

**M.M.Meredow, Ç.A.Amanow, R.A.Artykow
G.D.Durdyýew**

FIZIKA

Ýokary okuw mekdepleri üçin synag okuw kitaby

*Türkmenistanyň Bilim ministrligi
tarapyndan hödürlendi*

**Aşgabat
TOHU – 2010**

UOK 539.1

M.M.Meredow, Ç.A.Amanow, R.A.Artykow, G.D.Durdyyew.

Fizika. Ýokary okuw mekdepleri üçin okuw synag gollanmasy.

AŞGABAT, TOHU, 2010 ý.

Okuw gollanmasynyň I bölümini (I-VI we XVI baplar) G.Durdyyew, II bölümini (VII-IX baplar) Ç.A.Amanow, III bölümini (X-XI we XV baplar) M.M.Meredow, XII-XIV baplaryny R.A.Artykow yazdy.

Fizika –matematika ylymlarynyň doktory, T.Y.A.-nyň habarçy agzasy

G.G.Garyagdyýewiň redaksiýasy bilen

Syn ýazanlar: Fizika-matematika ylymlarynyň doktory, Türkmenistan Y.A.-nyň habarçy agzasy **M.Serginow** (Magtymguly adyndaky TDU.), fizika-matematika ylymlarynyň doktory **Y.Çaryýew** (Türkmen döwlet ulag we aragatnaşyk instituty) tehniki ylymlaryň kandidaty, dosent **G.D.Kurtowezow** (S.A.Nyyazow adyndaky Türkmen oba hojalyk uniwersiteti).

Okuw gollanmasy S.A.Nyyazow adyndaky Türkmen oba hojalyk uniwersitetinde fizika dersinden okuw maksatnamasy esasynda taýýarlanylýp, onda umumy fizika kursunyň degişli bölümleri gysgaça beýan edildi.

Kitapdan ýokary okuw mekdepleriniň inžener tehniki, ykdysadyýet fakultetlerinde okaýan talyplar-da peýdalanyp bilerler.

©S.A.Nyyazow adyndaky Türkmen oba hojalyk uniwersiteti

Aşgabat-2010

GİRİŞ

Fizika dersi we onuň beýleki ylymlar bilen baglanyşygy

Fizika beýleki tebigy ylymlar bilen bir hatarda, biziň daş töweregimizdäki maddy dünýäniň obýektiw häsiýetlerini öwrenýär. Fizika dersine anyk kesgitleme bermek kyn, sebäbi onuň bilen beýleki garyşyk ylymlaryň arasyndaky araçäk şertleýin kabul edilendir. Şonuň üçin fizika tebigat baradaky ylymdyr diýmeklik gutarnykly däldir.

Akademik A.F.Ioffe (1880-1960, rus fizigi) fizika şeýle kesgitleme berdi: “Fizika–meýdanlaryň we jisimleriň hereket kanunlaryny we umumy häsiýetlerini öwrenýän ylymdyr”. Häzirki wagtda ähli özara täsirleriň, mysal üçin grawitasiýa, elektromagnit, ýadro güýçleriniň meýdanlary arkaly amala aşyrylýandygy anyklanyldy.

Fizika – materiýanyň hereketiniň in bir ýönekeý, şonuň bilen bilelikde onuň umumy görnüşlerini (mehaniki, ýylylyk, elektromagnit we ş.m) hem-de olaryň özara öwrülişini öwrenýän ylymdyr.

Fizika beýleki tebigat ylymlary bilen jebis baglanyşyklydyr. Olaryň ysnyşykly ösmegi täze garyşyk ugurlaryň döremegine getirdi. Mysal üçin, astrofizika, geofizika, biofizika, fiziki himiýa we başgalar.

Fizika tehnika bilen ikitaraplaýyn baglanyşyklydyr. Tehnikanyň amaly talaplary fizikanyň ösmegine getirdi. (Gadym müsürlileriň we grekleriň mehanikasy şol wagtyň gurluşyk we harby tehnikasynyň öňde goýan talaplary bilen gös-göni baglanyşykly ýüze çykdy. Barha ösýän tehnikanyň täsiri netijesinde XVII asyryň ahyrlarynda we XVIII asyryň başlarynda örän uly ylmy açyşlar edildi). Beýleki tarapdan, önümçilikde tehnikanyň ösmegi fizikanyň ösmegine bagly bolup durýar. Fizika ylmy täze tehnologiýalaryň, ýagny elektron, ýadro tehnikalarynyň döremeginiň esasy bolup durýar.

Faradeýiň 1831-nji ýylda açan elektromagnit induksiýa hadysasy häzirki wagtda biziň senagatymyzy, öý hojalygymyzy elektrik togy bilen üpjün edýän generatorlaryň (tok öndürijileriň) döremegine getirdi.

