derejesi. Ol polimeriň bir molekula-  
synda monomeriň näçe molekulasyňyň bardygyny görkezýär. Po-  
listirol üçin  $n = 6000$  çenli bolup biler. Stirolýň molekulýar massasy

$Mr(C_8H_8) = 12 \cdot 8 + 1 \cdot 8 = 104$ . Onda polistirolyň molekulýar massasy  $104 \cdot 6000 = 624000$  bolar.

Polimerleriň bellibir ereme temperaturasy bolmaýar, ýagny olar gyzdyrylanda ilki ýumşap, kem-kemden suwuk hala geçip bilýär.

Polimerler iki topara bölünýär:

1. Çyzykly polimerler.
2. Giňişlikleýin polimerler.

Çyzykly polimerleriň molekulalary zynjyr ýa-da inçe ýüplük görnüşinde bolup, olar göni däl, egreden we biri-birine perpendikulýar görnüşde ýerleşýärler. Ol molekulalaryň uzynlygynyň kese-kesigine bolan gatnaşygy müňe çenli bolup biler. Giňişlikleýin polimerleriň molekulalary (üç ölçegli) giňişlikde hemme tarapa, takmynan, deňräk ösen bolýar we takmynan şar şekilde bolýar.

Çyzykly we giňişlikleýin polimerleriň häsiýetleri has tapawutly bolýarlar. Çyzykly polimerler çäýe we maýyşgak bolup, ýokary bolmadyk temperaturalarda ýumşap, soňra eräp bilýär.

Giňişlikleýin polimerler gaty häsiýetli bolup, ýumşama temperaturasy has ýokary bolýar ýa-da ýumşama temperatura ýetmänkä olaryň özlери ýanýar ýa-da çişýär, ýitip gidýär.

Çyzykly polimerler inçe, çäýe, berk süýümler we ýuka gatlak almaga mümkinçilik berýär. Ony süýümleri, dokma materiallary taýýarlamakda ulanýarlar. Giňişlikleýin polimerlerden inçe süýümleri we ýuka gatlagy alyp bolmaýar.

Organiki polimerler ýylylyk häsiýetleri boýunça hem iki topara bölünýärler:

1. Termoplastik materiallar.
2. Termoreaktiv materiallar.

Termoplastik materiallar gyzdyrylanda ýumşaýar, özem maýyşgak bolýar, bellibir eredijilerde ereýär. Olary ýumşama temperaturasyna çenli gyzdyryp, ýene sowadylsa, olar öňki häsiýetlerine eýe bolýar. Emma termoreaktiv polimerler termoplastik materiallaryň tersine, gyzdyrylanda olarda öwrülmeýän hadysalar bolup, has berk, gaty bolýarlar we ereme häsiýetini ýitirýärler.

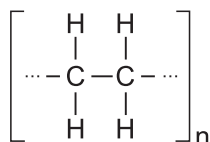
Umuman, termoplastik materiallara çyzykly materiallar, termoreaktiv materiallara bolsa köp dürli materiallar degişli bolýarlar.

**Smolalar. Sintetiki smolalar.** Smolalar, umuman, ýokary molekulýar organiki maddalaryň çylşyrymly garyndylarydyr. Olar tebigy we sintetiki smolalara bölünýärler. Tebigy smolalara kanifol we gazylyp alynýan kopallar degişlidir.

Elektrotehnikada, şeýle hem durmuşda elektroörtük material hökmünde sintetiki smolalar has giňden ulanylýar. Şoňa görä aşakda sintetiki smolalaryň birnäçesine seredip geçeliň.

**Polietilen.** Ol gaz halyndaky etileniň polimerleşmesi netijesinde alynýar.

Etileniň himiki düzümi  $H_2C=CH_2$  ýa-da  $C_2H_4$ . Ol köp möçberde nebit önümlerinden alynýar. Polietilen gaty halda bolup, onuň molekulýar gurluşy aşakdaky ýaly bolýar:



Polietileni almak üçin üç usul ulanylýar:

1. Ýokary basyşda ( $300 \text{ Mpa}$  çenli) we  $200^\circ\text{C}$  temperaturada bolup, bu usul bilen alynýan polietilene ýokary basyşly polietilen diýilýär. Ol rus dilinde gysgaça ПЭВД diýlip bellenilýär. Bu polietileniň dykzlygy  $920 \div 930 \text{ kg/m}^3$ ; ereme temperaturasy  $105 \div 110^\circ\text{C}$ . Molekulýar massasy  $18000\text{--}35000$ .

2. Pes basyşda alynýan polietilen ( $0,3 \div 0,6 \text{ Mpa}$  we  $80^\circ\text{C}$  temperatura) rus dilinde ПЭНД görnüşde bellenilýär. Bu polietileniň dykzlygy  $940 \div 960 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ ; ereme temperaturasy  $120 \div 125^\circ\text{C}$ .

3. Orta basyşda alynýan polietilen ( $3 \div 7 \text{ Mpa}$  we  $160 \div 275^\circ\text{C}$ ). Ol gysgaça rus dilinde ПЭСД görnüşde bellenilýär. Bu polietileniň dykzlygy  $960 \div 970 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ ; ereme temperaturasy  $127 \div 130^\circ\text{C}$ .

Polietileniň esasy häsiýetleri:

Udel garşylygy:  $\rho = 10^{13} \div 10^{15} \text{ Om} \cdot \text{m}$ ;

Dielektrik syzyjylygy:  $\varepsilon = 2,3 \div 2,4$ .

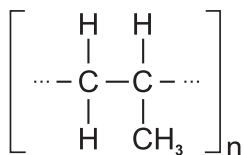
Ýitgi burçy  $\text{tg}\delta = 0,0001 \div 0,0005$ .

Elektrik berkligi:  $E_b = 15 \div 20 \frac{\text{kV}}{\text{mm}}$ .

Otnositel süýnäjiligi:  $300\%$



**Polipropilen.** Ol propileniň ( $\text{H}_2\text{C}=\text{CH}-\text{CH}_3$ ) polimerleşmesi netijesinde alynýar. Onuň molekulýar gurluşy aşakdaky görnüşde:



Polipropileniň dykyzlygy  $900 \div 910 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ , ereme temperatura-sy  $160 \div 170^\circ \text{C}$ , gyzgyna çydamlylygy  $105^\circ \text{C}$ , otnositel süýnüşiligi  $500 \div 700\%$ .

Polipropileniň we polietileniň elektroörtükli häsiýetleri bir-meňzeş. Bu materiallara ýurdumyzyň içinde we daşarky bazarlar-da islegiň uludygy sebäpli, hormatly Prezidentimiz Gurbanguly Berdimuhamedowyň uly tagallasy bilen, häzirki wagtda Hazaryň kenar-nynda Gyýanlyda kuwwatly gaz-himiýa toplumy gurulýar. Onda her ýyl-da 386 müň tonna polietilen we 81 müň tonna polipropilen öndürilmeli.

**Polistirol.** Ol suwuk uglewodorod bolup, stirolyň ( $\text{C}_8\text{H}_8$ ) polimerleşmesi netijesinde alynýar. Polistirol polýar däl gaty madda, özem termoplastik häsiýetli. Onuň dykyzlygy  $1050 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ , gyzgyna çydamlylygy  $70 \div 800^\circ \text{C}$ , otnositel süýnüşiligi  $1,5 \div 4\%$ . Onuň elektrik häsiýetleri:

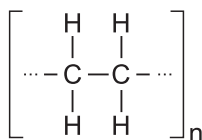
Udel garşylygy:  $\rho = 10^{14} \div 10^{15} \text{ Om} \cdot \text{m}$ ;

Dielektrik syzyjylygy:  $\varepsilon = 2,4 \div 2,6$ .

Ýitgi burçy  $\text{tg} \delta = 0,0001 \div 0,0005$ .

Elektrik berkligi:  $E_b = 20 \div 35 \frac{\text{kV}}{\text{mm}}$ .

**Poliwinilhlorid.** Ol gaz halyndaky monomer bolup, winilhloridiň ( $\text{H}_2\text{C}=\text{CH}-\text{Cl}$ ) polimerleşmesiniň önümidir. Onuň molekulýar gurluşy aşakdaky ýaly bolýar:



Bu ýerden görnüşi ýaly, onuň molekulýar gurluşy polietileniňkä meňzeş, emma onda wodorodyň bir atomy Cl hloryň atomy bilen çal-

şyrylýar. Şoňa görä-de ol polýar polimer bolup, onuň fiziki häsiýetleri peselýär. Onuň dykzlygy  $1400 \div 1700 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ , gyzgyna çydamlylygy  $60 \div 70^\circ\text{C}$ , otnositel süýnüşiligi  $50 \div 150\%$ . Onuň elektrik häsiýetleri:

Udel garşylygy:  $\rho = 1013 \div 1014 \text{ } \Omega \cdot \text{m}$ ;

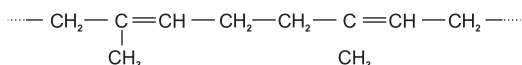
Dielektrik syzyjylygy:  $\varepsilon = 3 \div 5$ ;

Ýitgi burçy:  $\text{tg}\delta = 0,03 \div 0,08$ ;

Elektrik berkligi:  $E_b = 15 \div 20 \frac{\text{kV}}{\text{mm}}$ .

Poliwinilhlorid suwuň, garylan kislotalaryň, benziniň we spirtiň täsirlerine durnuklylygy bilen tapawutlanýar. Şonuň üçin ol tehnikada we tok geçiriji simleriň, kabelleriň daşyna örtmek üçin niýetlenen örtüklik materiallaryň rezin we plastik önümlerini taýýarlamak üçin ulanylýar.

**Polimetilmetakrilat.** Bu material metilmetakrilatyň polimerleşme reaksiýasynyň önümidir:



Bu material organiki aýna, pleksiglas ady bilen bellidir. Ol reňksiz dury konstruktiv material hökmünde hem örän giňden ulanylýar. Oňa elektrik duga täsir edende ondan köp mukdarda gazlar ( $\text{CO}$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CO}_2$ ) bölünip çykýar. Netijede, şol ýerde uly basyş döretme bilen duga söndürilýär. Şonuň üçin ol duga söndüriji material hökmünde hem giňden ulanylýar. Ol materialyň dykzlygy  $1200 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ , otnositel süýnüşiligi  $2 \div 10\%$ . Onuň elektrik häsiýetleri:

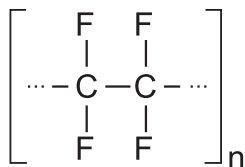
Udel garşylygy:  $\rho = 1011 \div 1012 \text{ } \Omega \cdot \text{m}$ ;

Dielektrik syzyjylygy:  $\varepsilon = 3,5 \div 4,5$ ;

Ýitgi burçy:  $\text{tg}\delta = 0,02 \div 0,08$ ;

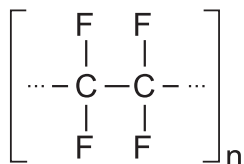
Elektrik berkligi:  $E_b = 20 \div 35 \frac{\text{kV}}{\text{mm}}$ .

**Ftororganiki polimerler.** Olardan ilki başda politetraftoretilene seredeliň. Ol tetraftoretileniň ( $\text{F}_2\text{C}=\text{CF}_2$ ) polimerleşmesi netijesinde alynýar. Onuň molekulýar gurluşy aşakdaky görnüşdedir:



Bu material SSSR döwründe ftorlon – 4 ýa-da ftoroplast – 4 ady bilen öndürilipdir. Onda 4-lik san monomerdäki  $F$  atomlarynyň sanyyny görkezýär. Ftoroplast – 4 organiki materiallaryň arasynda iň ýokary hilli hasap edilýär. Ol ak ýa-da çalymtyk ýarym dury material. Gyzgyna çydamlylygy  $250^{\circ}\text{C}$ . Oňa hiç hili kislotalar täsir etmeýär. Onuň dykzlygy  $2100\div 2300 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ . Ol ýanmaýan, suw siňdirmeyän we öllenmeyän polýar däl materialdyr.  $50\div 1010\text{Gs}$  ýygylak aralygynda dielektrik syzyjylygy  $\varepsilon = 3,5\div 4,5$ ;  $\text{tg}\delta=0,0001\div 0,0003$ ;  $\rho=1016 \text{Om}\cdot\text{m}$ ; elektrik berkligi  $E_b=20\div 30 \frac{\text{kV}}{\text{mm}}$ ; sowuga çydamlylygy –  $80\div 100^{\circ}\text{C}$ .

Ftoroplast – 4-den başga-da elektrotehnikada ftoroplast – 3 (ftorlon–3) hem ulanylýar. Onuň molekulýar gurluşy aşadaky görnüşdedir:



Onda ftoruň bir atomy hlor bilen çalşyrylýar. Şonuň üçin ol polýar molekulaly materiala öwrülýär we onuň häsiýetleri hem az-kem peselýär:

Gyzgyna çydamlylygy:  $130^{\circ}\text{C}$ ;

Dielektrik syzyjylygy:  $\varepsilon=3,3$ ;

Udel garşylygy:  $\rho = 10^{16} \text{Om}\cdot\text{m}$ .

Emma onuň täzeden işlemek tehnologiýasy has ýeňilleşýär.

Häzire çenli seredilen sintetiki polimerleriň molekulýar gurluşyndaky zynjyrlar diňe uglerodyň atomlary bilen emele getirilýär. Emma durmuşda we elektrotehnikada giňden ulanylýan sintetiki şepbikleriň birnäçesinde molekulýar gurluşyň zynjyrlarynda diňe uglerodyň atomlary gatnaşman, eýsem, beýleki elementleriň atomlary hem gatnaşýarlar. Olara geterozynjyrlý sintetiki şepbikler diýilýär. Olara poliamidler, fenolformaldegidler, poliefirler, epoksitler we kremniorganiki şepbikler degişlidir. Ol sintetiki şepbikleriň esasy häsiýetleri 3.2-nji tablisada berilýär. Olar durmuşda ulanylýan inçe sintetiki süýümleri (kapron, neýlon, lawsan) almak üçin giňden ulanylýar.

Geterozynjyrdy termoplastik smolalar

t/n	Sintetik polimerler	Dykyzlygy $\frac{kg}{m^3}$	Gyzgyna çydamly- lygy, °C.	Udel gar- şylygy $\rho$ , $Om \cdot m$ .	Dielektrik syzyjyly- gy, $\epsilon$	tg $\delta$	Elektrik berkligi $E_b, \frac{kV}{mm}$	Otnositel süýnüjili- gi %
1	Poliamid smolalar (kapron, neýlon)	1100÷1150	100÷120	1011÷1012	3÷4	0,015÷0,035	15÷20	90
2	Fenolformaldegid smolalar	1250	105÷120	1011÷1012	5÷6,5	-	10÷20	1,5
3	Poliefirsmolalar (lawsan)	1100÷1450	110÷150	1011÷1014	3÷4,5	0,002÷0,02	15÷25	5÷10
4	Epoksid smola	1100÷1250	120÷140	1012÷1013	3÷4	0,015	20÷80	-
5	Kremniorganiki smolalar	1600÷1750	180÷220	1012÷1014	3,5÷5	0,01÷0,02	15÷25	-

### 3.4. Garasakgyçlar. Mumyýa şekilli dielektrikler. Elektroörtükli laklar we kompaundlar

**Garasakgyçlar.** Garasakgyçlar organiki amorf materiallara degişli bolup, uglewodorodlaryň çylşyrymly mehaniki garyndylarydyr. Olaryň düzümine az mukdarda kislorod we kükürt hem girýär. Garasakgyçlar gara ýa-da gara-goňur reňkde bolup, has pes temperatura-larda gaty we port halda bolýarlar. Olar termoplastik material bolup, gyzdrylanda kem-kemden ýumşap, suwuk hala geçýärler. Onuň dykzlygy takmynan  $1000 \frac{kg}{m^3}$ . Garasakgyçlar suwda we spirtde eremeýärler, emma benzolda, toluolda we benzinde ereýärler. Olar suw siňdirmeyärler we olaryň galyň gatlagyndan suw geçmeýär. Gelip çykyşyna görä bitumlar iki görnüşe bölünýärler:

1. Emeli garasakgyçlar. Olar nebitden alynýar.

2. Tebigy garasakgyçlar. Olara başgaça asfalt hem diýilýär. Olar nebit çykýan ýerlerden gazylyp alynýar (diýmek, asfalt hem tebigy şertlerde nebitden emele gelýän bolmaly).

Elektroörtükli laklar tehnikada nebit garasakgyçlardan BH-III, BH-IV we BH-V we has kynlyk bilen ereýän B we Γ markalylary ulanylýar. Ol markaly garasakgyçlaryň ýumşama temperaturalary degişlilikde:

BH-III	BH-IV	BH-V	B	Γ
50°C	70°C	90°C	110°C	125°C

Garasakgyçlaryň ýumşama temperaturasyny galdyrmak üçin olary 255÷280°C çenli gyzdryyp, erginiň içine howa goýbermeli. Ýumşama temperaturasyny peseltmek üçin bolsa, onuň erginine az mukdarda nebit ýagyny goşmaly. Şonda onuň sowuga çydamlylygy ýokarlanýar we portlugy gowulaşýar. Garasakgyçlar gowşak polýar material bolup, olaryň esasy häsiýetleri:

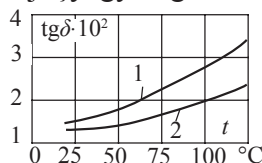
Udel garşylygy:  $\rho = 10^{13} \div 10^{14} \text{ Om} \cdot \text{m}$ ;

Dielektrik syzyjylygy:  $E = 2,5 \div 3,0$ ;

Ýitgi burçy:  $\text{tg} \delta = 0,01$ ;

Elektrik berkligi:  $E_b = 10 \div 25 \frac{kV}{mm}$ .

BH-V we  $\Gamma$  markaly garasakgyçlar üçin  $\text{tg}\delta$ -niň temperatura baglylygynyň grafikleri 3.2-nji çyzgyda görkezilýär.



**3.2-nji çyzgy.** BH-V (1) we  $\Gamma$  (2) markaly garasakgyçlar üçin  $\text{tg}\delta=f(t^0)$  baglylygynyň grafikleri

**Mumyýa şekilli dielektrikler.** Mumyýa şekilli dielektrikler çalt ereýän gaty, kristallik gurluşly, mehaniki berkligi pes we suw siňdirliligi hem pes maddalardyr. Ol materiallar elektrotehnika elektroörtüklere siňdirmek we guýmak üçin ulanylýar. Mumyýa şekilli dielektrikleriniň birnäçesine seredip geçeliň.

*Parafin.* Ol polýar däl molekulaly, mumyýa şekilli we arzan madda bolup, parafinli nebitden alynýar. Arassalanan parafiniň dyklyzlygy  $900 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ , ereme temperaturasy  $50 \div 55^\circ\text{C}$ ,  $\text{tg}\delta = 0,0003 \div 0,0007$ ,  $\rho = 10^{16} \text{ Om}\cdot\text{m}$ , elektrik berkligi  $E_b = 10 \div 25 \frac{\text{kV}}{\text{mm}}$ . Parafini kagyz kondensatorlara, agaja we kartona siňdirmek üçin we tegekleriň arasyna guýmak üçin ulanylýar. Parafin nebit ýaglarynda, benzinde we benzolda ereýär.

*Serezin.* Ol nebitdäki *ozokerit* mineralyny (*dag mumyýasyny*) arassalamak usuly bilen alynýar. Nebitdäki *ozokerit* hem tebigy şertlerde emele gelýän nebit önümidir. Serezin hem kagyz we slýudaly kondensatorlara siňdirmek üçin ulanylýar.

*Sintetiki parafin we sintetiki serezin.* Olar sintetiki benzin we ýaglar alnanda goşmaça önüm hökmünde emele gelýär. Olaryň ereme temperaturasy  $100 \div 130^\circ\text{C}$ . Elektroörtükli häsiýetleri tebigy parafiniň we sereziniň häsiýetlerine meňzeş.

*Wazelin.* Gaty we suwuk uglewodorodlaryň garyndysy bolup, nebitden alynýar. Kagyz kondensatorlarynda siňdirmek üçin ulanylýar. Kondensator wazelininiň esasy häsiýetleri:  $t=20^\circ\text{C}$ ,  $\rho=5 \cdot 10^{12} \text{ Om}\cdot\text{m}$ ,  $\text{tg}\delta = 0,0002$  ( $f=1 \text{ kGs}$ ),  $E_b=20 \frac{\text{kV}}{\text{mm}}$ .

**Elektroörtükli laklar.** Elektroörtükli laklar dürli şepbikleriniň, garasakgyçlaryň çalt bugaryan (uçýan) ýaglaryndaky kolloid erginleridir. Ol ilki suwuk halda bolýar. Lak materialyň üstüne çalnýp, soň-

ra guradylanda erediji ýag bugaryp, materialyň üstünde lagyň esasy-ny düzýän maddalar gaty hala geçmek bilen ýuka lak gatlagy emele getirýärler. Elektroörtükli laklar ulanyşyna görä 3 topara bölünýär: siňdirilýän laklar, üst ýapyjy laklar we ýelim laklary. Siňdirilýän laklar süýümli we öýjükli materiallara (kagyz, karton, örülen we dokalan mata, elektrik maşynlaryň tegekleriniň örtükleri) siňdirmek üçin ulanylýar. Şonda örtüklerdäki howa öýjükleri lak bilen doldurylyp, olaryň elektrik berkligi, ýylylyk geçirijiligi we udel garşylygy artýar. Şeýlelikde, mehaniki häsiýetleri has ýokarlanýar.

*Üst ýapyjy laklar* materiallaryň üstünde mehaniki berk, tekiz, suw we elektrik toguny geçirmeýän ýuka gatlagy emele getirmek üçin ulanylýar. Olardan emal – laklar tok geçiriji metal simleriň we magnit listleriň üstünde elektroörtükli gatlagy döretmek üçin ulanylýar. Ol laklara mysal edip, БГ-99, СПД markaly laklary görkezmek bolar.

*Ýelim laklar* gaty elektroörtükli materiallary biri-birine ýelme-mek üçin ulanylýar. Meselem, ýelim lagynyň kömegi bilen kiçi slýu-da listlerini biri-birine ýelimläp mikanit listleri alynýar. Bakalit laklary we kagyz listlerini biri-birine ýelimläp getinaks, mata listlerini ýelimläp bolsa tekstolit materiallary alynýar.

Häzirki wagtda elektroörtükli laklaryň köpüsi giňden ulanylýar:

**1. Şepbik laklary.** Olara bakalit, gliftal, kremniorganiki we poliwinil-hlorid laklary degişlidir. Bu laklar sintetiki ýa-da tebigy şepbikleriň erginleridir.

**2. Sellýuloza laklary.** Olar sellýuloza efriniň suwuk garyndylaryndan (meselem, nitrolaklar) ybarat.

**3. Ýagly laklar.** Olaryň esasyňy çalt guraýan ýaglar, benzin we kerosin düzýär. Olar laklanan matalary we laklanan kagyzlary taýýarlamakda ulanylýar.

**4. Arassa garasakgyç laklary.** Olar bitумыň organiki eredijilerindäki erginlerdir. Bu laklar metallary poslamakdan goraýar.

**5. Ýagly garasakgyç laklary.** Düzümi bitum we çalt bugarýan ýagdan ybarat.

**6. Ýagly şepbikli laklar.** Olaryň düzümine ýag we tebigy ýa-da sintetiki şepbikler girýär.

Aşakda birnäçe laklaryň markalanylyşy we elektrik berkligi berilýär:

Fenol lagy: ФЛ-98;  $E_b = 70 \frac{MV}{m}$ ;

Poliuretan lagy: УР- 9144;  $E_b = 80 \frac{MV}{m}$ ;

Kremniorganiki laklar: КО-964;  $E_b = 75 \frac{MV}{m}$ ;

Ýagly gliftal lagy: ГФ-95;  $E_b = 95 \frac{MV}{m}$ .

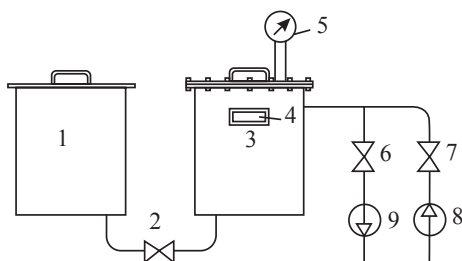
**Kompaundlar.** Kompaundlaryň düzüminde, laklardan tapawutlylykda, erediji suwuklyklar bolmaýar. Olar dürli şepbiklerden, garasakgyçlardan, mummyalardan we ýaglardan durýar. Eger kompaund ilki başda gaty halda bolsa, onda ol ulanylmazdan öň gowşak şepbeşikli suwuk önüm almak üçin gerekli temperatura çenli gyzdymaly bolýar. Kompaundlar ulanylyşy boýunça iki topara bölünýär:

1. Siňdirilýän kompaundlar.

2. Guýulýan kompaundlar.

Siňdirilýän laklara meňzeşlikde, siňdirilýän kompaundlar hem süýümlü we öýjükli elektroörtükli materiallara siňdirmek üçin ulanylýar. Kabel tehnikaşynda ýöriteleşdirilen kabel kompaundlary ulanylýar. Olar hem öz gezeginde siňdirilýän we guýulýan kompaundlara bölünýär. Siňdirilýän kabel kompaundlary kabeliň kagyz elektroörtüklerine siňdirilmek üçin ulanylýar. Olar nebit ýagyna kanifol ýa-da sintetiki şepbik goşulyp alynýar. Guýulýan kabel kompaundlary hem garasakgyçlardan, nebit ýagyndan we kanifoldan taýýarlanylýar. Kabelleriň uçlaryna, şahalanýan ýerlerinde geçiriji simleriň aralyklaryna we muftalaryna kompaund guýlanda olaryň elektroörtükli we mehaniki häsiýetleri has ýokarlanýar. Häzirki ulanylýan kompaundlar termoplastik we termoreaktiv materiallar bolup bilýär. Elektrotehnika materiallaryna we gurluşlara lak we kompaund siňdirmek – guýma işlerinde ýokary tehnologiýa talaplary ýerine ýetirmek zerurdyr. Ol işler ýerine ýetirilende ilki başda önümler ýokary hilli arassalanan bolmaly. Laklar we kompaundlar siňdirilende hem-de guýlanda çyglylyk we howa boşluklary düýbünden bolmaly däl. Siňdirmek we guýma işleri geçirilenden soň, ol önümleri guratmak işleri hem talabalaýyk geçirilmelidir. Köp halatlarda siňdirmek-guratma işleri ýöriteleşdirilen, wakuüm nasoslary we ýokary basyş döredýän nasoslar bilen üpjün edilen gurluşlarda (awtoklawda) ýerine ýetirilýär. Ol gurluşyň gurluş shemasy 3.3-nji çyzgyda görkezilýär.





**3.3-nji çyzgy. Lak siňdirilýän sehiň gurluş shemasy:** 1 – siňdirilýän lak üçin gap; 2 – siňdirilýän lagy turbadan akdyrmak üçin wentil-nasos; 3 – siňdirmе we guratma geçirilýän awtoklaw; 4 – seredilýän penjire; 5 – manometr; 6 – wakuum nasosynyň turbasyndaky kran; 7 – gysylan gazyň turbasynyň krany; 8 – gysylan gazyň ballony; 9 – wakuum nasosy

### 3.5. Süýümlі materiallar. Kagyz, karton we fibra materiallary. Dokma materiallary

**Süýümlі materiallar barada umumy düşüňjeler.** Süýümlі materiallar içki gurluşy boýunça inçe süýümlerden durýar we elektrotehnikada elektroörtükli material hökmünde giňden ulanylýar. Süýümlі materiallaryň artykmaçlyklary – bahasy arzan, olara mehaniki berklik mahsus, örüm çеýе we maýyşgak bolýar. Olaryň ýetmezçilikleri: uly bolmadyk elektrik berklik we pes ýylylyk geçirijilik, köp suw siňdirijilik. Emma ýokarda görkezilişi ýaly, olaryň bu ýetmezçiliklerini elektroörtükli laklary siňdirmek bilen düzedip bolýar. Şol sebäpli süýümlі materiallar elektroörtükli material hökmünde ýag we lak siňdirilen görnüşlerde ulanylýar.

Süýümlі materiallar, esasan, iki topara bölünýär:

1. Organiki süýümlі materiallar. Olara agaç, kagyz, karton, fibra, ýüpek, pagta, ýün ýüplükler we matalar degişli.

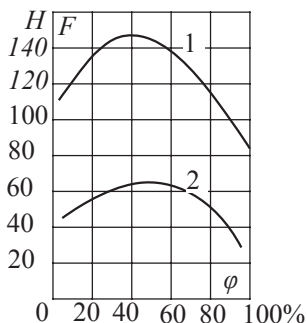
2. Organiki däl süýümlі materiallar. Olara aýna we asbest süýümleri degişli.

Soňky wagtlarda sintetiki polimerlerden alynýan sintetiki süýümlі materiallar hem giňden ulanylýar. Meselem, neýlon, kapron, lawsan.

**Kagyz, karton we fibra materiallar.** Kagyzy we kartony öndürmek üçin agaç sellýulozasy ulanylýar. Elektroörtük hökmünde

ulanylýan kagyzy almak üçin sulfat we nitron sellýulozasy ulanylýar. Ony almak üçin agajy NaOH goşulan garyndyda gaýnatmaly bolýar.

Kagyzyň mehaniki berkligi çyglylyga bagly bolýar. 3.4-nji çyzgyda K-80 markaly top kagyzyň (galyňlygy 80 *mkm* we ini 15 *mm*) mehaniki berkliginiň howanyň çyglylygyna baglylygy görkezilýär. Ol çyzgydan görnüşi ýaly, uly çyglylyklarda berklik çalt gowşaýar.



**3.4-nji çyzgy.** K-80 kagyzynda üzüji güýjüň howanyň çyglylygyna baglylygy. 1-topuň ugruna; 2-topuň keseligine

Elektrotehnikada kagyz aşakdaky görnüşlerde ulanylýar:

**1. Kabel kagyzy.** Russiýada öndürilýän kabel kagyzlarynyň markalary KM, KB, KBY, KBM we KBMY. Markadaky harplar: *K* – kabel, *M* – köpgatlakly, *B* – ýokary woltly, *V* – dykyzlanan. Kabel kagyzlary hemişe ýag siňdirilen görnüşde ulanylýarlar.

**2. Telefon kagyzyň** (KT we KTY markaly) galyňlygy 50 *mkm* we kiçi göwrümlü massasy  $800 \div 820 \frac{kg}{m^3}$  bolmaly. Olar pes naprýaženiýelerde ulanylýandygy sebäpli, ýag siňdirilmedik görnüşde ulanylýar. Olar telefon kabellerindäki simleri tapawutlandyrmak üçin dürli reňkde (gök-ýaşyl ýa-da gök) taýýarlanylýar. ЭИП-50, ЭИП-63 we ЭИП-75 markaly siňdirilen kagyz listleri getinaks listlerini taýýarlamak üçin ulanylýar. Ol kagyzlaryň galyňlygy deňişlilikde 0,09; 0,11 we 0,13 *mm*-e deň bolmaly. Kondensator kagyzy ýag siňdirilen görnüşde kagyzly kondensatorlarda dielektrik hökmünde ulanylýar. Olar iki görnüşde goýberilýär. KOH – adaty kondensator kagyzy, silkon – güýç kondensatorlar üçin kagyz. Aday kondensator kagyzlary örän ýuka görnüşde (5, 7, 10, 12, 22, 30 *mkm*) taýýarlanylýar we ýokary elektrik sygymly kondensatorlarynda ulanylýar. Silkon kagyzlaryň

galyňlygy 30 *mkm*-den galyň bolmaly. Häzirki wagtda güýç kondensatorlarynda kagyz bilen bir hatarda sintetiki ýukajyk gatlak hem ulanylýar. Olarda dielektrik iki gatlakdan durýar: kagyz we sintetiki ýukajyk gatlakdan.

**3. Karton kagyzdan,** esasan, özüniň has galyňlygy bilen tapawutlanýar. Elektroörtükli kartonlar iki görnüşde taýýarlanylýar: howada ulanylýan kartonlar. Olar has gaty we maýyşgak häsiýetde bolýar. Olardan elektrik maşynlarda ulanylýan prokladkalar, tegekleriň karkaslary, şaýbalar taýýarlanylýar. Ýagda işleýän kartonlar has ýumşak we öýjüklü bolup, esasan, transformator ýagynda ulanylýar. Ol kartonlar ýagy özlerine gowy siňdirip, ýokary elektrik berklige eýe bolýarlar. Elektroörtükli kartonlar agaç ýa-da pagta sellýulozasyndan taýýarlanylýar.

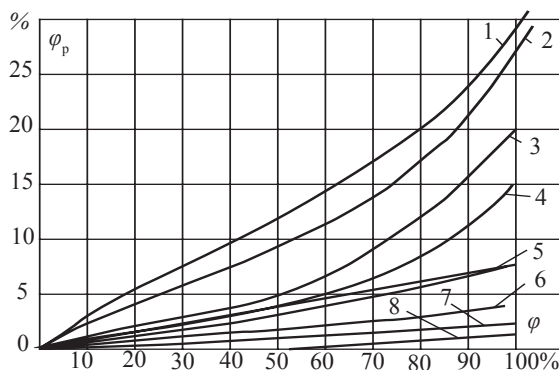
**4. Fibra.** Bu materialy ýuka kagyz lentasyny  $ZnCl_2$  hlorly sinkiň ýyly ergin garyndysyna batyrylyp alynýar. Ol lenta erginden geçenden soň polat barabana saralýar. Şonda kagyz lenta gatlary biri-birine ýelmeşýär. Soňra fibra barabandan kesilip alynýar, ol suwda ýuwulýar we preslenýär. Fibranyň elektroörtükli häsiýetleri örän pes. Emma onuň mehaniki häsiýetleri ýokary we berkdir. Ony aňsatlyk bilen işläp, dürli önümleri ýasap bolýar.

**Dokma materiallary.** Dokma materiallary süýümlü materiallary täzeden işläp, örmek we dokamak usullary arkaly alynýar. Olary taýýarlamak üçin tebigy, emeli we sintetiki süýümler ulanylýar.

*Tebigy süýümlere* pagta we ýüpek süýümleri degişli. Ýüpekden has inçe we berk elektroörtükleri taýýarlamak bolýar. Ýüpek pagtadan ýasalan örtükler has gymmatdyr.

*Emeli süýümlere* wiskoz we asetat ýüpekleri degişlidir. Olar sellýuloza efrinden alynýar. Ol efir bellibir eredijilerde eremek bilen inçe diametrli deşijekleriň üsti bilen inçe süýümleri çekip almaga mümkinçilik berýär. Daşky görnüşi boýunça emeli ýüpekler tebigy ýüpege meňzeş bolýar. Suwy siňdirijiligi boýunça wiskoz ýüpek pagta süýümi bilen deňrāk. Emma asetat ýüpeginiň suwy siňdirijiligi tebigy ýüpekden we pagta süýüminden pes bolýar. 3.5-nji çyzgyda dürli süýümleriň suw siňdirijiliginiň howanyň çyglylygyna baglylygy görkezilýär.

Sintetiki süýümlere lawsan, kapron, neýlon, anid, hlorin we beýleki sintetiki süýümler degişlidir. Ýokarda görkezilişi ýaly, bu süýümler ýokary molekulýar çyzykly polimerlerdir.



**3.5-nji çyzgy.** Dürli süýümleriň deňagramlaşan çyglylygynyň, howanyň  
 otositel çyglylygyna baglylygynyň grafikleri. 1-wiskoz yük; 2-tebigy yük; 3-pagta süýümi; 4-asetat ýüpegi; 5-kapron;  
 6-nitron, hlorin; 7-polistirol; 8-polietilen süýümi

Tebigy we emeli ýüplüklerden örülen materiallar geçiriji simle-riň daşyndaky rezin örtükleri mehaniki täsirlerden goramak üçin ulanylyar.

*Laklanan matalar* diýlip, elektroörtükli lak siňdirilen matalara aýdylýar. Olardan dokalan mata mehaniki berkligi, siňdirilýän laklar bolsa elektrik berkligi üpjün edýärler. Laklanan materiallar elektrik maşynlarynda, enjamlarda we kabbellerde örän giňden ulanylyar. Olarda nah matalar we ýüpek matalar ulanylyar. Ulanylýan laklara görä laklanan matalar açyk (sary) we gara reňkde bolup biler. Sary reňklide ýag laklary, gara reňklide bolsa ýag-garasakgýç lagy ulanylyar. Açyk sary nah laklanan matalaryň elektrik berkligi  $E_b = 35 \div 50 \frac{MV}{m}$ , ýüpek laklanan matalaryň elektrik berkligi bolsa  $E_b = 55 \div 90 \frac{MV}{m}$ . Gara nah laklanan matalaryň elektrik berkligi  $E_b = 50 \div 60 \frac{MV}{m}$ . Ol laklanan matalaryň dyklyzlygy  $900 \div 1100 \frac{kg}{m^3}$  aralykda bolýar. Nah lakotkanyň galyňlygy  $d = 0,15 \div 0,30 \text{ mm}$ , ýüpek lakotkanyň galyňlygy  $d = 0,04 \div 0,15 \text{ mm}$ . Kapron laklanan matalar üçin  $d = 0,1 \div 0,15 \text{ mm}$ .

Nah laklanan matalardan zolaklaýyn kesilip, elektroörtükli lentalar taýýarlanylýar. Olara izolentalar diýilýär we elektrotehnikada giňden ulanylýar. Kagyz lentalaryna ýag laklaryny siňdirip, laklanan kagyzlar alynýar. Olar laklanan matalardan arzan we elektroörtük häsiýetleri ýokary bolýar. Emma olaryň mehaniki häsiýetleri laklanan

matalalar bilen deňeşdirilende pes bolýar. Soňky wagtlarda laklanan matalar we laklanan kagyzlar mümkin boldugyça has çeyýe we berk laklanan sintetiki polimer elektroörtükli lentalar bilen çalşyrylýar. Emma olaryň gyzgyna çydamlylygynyň pesdigini bellemeli.

### 3.6. Plastmassalar. Gatlakly plastmassalar

**Plastmassalar barada umumy düşüňjeler.** Plastmassalary bir wagtyň özünde gyzdymak we uly basyşda preslemek usuly bilen alýarlar. Plastmassalar elektrotehnikada elektroörtük we konstruktiv materiallar hökmünde giňden ulanylýar. Olar dürli görnüşli we şekilli elektrotehniki önümleri şamp usulynda öndürmäge mümkinçilik berýär.

Köplenç ýagdaýlarda plastmassalar iki sany esasy düzüjilerden (komponentlerden) durýar:

1. Baglaşdyryjylar;
2. Dolduryjylar.

Baglaşdyryjylar bolup, köplenç, organiki polimerler hyzmat edýär. Olar basyşyň täsirinde deformirlenýär. Kä halatlarda baglaşdyryjylar hökmünde organiki däl materiallar hem ulanylýar. Meselem, mikaleksde aýna, asbest-sementde sement.

Dolduryjylar baglaşdyryjy maddalar bilen berk baglaşýan we ýelmeşýän bolup, külke, süýümlü, maýda ýonuşgalar, nah matalar, kagyz listler, asbest we aýna süýümler we ş.m bolup biler. Dolduryjylar bir tarapdan, plastmassanyň mehaniki häsiýetlerini ýokarlandyrýar we ony arzanladýar. Başga bir tarapdan, olaryň suw siňdirijiligi ýokarlanyp, elektroörtük häsiýetleri peselýär. Emma käbir dolduryjy meselem, kwars çägesi plastmassanyň ýylylyk geçirijiligini we elektrik berkligini ýokarlandyrýar, tgδ-ni kiçeldýär.

Plastmassalaryň düzümine plastifikatorlar we dürli reňk berýän boýag maddalary hem goşulýar. Plastifikatorlar materialyň maýyşgaklygyny ulaldyp, olaryň portlugyny peseldýär. Plastmassalary taýýarlamagyň tehnologiýasy, esasan, baglaşdyryjy materiallar bilen kesgitlenýär. Baglaşdyryjylaryň görnüşine görä plastmassalar iki topara bölünýär:

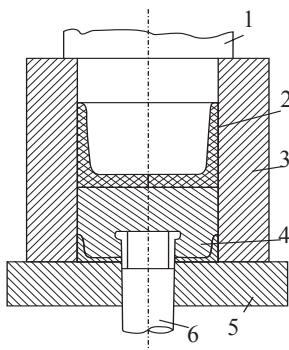
1. Gyzgyn presleniýän plastmassalar. Olar preslenende gyzdyrylmaly.

2. Sowuk presleniýän plastmassalar. Olar adaty temperaturalar-da presleniýärler.

Organiki baglaşdyryjy plastmassalaryň köpüsi gyzgyn presslenmegi talap edýärler. Ol plastmassalar termoplastik we termoreaktiv plastmassalara bölünýär.

Gyzgyn presleniýän termoplastik plastmassalarda baglaşdyryjylar täzeden ýumşamak we käbir eredijilerde eremek ukyplaryny saklaýarlar. Emma termoreaktiv plastmassalardaky baglaşdyryjylar gyzdyrylandan soň, ýumşamaýan we erginde eremeýän hala geçýärler.

Plastmassa önümlerini taýýarlamak üçin onuň düzümine girmäge dolduryjy we baglaşdyryjy materiallary gerekli gatnaşykda çekip alyp, olary külke görnüşde garyşdyrmaly. Soňra alnan külke massany (presporoşogy) ýörite taýýarlanan galyba (presformada) ýerleşdirmeli. Soňra gyzdyrmak we preslemek işleri geçirilýär. 3.6-njy çyzgyda kompression preslenme üçin ulanylýan presformanyň bir görnüşi görkezilýär.



**3.6-njy çyzgy.** Presformanyň bir görnüşiňiň gurluş shemasy. 1-ýokarky puanson; 2-önüm; 3-matrisa; 4-aşaky puanson; 5-presiň plitasy; 6-itekleýji

**Gatlakly plastikler.** Elektroörtükli we konstruktiv materiallar hökmünde gatlakly plastikler hem örän giňden ulanylýar. Olarda dolduryjy material hökmünde süýümlü materiallaryň listleri ulanylýar. Ol materiallara getinaks, tekstolit we başgalar degişlidir.