D.I.Mendeleyewiň 1869-njy ýylda açan periodiki kanuny himiýanyň we fizikanyň örän köp meselelerini çözdü.

Geçen asyryň 70-nji ýyllarynda Makswelliň döreden elektromagnit teoriýasy, eletromagnit energiýasynyň tolkun görnüşinde ýaýraýandygyny subut etdi. Makswelliň bu teoriýasynyň dogrudygyny 1888-nji ýylda nemes alymy Gers tejribe arkaly subut etdi. Makswelliň-Gersiň bu açyşyny A.S.Popow 1895-nji ýylda radiony oýlap tapmak bilen durmuşa ornaşdyrdy. Radiotehnikanyň döremegi we ösmegi

fiziklere tebigatyň kanunlaryny öwrenmäge giň eksperimental mümkinçilikler berdi.

A.G.Stoletowyň fotoeffekti öwrenmek baradaky geçiren barlaglary (1888-1889-njy ýyllar) häzirkî zaman telewideniýesiniň we awtomatikasynyň döremegine getirdi.

Tehnika bilen fizikanyň ösüş proseslerindäki özara baglanyşyklar, häzirkî wagtda Gün energiýasyny gös-göni peýdalanmak, termoyadro reaksiýasyny Ýer şertlerinde amala aşyrmak, otag we ondan-da ýokary temperaturalarda aşageçirijilik häsiýetli materiallary döretmek ýaly meseleleriň çözülmegi üçin fiziki hadysalaryň mundan buýana hem çuňňur öwrenilmegini talap edýär.

Fizika filosofiýa bilen hem berk baglanyşykly, energiýanyň saklanmak we öwrülme kanuny, atom fizikasyndaky kesgitsizlik teoriýasy ýaly uly açyşlar we başgalar, materializm bilen idealizmiň arasynda ýiti göreş meýdanyna öwrüldi. Fizikanyň ylmy açyşlaryndan gelip çykýan dogry filosofiki netijeleri, dialektiki materializmiň esasy düzgünlerini mydama tassykladylar, sebäbi açyşlaryň öwrenilmegi we olaryň filosofiki netijesi ylmy dünýägraýşy kemala getirmekde uly ähmiýete eýedir.

Fiziki ululyklaryň birlikleri

Fiziki kanunlar fiziki ululyklary biri-biri bilen baglanyşdyrýarlar. Şonuň üçin bu ululyklary ölçemeklik gerek bolýar. Haýsy hem bolsa bir fiziki ululygy ölçemek diýmek, ony birlik deregine kabul edilen başga bir (nusga) ululyk bilen deňeşdirmek diýmekdir.

Birlikler ulgamyny gurmak üçin biri-birine bagly bolmadyk birnäçe fiziki ululyklaryň birlikleri erkin saýlanyp alynýar. Bu birliklere esasy birlikler diýilýär. Beýleki fiziki ululyklar we olaryň birlikleri bu ululyklary esasy fiziki ululyklar bilen baglanyşdyrýan kanunlar arkaly getirilip çykarylýar. Olara getirilen birlikler diýilýär.

Öňki SSSR Döwlet standartyna laýyklykda (GOST 8.417-81) Halkara birlikler sistemasyny (HS) - Internasional sistemany (IS) ulanmaklyk hökmany suratda girizildi. Bu birlikler sistemasy ylym, tehnika, oba hojalygy, bilim öwretmegiň usulyýeti üçin ýeke-täk kabul edilen birlikler sistemasydyr. IS-niň düzümine 7 sany esasy – metr, kilogram, sekunt, Amper, Kelwin, mol, Kandela we iki sany goşmaça – radian we steradian birlikler girýär.

METR (m) – ýagtylygyň wakuumda $1/299792458$ sekuntda geçýän ýolunyň uzynlygyna deň.

KİLOGRAM (kg) –kilogramyň halkara prototipine deň massa (Parižiň golaýynda Sewre şäherinde ölçegin we agramyň Halkara mejlisinde saklanýan platinoiridiý silindri).

SEKUNT (s) – seziý-133-iň atomynyň esasy halynyň aşa ýuka iki derejesiniň arasyndaky geçişe laýyk gelýän şöhledenmäniň 9192631770 periodyna deň.

AMPER (A) – wakuumda biri-birinden 1m uzaklykda ýerleşen, tükeniksiz uzynlykly we kese kesiginiň meýdany örän kiçi bolan iki sany geçirijiniň üstünden üýtgemeyän tok akyp geçende olaryň her bir metr uzynlygyna $2 \cdot 10^{-7}$ N deň bolan özara täsir güýjüň döredýän togunyň ululygy kabul edilen.

KELWİN (K) - suwuň üç hal nokadynyň termodinamiki temperaturasynyň 1/273,16 bölegi.

MOL (mol) – massasy 0,012 kg bolan ^{12}C -uglerodda näçe atom bar bolsa, şonça struktura elementleri bar bolan ulgamdaky maddanyň mukdary.

KANDELA (Kd) – ýagtylyk çeşmesiniň temperaturasy platinanyň gatamak temperaturasyna deň bolanda, 101325 Pa basyşda, $1/60000 \text{ m}^2$ meýdandan perpendikulýar ugur boýunça doly şöhlenenýän ýagtylyk güýjüdür.

RADIAN (rad) – dugasynyň uzynlygy töweregiň radiuslaryna deň bolan iki sany radiusyň arasyndaky burça deňdir.

STERADIAN (sr) – tarapy sferanyň radiusyna deň bolan kwadratyň meýdany ýaly sferik üsti kesip alýan we depesi sferanyň merkezinde ýerleşýän konusyň emele getirýän jisim burçudyr.

Getirilen birlikleri almak üçin esasy birlikler bilen baglanyşdyrýan fiziki kanunlar ulanylýar. Mysal üçin, gönüçzykly deňölçegli hereketiň formulasy esasynda $v=s/t$, s – geçilen ýol, t – wagt. Onda tizligiň döredilen birligi 1m/s bolýar.

Bu okuw kitaby oba hojalyk ýokary okuw mekdepleriniň talyplary üçin niýetlenendir. Kitaba oba hojalyk hünärlerinde okaýan talyplar üçin fizika dersinden okuw meýilnamasyna laýklyklykda fizika kursunyň degişli bölümleri girizildi. Bölümleriň göwrümleri okuw meýilnamasyna laýklyklykda çäklendirildi.

Oba hojalyk önümlerini gaýtadan işlemek, dokma we ýeňil senagaty önümçiligi hünärlerini öwrenýän talyplara ýörite we goşmaça edebiýatlar hödürlenýär.

I

MEHANIKANYŇ FIZIKI ESASLARY

Mehanika – mehaniki hereketiň kanunalaýyklyklaryny we onuň ýüze çykmasyynyň ýa-da üýtgemesiniň sebäplerini öwrenýän fizikanyň bölümidir. Mehanniki hereket – bu wagtyň geçmegi bilen jisimiň ýa-da onuň bölejikleriniň özara ýerleşişiniň beýleki jisimlere görä üýtgemegidir.

Mehanika grek alymy Arhimed (biziň eramyzdan öň 287-212-nji ýyllar) ryçagyň deňagramlylyk düzgünini açandan soň ylym hökmünde ösüp başlady. Mehanikanyň esasy kanunlary italiýan fizigi we astronomy G.Galileý (1564-1642) tarapyndan takyklandy we iňlis alymy I.Nýuton (1643-1727) tarapyndan gutarnykly görnüşi aldy.

Galileý-Nýutonyň mehanikasyna nusgawy mehanika diýilýär we ol tizligi ýagtylygyň tizligine garanyňda has kiçi bolan tizlik bilen hereket edýän makroskopiki jisimleriň hereket kanunlaryny öwrenýär. Tizlikleri ýagtylygyň wakuumdaky tizligine barabar bolan tizlik bilen hereket edýän makroskopiki jisimleriň hereket kanunlaryny Eýnşteýniň (1879-1955) otnositellik teoriýasyna esaslanan relýatiwistik mehanika öwrenýär. Aýry-aýry atomlaryň ýa-da elementar bölejikleriň (mikroskopik jisimleriň) hereketi öwrenilende nusgawy mehanikanyň kanunlaryny ulanyp bolmaýar, olar kwant mehanikanyň kanunlaryna boýun egýär. Klassyky mehanikanyň ulanyş çägi barada biz soňra aýratyn durup geçeris. Häzirikçe diňe tizlikleri ýagtylygyň tizliginden kiçi bolan makroskopik jisimleriň hereketleri barada gürrüň etjekdiris.

Mehanika üç bölümden ybaratdyr: kinematika, dinamika, statika.

KINEMATIKA – jisimiň hereketini, ony döredýän sebäplere seretmezden öwrenýär.

DINAMIKA – jisimiň hereketiniň ýüze çykmagynyň ýa-da üýtgemesiniň sebäplerini we kanunlaryny, ýagny tizlenmäniň döremeginiň sebäplerini öwrenýär.

STATIKA – jisimler sistemasynyň deňagramlylyk kanunlaryny öwrenýär. Eger jisimiň hereket kanuny belli bolsa, onda olardan deňagramlylyk kanunyny getirip çykaryp bolýar. Şonuň üçin fizikada statikanyň kanunlary, dinmikanyň kanunlaryndan aýratynlykda öwrenilmeýär.