**Getinaks.** Ony bakalit siňdirilen kagyz listlerini gyzgyn preslemek usuly bilen alýarlar. Preslenende, takmynan, 1 MPa basyş we

160÷165°C temperatura ulanylýar. Preslenmäniň dowamlylygy şol basyşda we temperaturada getinaksyň galyňlygynyň her 1 *mm*-ne 2÷5 minut saklanmaly. Presleme gutarandan soň, ony +60°C-e çenli sowatmaly. Getinaks Russiýada dürli markalarda öndürilýär. V markaly getinaksyň esasy häsiýetleri 3.3-nji tablisada berilýär.

3.3-nji tablica

*V* – getinaksyň, tekstolitiň we aýna tekstolitiniň esasy häsiýetleri

№	Häsiýetleri	Getinaks V	Tekstolit	Aýna tekstoliti
1	Dykyzlygy $\frac{kg}{m^3}$	1400	1400	1800
2	Egrelmäge berklik çägi <i>MPa</i>	100	60	400
3	Elektrik berklik gatлага perpendicular pendikulýar $\frac{MV}{m}$	20÷40	20÷40	-
4	Dielektrik syzyjylygy $\epsilon$	5÷6	5÷6	-
5	Gyzgyna çydamlylygy (Martens usulynda) °C	190	160	260

Getinaksyň gatlakly gurluşy, beýleki gatlakly materiallardaky ýaly bolup, onda anizotrop häsiýet döredýär. Meselem, gatlara parallel ugurda göwrümleýin udel garşylyk gatлага perpendicular ugur bilen deňeşdirilende 50÷100 esse pes, elektrik berkligi hem 5÷8 esse pes bolýar.

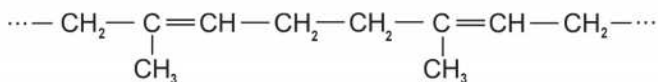
Getinaks elektrotehnikada elektroörtük we konstruktiv material hökmünde giňden ulanylýar. Radiotehnikada we elektronikada üsti folga (ýuka metal gatlagy) bilen örtülen getinaks listleri çap edilen shemalary taýýarlamak üçin köp ulanylýar. Ol shemalary taýýarlamak üçin bir tarapy ýa-da iki tarapy hem gyzyl mis folga bilen örtülen getinaks listiň üstünde kislota täsir etmeýän reňk (lak) bilen gerekli elektrik shema çyzylýar. Soňra ol shemaly list kislota batyrylanda mis gatlagynyň laklanmadyk ýerleri kislotada eremek bilen getinaksyň ýüzünde diňe gerekli elektrik shema galýar. Ol shemany laklanan çyzgynyň aşagyndaky mis zolaklary emele getirýär. Bu maksat üçin ulanylýan folganyň galyňlygy 0,035÷0,05 *mm* bolmaly.

*Tekstolit.* Bu plastik materialy mata bilen bakalit gyzgyn preslenmegi bilen alynýar. Onuň elektrik häsiýetleri getinaksyňka meňzeş. Emma mehaniki häsiýetleri ýokary bolýar. Ol getinaks bilen deňeşdirilende 5 – 6 esse gymmat, sebäbi matanyň bahasy kagyza garanynda şonça esse gymmat. Has gyzgyna çydamly getinaks almak üçin kagyzyň deregine asbest kagyzlaryny ulanyp, asbesogetinaks diýilýän material alynýar. Tekstolite pagta matanyň deregine asbest matasyny ulanyp, asbestotekstolit material alynýar. Has ýokary gyzgyna çydamly, mehaniki taýdan berk we suw siňdirmeyän material-aýnatekstolit (steklotekstolit). Ol tekstolitden aýna matasy alynýar.

### 3.7. Tebigy we sintetik kauçuklar. Organiki däl aýna

Durmuşda we tehnikada tebigy kauçugyň esasynda alynýan materiallar we emeli ýol bilen alynýan sintetik kauçuklar giňden ulanylýar.

**Tebigy kauçuk** – kauçuk getiriji ösümlüklerden alynýar. Kauçuk ösümlükleriň süýtli şiresinde bolýar. Himiki düzümi boýunça tebigy kauçuk uglewodorod polimeri bolup, onuň himiki düzümi  $(C_5H_8)_n$ . Molekulýar gurluşy bolsa aşadakylardan ybarat:

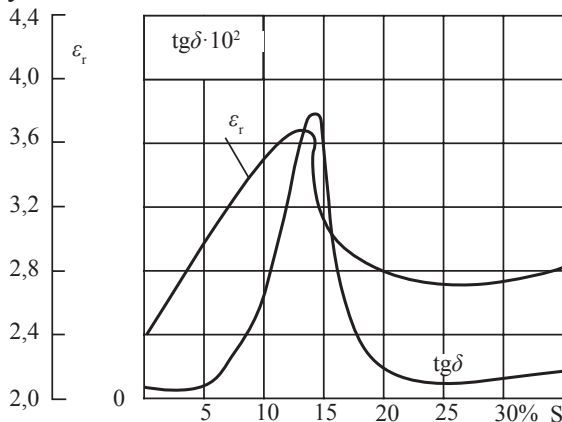


Ol gyzdyrylanda  $50^\circ C$  temperaturada ýumşayar we şepbik hala geçýär, pes temperaturalarda bolsa gaty port halda bolýar. Kauçuk uglewodorodlarda – benzinde ereýär. Kauçugyň benzindäki erginine rezin ýelim diýip atlandyrylýar. Ol rezini we kauçugyň özünü ýelimlemek üçin ulanylýar. Tebigy arassa kauçugyň gyzgyna çydamsyzlygy we himiki durnuksyzlygy sebäpli, aýratynlykda elektroörtük material hökmünde ulanylmaýar. Kauçugyň bu kemçiliklerini aýyrmak üçin oňa gyzdyrylan ýagdaýynda kükürt goşulýar. Kauçuga kükürt goşmak usulyna wulkanlaşma (wulkanizasiýa) diýilýär. Wulkanlaşmadan soň kauçugyň gyzgyna çydamlylygy, mehaniki berkligi we dürli eredijilere durnuklylygy ýokarlanýar. Eger kauçuga 1-3% kükürt goşulsa, onda ýokary maýyşgakly we ýokary süýnüjilikli ýumşak rezin alynýar. Onuň süýnüjiligi  $150 \div 500\%$  ýetýär. Eger-de kauçuga  $30 \div 35\%$



kükürt goşulsa, onda ebonit diýilýän gaty rezin alynýar. Onuň süý-nüjiligi 2÷6%. Rezin we ebonit taýýarlananda olaryň düzümine dürli dolduryjylar (hek, talk) we boýaglar, katalizatorlar hem goşulýar.

Elektrotehnika senagatynda rezin dürli geçiriji simleriň we kabelleriň daşyna örtmek üçin we goraýjy ellikler, galoşlar, halyçalary hem-de elektroörtükli turbalary taýýarlamak üçin giňden ulanylýar. Olar suw geçirmeýär. Arassa kauçuk polýar däl dielektrikdir. Onuň esasy häsiýetleri: udel garşylygy  $\rho=10^{14} \text{ Om}\cdot\text{m}$ ,  $\varepsilon=2,4$ ,  $\text{tg}\delta=0,002$ . Emma wulkanlaşmadan soň goşulýan kükürdiň mukdaryna baglylyk-da  $\varepsilon$ ,  $\text{tg}\delta$  parametrler güýçli üýtgeýärler. Bu parametrleriň kauçuğa goşulýan kükürdiň mukdaryna baglylygynyň grafikleri 3.7-nji çyzgy-da görkezilýär.



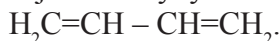
**3.7-nji çyzgy.** Wulkanlaşdyrylan kauçukda  $\varepsilon$ ,  $\text{tg}\delta$  ululyklaryň goşulan kükürdiň mukdaryna baglylygy

Bu çyzgydan görnüşi ýaly, ol parametrler kükürdiň 5÷15% mukdarlarynda birden ulalýarlar. Ony ol materialyň polýarlyk derejesiniň ulalýandygy bilen düşündirilýär. Kükürdiň has köp mukdarlarynda materialyň şepbeşikliginiň artýandygy sebäpli, dipol molekulalaryň ýerleşmeleri kynlaşýar. Adaty elektroörtük rezinde  $\rho=10^{13} \text{ Om}\cdot\text{m}$ ,  $\varepsilon=3\div 7$ ,  $\text{tg}\delta=0,02\div 0,1$ , elektrik berkligi  $E_b=20\div 30 \frac{\text{MV}}{\text{m}}$ . Reziniň ýetmezçilikleri: pes gyzgyna çydamlylyk, polýar däl suwuklyklaryň (benziniň, benzolyň) täsirine pes durnulylyk, ýagtylygyň, aýratyn hem ultramelewşe şöhleleriň täsirinde çalt hatardan çykýar. Oňa howada emele gelýän ozonlar erbet täsir edýär. Rezin mis bilen galtaşan ýagdaýynda ondaky kauçuk bilen täsirleşmä girmedik kükürdiň erkin

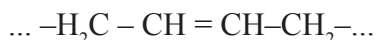
atomlary mise geçip, mis simlerini zaýalaýarlar. Şol sebäpli mis geçiriji simlerde elektroörtük rezin ulanylanda olaryň arasynda kagyz ýa-da başga metal örtük hökman goýulmalydyr. Alýumin simlerde bu hadysa bolmaýar, şonuň üçin ol simlerde rezin örtükleri gönümel ulanmak bolýar.

**Sintetik kauçuk.** Tebigy kauçugyň ýetmezçiligi sebäpli, soňky wagtlarda kauçugy emeli usul bilen almagyň tehnologiýasy işlenip düzüldi. Emeli usul bilen alynýan kauçuga sintetik kauçuk diýilýär. Sintetik kauçuk (SK) almak üçin ilkinji material hökmünde spirt, nebit we tebigy gaz ulanylýar. Häzirki wagtda kabel senagatynda gorag örtükleri diňe sintetik kauçuk esasynda taýýarlanylýar. Aşakda sintetik kauçuklaryň birnäçesine seredip geçeliň.

**1. Butadien kauçuk (SKB).** Ol gaz halyndaky butadien uglewodorodyň polimerlenmesi netijesinde alynýar. Butadieniň himiki düzümi:



Polimerlenmeden soň alynýan SKB-niň molekula zynjyrynyň gurluşy:



Şeýlelikde, düzümi boýunça SKB tebigy kauçuga (HK) ýakyn. Ony wulkanlaýjy madda goşman  $200\div 300^\circ\text{C}$ -ä çenli gyzdyrylsa, goşmaça polimerlenme geçip, eskapon diýilýän materiala öwrülýär. Eskaponyň mehaniki häsiýeti ebonite meňzeş, emma ol has gyzgyna çydamly we himiki taýdan durnukly bolýar.

Eskaponyň ýokary elektroörtük häsiýetleri bar:  $\rho=10^{15}\text{ Om}\cdot\text{m}$ ,  $\varepsilon=2,7\div 3,0$ ,  $\text{tg}\delta=5\cdot 10^{-4}$ . Onuň bu ýokary hilli häsiýetleri arassa uglewodorod düzümlü giňişleýin polýar däl tebigatly polimerligi bilen düşündirilýär. Eskaponyň esasynda birnäçe elektroörtük materiallar (laklar, laklanan matalar, kompaundlar we ş.m) taýýarlanylýar.

**2. Butadien-stirol kauçuk (CKC).** Ol butadieniň we stirolýň bilelikde polimerlenmesi netijesinde alynýar. Onuň elektroörtük häsiýetleri tebigy kauçugyňka meňzeş. Emma onuň gyzgyna çydamlylygy ýagyň we benziniň täsirlerinden has ýokary.

**3. Butil kauçuk.** Ol izobutilen ( $\text{H}_2\text{C}=\text{C}(\text{CH}_3)_2$ ) bilen az mukdardaky izopren ýa-da butadieniň bilelikdäki polimerlenmesi netijesinde alynýar. Onuň esasynda alynýan rezin ýokary gyzgyna çydamly we kislorodyň, ozonyň we kislotalaryň täsirine bolsa durnukly.

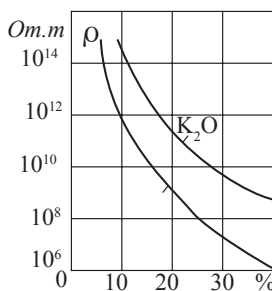
**4. Hloropen kauçuk.** Ol hloropreniň ( $\text{H}_2\text{C}=\text{C}(\text{Cl}) - \text{CH}=\text{CH}_2$ ) polimerlenmesi netijesinde alynýar. Onuň elektroörtük häsiýetleri ýokary däl. Emma ol ýagyň, benziniň, ozonyň täsirlerine durnukly.

**5. Kremniý organiki kauçuklar.** Olaryň gyzgyna çydamlylygy ( $+250^\circ\text{C}$ ) we sowuga çydamlylygy ( $-100^\circ\text{C}$ ) ýokary. Şeýle hem elektroörtük häsiýetleri gowy. Emma olaryň mehaniki häsiýetleri pes.

**Organiki däl aýna.** Organiki däl aýnalar kwaziamorf maddalar bolup, dürli oksidleriň çylşyrymly ulgamydyr. Onuň düzümine özbaşdak aýna emele getiriji ( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Ba}_2\text{O}_3$ ) oksidlerden başga, ýene-de dürli oksidler hem girýärler:  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{BaO}$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  we başgalar. Köp aýnalaryň esasyňy  $\text{SiO}_2$  düzýär. Ol aýnalara silikat aýnalar diýilýär. Aýnalaryň dykzlygy  $2 \div 8,1 \frac{\text{mg}}{\text{m}^3}$  aralykda bolýar. Agyr aýnalara köp gürşunly (hrustal, flint) aýnalar degişlidir. Adaty silikat aýnanyň dykzlygy (penjire aýnasy)  $\sim 2,5 \frac{\text{mg}}{\text{m}^3}$ . Olaryň gysylmaga mehaniki berkligi  $6000 \div 21000 \text{ MPa}$ . Süýndürmäge mehaniki berkligi  $100 \div 300 \text{ MPa}$ . Ýumşamak temperaturasy  $400 \div 1600^\circ\text{C}$  aralykda bolýar. Onda  $1600^\circ\text{C}$  arassa kwars ( $100\% \text{ SiO}_2$ ) degişlidir. Dürli düzümlü aýnalaryň gyzgyna giňelme koeffisiýenti  $\alpha_l = (0,55 \div 15) \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ . Onda  $\alpha_l = 0,55 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$  kwars aýnasynda degişli.

Göze görünýän ýagtylyk şöhleleri üçin adaty aýna dury bolýar. Olarda käbir goşulýan garyndylar dürli reňkli aýnalary almaga mümkinçilik berýär, meselem,  $\text{CuO}$  – gök,  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  – ýaşyl,  $\text{UO}_2$  – sary reňki berýär. Dürli aýnalaryň  $n$  döwme görkezijisi  $n = 1,47 \div 1,96$  aralykda bolýar.  $n = 1,96$  baha hrustala degişli.

Arassa kwars aýna ( $\text{SiO}_2$ ) suwda eremeýär. Oňa aşgar oksidleri goşulanda suwa durnuklylygy has peselýär. Silikat aýnalar,  $\text{HF}$  kislotadan başga, hemme kislotalaryň täsirine durnuklydyr. Aýnalaryň elektrik häsiýetleri olaryň himiki düzümine güýçli bagly bolýar. Tehniki aýnalar üçin kadaly temperaturada  $\rho = 10^8 \div 10^{15} \text{ Om}\cdot\text{m}$ ;  $\varepsilon = 3,8 \div 16,2$ ;  $\text{tg}\delta = 0,0002 \div 0,01$ . Kwars aýna üçin  $20^\circ\text{C}$  temperaturada  $\varepsilon = 3,8$ ;  $\text{tg}\delta = 0,0002$ .  $20^\circ\text{C}$  temperaturada  $\rho = 10^{15} \text{ Om}\cdot\text{m}$ . Aýna aşgar metallaryň oksidleriniň goşulmagy onuň  $\rho$  udel garşylygynyň güýçli peselmegine getirýär (3.8-nji çyzgy).



### 3.8-nji çyzgy. $\text{SiO}_2 - \text{Na}_2\text{O}$ we $\text{SiO}_2 - \text{K}_2\text{O}$ aýnalarynda udel garşylygyň peselmegi

Aýnanyň elektrik berkligi  $E_b$  onuň himiki düzümine känbir bagly bolmaýar. Emma ondaky howa boşluklar elektrik berkliginiň peselmegine getirýär. Hemişelik naprýaženiýede deňdeş elektrik meýdanda aýnanyň elektrik berkligi  $500 \frac{\text{MV}}{\text{m}}$  ýetýär.

Ulanýş aýratynlyklaryna görä aýna şu aşakdaky görnüşlere bölünýär:

1. *Kondensator aýnalary.* Olar kondensatorlarda dielektrik hökümünde ulanylýar. Olaryň mümkin boldygyça uly  $\epsilon$  dielektrik syzyjylygy we  $\text{tg} \delta$  kiçi bolmaly.

2. *Düzüm bölekler ýasalyan aýna.* Olardan izolýatorlar, monjuklar we ş.m. taýýarlanylýar.

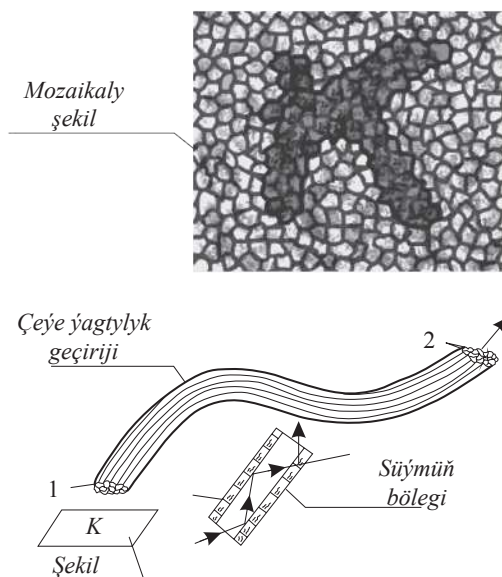
3. *Çyra aýnalary.* Olar ýşyklandyryjy we radio-elektron çyralar üçin ulanylýar. Olar wolfram, molibden metallar bilen sepleşmeli.

4. *Dolduryjyly aýna.* Ol slýuda külkesinden mikaleks material almakda gyzgyn preslemekde baglaşdyryjy komponent bolup hyzmat edýär.

5. *Aýna emallar.* Dürli enjamlaryň (rezistorlaryň, kondensatorlaryň, ýarymgeçiriji diodlaryň) üstüne çaymak üçin ulanylýar.

6. *Aýna süýümler.* Diametri  $d=4\div 7 \text{ mkm}$  bolan aýna süýümleri maýyşgak bolup, olardan aýna mata, lentalar taýýarlanylýar we aýna mata, aýnatekstolit, steklogetinaks materiallar taýýarlamakda ulanylýar.

7. *Swetowodlar.* Ol hersi iki dürli aýnadan ýasalan süýümleriň toplумы. Onuň gurluş shemasy 3.9-njy çyzgyda görkezilýär.



### 3.9-njy çyzgy. Swetowodyň gurluş shemasy

Ondaky her süýüm biri-biriniň içinde konsentrik ýerleşen iki silindr şekilli inçejik süýümlerden durýar. Olaryň daşkysynyň döwürleme görkezijisi  $n_2$ , içkisiniň döwürleme görkezijisi  $n_1$ . Şonda  $n_1 > n_2$  bolanda içki we daşky aýnalaryň çäginde ýagtylyk şöhleleriniň doly içki serpikmesi bolup, olar daşky gurşawa ýaýrap bilmeýär. Eger bir çogdumda şular ýaly münlerçe süýümler bar bolsa, onda çogdumyň 1-nji ujundaky predmetiň şekilini swetowodyň 2-nji ujunda ýerleşdirilen ekranda görmek bolýar.

Swetowodlar taýýarlananda her iki gat aýna süýümiň diametri  $20 \div 30 \text{ mkm}$ . Şonda diametri  $5-6 \text{ mm}$  bolan swetowodda birnäçe mün süýüm ýerleşýär. Şular ýaly swetowodlary dury organiki polimer süýümleriň esasynda hem taýýarlap bolýandygyny bellemeli. Ol süýümler has çeýe, berk bolýar. Emma olaryň gyzgyna çydamlylygy pes bolýar.

8. *Sitallar*: Ony ýöriteleşdirilen düzümlü aýnany kristallaşdyryp alýarlar. Ol aýna ýaly dury däl. Olar gurluşy boýunça aýna bilen keramikanyň aralygynda bolup, olara başgaça aýna keramika hem diýilýär. Ony almak üçin ýörite saýlanyp alnan aýna massasynda iki basgançakly termiki işler geçirilýär.

500÷700°C temperaturalarda saýlanyp alnan aýnada kristal başlangyçlary emele getirilýär.

900÷1100°C temperaturalarda kristal fazasy ösdürilýär. Onda kristal fazasy 80÷90% bolup biler. Ondaky kristallaryň ölçegi takmynan 2 *mkm*.

Sitalyň esasy häsiýetleri: ol dury däl. Ýumşama temperaturasy 900÷1300°C;  $\rho = 10^{10} \div 10^{12} \text{ Om} \cdot \text{m}$ ;  $E_b = 20 \div 80 \frac{MV}{m}$ ;  $\text{tg} \delta = (10 \div 800) \cdot 10^{-4}$ . Ýylylyk geçirijilik koeffisiýenti  $\gamma_T = 0,8 \div 2,2 \frac{Wt}{m \cdot K}$ ;  $\alpha_l = (0,1 \div 12) \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ . Sitalyň ýokary mehaniki berkligi bar. Ol aýna ýaly port däl.

### 3.8. Keramiki dielektrik materiallar. Farfor

**Umumy maglumatlar.** Keramiki materiallar organiki däl materiallara degişli. Adatça, keramiki önümler dürli gerek şekillerde suwda garylan laýdan ýasalýar. Soňra olar guradylýar we ýokary temperaturada bişirilýär. Bişirilende keramiki massada çylşyrymly fiziki-himiki hadysalar geçmek bilen taýýar önümler gerek häsiýetlere eýe bolýarlar. Aýratyn hem olaryň mehaniki berkligi has ýokarlanýar. Soňra düzüminde az laýly ýa-da asla laý girmeyän keramiki materiallar ýüze çykyp başlaýar. Şeýlelikde, häzirki wagtda öndürilýän keramiki materiallar öz häsiýetleri we ulanyşlary boýunça örän köp dürlüdür. Elektrotehnikada elektroörtük hökmünde ulanylýan keramikalar mehaniki taýdan ýokary berkligi, ýokary gyzgyna çydamlylygy we himiki durnuklylygy bilen tapawutlanýar. Häzirki wagtda ýarymgeçiriji häsiýetli, magnit häsiýetli we segnetoelektrik häsiýetli keramiki materiallar hem taýýarlanylýar we elektrotehnikada olar giňden ulanylýar.

**Farfor.** Häzirki wagtda farfor elektroörtükli materiallaryň esasyalarynyň biri bolup hyzmat edýär. Farfory taýýarlamak üçin ýokary hilli arassa laý-kaolin we minerallar kwars  $\text{SiO}_2$ , meýdan şpaty ulanylýar. Olar owradylyp, suwda garylýar. Soňra şol alnan laýdan dürli usullar (galyplar, presler) ulanyp, dürli we çylşyrymly şekilli gerek önümler taýýarlanylýar we guradylýar. Ondan soň bu önümleri glazurlama we bişirme işleri geçirilýär. Glazur aýna görnüşli massa

bolup, farfor önüminiň üstüne çäýylmek bilen tekiz, ýylmanak örtük (syrça) emele getirýär. Netijede, farforyň elektrik we mehaniki häsiýetleri has ýokarlanýar. Glazur farfory çyglylykdan, hapalyklardan we suwdan goraýar. Ol üst şikesleri (ýaryklary, öýjükleri) ýapmak bilen farforyň mehaniki berkligini has ýokarlandyrýar. Bellemeli zat: glazuryň gyzgyn çyzykly giňelme koeffisiýenti  $\alpha_l$  farforyň giňelme koeffisiýentine  $\alpha_l$  ýakyn bolmaly. Bu şert ýerine ýetirilmese, temperatura üýtgände glazuryň üstünde ownuk jaýryklar emele gelýär.

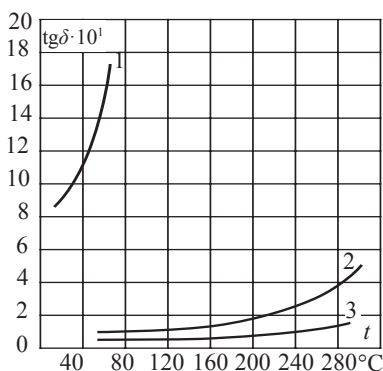
*Bişirme* – farfor önümleri üçin iň bir wajyp hadysalaryň biridir. Bişirme farforda mehaniki berklik, suwa durnuklylyk we ýokary elektroörtük häsiýetleri döredýär. Ol bişirilenden döwründe laý özüniň kristallik gurluşyny üýtgedýär we onuň düzümindäki suw aýrylýar. Farforyň düzümindäki meýdan şpaty bişirme temperaturasynda ergin aýna görnüşe geçip, kwarsyň we laýyň dänejikleriniň ara boşluklaryny doldurýar we olary biri-birine berk baglaşdyrýar. Şeýlelikde, farfora kristallik dolduryjyly aýna hökmünde garamak bolar. Kristallik dolduryjylar onuň portlugyny peseldýärler. Farforyň bişirme temperaturasy  $1300\div 1410^\circ\text{C}$ . Bişirmäniň dowamlylygy bolsa  $20-70$  sagada ýetýär. Bişirilenden farforyň düzümi mikroskop bilen seljerilende ol  $3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$  mullit we  $\text{SiO}_2$  kwars kristallaryndan durýar. Olaryň aralyklary bolsa meýdan şpatynyň eremegi netijesinde emele gelýän aýna şekilli massa bilen doldurylmaly.

Bişirilenden soň farforyň dykzlylygy  $2,3\div 2,5 \frac{\text{Mg}}{\text{m}^3}$ ,  $\alpha_l = (3-4,5) \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ . Gysylmakda berklik çägi  $400\div 700 \text{ MPa}$ , süýnmekde  $45\div 70 \text{ MPa}$ , egredilende  $80\div 150 \text{ MPa}$ . Farforyň elektrik häsiýetleri normal temperaturada we pes ýygylýklarda kanagatlanarly hasap edilýär:  $\rho = 10^{12}\div 10^{13} \text{ Om}\cdot\text{m}$ ,  $\varepsilon = 6\div 8$ ,  $\text{tg}\delta = 0,015\div 0,025$ ,  $E_b = 10\div 30 \frac{\text{MV}}{\text{m}}$ . Emma temperaturanyň ýokarlanmagy bilen onuň elektrik häsiýetleri ýaramazlaşýar. Aýratyn hem ýokary temperaturalarda we ýokary ýygylýklarda  $\text{tg}\delta$  ulalýar. Bu bolsa energiýa ýitgileriniň köpelmegine getirýär.

**Dürli keramiki dielektrikler.** Soňky wagtlarda radioelektronika senagatynyň we elektritermiýanyň ösmegi bilen ýokary temperaturalarda we ýokary ýygylýklarda ulanyp boljak materiallara talap güýçlenýär. Şol sebäpli farforyň ýokarda görkezilen kemçiliklerini düzetmek we täze häsiýetli keramiki materiallary almak ugunda derňew

işleri güýçlendi we täze ýokary häsiýetli farforlar alyndy. Olaryň bir-näçesine seredip geçeliň.

1. *Radiofarfor we ultrafarfor*. Radiofarfory farforyň aýna şekilli fazasyna bariniň oksidini ( $\text{BaO}$ ) goşmak bilen alynýar. Ultrafarfory bolsa radiofarfora  $\text{Al}_2\text{O}_3$  goşup alýarlar. Netijede, bu materiallaryň  $\text{tg}\delta$ -si adaty farfor bilen deňeşdirilende örän kiçelýär (3.10-njy çyzgy).



**3.10-njy çyzgy.** Farforda (1), ultrafarforda (2) we alýumin oksidinde (3) 1 MGs ýyglykda  $\text{tg}\delta=f(t^\circ)$  baglanyşygyň grafikleri

Adaty temperaturada radiofarfor üçin  $\text{tg}\delta=0,003$ , ultrafarfor üçin  $\text{tg}\delta=0,001$ .

2. *Alýumooksid keramika* – esasan, alýumin oksidinden durýar. Iş temperaturasy  $1600^\circ\text{C}$ . Onuň örän ýokary mehaniki berkligi we ýylylyk geçirijiligi bolýar. Onuň ýylylyk geçirijiligi farforyňkydan  $10\div 20$  esse ýokary. Dielektrik syzyjylygy  $\varepsilon=10$ . Ol durý material.

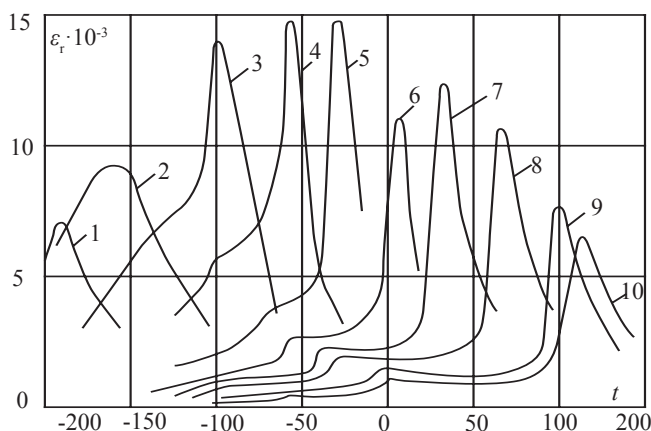
3. *Steatit* – keramikanyň bir görnüşü bolup, ol mineral talkyň ( $3\text{MgO}\cdot 4\text{SiO}_2\cdot \text{H}_2\text{O}$ ) esasynda taýýarlanylýar. Ony kesmek, ýonmak bilen dürli şekilli önümleri taýýarlamak bolýar. Steatitiň  $\text{tg}\delta$ -si örän kiçi ( $\text{tg}\delta=2\cdot 10^{-4}$ ). Şoňa görä ol material ýokary ýyglyklarda işleýän radiotekniki gurluşlarda giňden ulanylýar.

4. *Uly dielektrik syzyjylykly keramikalar*. Bu keramikalar, esasan, kiçi göwrümlü, emma uly elektrik sygymly kondensatorlary taýýarlamak üçin ulanylýar. Uly dielektrik syzyjylykly keramikanyň köpüsi titanyň dioksidi  $\text{TiO}_2$  esasynda alynýar. Titanyň dioksidiniň bir görnüşine rutil diýilýär. Onuň esasy kristallografik okunyň ugrunda dielektrik syzyjylygy  $\varepsilon=173$ -e ýetýär. Elbetde, rutile başga materiallaryň goşulmagy onuň dielektrik syzyjylygyny peseldýär. Netijede, dürli-dürli dielektrik syzyjylykly materiallar alynýar. Olara gysgaça



tikondlar (titan we kondensator sözlerinden gelip çykýar) diýilýär. Olar T60, T80, T150 markalarda taýýarlanylýar. Ondaky sanlar şol keramikanyň dielektrik syzyjylygyny görkezýär. Bu maksat üçin diňe rutil ( $\text{TiO}_2$ ) ulanylman, kalsiniň titanaty ( $\text{CaO} \cdot \text{TiO}_2$ ), stronsiniň titanaty ( $\text{SrO} \cdot \text{TiO}_2$ ) we ş.m. birleşmeleriň kristallik fazalary hem ulanylýar.

5. *Segnetokeramika*. Segnetoelektrik materiallar işjeň dielektrikler hökmünde kitabyň I babında seredilipdi. Segnetoelektrikler örän uly dielektrik syzyjylyklarynyň temperatura we oňa täsir edýän naprýaženiýä güýçli baglylygy bilen tapawutlanýarlar. Ilkinji gezek B.M.Wuluň maglumatlaryna görä, bu segnetoelektrik häsiýetler diňe monokristallarda ýüze çykman, eýsem, polikristallarda we keramika görnüşdäki materiallarda hem saklanýar. Mysal üçin, 3.11-nji çyzgyda bariniň titanaty ( $\text{BaTiO}_3$ ) we stronsiniň titanaty ( $\text{SrO} \cdot \text{TiO}_2$ ) esasyndaky dürli düzümlü keramikada dielektrik syzyjylygyň  $f=1 \text{ kGs}$  ýygylýkda temperatura baglylygynyň grafikleri berilýär.



**3.11-nji çyzgy.**  $\text{BaTiO}_3$  -  $\text{SrTiO}_3$  segnetokeramikada  $E=f(t^\circ)$  baglanyşyklar.

1 -10%  $\text{BaTiO}_3$ ; 2 -20%; 3 -30%; 4 -40%; 5 -50%; .... 10 -100%

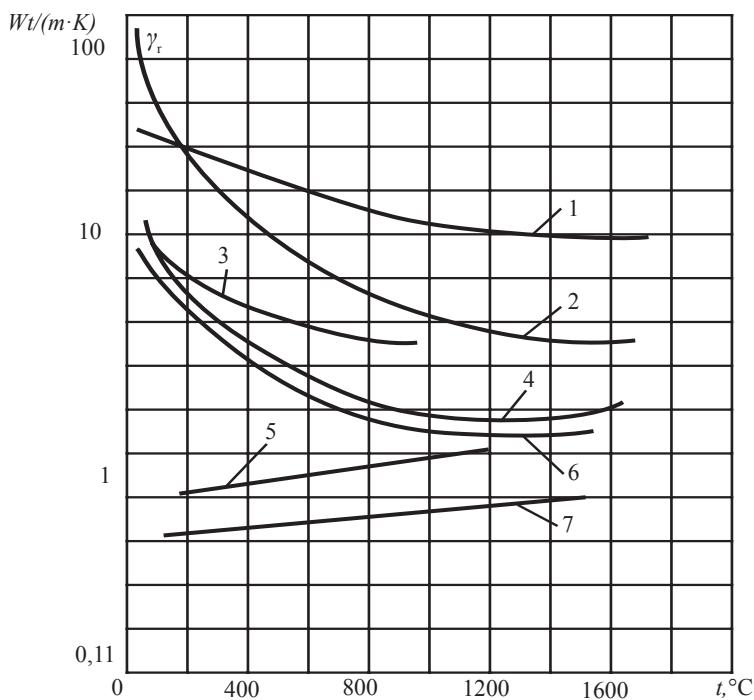
Bu çyzgydan görnüşi ýaly, Kýuriniň nokady himiki düzüme baglylykda temperaturanyň giň interwalynda üýtgeýändigini görkezýär.

Ondan başga-da segnetokeramikaly kondensatorlaryň elektrik sygymy örän güýçli çyzykly däldigi bilen häsiýetlendirilýär. Olara gysgaça warikondlar hem diýilýär.

6. *Has ýokary gyzgyna durnukly keramikalar*. Ýokary temperaturalarda işleýän we temperaturanyň birden üýtgemegine çydamly

(kiçi  $\alpha_l$ ) keramika mysal edip  $2\text{MgO} \cdot 2\text{As}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{SiO}_2$  materialy görkezmek bolar. Onda  $20^\circ\text{C}$  temperaturada  $\rho=10^{11} \div 10^{13} \text{ Om} \cdot \text{m}$ ,  $600^\circ\text{C}$ -e  $\rho=10^{10} \text{ Om} \cdot \text{m}$ ;  $\alpha_l=7 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ . Ýylylyk geçirijilik koeffisiýenti  $\gamma_r=7 \cdot 10^{-6} \frac{\text{Wt}}{\text{m} \cdot \text{K}}$ . Alýuminiň titanatynda ( $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{TiO}_2$ )  $\alpha_l$  örän pes  $\alpha_l=0,1 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ .

Gyzgyna çydamly materiallar hökmünde arassa metallaryň oksidleri hem uly gyzyklanma döredýär we olar hem giňden ulanylýar. Olara mysal edip, berilliniň oksidini ( $\text{BeO}$ ), magniniň oksidini ( $\text{MgO}$ ) we alýuminiň oksidini ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) görkezmek bolýar. Berilliniň oksidiniň ( $\text{BeO}$ ) esasy häsiýetleri: dykzlygy  $3000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ , ereme temperaturasy  $t_{er}=2670^\circ\text{C}$ ;  $\varepsilon_r=7,4$ ;  $t=1000^\circ\text{C}$ -da  $\rho=10^5 \text{ Om} \cdot \text{m}$ .  $t=20^\circ\text{C}$  we  $f=1 \text{ MGs}$ -de  $\text{tg}\delta=(2-5) \cdot 10^{-4}$ ;  $\alpha_l=10 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ . 3.12-nji çyzgyda birnäçe metal oksidleriň ýylylyk geçirijilik koeffisiýentiniň temperatura baglylygynyň grafikleri görkezilýär.



**3.12-nji çyzgy.** Gyzgyna durnukly materiallaryň ýylylyk geçirijilik koeffisiýentiniň temperatura baglylygynyň grafikleri. 1-grafit, 2-BeO; 3-SiO<sub>2</sub>; 4-MgO; 5-şamut; 6-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; 7-ZrO<sub>2</sub>

### 3.9. Slýuda we slýudaly materiallar

**Tebigy slýuda we onuň görnüşleri.** Slýuda – tebigy mineral bolup, ol elektroörtük materiallaryň esasy bolup durýar. Ol özüniň aýratyn häsiýetleri bilen, ýagny ýokary elektrik berkligi, gyzgyna çydamlylygy, çyglylyga durnuklylygy, mehaniki berkligi we çýeligi bilen elektrotehnikanyň hemme ýerlerinde diýen ýaly peýdalanylýar. Meselem, ol ýokary naprýaženiýeli we kuwwatly elektrik maşynlarynda, şol sanda, iri turbogeneratorlarda, gidrogeneratorlarda, güýçli elektrik hereketlendirijilerde elektroörtük material hökmünde, kondensatorlarda dielektrik hökmünde hem ulanylýar.

Tebigy slýuda gatlakly kristal görnüşinde Russiýada we Hindistanda gazylyp alynýar. Himiki düzümi boýunça tebigy slýudanyň dürli görnüşleri alýumosilikatlardyr. Olardan esasyly:

1. Muskowit:  $K_2O \cdot 3Al_2O_3 \cdot 6SiO_2 \cdot 2H_2O$ .
2. Flogopit:  $K_2O \cdot 6MgO \cdot Al_2O_3 \cdot 6SiO_2 \cdot 2H_2O$ .

Muskowit elektroörtüklik häsiýetleri boýunça flogopitden tapawutlanýandygy 3.4-nji tablisadan görünýär.

3.4-nji tablisa

Slýudanyň görnüşleri	$\rho, Om \cdot m$	$\epsilon_r$	$tg\delta \cdot 10^4$ ýygylklarda		
			50 Gs	1 kGs	1 MGs
Muskowit	$10^{12} \div 10^{16}$	$6 \div 8$	150	25	3
Flogopit	$10^{11} \div 10^{12}$	$5 \div 7$	500	150	15

Ondan başga-da, muskowit flogopit bilen deňeşdirilende mehaniki taýdan has berk, gaty, çýe we maýyşgak bolýar. Umuman, slýuda anizotrop häsiýetdedir. Ýokarky tablisada berlen parametrleriň bahalary elektrik meýdanyň ugry kristal gatlaklarynyň sepleşýän tekizligine perpendikulýar ugrukdyrylan ýagdaýynda alnandyr. Sepleşme meýdanyň ugrunda slýudanyň elektroörtüklik häsiýeti has-da ýaramazlaşýar. Meselem, muskowitde  $\rho = 10^6 \div 10^8 Om \cdot m$ ,  $\epsilon_r = 11 \div 16$ , flogopitde  $\epsilon_r = 23 \div 46$ . Olarda ýylylyk geçirijilik koeffisiýenti perpendikulýar ugurda muskowit üçin  $\gamma_T = 0,44 \frac{mWt}{m \cdot k}$ , flogopit üçin bolsa  $\gamma_T = 0,44 \frac{mWt}{m \cdot k}$ . Emma sepleşme meýdanyň ugrunda ýylylyk geçirijilik koeffisiýenti 10 esse uly bolýar.

Slýuda gyzgyna çydamlylygy boýunça iň ýokary C topara degişli. Onuň ereme temperaturasy  $1145\div1400^{\circ}\text{C}$  aralykda bolýar. Emma bellibir ýokary temperaturalarda slýudadan onuň düzümine girýän suw bölünip başlaýar. Şonda onuň durulygy ýityr we häsiýetleri birden üýtgeýär. Bu temperatura dürli slýudalarda dürli bolýar. Meselem, muskowitzde, adatça,  $200\div600^{\circ}\text{C}$  aralykda, flogopitde bolsa  $800\div900^{\circ}\text{C}$ . Tebigy şertlerde slýuda listleriniň meýdany  $50 - 65\text{ sm}^2$  aralyklarda bolup bilýär. Her gatlagyň galyňlygy bolsa  $0,005\div0,045\text{ mm}$  aralykda bolýar. Şoňa göräde slýudany elektroörtük material hökmünde ulanmak üçin onuň esasynda dürli usullar bilen birnäçe elektroörtüklik materiallary taýýarlanylýar. Olaryň birnäçesine seredip geçeliň.

### 3.10. Slýudaly elektroörtük materiallar

**1. Mikanitler.** Olar slýuda ýapraklaryny ýelim laklary ýa-da gury şepbikler bilen biri-birine ýelimläp alynýar. Mikanitler list ýa-da top (rulon) görnüşinde taýýarlanylýar. Onuň düzüminde azyndan 50% slýudanyň bardygy sebäpli, olar ýokary gyzgyna çydamly (B topar  $t_{is}=130^{\circ}\text{C}$ ) materiallara degişli bolýar. Mikanitleri slýuda listleriň mata ýa-da kagyz listleriniň üstüne, ýa-da olaryň aralygyna ýelmäp hem taýýarlaýarlar. Taýýarlanyşyna we ulanylyşyna görä mikanitler birnäçe görnüşde bolýarlar. Olar bolsa aşakdakylardan ybarat:

**Gaty mikanitler.** Olara kollektor we prokladka mikanitleri degişlidir. Gaty mikanitler kadaly temperaturada we  $100^{\circ}\text{C}$ -e çenli gaty halysynda bolýar. Olar eplenmeýän görnüşde, tekiz halda elektroörtük prokladka görnüşde ulanylýar.