I BAP. ÖŇE BOLAN HEREKETİŇ KİNEMATİKASY

§1.1. Material nokat. Hasaplama sistemasy. Traýektoriya

Mehaniki hereketiň iň sada görnüşi material nokadyň hereketidir. Hereketiň berlen şertlerinde ölçegini hasaba almasaň hem bolýan jisime *material nokat* diýilýär. Mysal üçin, Ýeriň ortaça diametri $12700 \text{ km} \approx 0,13 \cdot 10^5 \text{ km}$ -e, onuň Gün bilen aralygy bolsa $150 \cdot 10^5 \text{ km}$ -e golaý, şonuň üçin Ýeriň ululygy Güne çenli bolan aralyk bilen deňeşdirilende örän kiçidigi sebäpli Ýeri material nokat hökmünde kabul etmek bolar. Emma, edil şol bir hakyky jisime, meseläniň goýluşyna baglylykda, bir ýagdaýda material nokat hökmünde, ikinji bir ýagdaýda bolsa belli bir ölçegli jisim hökmünde garalýandygyny bellemek gerek. Mysal üçin, top okuna uçuş şertlerinde material nokat hökmünde garap bileris. Emma top okunuň uçuşyna howanyň garşylygynyň edýän täsirini hem-de uçuş wagtynda top okunuň aýlanýandygyny hasaba alsak, onda biz top okuna material nokat hökmünde garap bilmeris: biz onuň massasyny, ölçeglerini we ş.m. hasaba almaly bolarys.

Islendik mehaniki hereket otnositelleýindir. Tebigatda hereketsiz jisim ýokdur. Jisimiň hereketi giňişlikde belli bir wagtda bolup geçýär. Şonuň üçin islendik jisimiň hereketini kesgitlemek üçin, onuň şol bir wagtda giňişligiň haýsy ýerinde durandygyny, belli bir wagtdan soň onuň ornuny nähili üýtgedendigini bilmek gerek. Şonuň üçin biz haýsy hem bolsa bir jisimi hereketsiz diýip kabul etmeli bolýarys. Hereketsiz diýip kabul edilen jisime hasap jisimi ýa-da *hasaplama başlangyjy* diýip at berilýär. Başlangyç nokady hasap jisiminde ýerleşdirilen koordinatalar ulgamyna *hasaplama sistemasy* diýilýär. Mysal üçin, otagyň bir burçundan zyňlan şarjagazyň hereketine biz otaga otnositellikde garap bileris. Koordinatalar başlangyjyny şol burçda ýerleşdirip, onuň oklaryny diwarlaryň boyuna ugrykdysak, hasaplama sistemasy emele geler.

Hereketsiz diýip kabul edilýän, ýa-da oňa otnositellikde mydama deňölçegli gönüçyzykly hereketde bolýan islendik sistema hasaplamanyň *inersial sistemasy* diýilýär. Degişlilikde, üýtgeýän ýa-da egriçyzykly hereket edýän islendik sistema hasaplamanyň inersial däl sistemasy bolup hyzmat eder. Hereketleriň kanunlary öwrenilýän wagtynda oňa doly we dogry düşünmek üçin, bu hereketiň haýsy hasaplama sistemasyna otnositellikde seredilýändigine üns bermek gerek.

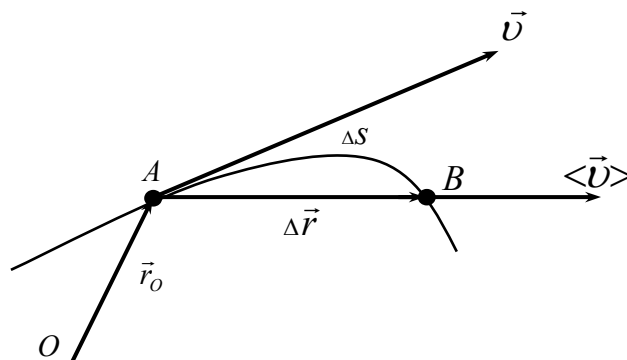
Jisimiň giňişlikde hereket edende galdyrýan yzyna *trayektoriya* diýilýär. Trayektoriýanyň görnüşine baglylykda jisimiň hereketi gönüçyzykly ýa-da egriçyzykly bolup biler.

§1.2. Tizlik

Jisimiň islendik deň wagt aralygynda deň orun üýtgetmesine deňölçegli, deň wagt aralygynda dürli orun üýtgetmesine bolsa deňölçegsiz hereket diýilýär. Bu hereketler biri-birinden tapawutlanýarlar.