Kollektor mikaniti ştamplanan şekilde taýýarlanylýar, elektrik maszynlaryň kollektoryndaky mis plastinkalarynyň arasynda elektroörtük görnüşinde hyzmat edýär. Ol flogopit slýudadan taýýarlanylýar. Onda baglaşdyryjy madda hökmünde gliftal ýa-da şepbik örän az mukdarda ( $4\%$ -den kän däl) ulanylýar. Şonuň üçin kollektor mikanitiniň özboluşly mehaniki häsiýetleri bolup, özem gyzgyna çydamlydyr. Olar galyňlygy  $0,4\div1,5\text{ mm}$  list görnüşinde taýýarlanylýar.

**Şekil berip bilýän mikanitler.** Olar kadaly temperaturada gaty, emma gyzdyrylanda bellibir şekili alyp bolýar, ol şekili soň sowadylanda hem saklaýar. Olar kollektor manžetleri, flanslary we dürli şekilli önümleri taýýarlamak üçin ulanylýar. Olarda slýuda  $80\div95\%$  ýet-

ýär. Baglaşdyryjylary bolsa:  $5\div 20\%$  gliftal ýa-da kremniý organiki şepbiklerdir.

**Çeýe mikanitler.** Olar adaty temperaturalarda çeýe bolup, elektrik maşynlaryň dürli böleklerinde maýyşgak elektroörtük hökmünde ulanylýar. Olaryň galyňlygy  $0,15\div 0,5\text{ mm}$  bolan list görnüşinde, muskowit ýa-da flogopiti ýagly-gliftal ýa-da kremniorganiki lak bilen utgaşdyryp taýýarlaýarlar. Çeýe mikanitler iki tarapy kagyz ýelmenen görnüşde hem taýýarlanylýar.

**Gyzgyna çydamly mikanit.** Olarda organiki baglaşdyryjylar ulanylmaýar. Olar birnäçe ýüz graduslarda işleýän elektrik gyzdyryjylarda elektroörtük material hökmünde ulanylýar. Olar flogopitden taýýarlanylýar.

**Slýudinitler we slýudoplastlar.** Bu materiallara slýudaly kagyzlar diýilýär. Slýudanitler galyndy külke slýudalardan alynýar. Olary taýýarlamak üçin külke slýuda kristallary  $900^{\circ}\text{C}$ -ä çenli gyzdyrylyp, täzeden işlenýär. Şol temperaturada kristalyň düzümindäki suw aýrylýar. Ondan soň olar kislotada we aşgar garyndylarda, soňra suwda ykjam ýuwulýar. Soňra bu suwly we maýda slýudaly massa kagyz öndüriji maşyna geçirilýär. Netijede, galyňlygy  $10\div 150\text{ mkm}$  bolan slýudanit kagyzlary alynýar. Onuň gury görnüşinde elektrik berkligi  $E_b = 15\div 20 \frac{\text{MV}}{\text{m}}$ , emma slýudinit kagyzlary suw degende ýa-da beýleki polýar suwuklyklarda dargaýar. Olar lak siňdirilen listler we lentalar görnüşde elektroörtük hökmünde giňden ulanylýar. Slýudinitler epoksit, kremniorganiki baglaşdyryjylar bilen ýeterlik mehaniki berklige we gyzgyna çydamlylyga eýe bolýarlar.

**Slýudoplastlar.** Olar tebigy slýudanyň ownuk kristal listlerini biri-birine gysmak-preslemek bilen alynýar. Slýudoplastlar öndürilende hem kagyz öndüriji maşynlar ulanylýar. Netijede, galyňlygy  $0,2\div 0,4\text{ mm}$  bolan slýudoplast listler alynýar. Olaryň mehaniki berkligi slýudinitler bilen deňeşdirilende has ýokary bolýar. Meselem, onuň süýnme berkligi  $90\text{ MPa}$  deň. Slýudoplast kagyzlaryň esasynda dürli baglaşdyryjylar ulanyp, kollektor we prokladka üçin slýudoplastlar we stekloslýudoplastlar taýýarlanylýar. Olaryň mehaniki berkligi we himiki durnuklylygy has ýokary bolýar.

**Mikaleks.** Ol üwelen slýudany we aňsat ereýän aýnany garyp, takmynan,  $600^{\circ}\text{C}$  temperaturada gyzgyn preslemek usuly bilen taý-

ýarlanylýar. Bu material mehaniki taýdan has berkligi we ýokary gyzgyna çydamlylygy bilen tapawutlanýar. Onuň esasy fiziki häsiýetleri 3.5-nji tablisada görkezilendir:

3.5-nji tablisa

1	Dykyzlygy, $\frac{mg}{m^3}$	2,6 ÷ 3,0
2	Iş temperaturasy	300 ÷ 350°C
3	Ýylylyga giňelme koeffisiýenti	$\alpha_l = 8 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$
4	Berklik çägi: süýnmäge gysylmaga egrelmäge	30 ÷ 70 <i>Mpa</i> 100 ÷ 400 <i>Mpa</i> 70 ÷ 140 <i>Mpa</i>
5	Göwrümleýin udel garşylygy	$\rho = 10^{10} \div 10^{12} \text{ Om} \cdot \text{m}$
6	Dielektrik syzyjylygy	$\epsilon = 6 \div 8,5$
7	$\text{tg} \delta$ ( $f=1\text{MGs}$ ýygýlykda)	$\text{tg} \delta = 0,003 \div 0,01$
8	Elektrik berkligi ( $f=50\text{Gs}$ ýygýlykda)	$E_b = 10 \div 20 \frac{\text{MV}}{\text{m}}$

Mikaleks radioteknikada we elektrowakuum tehnikasynda has giňden ulanylýar.

**Sintetik slýuda.** Soňky wagtlarda slýudany emeli usul bilen almak tehnologiýasy işlenip düzüldi. Ol usul bilen alynýan slýuda sintetik slýuda diýilýär. Degişli himiki düzümi saýlamak we örän haýal sowatmak bilen fluorflogopit diýilýän sintetik slýuda alyndy. Onuň himiki durnuklylygy, gyzgyna çydamlylygy we radiasion durnuklylygy boýunça tebigy flogopitden ýokary bolýar. Emma sintetik slýuda tebigy şepbikden has gymmat. Onuň kristallary hem has ownuk bolýar. Häzirki wagtda fluor-flogopit – 200÷800°C temperaturalar aralygyn-da işläp bilýän şamp usuly bilen taýýarlanylýan detallary öndürmek üçin hem-de mikaleksleri taýýarlamak üçin ulanylýar. Ol mikaleksleriň häsiýetleri tebigy slýudanyň esasynda alnan mikaleksiň häsiýetlerinden has ýokary bolýar.

### 3.11. Asbest we asbestli materiallar.

#### Organiki däl dielektrik plýonkalar

**Asbest we asbestli materiallar.** Asbest – süýümli organiki däl mineral. Onuň has köp ýaýran görnüşine hrizotil asbest diýilýär. Hrizotiliň himiki düzümi:



Asbest daşlaryň arasynda tekiz gatlak görnüşinde ýerleşýär we her gatlak biri-birine parallel ýerleşen süýümlerden durýar. Her süýümiň uzynlygy gatlagyň (listiň) galyňlygyna deň bolup, 0,1mm-den birnäçe santimetre ýetýär. Süýümleriň uzynlygy näçe uly bolsa, şonça-da gymmatly hasap edilýär. Uzyn süýümlü asbestler el güýji bilen ýygnaýlar. Russiýada asbestiň çykarylýan ýerleri Uralda (Asbest şäherine golaý ýerde) ýerleşendir. Asbestiň beýleki organiki süýümlü materiallardan artykmaçlygy – onuň ýokary gyzgynlyga çydamlylygydyr. Ol 400 – 500°C-ä çenli gyzdyrylanda özüniň öňki häsiýetlerini saklaýar. Emma 500°C-den soň, onuň düzümindäki suw aýrylýar we başga kristal görnüşe geçýär, mehaniki berkligi has peselýär. Asbest 1150°C-den ýokary temperaturada ereýär. Ol özüne suw çekegen bolýar. Emma oňa garasakgyç, şepbik siňdirilen ýagdaýynda suw siňdijiligi has peselýär.

Asbest önümleri elektrotehnikanyň dürli ýerlerinde giňden ulanylýar. Asbest süýümlerinden kagyz, kardon, matalar we lentalar taýýarlanylýar we olar ýokary gyzgynlyga çydamlylygy bilen tapawutlanýarlar. Asbestli materiallaryň ýylylyk geçirijiligi hem pes bolýar. Şonuň üçin olar ýylylyk tehnikasynda ýylylyk örtük materialy hökmünde hem giňden ulanylýar.

Asbestli materiallara asbogetinaks, asbotekstolit we asbosement degişlidir. Asbogetinaksda kagyz dolduryjylaryň deregine asbest süýümleri, asbotekstolitde dolduryjy bölek hökmünde dokma matalaryň deregine asbest matalar ulanylýar. Netijede, bu materiallaryň mehaniki berkligi we gyzgynlyga çydamlylygy ýokarlanýar.

**Asbosement** – sowuk preslemek bilen alynýan gaty organiki däl plastmassa material. Onda baglaşdyryjy bölegi bolup sement, dolduryjy bölek bolup bolsa asbest süýümleri hyzmat edýär. Asbosement sowuk halda suwy, sementi we asbesti garyşdyryp we soňra preslenip alynýar. Ol galyňlygy 4 – 40 mm listler we turba görnüşinde öndürilýär. Ol materiallar gyzgyna, uçgun dugalaryna çydamly bolany üçin, elektrotehnikada paýlaýjy tagtalar, şitler we ş.m. taýýarlamak üçin ulanylýar.

**Organiki däl dielektrik ýuka gatlaklar.** Elektrotehnikanyň köp ýerlerinde ýuka organiki däl, gyzgyna çydamly ýuka gatlaklar hem giňden ulanylýar. Ol ýuka gatlaklary almagyň bir usuly – öňünden taýýar-

lanan maddany wakuumda bugartmak bilen alynýar. Ol ýuka gatlaklary almagyň has giňden ulanylýan usuly himiki ýol bilen metalyň üstünde şol metalyň oksidini goýmakdan ybaratdyr. Bu usulda berlen metalyň üstünde şol metalyň kislorod bilen birleşmesi – oksidi emele gelýär. Şonuň üçin bu usula oksidirlenme usuly diýilýär. Şonda emele gelýän ýuka gatlag – oksid elektroörtükli ýuka gatlak diýilýär. Berlen metalyň üstünde tutuşlaýyn oksid örtügi emele gelip biljegini öňünden kesgitlemek üçin oksidirlenmäniň göwrümleýin koeffisiýenti diýilýän ululyk girizilýär. Ol oksidiň göwrüminiň onuň düzümine giren metalyň göwrümine bolan gatnaşygyna deň, ýagny

$$K = \frac{M\rho_M}{nA\rho_0}, \quad (3.1)$$

bu ýerde  $M$  – oksidiň molekulýar massasy;  $\rho_M$  – metalyň dykzlygy;  $n$  – oksidiň molekulasyňa girýän metal atomlarynyň sany;  $A$  – metalyň atom massasy;  $\rho_0$  – oksidiň dykzlygy.

Eger-de  $K > 1$  bolsa, onda emele gelýän oksid gatlagy şol metalyň üstüni doly örtýär. Eger-de  $K < 1$  bolsa, onda tutuşlaýyn örtük emele gelip bilmeýär. Meselem, adaty şertlerde alýuminiň üsti hemişe howada  $\text{Al}_2\text{O}_3$  oksidiniň ýuka gatlaklary bilen tutuşlygyna örtülen bolýar. Sebäbi bu ýerde:  $A = 26,97$ ;  $\rho_M = 2700 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ ;  $M = 101,91$ ;  $n = 2$ ;  $\rho_0 = 3200 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$  bolanda (1) formula görä  $K = 1,6 > 1$ . Emma demir üçin  $K < 1$ . Şonuň üçin demriň üstünde tutuşlaýyn oksid örtügi emele gelmeýär.

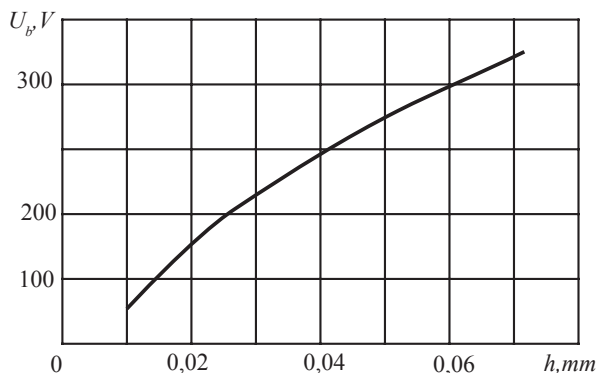
Adaty şertlerde emele gelen  $\text{Al}_2\text{O}_3$  oksidiň galyňlygy örän ýuka bolup, takmynan, 1 *mm* we onuň böwsülme naprýaženiýesi hem, takmynan, 1 *V* bolýar.

Alnyş usulyna, häsiýetlerine we ulanyşyna görä alýumin oksidiniň ýuka gatlaklary iki topara bölünýär:

I topardaky oksidleriň galyňlygy 2 *mm*-den uly bolmaýar. Olar, esasan, elektrolit kondensatorlarynda giňden ulanylýar, özem kiçi göwrümlü, uly elektrik sygymly kondensatorlary almaga mümkinçilik berýär.  $\text{Al}_2\text{O}_3$  oksidiň dielektrik syzyjylygy  $\varepsilon = 10$ . Bu maksat üçin has amatlysy tantal oksidi ( $\text{TaO}_3$ ) ( $\varepsilon = 27$ ) we niobiý oksidi  $\text{Nb}_2\text{O}_5$  ( $\varepsilon = 40$ ) hasap edilýär. Bu kondensatorlarda oksid plýonka geçiriji suwuk elektrolit bilen galtaşan bolýar. II topardaky oksid plýonkanyň galyňlygy 2 *mm*-den uly bolup, olar elektrohimiiki oksidirlenme usuly bilen alynýar.

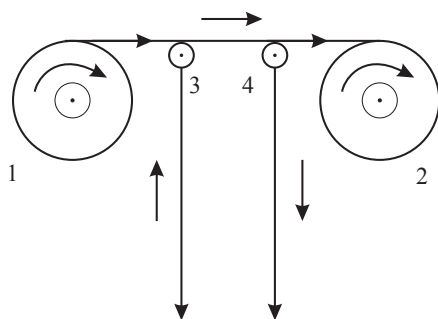


II topara deňişli alýumini oksid elektroörtügiň  $U_b$  böwsülme naprýa-  
ženiýesiniň galyňlyga baglylygynyň grafigi 3.13-nji çyzgyda berilýär.



**3.13-nji çyzgy.** II topara deňişli  $Al_2O_3$  oksidinde böwsülme  
naprýaženiýäniň galyňlyga baglylygy

$Al_2O_3$  oksidi gyrgyzna çydamlylygy boýunça C topara deňişli. Onuň ereme temperaturasy  $2050^{\circ}C$ . Ýokary garşylykly metal garyndylaryň daşynda oksid elektroörtük plýonkalaryny almak üçin termiki oksidirlenme usuly ulanylýar. Meselem, bu usul bilen (gysga wagtlaýyn 3 sekundyň dowamynda) howada  $900^{\circ}C$ -ä çenli gyzdyryp, konstantan siminiň daşynda oksid elektroörtük alynýar. Soňra ol simlerden sarymlary biri-birine galtaşýan rezistorlary, reostatlary taýýarlap bolýar. Konstantan simleriniň üstünde oksid elektroörtüginu almak üçin 3.14-nji çyzgyda görkezilen gurluşy ulanmak bolýar.



**3.14-nji çyzgy.** Konstantan simleriň üstünde oksid plýonkasyny  
emele getirýän gurluş. 1, 2 – simli barabanlar;  
3, 4 – metal tigirçekler



#### **4.1. Geçiriji materiallar barada umumy düşüňjeler. Metallarda elektrik geçirijiligiň nusgawy elektron nazaryýeti. Ýokary geçirijilikli metallar**

**Geçiriji materiallar barada umumy düşüňjeler.** Elektrik toguny gowy geçirmäge ukyply materiallara geçiriji materiallar diýilýär. Elektrik toguny geçiriji materiallar agregat hallary boýunça gaty, suwuk we kähalatlarda gaz halynda hem bolup bilýär.

Gaty halyndaky geçirijilere metallar we metal garyndylary, şeýle hem uglerodyň birnäçe görnüşleri degişlidir.

Suwuk geçirijilere eredilen metallar we dürli elektrolitler girýär. Emma simapdan başga beýleki metallaryň ereme temperaturasy, adaty, ýokary bolýar. Simabyň ereme temperaturasy  $39^{\circ}\text{C}$ . Şoňa görä-de otag temperaturasynda suwuk geçiriji hökmünde diňe simaby ulanmak bolýar. Ondan başga-da galliý metalynyň ereme temperaturasyňyň ( $29,8^{\circ}\text{C}$ ) adaty temperatura ýakyndygyny bellemeli.

Metallarda, metal garyndylarynda gaty we suwuk hallarynda elektrik geçirijilik erkin elektronlaryň hereketi bilen amala aşyrylýar. Sonuň üçin olara elektron elektrik geçirijilikli geçirijiler ýa-da birinji kysymly geçirijiler diýilýär. Ikinji kysymly geçirijilere elektrolitler – kislotalaryň, aşgarlaryň we duzlaryň, esasan, suwdaky erginleri hem-de ion birleşmeleriň erginleri degişlidir. Olarda elektrik geçirijilik erkin položitel we otrisatel ionlaryň hereketi bilen ýüze çykýar. Elektrik geçirijiligiň bu görnüşinde elektrik zaryadlarynyň geçirilmegi bilen bilelikde maddanyň geçirilişi hem bolup geçýär. Netijede, elektrolitiň düzümi üýtgap, elektrodalaryň üstünde elektroliz hadysasy ýüze çykýar.

Gazlar we buglar, şol sanda metal buglary pes naprýaženiýelerde elektrik toguny geçirmeýärler. Emma elektrik meýdanynyň güýjlenmesiniň has ýokary kritiki bahalarynda, ýagny urgy we fotoionlaşmanyň ýüze çykmagy üçin ýeterlik bolanda, gaz elektron we ion geçirijilikli geçiriji bolup biler. Güýçli ionlaşdyrylan gazlarda göwrüm birliginde erkin elektronlaryň we položitel ionlaryň sany deňleşende gaz deňagramlaşan geçiriji sreda özgerýär. Şolar ýaly ýagdaýa plazma ýagdaýy diýilýär.

1-nji bapda metallarda metal baglanyşyga seredilende metalyň her atomy özünüň bir walent elektronyny daşyna goýberip, položitel iona öwürülýändigini we ol ionlaryň kristal gözeneginiň düwünlerinde ýerleşýändigini, ol erkin elektronlaryň bolsa kristal gözeneginiň düwünleriniň aralyklarynda tertipsiz hereketde bolýandyklary bellegen. Ol elektronlara başgaça elektron gazy hem diýilýär.

Eger metalyň atomy bir gezek ionlaşýar diýip hasap edilse, onda her metalda erkin elektronlaryň sanyny kesgitlep bolýar. Belli bolşy ýaly, islendik maddanyň bir molundaky atomlaryň sany  $N_0 = 6,02 \cdot 10^{26} \text{ kmol}^{-1}$  Awogadronyň sanyna deň. Onda  $m$  massaly metalda mollaryň sany

$$\nu = \frac{m}{A} = \frac{d \cdot V}{A}. \quad (4.1)$$

bu ýerde  $A$  – metalyň atom massasy;

$d$  – metalyň dykyzlygy;

$V$  –  $m$  massaly metalyň göwrümi.

Onda  $m$  massaly metalda atomlaryň sany:

$$N = \nu \cdot N_0 = \frac{d \cdot V}{A} \cdot N_0. \quad (4.2)$$

Bu ýerden metalyň göwrüm birligindäki atomlaryň sany:

$$N^I = \frac{N}{V} = \frac{d \cdot V}{V \cdot A} \cdot N_0 = \frac{d}{A} \cdot N_0. \quad (4.3)$$

Şert boýunça  $N^I = n$  bolmaly. Diýmek, metallarda erkin elektronlaryň sany

$$n = \frac{d}{A} \cdot N_0. \quad (4.4)$$

Diýmek, berlen metalda erkin elektronlaryň sany ol metalyň  $A$  atom massasy we  $d$  dykyzlygy bilen kesgitlenilýär.

### 4.1.2. Metallarda elektrik geçirijiligi nusgawy elektron nazaryýeti

Metallaryň Drude we Lorens tarapyndan döredilen nusgawy elektron nazaryýetiniň esasyňy erkin (toplanan) elektronlardan düzülen elektron gaz düşüňjesi düzýär. Bu nazaryýet boýunça ideal gazyň häsiýetleri, ýagny nusgawy statistikanyň kanunlary metallardaky elektron gazynda ulanylýar. Diýmek, elektron gazdaky elektronlaryň hereketi ideal gazlardaky molekulalaryň hereket kanunlaryna boýun egmeli.

Ideal gazlaryň atom kinetiki nazaryýeti boýunça üznüksiz haotik hereketde bolýan elektronlaryň orta kinetik energiýasy temperatura baglylykda çyzykly ösýär:

$$\frac{m_0 v_T^2}{2} = \frac{3}{2} kT, \quad (4.5)$$

bu ýerde ( $v_T$ ) – ýylylyk hereketiň orta tizligi;

$k$  – Bolsmanyň hemişeligi;

$m_0$  – elektronyň massasy.

Bu formula boýunça  $T=300\text{ K}$  temperaturada ( $v_T$ )  $\approx 10^5 \frac{m}{s}$  bolmaly.

Elektronlara daşky elektrik meýdany täsir edende olar goşmaça ugrukdyrylan hereketiň  $\bar{v}_T$  tizligini alýarlar. Netijede, elektrik togy döreýär. Geçirijide bu toguň dykzlygy:

$$j = en \bar{v} \quad (4.6)$$

formula bilen aňladylýar. Bu ýerde:  $\bar{v}$  – zaryad göterijileriň ugrukdyrylan hereketiniň orta tizligi;  $e$  – elektronyň zaryady.

Mis geçirijide toguň dykzlygy  $j = 10^6 \frac{A}{m^2}$  bolanda elektronyň ugrukdyrylan hereketiniň tizligi (dreýf tizligi)  $10^{-4} m/s$  derejede bolýar. Ýagny real şertlerde  $v \ll (v_T)$  deňsizlik ýerine ýetirilýär. Elektronlar kristal gözenekleriniň düwünleri bilen iki çakyşmalarynyň wagt aralygynda, elektrik meýdanyň täsirinde

$$\alpha = \frac{eE}{m_0} \quad (4.7)$$

tizlenme bilen ugrukdyrylan hereketi edýärler. Erkin ýoluň ahyrynda bolsa olaryň dreýf maksimal tizligi

$$v_{\max} = a\tau_0. \quad (4.8)$$

Bu ýerde  $\tau_0$  – elektronlaryň erkin hereketlenýän wagty.

Çakyşmadan soň, elektronlaryň köpüsiniň ugrukdyrylan hereketiniň tizligi nola çenli peselýär, ýagny toplanan kinetik energiýa kristal gözeneginiň atomlaryna geçirilýär. Şonuň üçin elektronlaryň erkin hereketiniň dowamynda elektronyň dreýf tizliginiň orta bahasy maksimal tizligiň ýarysyna deň bolmaly, ýagny

$$\bar{v} = \frac{eE}{2m_0} \cdot \tau_0. \quad (4.9)$$

Hakykatda, elektronlaryň doly tizligi olaryň ýylylyk hereketiniň we dreýf tizlikleriniň jemine deň bolmaly. Emma ýokarda belenşişi ýaly,  $\bar{v} \ll (\bar{v}_T)$  deňsizlik ýüze çykýar. Şoňa görä, elektronlaryň erkin hereketiniň  $\tau_0$  wagty hasaplananda  $\bar{v}$  hasaba alynmaýar. Onda:

$$\tau_0 = \frac{\bar{\lambda}}{\bar{v}_T}.$$

Diýmek,

$$\bar{g} = \frac{eE}{2m_0} \cdot \frac{\bar{\lambda}}{\bar{v}_T}, \quad (4.10)$$

bu ýerde  $\bar{\lambda}$  – elektronlaryň erkin hereketiniň uzynlygy. Şeýlelikde, (4.6) we (4.10) formulalardan alarys:

$$j = \frac{e^2 n \bar{\lambda}}{2m_0 \bar{v}_T} \cdot E. \quad (4.11)$$

Fizikadan belli bolşy ýaly, Omuň kanunynyň differensial görnüşi

$$j = \gamma E, \quad (4.12)$$

bu ýerde.  $\gamma = \frac{I}{\rho}$  – udel elektrikgeçirijilik;  $\rho$  – udel garşylyk. Onda (4.11) we (4.12) formulalary deňeşdirip alarys:

$$\rho = \frac{1}{j} = \frac{2m_0 \bar{v}_T}{e^2 n \bar{\lambda}}. \quad (4.13)$$

Şeýlelikde, (4.13) formula metal geçirijileriň udel garşylygynyň nusgawy elektron nazaryýeti esasynda alnan formulasy diýilýär.

**Ýokary geçirijilikli metallar.** Ýokarda görkezilen (4.13) formuladan görnüşi ýaly, metallaryň  $\gamma$  udel elektrik geçirijiligi we oňa ters ululyk bolan  $\rho$  udel garşylyk şol metalda erkin elektronlaryň tertipsiz  $(\bar{v}_T)$  ýylylyk hereketiniň tizligine, ondaky erkin elektronlaryň  $n$  sanyna we elektronlaryň  $\bar{\lambda}$  erkin hereketiniň ortaça uzynlygyna bagly. Şoňa görä,  $\rho$  udel garşylyk otag temperaturasynda dürli metallarda dürli bolýar. Has pes udel garşylykly (ýokary udel geçirijilikli) metallara ýokary geçirijilikli metallar diýilýär. Olara tertip boýunça kümüş

(Ag), mis (Cu), altyn (Au) we alýumin (Al) degişlidir. Bu metallaryň esasy häsiýetleri 4.1-nji tablisada görkezilýär.

4.1-nji tablica

**Ýokary geçirijilikli metallar**

№	Metallar	Dykyzlygy, $kg/m^3$	$t_{er}^{\circ}C$	Udel garşylygy $\rho$ , $Om \cdot m$	$\rho_{TK}, K^{-1}$
1	Kümüş (Ag)	1050	961	$1,6 \cdot 10^{-8}$	$4,45 \cdot 10^{-3}$
2	Mis (Cu)	894	1083	$1,7 \cdot 10^{-8}$	$4,35 \cdot 10^{-3}$
3	Altyn (Au)	1930	1063	$2,4 \cdot 10^{-8}$	$4,8 \cdot 10^{-3}$
4	Alýumin (Al)	2700	657	$2,8 \cdot 10^{-8}$	$4,2 \cdot 10^{-3}$
5	Demir (Fe)	7870	1535	$9,8 \cdot 10^{-8}$	$4,5 \cdot 10^{-3}$

Bu metallaryň arzanlary mis we alýumin bolup, olardan tok geçiriji simler, kabeller, elektrik maşynlaryň we transformatorlaryň tegeklere, elektromagnitler taýýarlanylýar. Bu metallar bilen utgaşdyrylyp, giňden ulanylýan mehaniki taýdan berk we gyzgyna çydamly demriň (Fe) udel garşylygy  $\rho=9,8 \cdot 10^{-8} Om \cdot m$  has ýokary bolsa-da bu tablica girizildi.

Hasaplamalar we tejribeler boýunça dürli metallarda elektronlaryň ýylylyk hereketiniň  $v_T$  tizligi takmynan birmeňzeşdir.

Erkin elektronlaryň  $n_0$  sany hem dürli metallarda az tapawut edýärler. Meselem, misde (Cu) we nikelde (Ni)  $n_0$ -yň tapawudy 10%-den hem pes. Diýmek, metallarda udel garşylygyň ýa-da udel geçirijiligiň bahasy, esasan, elektronlaryň erkin hereketiniň  $\bar{\lambda}$  orta uzynlygyna bagly. Elektronlaryň erkin hereketiniň  $\bar{\lambda}$  orta uzynlygy bolsa, öz gezeginde, geçiriji materialyň içki kristal gurluşyna, kristalyň dürli şikeslerine bagly. Arassa we dogry kristal gözenekli metallaryň hemişe pes udel garşylygy (ýokary tok geçirijiligi) bolýar.

Metallarda diňe elektrik geçirijilik däl, eýsem, ýylylyk geçirijiligiň hem erkin elektronlar bilen amala aşyrylýandygyny bellemeli. Şonuň üçin metallarda  $\gamma$  udel elektrik geçirijilik bilen  $\lambda_T$  udel ýylylyk geçirijiligiň arasynda ýakyn baglanyşyk ýüze çykýar we ol baglanyşyk Widemanyň- Fransyň kanuny bilen aňladylýar. Ideal gazyň atomkinetik nazaryýeti esasynda elektronly ýylylyk geçirijilikde udel ýylylyk geçirijilik

$$\lambda_T = \frac{1}{2} knv_T \bar{\lambda}. \quad (4.14)$$

(4.13) formuladan udel elektrik geçirijilik

$$\gamma = \frac{e^2 n \bar{\lambda}}{2 m_0 g_T}. \quad (4.15)$$

Onda (4.14) formulany (4.15) formula bölüp we (4.5) formulany göz önünde tutup alarys:

$$\frac{\lambda_T}{j} = 3k^2 e^{-2} T = L_0 T. \quad (4.16)$$

Ýagny udel ýylylyk geçirijiligiň udel elektrik geçirijilige bolan gatnaşygy berlen temperaturada hemişelik galýar, özem geçirijiniň tebigatyna bagly bolmaýar. (4.16) formuladaky

$$L_0 = \frac{\lambda_T}{j} = \frac{\pi^2}{3} \left( \frac{k}{e} \right)^2 = 2,45 \cdot 10^{-8} W^2 K^{-2} \quad (4.17)$$

ululyga Lorensiň sany diýilýär.

Bu tassyklama Widemanyň – Fransyň – Lorensiň kanuny diýilýär. Tejribelerde görkezilişi ýaly, bu kanun kadaly we oňa ýakyn ýokary temperaturalarda (marganes we berilliden başga), köplenç, metallarda ýerine ýetýär. Meselem,  $T=293K$  temperaturada mis üçin  $L_0 = 2,44 \cdot 10^{-8} \frac{W^2}{K^2}$ , kümüş üçin  $L_0 = 2,35 \cdot 10^{-8} \frac{W^2}{K^2}$ , sink üçin  $L_0 = 2,45 \cdot 10^{-8} \frac{W^2}{K^2}$ .

Indi ýokary geçirijilikli metallaryň has giňden ulanylýanlarynyň esasy aýratynlyklaryna gysgaça seredip geçeliň.

**Mis (Cu).** Onuň giňden ulanylyşyny esaslandyrýan esasy aýratynlyklary:

1. Pes udel garşylygy bolup, geçirijiligi boýunça kümüşden soň ikinji orunda durýar.
2. Ýeterlik derejede mehaniki taýdan berk.
3. Köp ýagdaýlarda kanagatlanarlykly, poslamazlyga durnukly.
4. Ol aňsatlyk bilen täzeden işlenilýär. Örän ýuka listler (folgalar) we örän inçe simleri almaga mümkinçilik berýär.
5. Ony aňsatlyk bilen kebşirläp bolýar.

**Alýumin (Al).** Ol elektrik geçiriji material hökmünde ulanylyp, misden soň, ikinji orunda durýar. Onuň esasy aýratynlyklary:

1. Ol ýeňil metal bolup, misden 3,5 esse ýeňil.
2. Elektrik geçirijiligi boýunça hemme metallaryň arasynda dördünji orunda durýar.
3. Alýuminden örän ýuka folgalar (6–7 *mm*) taýýarlamak bolýar.
4. Alýuminiň üstünde aňsatlyk bilen oksid ýuka gatlagy ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) emele gelýär.
5. Alýuminiň mehaniki taýdan berkligi, mis bilen deňeşdirilende, pes bolýar. Şonuň üçin elektrik liniýalarda alýumin simler demir simler bilen utgaşdyrylyp ulanylýar.

## 4.2. Metallarda udel garşylygyň temperatura baglylygy. Aşageçirijiler

**Metallarda udel garşylygyň temperatura baglylygy.** Hemme geçirijilerde elektrik togunyň dykzlygy differensial görnüşdäki Omuň kanuny esasynda kesgitlenýär:

$$j = \gamma E, \quad (4.18)$$

bu ýerde:  $\gamma$  – materialyň udel elektrik geçirijiligi;  $E$  – geçirijide elektrik meýdanyň güýjenmesi.

Udel geçirijiligiň ters ululygyna udel garşylyk diýilýär. Onuň formulasy  $\rho = \frac{l}{j}$ , [ $\text{Om} \cdot \text{m}$ ].  $l$  uzynlykly we kese-kesiginiň meýdany  $S$ -e deň bolan geçirijiniň elektrik garşylygy:

$$R = \rho \frac{l}{S}. \quad (4.19)$$

Bu ýerden  $\rho$  udel garşylyk:

$$\rho = \frac{RS}{l}, \quad [\text{Om} \cdot \text{m}]. \quad (4.20)$$

Geçen 4.1-nji bölümde bellenşi ýaly, metallaryň nusgawy elektron nazaryýeti esasynda udel garşylygyň aşakdaky formulasy alyndy:

$$\rho = \frac{2m_0 \bar{v}_T}{e^2 n \lambda}. \quad (4.21)$$

Bu formuladan görnüşi ýaly,  $\rho$  udel garşylygyň temperatura baglylygynyň metalda erkin elektronlaryň  $n_0$  sanynyň, olaryň erkin he-



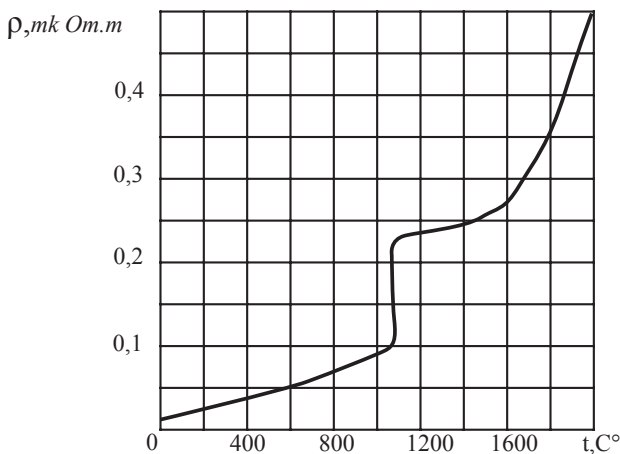
reketiniň  $\bar{\lambda}$  ortaça uzynlygynyň we elektronlaryň ýylylyk hereketiniň  $v_T$  tizliginiň temperatura baglylygy bilen kesgitlenýär. Metallarda erkin elektronlar atomlaryň arasynda metal baglanyşygyň ýüze çykyş tebigatyna görä her atomyň ionlaşmasy netijesinde ýüze çykýar. Ondan başga-da metallaryň zolaklaýyn gurluşynda gadagan zolagyň giňligi  $\Delta E=0$ . Şoňa görä metallarda erkin elektronlaryň sany temperaturanyň ýokarlanmagy bilen üýtgemän galýar. Emma temperaturanyň ýokarlanmagy bilen kristal gözenekleriň düwünleriniň yrgyldy hereketi güýçlenip, elektronlaryň ugrukdyrylan hereketine garşy her hili päsgelçilikler hem artýar. Netijede, erkin elektronlaryň erkin hereketiniň  $\bar{\lambda}$  orta uzynlygy kiçelýär. Bu bolsa erkin elektronlaryň  $u$  hereketlenijiliginiň peselmegine getirýär. Hereketlenijiligiň peselmegi bolsa, aşakdaky formula görä,  $\gamma$  udel geçirijiligiň peselmegine we  $\rho$  udel garşylygyň bolsa artmagyna getirýär.

$$\gamma = \frac{l}{\rho} = neu. \quad (4.22)$$

Diýmek, metallarda we metal garyndylarda udel garşylygyň temperatura koeffisiýenti:

$$\rho_{TK} = \alpha_p = \frac{l}{\rho} \cdot \frac{d\rho}{dT}. \quad (4.23)$$

Metallar gaty haldan suwuk hala geçende, ýagny erände, köplenç,  $\rho$  udel garşylyk ulalýar. Meselem, ol misiň udel garşylygynyň temperatura baglylygynda görünüýär (4.1-nji çyzgy).



**4.1-nji çyzgy.** Misde udel elektrik garşylygyň temperatura baglylygy. Misiň ereme temperaturasynda  $1083^\circ C$ -de udel garşylyk duýdansyz ýokarlanýar

Dürli metallarda ergin hala geçilende udel garşylygyň üýtgeýşi 4.2-nji tablisada görkezilýär.

4.2-nji tablica

Metal	Hg	Cu	Au	Zn	Sn	Ag	Al	Na	Ga	Bi
$\frac{\rho_{\text{suwuk}}}{\rho_{\text{gaty}}}$	3,2	2,4	2,28	2,19	2,1	1,9	1,64	1,45	0,58	0,43

Tejribelerden görnüşi ýaly, gaty haldan ergin hala geçende göwürümi ulalýan (dykzylygy kiçelýän) metallarda  $\rho_{\text{suwuk}} > \rho_{\text{gaty}}$  bolýar. Tersine galliý, wismut, surma erände göwürüm kiçelýär, dykzylyk ulalýar. Şoňa görä olarda  $\rho_{\text{suwuk}} < \rho_{\text{gaty}}$  bolýar. Metallarda ýylylyga çyzykly giňelme koeffisiýenti aşakdaky deňlik bilen kesgitlenilýär:

$$\alpha_i = l_{TK} = \frac{1}{l} \cdot \frac{dl}{dT}. \quad (4.24)$$

Metallarda we metal garyndylarda  $R$  elektrik garşylygyň temperatura koeffisiýenti:

$$R_{TK} = \alpha_R = \frac{1}{R} \cdot \frac{dR}{dT}. \quad (4.25)$$

Arassa metallarda  $\alpha \approx \alpha_R$  bolýar. Emma metal garyndylarda:

$$R_{TK} = \alpha_R = \alpha_p - \alpha_l \text{ ýa-da } \alpha_p = \alpha_R + \alpha_l \quad (4.26)$$

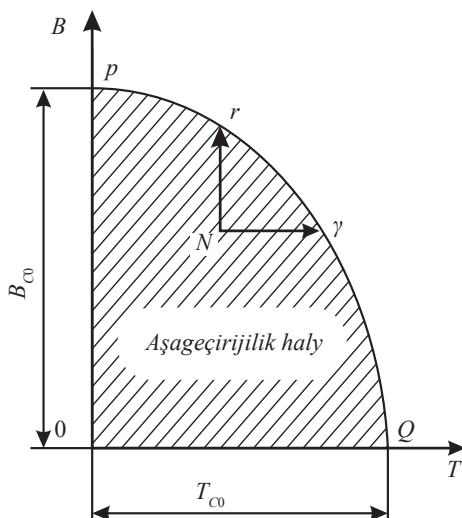
bolýandygyny göz önünde tutmaly.

**Aşageçirijiler.** (4.4) formula görä, absolýut nol temperaturada elektronlaryň ýylylyk hereketiniň tizligi nola deň ( $v_T=0$ ) bolup, udel garşylyk hem nola deňleşmeli. 1911-nji ýylda niderland fizigi H. Kamerling-Onnes simaby suwuk geliniň temperaturasynda ( $T=4,2K$ ) we kadaly basyşda derňemek bilen uly ylmy açyş edýär. Ol suwuk geliniň bellibir temperatura çenli sowadylyp doň halyndaky simap halkasynda garşylygyň çakdanaşa birden azalandygyny görýär. Bu hadysa (maddada tükeniksiz uly udel geçirijiligiň ýüze çykmasy) aşageçirijilik hadysasy diýilýär. Maddanyň aşageçirijilik halyna geçýän temperaturasynda aşageçirijilige  $T_{as}$  geçiş temperaturasy diýilýär. Aşageçirijilik haly öwrülişikli hal bolýar, ýagny  $T_{as}$  temperaturadan ýokarda madda aşageçirijilik halyna geçen bolsa, onda ony ýene  $T_{as}$  temperatura çenli gyzdyrylsa, ol madda öňki kadaly halyna geçýär.

Häzirki wagtda 35 sany metal we müňdenem köp metal garyndylar, himiki birleşmeler aşageçirijilik hala geçirildi. Emma kadaly

temperaturada pes udel garşylykly metallary: kümşi, misi, altyny we platinany häzire çenli aşageçirijilik hala geçirmek başartmaýar.

Belli bolşy ýaly, elektromagnitde döreýän magnit meýdanyň güýjenmesi  $H$  we magnit induksiýasy  $B$  onuň sarymlaryndan akýan tok güýjüne  $I$  bagly bolmaly. Emma aşageçirijilikli elektromagnit bilen uly magnit meýdanyň güýjenmesi  $H$  we magnit induksiýasy  $B$  uly bolan güýçli magnit meýdanyny almak synanyşygy şowsuz bolýar. Sebäbi aşageçirijilik diňe  $T_{aş}$  temperaturadan ýokary temperaturanyň täsiri bilen bozulman, eýsem, aşageçirijiniň üstüne täsir edýän  $B_0$  induksiýaly magnit meýdanyň täsiri bilen hem bozulýar. Ol 4.2-nji çyzygyda görkezilen aşageçirijiniň hal diagrammasy esasynda düşündirilýär.



**4.2-nji çyzygy. Birinji kysymly aşageçirijiniň hal diagrammasynyň umumy görnüşü**

Aşageçirijilik halynda bolan materialyň her bir temperaturasy-na degişli magnit meýdanyň induksiýasynyň  $B_c$  geçiş bahasy bolýar. Iň ýokary  $T_{c0}$  geçiş temperaturasy (kritiki temperatura) iň pes  $B_c$  geçiş magnit induksiýasy bolanda ýetilýär, ýagny aşageçirijili elektromagnitde sarymdan örän pes tok geçende. Şoňa degişlilikde iň ýokary mümkin bolan geçiş magnit induksiýa bahasy  $B_{c0}$  aşageçirijiniň temperaturasy noldan örän az tapawut edende mümkin bolýar. 4.3-nji çyzygdaky çyzyklan  $OPQ$  çäk – aşageçirijilik halyna degişli,  $PQ$  – çyzykdan daşary – çyzyklanmadyk çäk – materialyň kadaly halyna

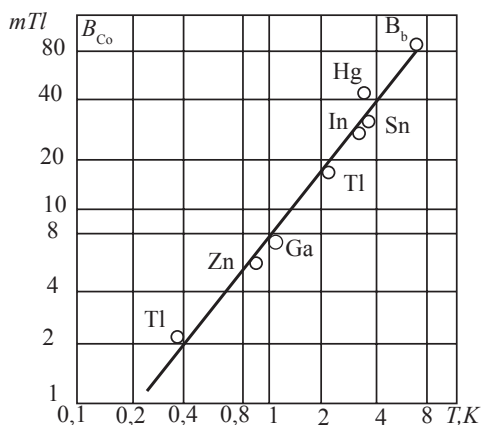
değişli. Eger material diagrammanyň  $x$  nokadynda işleýän bolsa, onda onuň aşageçirijilik halyny  $xy$  aralyga gysdyrmak bilen ýa-da magnit induksiýasyny  $xz$  aralyga ulaltmak bilen aýyrmak bolar. Umumy ýagdaýda  $T$  we  $B$ -ni bile üýtgedip hem aşageçirijiligi aýryp bolar. 4.3-nji tablisada dürli aşageçirijiler üçin  $T_{co}$  we  $B_{co}$ -niň bahalary berilýär.

4.3-nji tablica

Aşageçiriji materiallarda  $T_{co}$  we  $B_{co}$  ululyklar

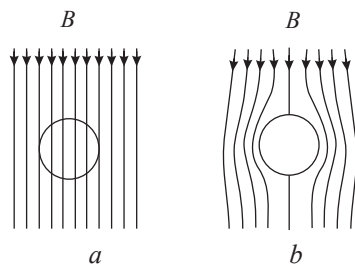
Aşageçirijilik	$T_{co}$ , K	$B_{co}$ , Tl
Elementar:		
Galáýy (Sn) . . . . .	3,70	0,031
Simap (Hg) . . . . .	4,20	0,046
Wanadiý (V) . . . . .	5,30	0,130
Gurşun (Pb) . . . . .	7,20	0,080
Niobiý (Nb) . . . . .	9,40	0,195
Garyndylar:		
Splaw 50% Nb + 50% Ti	8,70	12,000
Splaw 50% Nb + 50% Zr	9,50	11,000
Birleşmeler:		
$V_3Ga$	14,00	50,000
$Nb_3Sn$	18,00	22,000
$Nb_3Ga$	20,30	34,000
$Nb_3Ge$	24,30	37,000

4.3-nji çyzgyda bolsa elementar aşageçirijilerde  $T_{co}$  we  $B_{co}$  ululyklaryň özara baglanyşygy görkezilýär.



4.3-nji çyzgy. Elementar aşageçirijilerde  $T_{co}$  we  $B_{co}$  ululyklaryň özara baglanyşygy

1933-nji ýylda nemes fizikleri W. Meýsner we R. Oksenfeld täze açyş edýärler. Olar aşageçirijiler kadaly ýagdaýdan aşageçirijilik halyna geçenlerinde ideal diamagnetige öwrülýändigini, ýagny olaryň  $\mu_r$  magnit syzyjylygynyň bire ýakyn bahadan böküp,  $\mu_r=0$  çenli peselýändigini açýarlar (4.4-nji a, b çyzgylar). Şonuň üçin magnit güýç çyzyklary aşageçirijiniň içine girip bilmeýär. Bu effekt 1935-nji ýylda W.K.Arkadiýew tarapyndan howada «gaýýan» magnit bilen tejribede görkezilýär (4.4-nji çyzgy).



**4.4-nji çyzgy. Magnitli aşageçirijiler. a – Maýsneriň-Oksenfeldiň effekti  
b – B.K.Arkadiýewiň «gaýýan» magnitli tejribesi**

Eger hemişelik magnit aşageçiriji halyndaky okaranyň içine goýberilse, onda ol magnit ýokary zyňlyp, bellibir aralykda howada gaçman saklanýar.

Aşageçirijilik hadysasynyň nazaryýeti örän çylşyrymly. Oňa düşünmek we ony esaslandyrmak diňe kwant mehanikasynyň kömegi bilen mümkin. Şol sebäpli, ol hadysa açylandan soň, takmynan, 50 ýylyň dowamynda düşündirilmän galypdyr. Aşageçirijiligiň nazaryýetini düzmekde sowet alymlary L.D.Landau, N.N.Bogolýubow, W.L.Ginzburg, A.A.Abrikosow we L.P.Gorkow köp iş etdiler. Ahyrynda 1957-nji ýylda amerikan alymlary D.Bardin, L.Kuper we D.Şriffert ol hadysanyň nazaryýetini işläp düzdüler. Bu nazaryýet boýunça aşageçirijiligiň ýüze çykmagy üçin metallardaky elektronlaryň arasynda çekişme güýji ýüze çykmaly. Otrisetel zarýadlanan elektronlaryň arasynda çekişme güýç bolsa, diňe položitel ionlaryň döredýän meýdanynda bolup biler. Ol meýdan elektronlaryň arasynda ýüze çykýan itekleşme Kulon güýçlerini gowşatmaly. Çekişme güýçleri diňe elektrikgeçirijilige gatnaşýan elektronlaryň arasynda, ýagny energiýasy boýunça Ferminiň derejesine ýakyn ýerleşýän elektronlaryň arasynda ýüze çykýar. Eger şolar ýaly çekişme ýüze çyksa, onda impulsy we spini garşylykly ugrukdyrylan elektronlar biri-biri bilen jübütleşýärler, ýagny «kuper jübüti» diýilýän jübütler emele gelýär.

Belli bolşy ýaly, metallarda elektrik garşylyk elektronlaryň kristal gözeneginiň ýylylyk yrgyldysy we keseki garyndysy bilen täsirleşmesi (dargamasy) netijesinde ýüze çykýar.

Nazaryýetde subut edilişine görä, jübütleşen elektronlar (kuper jübütleri) aşageçirijilik halynda kristal gözeneginiň şikesleri bilen täsirleşmeýärler we dargamaýarlar.

Aşageçirijileri ylymda we tehnikada ulanmagyň esasy ugry aşýokary magnit meýdanyny almak bolup durýar. Häzirki wagtda aşageçirijiler bilen  $H=10^7$  A/m güýjenmeli magnit meýdany alynýar. Güýçli magnit meýdany ylmy derňewlerde ulanylýan tizleşdirijilerde, termoyadro sintezinde plazmany saklamak üçin giňden ulanylýar.

Aşageçiriji tegekleri ulanmaklyk elektrik maşynlarynda magnit serdeçnikleri aýryp, olaryň şol bir kuwwatyny saklap, massasyny we göwrümünü 5 – 7 esse kiçeltmäge mümkinçilik berýär. Maýsneriň – Oksenfeldiň effekti esasynda işleýän «magnit ýassykly» aşýokary tizlikli demir ýol ulaglary öndürilýär. Aşageçirijileri ulanmakda esasy bökdençlik pes temperaturalary almagyň kynlygy we gymmat düşýänligidir.

1986-njy ýylda azot temperaturasyndan (77 K) hem ýokary temperaturalarda aşageçiriji halyna geçýän birleşmeler (Meselem,  $Ti_2Ca_2Ba_2Cu_3O_{10}$ ,  $T_{aş}=127$  K) açyldy. Häzirki wagtda bu maddalary nazary hem-de amaly taýdan öwrenmek uly gyzyklanma bilen alnyp barylýar. Sebäbi maddanyň aşageçirijilik temperaturasy otag temperaturasyna näçe golaý bolsa, şonça-da ony amalyýetde ulanmak, ýagny elektrik energiýasyny ýitgisiz ulanmak mümkinçiligi dörär. Bu bolsa energetikada, tehnikada hem-de tehnologiýada görüp-eşidilmedik özgerişlere getirer.

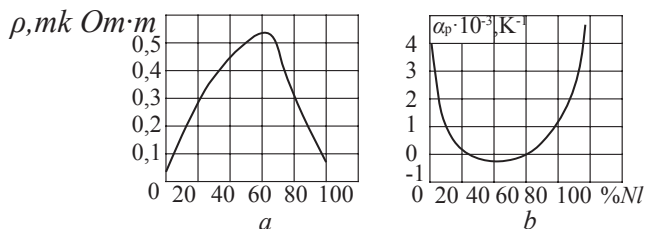
Häzirki wagtda «ýyly» aşageçirijili materiallary tapmak we almak işleri üznüksiz dowam etdirilýär.

### 4.3. Metal garyndylary. Kurnakowyň diagrammasy.

#### Uly elektrik garşylykly metal garyndylary

**Metal garyndylary.** Öň belleniş ýaly, metallarda kristal gözenegiň islendik şikesleri keseki garyndylaryň atomlary, kristal gözeneginiň gyşarmalary udel garşylygyň ulalmagyna getirýär. Eger  $A$  metalda  $B$  metal doly eräp, ol iki  $A$  we  $B$  metallar üznüksiz gaty garyndy emele getirýän bolsalar, onda ol gaty garyndynyň  $\rho$  udel garşylygynyň himiki düzüme baglylygynyň grafigi maksimumdan geçýär. Şol üznüksiz gaty

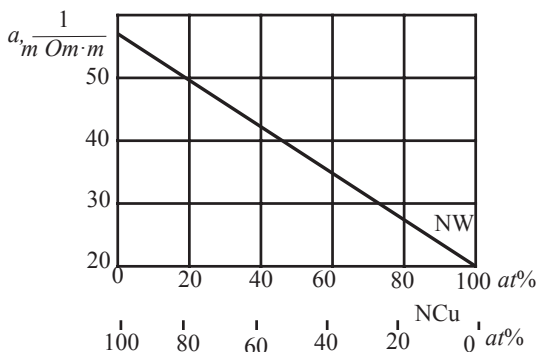
garyndylarda udel garşylygyň temperatura koeffisiýenti  $\alpha_p$ -niň himiki düzüme baglylygynyň grafigi bolsa minimumdan geçýär. Ol baglylyklaryň grafikleri mis-nikel (Cu-Ni) gaty garyndylary üçin 4.5-nji *a* we *b* çyzgylarda görkezilýär.



**4.5-nji çyzgy.** *a* – Cu-Ni gaty garyndylarda  $\rho = f(Ni\%)$ ; *b* – Cu-Ni gaty garyndylarda  $\alpha_p = f(Ni\%)$

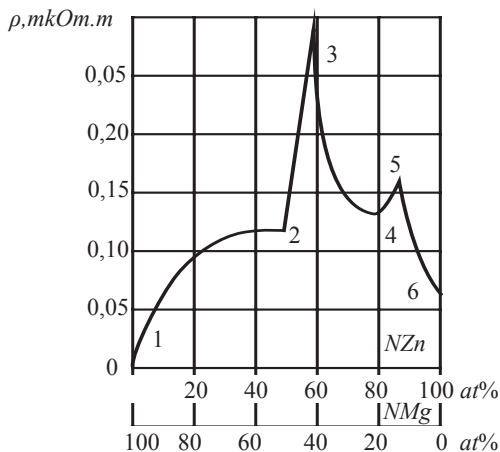
Gaty garyndylarda  $\rho$  we  $\alpha_p$ -niň bu görnüşde üýtgemelerini gaty garyndylarda arassa metallar bilen deňeşdirilende kristal gurluşyň has çylşyrymlaşýandygy bilen düşündirmek bolar. Olarda  $\gamma$  udel geçirijiligiň üýtgemesi diňe hereketlenijiligiň üýtgemesi bilen şertlendirilmän, eýsem, temperaturanyň ýokarlanmagy netijesinde zarýad göterijileriň sany hem üýtgap biler. Hereketlenijiligiň peselmegi zarýad göterijileriň sanynyň köpelmegi bilen kompensirlenýän gaty garyndylarda  $\alpha_p$  nola deň hem bolup biler.

Eger iki metal biri-birine garyşman, hersi aýratyn kristallary emele getirýän bolsalar, onda ol gaty garyndy bolman, eýsem, mehaniki garyndy bolup, şol ýagdaýda udel geçirijilik himiki düzüme baglylykda çyzykly üýtgeýär. Ol baglanyşyk Cu – W garyndy üçin 4.6-njy çyzgyda görkezilýär.



**4.6-njy çyzgy.** Mis – wolfram garyndysynda udel geçirijiligiň himiki düzüme baglylygy

**Kurnakowyň diagrammasy.** N.S.Kurnakowyň tejribe esasynda tassyklamagyna görä, eger iki  $A$  we  $B$  metallar bellibir himiki gatnaşyklarda himiki birleşmeleri emele getirýän bolsalar, onda  $A$  we  $B$  metallaryň gaty garyndylaryň  $\rho$  udel garşylygynyň himiki düzüme baglanyşygynyň grafiginde himiki baglaşma emele gelýän nokatlarynda döwürleme emele gelýär. Ol magniý (Mg) we sink (Zn) metallaryň garyndylarynda  $\rho$  udel garşylygynyň himiki düzüme baglylygynyň grafiginde aýdyň görünüär (4.7-nji çyzgy).



**4.7-nji çyzgy.** Magniý – sink garyndylarda  $\rho$  udel garşylygynyň himiki düzüme baglylygy. 1 – arassa magniý (Mg); 2 –  $\text{MgZn}$  birleşmesi; 3 –  $\text{Mg}_2\text{Zn}_3$ ; 4 –  $\text{MgZn}_4$ ; 5 –  $\text{MgZn}_6$ ; 6 – arassa sink (Zn)

A.F.Ioffeniň görkezmegine görä, bu himiki birleşmeleriň köpüsiniň elektrik geçirijiligi metal häsiýetde bolman, elektron ýarymgeçirijiler görnüşinde bolýarlar.

**Uly elektrik garşylykly metal garyndylary.** Ýokarda belenilişi ýaly, metallaryň arasynda gaty garyndylar emele geleninde olaryň udel garşylygynyň himiki düzüme baglylygynyň grafigi maksimumdan geçýär. Emma  $\rho$  udel garşylygyň  $\alpha_p$  temperatura koeffisiýenti bolsa peselip, onuň himiki düzüme baglylygynyň grafigi minimumdan geçýär.

Metallaryň gaty garyndylaryna degişli bu kanunalaýyklyklar dürli metallary özara garmak bilen ýokary udel garşylykly we pes  $\alpha_p$  temperatura koeffisiýentli geçiriji materiallary taýýarlamaga mümkinçilik berýär. Olaryň birnäçesine seredip geçeliň.



**Manganin.** Düzümi: 85%-Cu, 12%-Mn, 3%-Ni. Ady margensiň «manganum» adyndan alnan. Onuň udel garşylygy  $\rho=0,42\div0,48\text{ mkOm}\cdot\text{m}$ , udel garşylygyň temperatura koeffisiýenti  $\alpha_p=(5\text{-}30)\cdot10^{-6}\text{ K}^{-1}$ . Manganinden örän inçe ( $d=0,02\text{ mm}$ ) simleri taýýarlap bolýar.  $\alpha_p$ -nyň pes we udel garşylygyň wagta durnukly bolmagy üçin manganin simleri  $500\div600^\circ\text{C}$  temperaturada taplanýar. Onuň iş temperaturasy  $200^\circ\text{C}$ -den ýokary däl. Mehaniki häsiýetleri: mehaniki berkligi  $\sigma_p=450\text{--}600\text{ Mpa}$ ,  $\Delta l/l=15\text{--}30\%$ . Manganiniň dykzlygy  $8400\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ . Manganin nusgawy rezistorlar, ölçeg abzallarynda ulanylýan şuntlary, goşmaça garşylyklary taýýarlamak üçin ulanylýar.

**Konstantan.** Onuň himiki düzümi: 60%-Cu we 40%-Ni. «Konstantan» ady udel garşylygynyň temperaturanyň üýtgemegi bilen kän üýtgemän, hemişelik galýandygyndan gelip çykýar. Konstantanyň kadaly temperaturada udel garşylygy  $\rho=0,48\div0,52\text{ mkOm}\cdot\text{m}$ ,  $\alpha_p=(5\text{-}25)\cdot10^{-6}\text{ K}^{-1}$ . Mehaniki häsiýetlerine görä, ol manganine ýakyn. Emma onuň gyzgyna çydamlylygy ýokary. İş temperaturasy manganiniňkiden ýokary  $450^\circ\text{C}$ . Onuň simleri rezistorlarda we reostatlarda hem-de kuwaty uly bolmadyk elektrik gyzdyryjylarda ulanylýar. Konstantany giňden ulanmaklygy çäklendirýän sebäpleriniň biri, onuň düzüminde gyt hem gymmat metallara degişli bolan nikeliň bolmagydyr.

**Demriň esasyndaky splawlar.** Fe – Ni – Cr sistemadaky splawlara nihrom ýa-da ferronihrom (Fe düzüminde köp bolan ýagdaýynda) diýilýär. Olaryň düzümi we häsiýetnamalary 4.4-nji tablisada berilýär.

4.4-nji tablisa

Splawyň markasy	Düzümi, %, massa boýunça			Dykzlygy, $\text{mg/m}^3$	$\rho$ , $\text{mkOm}\cdot\text{m}$	$\alpha_p\cdot10^6$ , $\text{K}^{-1}$	Iş temperaturasy, $^\circ\text{C}$
	Cr	Ni	Mn				
X15H60	15-18	55-61	1,5	8,2-8,3	1,1-1,2	100-200	1000
X20H80	20-23	75-78	1,5	8,4-8,5	1,0-1,1	100-200	1100

Bu tablisadan görnüşi ýaly, nihromyň iş temperaturasy  $1000\text{--}1100^\circ\text{C}$ -e ýetýär. Şonuň üçin olar, esasan, elektrogызdyryjy elementlerde ulanylýar. Olaryň udel garşylygy mis bilen deňeşdirilende, takmynan, 100 esse ýokary bolýar. Fe – Cr – Al sistemadaky gaty garyndylara fehrallar we hromallar diýilýär. Olaryň himiki düzümleri, markalary we esasy häsiýetnamalary 4.5-nji tablisada berilýär. Bu garyndylar sowet döwründe kabul edilen standart boýunça şeýle atlandyrylýar:

$X$  – hrom,  $H$  – nikel,  $IO$  – alýumin,  $B$  – niobi,  $B$  – wolfram,  $\Gamma$  – marganes,  $\mathcal{M}$  – mis,  $\mathcal{M}$  – berilli.

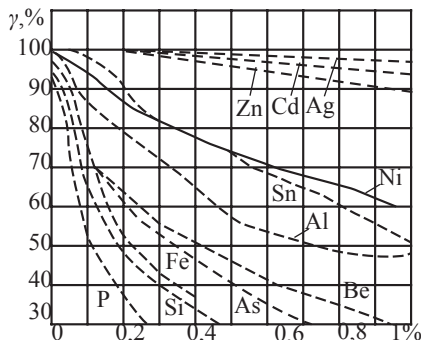
4.5-nji tablisa

Splawyň markasy	Düzümi, %, massa boýunça				Dýkyzlygy, $mg/m^3$	$\rho$ , $mkOm \cdot m$	$\rho_{TK} \cdot 10^{-6} K^{-1}$	$\sigma_p$ , $Mpa$	Maksimal iş temperaturasy, $^{\circ}C$
	Cr	Ni	Mn	Al					
X13IO4	12-15	0,6	0,7	3,5-5,5	7,1-7,5	1,2-1,35	100	700	900
X23IO5	22-25	0,6	0,7	4,5-5,5	6,9-7,3	1,3-1,5	65	800	1200

Bu splawlar gyzdyryjy elementler hökmünde ulanylanda wagtyň geçmegi bilen olaryň hatardan çykması, howada turşamalary bolup geçýär. Eger olaryň üstüne kislorodyň aralaşmagyndan goralsa, onda olaryň iş möhleti has artar. Meselem, çay gaýnadylýan gyzdyryjylarda gyzdyryjy sim durnukly metal turbasynyň okunyň ugrunda ýerleşdirilip, onuň metal turba bilen aralygy gyzgyna çydamly dielektrik bilen, meselem, magneziý ( $MgO$ ) bilen doldurylýar. Ondan başga-da, elektrik gyzdyryjylar gysga wagtlaýyn ýakylyp, öçürilende-de olaryň spirallary çalt zaýalanýar. Sebäbi çalt sowadylanda nihromyň üstündäki oksid gatlaklary garylyp, onuň içine kislorod aralaşýar we turşaýar.

**Mis we alýumin garyndylary.** Ýokarda bellenilişi ýaly, elektrotehnikada geçiriji material hökmünde, esasan, mis we alýumin ulanylýar. Aýratyn ýagdaýlarda ol materiallaryň mehaniki häsiýetlerini ýokarlandyrmak maksady bilen, olara az mukdarda başga elementler goşulýar. Meselem, köp halatlarda arassa misiň deregine oňa galaýy, kremniý, fosfor, berilliý, hrom, magniý ýa-da kadmiý goşulan gaty garyndylar ulanylýar. Bu garyndylara бүрүнч diýilýär. Mise sink goşulyp alnýan garynda latun diýilýär. Arassa misiň mehaniki berklik çägi  $\sigma_p = 360 \text{ Mpa}$ . Emma elektrik geçirijiligi kän üýtgemezden berillili bronzanyň mehaniki berkligi  $\sigma_p = 1350 \text{ Mpa}$  ýetýär. Kadmiý bronzany seplesme simlerde we kollektor plastinkalary taýýarlamak üçin ulanylýar. Latun her dürli tok geçiriji şaýlary ýasamak üçin giňden ulanylýar. Alýuminiň esasyndaky garyndylara aldreýler diýilýär. Onuň düzümi 0,3-0,5%  $Mg$ , 0,4-0,7%  $Si$  we 0,2-0,3%  $Fe$  (galany  $Al$ ).

Arassa alýuminiň esasy häsiýetleri: berklik çägi  $\sigma_p = 160\text{--}170 \text{ Mpa}$ , süýnüjiligi  $\Delta l/l = 1,5\div 2\%$ , udel garşylygy  $\rho = 0,029 \text{ mkOm}\cdot\text{m}$ . Deňşdirmek üçin aldreýiň esasy häsiýetleri: berklik çägi  $\sigma_p = 350 \text{ Mpa}$ , süýnüjilik  $\Delta l/l = 6,5\%$ , udel garşylyk  $\rho = 0,0317 \text{ mkOm}\cdot\text{m}$ . Bu ýerden görnüşi ýaly, aldreýde mehaniki berklik iki esseden hem köp ulalýar. Udel garşylyk bolsa kän üýtgemeyär. 4.8-nji çyzgyda misiň udel elektrik geçirijiliginiň keseki garyndylaryň mukdaryna baglylygynyň grafikleri görkezilýär.



**4.8-nji çyzgy.** Misiň udel elektrik geçirijiliginiň keseki garyndylarynyň mukdaryna baglylygynyň grafikleri

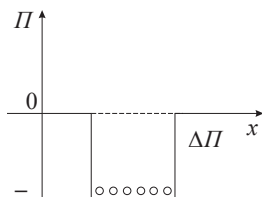
Çyzgydan görnüşi ýaly, misiň udel elektrik geçirijiligini fosfor, kremniý, demir, myşşak elementleri has güýçli peseldýär, sink, kadmiý, kümüş elementleri bolsa kän täsir etmeyär.

#### 4.4. Metallarda sepleşme potensiallaryň tapawudy.

##### Termoelektrik hereketlendiriji güýçler we termojübütler. Termojübütler üçin materiallar

**Metallarda sepleşme potensiallaryň tapawudy.** Metallarda sepleşme potensiallaryň tapawudynyň ýüze çykmasyňyň öwrenmek üçin ilki başda erkin elektronlaryň metaldan çykyş işini bilmeli. Belli bolşy ýaly, hemme metallarda kadaly temperaturada erkin elektronlar kristal gözeneginiň düwünlerinde ýerleşen položitel ionlaryň arasyn-da tertipsiz hereketde bolýarlar. Haçan-da elektronlar tertipsiz hereket etmek bilen metalyň daşyna çyksa, onda olara položitel ionlar tarypyndan çekişme güýji täsir edip, ol elektronlar metalyň içine çekiler. Şoňa görä metalyň içinde elektronlaryň potensial energiýasy onuň da-

şyndakysyndan pes bolýar. Şeýlelikde, metalyň üst çäginde potensial energiýa nola deň diýip hasap edilse, onda metalyň içinde elektronnyň potensial energiýasy otrisatel alamatly bolar. Şol ýagdaýda erkin elektronlar metalyň içinde çuňlugy  $\Delta\Pi$  deň bolan potensial çukurda ýerleşen ýaly bolýar (4.9-njy çyzgy).



#### 4.9-njy çyzgy. Metaldaky erkin elektronlar potensial çukurda

Onda ol elektronlaryň metaldan çykmagy üçin özüniň kinetik energiýasynyň hasabyna şol potensial çukuryň  $\Delta\Pi$  çuňlugyna deň bolan  $A_\phi$  iş etmeli bolýar, ýagny:

$$A_\phi = \Delta\Pi. \quad (4.27)$$

Ondan başga-da, käbir elektronlar metalyň daşyna çykyp, örän kiçi atom aralykda ( $10^{-10} \div 10^{-9}m$ ) saklanýar we ýuka «elektron buludyny» emele getirýär. Ol gatlak metalyň üstüne ýakyn položitel ionlar bilen tekiz kondensatora meňzeş ikileýin elektrik gatlagyny emele getirýär. Ol gatlagyň daşynda elektrik meýdany döremeýär. Şol gatlagyň  $\Delta\phi$  potensiallar tapawudyna potensialyň üst bökmesi ýa-da şol metalyň üst potensialy diýilýär. Şol ýagdaýda

$$\Delta\Pi = e\Delta\phi. \quad (4.28)$$

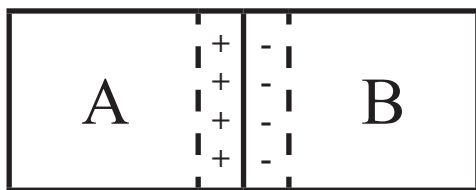
(4.27) we (4.28) formulalara görä alarys:

$$A_\phi = e\Delta\phi. \quad (4.29)$$

Şeýlelikde, elektronlaryň öz kinetik energiýasynyň hasabyna metalyň daşyna çykmak üçin ýerine ýetirmeli işiň iň kiçi mehaniki işiň bahasyna elektronyň metaldan çykyş işi diýilýär.  $A_\phi$  çykyş işi dürli metallarda we metal garyndylarda dürli bolýar. Şeýle hem ol metalyň üst ýagdaýlaryna hem bagly bolýar.

Öň bellenşi ýaly, dürli metallarda onuň dykyzlygyna we atom massasyna baglylykda erkin elektronlaryň konsentrasiýasy (elektron gazynyň basyşy) hem deň bolmaýar.

Goý,  $A$  we  $B$  metallar biri-birine seplesdirilen bolsun (4.10-njy çyzgy).



4.10-njy çyzgy.  $A$  we  $B$  metallaryň özara seplesmesi

Eger  $A$  metalda elektronlaryň  $A_\phi$  çykyş işi  $B$  metaldaky elektronlaryň  $A_\phi$  çykyş işinden kiçi bolsa we  $A$  metaldaky erkin  $n_A$  elektronlaryň sany  $B$  metaldakydan uly bolsa, onda seplesmede erkin elektronlar  $A$  metaldan  $B$  metala köp geçer. Netijede,  $A$  we  $B$  metallaryň seplesmesinde potensiallaryň tapawudy dörrär. Oňa seplesme potensiallarynyň tapawudy diýilýär. Metallaryň elektron nazaryýetine görä,  $A$  we  $B$  metallaryň seplesmesinde ýüze çykýan seplesme potensiallarynyň tapawudy aşakdaky formulalar bilen kesgitlenýär:

$$\begin{cases} U_{AB} = U_B - U_A + \frac{kT_1}{e} \ln \frac{n_{oA}}{n_{oB}}, \\ U_{AB} = U_A - U_B + \frac{kT_2}{e} \ln \frac{n_{oB}}{n_{oA}}, \end{cases} \quad (4.3)$$

bu ýerde  $U_A$  we  $U_B$  – seplesýän metallaryň potensiallary;

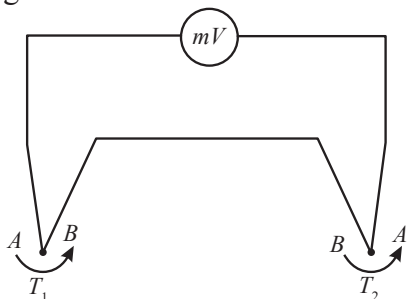
$k$  – Bolsmanyň hemişeligi;

$e$  – elektronyň zarýady;

$n_{oA}$  we  $n_{oB}$  –  $A$  we  $B$  metallarda elektronlaryň sany.

**Termoelektrik hereketlendiriji güýçler we termojübütler.**

Goý,  $A$  we  $B$  dürli metal simlerinden 4.11-nji çyzgyda görkezilen ýapyk zynjyr emele getirilen bolsun.



4.11-nji çyzgy. Termojübüdiň shemasy

Bu zynjyrd a sepleřmeleriň temperaturasy birmeňzeř bolsa, (4.4) formula esasynda potentsiallaryň tapawutlarynyň jemi nola deň bolýar. Emma sepleřmeleriň temperaturalary dürli bolsalar, onda sepleřmeleriň arasynda elektrikhereketlendiriji güýç döreýär. Oňa termoelektrik hereketlendiriji güýç diýilýär. Ony (4.4) formulanyň esasynda aşakdaky ýaly kesgitlemek bolar:

$$\begin{aligned}\varepsilon_T &= U_{AB} + U_{BA} = U_B - U_A + \frac{kT_1}{e} \ln \frac{n_{oA}}{n_{oB}} + U_A - U_B + \frac{kT_2}{e} \ln \frac{n_{oB}}{n_{oA}} = \\ &= \frac{k}{e} \ln \frac{n_{oA}}{n_{oB}} (T_1 - T_2) .\end{aligned}\quad (4.31)$$

Eger  $\frac{k}{e} \ln \frac{n_{oA}}{n_{oB}} = \alpha_T$  bilen bellenilse, onda

$$\varepsilon_T = \alpha_T (T_1 - T_2). \quad (4.32)$$

$\alpha_T$  berlen metallar jübüdi üçin hemişelik bolýar. Oňa termoelektrik hereketlendiriji güýjüň koeffisiýenti ýa-da differensial termoelektrik hereketlendiriji güýç diýilýär.

$$\alpha_T = \frac{\varepsilon_T}{T_1 - T_2}. \quad (4.33)$$

(4.32) formuladan görnüş i ýaly,  $\varepsilon_T$  termoelektrik hereketlendiriji güýç temperaturalaryň ( $T_1 - T_2$ ) tapawudyna bagly. Eger-de ikinji sepleřmäniň  $T_2$  temperaturasy hemişelik saklansa (meselem, buzly suwda), onda  $\varepsilon_T$  termoelektrik hereketlendiriji güýç (milliwoltmetriň görkezmesi) diňe birinji sepleřmäniň ýerleşen ýeriniň  $T_1$  temperaturasyyna bagly bolar. Şol esasyda işleýän gurluşlara termojübütler diýilýär. Olar dürli çäklerde temperaturany takyk ölçemäge mümkinçilik berýär.

**Termojübütler üçin materiallar.** Termojübütlerde uly termoelektrik hereketlendiriji güýç we termoelektrik hereketlendiriji güýjüň koeffisiýenti durnukly bolmaly. Termojübütleri ýasamak üçin aşakdaky splawlar ulanylýar:

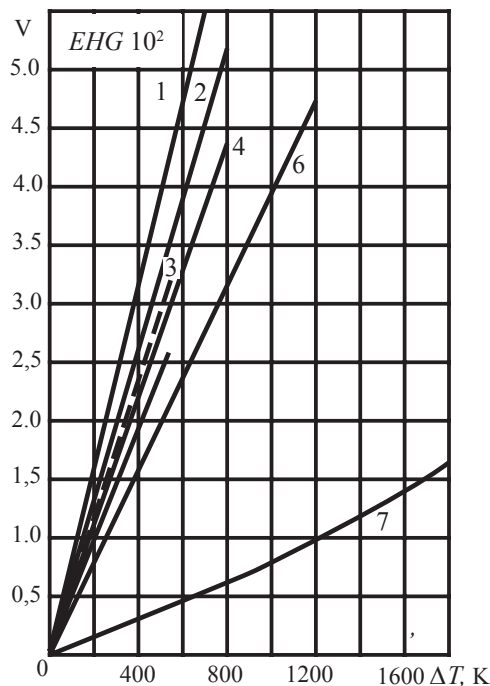
1. Kopel (56% Cu we 44% Ni);
2. Alýumel (95% Ni, galany Al, Si we Mg);
3. Hromel (90% Ni we 10% Cr);
4. Platinorodiý (90% Pt we 10% Rh).

Dürli termojübütleriň ölçeg çäkleri:

1. Platinorodiý – platina - 1600°C-e çenli;
2. Hromel – alýumel – 900 - 1000°C-e çenli;

Demir – konstantan, demir – kopel we hromel – kopel - 600°C;  
Mis – konstantan, mis – kopel - 350°C.

4.12-nji çyzgyda dürli termojübütler üçin termoelektrik hereketlendiriji güýjiň temperatura baglylygynyň grafikleri berilýär.



**4.12-nji çyzgy. Dürli termojübütlerde  $\varepsilon_T$  termoelektrik hereketlendiriji güýjiň temperatura baglylygynyň grafikleri**

## **4.5. Gyzgyna çydamly metallar.**

### **Sepleşme materiallar. Kebşirler we flýuslar**

**Gyzgyna çydamly metallar.** Birnäçe metallar özüniň ýokary ereme temperaturasy bilen tapawutlanýarlar. Materiallaryň gyzgyna çydamlylygy ilki başda ol materialyň ereme temperaturasyna bagly bolýar. Metallaryň arasynda ereme temperaturasy has ýokary bolan metallar aşakdaky 4.6-njy tablisada görkezilýär:

№	Metallar	Ereme tempe- raturasy, °C	Dykzlygy, kg/m <sup>3</sup>
1.	Hrom (Cr). . . . .	1850	7100
2.	Platina (Pt). . . . .	1770	21400
3.	Toriý (Th). . . . .	1850	11500
4.	Sirkoniý (Zr). . . . .	1860	6500
5.	Iridiý (Ir). . . . .	2350	22500
6.	Niobiý (Nb). . . . .	2410	8570
7.	Molibden (Mo). . . . .	2620	10200
8.	Tantal (Ta). . . . .	2850	16700
9.	Reniý (Re). . . . .	3180	20500
10.	Wolfram (W). . . . .	3380	19300

Bu metallar we olaryň gaty garyndylary elektrotehnikada, köplenç, sepleşme materiallar hökmünde ulanylýar. Olarda wolfram elektrik çyralarda gyzdyrylýan simler görnüşinde giňden ulanylýar.

**Sepleşme materiallar.** Sepleşme materiallary elektrotehnikada elektrik zynjyrlaryny ýazdyrýan ýa-da utgaşdyrýan elementlerde ulanylýar. Ol elementlerde iki metal geçirijileriň arasynda üzülýän we typýan sepleşmeler bolup biler. Uly tokly we ýokary naprýaženiýeli zynjyrlarda, sepleşmelerde ulanylýan geçirijiler ýokary ygtybarly bolmalydyr. Zynjyr ýazdyrylanda ýa-da birikdirilende ýüze çykýan elektrik duganyň täsiri bilen olar ýanmaly däl ýa-da eräp biri-birine kebşirlenmeli däl. Şoňa görä bu maksat üçin ilki başda gyzgyna çydamly arassa metallar ulanylýar. Köp halatlarda sepleşme materiallar hökmünde arassa metallardan başga metal garyndylary we metallary keramika hem ulanylýar. Meselem, giňden ulanylýan garyndy bolan Ag – CdO-nyň düzümindäki kadminiň oksidi massa görä 12–20% CdO bolmaly. Bu materialy turşadyjy atmosferada kümüş-kadmiý splawyny gyzdyryp alýarlar. Uly kuwwatly gurluşlarda üzülýän sepleşmeler hökmünde şu düzümler ulanylýar: Ag bilen Co, Ni, Cr, W, Mo we Ta; Cu bilen W we Mo; Au bilen W we Mo.

Typýan sepleşmeleriň materiallary sürtülmä durnukly bolmaly. Şol maksat bilen gaty mis, berilli bürünç, hem-de Ag – CdO ulanylýar. Elektrik maşynlaryň aýlanýan böleginde typýan kontaktlary almak üçin kömür çotkalar hyzmat edýär.



**Kebşirler.** Kebşirler metallary ýa-da metal garyndylary biri-biri bilen kebşirlenende ulanylýan ýöriteleşdirilen metal garyndylardyr. Kebşirleme iki metalyň ýa-da metal garyndylaryň arasynda mehaniki berk sep almak üçin ýa-da pes geçiş elektrik garşylykly hemişelik kontakt almak üçin ulanylýar. Kebşirlemede birleşdirilýän ýerler we kebşir gyzdyrylýar. Şonda kebşiriň ereme temperaturasy kebşirlenýän metallaryň ereme temperaturasyndan has pes bolany üçin ol ereýär, kebşirlenmeli metallar bolsa gaty halda bolýarlar. Ergin kebşir bilen gaty metalyň galtaşýan araçäginde çylşyrymly fiziki-himiki hadysalar bolup geçýär. Kebşir ergin halda metallary ölleýär we olaryň üstüne ýaýrap, kebşirlenmeli metallaryň araboşluklaryny doldurýar. Şonda kebşir kebşirlenmeli metalyň içine diffuziýa arkaly aralaşýar, metal bolsa bellibir mukdarda kebşirde ereýär. Netijede, metallaryň arasynda aralyk gatlak emele gelip, ol doňanda metallary biri-birine berk birleşdirýär.

Kebşirler iki topara bölünýär: ýumşak we gaty kebşirler. Ýumşak kebşirlere ereme temperaturasy  $400^{\circ}\text{C}$ -e çenli bolan kebşirler degişli. Gaty kebşirlere ereme temperaturasy  $500^{\circ}\text{C}$ -den ýokary bolan kebşirler degişlidir.

Birnäçe kebşirleriň umumylaşdyrylan häsiýetnamalary 4.7-nji tablisada berilýär.

4.7-nji tablisa

Kebşirleriň gör-nüşleri	Kebşirle-riň mar-kasy	Himiki düzümi	Ereme tempe-raturasy	Kebşirlenýän materiallar
1	2	3	4	5
Galaýy, gurşun kebşiri	ПОС-18 ПОС-90	Sn 18-90 %, Sb 0,15-2.5 %, Pb - galanlary	190-277	Mis we onuň galyndylary, küküş, sinklenen demir
Galaýy, gurşun, kadmiý kebşiri	ПОСК-47	Sn 47-50 %, Sb 32-36 %, Cd 17-18 %	145-180	Mis we onuň galyndylary, küküş
Galaýy, gurşun, küküş kebşiri	ПЦрК	Sn 30%, Pb 63% Cd 5%, Ag 2%	225	Şoňa meňzeş

1	2	3	4	5
Wudyň splawy	—	Sn 12,5%, Pb 25 %, Cd 11,5 % Bi 50 %	60,5	Pes temperatūra kebşirlenýän dürli materiallar
Galaýy, kadmiý we sink kebşirleri	—	Sn 40-55 % Cd 20%, Zn 25%, (Al 15%)	200-250	Alýumin we onuň splawlary

**Flýuslar.** Ýokary hilli kebşirleme almak üçin kebşirlerden başga kömekçi maddalar hem ulanylýar. Olara flýuslar diýilýär. Olar aşakdaky wezipeleri ýerine ýetirýär:

1. Kebşirlenýän metallaryň üstündäki hapalary eretmeli we arasalamaly.

2. Kebşirleme wagtynda kebşirlenýän metallaryň üstüni we ergin kebşiri turşamakdan goramaly.

3. Ergin kebşiriň üst dartylma güýjüni peseltmeli we kebşirlenýän üstleriň ergin kebşir bilen gowy öllenmesini gazanmaly.

Kebşirlenýän metallara edýän täsirlerine görä flýuslar birnäçe toparlara bölünýär:

1. Işjeň ýa-da kislotaly flýuslar. Olary taýýarlamak üçin duz kislotasy, metallaryň hlorly, fluorly birleşmeleri ulanylýar.

2. Kislotasyz flýuslar. Kanifol we spirtiň, gliseriniň esasynda taýýarlanylýan flýuslar şeýle atlandyrylýar.

3. Işjeňleşdirilen flýuslar. Kanifola az mukdarda duz turşuly, fosfor turşuly anilin we dietilamin goşulyp taýýarlanylýar.

4. Poslama durnukly flýuslar. Bu flýuslar fosfor kislotasynyň üstüne dürli organiki birleşmeleri we eredijileri goşmak bilen taýýarlanylýar. Şeýle hem organiki kislotalaryň esasynda alynýan flýuslardyr.

## 4.6. Metal däl geçirijiler

**Elektrokömür geçirijiler.** Metal däl gaty geçirijileriň arasynda elektrotehnikada has giňden ulanylýanlary uglerodyň esasynda alynýan elektrokömür geçirijilerdir. Kömürden elektrik maşynlaryň çotkalary, prožektorlar üçin elektrodlar, dugaly elektrik peçler üçin we elektro-

lit wannalar üçin elektrodlar, galwaniki elementleriň anody taýýarlanylýar. Kömür külkeleri mikrofonlarda ses tolkunlarynyň täsiri bilen üýtgeýän garşylyklar, kömürden ýokary garşylykly rezistorlar, telefon torlary üçin zaryadsyzlandyryjylar we ş.m. taýýarlanylýar.