Jisimiň hereketini hasiýetlendirmek üçin tizlik diýen düşünje girizilýär. Tizlik wektor ululyk bolup, wagtyň berlen pursatynda hereketiň çaltlygyny we ugruny kesgitleýän ululykdyr.

Goý, jisim egriçyzykly trayektoriya bilen hereket edýär diýeliň. Oňa t wagt pursatynda \vec{r}_0 radius-wektor degişli bolsun (ýagny t_0 wagt pursatynda jisimiň ýagdaýy \vec{r}_0 radius-wektoryň ululygy bilen kesgitlenilýär. 1.1-nji surat).



1.1-nji surat. Egriçyzykly hereketiň şekillendirilişi.

Uly bolmadyk Δt wagtyň dowamynda jisim Δs ýoly geçýän we elementar Δr orun üýtgetmäni alýan bolsun, onda

$$\langle \vec{v} \rangle = \frac{\Delta \vec{r}}{\Delta t} \quad (1.1)$$

Bu ululyga hereketiň Δt wagtdaky *orta tizligi* diýilýär. Orta tizlik wektorynyň ugry $\Delta \vec{r}$ -iň ugry bilen gabat gelýär. Eger-de (1.1) deňlikden $\Delta t \rightarrow 0$ predeline geçsek, onda mgnowen tizligi alyp bolýar:

$$\vec{v} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \vec{r}}{\Delta t} = \frac{d\vec{r}}{dt} .$$

Diýmek, mgnowen tizlik hereket edýän jisimiň radius-wektoryndan wagta görä alnan birinji önüme deňdir. Mgnowen tizligiň ugry hereketiň ugry bilen gabat gelýär we ol traýektorýanyň berlen nokadyna geçirilen galtaşma boýunça ugrukdyrylýar. Δt wagtyň kiçelmegi bilen jisimiň geçýän Δs ýoly barha $|\Delta \vec{r}|$ -e golaýlaşýar. Şonuň üçin mgnowen tizligiň moduly aşakdaky görnüşi alar:

$$v = |\vec{v}| = \left| \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \vec{r}}{\Delta t} \right| = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{|\Delta \vec{r}|}{\Delta t} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta s}{\Delta t} = \frac{ds}{dt}$$

Şeýlelikde, mgnowen tizligiň san bahasy geçilen ýoluň wagta görä alnan birinji önümine deňdir:

$$v = \frac{ds}{dt} \quad (1.2)$$

Deňölçeşsiz hereketde mgnowen tizligiň moduly wagta görä üýtgeýär. Şonuň üçin deňölçeşsiz hereketiň orta tizligi düşünjesi girizilýär. Ýagny:

$$\langle \vec{v} \rangle = \frac{\Delta s}{\Delta t}$$

1.1-nji suratdan görnüşi ýaly, $\langle \vec{v} \rangle > |\langle \vec{v} \rangle|$ sebäbi $\Delta s > |\Delta \vec{r}|$, gönüçyzykly hereketde $\Delta s = |\Delta \vec{r}|$.

1.2 formuladan ds -i tapyp ($ds = v dt$), ony t -den $t + \Delta t$ wagt aralygynda integrirläp, material nokadyň Δt wagtda geçen ýolunyň uzynlygyny tapýarys:

$$s = \int_t^{t+\Delta t} v dt \quad (1.3)$$

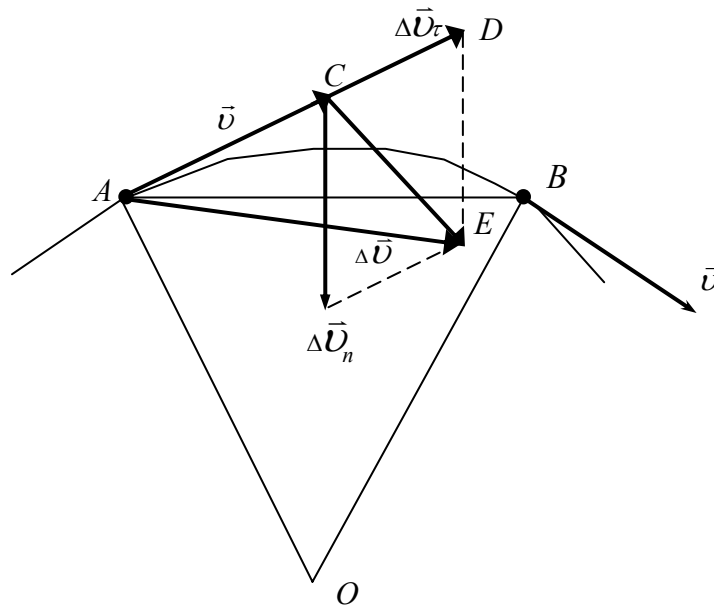
Deňölçeşli hereketde (1.3) aňlatmany şeýle ýazmak bolar:

$$s = v \int_t^{t+\Delta t} dt = v \Delta t .$$

§ 1.3. Tizlenme. Tangensial we normal tizlenmeler

Deňölçeşsiz hereketde jisimiň tizliginiň wagta görä nähili üýtgeýändigini bilmek gerek bolýar. Moduly we ugry boýunça tizligiň wagt birliginde üýtgemegini häsiýetlendirýän fiziki ululyga *tizlenme* diýilýär. Goý, jisimiň t wagtda A nokatdaky tizligi \vec{v} bolsun. Δt wagtyň geçmegi bilen ol B nokada geçýär we moduly hem ugry boýunça A nokatdaky tizliginden tapawutlylykda $\vec{v}_1 = \vec{v} + \Delta \vec{v}$ tizlige eýe bolýar.

\vec{v}_1 wektory A nokada geçirip, $\Delta \vec{v}$ -ni tapalyň (1.2-nji surat). $\Delta \vec{v}$ tizligiň üýtgemeginiň Δt wagt aralygyna bolan gatnaşygyna deň bolan wektor ululyga deňölçeşsiz hereketiň t -den $t + \Delta t$ aralygyndaky *orta tizlenmesi* diýilýär.



1.2-nji surat. Tizlenmäniň kesgitlenişi.

Jisimiň t wagt pursatyndaky \vec{a} mgnowen tizlenmesi orta tizlenmäniň predeline deňdir:

$$\vec{a} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \langle \vec{a} \rangle = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t} = \frac{d\vec{v}}{dt}$$

Şeýlelikde, \vec{a} tizlenme wektor ululyk bolup, tizlikden wagta görä alnan birinji önüme deňdir.

$\Delta\vec{v}$ wektory iki sany düzüjä dargadalyň. Şonuň üçin A nokatdan \vec{v} tizligiň ugruna moduly boýunça \vec{v}_1 deň dolan \overrightarrow{AD} wektory alyp goýalyň (1.2-nji surat). Görnüşi ýaly, \overrightarrow{CD} wektora deň bolan $\Delta\vec{v}_\tau$ wektor, Δt wagtyň dowamynda tizligiň moduly boýunça üýtgemesini häsiýetlendirýär:

$$\Delta\vec{v}_\tau = \vec{v}_1 - \vec{v}.$$

$\Delta\vec{v}$ wektoryň ikinji düzüjisi bolan $\Delta\vec{v}_n$ wektor Δt wagtyň dowamynda tizligiň ugry boýunça üýtgemesini häsiýetlendirýär.

Tizlenmäniň tangensial düzüjisi tizligiň modulyndan wagta görä alnan birinji önüme deň bolup, tizligiň moduly boýunça üýtgemesiniň çaltlygyny häsiýetlendirýär:

$$a_\tau = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta v_\tau}{\Delta t} = \frac{dv}{dt}$$

Tizlenmäniň ikinji düzüjisini kesgitleliň.

Goý, Δs duga AB hordadan az tapawutlanar ýaly, B nokat A nokada ýeterlik golaý bolsun. Onda AOB we EAD üçburçluklaryň meňzeşliginden $\frac{\Delta v_n}{AB} = \frac{v_1}{r}$ deňlik gelip çykýar, şeýle-de, $AB = v \Delta t$, onda:

$$\frac{\Delta v_n}{\Delta t} = \frac{v v_1}{r}.$$

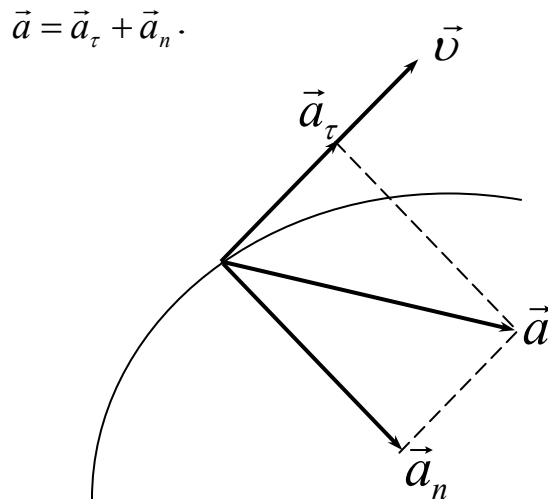
Bu ýerde haçan $\Delta t \rightarrow 0$ bolanda $\vec{v}_1 \rightarrow \vec{v}$ alarys. $\vec{v}_1 \rightarrow \vec{v}$ bolanda EAD burç nola ymtylýar, onda deňýanly EAD üçburçlugyň \vec{v} we $\Delta\vec{v}_n$ wektorlarynyň arasyndaky ADE burç gönüburça ymtylar. Dogrudan-da, Δt nola ymtylanda \vec{v} we $\Delta\vec{v}_n$ wektorlar özara perpendikulýar bolýarlar. Sebäbi tizlik wektory traýektoriya galtaşma boýunça ugrukdyrylan, onda egrilik merkezine ugrukdyrylan $\Delta\vec{v}_n$ wektor tizlik wektoryna perpendikulýardyr.