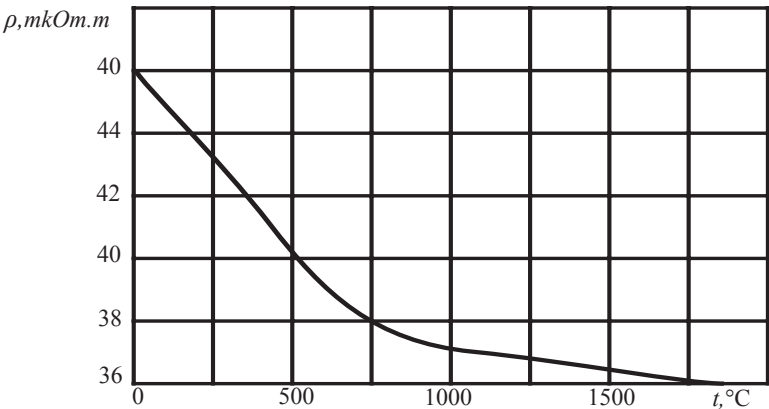
Elektrokömür öndürmekde çig mal hökmünde gurumy, grafiti ýa-da antrasiti ulanmak bolýar. Steržen elektrodлары ovradylan kömri, daşkömür smolasyny ýa-da suwuk aýnany baglaşdyryjy komponent hökmünde ulanylyp, preslenip alynýar. Çylşyrymly şekilli harytlar degişli presformalarda gyzgyn preslenip taýýarlanylýar. Ýokary temperaturalarda uglerodyň grafitе emeli geçmesi ýüze çykýar. Şonuň üçin ol hadysa grafitirleme hem diýilýär.

Elektrik maşynlary üçin adaty çotkalar, takmynan, 800°C-de bişirilýär. Grafitirlenen çotkalar bolsa bişirilende 2200°C-e çenli gyzdyrylýar. Kömür elektrodларыň esasy häsiýetleri 4.8-nji tablisada berilýär.

4.8-nji tablisa

Elektrodларыň görnüşleri	$\rho, mkOm$	Dykyzlyk, $mg/m^3$	Süýnmäge berklik çägi	Gysylma berklik çägi
Kömür	50	1,5	700-1100	2300-4100
Grafit	15	2,0	600-700	200-500

Kömür elektrodlarda hem beýleki kömür harytlar ýaly, udel garşylygyň temperatura koeffisiýenti otrisatel bolýar. Ol 4.13-nji çyzgydan görünýär.



4.13-nji çyzgy. Kömür elektrodda udel garşylygyň temperatura baglylygy



## 5.1. Ýarymgeçiriji materiallar barada umumy maglumatlar. Ýarymgeçiriji häsiýetli elementler we çylşyrymly ýarymgeçirijiler. Hususy ýarymgeçirijiler

**Ýarymgeçiriji materiallar barada umumy maglumat.** Kadaly temperaturalarda elektron elektrik geçirijilikli maddalaryň birnäçesinde udel garşylyk metal geçirijileriňkiden ýokary, emma dielektrikleriňkiden bolsa pes bolýar. Şeýle maddalar ýarymgeçirijilere degişli bolýar (5.1-nji tablisa).

5.1-nji tablisa

**Elektrotehniki materiallaryň 20°C temperaturada we hemişelik naprýaženiýede udel garşylygy**

Materiallar	$\rho$ , $Om \cdot m$	$\alpha_p$ -nyň alamaty	Elektrogeçirijilik tipi
Geçirijiler	$10^{-8} - 10^{-5}$	položitel	elektron
Ýarymgeçirijiler	$10^{-6} - 10^{+8}$	otrisatel	elektron
Dielektrikler	$10^{+7} - 10^{+16}$	otrisatel	ion we elektron

Ýarymgeçirijileriň elektrogeçirijiligi köp mukdarda daşky energetiki täsirlere we örän az mukdarda dürli keseki garyndylara bagly bolýar. Ýarymgeçirijileriň elektrik geçirijiligini temperatura, ýagtylyk, elektrik meýdany we mehaniki täsirler bilen dolandyrmak mümkinçilikleri termorezistorlaryň, fotorezistorlaryň, waristorlaryň, tenzorezistorlaryň we ş.m.-leriň esasyňy düzýärler.

Ýarymgeçirijilerde iki görnüşli elektrik geçirijiligiň ( $n$ -elektron görnüşli we  $p$ -elektron-deşijek görnüşli) bolmagy, dürli kuwwatly göneldijileri, güýçlendirijileri we generatorlary taýýarlamaga mümkinçilik berýär. Ýarymgeçiriji ulgamlar dürli görnüşli energiýany elektrik energiýasyna öwürmek üçin giňden ulanylýar. Bu hilli özgerdijilere gün batareýalary we termoelektrik generatorlary mysal bolup biler.

Ýarymgeçiriji abzallar (özgerdijiler) ölçege tehnikasynda hem giňden ulanylýar. Meselem, Holluň özgerdijilerini (datçikleri), ýagtylyk diodlary (swetodiodlary), ýagtylyk signallary almak üçin giňden ulanylýar.

**Ýarymgeçiriji häsiýetli elementler we çylşyrymly ýarymgeçirijiler.** Ähli ulanylýan ýarymgeçirijileri iki topara bölmek bolýar:

1. Ýönekeý ýarymgeçirijiler;
2. Çylşyrymly ýarymgeçirijiler.

Ýönekeý ýarymgeçirijiler himiki düzümi boýunça bir elementden durýar. Çylşyrymly ýarymgeçirijiniň himiki düzümine iki we ondan hem köp elementler girýär. Ýarymgeçiriji häsiýetli elementler 5.2-nji tablisada berilýär.

5.2-nji tablica

№	Elementler	Mendeleyewiň tablasyndaky toparlar	Gadagan zolagyň giňligi, eV
1	Bor	III	1,1
2	Kremniý	IV	1,12
3	Germaniý	IV	0,72
4	Fosfor	V	1,5
5	Myşyak	V	1,2
6	Kükürt	VI	2,5
7	Selen	VI	1,70
8	Tellur	VI	0,36
9	Ýod	VII	1,26

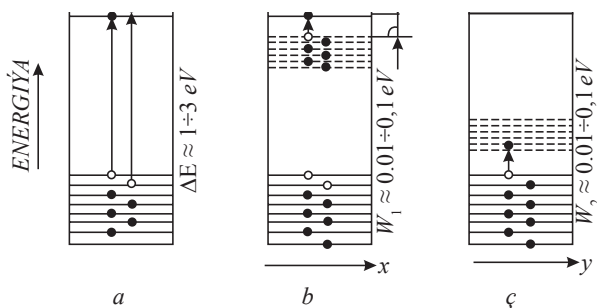
Bu tablisadan görnüşi ýaly, dokuz element ýarymgeçirijilere degişli. Olardan durmuşda has giňden ulanylýanlary kremniý, germaniý we has seýrek ulanylýany selendir.

Çylşyrymly ýarymgeçirijilere aşakdaky ýaly himiki birleşmeler mysal bolup biler:  $A^{IV}B^{IV}$  (meselem, SiC),  $A^{III}B^V$  (InSb, GaAs, GaP),  $A^{II}B^{VI}$  (CdS, ZnSe) we  $A^{II}B^{IV}C_2^V$  (CdSnAs<sub>2</sub>, ZnGeP<sub>2</sub>). Çylşyrymly ýarymgeçirijilere ýokarda görkezilen himiki birleşmeleriň arasynda emele gelýän gaty garyndylar hem degişlidir. Ýarymgeçiriji materiallardan taýýarlanylýan abzallaryň aşakdaky ýaly artykmaçlyklary bar:

1) uzak hyzmat edijilik; 2) kiçi göwrümlü we kiçi massaly; 3) ýönekeý gurluş we ygtybarlylyk; 4) toplumlaýyn önümçilikde ykdysady amatlylyk.

Soňky wagtlarda gaty jisimleriniň elektronikasynyň ösmegi ylymda, tehnikada we lukmançylykda giňden ulanylýan ýarymgeçirijili mikroelektronikanyň ýüze çykmagyna we ösmegine getirdi. Bu bolsa önümçiligi awtomatiki dolandyrmaga ýol açdy.

**Hususy ýarymgeçirijiler.** Öz düzüminde elektrik geçirijilige täsir edip bilýän keseki garyndylary bolmadyk ýarymgeçirijilere hususy ýarymgeçirijiler diýilýär. I bapda bellenişi ýaly, ýarymgeçirijiler zolak gurluşyna görä dielektrikler we metallar bilen deňeşdirilende, uly bolmadyk gadagan zolaklaryň giňligi bilen tapawutlanýarlar. Garyndysyz hususy ýarymgeçirijiniň zona gurluşy 5.1-nji a çyzgyda görkezilýär.



**5.1-nji çyzgy.** Ýarymgeçirijileriň zona gurluşy. *a* – hususy ýarymgeçiriji; *b* – donor garyndyly *n*-görnüşli ýarymgeçiriji; *ç* – akseptor garyndyly *p*-görnüşli ýarymgeçiriji

5.2-nji tablisadan görnüşi ýaly, ýönekeý ýarymgeçirijilerde gadagan zolagynyň giňligi  $\Delta E = 0,3 \div 1,5 \text{ eV}$  aralykda bolýar. Hususy ýarymgeçirijilerde elektronlar erkin zolak (geçirijilik zolak) diňe doldurylan zolakdan (walent zolakdan) geçirilip bilner. Belli bir  $T$  temperaturada elektronlar bilen doldurylan walent zolakdan birnäçe elektronlar (olarýň ýylylyk energiýasy  $KT \geq \Delta E$  bolanda) erkin zolaga geçip bilýär. Eger bu geçen elektronlaryň sanyny  $n_{oi}$  bilen bellesek, onda walent zolakda şonça boş ýerler emele gelýär. Emele gelýän boş ýerler elektrik zarýady elektronýň zarýadyna deň, alamaty položitel bolan zarýadlanan bölejikler ýaly özlerini alyp barýarlar. Olara «deşijekler» diýilýär. Walent zolakda emele gelen deşijekleriň sanyny  $p_{oi}$  bilen bellesek, onda hususy ýarymgeçirijide aşakdaky deňlikler bolmaly:

$$n_{0i}=p_{0i}; n_{0i}+p_{0i}=2n_{0i}. \quad (5.1)$$

Şeýlelikde, hususy ýarymgeçirijide elektrik geçirijilik, daşky elektrik meýdanyň täsiri bilen, geçirijilik zolagyndaky  $n_{0i}$  erkin elektronlaryň we walent zolagynda emele gelen  $p_{0i}$  deşijekleriň ugrukdyrylan hereketleri bilen amala aşyrylýar.

Şoňa görä, hususy ýarymgeçirijilerde udel elektik geçirijilik aşakdaky formula bilen kesgitlenilýär:

$$\gamma = n_{0i} e u_n + p_{0i} e u_p, \quad (5.2)$$

bu ýerde  $e=1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Kl}$  – elektronlaryň we deşijekleriň elektrik zarýady;  $u_n$  we  $u_p$  – elektronlaryň we deşijekleriň hereketlenijiligi;

Bilşimiz ýaly, hemme materiallarda zarýad göterijileriň hereketlenijiligi

$$u = \frac{\overline{g}}{E}; \left[ \frac{m^2}{V \cdot \text{sek}} \right] \quad (5.3)$$

formula bilen kesgitlenýär. Bu ýerde:  $E$  – materiala täsir edýän elektrik meýdanyň güýjenmesi;  $\overline{v}$  – zarýad göterijileriň ugrukdyrylan hereketiniň orta tizligi.

Tejribeleriň görkezmegine görä, (5.2) formuladaky  $u_n$  we  $u_p$  biri-birine deň bolmaýar. Sebäbi elektronlar we deşijekler kristal gözeneginiň meýdanynda hereket edenlerinde olaryň inertiligi, ýagny olaryň  $m_n^*$  we  $m_p^*$  täsir effektiw massalary dürli bolýar. Köplenç ýagdaýlarda  $m_n^* < m_p^*$ . Şonuň üçin hususy ýarymgeçirijilerde elektrik geçirijilik gowşak elektron häsiýetde bolýar.

Ýarymgeçirijilerde geçirijilik zolaga geçen elektronlaryň ýene walent zolaga gaýdyp, deşijekler bilen birleşmesi (neýtrallaşmasy) bolup geçýär. Bu hadysa «rekombinasiýa» diýilýär. Rekombinasiýa netijesinde elektronlaryň  $n_{0i}$  we deşijekleriň  $p_{0i}$  sanlary kemelýär. Islendik bellibir temperaturada oýandyрма we rekombinasiýa hadysalarynyň netijesinde ýarymgeçirijide oýandyrylan elektronlaryň we deşijekleriň deňagramlaşan sany ýüze çykýar. Şol deňagramlaşan ýagdaýda:

$$\begin{cases} n_{0i} = 2N_g e^{-\frac{\Delta E}{2KT}}, \\ p_{0i} = 2N_w e^{+\frac{\Delta E}{2KT}}. \end{cases} \quad (5.4)$$

bu ýerde  $\Delta E$  – gadagan zolagynyň giňligi;  $K$  – Bolsmanyň hemişeligi;  $N_g$  – ýarymgeçirijiniň geçirijilik zolagynda göwrüm birligindäki energetik derejeleriň sany;  $N_w$  – ýarymgeçirijiniň walent zolagynda göwrüm birligindäki energetik derejeleriň sany.

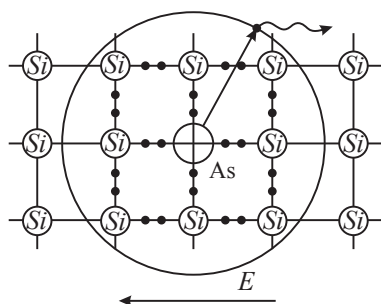
Bu formulalarda 2-lik koeffisiýent her bir energetik derejede iki elektronyň bolup biljekdigini görkezýär.

## **5.2. Garyndyly ýarymgeçirijiler. Donor we akseptor garyndylar. Geçirijiligiň görnüşleri. Garyndy atomlaryň energetiki derejeleri. Geçirijiligiň görnüşlerini kesgitlemegiň termoelektrik hereketlendiriji güýç usuly**

**Garyndyly ýarymgeçirijiler.** Ýarymgeçiriji abzallarda ulanylyan materiallar, köplenç, garyndyly ýarymgeçirijilerdir. Ýönekeý ýarymgeçirijilerde garyndy bolup, keseki elementleriň atomlary hyzmat edýär. Emma çylşyrymly ýarymgeçirijilerde, keseki atomlardan başga, himiki düzümiň bozulmasy hem garyndynyň wezipesini ýerine ýetirip bilýär. Ondan başga-da kristal gözeneginiň dürli şikesleri: düwünleriň arasyna giren atomlar, boş düwünler, mikromoýlar we ş.m. garyndy bolup bilerler (*1.7-nji çyzga seret*). Eger-de garyndy atomlar kristal gözeneginiň düwüninde ýerleşen bolsa, onda olara «çalşyрма» garyndylar diýilýär. Eger-de garyndy atomlar kristal gözeneginiň düwünleriniň arasynda ýerleşen bolsa, onda olara «ara girýän» garyndylar diýilýär.

**Donor we akseptor garyndylar. Geçirijiligiň görnüşleri.** Ýönekeý ýarymgeçirijiler germaniý (Ge) we kremniý (Si) Mendeleyewiň tablisasynda IVA topara degişli bolup, olaryň almazyňka meňzeş kristal gurluşlary bolýar. Olaryň gurluşynda her atom beýleki dört atomlar bilen gurşalyp, dört ugur boýunça atomlaryň arasynda kowalent baglanyşyk emele gelýär. Eger-de dört walentli germaniýiň ýa-da kremniýiň atomy baş walentli myşýagyň atomy bilen çalşyrylsa, onda dört ugur boýunça kowalent baglanyşyk emele gelende garyndy atomyň bir walent elektrony artykmaçlyk eder (*5.2-nji çyzgy*).

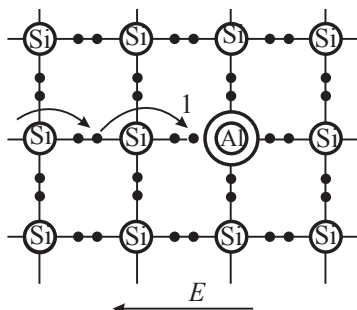




### 5.2-nji çyzgy. Kremniniň kristalynda donor garyndyly mysşak atomynyň ýerleşşi

Bu artykmaç elektron özüniň *As* atomy bilen has gowşak baglanyşykda bolmak bilen has kiçi  $\Delta\varepsilon_d \ll \Delta E$  daşky energiýanyň täsiri netijesinde geçiriji zolaga geçip bilýär. Şeýlelikde, bu garyndyly ýarymgeçirijide geçiriji zolakdaky erkin elektronlaryň konsentrasiýasy walent zolakdaky deşijekleriň  $p_i$  sanyndan has uly bolar, ýagny hususy ýarymgeçirijidäki  $p_i = n_i$  deňlik bozulyp,  $n_i \gg p_i$  deňsizlik ýüze çykar. Şeýle ýagdaýda ýarymgeçirijide esasy zaryad göterijiler elektronlar bolýar we ol ýarymgeçirijilere *n*-görnüşli ýarymgeçirijiler diýilýär. Ýarymgeçirijilerde erkin elektronlaryň konsentrasiýasyny ulaldýan garyndylara donor garyndylar diýilýär. Diýmek, çalyşýan garyndylaryň *donor garyndy* bolmagy üçin onuň walentligi ýarymgeçirijiniň walentliginden uly bolmaly. Meselem, dört walentli germanide we kremnide baş walentli As, P, Sb elementler donor garyndyly bolýarlar.

Goý, indi kremniniň kristalynda bir atom üç walentli alýuminiň atomy bilen çalşyrylan bolsun (5.3-nji çyzgy).



### 5.3-nji çyzgy. Kremniniň kristalynda akseptor garyndyly atomyň ýerleşşi

Onda dört ugur boýunça kowalent baglanyşygyň emele gelmegi üçin bir walent elektron ýetmeýär. Bu boş ýere örän az  $\Delta\epsilon_a \ll \Delta E$  energiýanyň sarp edilmegi bilen walent zolakdan bir elektron geçip bilýär. Diýmek, garyndy alýumin atomlara sanynyň köpelmegi bilen walent zolakdan elektronlaryň garyndy atomlara geçmesi hem köpeler. Netijede, walent zolakda deşijekleriň  $p_i$  sany köpeler we  $p_i > n_i$  deňsizlik ýüze çykyp, ol ýarymgeçirijide esasy zarýad göterijiler deşijekler bolar. Şeýle ýarymgeçirijilere  $p$ -görnüşli ýarymgeçirijiler diýilýär. Ýarymgeçirijilerde deşijekleriň sanyny köpeldýän garyndylara *akseptor* garyndylar diýilýär. Yokarda görkezilişi ýaly, çalyşýan garyndylaryň *akseptor* garyndy bolmagy üçin onuň walentligi ýarymgeçirijiniň walentliginden kiçi bolmaly. Meselem, germanide we kremnide Zn, Ga, In akseptor garyndy bolýar.

Kowalent baglanyşykly çylşyrymly ýarymgeçiriji häsiýetli himiki birleşmelerde, meselem,  $A^{III}B^V$  tipli (InSb, GaAs, InAs) birleşmelerde, adatça, II toparyň elementleri (Mg, Zn) III toparyň elementlerini çalşyrmak bilen akseptor garyndy bolýar. Emma VI toparyň elementleri (Se, Te) V toparyň elementlerini çalşyrmak bilen donor garyndy bolýarlar. IV toparyň elementleri  $A^{III}B^V$  ýarymgeçiriji birleşmede donor ýa-da akseptor garyndy bolup bilýär. Eger ol elementiň atomy  $A^{III}$  elementiň ýerinde ýerleşse – donor, emma  $B^V$  elementi çalyşsa – akseptor garyndy bolýar.

Kristal gözenegi almaz görnüşli ýarymgeçirijilerde düwünleriň arasyna girýän garyndy atomlaryň özüni alyp barsy has çylşyrymly bolýar. Şeýlelikde, olaryň donor ýa-da akseptor garyndy bolmagy ol garyndy atomyň ölçegine we elektrootrisatelligine bagly bolýar. Meselem, I topardan litiý germaniniň kristalynda düwünleriň arasynda ýerleşip donor garyndy bolup hyzmat edýär. VI topardan kislorod akseptor garyndy bolup hyzmat edýär. Onuň sebäbi aşakdaky ýaly düşündirilýär.

Uly diametrli litiniň atomy biri-birine ýakyn ýerleşen germaniniň atomlarynyň arasyna girmek üçin özüniň daşky bir walent elektronyny aňsatlyk bilen boşadyp ionlaşýar. Soňra ol düwünleriň arasynda ýerleşýär. Ondan aýrylan elektron bolsa  $n$ -görnüşli elektrogeçirijiligi döredýär. Kiçi ölçegli we uly elektrootrisatelli kislorodyň atomy Ge we Si-niň kristallarynda düwün aralykda ýerleşmek bilen ýarymgeçirijiden bir elektroony çekip alýar. Netijede,  $p$ -görnüşli elektrogeçirijiligi ýüze çykýar.

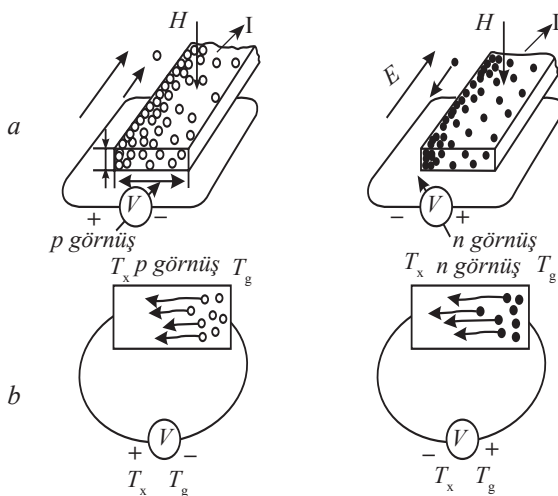
**Garyndy atomlaryň energetiki derejeleri.** Garyndy atomlaryň  $N$  sanynyň köp bolmadyk ýagdaýlarynda olar ýarymgeçirijiniň kristal gözeneginde biri-birinden daş aralykda ýerleşip, özara täsirleşmeýär-

ler. Şonuň üçin olaryň energetik derejeleri aýratyn erkin atomyňky ýaly diskret bolýarlar. Elektronlaryň bir garyndy atomdan beýleki garyndy atoma geçme ähtimallygy örän pes bolýar.

Daşky faktorlar (ýylylyk, ýagtylyk) täsir etmese donor garyndy atomlaryň doldurylan energetiki derejeleri gadagan zolagyň içinde geçirijilik zolagyň «düybünden»  $\Delta\varepsilon_d$  aralykda ýerleşýär (5.1-nji b çyzgy).  $\Delta\varepsilon_d$  – energiýa şol donor atomyň ionlaşma energiýasy diýilýär. Ol gadagan zolagyň  $\Delta E$  giňliginden has kiçi bolýar, ýagny  $\Delta\varepsilon_d \ll \Delta E$ . Şonuň üçin elektronlar donor garyndy atomlardan geçirijilik zolaga has pes temperaturalarda geçip başlaýarlar.

Akseptor garyndy atomlaryň doldurylmadyk energetik derejeleri ýarymgeçirijiniň gadagan zolagynyň içinde walent zolagyň «depesinden»  $\Delta\varepsilon_a$  aralykda ýerleşýär.  $\Delta\varepsilon_a$  – energiýa akseptor garyndy atomlaryň ionlaşma energiýasy diýilýär. Ol hem  $\Delta E$ -den has kiçi, ýagny  $\Delta\varepsilon_a \ll \Delta E$ . Şonuň üçin ilki başda ýylylyk oýandyrma başlananda, elektronlar walent zolaklardan akseptor atomlaryň doldurylmadyk derejelerine geçip başlaýarlar.

**Geçirijiligiň görnüşini kesgitlemegiň termoelektrik hereketlendiriji güýç usuly.** Termoelektrik hereketlendiriji güýç usulynyň shemasy 5.4-nji b çyzgyda görkezilýär.



**5.4-nji çyzgy.** Ýarymgeçirijileriň geçirijiligiň görnüşini kesgitlemegiň usullary: a – Holluň effekti bilen; b – termoelektrik hereketlendiriji güýç usuly bilen

Ýarymgeçirijileriň geçirijiliginiň görnüşini kesgitlemegiň iň ýönekeý usuly termoelektrik hereketlendiriji güýç usulydyr.

Belli bolşy ýaly,  $p$  görnüşli ýarymgeçirijilerde esasy zarýad göterijiler položitel zarýadlanan deşijekler bolýar. Eger 2.5-nji b çyzgydaky ýaly,  $p$  görnüşli ýarymgeçiriji nusgalygyň bir uýy gyzdyrylsa, ondaky erkin deşijekler diffuziýa arkaly sowuk uja geçip başlar. Netijede, nusgalygyň sowuk ujunda položitel zarýadlaryň artykmaçlygy, gyzgyn uçada bolsa otrisatel zarýadlaryň artykmaçlygy ýüze çykyp, ol uçlaryň arasynda termoelektrik hereketlendiriji güýç dörrär we ol uçlara birikdirilen milliwoльтmetriň peýkamýa saga gyşarar. Eger-de şol bir tejribe  $n$  görnüşli ýarymgeçirijide gaýtalansa, otrisatel zarýadlanan elektronlaryň gyzgyn uçdan sowuk uja diffuziýa arkaly geçmesi netijesinde ýüze çykýan termoelektrik hereketlendiriji güýçleriň alamaty otrisatel bolup, milliwoльтmetriň peýkamýa çepi gyşarar. Şeýlelikde, ýarymgeçirijide ýüze çykýan termoelektrik hereketlendiriji güýçleriň alamaty esasynda ol ýarymgeçirijiniň geçirijiliginiň görnüşini kesgitlep bolýar.

### 5.3. Ýarymgeçirijilerde Holluň effekti we onuň kömegi bilen geçirijiligiň görnüşini, zarýad göterijileriň sanyny we hereketlenijiligini kesgitlemek

**Ýarymgeçirijilerde Holluň effekti.** Ýarymgeçirijilere bir wagtda elektrik we magnit meýdanlaryň täsir etmeginde ýüze çykýan fiziki hadysalara galwanomagnit effektlere diýilýär. Holluň effekti olaryň esasyalarynyň biridir.

Goý, ini  $x$  we galyňlygy  $h$  bolan parallelopiped şekilli ýarymgeçirijiniň üstünden  $I$  hemişelik tok aksyn we ol ýarymgeçirijiniň geçirijiligi  $p$  görnüşli bolsun. Eger bu nusga 5.4-nji a çyzgydaky ýaly magnit meýdany täsir etse  $\vec{B} \perp \vec{T}$  ýa-da  $\vec{H} \perp \vec{T}$ , onda  $I$  toguň ugruna hereket edýän položitel zarýadlanan deşijeklere Lorens güýji täsir eder:

$$F_L = eBv_{or} \sin 90^\circ = eBv_{or}, \quad (5.5)$$

bu ýerde  $e$  – deşijekleriň zarýady;  $B$  – magnit meýdanyň induksiýasy;  $v_{or}$  – deşijekleriň ugrukdyrylan hereketiniň orta tizligi.

Täsir edýän ugry «çep el» düzgüni bilen kesgitlenýän Lorensiň  $F_L$  güýjüniň täsiri bilen položitel deşijekler çep gapdala tarap gyşarar. Netijede, nusganyň çep tarapynda položitel zarýadlaryň artykmaçlygy, oňa garşydaş sag gapdala bolsa, otrisatel zarýadlaryň artykmaçlygy ýüze çykýar. Netijede, nusgada keseleýin  $E_H$  elektrik meýdany we  $\varepsilon_H$  elektrik hereketlendiriji güýç döreýär. Bu hadysa Holluň efekti diýilýär. Holluň elektrik hereketlendiriji güýji  $\varepsilon_H$  we  $E_H$  güýjenme özara baglanyşykly, ýagny

$$E_H = \frac{\varepsilon_H}{x}. \quad (5.6)$$

Keseleýin  $E_H$  elektrik meýdanyň ýüze çykmagy bilen deşijeklere Lorens güýjünden başga

$$F_E = eE_H = e \frac{\varepsilon_H}{x} \quad (5.7)$$

elektrostatik güýç hem täsir edýär. Şonda  $F_L$  we  $F_E$  güýçler biri-birine ters ugrukdyrylan bolýar. Haçanda bu güýçler biri-birine deňleşseler, onda zarýad göterijileriň gyşarmasy kesilýär. Şol ýagdaýda  $F_L = F_E$  ýa-da  $eBv_{or} = e \frac{\varepsilon_H}{x}$ . Bu ýerden alarys:

$$\varepsilon_H = Bv_{or}x. \quad (5.8)$$

$p$  görnüşli ýarymgeçirijide  $I$  tok güýji

$$I = j \cdot S = pev_{or}xh, \quad (5.9)$$

bu ýerde  $S = x \cdot h$  – nusgalygyň kese-kesiginiň meýdany.

Onda (5.9) formuladan alarys:

$$v_{or} = \frac{I}{pexh}. \quad (5.10)$$

(5.8) we (5.10) formulalaryň esasynda

$$\varepsilon_H = \frac{I}{pexh} \cdot Bx = \frac{1}{pe} \cdot \frac{IB}{h} = R_H \cdot \frac{IB}{h}. \quad (5.11)$$

Şol usula meňzeşlikde  $n$  görnüşli ýarymgeçirijiler üçin hem aşakdaky formulany alarys:

$$\varepsilon_H = \left( -\frac{1}{ne} \right) \cdot \frac{IB}{h} = R_H \cdot \frac{IB}{h}. \quad (5.12)$$

(5.11) we (5.12) formulalara  $p$  görnüşli we  $n$  görnüşli ýarymgeçirijiler üçin Holluň elektrik hereketlendiriji güýçleriniň formulasy diýilýär. Olardaky  $R_H = \frac{1}{pe}$  ýa-da  $R_H = \frac{1}{ne}$  koeffisiýente Holluň koeffi-

siýenti diýilýär. Onuň ölçeg birligi  $\frac{m^3}{Kl}$ . Has takyk hasaplamalarda  $p$  görnüşli we  $n$  görnüşli ýarymgeçirijilerde Holluň koeffisiýenti:

$$R_H = \frac{A}{pe} \text{ ýa-da } R_H = \frac{A}{ne}. \quad (5.13)$$

Köpeldiji  $A$  zarýad göterijileriň sanyna we dargama mehanizmine baglylykda birden ikä çenli üýtgap bilýär. Meselem, germaniý üçin  $A=1,18$ .

(5.12) formuladan görnüşi ýaly, Holluň  $R_H$  koeffisiýentiniň almaty ýarymgeçirijiniň geçirijiligiň görnüşine bagly. Diýmek, Holluň effekti hem termoelektrik hereketlendiriji güýç usuly ýaly geçirijiligiň görnüşini kesgitlemegiň bir usuly bolup hyzmat edýär.

**Zarýad göterijileriň sanyny we hereketlenijiligini kesgitlemek.** Ýarymgeçirijilerde bir görnüşli geçirijilik ( $n$  görnüşli ýa-da  $p$  görnüşli) bolanda udel elektrogeçirijilik:

$$\begin{cases} \gamma = n_0 eu_n; (n - \text{görnüşli}), \\ \gamma = p_0 eu_p; (p - \text{görnüşli}). \end{cases} \quad (5.14)$$

Şeýle ýarymgeçirijilerde Holluň koeffisiýentiniň  $R_H$  kömeği bilen zarýad göterijileriň sanyny kesgitläp bolýar. Hakykatdan hem koeffisiýent  $A \approx 1$  hasap edilse, ( $n$  we  $p$ -niň uly bahalarynda)  $n$  görnüşli we  $p$  görnüşli ýarymgeçiriji üçin (5.8), (5.10) deňliklerden

$$\begin{cases} n = \frac{|R_H|}{e}; [m^{-3}] \\ p = \frac{R_H}{e}; [m^{-3}] \end{cases} \quad (5.15)$$

formulalar alynýar.

Eger berlen ýarymgeçirijide bir wagtyň özünde  $R_H$  bilen  $\gamma$  udel elektrik geçirijilik hem ölçenen bolsa, onda zarýad göterijileriň  $u_p$  we  $u_n$  hereketlenijiligini hem kesgitläp bolýar. Hakykatdan hem koeffisiýent  $A=1$  hasap edilende (5.13) we (5.14) formulalardan alarys:  $n$  görnüşli ýarymgeçiriji üçin:

$$\gamma = n_0 eu_n = \frac{u_n}{R_H}; \text{ bu ýerden } u_n = |R_H| \gamma \quad (5.16)$$

$p$  görnüşli ýarymgeçiriji üçin:

$$\gamma = p_0 eu_p = \frac{u_p}{R_H}; \text{ bu ýerden } u_p = R_H \gamma \quad (5.17)$$

Bu ýerden görnüşi ýaly, ýarymgeçirijilerde bir wagtda udel elektrik geçirijiligi we Holluň effekti derňemek ol materialyň geçirijiliginiň görnüşi, esasy zarýad göterijileriniň sanyny we olaryň hereketlenijiligini kesgitlemäge, şeýle hem ol ýarymgeçirijä ilkinji baha bermäge mümkinçilik berýär. Şonuň üçin bu usullar we derňewler ýarymgeçiriji tehnikaşynda giňden ulanylýar.

Holluň effekti diňe ýarymgeçirijileriň esasy parametrlerini kesgitlemäge hyzmat etmän, eýsem, ol ölçeg tehnikaşynda we awtomatikaşynda giňden ulanylýan Holluň özgerdijileriniň (teslometriň, modulýatoryň we ş.m) hem esasy düzýär.

**Iki görnüşli zarýad göterijili ýarymgeçirijiler.** Ýokarky alnan formulalar we düşüňjeler  $n$  görnüşli ýa-da  $p$  görnüşli ýarymgeçirijilere degişlidir. Olarda esasy däl zarýad göterijileriň sany esasyalaryň sany bilen deňeşdirilende örän ujypsyz kiçi hasap edilýär. Eger-de esasy däl zarýad göterijileriň sany köp bolup, magnit meýdanynda ýerleşdirilen ýarymgeçirijide olar bölejikleriň hereketine aýyk täsir edip başlasalar, onda zarýad göterijileriň iki görnüşini hem hasaba almak zerurdyr. Zarýad göterijileriň iki görnüşini hem hasaba alnanda Holluň koeffisiýentini hasaplamak çylşyrymlaşýar:

$$R_H = -\frac{A}{e} \cdot \frac{n(u_n / u_p)^2 - p}{[n(u_n / u_p) + p]^2}. \quad (5.18)$$

Eger bu formulada  $n=0$  ýa-da  $p=0$  hasap edilse, onda (5.18) formuladan (5.13) formula alnar. Germanide we kremnide  $p$  görnüşli nusgalykda pes temperaturalarda  $R_H$  Holluň koeffisiýenti ilki položitel bolýar. Soňra temperaturanyň ýokarlanmagy bilen bellibir temperaturada  $pu_p^2 = nu_n^2$  şertinde kompensasiýa haly ýüze çykyp, Holluň koeffisiýenti otrisatel alamaty alýar. Sebäbi germanide we kremnide elektronlaryň  $u_n$  hereketlenijiligi deşijegiň  $u_p$  hereketlenijiliginden uly bolýar. Şonda esasy zarýad göterijiler şol temperaturadan ýokarda elektron bolýar. Tejribeleriň görkezmegine görä,  $p$  görnüşli ýarymgeçirijilerde bellibir temperaturada Holluň koeffisiýentiniň alamatynyň üýtgemesi diňe germanide we kremnide ýüze çykmak,  $p$  görnüşli çylşyrymly ýarymgeçirijilerde hem bolup geçýär.

## 5.4. Ýarymgeçirijilerde elektrik geçirijiligiň temperatura baglylygy

Bir geçirijilik görnüşli ýarymgeçirijilerde  $\gamma$  udel elektrik geçirijilik:

$$n \text{ görnüşli ýarymgeçirijide } \gamma = n_0 e u_n; \quad (5.19)$$

$$p \text{ görnüşli ýarymgeçirijide } \gamma = p_0 e u_p. \quad (5.20)$$

Bu ýerden görnüşi ýaly,  $\gamma$  udel elektrik geçirijiligiň temperatura baglylygy zaryad göterijileriniň sanynyň we olaryň  $u_n$ ,  $u_p$  hereketlenijilikleriniň temperatura baglylyklary bilen kesgitlenýär. Şonuň üçin bu baglanyşyklara aýratynlykda seredeliň.

### 5.4.1. Zaryad göterijileriň sanynyň temperatura baglylygy.

Arassa (garyndysyz) hususy ýarymgeçirijilerde temperaturanyň ýokarlanmagy bilen walent zolagyndaky elektronlaryň ýylylyk energiýasy  $W_k$  hem köpeliýär. Bellibir temperaturalarda elektronlaryň ýylylyk energiýasy  $W_k$  gadagan zolagyň giňligine deň ýa-da ondan uly bolsa ( $W_k \geq \Delta E$ ), elektronlar walent zolakdan geçirijilik zolaga geçip başlaýar, ýagny hususy elektrik geçirijilik başlanýar. Ýarymgeçirijileriň nazaryýetine görä, hususy elektrik geçirijilikde erkin elektronlaryň  $n$  konsentrasiýasynyň temperatura baglylygy aşakdaky formula bilen aňladylyar:

$$n = n_0 e^{-\frac{\Delta E}{2kT}}. \quad (5.21)$$

Şoňa meňzeşlikde walent zolakdaky erkin deşijekleriň sany:

$$p = p_0 e^{\frac{\Delta E}{2kT}}, \quad (5.22)$$

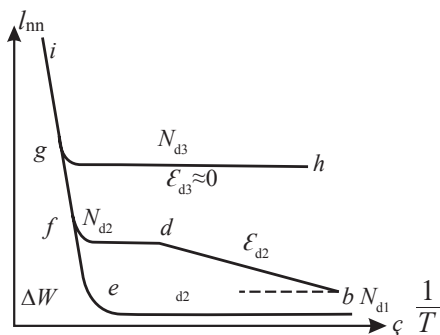
bu ýerde  $n_0$ ,  $p_0$  – berlen ýarymgeçiriji üçin hemişelik ululyklar;

$k$  – Bolsmanyň hemişeligi;  $T$  – absolýut temperatura.

5.4-nji temada bellenilişi ýaly, donor garyndy atomlaryň ionlaşma energiýasy  $\Delta \mathcal{E}_d$  we akseptor garyndy atomlaryň ionlaşma energiýasy  $\Delta \mathcal{E}_a$  gadagan zolagyň giňliginden has kiçi bolýar. Şonuň üçin garyndyly ýarymgeçirijilerde zaryad göterijileriň sany garyndy atomlaryň ionlaşmasynyň hasabyna has pes temperaturalarda ösüp



başlaýar. 5.5-nji çyzgyda  $n$  görnüşli donor garyndyly ýarymgeçirijide garyndy atomlaryň sany  $N_{d3} > N_{d2} > N_{d1}$  bolan nusgalarda  $n$  sanyň  $T$  temperatura baglylygynyň grafikleri görkezilýär.



**5.5-nji çyzgy.** Donor garyndyly ( $N_{d3} > N_{d2} > N_{d1}$ )  $n$  görnüşli ýarymgeçirijilerde zarýad göterijileriň sanynyň temperatura baglylygynyň grafikleri.  $E_{d1}$ ,  $E_{d2}$ ,  $E_{d3}$  donor garyndyly atomlaryň ionlaşma energiýasy

Bu çyzgydan görnüşi ýaly, donor garyndyly atomlaryň  $N_{d3}$  has uly bolan ýagdaýynda ionlaşma energiýasy nola deň ( $N_{d3}=0$ ) bolup, pes temperaturalarda  $n$  temperatura bagly bolmaýar. Ähli derňelen nusgalarda hususy elektrik geçirijiligiň başlanmagy bilen erkin elektronlaryň sany çalt ösýär. Garyndy donor garyndylaryň  $N_{d1}$  sanynyň az bolan ýagdaýynda  $l_{nn}=f(-\frac{1}{T})$  üç uçastokdan durýar:

$a-b$  – uçastokda garyndylaryň ionlaşma energiýasyny häsiýetlendirýär;

$b-e$  – uçastokda ionlaşmanyň gutaranlygy sebäpli,  $n$  erkin elektronlaryň sany üýtgemeyär.

$e$  nokatda ýokary temperaturada elektronlar gadagan zolagyň üstünden geçip ugraýar, ýagny hususy elektrik geçiriji çäge geçýär. Bu ýagdaýda elektronlaryň konsentrasiýasy deşikleriniň sanyna deň bolýar.

Çyzgydaky  $gh$  – uçastokda  $E_{d3}=0$  bolany üçin hemme garyndy atomlaryň ionlaşanlygy sebäpli,  $n$  erkin elektronlaryň sany üýtgemeyär.

**Hereketlenijiligiň temperatura baglylygy.** Ýarymgeçirijilerde zarýad göterijileriň  $u$  hereketlenijiligi metallardakydan birnäçe esse uly bolup bilýär. Umuman, hereketlenijilik

$$u = \frac{v_{\text{or}}}{E} = \frac{e}{m^*} \cdot \tau = \frac{e}{m^*} \cdot \frac{\lambda_{\text{or}}}{v_t}, \quad (5.23)$$

bu ýerde  $v_t$  – elektronlaryň ýylylyk hereketiniň orta tizligi;

$m^*$  – zarýad göterijiniň effektiw massasy;

$\lambda_{\text{or}}$  – elektronyň erkin hereketiniň orta uzynlygy;

$\tau$  – elektronyň erkin hereketiniň wagty.

Ýarymgeçirijilerde hereketlenijiligiň temperatura baglylygyna aşakdaky faktorlar täsir edip bilýär:

Kristal gözenekde atamlaryň we ionlaryň ýylylyk yrgyldylary;

Keseki garyndylaryň ionlaşan ýa-da neýtral haldaky atamlary;

Kristalyň mümkin bolan hemme şikesleri (boş düwünler, aralyga giren atamlaryň döreden gyşarmalary, moýlar we ş.m).

Ýarymgeçirijilerde erkin elektronlaryň sanynyň az bolýanlygy sebäpli, olaryň özara täsirleri (dargamalary) hasaba alynmaýar.