$$\frac{\Delta v_n}{\Delta t} = \frac{v v_1}{r}, \quad \Delta t \rightarrow 0 \text{ bolanda } \vec{v}_1 \rightarrow \vec{v}, \text{ onda alarys:}$$

$$a_n = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta v_n}{\Delta t} = \frac{v \cdot v_1}{r} = \frac{v \cdot v}{r} = \frac{v^2}{r}.$$

Tizlenmäniň ikinji düzüjisine tizlenmäniň normal (perpendikulýar) düzüjisi diýilýär. Ol traektoriýanyň her bir nokadynda normal boýunça egrilik merkezine tarap ugrukdyrylandyr, şol sebäpli hem oňa *merkeze ymtylýan tizlenme* diýilýär.

Şeýlelikde, egri hereket edýän jisimiň doly tizlenmesi tangensial we normal düzüjileriň geometriki jemine deňdir (1.3-nji surat), ýagny:



1.3-nji surat. Doly, tangensial we normal tizlemneler.

Tizlenmäniň tangensial düzüjisi (tangensial tizlenme) moduly boýunça tizligiň üýtgeýiş çaltlygyny kesgitleýär we ol traektoriýanyň galtaşma çyzygynyň boýuna ugrukdyrylypdyr. Tizlenmäniň normal düzüjisi – jisimiň tizliginiň ugry boýunça üýtgeýiş çaltlygyny kesgitleýär we traýektoriýanyň berlen nokadynda egrilik merkezine tarap ugrukdyrylandyr.

Tizlenmäniň tangensial we normal düzüjilerini hasaba almak bilen, hereketiň aşakdaky görnüşlerini bellemek bolar:

1. $a_\tau = 0, \quad a_n = 0$ – gönüçzykly deňölçegli hereket;
2. $a_\tau = a = const, \quad a_n = 0$ – gönüçzykly deňüýtgeýän hereket, onda:

$$a_\tau = a = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{v_2 - v_1}{t_2 - t_1}$$

Eger-de wagtyň başlangyç momenti $t_1 = 0$ bolsa, başlangyç tizlik $v_1 = v_0$, şeýle-de $t_2 = t$ we $v_2 = v$ bilen belläp, $a = \frac{(v - v_0)}{t}$ aňlatmany alarys, bu ýerden:

$$v = v_0 + at$$

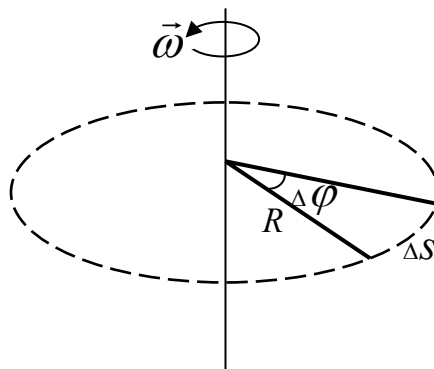
Bu formulany wagtyň 0 -dan islendik t çenli üýtgän çäklerinde integrirläp, deňölçegli üýtgeýän hereket üçin geçilen ýoluň formulasyny alarys:

$$s = \int_0^t v dt = \int_0^t (v_0 + at) dt = v_0 t + \frac{at^2}{2};$$

3. $a_\tau = f(t)$, $a_n = 0$ – üýtgeýän tizlenmeli gönüçyzykly hereket;
4. $a_\tau = 0$, $a_n = \text{const}$, haçan-da $a_\tau = 0$ bolanda tizlik moduly boýunça üýtgemeyär, diňe ugry boýunça üýtgeýär. $a_n = \frac{v^2}{r}$ formuladan, egrilik radiusynyň hemişelik bolmalydygy gelip çykýar. Bu ýagdaýda töwerek boýunça hereket deňölçegli bolýar;
5. $a_\tau = 0$, $a_n \neq 0$ – deňölçegli egriçyzykly hereket;
6. $a_\tau = \text{const}$, $a_n \neq 0$ – egriçyzykly deňüýtgeýän hereket;
7. $a_\tau = f(t)$, $a_n \neq 0$ – üýtgeýän tizlenmeli egriçyzykly hereket.