Atom kristal gözenekli ýarymgeçirijilerde zarýad göterijileriň dargamasy kristal gözenegiň ýylylyk yrgyldysynyň we ionlaşan garyndylaryň täsirinde ýüze çykýar. Zarýad göterijiler kristal gözeneginiň ýylylyk yrgyldylarynda darganlarynda elektronlaryň erkin hereketiniň orta uzynlygy  $\lambda_{\text{or}}$  temperatura ters bagly (proporsional) bolýar, ýagny:

$$\lambda_{\text{or}} = \frac{1}{T}. \quad (5.24)$$

Zarýad göterijileriň  $v_t$  ýylylyk hereketiniň tizligi bolsa, onda (5.23) formulanyň esasynda  $u$  hereketlenijilik aşakdaky görnüşde temperatura bagly bolýar:

$$u \sim \frac{1}{T^{3/2}} \sim T^{-3/2}. \quad (5.25)$$

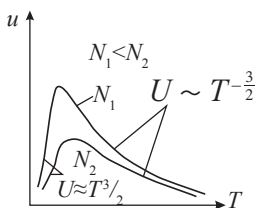
Neýtral atomly kristal gözeneklerde pes temperaturalarda ionlaşan garyndy atamlaryň täsirinde dargama ýagdaýy güýçli bolýar. Şol ýagdaýda hereketlenijilik (5.23) formula görä

$$u \sim T^{3/2}$$

baglanyşykda temperaturanyň ýokarlanmagy bilen ulalmaly.

Eger berlen ýarymgeçirijide bu dargama mehanizmleriň ikisi hem gatnaşýan bolsa, (gözenegiň yrgyldysy we ionlar), onda here-

ketlenijiligiň temperatura baglylygynyň jemleýji grafigi maksimumdan geçýär. Ol baglanyşyk garyndy atamlaryň  $N_1$ ,  $N_2$  dürli sanlarynda 5.6-njy çyzygyda görkezilýär.

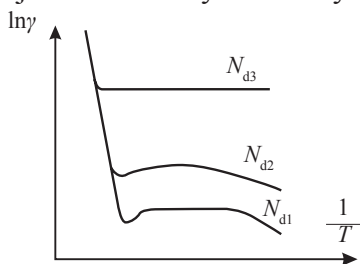


**5.6-njy çyzygy.** Garyndy atamlaryň  $N_1$ ,  $N_2$  dürli sanlarynda ( $N_1 < N_2$ ) zarýad göterijileriniň  $u$  hereketlenijiliginiň temperatura baglylygynyň grafikleri

Ion gurluşly kristallarda zarýad göterijileriň hereketlenijiligine kristal ýylylyk yrgyldylary, atom gurluşly kristallar bilen deňeşdirilende has güýçli täsir edýändigini bellemeli. Şol sebäpli ion gurluşly kristally ýarymgeçirijilerde zarýad göterijileriň hereketlenijiligi hemişe pes bolýar.

**Udel elektrik geçirijiligiň temperatura baglylygy.** Ýarymgeçirijilerde udel elektrik geçirijiligiň temperatura baglylygy zarýad göterijileriň sanynyň we hereketlenijiliginiň temperatura baglylyklarynyň jemleýjisi bolýar.

Garyndy atamlaryň  $N_1 < N_2 < N_3$  dürli sanlarynda  $\gamma$  udel elektrik geçirijiligiň temperatura baglylygynyň grafikleri 5.7-nji çyzygyda görkezilýär. Bu çyzygydan görnüşi ýaly, pes temperaturalarda ýarymgeçiriji garyndyly elektrik geçirijilik bilen, ýokary temperaturalarda bolsa hususy elektrik geçirijilik bilen häsiýetlendirilýär.



**5.7-nji çyzygy.** Garyndyly atamlaryň sanlary  $N_{d1} < N_{d2} < N_{d3}$  bolan ýarymgeçirijide  $\gamma$  udel elektrik geçirijiligiň temperatura baglylygynyň grafigi

Atom kristal gözenekli ýarymgeçirijilerde  $u$  hereketlenijiligiň temperatura baglylykda üýtgemesi garyndylaryň sanynyň üýtgemese

si bilen deňeşdirilende has haýal bolup geçýär. Şonuň üçin  $\gamma$  udel elektrik geçirijiniň temperatura baglylygynyň zarýad göterijileriň sanynyň temperatura baglylygyna meňzeş bolýar. Pes temperatura-larda ýarymgeçiriji garyndyly geçirijilik bilen häsiýetlendirilýär. Ýo-kary temperaturalarda bolsa hususy elektrik geçirijilik başlanýar. Şol ýagdaýda  $\gamma$  udel elektrik geçirijilik hem  $n$  ýaly eksponensial kanun boýunça birden ösýär, ýagny:

$$\gamma = Ae^{-\frac{\Delta E}{2kT}}, \quad (5.26)$$

bu ýerde  $A$  – berlen ýarymgeçiriji üçin hemişelik;  $\Delta E$  – gadagan zolagyň giňligi;  $k$  – Bolsmanyň hemişeligi;  $T$  – absolýut temperatura.

Eger  $b = \frac{\Delta E}{2kT}$  diýip bellesek, onda ýarymgeçirijiniň  $\rho$  udel garşylygyny aşakdaky ýaly aňlatmak bolar:

$$\rho = \frac{1}{\gamma} = Ae^{\frac{b}{T}}. \quad (5.27)$$

Onda udel garşylygyň temperatura koeffisiýenti:

$$\rho_{TK} = \alpha_\rho = \frac{1}{\rho} \cdot \frac{d\rho}{dT} = -\frac{b}{T^2}. \quad (5.28)$$

Diýmek, ýarymgeçirijilerde  $\alpha_\rho$  otrisatel bolup, we ol  $\Delta E$  gadagan zolagyň giňligine bagly bolýar.

Metallar bilen deňeşdirilende ýarymgeçirijilerde  $\alpha_\rho$  10÷15 esse uly bolýar. Bu bolsa ýarymgeçirijilerden ýokary duýgurly termorezis-torlary taýýarlamaga mümkinçilik berýär.

## 5.5. Ýarymgeçirijilerde fotogeçirijilik.

### Ýarymgeçirijilerde gadagan zolagyň giňligini kesgitlemegiň termiki we optiki usullary

**Ýarymgeçirijilerde fotogeçirijilik.** Ýarymgeçirijilerde elektronlaryň walent zolakdan ýa-da garyndy atomlaryň energetiki de-rejelerinden geçirijilik zolaga geçmegi diňe ýylylyk energiýasynyň (ýokary temperaturanyň) täsiri bilen ýüze çykman, ýagtylyk energiýasynyň täsiri bilen hem ýüze çykyp bilýär. Ýagtylyk energiýasynyň siňdirilmesi bilen ýarymgeçirijide elektron-deşijek jübütleri emele gelip, elektrik geçirijilik artýar. Elektromagnit şöhleleriniň täsiri bilen

maddada elektrik geçirijiligiň döremegine fotogeçirijilik diýilýär. Fotogeçirijilik hadysasynda ýagtylygyň kwant tebigaty ýüze çykýar. Ýagtylygyň kwant tebigatyna görä bir kwantyň (fotonyň) energiýasy:

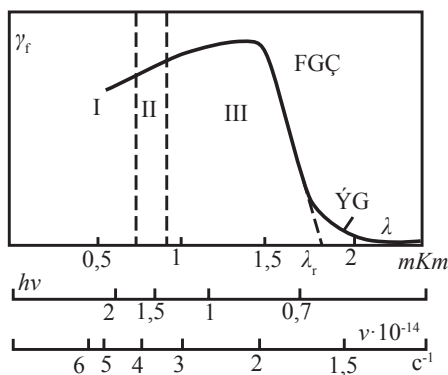
$$\varepsilon_k = h\nu = \frac{hc}{\lambda}, \quad (5.29)$$

bu ýerde  $h=6,625 \cdot 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$  – Plankyň hemişeligi;  $c=3 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}$  – ýagtylygyň wakuumdaky tizligi;  $\lambda$  – ýagtylygyň tolkun uzynlygy.

Eger  $h$ ,  $c$  ululyklaryň bu bahalary ulanylsa we  $\lambda$  mikrometrde alynsa, onda (1.5) formulany aşakdaky görnüşde ýazmak bolar:

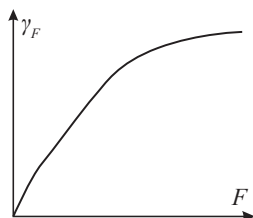
$$h\nu = \frac{1,23}{\lambda}. \quad (5.30)$$

Arassa (hususy) ýarymgeçirijide, eger ýagtylygyň bir kwantyň energiýasy şol ýarymgeçirijiniň gadagan zolagynyň  $\Delta E$  giňligine deň ýa-da ondan uly bolsa ( $h\nu \geq \Delta E$ ), onda bu kwantyň siňdirilmegi bilen bir elektron walent zolakdan geçirijilik zolaga geçip, erkin elektron-deşijek jübüti emele geler. 5.8-nji çyzgyda germaniý üçin fotogeçirijiligiň düşýän ýagtylygyň tolkun uzynlygyna baglylygy görkezilýär.



**5.8-nji çyzgy.** Germaniý üçin fotogeçirijiligiň düşýän ýagtylygyň tolkun uzynlygyna baglylygy. (I – görünýän ýagtylyk; II – gyzyl spektr; III – infragyzyly; FGÇ – fotogeçirijiligiň gyzyl çägi)

Fotogeçirijiligiň ýüze çykýan şertlerinde (meselem,  $h\nu \approx \Delta E$ ) onuň möçberi (ululygy) düşýän ýagtylygyň depginine (intensiwligine) hem bagly bolýar, ýagny ýagtylygyň depgininiň güýçlenmegi bilen, umuman, fotogeçirijilik ösýär. Ol baglanyşygyň umumy görnüşi bolsa 5.9-njy çyzgyda görkezilýär.



### 5.9-njy çyzgy. Fotogeçirijiligiň düşýän ýagtylygyň depginine baglylygy

Bu baglylyga bir wagtyň özünde iki hadysa täsir edýär: 1) depginiň artmagy bilen ýarymgeçirijiniň üstüne düşýän kwantlaryň sany köpelip, erkin zarýad göterijileriň sany hem köpeliýär; 2) dürli alamatly zarýad göterijileriň sanynyň ösmegi bilen olaryň özara rekombinasiýasy hem güýçlenýär. Bu hadysalaryň birinjisi fotogeçirijiligiň ösmegine, ikinjisi bolsa fotogeçirijiligiň peselmegine getirýär.

Iş ýüzünde fotogeçirijiligiň ýagtylygynyň  $F$  depginine baglylygy aşakdaky formula bilen aňladylýar:

$$\gamma_F = BF^x, \quad (5.31)$$

bu ýerde  $B$  – berlen ýarymgeçirijini häsiýetlendirilýän hemişelik;  $x - 0 < x < 1$  şerte boýun egýän ululyk.

Içki fotoeffektde her siňdirilen kwanta düşýän elektron-deşijek jübütleriň sanyna kwant çykyşy diýilýär. Meselem, germanide tolkun uzynlygy  $1 \div 1,8 \text{ mkm}$  bolan siňdirilen fotonlaryň her birine bir elektron-deşijek düşüp, kwant çykyşy bire deň bolýar.

Düşýän ýagtylygyň kwantynyň energiýasy has uly bolanda ilkinji dörän elektron-deşijek jübütleri ikilenji jübütleri döredip bilýärler. Şonda kwant çykyşy birden uly bolup biler. Fotogeçirijilik temperatura hem bagly bolýar. Ol temperaturanyň peselmegi bilen ulalýar, sebäbi temperaturanyň peselmegi bilen garaňkylykdaky geçirijilik peseliýär, ýagtylygyň täsiri bolsa artýar. Temperaturanyň peselmegi bilen  $\Delta E$  gadagan zonanyň giňligi hem artýar.

### Deňagramlaşmadyk zarýad göterijileriň rekombinasiýasy.

Umuman, elektromagnit şöhleleriň täsiri bilen ýüze çykyan zarýad göterijilere deňagramlaşmadyk zarýad göterijiler diýilýär. Meselem, fotogeçirijilik hadysasynda döreýän elektron-deşijek jübütleri deňagramlaşmadyk zarýad göterijilerdir. Olar döränden soň bellibir wagtda

ýene neýtrallaşýarlar, ýagny rekombinirlenýärler. Ol wagt dürli ýarymgeçirijilerde dürli bolýarlar. Ol wagty häsiýetlendirmek üçin deňagramlaşmadyk zarýad göterijileriň ýaşaýyş wagty diýen düşünje ulanylýar. Ýarymgeçirijiniň göwrümünde deňagramlaşmadyk zarýad göterijileriň ýaşaýyş wagty  $\tau_{0V}$  aşadaky formula bilen kesgitlenýär:

$$\tau_{0V} = \frac{\Delta n_0}{d\Delta n_0 / d\tau}, \quad (5.32)$$

bu ýerde  $\Delta n_0$  – deňagramlaşmadyk zarýad göterijileriň konsentrasiýasy;

$\frac{d\Delta n_0}{d\tau}$  – rekombinasiýa netijesinde  $\Delta n_0$  konsentrasiýanyň kemelmeli tizligi.

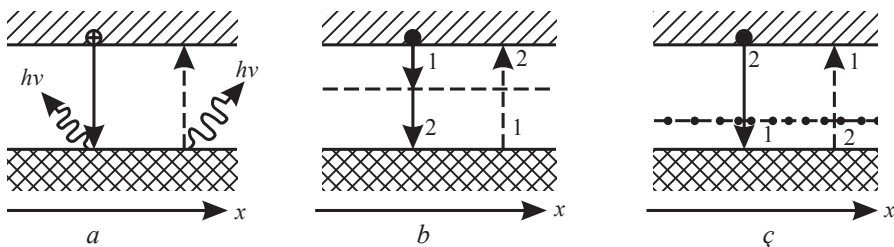
Göwrümleýin  $\tau_{0V}$  ýaşaýyş wagtyndan başga deňagramlaşmadyk zarýad göterijileriň  $\tau_{0S}$  ýaşaýyş wagty bolýar. Onda effektiv ýaşaýyş wagty aşadaky formula bilen kesgitlenýär.

$$\frac{1}{\tau_{0eff}} = \frac{1}{\tau_{0V}} + \frac{1}{\tau_{0S}}. \quad (5.33)$$

Elektrik we magnit meýdanlarynyň täsir etmeýän ýagdaýynda bir ugurda diffuziýa netijesinde zarýad göterijileriň ýaşaýyş wagtynyň dowamynda geçýän aralygyna diffuzion uzynlyk diýilýär. Ol elektronlar we deşijekler üçin aşadaky formulalar bilen kesgitlenýär:

$$L_n = \sqrt{D_n \tau_{0n}} \quad L_p = \sqrt{D_p \tau_{0p}}. \quad (5.34)$$

Ýarymgeçirijilerde deňagramlaşmadyk zarýad göterijileriň rekombinasiýasynyň dürli ýollary bolup biler. Ol ýollar 5.10-njy çyzgyda görkezilýär.



**5.10-njy çyzgy.** Zarýad göterijileriň generirlenmeginiň we rekombinasiýasynyň mümkin bolan ýollary. a – göni rekombinasiýa we generirlenme; b – doldurylmadyk derejeleriň üsti bilen rekombinasiýa we generirlenme; ç – doldurylan derejelere rekombinasiýa we generirlenme

Bu çyzgydan görnüşi ýaly, deňagramlaşmadyk zaryad göterijileriň döreýşiniň (generirlenmesiniň) we rekombinasiýasynyň üç sany ýollary bolýar. Olaryň iň ýönekeý görnüşinde rekombinasiýa elektronlaryň geçirijilik zolakdan walent zolaga gönümel gaýdyp gelmesi bilen amala aşyrylýar. Oňa gönümel rekombinasiýa diýilýär. Ikinji we üçünji görnüşlerde rekombinasiýa we generirlenme gadagan zolagyň içinde ýerleşen donor we akseptor garyndylaryň energetik derejeleriniň üstünden amala aşyrylýar. Ol energetik derejelere başgaça rekombinasion «duzaklar» diýilýär.

Şeýlelikde, ýarymgeçirijilerde fotogeçirijilik köp ýagdaýlara bagly bolup, dürli ýarymgeçirijilerde dürli hili we dürli ululyklarda bolup bilýär. Fotogeçirijiligi uly bolýan ýarymgeçiriji materiallar (PbS, CdS birleşmeler) elektronikada we awtomatikada giňden ulanylyan duýgur fotorezistorlary taýýarlamak üçin ulanylýar.

**Ýarymgeçirijilerde gadagan zolagyň giňligini kesgitlemegiň termiki we optiki usullary.** Her bir ýarymgeçiriji material üçin gadagan zolagyň  $\Delta E$  giňligi onuň esasy kesgitleýji häsiýetleriniň biridir. Çünki olaryň elektrik, optiki häsiýetleri, esasan,  $\Delta E$  bilen kesgitlenýär. Meselem, ýarymgeçirijilerde hususy elektrik geçirijilikde, geçen 5.4-nji temada bellenişi ýaly, udel elektrik geçirijiligiň temperatura baglylygy

$$\gamma = Ae^{-\frac{\Delta E}{2kT}} \quad (5.35)$$

görnüşde aňladylýar. Bu formulany logarifmläp alarys:

$$\ln \gamma = \ln A - \frac{\Delta E}{2K} \cdot \frac{1}{T}. \quad (5.36)$$

(5.36) formulany iki  $T_1 < T_2$  temperaturalarda ýazalyň:

$$\begin{cases} \ln \gamma_1 = \ln A - \frac{\Delta E}{2K} \cdot \frac{1}{T_1}, \\ \ln \gamma_2 = \ln A - \frac{\Delta E}{2K} \cdot \frac{1}{T_2}. \end{cases} \quad (5.37)$$

Bu ýerden  $\ln \gamma_2 - \ln \gamma_1 = \frac{\Delta E}{2K} \left( \frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right)$  ýa-da

$$\Delta E = \frac{2KT_1 \cdot T_2 \ln \frac{\gamma_2}{\gamma_1}}{T_2 - T_1} = \frac{2KT_1 \cdot T_2 \lg \frac{\gamma_2}{\gamma_1}}{0,43(T_2 - T_1)}. \quad (5.38)$$



Bu ýerden görnüşi ýaly, ýarymgeçirijilerde udel elektrik geçirijiligiň temperatura baglylygyny derňemek bilen, şol ýarymgeçirijiniň gadagan zolagynyň  $\Delta E$  giňligini kesgitlep bolýar. Bu usula termiki usul diýilýär. Fotogeçirijilik ýarymgeçirijiniň üstüne düşýän ýagtylyk fotonynyň energiýasy şol ýarymgeçirijiniň gadagan zolagynyň giňligine deň bolan şertde başlanýar ( $h\nu = \Delta E$ ). Fotogeçirijiligiň başlanmagyna degişli ýagtylygyň tolkun uzynlygyna  $\lambda_g$  fotogeçirijiligiň gyzyň çägi diýilýär. Fotogeçirijiligiň gyzyň çäginde:

$$\Delta E = h\nu = \frac{1,23}{\lambda_g}, \quad [\text{eV}]. \quad (5.39)$$

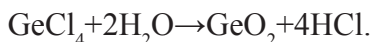
Şeýlelikde, ýarymgeçirijide fotogeçirijiniň gyzyň çäginde degişli  $\lambda_g$  tolkun uzynlygy kesgittense, gadagan zolagyň giňligini kesgitlep bolýar. Bu usula optiki usul diýilýär.

## 5.6. Ýarymgeçiriji häsiýetli elementler.

### Germaniý, kremniý we selen

5.1-nji temada bellenişi ýaly, 9 sany element ýarymgeçiriji häsiýetde bolýarlar. Olardan diňe üçüsi aýratynlykda ýarymgeçiriji material hökmünde ulanylýar. Olara germaniý, kremniý we selen degişlidir. Beýleki ýarymgeçiriji elementler çylşyrymly ýarymgeçirijileri almakda we keseki garyndylar hökmünde ulanylýar. Elektrotehnika-da giňden ulanylýan germaniniň, kremniniň we seleniň esasy häsiýetlerine seredeliň.

**Germaniý.** Germaniniň Ýer gatlagyndaky mukdary köp däl, takmynan,  $7 \cdot 10^{-4}\%$ . Arassa germaniý elementini almak üçin himiki ýol bilen suwuk haldaky germaniniň tetrahloridi ( $\text{GeCl}_4$ ) ulanylýar. Onuň gaýnama temperaturasy  $83^\circ\text{C}$  gidroliz reaksiýasy arkaly germaniniň tetrahloridinden ilki bilen germaniniň oksidi ( $\text{GeO}_2$ ) alynýar:



Soňra reaksiýa netijesinde alnan oksid wodorod bilen dikeldilip, külke görnüşde arassa germaniý elementi alynýar. Alnan külke görnüşdäki germaniý täzeden eredilip, polikristal guýmalar alynýar. Soňra ol guýmalar zolaklaýyn eretmek usuly bilen ýokary hilli arassa monokristal germaniý taýýarlamak üçin zerur material hökmün-

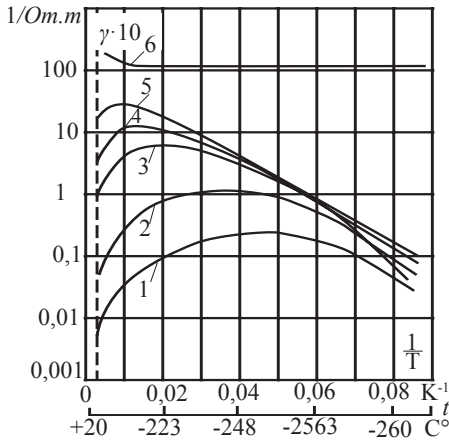
de ulanylýar. Germanini gönümel monokristal görnüşde almak üçin erginden çekmek usuly (Çohralskiniň usuly) hem giňden ulanylýar. Germaniý – D.I.Mendeleyewiň tablisasynda IV topara degişli bolup, kowalent baglanyşykly, almaz görnüşli, kub şekilli kristal. Onuň esasy fiziki häsiýetleri 1.6-njy tablisada görkezilendir.  $n$  görnüşli germanide udel elektrogeçirijiligiň temperatura we myşýagyň garyndysynyň sanyna baglylygy 5.3-nji çyzgyda görkezilýär. Onda garyndy myşýak atomynyň dürli sanlarynda elektrik geçirijiligiň garyndyly we hususy zonalary açyk görüňär.

5.3-nji tablisa

№	Häsiýetleri	Germaniý	Kremniý	Selen
1	Atom massasy	72,6	28,06	-
2	Hemişelik kristal gözenekleri, $nm$	0,566	0,542	-
3	Dykyzlygy ( $t=20^{\circ}$ ), $mg/m^3$	5,3	2,3	4,8
4	Uzynlyga giňelme koeffisiýenti, $K^{-1}$	$6,0 \cdot 10^{-6}$	$4,2 \cdot 10^{-6}$	$50 \cdot 10^{-6}$
5	Ýylylyk geçirijilik koeffisiýenti, $Wt/(m \cdot K)$	55	80	4
6	Orta ýylylyk sygymy, $J/(kg \cdot K)$	333	710	330
7	Ereme temperaturasy, $^{\circ}C$	936	1414	217-220
8	Üst dartyлма koeffisiýenti, $N/m$	0,6	0,72	0,11
9	Hususy udel garşylyk, $Om \cdot m$	0,47	2000	-
10	Esasy zaryad görterijileriň hususy sany, $m^{-3}$	$2,5 \cdot 10^{19}$	$1 \cdot 10^{16}$	-
11	Gadagan zolagyň giňligi, $eV$	0,72	1,12	1,70-1,90
12	Elektronlaryň hereketlenijiligi, $m^2/V \cdot s$	0,39	0,14	-
13	Deşijekleriň hereketlenijiligi, $m^2/V \cdot s$	0,19	0,05	$0,2 \cdot 10^4$
14	Elektronlaryň çykyş işi, $eV$	4,8	4,3	-
15	Dielektrik syzyjylyk	16	12,5	-
16	Termoelektrik hereketlendiriji güýji, $\Delta T=100 K$ , $mV$	33,0	41,6	-

Germaniý ergin hala geçende, onuň udel elektrik geçirijiligi, takmynan, 13 esse artýar,  $1100^{\circ}C$  temperaturadan başlap bolsa peselýär. Germanide fotogeçirijilik  $\lambda \approx 1,5 \text{ mkm}$  bolanda, spektriň infragyzyň çäginde maksimum bahany alýar. Germaniý häzirki wagtda iň giňden ulanylýan ýarymgeçirijileriň biridir. Ol üýtgeýän togy göneldýän dürli kuwwatly göneldijileri, tranzistorlaryň dürli görnüşlerini ýasamak üçin ulanylýar. 5.11-nji çyzgyda germaniniň udel elektrik geçirijiligi-

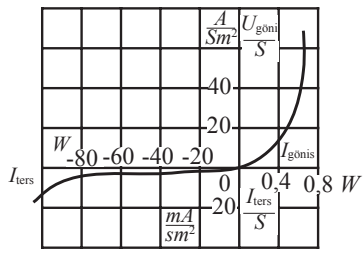
niň temperatura we myşýagyň mukdaryna baglylygynyň grafigi görkezilendir.



**5.11-nji çyzgy.**  $n$  görnüşli germanide udel elektrik geçirijiligiň temperatura we myşýagyň garyndysynyň sanyna baglylygy

1 –  $N = 8 \cdot 10^{18} \text{ m}^{-3}$ ; 2 –  $8 \cdot 10^{19} \text{ m}^{-3}$ ; 3 –  $1,2 \cdot 10^{21} \text{ m}^{-3}$ ; 4 –  $7 \cdot 10^{21} \text{ m}^{-3}$ ; 5 –  $6 \cdot 10^{22} \text{ m}^{-3}$ ; 6 –  $8 \cdot 10^{23} \text{ m}^{-3}$ .

5.12-nji çyzgyda howa bilen sowadylýan germaniý güýç göneldijisiniň wolt-ampere häsiýetnamasy görkezilendir.



**5.12-nji çyzgy.** Howa bilen sowadylýan germaniý güýç göneldijisiniň wolt-ampere häsiýetnamasy

Germaniden magnit meýdanynyň güýjenmesini, togy we kuwatyny ölçemek üçin ulanylýan Holluň özgerdijileri hem taýýarlanylýar. Germaniniň optiki häsiýetleri ondan fototranzistorlary, fotorezistorlary, optiki filtrlere, ýagtylyk modulýatorlary taýýarlamaga mümkinçilik berýär.

**Kremniý.** Kremniý hem germaniý ýaly IV topardan bolup, kowalent baglanyşykly almaz ýaly kristal gurluşly elementdir. Ol Ýer

gatlagynda has köp (takmynan 30%) ýaýran elementleriň biridir. Kremniý tebigatda arassa element görnüşde duşmaýar. Onuň iň köp ýaýran birleşmesi kwars çägesidir ( $\text{SiO}_2$ ). Arassa kremnini almagyň tehnologiýasy aşakdaky basgançaklardan ybarat:

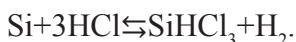
Tehniki kremnini aňsat bugarýan we aňsat dikeldilýän birleşmä özgertmek;

Ol birleşmäni fiziki we himiki usullar bilen arassalamak;

Arassa kremniý bölünip çykar ýaly birleşmäni dikeltmek;

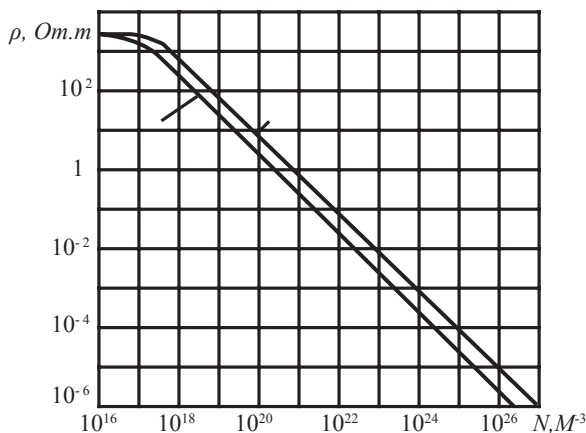
Kremnini gutarnykly arassalamak we monokristaly köpeltmek.

Ýarymgeçiriji önümçiliginde kremnini almagyň iň giňden ýaýran usuly trihlorsilany ( $\text{SiHCl}_3$ ) wodorodly dikeltmek usulydyr:



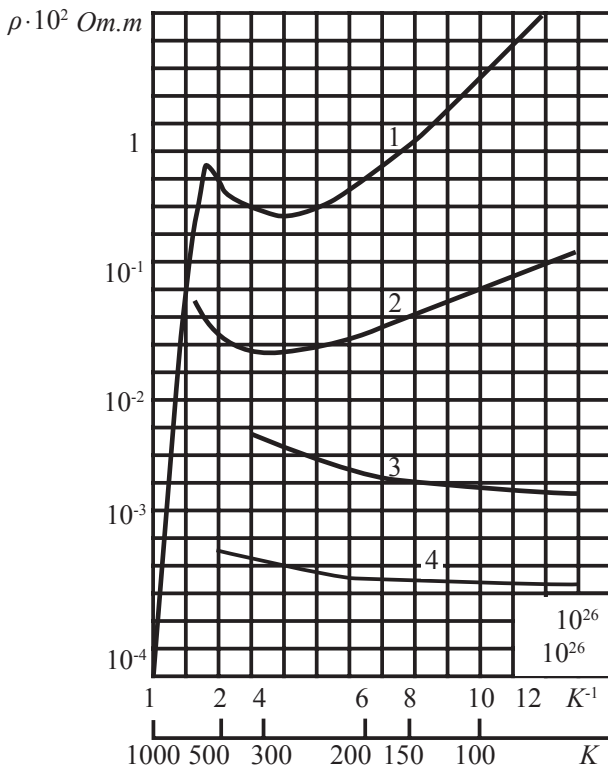
Trihlorsilanyň gaýnama temperaturasy  $32^\circ\text{C}$  bolan suwuklykdyr.

Arassa kremniý howada  $900^\circ\text{C}$ -e çenli durnukly bolýar. Ol ýokary temperaturada  $\text{SiO}_2$  emele getirmek bilen turşaýar. Kremniý  $1414^\circ\text{C}$  temperaturada ereýär. Onuň esasy fiziki häsiýetleri 5.3-nji tablisada berilýär. Kremniniň elektrik geçirijiligi ondaky keseki garyndylaryň konsentrasiýasyna baglydyr. Ol baglanyşyk 5.13-nji çyzgyda görkezilýär.



**5.13-nji çyzgy.**  $n$  görnüşli we  $p$  görnüşli kremnide udel garşylygyň keseki garyndylaryň sanyna baglylygy

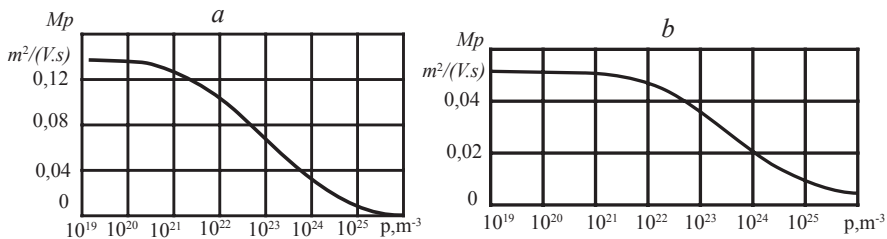
$n$  görnüşli kremnide garyndy fosforyň dürli konsentrasiýalarynda udel garşylygyň temperatura baglylygynyň grafikleri bolsa 5.14-nji çyzgyda berilýär.



**5.14-nji çyzyg.**  $n$  görnüşli kremnide garyndy fosforyň dürli konsentrasiýalarynda udel garşylygynyň temperatura baglylygy

1 –  $N = 4,7 \cdot 10^{23} \text{ m}^{-3}$ ; 2 –  $2,7 \cdot 10^{24} \text{ m}^{-3}$ ; 3 –  $4,7 \cdot 10^{25} \text{ m}^{-3}$ ; 4 –  $4,7 \cdot 10^{26} \text{ m}^{-3}$

5.15-nji çyzygyda  $n$  görnüşli we  $p$  görnüşli kremnide esasy zaryad göterijileriň hereketlenijiliginiň olaryň konsentrasiýasyna baglylygy görkezilýär.



**5.15-nji çyzyg.** Kremnide a – erkin elektronlaryň; b – deşijekleriň hereketlenijiliginiň olaryň sanyna baglylygy

Häzirki wagtda kremniý ýarymgeçiriji abzallary taýýarlamakda esasy material bolup hyzmat edýär. Ondan diodlar, tranzistorlar, fotoelementler, gaty mikroshemalar we ş.m taýýarlanylýar. Kremniý fotoelementler gün energiýasyny elektrik energiýa öwürýän gün batareýalarda hem giňden ulanylýar. Olaryň peýdaly täsir koeffisiýenti 10–12% ýetýär. Kremniniň esasy fiziki häsiýetleri 5.3-nji tablisada berilýär. Ondan görnüşi ýaly, kremniniň ereme temperaturasy  $1414^{\circ}\text{C}$  we gadagan zolagynyň giňligi  $\Delta E = 1,12 \text{ eV}$ . Şoňa görä kremniniň maksimal iş temperaturasy  $180 \div 200^{\circ}\text{C}$ -e ýetýär. Germaniniň iş temperaturasy bolsa  $-60^{\circ}\text{C} \div +70^{\circ}\text{C}$  aralykda bolýar.

**Selen.** Selen – D.I.Mendeleyewiň tablisasynda VI toparda ýerleşýär. Ony zawodlarda misi elektrik usul bilen arassalamak arkaly alýarlar. Selen amorf we dürli reňkde kristal görnüşlerde bolup bilýär. Geksagonal kristal gurluşly seleniň fiziki häsiýetleri 5.3-nji tablisada berilýär. Seleniň udel garşylygy garyndylaryň görnüşine we sanyna, temperatura, şeýle hem ýagtylandyrylyşa baglylykda örän giň  $1 \div 10^{11} \text{ Om}\cdot\text{m}$  aralykda bolup bilýär. Adatça, selen  $p$  – görnüşli ýarymgeçirijidir. Ondan fotoelementleri we göneldijileri taýýarlap bolýar. 5.3-nji tablisadan görnüşi ýaly, seleniň gadagan zolagynyň giňligi  $\Delta E = 1,7 \div 1,9 \text{ eV}$ . Şonuň üçin selen fotoelementleriň tolkun uzynlygy  $\lambda = 0,65 \div 0,72 \text{ mkm}$  bolan, görünýän spektrli ýagtylyklary duýup bilýär. Häzirki wagtda seleniň ulanylmasy has azaldy. Soňky döwürde ýarymgeçiriji tehnikaşynda germaniý, kremniý ýönekeý ýarymgeçirijilerden başga çylşyrymly ýarymgeçiriji materiallar hem giňden ulanylýar. Indiki bölümde olaryň birnäçe görnüşlerine seredip geçeliň.

## 5.7.Ýarymgeçiriji himiki birleşmeler we olaryň düzümindäki materiallar

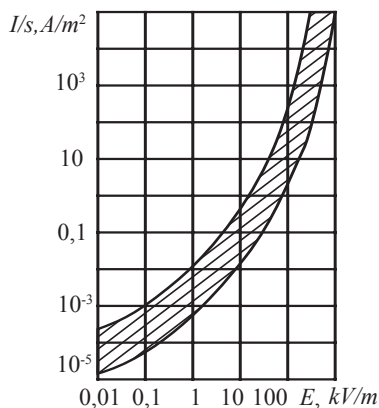
Iki elementden düzülen çylşyrymly ýarymgeçirijilere AIVBIV, AIIIBV, AIIIBVI görnüşdäki himiki birleşmeler mysal bolup biler. Bu görnüşli ýarymgeçiriji birleşmeleriň birnäçesine aýratynlykda sere deliň.

**A<sup>IV</sup>B<sup>IV</sup> görnüşli ýarymgeçirijiler.** A<sup>IV</sup>B<sup>IV</sup> görnüşdäki birleşmäniň iki elementi hem D.I.Mendeleyewiň tablisasynda IV topara degişli. Bu görnüşli birleşmäniň ýeke-täk mysaly kremniniň karbidi (SiC) bolýar. Onuň stehiometrik düzüminde massa boýunça 70,045% Si we 29,955% C bolýar. Tehniki karbidi elektrik peçlerde kremniniň dioksidini (SiO<sub>2</sub>) uglerod bilen gaýtarmak arkaly alýarlar. Şonda 2000°C temperatura çenli kremniý karbidiniň (SiC) kub şekilli β-modifikasiýasy has ýokary temperaturada bolsa, geksagonal α-modifikasiýasy emele gelýär. Iş gutaryp, peç sowadylandan soň, ondan biri-birine degşip duran kremniý karbidiniň (SiC) kristallarynyň dänejikleri çykarylýar. Olara bolsa duzlar diýilýär. Olar owradylanda diş şekilli kristal dänejikleri emele gelýär. Ol dänejikleriň ölçegleri 40÷300 *mkm* aralykda bolýar. Kremniý karbidi (SiC) alnys tehnologiýasyna we düzümindäki keseki garyndylara baglylykda dürli reňkde bolup bilýär. Kremniý karbidiniň (SiC) düzümindäki V toparyň elementleri (N, P, As, Sb, Bi) we demir kremniý karbidine ýaşyl reňki we *n* görnüşli elektrogeçirijiligi, II toparyň elementleri (Ca, Be, Mg) we III toparyň elementleri (B, Al, Ga, In) gök we melewşe reňki hem-de *p* görnüşli elektrogeçirijiligi berýärler. Ondan başga-da onuň himiki düzüminde kremniý (Si) köp bolsa, *n* görnüşli, uglerod (C) köp bolsa, *p* görnüşli kremniý karbidi (SiC) emele gelýär. Aşakda kremniý karbidiniň (SiC) esasy fiziki häsiýetleri berilýär:

1.	Dykyzlygy. ....	3,2 <i>Mg/m</i> <sup>3</sup>
2.	Ýylylyk geçirijilik koeffisiýenti (20°C) . . . . .	10 – 40 <i>Wt/(m·K)</i>
3.	Gadagan zolagynyň giňligi . . . . .	2,8÷3,1 <i>eV</i>
4.	Elektronlaryň hereketlenijiligi (20°C) . . . . .	0,01÷0,05 <i>m</i> <sup>2</sup> / <i>(V·s)</i>
5.	Deşijekleriň hereketlenijiligi (20°C) . . . . .	0,002÷0,005 <i>m</i> <sup>2</sup> / <i>(V·s)</i>
6.	Dielektrik syzyjylygy . . . . .	6,5 – 7,5
7.	Termoelektrik hereketlendiriji güýjenmesine görä.	300 <i>mkV/K</i>

Külke şekilli kremniý karbidiniň elektrik geçirijiligi her dänejigiň geçirijiligine, dänejikleriň ölçeglerine, biri-birine gysylyşyna, elek-

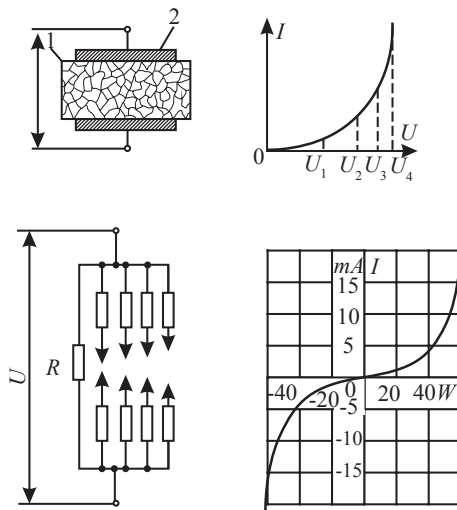
trik meýdanyň güýjenmesine we temperatura bagly bolýar. 5.16-njy çyzgydan görnüşi ýaly kremniý karbidiniň (SiC) külkesiniň toguň dykzlygynyň elektrik meýdanyň güýjenmesine baglylygy görkezilýär.



**5.16-njy çyzgy.** Kremniý karbidiniň (SiC) külkesinde toguň dykzlygynyň elektrik meýdanyň güýjenmesine baglylygy, dänejikleriň ölçegi  $63 \div 75 \text{ mkm}$  we külkä bolan basyş  $60 \text{ Mpa}$ )

Çyzgydan görnüşi ýaly,  $j=f(E)$  baglanyşyk dagynyk we çyzykly däl, ýagny Omuň kanunyna boýun egmeýär.

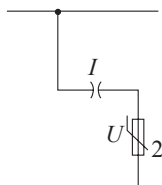
5.17-nji çyzgyda üýtgeýän tokda kremniý karbidiniň (SiC) hakyky wolt-ampere häsiýetnamasy görkezilýär.



**5.17-nji çyzgy.** Üýtgeýän tokda kremniý karbidiniň (SiC) hakyky wolt-ampere häsiýetnamasy



Kremniniň karbidinden (SiC) taýýarlanylýan çyzykly däl rezistorlara waristorlar diýilýär. Waristorlaryň durnukly işlemegi üçin onda-ky kristal däneçikleri ýörite baglaşdyryjylar (suwuk aýna, çalt ereýän aýna, laý, ultrafarfor, lak we ş.m) bilen biri-birine ýelmeşdirýärler. Laýly baglaşdyryjysy bolan materiala tirit, suwuk aýna baglaşdyryjysy bolan materiala bolsa wilit diýilýär. Elektrotehnikada kremniý karbidi (SiC) wentil zarýadsyzlandyryjylaryň rezistorlaryny taýýarlamak üçin ulanylýar. Ol rezistorlar elektrik liniýalaryny we enjamlaryny aşa naprýaženiýeden goramak üçin ulanylýar (5.18-nji çyzgy).



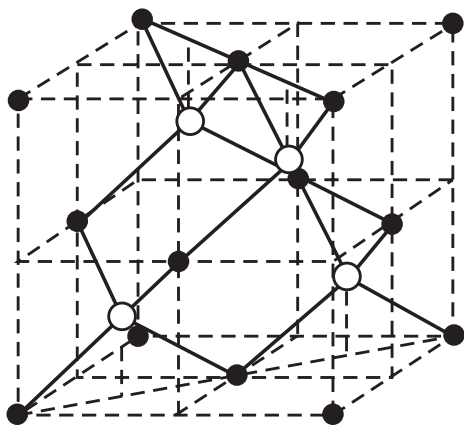
**5.18-nji çyzgy.** Wentil zarýadsyzlandyryjynyň shemasy.  
1 – uçgun aralyk; 2 – waristorlar

Elektrik liniýalarda naprýaženiýe birden ýokarlananda, 1 – uçgun aralyk böwsülýär we waristora ýokary naprýaženiýe täsir edip, onuň garşylygy birden peselýär we liniýa ýer bilen birikdirilýär. Şonda waristordan örän gysga wagtda (10 – 100 *mksek*) tok akýar. Emma üýtgeýän naprýaženiýe nol bahany alanda ýere birikme kesilýär. Waristoryň garşylygy awtomatiki dikeldilýär.

Ýokary temperatura (1500°C) çenli gyzygynlygy almak üçin ulanylýan dürli kuwwatly elektrik peçlerde kremniniň karbidinden (SiC) taýýarlanylýan silit sterženleri ulanylýar. Olaryň dykzylygy 3,2 *mg/m<sup>3</sup>*, udel garşylygy  $\rho = 0,001 \div 0,1 \text{ } \Omega \cdot \text{m}$ . 1923-nji ýylda O.Losew tarapyndan kremniý karbidinde (SiC) inžeksion elektrolýuminessensiýa hadysasy açylýar. Bu hadysa *p-n* geçişň göni ugrunda tok geçende ýüze çykýar we häzirki wagtda giňden ulanylýan swetodiodlaryň işleýiş prinsipini düzýär. Kremniý karbidi (SiC) esasynda taýýarlanylýan swetodiodlar dürli reňkli görünýän ýagtylyk şöhlelerini almaga mümkinçilik berýär. Sebäbi kremniý karbidiniň (SiC) gadagan zonasynyň giňligi  $\Delta E = 2,8 \div 3,1 \text{ eV}$ .

**A<sup>III</sup>B<sup>V</sup> görnüşli ýarymgeçirijiler.** A<sup>III</sup>B<sup>V</sup> görnüşli ýarymgeçiriji birleşmeler III we V toparlaryň elementlerinden düzülip, germaniniň

we kremniniň iň ýakyn elektron analoglarydyr. Olar almaza meňzeş kub şekilli (sfalerit) kristal gurluşda bolýarlar. Olaryň kristal gurluşynda III toparyň elementleriniň her atomy V topardaky elementleriň tetraedrik gurşawynda ýerleşýärler we dört ugur boýunça kowalent baglanyşygy emele getirýär. 5-19-njy çyzygyda AIII BV görnüşli birleşmeleriň sfalerit gurluşy görkezilýär. Ol birleşmeleriň birnäçesiniň esasy häsiýetleri 5.4-nji tablisada berlendir.



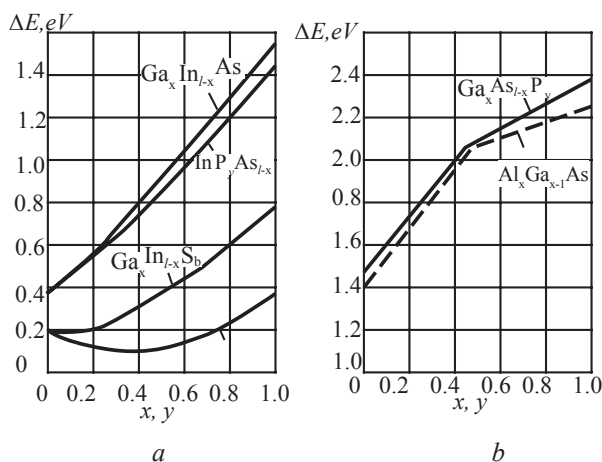
**5.19-njy çyzygy.  $A^{III}B^V$  görnüşli birleşmeleriň sfalerit gurluşy.**  
Gara togalajyklar -  $A^{III}$  atomlar; ak togalajyklar -  $B^V$  atomlar

5.4-nji tablica

№	Häsiýetleri	GaP	InP	GaAs	InAs	GaSb	InSb
1	Dykyzlygy, $mg/m^3$	4,07	4,78	5,32	5,67	5,65	5,78
2	Ere me temperaturasy, °C	1467	1070	1238	942	710	525
3	Gadagan zonasynyň giňligi, $eV$	2,26	1,35	1,43	0,36	0,72	0,18
4	Elektronlaryň hereketlenijiligi, $m^2/(V \cdot s)$	0,019	0,46	0,95	3,3	0,4	7,8
5	Deşijekleriň hereketlenijiligi, $m^2/(V \cdot s)$	0,012	0,015	0,045	0,046	0,14	0,075
6	Dielektrik syzyjylygy	11,1	12,4	13,1	14,6	15,7	17,7

Bu birleşmelerden has köp ulanylýanlary hökmünde GaAs, InSb we GaP görkezmek bolýar. GaAs birleşmeden uly PTK-ly fotoelementler, ýarymgeçiriji lazerler we tunnel diodlar taýýarlanylýar. Bu birleşmeden taýýarlanylýan abzallaryň iş temperaturasy 450°C

ýetýär. InSb birleşmäniň kristallary termoelektrik generatorlarda we sowadyjylarda giňden ulanylýar. GaP birleşmesi özüniň uly gadagan zonasynyň giňligi ( $\Delta E = 2,3 \text{ eV}$ ) bilen tapawutlanýar we ol önümçilikde gyzyly we ýaşyl reňkli şöhle berýän swetodiodlary ýasamakda ulanylýar. Ýarymgeçiriji tehnikaşynda  $A^{III}B^V$  görnüşli birleşmeleriň esasyndaky gaty garyndylaryň birnäçesinde gadagan zonanyň giňliginiň himiki düzüme baglylygynyň grafikleri berilýär (5.20-nji çyzgy). Olardan  $GaAs_{1-x}Px$  we  $Al_xGa_{1-x}As$  gaty garyndylar gyzyly şöhle berýän swetodiodlary we lazerleri ýasamak üçin ulanylýar.  $Ga_xIn_{1-x}P$  ( $x = 0,5 \div 0,7$ ) gaty garyndylar bolsa, sary-ýaşyl spektrlerde ulanylýar.



**5.20-nji çyzgy.** AIIIBV birleşmeleriň düzümindäki gaty garyndylarda gadagan zolagyň giňliginiň himiki düzüme baglylygy ( $T = 300 \text{ K}$ ).

a – birmeňzeş zolak gurluşly birleşmeleriň arasyndaky gaty garyndylar;  
b – zolak gurluşlary dürli bolan garyndylar

**AIIIBVI görnüşli ýarymgeçirijiler we beýleki ýarymgeçiriji materiallar.** AIIIBVI görnüşli ýarymgeçiriji birleşmelere sulfidler, selenidler we telluridler degişlidir. Olaryň hem almaza meňzeş ýarymgeçirijileri bolup, kub şekilli (sfalerit), ýa-da geksagonal (wýürsit) şekilli kristal gurluşlary bardyr.  $A^{II}B^{VI}$  görnüşli ýarymgeçirijileriň birnäçesiniň esasy häsiýetleri 5.5-nji tablisada berilýär. Olarda ion baglanyşygyň paýynyň artmagy sebäpli,  $A^{II}B^{VI}$  görnüşli birleşmeler bilen deňeşdirilende gadagan zolagy ulalýar, hereketlenijilik bolsa peselýär.

5.5-nji tablisa

№	Birleşmeler	Kristal gurluşy	Dykyzlygy, $Mg/m^3$	Ereme temperaturasy, $^{\circ}C$	Gadagan zonasynyň giňligi, $eV$	Elektronlaryň hereketlenijiligi, $m^2/(V \cdot sek)$	Deşijekleriň hereketlenijiligi, $m^2/(V \cdot sek)$	Geçirijiligiň görnüşü
1.	ZnS	Sfalerit	4,09	1020	3,67	0,014	0,0005	$n$
2.	CdS	Wýursit	4,82	1750	2,53	0,034	0,011	$n$
3.	HgS	Sfalerit	7,73	1480	1,78	0,07	-	$n$
4.	ZnSe	Sfalerit	5,42	1520	2,73	0,026	0,0015	$n$
5.	CdSe	Wýursit	5,81	1264	1,85	0,072	0,0075	$n$
6.	HgSe	Sfalerit	8,25	790	0,12	2,0	-	$n$
7.	ZnTe	Sfalerit	6,34	1239	2,23	0,053	0,003	$p$
8.	CdTe	Sfalerit	5,86	1041	1,51	0,12	0,006	$n, p$
9.	HgTe	Sfalerit	8,09	670	0,08	2,5	0,02	$n, p$

$A^{II}B^{VI}$  görnüşli birleşmeleriň arasynda has giňden ulanylýanlary ZnS we CdS. Sink sulfidi (ZnS) – köp dürli senagat lüminoforlaryň esasy düzýär. Kadmiý sulfidi (CdS) bolsa, fotorezistorlary taýýarlamakda giňden ulanylýar. Bu maksat üçin görünýän ýagtylyklara duýgur *CdSe* ýuka gatlaklar hem giňden ulanylýar.

Kiçi gadagan zolakly  $A^{II}B^{VI}$  görnüşli ýarymgeçirijiler infragyzyň şöhleleri kabul edijiler hökmünde ulanylýar. Bu maksat üçin aýratyn hem  $Cd_xHg_{1-x}Te$  gaty garyndylar uly gyzyklanma döredýär. Olaryň fotoduýýujylyk spektri  $\lambda=8\div 14 \text{ mkm}$  bolan «atmosferanyň durulyk penjiresini» hem öz içine alýar.

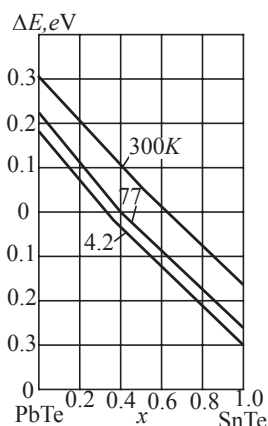
$A^{IV}B^{VI}$  görnüşli ýarymgeçirijileriň esasy häsiýetleri 5.6-njy tablisada berilýär.

5.6-njy tablisa

№	Birleşmeler	Dykyzlygy, $Mg/m^3$	Ereme temperaturasy, $^{\circ}C$	Gadagan zonasynyň giňligi, $eV$	Elektronlaryň hereketlenijiligi, $m^2/(V \cdot s)$	Deşijekleriň hereketlenijiligi, $m^2/(V \cdot s)$
1	PbS	7,61	1114	0,39	0,06	0,07
2	PbSe	8,15	1076	0,27	0,12	0,10
3	PbTe	8,16	917	0,32	0,18	0,09
4	<i>SnTe</i>	-	-	0,23	-	-

Gurşunyň halkogenidleriniň ýuka gatlaklary we polikristal gatlaklary infragyzyň çäklerde ýokary fotoduýgurlygy bilen tapawutlanýarlar. Şoňa görä olaryň esasynda duýgur fotorezistorlar, pes temperaturalarda inžeksion lazerleri taýýarlamak bolýar. Ondan başga-da  $PbTe - SnTe$  gaty garyndylar elektronikada giňden ulanylýar. Ol gaty garyndylaryň dürli temperaturalarda  $\Delta E$  gadagan zonanyň giňliginiň  $x$  düzüme baglylygyň grafikleri 5.21-nji çyzgyda görkezilýär.

Ol gaty garyndylaryň spektral diapazony 30  $mkm$ -e çenli ýetýän inžeksion lazerleri taýýarlamağa mümkinçilik berýär. Şeýle hem gurşunyň we galaýynyň düzüminden alynýan gaty garyndylar ýarymgeçiriji termoelektrik generatorlaryň termoelementlerini taýýarlamak üçin hem giňden ulanylýar.



**5.21-nji çyzgy.  $Pb_{1-x}Sn_xTe$  gaty garyndylarda  $\Delta E$  gadagan zolagyň giňliginiň dürli temperaturalarda  $x$  düzüme baglylygy**

## 5.8. Ýarymgeçiriji materiallary monokristal görnüşde almagyň usullary

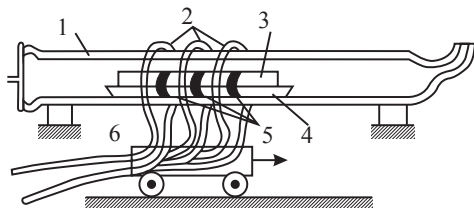
Ýarymgeçiriji materiallardan dürli abzallar we enjamlar taýýarlananda olary, köplenç, monokristal görnüşde ulanýarlar. Ýarymgeçiriji materiallary keseki garyndylardan arassalamak we olary monokristal görnüşde almak bolsa ýarymgeçiriji tehnikasynda iň kyn we çylşyrymly işleriň biridir. Şoňa görä ýarymgeçiriji materiallaryň öz fiziki we himiki häsiýetlerine baglylykda monokristal almagyň aşakdaky usullary giňden ulanylýar:

1. Kadaly ugrukdyrylan kristallaşma usuly;
2. Monokristaly erginden çekmek usuly;
3. Zolaklaýyn eretmek usuly;
4. Kristallary gaz fazadan ösdürmek usuly;
5. Metallaryň erginlerindäki garyndylardan kristal almak usuly;
6. Kristaly epitaksial ösdürmek usuly (bir maddanyň kristal gatlagynyň üstüne berlen ýarymgeçirijiniň kristalyny ösdürmek).

Bu usullaryň ilkinji üçüsi germaniniň, kremniniň we ereme temperaturasynda çenli eremeýän ýarymgeçiriji birleşmeleriň kristallary-

ny almak üçin giňden ulanylýar. Olardan has giňden ulanylýan zolaklaýyn eretmek we erginden çekip almak usullaryna aýratynlykda seredeliň.

**Zolaklaýyn eretme usuly.** Germanini keseki garyndylardan aras-salamak we onuň monokristalyny köpeltmek üçin ulanylýan zolaklaýyn eretme usulynyň gurluş shemasy 5.22-nji çyzgyda görkezilýär.



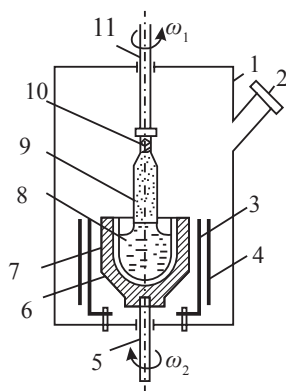
**5.22-nji çyzgy.** Zolaklaýyn eretme usulynyň gurluşy. 1 – kwars turbasy; 2 – ýokary ýygylkly generatoryň konturynyň sarymlary; 3 – arassalanýan germaniniň guýulmasy; 4 – grafit gaýyja; 5 – erginli zolaklar; 6 – hereketlendirilýän arabajyk

Zolaklaýyn eretme usulynda ýarymgeçiriji materiallaryň keseki garyndy atomlardan arassalamak hadysasy hem bolup geçýär. Ol hadysa garyndylaryň segregasiýa hadysasyna esaslanýar, ýagny deňagramlaşan ýagdaýda bolan suwuk we gaty fazalarda garyndylaryň ereýşi deň bolmaýar. Özara sepleşikde bolan gaty we suwuk fazalardaky garyndylaryň sanlarynyň gatnaşygyna paýlanma koeffisiýenti diýilýär:

$$K_0 = \frac{N_{\text{gaty}}}{N_{\text{suwuk}}} . \quad (5.40)$$

Germanide we kremnide köp garyndylar üçin  $N_{\text{suwuk}} > N_{\text{gaty}}$ , şoňa görä  $k < 1$ . Şol ýagdaýda erginli zolak ýarymgeçiriji sterženiň uzaboýuna hereket etdirilende, keseki garyndylar başlangyç uçdan ahyrky ujuna (çepden saga) geçirilýär. Ýarymgeçirijiniň doly arassalanmagy üçin bu geçiriliş bir ugur boýunça 7 – 8 gezek gaýtalanýar. Bu usul germaniý üçin geçirilende erginli zolagynyň giňligi 40 – 50 mm, guýmanyň uzynlygy, takmynan, 1000 mm alynýar we wodorod atmosferasynda geçirilýär. Arabajygyň (erginli zolagyň) hereket tizligi 50 – 100 mkm/sek bolýar. Erginli zolaklaryň sanyny köpeldip, geçişleriň sanyny azaldyp bolýar. Meselem, erginli zolaklaryň sany üçe deň bolsa, bir gezekki geçiş üç geçişe deň bolýar. Tejribeler geçirilende erginiň temperaturasy hemişelik saklanmaly we onuň temperaturasy ýarymgeçirijiniň ereme temperaturasyna deň bolmalydyr.

**5.8.2. Monokristallary erginden çekip alma usuly.** Has ýokary hilli we uly ölçegli germaniniň we kremniniň monokristallary erginden çekip alma usuly bilen alynýar. Ol usulyň gurluş shemasy 5.23-nji çyzgyda görkezilýär.



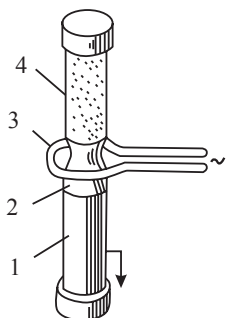
**5.23-nji çyzgy.** Monokristallary erginden çekip alma usulynyň gurluşy. 1 – işçi kamerasy; 2 – görülyän aýna; 3 – elektrik gyzdýryjy; 4 – ýylylyk ekranlary; 5 – tigeli aýlamak üçin ştok; 6 – grafit tigeli; 7 – kwars gaby; 8 – ergin; 9 – ösýän monokristallar; 10 – pelte; 11 – pelte berkidilýän ştok

Işçi göwrüm hökmünde içinde  $10^{-4}$  Pa wakuum döredilen ýa-da wodorod bilen doldurylan kamera hyzmat edýär. Ilki bilen ýokary hilli ýarymgeçiriji material ergin hala geçirilýär. Soňra monokristal pelte usullyk bilen ergine batyrylýar we onuň daşy eräp başlaýança erginde saklanylýar. Soňra ony aýlamak bilen ýokary galdyrylyp başlanýar. Peltäniň ujy bilen çekilen suwuk ergin kem-kemden doňup, pelte bilen artýan monokristal emele gelýär. Şonda peltäniň çekiliş tizligi  $10^{-5}$ – $10^{-6}$  m/s aralykda bolmaly. Bir deň diametrli monokristal çybygyny almak üçin erginiň temperaturasy  $0,1^{\circ}\text{C}$ -e deň bolan temperaturada hemişelik saklanmaly. Bu usul bilen germaniniň 100 mm diametrli monokristallaryny almak bolýar. Bu usulyň dowamynda garyndylary ulanmak bilen  $n$  görnüşli we  $p$  görnüşli, dürli konsentrasiýaly kristallary almak bolýar.

Kremniniň iri kristallaryny almak we ösdürmek üçin erginden çekmek we tigelsiz zolaklaýyn eretme usullary ulanylýar. Senagatda erginden çekip alma usuly bilen diametri 150 mm we uzynlygy 1 m deň bolan kremniniň monokristallaryny almak bolýar.

Belli bolşy ýaly, kremniniň ereme temperaturasy  $1414^{\circ}\text{C}$ . Bu temperaturada kremniý gaýyjak, tigel ýasalýan kwars we grafit materiallar bilen täsirleşip başlaýar we kremniniň karbidi ( $\text{SiC}$ ) emele gelýär. Şol sebäpli kremnide zolaklaýyn eretme usuly tigelsiz geçirilýär.

Onuň shemasy 5.24-nji çyzgyda görkezilýär. Bu usulda ergin zona aşakdan ýokarylygyna hereket etdirilýär.

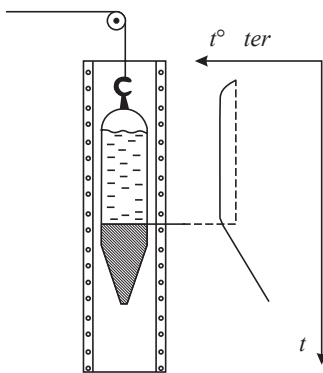


**5.24-nji çyzgy.** Tigelsiz eretme usuly. 1 – monokristal; 2 – eredilen zona; 3 – induktor; 4 – polikristal steržen

Bu usulda ergin zona iki sany gaty bölekleriň arasynda kremniniň üst dartyлма güýjüniň hasabyna dökülmän saklanýar.

**Kadaly ugrukdyrylan kristallaşma usuly.** Bu usul germaniniň, kremniniň we ereme temperaturasynda eremeyän ýarymgeçiriji birleşmeleriň monokristallaryny ösdürmekde ulanylýan usullaryň iň ýönekeýi hasaplanylýar. Bu usulda ovradylan ýarymgeçiriji material (polikristal) bir uýy çüýredilen kwarsta ýa-da aýna konteýnerde ýerleşdirilýär we onda wakuum döredilýär. Konteýneriň ýerleşdirilişine görä, bu usul iki görnüşde bolýar: gorizonta we wertika ugrukdyrylan kristallaşma usullary. Olaryň wertika görnüşiniň shemasy 5.25-nji çyzgyda görkezilýär.

Bu çyzgyda  $M$  – monokristaly,  $E$  – ergin haldaky ýarymgeçiriji materialy aňladýar. Şu usulda konteýner dik (wertika) elektrik



**5.25-nji çyzgy.** Kadaly ugrukdyrylan kristallaşma usulyň wertika görnüşü.  $a$  – turba şekilli elektrik peji;  $b$  – peçde temperaturanyň  $l$  uzynlyga görä paýlanyşy

peçde ýerleşdirilýär we ondaky ýarymgeçiriji material tutuşlygyna ergin hala geçirilýär. Soňra örän haýal tizlik bilen ( $5 \text{ mm/sag}$ ) konteýner aşaklygyna hereket etdirilýär. Şonda konteýneriň ujunda monokristal görnüş başlaýar. Ahyrynda tutuşlaýyn ýarymgeçiriji gaty monokristal hala geçmeli. Bu usulda-da zolaklaýyn eretme usulyndaky ýaly, ýarymgeçirijiniň keseki garyndy atomlardan bellibir derejede arassalanmasy hem bolup geçýär, ýagny olar guýmanyň aşaky ujundan ýokarky uja geçirilýär.





## 6.1. Materiallaryň magnit häsiýetleri barada esasy düşüňjeler

Hemme materiallaryň magnit häsiýetleri olaryň içki düzüminde bar bolan mikrotoklar bilen şertlendirilýär. Islendik atomlardaky elektronlar ýadronyň daşynda aýlanmak bilen aýlaw toguny döredýär, şonda elektronlaryň orbital magnit momenti ýüze çykýar:

$$P_m = i \cdot S = \frac{e}{T} \cdot S = e \cdot v \cdot S, \quad (6.1)$$

bu ýerde  $e$  – elektronyň zarýady;  $v$  – elektronyň aýlanma ýygylgy;  $S$  – aýlaw toguň içki meýdany.

Elektronlaryň öz okunyň daşynda aýlanmasy netijesinde bolsa olaryň spin magnit momenti döreýär.

Dürli materiallarda bu magnit momentler daşky magnit meýdany bilen dürli hili täsirleşýärler we şoňa görä dürli materiallaryň magnit häsiýetleri örän dürli-dürli bolýar. Hemme materiallar magnit häsiýetleri boýunça üç topara bölünýärler:

1. Diamagnetikler;
2. Paramagnetikler;
3. Ferromagnetikler.

Diamagnetik materiallara magnit syzyjylygy  $\mu < 1$  bolan materiallar degişli. Bu maddalara wodorod, inert gazlar, organiki birleşmeleriň köpüsi we birnäçe metallar (mis, sink, kümüş, altyn, simap, wismut, galliý, surma) degişlidir. Şular ýaly materiallarda magnit syzyjylygy  $\mu$  kiçi we daşky magnit meýdanynyň güýjenmesine bagly bolmaýar. Paramagnetik materiallarda magnit syzyjylygy  $\mu > 1$  we daşky magnit meýdanyň güýjenmesine bagly bolmaýar. Olara kislorod, azot oksidi, metallar Pt, Al, W, Mn, Sn degişlidir. Güýçli magnit materiallar bolan

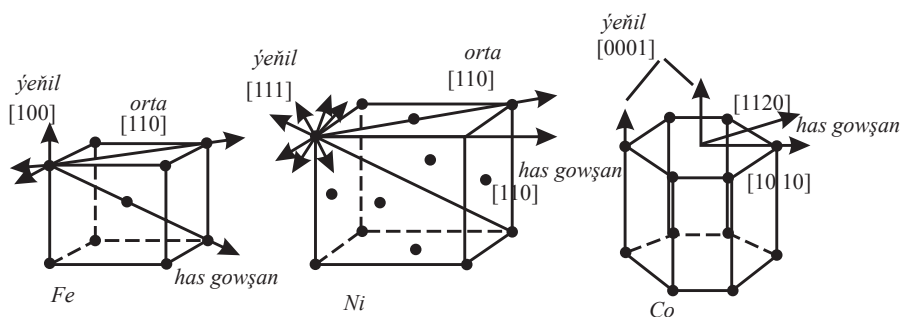
ferromagnet materiallarda magnet syzyjylyk  $\mu \gg 1$  we daşky magnet meýdanyň güýjenmesine güýçli bagly bolýar. Olara demir, nikel, kobalt metallar we ol metallaryň garyndylary degişli. Elektrotehnikada magnet materiallary hökmünde ferromagnet materiallary göz önünde tutulýar.

**Ferromagnet materiallarynyň aýratynlyklary.** Ferromagnet materiallarynyň güýçli magnet häsiýetleri olaryň içki çäkler – domen gurluşy bilen düşündirilýär. Domenler makroskopik çäkler bolup, her domeniň içinde daşky magnet meýdany täsir etmeýän ýagdaýynda öz-özünden magnitlenme bolup geçýär. Emma daşky magnet meýdanyň täsir etmedik ýagdaýynda dürli domenleriň magnet momentleri bitertip ugrukdyrylan bolup, olar özara kompensirlenýärler. Her domeniň ölçegleri takmynan  $0,001 \div 10 \text{ mm}^3$  bolup bilýär. Ferromagnet daşky magnet meýdanyň täsiri bilen magnitlenýän wagtynda aşakdaky hadysalar bolup geçýär:

1. Magnet momentiniň ugry daşky magnet meýdanyň ugry bilen kiçi burçy emele getirýän domenleriň göwrümi giňelýär (domenleriň çäkleriniň süýşmesi bilen);

2. Domenleriň magnet momentleriniň daşky magnet meýdanynyň ugruna görä öwrülmesi.

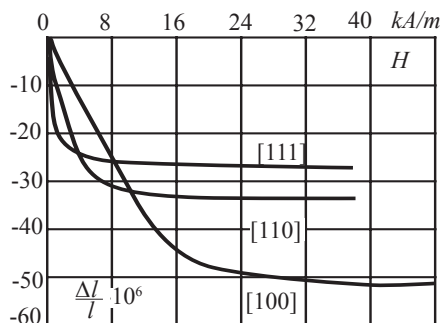
Ferromagnet materiallaryň monokristallarynyň magnitlenmesi anizotrop häsiýetli bolýar, ýagny olar bellibir oklara görä aňsat ýa-da kyn magnitlenýärler. 6.1-nji çyzgyda demriň, nikeliniň we kobaltynyň kristallarynda ýeňil, orta we has gowşan magnitlenmäniň ugurlary görkezilýär.



**6.1-nji çyzgy.** Demriň, nikeliniň we kobaltynyň monokristallarynda ýeňil, orta we has gowşan magnitlenmäniň ugurlary

Eger magnitlenmede anizotrop polikristal maddada ýüze çykýan bolsa, oňa magnitteksturasy diýilýär.

Ondan başga-da ferromagnitleriň monokristallary magnitlenende olaryň çyzykly ölçegleri üýtgeýär. Bu hadysa magnitstriksiýa hadysasy diýilýär. Bu hadysa hem anizotrop häsiýetde bolýar we ol polikristallik ferromagnitlerde hem ýüze çykýar. Esasy üç ferromagnit elementleriň arasynda has uly magnitstriksiýa nikelde ýüze çykýan 6.2-nji çyzgyda nikel üçin kristalyň üç ugry boýunça magnitostriksion deformasiýanyň egri çyzyklary görkezilýär.



**6.2-nji çyzgy. Nikeliň kristallarynda üç ugur boýunça magnitostriksion deformasiýanyň egri çyzyklary**

Dürli materiallarda magnitostriksion deformasiýanyň adaty položitel (magnit meýdanyň ugruna süýnmesi) ýa-da otrisatel bolup biler. Şol bir materialda (meselem, demirde) magnit meýdanyň güýjlenmesiniň üýtgemegi bilen magnitostriksion deformasiýanyň alamaty hem üýtgäp bilýär.

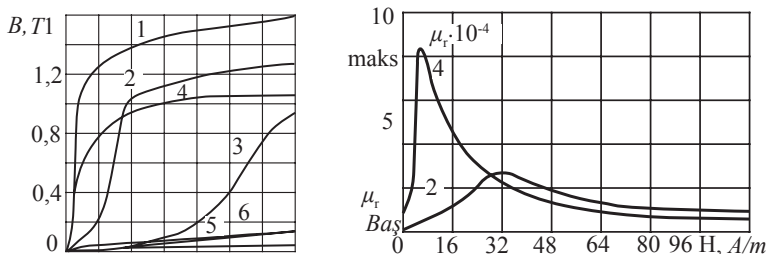
Ferromagnit materiallarda magnitlenmäniň bolup geçişi adatça magnitlenmäniň  $B(H)$  baglanyşygynyň egri çyzygy bilen häsiýetlendirilýär. Bu ýerde:  $H$  – daşky magnit meýdanynyň güýjlenmesi,  $\frac{A}{m}$ ;  $B$  – materialdaky magnit meýdanyň induksiýasy,  $Tl$ .  $B$  bilen  $H$ -yň arasynda:

$$B = \mu_0 \mu_r H \quad (6.2)$$

baglanyşyk bolýar. Bu ýerde  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{Gn}{m}$  – magnit hemişeligi;  $\mu_r$  – materialyň magnit syzyjylygy.

$$(6.2) \text{ formula görä: } \mu_r = \frac{B}{\mu_0 H} \quad (6.3)$$

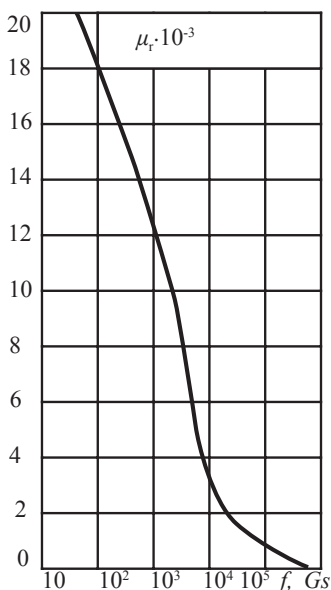
6.3-nji çyzgyda dürli magnit materiallarda  $B$  magnit induksiýasynyň we  $\mu_r$  magnit syzyjylygynyň daşky magnit meýdanyň güýjenmesine baglylygynyň egri çyzyklary görkezilýär.  $B=f(H)$  baglanyşygyň egri çyzygyna magnitlenmäniň esasy egri çyzygy diýilýär.



**6.3-nji çyzgy.** Dürli magnit materiallarda magnit induksiýasynyň we magnit syzyjylygynyň daşky magnit meýdanyň güýjenmesine baglylygynyň egri çyzyklary.

1-ýokary hilli arassa demir; 2-arassa demir (99,98% Fe);  
3-tehniki arassa demir (99,92% Fe); 4-permalloý (78% Ni);  
5-nikel; 6-demir-nikel splawy (26% Ni)

Örän gowşak magnit meýdanynda ( $H \approx 0$ ) kesgitlenen  $\mu_{rb}$  magnit



**6.4-nji çyzgy.** Permalloýda dinamiki magnit syzyjylygynyň gowşak meýdanda  $f$  ýygylýa baglylygy

syzyjylyga başlangyç magnit syzyjylygy diýilýär. Magnit syzyjylygynyň iň uly bahasyna  $\mu_{rmax}$  maksimal magnit syzyjylyk diýilýär. Üýtgeýän magnit meýdanlarda ferromagnetikleriň esasy häsiýeti dinamiki magnit syzyjylyk hasaplanylýar:

$$\mu_r = \frac{B_{max}}{H_{max}} \quad (6.4)$$

Üýtgeýän magnit meýdanyň  $f$  ýygylýgynyň artmagy bilen dinamiki magnit syzyjylyk peselýär. Ol baglanyşyk permalloý üçin 6.4-nji çyzgyda görkezilendir.

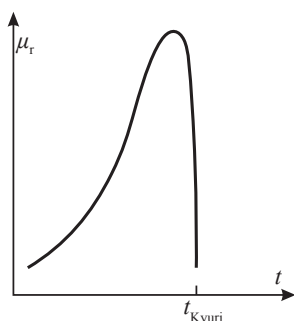
Ýygylýgynyň ösmegi bilen  $\mu_r$ -niň peselmegi magnit hadysalaryň inersiallygy bilen düşündirilýär. Ferromagnet materiallaryň magnit syzyjylygy temperatura hem güýçli bagly bolýar. Ol baglanyşygyň umumy görnüşi 6.5-nji çyzgyda görkezil-

ýär. Ol baglanyşygyň grafigi Kýuri temperaturasynda ýakyn temperaturalarda maksimumdan geçýär. Arassa demir üçin Kýuri nokady  $768^{\circ}\text{C}$ , nikel  $358^{\circ}\text{C}$ , kobalt üçin  $1131^{\circ}\text{C}$ .

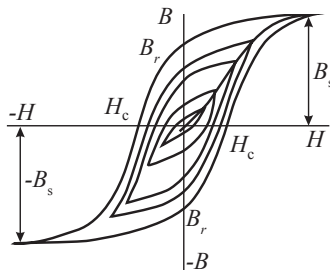
Kýuri nokadynan ýokary temperaturalarda ýylylyk hereketiň güýçlenmegi bilen domen gurluş bozulýar we material ferromagnit häsiýetini ýitirýär. Magnit syzyjylygyň temperatura baglylygyny häsiýetlendirmek üçin magnit syzyjylygyň temperatura koeffisiýenti  $\alpha_{\mu_r}$  ulanylýar:

$$\mu_r TK = \alpha_{\mu_r} = \frac{1}{\mu_r} \cdot \frac{d\mu_r}{dt} \quad (6.5)$$

**Magnit gisterezisi.** Eger ferromagnit material doýgun hala çenli magnitlendirilse, soňra bolsa daşky magnit meýdanyň güýjenmesi kem-kemden azaldylsa, onda  $B$  induksiýa hem peseler, emma bu azalma magnitlenmäniň esasy egri çyzygy boýunça däl-de, başga  $B_s B_r$  egri çyzyk boýunça bolup geçer. Şonda  $H=0$  bolanda magnit induksiýa nola deň bolman  $B_r$  bahany alar.  $B_r$  baha bolsa galyndy induksiýa diýilýär (6.6-njy çyzygy).



**6.5-nji çyzygy. Ferromagnit materiallarda magnit syzyjylygynyň temperatura baglylygynyň umumy görnüşi**



**6.6-njy çyzygy. Üýtgeýän magnit meýdanyň amplitudasynyň dürli bahalarynda gisterezis halkalary we ferromagnetigiň magnitlenmesiniň esasy egri çyzygy**

$B_r$  galyndy induksiýany doly aýyrmak üçin daşky magnit meýdanyň ugruny üýtgetmeli. Şonda magnit meýdanyň  $H_c$  bahasynda  $B_r=0$  bolar. Magnit meýdanyň güýjenmesiniň bu bahasynda koersitiw güýç diýilýär. Şeýlelikde, magnitlendiriji üýtgeýän meýdanyň her doly siklinde (periodynda)  $B=f(H)$  baglanyşykda ýapyk şekil emele

gelyär. Ol şekile gisterezis halkasy diýilýär. Onuň ýüze çykmany  $B$  magnit induksiýanyň  $H$  magnit güýjenmesinden yza galmasy bilen düşündirilýär. Magnit meýdanynyň amplitudasyny üýtgetmek bilen gisterezis halkalaryň toplumyny almak bolýar. Olaryň her biriniň depesi magnitlenmäniň esasy egri çyzygynyň üstünde ýatýar.  $B_r$  galynydy magnit induksiýa we  $H_c$  koersitiw güýç her bir magnit materialda iň uly gisterezis halkanyň esasy parametrleri bolup hyzmat edýär (6.6-njy çyzygy). Olar dürli magnit materiallarda dürli bolýarlar. Hemme magnit materiallar  $H_c$  koersitiw güýjüň we  $\mu_r$  magnit syzyjylygynyň bahalaryna görä iki topara bölünýär:

1. Uly magnit syzyjylykly we kiçi koersitiw güýçli magnit materiallara ýumşak magnit materiallar diýilýär.

2. Uly koersitiw güýji bolan we uly bolmadyk magnit syzyjylykly materiallara bolsa gaty magnit materiallar diýilýär.

## 6.2. Magnitli materiallarda energiýa ýitgileri

Ferromagnit materiallarda magnitlenme gaýtalanyp durýan ýagdaýlarda, ýagny üýtgeýän magnit meýdanlarynda hemişe ýylylyk energiýa ýitgileri ýüze çykýar. Olar bolsa iki görnüşde bolýarlar:

1. Gisterezise bolan ýitgiler;

2. Dinamiki ýitgiler.

Gisterezise bolan ýitgileri her bir magnitli materialynda statistiki gisterezis halkasynyň meýdany bilen kesgitlenilýär. Ol meýdan näçe uly bolsa, ýitgi hem uly bolýar. Gisterezise sarp edilýän ýitgileri bir aýlawda we göwrüm birliginde hasaplamak üçin aşakdaky empirik formula hödürlenilýär:

$$W_H = \eta B_{\max}^n, \quad (6.6)$$

bu ýerde  $\eta$  – materiala bagly koeffisiýent;  $B_{\max}^n$  – siklin dowamynda magnit induksiýanyň maksimal bahasy ( $n-1, 6 \div 2$  dereje görkeziji).

Gisterezise sarp edilýän energiýanyň kuwwaty:

$$P_H = B_{\max}^n fV, \quad (6.7)$$

bu ýerde  $f$  – toguň ýygylgy;  $V$  – ferromagnitiň göwrümi.

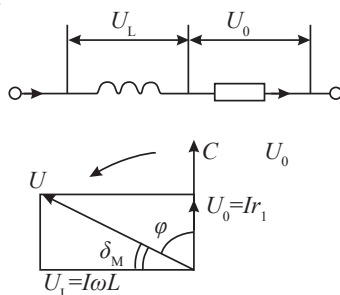
Magnitli materiallarda dinamiki ýitgiler induksirlenýän köwlenme toklar bilen döredilýär. Köwlenme toklara sarp edilýän ýitgiler ferromagnitiň elektrik garşylygyna bagly bolýar. Garşylygynyň uly bol-

magy bilen köwlenme toklar peselýär we ýitgi bolsa azalýar. Köwlenme toklara sarp edilýän energiýanyň kuwwaty aşakdaky empirik formula bilen kesgitlenýär:

$$P_f = \xi B_{\max}^2 f^2 V, \quad (6.8)$$

bu ýerde  $\xi$  – ferromagnitiň tipine (udel garşylygyna) bagly koeffisiýent.

(6.7) we (6.8) formulalardan görnüşi ýaly, gisterezise sarp edilýän ýitgileriň kuwwaty  $P_H$  ýygylgyň birinji derejesine, köwlenme toklara bolan ýitgileriň  $P_f$  kuwwaty bolsa ýygylgyň ikinji derejesine bagly bolýar. Şoňa görä ýokary ýygylyklarda, esasan, köwlenme toklara bolan ýitgileri göz önünde tutmaly. Üýtgeýän toguň zynjyrlarynda induktiw tegekde ýitgi kuwwatyna baha bermek üçin magnit ýitgileriniň  $\delta_m$  burçunyň  $\operatorname{tg} \delta_m$ -ni peýdalanýarlar. Içi magnit serdeçnikli induktiw tegegiň hususy sygymy we sarymlaryň garşylygy hasaba alynmasa, onda ony 6.7-nji çyzgyda görkezilen ekwiwalent shema bilen aňlatmak bolar.



**6.7-nji çyzgy.** Magnit serdeçnikli induktiw tegegiň ekwiwalent shemasy we wektor diagrammasy

Şeýle bolanda ekwiwalent shemanyň wektor diagrammasyndan alarys:

$$\operatorname{tg} \delta_m = \frac{r_1}{\omega L}, \quad (6.9)$$

bu ýerde  $L$  – ideal tegegiň induktiwligi;  $\omega = 2\pi f$  – dowamly ýygylgyk;  $r_1$  – arassa işjeň garşylyk.

(6.9) formula görä arassa işjeň garşylyk:

$$r_1 = \omega L \operatorname{tg} \delta_m. \quad (6.10)$$

Onda seredilýän yzygider ekwiwalent shemada görkezilen magnit ýitgileriň aktiw kuwwatyny aşakdaky formula bilen kesgitlemek bolýar:

$$P_a = I^2 r_1 = I^2 \omega L \tan \delta_m. \quad (6.11)$$

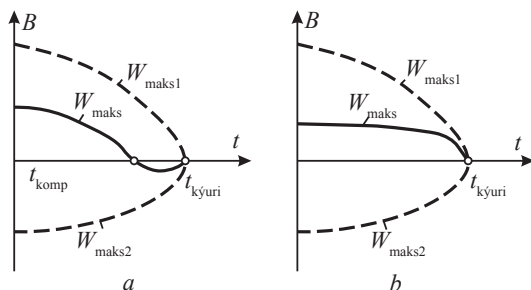
Belli bolşy ýaly, köwlenme toklar hemişe magnit meýdanynyň ugruna perpendikulýar üstde ýüze çykýar. Üýtgeýän magnit akymynyň täsiri bilen serdeçnigiň okuna görä öwrülýän islendik silindr şekilli konturda öz-özünden induksiýanyň elektrik hereketlendiriji güýji ýüze çykýar (6.8-nji çyzgy) we ol ýygylýa proporsional bolýar:

$$U \sim E \sim f B_m. \quad (6.12)$$

Joul – Lensiň kanuny boýunça şol konturda ýüze çykýan aktiw kuwwat:

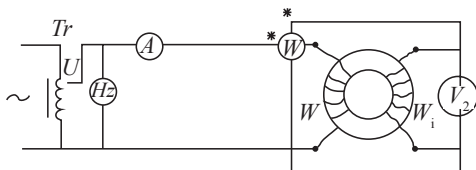
$$P_a = E^2 \gamma \sim \gamma f^2 B_m^2. \quad (6.13)$$

Şeýlelikde, (6.9) empirik formula bilen gabat gelýän formula alynýar. Bu ýerde  $\gamma$  – udel elektrik geçirijilik.



**6.8-nji çyzgy.** Ferromagnit serdeçnigiň kese-kesiginde köwlenme toklaryň paýlanyş shemasy. a – tutuşlaýyn serdeçnik; b – listlerden ýygananan serdeçnik

**Magnit ýitgilerini ölçemegiň wattmetr usuly.** Magnitli materiallarda magnit ýitgilerini kesgitlemegiň iň ýönekeý we giňden ulanylýan usullaryndan biri wattmetr usulydyr. Bu usulda derňelýän magnitli materialdan halka şekilli serdeçnik ýasalýar. Ol serdeçnigiň üstünde magnitlendiriji  $\omega$  sarym we  $\omega_i$  ölçeýji sarym saralýar. Bu usul boýunça ölçegler 6.9-njy çyzgyda görkezilen shema boýunça ýerine ýetirilýär.



**6.9-njy çyzgy.** Magnitli materiallarda magnit ýitgilerini kesgitlemegiň wattmetr usulynyň shemasy



Wattmetriň yzygider tegegi magnitlendiriji  $\omega$  sarym bilen yzygider, wattmetriň parallel tegegi bolsa  $\omega_i$  ölçýji sarym bilen parallel birikdirilýär. Magnitlenmä bolan ýitgiler magnit induksiýasynyň sinusoidal ýagdaýynda kesgitlenýär. Şol ýagdaýda wattmetriň görkezmesi aşakdaky ýaly bolýar:

$$P_w = UI \cos \varphi, \quad (6.14)$$

bu ýerde  $U$  -  $\varphi$  naprýaženiýäniň täsir ediji bahasy (woltmetriň görkezijisi boýunça);  $I$  – magnitlendiriji toguň birinji garmonikasyň täsir ediji bahasy (ampermetriň görkezmesi boýunça);  $\varphi$  –  $I$  we  $U$ -nyň fazalarynyň tapawudy.

Bu shemada  $\varphi$  burçy  $90^{\circ}$ -a ýakyn bolýandygy sebäpli, kiçi kosi-nusly wattmetri ulanmaly. Ulanylýan shemada wattmetriň görkezýän kuwwatyna serdeçnikde bolýan magnitlenme ýitgisinden başga wattmetriň öz ýitgisi, wattmetriň parallel sarymynyň ýitgisi we  $\omega_i$  ölçýji sarymyň özündäki ýitgi hem girýär. Şol sebäpli magnitlenmä bolan ýitginiň kuwwatyny aşakdaky formula bilen kesgitläp bolýar:

$$P = P_w \frac{\omega}{\omega_i} - U^2 \frac{R_v + R_w}{R_v \cdot R_w}, \quad (6.15)$$

bu ýerde  $R_v$  – woltmetriň içki garşylygy;  $R_w$  – wattmetriň parallel tegeginiň garşylygy.

(6.15) formula bilen kesgitlenýän magnit ýitgileriniň kuwwaty gisterezise sarp edilýän ýitgileri we köwlenme toklarynyň magnit ýitgileriniň jemleýji kuwwaty bolýandygyny bellemeli. Hakykatda, wattmetr usuly bilen ol ýitgileriň kuwwatyny aýratynlykda hem kesgitläp bolýar. Onuň üçin jemleýji kuwwaty birdeň magnit induksiýasynda we iki dürli  $f_1, f_2$  pes ýygylyklarda ölçemeli. Şol ýagdaýda (6.8) formulany aşakdaky ýaly aňlatmak bolýar:

$$P_g = \alpha f, \quad (6.16)$$

bu ýerde  $\alpha = \eta B_m V$  - hemişelik. (6.9) formulany bolsa

$$P_k = \beta f^2. \quad (6.17)$$

görnüşde ýazmak bolýar. Bu ýerde  $\beta = \varphi B_m^2 V$  - hemişelik.

Onda jemleýji ýitginiň kuwwaty:

$$P = P_g + P_k = \alpha f + \beta f^2. \quad (6.18)$$

Bu deňligi iki dürli  $f_1$  we  $f_2$  ýygylyklar üçin ýazalyň:

$$\begin{cases} P_1 = \alpha f_1 + \beta f_1^2, \\ P_2 = \alpha f_2 + \beta f_2^2. \end{cases} \quad (6.19)$$

Bu deňlemeler ulgamyny  $\alpha$  we  $\beta$  koeffisiýentlere görä bilelikde işlemeli we ondan soňra (6.16) we (6.17) formulalar esasynda  $P_g$  we  $P_k$  -ni aýratynlykda kesgitlemek bolýar.

### 6.3. Ýumşak magnit materiallary

Ýumşak magnit materiallary ýokary magnit syzyjylygy, ýokary bolmadyk koersitiw güýji we gisterezise sarp edilýän ýitgileriň az mukdary bilen tapawutlanýarlar. Ol magnit materiallary transformatorlaryň, elektromagnitleriň we ölçeg abzallarynyň serdeçniklerini taýýarlamak üçin giňden ulanylýar. Köwlenme toklara bolan ýitgileri azaltmak üçin transformatorlaryň serdeçnikleri biri-birinden elektroörtükli ýumşak magnit listlerinden taýýarlanylýar. Ýumşak magnitli materiallaryň birnäçesine seredeliň.

**Demir (pes uglerodly polat).** Tehniki taýdan arassa demriň düzüminde, adatça, az mukdarda, uglerod, kükürt, marganes, kremniý we beýleki elementler bolýar. Olar onuň magnit häsiýetlerini peseldýär. Tehniki arassa demriň udel garşylygynyň has pesligi sebäpli, ol has seýrek ulanylýar. Daşary ýurtlarda bu materiala «armko-železo» diýilýär. Pes uglerodly elektrotehniki polat listleri tehniki taýdan arassa demriň bir görnüşi bolup, galyňlygy  $0,2 \div 4 \text{ mm}$  list görnüşinde taýýarlanylýar. Onuň düzüminde  $0,04\%$ -den köp bolmadyk uglerod we  $0,6\%$ -den köp bolmadyk beýleki garyndylar bolýar. Maksimal magnit syzyjylygy  $3500 \div 4500$ . Koersitiw güýji, degişlilikde,  $H_c = 100 \div 650 \frac{A}{m}$ .

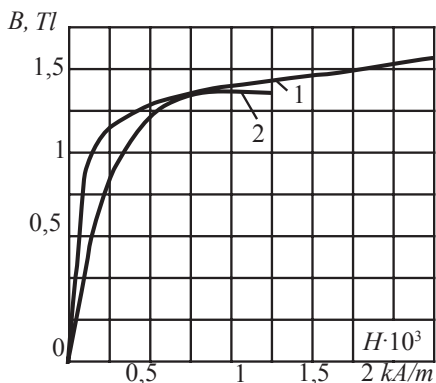
**Kremnili elektrotehniki polat.** Ol has giňden ulanylýan ýumşak magnit materialdyr. Bu poladyň düzümine kremniniň goşulmagy bilen onuň udel garşylygy köpeliýär we şol sebäpli köwlenme toklara sarp edilýän ýitgiler azalýar. Ondan başga-da kremniý uglerodly grafit görnüşde bölünip aýrylmagyna we polat turşusynyň doly aýrylmagyna getirýär. Bu bolsa  $\mu_r$  magnit syzyjylygyň artmagyna,  $H_c$ -niň peselmegine we gisterezise bolan ýitgileriň peselmegine getirýär. Kremniniň mukdary  $4\%$ -e ýetýänçe poladyň mehaniki häsiýetleri ýeterlik derejede kanagatlanarlykly bolýar. Emma kremniý  $5\%$ -den köp bolsa, polat port bolýar. Elektrotehniki poladyň dykzylygynyň we udel elektrik geçirijiliginiň goşulan kremniniň mukdaryna baglylygy 6.1-nji tablisada berilýär. Ol tablisadan görnüşi ýaly, elektroteh-

niki poladyň udel elektrik garşylygy ondaky kremniniň mukdarynyň artmagy bilen ösýär.

6.1-nji tablisa

Kremniniň mukdary, %	Dykyzlygy, $mg/m^3$	Udel elektrik garşylygy, $\rho$ , $mkOm \cdot m$
0,4	7,85	0,14
0,4÷0,8	7,82	0,17
0,8÷1,8	7,80	0,25
1,8÷2,8	7,75	0,40
2,8÷3,8	7,65	0,50
3,8÷4,8	7,55	0,60

6.10-njy çyzgyda elektrotehniki polatda magnit induksiýanyň magnit meýdanynyň güýjenmesine baglylygy görkezilýär.



6.10-njy çyzgy. Elektrotehniki polatda magnit induksiýanyň magnit meýdanynyň güýjenmesine baglylygy

1) 1521 markaly 0,35mm galyňlykly.

2) 1572 markaly 0,1mm galyňlykly.

Kremnili elektrotehniki poladyň markasynda 4 san ulanylýar:

1-nji san 1 – gyzzgyn togalanan izotrop; 2 – sowuk togalanan, izotrop; 3 – sowuk togalanan, anizotrop, gapyrga teksturaly.

2-nji san – kremniniň mukdaryny görkezýär: 0 – 0,4% çenli Si; 1–0,4%-0,8% Si; 3 – 1,8%-2,8% Si; 4 – 2,8%–3,8% Si; 5–3,8%–4,8% Si.

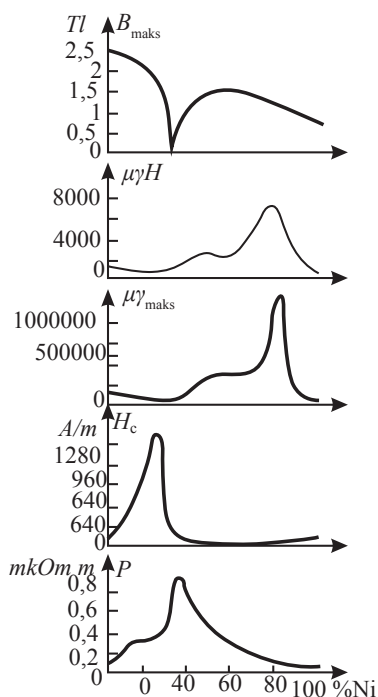
3-nji san – magnit ýitgilerini: 0 – udel magnit ýitgi  $B=1,7$  Tl we  $f=50$  Gs ( $P_{1,750}$ ; 1– $B=1,5$  Tl we  $f=50$  Gs ( $P_{1,550}$ ; 2 –  $B=1,0$  Tl we  $f=400$  Gs; 6 – magnit induksiýasy gowşak magnit meýdanynda

$H=0,4\frac{A}{m}$  ( $B_{0,4}$ ); 7– magnit induksiya aram magnit meýdanynda  $H=10\frac{A}{m}$  ( $B_{10}$ ).

**Permalloy.** Ol demir we nikel garyndysy bolup, gowşak magnit meýdanynda örän uly başlangyç magnit syzyjylygy bilen tapawutlanýar. Ol iki görnüşde bolýar:

1. Ýokary nikelli permalloý – 70-83% Ni;
2. Pes nikelli permalloý – 40-50% Ni we galany Fe.

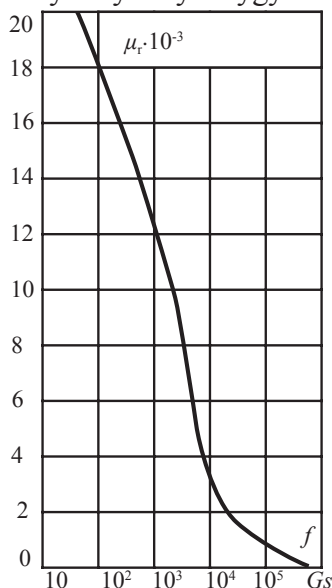
Permalloyň esasy magnit häsiýetleri we udel garşylygy ondaky nikeliň mukdaryna bagly bolýar. Ol baglanyşyklar 6.11-nji çyzgyda görkezilýär. In uly magnit syzyjylyk 78,5% Ni himiki düzümlü garyndyda ýüze çykýar.



**6.11-nji çyzgy. Demir-nikel garyndylarda (permalloýda) magnit häsiýetleriň we udel garşylygyň nikeliň mukdaryna baglylygy**

Ýokary nikelli permalloýda  $\mu$  magnit syzyjylyk pes nikelli permalloý bilen deňeşdirilende birnäçe esse uly bolýar. Onuň udel garşylygy bolsa pes nikelli permalloýyňkydan, takmynan, üç esse kiçi bolýar. Şoňa görä ýokary ýygylýklarda pes nikelli permalloý ulanmak amatly bolýar. Ondan başga-da permalloýda magnit syzyjylyk ýygylýgyň art-

magy bilen çalt peselýär (6.12-nji çyzgy). Ol udel garşylygynyň pesdigi sebäpli, köwlenme toklaryň uly bolýandygy bilen düşündirilýär.



**6.12-nji çyzgy. Permalloyda dinamiki magnit syzyjylygynyň gowşak meýdanda ( $H=0,8 \frac{A}{m}$ ) ýygylga baglylygy**

Permalloyyň magnit häsiýetlerine keseki garyndylar hem uly täsir edýär. Meselem, molibden we hrom onuň udel garşylygyny we başlangyç magnit syzyjylygyny ýokarlandyrýar, deformasiýa duýgulygyny bolsa peseldýär.

Dürli görnüşli permalloýlar markalananda aşakdaky harplar ulanylýar:

H – nikel; K – kobalt; M – marganes; X – hrom; C – kremniý; Д – mis; Y – häsiýetleri ýokarlandyrylan garyndylar; П – gönüburçlukly gisterezis halkasy.

**Permalloylaryň ulanylyşy.** 45H we 50H garyndylar kiçi göwrümlü güýç transformatorlaryň serdeçniklerini, drosselleri, rele we magnit zynjyrlarynyň böleklerini taýýarlamak üçin ulanylýar. 50HXC garyndylardan impuls transformatorynyň serdeçnigi, ses we ýokary ýygylkda işleýän aragatnaşyk enjamlary taýýarlanylýar. 79HM, 80HXC we 76HXД gaty garyndylar kiçi göwrümlü transformatorlaryň serdeçniklerini, rele we magnit ekranlaryny taýýarlamakda ulanylýar. 0,02 mm galýňlyklar impuls transformatoryň serdeçnigini, magnit güýçlendirijiler-

de, hasaplaýjy maşynlaryň ýat öýjüklerinde ulanylýar. 6.2-nji tablisada permalloýlaryň birnäçe görnüşleriniň esasy häsiýetleri berilýär.

6.2-nji tablica

**Permalloýyň görnüşleri we häsiýetleri**

Topar-lar	Marka	Önümiň görnüşü	Ga-lyňly-gy, mm	$\mu_{rH}$	$\mu_{rmax}$	$H_c, \frac{A}{m}$	$B_{max}, Tl$	$\rho, mkm. Om \cdot m$
Garyn-dysyz, pes nikelli	45H 50H	Sowuk ýaýylan lenta Gyzgyn ýaýylan listler Çybyk	0,02-2,5 3-22 8-10	1700-3000	16000-35000	32-10	1,5	0,45
Garyn-dyly, pes nikelli	50HXC	Sowuk ýaýylan lenta	0,02-1,00	1500-3200	15000-30000	20-8	1,00	0,90
Garyn-dyly, ýokary nikelli	79HM 80HXC 76HXД 79HM	Sowuk ýaýylan lenta Gyzgyn ýaýylan lenta Çybyk	0,02-2,5 3-22 8-10	16000-35000	50000-220000	5,2-1,0	0,65	0,55
Super-malloý, 79% Ni, 5% Mo, 15% Fe, 0,5% Mn	-	Listler	0,35	100000	B=0,3 Tl bolanda 1500000 çenli	0,3	0,80	0,60

Bu tablisadan görnüşü ýaly, supermalloý diýip atlandyrylýan permalloýyň örän ýokary magnit häsiýetleri bar.

**Alsiferler.** Olar demriň kremnili we alýuminli garyndysydyr. Olaryň optimal düzümi: 9,5% Si, 5,6% Al, galany Fe. Ol gaty we port bolýar. Ondan dürli şekilli önümler eredilip guýmak usuly bilen alynýar. Alsiferiň esasy häsiýetleri:

$\mu_{rH}=35500$ ;  $\mu_{rmax}=120000$ ;  $H_C=1,8 \frac{A}{m}$ ;  $\rho=0,8 \text{ mkmOm}\cdot\text{m}$ . Galyňlygy 2 – 3 mm bolan alsifer magnit ekranlary port bolandygy sebäpli, eredilip guýma usuly bilen taýýarlanylýar. Alsiferiň portlugy ony owardyp, külke görnüşinde ýokary ýygylýkly preslenen serdeçnikleri taýýarlamaga mümkinçilik berýär.

## 6.4. Ýörite ferromagnetikler. Ferritler

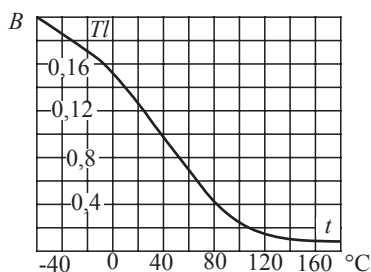
**Ýörite ferromagnetikler.** Ferromagnit materiallarynyň arasyndan ulanylyşy içki gurluşyna we himiki düzümine baglylykda ýüze çykýan magnit häsiýetleriniň aýratynlyklaryna esaslanýan materiallary saýlamak mümkin. Ol materiallara aşakdaky ferromagnit materiallar degişli:

1. Magnit meýdanynyň güýjenmesi üýtgände magnit syzyjylygynyň az üýtgemesi bilen tapawutlanýan garyndylar;
2. Magnit syzyjylygynyň temperatura güýçli baglylygy bilen tapawutlanýan garyndylar;
3. Ýokary magnitostriksiýaly garyndylar;
4. Aýratyn ýokary doýgun magnit induksiýaly ferromagnit garyndylar.

*1-nji topara* perminwar diýlip atlandyrylýan garyndy degişlidir. Onuň düzümi 29,4% Fe, 45% Ni, 25% C<sub>0</sub> we 0,6% Mn. Ol garyndy 1000°C-de bişirilýär, ondan soň 400 – 500°C-de saklanyp, haýallyk bilen sowadylýar. Perminwaryň uly bolmadyk koersitiw güýji bolýar. Onuň başlangyç magnit syzyjylygy 300 we ol bahany  $B=0,1 \text{ Tl}$  bolanda magnit güýjenme  $250 \text{ A/m}$  çenli üýtgände hemişelik saklanýar. Magnit syzyjylygyny has hemişelik saklaýan garynda izoperm diýilýär. Onuň düzümine demir, nikel we alýumin ýa-da mis girýär. Izopermiň magnit syzyjylygy  $\mu=30-80$  aralygynda bolup, magnit meýdanyň güýjenmesi birnäçe yüz esse  $\frac{A}{m}$  çenli üýtgese-de ol kän üýtgemeyär.

*2-nji topara* Ni–Cu, Fe–Ni esasyndaky ýa-da Fe–Ni–Cr termomagnit garyndylar degişli. Bu materiallar magnitoelektrik abzalarda hemişelik magnitlerde magnit induksiýasynyň ýa-da geçiriji simleriň garşylygynyň temperatura bagly ýüze çykýan nätaklyklary düzetmek üçin ulanylýar. Magnit syzyjylygyň aýdyň temperatura baglylygyny almak üçin Kýuri nokadynyň töwereginde fer-

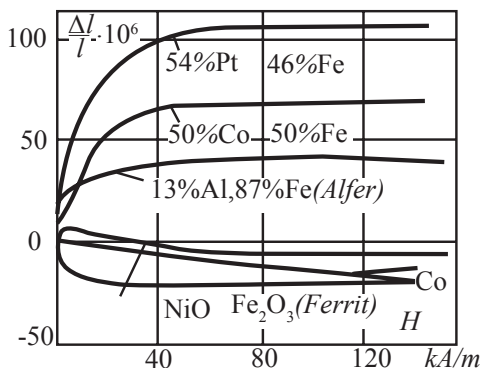
romagnetikleriň temperaturanyň artmagy bilen induksiýasynyň çalt peselme häsiýeti ulanylýar. Ni–Cu garyndyda 30% mis bolanda  $H=8\frac{kA}{m}$  güýjenmede magnit induksiýasynyň temperatura baglylykda peselmesi 6.13-nji çyzgyda görkezilýär.



**6.13-nji çyzgy.** Termomagnit garyndyda  $H=8\frac{kA}{m}$  bolanda magnit induksiýasynyň temperatura baglylygy

Bu has amatly Fe–Ni–Co garyndylardyr.

3-nji topara ýokary magnitostriksiýaly garyndylar (Fe–Pt, Fe–Co, Fe–Al) degişlidir. Ol garyndylarda ugurdaş magnitostriksiýada çyzykly ölçegleriň  $\frac{\Delta I}{I}$  üýtgeýşi položitel bolup,  $(40-120) \cdot 10^{-6}$  aralyklarda bolýar (6.14-nji çyzgy).



**6.14-nji çyzgy.** Birnäçe materiallarda magnitostriksion deformasiýanyň magnit meýdanyň güýjenmesine baglylygy

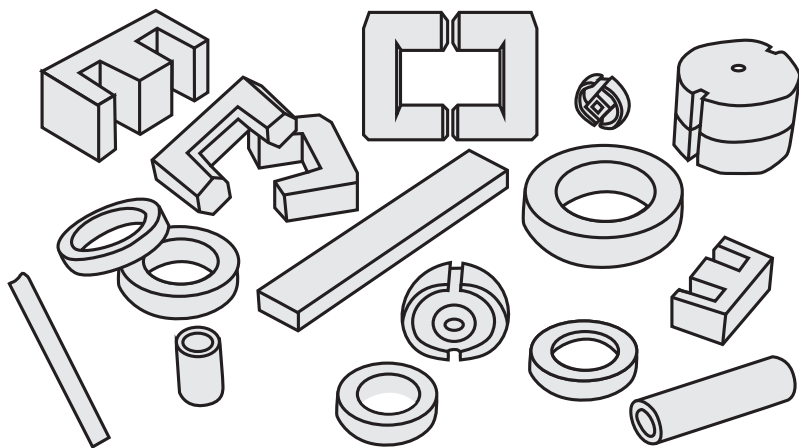
Magnitostriksion material hökmünde arassa nikel hem ulanylýar. Onuň otrisatel magnitostriksiýasy bolýar. Magnitostriksiýa hadysasy ses we ultrases yrgyldy generatorlarynda ulanylýar. Magnitostriksion abzallar ultrases bilen gaty we port materiallary täzeden işlemek-



de defektoskoplarda we mehaniki yrgyldylary elektrik yrgyldylara öwürmekde giňden ulanylýar.

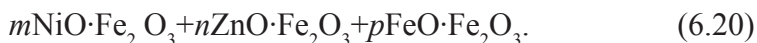
4-nji topara 2,4 Tl we ondan hem has ýokary doýgun magnit induksiýaly ferromagnetikler – demir, kobalt garyndylary girýär. Udel garşylyk bu garyndylarda ýokary bolmaýar. 50 – 70% CO düzümlü bu garynda permendýurlar diýilýär. Permendýurlaryň gymmatdygy sebäpli, olar diňe ýöriteleşdirilen abzallarda (dinamiki reproduktorlarda, ossillograflarda, telefon membranalarynda we ş.m.) ulanylýar.

**6.4.2. Ferritler.** Ferritler uly bolmadyk elektron elektrogeçirijilikli magnit keramikasydyr. Demir bilen deňeşdirilende udel garşylygy  $10^6 - 10^{11}$  esse uly we ýokary ýygylklarda pes energiýa ýitgili ferritleriň ulanylyş mümkinçiliklerini has giňeldýär. 6.15-nji çyzgyda birnäçe ferrit detallaryň daş görnüşleri görkezilýär.

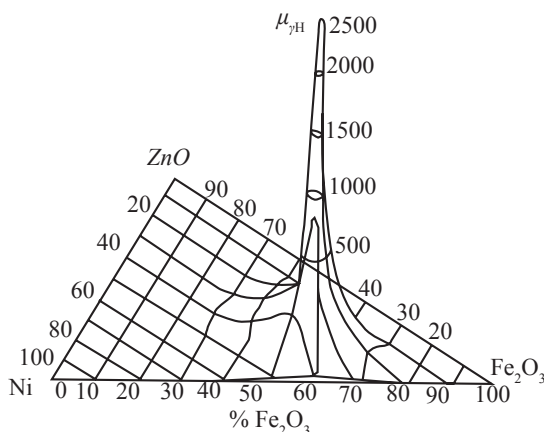


6.15-nji çyzgy. Ferritden taýýarlanan detallar

Ferritler demriň oksidinden we iki walentli (ýa-da seýrek duş gelýän bir walentli) metallaryň oksidinden düzülen ulgam bolup, onuň umumy formulasy  $MeO \cdot Fe_2O_3$  görnüşde bolýar. Bu ýerde *Me* – iki walentli metalyň belgisi. Ferritleriň kub şekilli kristal gözenegi bolýar. Has täsin magnit häsiýetli we tehnikada giňden ulanylýan ferritler, adatça, birnäçe ýönekeý birleşmeleriň, şol sanda magnit däl birleşmeleriň gaty garyndylarydyr. Mysal üçin, giňden ýaýran nikel-sink ferritleriň formulasy aşakdaky görnüşde bolýar:



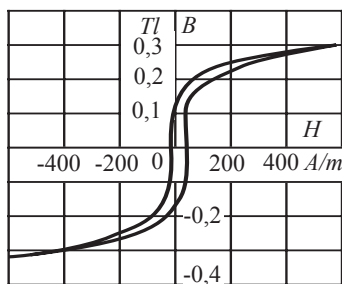
Bu ýerde  $m$ ,  $n$ ,  $p$  – komponentleriň mukdar gatnaşyklaryny görkezýär. 6.16-njy çyzgydan görnüşi ýaly,  $\mu_{rH}$ -nyň uly bahasy üçleýin diagrammanyň ýeterlik inçe böleginde ýerine ýetirilýär.



**6.16-njy çyzgy.** NiO – ZnO – Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ulgamda başlangyç magnit syzyjylygyň himiki düzüme baglylygy

Tehnikada giňden ulanylýan ferritlere oksiferler hem diýilýär. Ferrit önümleri taýýarlamak üçin ilki külke ferrit alynýar we oňa plastifakor – poliwinil spirtiň garyndysy goşulýar. Ol alnan massadan uly basyş bilen dürli gerek bolan şekiller alynýar. Soňra bu önümler howada 1100 – 1400°C temperaturada bişirilýär.

**Ýumşak magnit ferritleri.** 6.17-nji çyzgydan görnüşi ýaly, ýokary magnit syzyjylykly ferritiň uly maksimal 0,3 Tl-den ýokary magnit induksiýasy we pes  $\sim 16 \frac{A}{m}$ - koersitiw güýji bolýar.



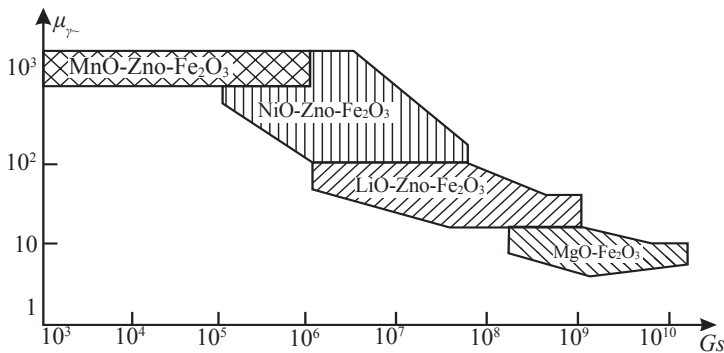
**6.17-nji çyzgy.** Uly magnit syzyjylykly nikel-sink ferritiniň gisterezis halkasy

6.4-nji çyzgyda bolsa nikel-sink ferritlerde magnit syzyjylygyň temperatura baglylygy görkezilýär. Ondan görnüşi ýaly, Kýuri noka-

dyna çenli temperaturanyň artmagy bilen başlangyç magnit syzyjylyk  $\mu_{\text{rH}}$  artýar, Kýuri nokadyndan soň bolsa birden peselýär.

Ferritleriň esasy fiziki häsiýetleri:

Dykyzlygy  $4-5 \frac{\text{mg}}{\text{m}^3}$ ; ýylylyk geçirijilik koeffisiýenti  $\gamma_T = 5 \frac{\text{Wt}}{\text{m} \cdot \text{K}}$ ; ýylylyga giňelme koeffisiýenti  $\sim 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ ; udel garşylyk  $\rho = 10^{-3} \div 10^8 \text{ Om} \cdot \text{m}$ ;  $\text{tg}\delta = 0,005 \div 0,1$ . Olarda uly dielektrik syzyjylyk ýygylýgyň artmagy bilen peselýär. Ferritlerde magnitostriksiýa hadysasy hem ýüze çykýar. Ol temperatura we Kýuri nokadyna bagly bolýar. Häzirki wagtda giňden ulanylýan ferritler: marganes-sink, nikel-sink we litiý-sink. Olary ulanmagyň ýygylýk çäkleri 6.18-nji çyzgyda görkezilýär.



**6.18-nji çyzgy.** Dürli ýygylýklarda ferritleri ulanmagyň mysaly shemasy

Ferritleri ulanmagyň maksimal çägi  $\text{tg}\delta$ -niň çalt ösüp başlamagy bilen kesgitlenýär. Dürli ferritler üçin  $f_{\text{gr}}$  0,1-den 50 MGs çenli bolup biler. Markasynda BЧ belgili ferritleriň ulanyş çägi 50-den 600 MGs çenli.

**Gönüburçlukly gisterezis halkaly (ΠΠΓ-li) ferritler.** Hasaplaýyş tehnikasynda ýat tutujy gurluş hökmünde gönüburçlukly gisterezis halkaly ferritler uly gyzyklanma döredýär. Ol materiallar üçin goşmaça parametrler talap edilýär. Ol parametrlerden esasy – gisterezis halkasynyň gönüburçluk  $K_n$  koeffisiýentidir. Ol galyndy magnit induksiýanyň  $B_{\text{max}}$  magnit induksiýasyna gatnaşygyna deň:

$$K_n = \frac{B_r}{B_{\text{max}}} \quad (6.21)$$

$B_{\text{max}}$  magnit induksiýasy  $H_{\text{max}} = 5H_c$  bolanda ölçenilýär.  $K_n$  koeffisiýent bire näçe ýakyn bolsa, şonça gowy hasap edilýär.

**Magnitostriksion ferritler.** Olar ýokary ýygylýkly magnitostriksion material hökmünde ulanylýar. Ol materiallar 6.3-nji tablisada berilýär.

**Magnitostriksion ferritler**

№	Materiallar	Düzümi	$\frac{\Delta I}{I} \cdot 10^6$
1.	Demir ferriti (magnetit). . .	$\text{FeO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$	+40
2.	Permalloy. . . . .	$45 \text{ Ni} \cdot 55 \text{ Fe}$	+27
3.	Margens ferriti. . . . .	$\text{MnO} \cdot \text{Fe}_3\text{O}_4$	-2
4.	Nikel-sink ferriti. . . . .	$\text{Ni}_3 + \text{Zn} + \text{Fe}_3\text{O}_4$	-5
5.	Litiý ferriti. . . . .	$\text{Li} + \text{Fe} + \text{Fe}_3\text{O}_4$	-8
6.	Kobol ferriti. . . . .	$\text{Co}_2 + \text{Fe}_3\text{O}_4$	Takmynan -200

**Magnitodielektrikler.** Olary külkelenen ferromagnetigi organiki ýa-da organiki däl baglaşdyryjy elektroörtük materiallar bilen garyşdyryp we presläp alýarlar. Olarda magnit material hökmünde karbonil demri, üwelen alsifer we ş.m. ulanylýar. Elektroörtük baglaşdyryjy hökmünde fenolformaldegid şepbigi, polistirol, aýna we ş.m. ulanylýar. Olar ýokary elektrik garşylygy we kiçi magnit ýitgi burçunyň tgδ-si bilen tapawutlanýarlar. Şoňa görä magnitodielektrikler ýokary ýygylklarda giňden ulanylýar. Elektrotehnikada gurluşyk material hökmünde magnit we magnit däl häsiýetli çöýünler we polatlar hem ulanylýar. Magnit däl häsiýetli çöýüň düzümi: 2,6-3,% C, 2,5% Si, 5,6% Mn, 9-12% Ni, galany demir. Magnit däl poladyň düzümi: 0,25-0,35% C, 22-25% Ni, 2-3% Cr, galany demir.

**6.5. Gaty magnitli materiallar**

Himiki düzümi, alnyş usuly boýunça gaty magnitli materiallar aşakdaky görnüşlere bölünýär:

1. Garyndy goşulan martensit polady;
2. Guýma gaty magnitli garyndylar;
3. Külkeden alnan magnitler;
4. Gaty magnitli ferritler;
5. Çeýe we maýyşgak garyndylar, lentalar.

Hemişelik magnitler üçin niýetlenen materiallaryň esasy häsiýetleri bolup, koersitiw güýç, galyndy magnit induksiýa we magnitiň daşky gurşawa berýän energiýasy hyzmat edýär. Gaty magnitli materiallaryň magnit syzyjylygy magnit taýdan ýumşak materiallary bilen deňeşdirilende pesdir.

## Peýdalanylan edebiýatlar

1. *Gurbanguly Berdimuhamedow*. Türkmenistanyň durmuş-ykdysady ösüşiniň döwlet kadalaşdyrylyşy. I tom. Ýokary okuw mekdepleriniň talyp-lary üçin okuw gollanmasy. Aşgabat, 2010.
2. *Gurbanguly Berdimuhamedow*. Türkmenistanyň durmuş-ykdysady ösüşiniň döwlet kadalaşdyrylyşy. II tom. Ýokary okuw mekdepleriniň talyp-lary üçin okuw gollanmasy. Aşgabat, 2010.
3. Türkmenistanyň Konstitusiyasy. Aşgabat, 2016.
4. Türkmenistanyň elektrik energiýasy pudagyny ösdürmegiň 2013–2020-nji ýyllar üçin Konsepsiyasy.
5. *Н. П. Богородский, В. В. Пасынков, Б. М. Тареев*. Электротехнические материалы. Ленинград. Энергоатомиздат, 1985.  
*В. В. Пасынков, В. С. Сорокин*. Материалы электронной техники. Санкт-Петербург, 2001.  
*В. В. Горбачев, Л. Т. Спицына*. Физика полупроводников и металлов. М.Металлургия,1982.  
*Д. М. Казарновский, Б. М. Тареев*. Испытание электроизоляционных материалов. Л.Энергия,1980.
9. *Б. М. Тареев*. Физика диэлектрических материалов. М. Энергия, 1982.
10. *Б. Ф. Ормонт*. Введение в физическую химию и кристалло-химию полупроводников. М. Высшая школа,1982.
11. *А. А. Преображенский*. Магнитные материалы и элементы. М.Высшая школа,1976.
12. Справочник по электротехническим материалам. Подред. *Ю. В. Корицкого, В. В. Пасынкова и Б. М. Тареева*. 2-е изд. – энергия. т. 1, 2. М,1976. т.3-Л,1976.

## MAZMUNY

Sözbaşy .....	7
---------------	---

### **I bap. Elektrotehniki materiallaryň toparlara bölünişi.**

#### **Maddalaryň içki gurluşy**

1.1. Elektrotehniki materiallaryň toparlara bölünişi .....	10
1.2. Maddalaryň içki gurluşy. Himiki baglanyşyklar. ....	10
1.3. Kristal we amorf gurluşly materiallar .....	12
1.4. Kristal gaty jisimleriň energetik zolaklary baradaky nazaryýetiň esaslary. .	15
1.5. Polýar we polýar däl molekulýar gurluşly maddalar .....	16

### **II bap. Dielektrikler**

2.1. Dielektriklerde elektrik hadysalary. ....	17
2.2. Dielektriklerde polýarlanma hadysasy. Dielektrik syzyjylyk. Polýarlanmanyň görnüşleri. ....	17
2.3. Gazlarda, suwuk we gaty dielektriklerde dielektrik syzyjylyk. ....	22
2.4. İşjeň dielektrikler we olaryň ulanylyşy. ....	24
2.5. Dielektriklerde elektrik geçirijilik. Gazlarda we suwuklyklarda elektrik geçirijilik .....	29
2.6. Gaty dielektriklerde elektrik geçirijilik. Göwrümleýin we üst elektrik geçirijilik .....	36
2.7. Dielektriklerde dielektrik ýitgileri. Dielektrik ýitgileriniň görnüşleri. . . .	40
2.8. Gazlarda, suwuklyklarda we gaty dielektriklerde dielektrik ýitgiler . . . .	46
2.9. Dielektriklerde elektrik böwsülme hadysasy. Gazlarda we suwuklyklarda elektrik böwsülme .....	51
2.10. Dielektrikleriň fiziki - mehaniki we ýylylyk häsiýetleri .....	60
2.11. Dielektrikleriň ýylylyk häsiýetleri .....	63

### **III bap. Elektroörtükli materiallar**

3.1. Elektroörtükli materiallar barada umumy düşüňjeler. Gaz halyndaky we suwuk elektroörtükli materiallar .....	65
3.2. Suwuk elektroörtükli materiallar .....	67
3.3. Gaty elektroörtükli materiallar. Organiki polimerler. Sintetiki smolalar. . .	70
3.4. Garasagýçlar (Bitumlar). Mumiýa şekilli dielektrikler. Elektroörtükli laklar we kompaundlar. ....	77
3.5. Süýümlü materiallar. Kagyz, karton we fibra materiallary. Dokma materiallary .....	81
3.6. Plastmassalar. Gatlakly plastmassalar. ....	85

3.7. Tebigy we sintetik kauçuklar. Organiki däl aýna.....	88
3.8. Keramiki dielektrik materiallar. Farfor. ....	94
3.9. Slýuda we slýudaly materiallar. ....	99
3.10. Slýudaly elektroörtükli materiallar. ....	100
3.11. Asbest we asbestli materiallar. Organiki däl dielektrik plýonkalar. ....	102

#### **IV bap. Geçiriji materiallar**

4.1. Geçiriji materiallar barada umumy düşüňjeler. Metallarda elektrik geçirijiligiň nusgawy elektron nazaryýeti. Ýokary geçirijilikli metallar . .	106
4.2. Metallarda udel garşylygyň temperatura baglylygy. Aşageçirijiler . . . . .	112
4.3. Metal garyndylary. Kurnakowyň diagrammasy. Uly elektrik garşylykly metal garyndylary . . . . .	118
4.4. Metallarda sepleşme potentsiallaryň tapawudy. Termoelektrik hereketlendiriji güýçler we termojübütler. Termojübütler üçin materiallar. ....	123
4.5. Gyzgyna çydamly metallar. Sepleşme materiallar. Kebşirler we flýuslar .	127
4.6. Metal däl geçirijiler. ....	130

#### **V bap. Ýarymgeçiriji materiallar**

5.1. Ýarymgeçiriji materiallar barada umumy maglumatlar. Ýarymgeçiriji häsiýetli elementler we çylşyrymly ýarymgeçirijiler. Hususy ýarymgeçirijiler. ....	132
5.2. Garyndyly ýarymgeçirijiler. Donor we akseptor garyndylar. Geçirijiligiň görnüşleri. Garyndy atomlaryň energetiki derejeleri. Geçirijiligiň görnüşlerini kesgitlemegiň termoelektrik hereketlendiriji güýç usuly . . . . .	136
5.3. Ýarymgeçirijilerde Holluň effekti we onuň kömegi bilen geçirijiligiň görnüşini, zarýad göterijileriň sanyny we hereketlenijiligini kesgitlemek . . . . .	140
5.4. Ýarymgeçirijilerde elektrik geçirijiligiň temperatura baglylygy. ....	144
5.5. Ýarymgeçirijilerde fotogeçirijilik. Ýarymgeçirijilerde gadagan zolagyň giňligini kesgitlemegiň termiki we optiki usullary . . . . .	148
5.6. Ýarymgeçiriji häsiýetli elementler. Germaniý, kremniý we selen. ....	153
5.7. Ýarymgeçiriji himiki birleşmeler we olaryň düzümindäki materiallar. . .	158
5.8. Ýarymgeçiriji materiallary monokristal görnüşde almagyň usullary . . . . .	165

#### **VI bap. Magnit materiallary**

6.1. Materiallaryň magnit häsiýetleri barada esasy düşüňjeler . . . . .	169
6.2. Magnitli materiallarda energiýa ýitgileri . . . . .	174
6.3. Ýumşak magnit materiallary . . . . .	178
6.4. Ýörite ferromagnetikler. Ferritler. ....	183
6.5. Gaty magnitli materiallar. ....	188
Peýdalanylan edebiýatlar . . . . .	189

**Ata Nazarow, Baba Babaýew**

## **ELEKTROTEHNIKI MATERIALLAR**

Ýokary okuw mekdepleri üçin okuw kitaby

Redaktor	<i>H. Sapargulyýew</i>
Surat redaktory	<i>O. Çerkezowa</i>
Teh. redaktor	<i>O. Nurýagdyýewa</i>
Kompýuter işleri	<i>D. Piriýewa</i>
	<i>B. Mämmetgurbanow</i>
Neşir üçin jogapkär	<i>J. Jumagylyjow</i>

Çap etmäge rugsat edildi 27.08.2019. Ölçeği 60x90<sup>1/16</sup>.  
Times New Roman garniturasy. Şertli çap listi 12,0.  
Hasap-neşir listi 11,21. Şertli reňkli ottiski 31,25.  
Çap listi 12,0. Sargyt № 823. Sany 700.

Türkmen döwlet neşirýat gullugy.  
744000. Aşgabat. Garaşsyzlyk şaýoly, 100.

Türkmen döwlet neşirýat gullugynyň Metbugat merkezi.  
744015. Aşgabat. 2127-nji (G. Gulyýew) köçe, 51/1.