1.4. Burç tizligi we çyzyk tizligi. Olaryň arasyndaky baglanyşyk

Jisimiň töwerek boýunça hereketini häsiýetlendirmek üçin burç tizligi we burç tizlenmesi diýen düşüňjeler girizilýär.



1.4-nji surat. Burç tizliginiň şekillendirilişi.

Goý, jisim R radiusly töwerek boýunça deňölçegli hereket edýän bolsun (1.4-nji surat). Onuň sähelçe Δt wagt geçendäki ýagdaýyny $\Delta\varphi$ öwrülme burçy bilen aňladalyň. Jisimiň öwrülme burçundan wagta görä alnan birinji önüme deň bolan wektor ululyga *burç tizligi* diýilýär:

$$\vec{\omega} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \vec{\varphi}}{\Delta t} = \frac{d\vec{\varphi}}{dt}.$$

Burç tizliginiň birligi deregine radius-wektoryň bir sekuntda bir radian burça öwrülendäki tizligi kabul edilýär we $1\frac{rad}{s}$ görnüşinde belgilenýär.

Çyzyk tizligi burç tizliginiň radiusa köpeldilmegine deňdir (14-nji surata seret):

$$v = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta s}{\Delta t} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{R \Delta \varphi}{\Delta t} = R \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \varphi}{\Delta t} = R\omega, \quad v = R\omega$$

Eger-de, $\omega = const$ bolsa, aýlanma hereketi deňölçeqlidir we ony T aýlanma peridy bilen kesitlemek bolar. Jisimiň töwerek boýunça doly bir aýlaw edýän wagtyna *aýlaw peridy* diýilýär. Bu $\Delta t = T$ wagt aralygynda $\Delta \varphi = 2\pi$ bolýar, onda $\omega = \frac{2\pi}{T}$, bu ýerden:

$$T = \frac{2\pi}{\omega}.$$

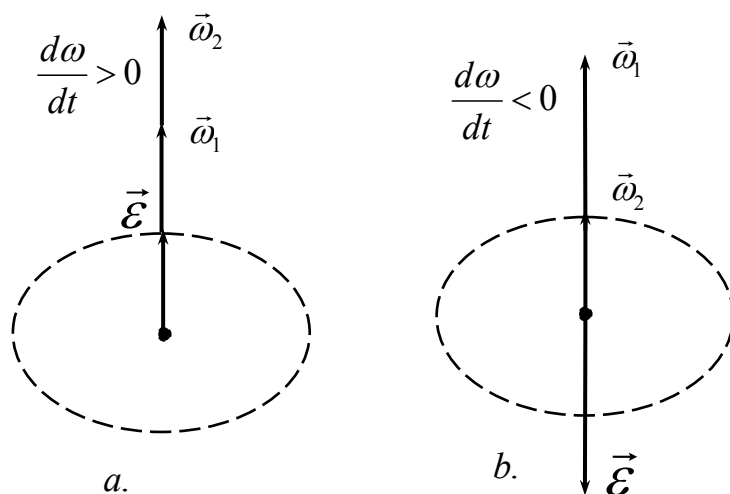
Jisimiň töwerek boýunça deňölçeqli hereketinde onuň wagt birliginde ýerine ýetirýän n aýlaw sanyna *aýlaw ýygylgy ýa-da çyzykly ýygylk* diýilýär. Eger-de aýlaw ýygylgyny n harpy bilen bellesek, onda:

$$n = \frac{1}{T} = \frac{\omega}{2\pi}, \text{ bu ýerden : } \omega = 2\pi n.$$

Burç tizlenmesi diýip, burç tizliginiň wagta görä alnan birinji önümine ýa-da öwrülme burçunyň wagta görä alnan ilkinji önümine deň bolan wektor ululyga aýdylýar:

$$\vec{\varepsilon} = \frac{d\vec{\omega}}{dt} \quad \text{ýa-da} \quad \vec{\varepsilon} = \frac{d^2\vec{\varphi}}{dt^2}$$

1.5-nji suratdan görnüşi ýaly, burç tizlenmesiniň wektory $\vec{\varepsilon}$ aýlanma oky boýunça burç tizliginiň elementar artdyrmasyna tarap ugrukdyrylandyr. Tizlenýän hereketde $\vec{\varepsilon}$ wektor $\vec{\omega}$ wektora ugurdaş, (1.5-nji a surat), haýallaýan hereketde bolsa garşylykly (1.5-nji b surat) ugrukdyrylandyr.



1.5-nji surat. Burç tizlenmesiniň şekillendirilişi.

$$a_{\tau} = \frac{dv}{dt}, \quad v = \omega R \quad \text{we} \quad a_{\tau} = \frac{d(\omega R)}{dt} = R \frac{d\omega}{dt} = R\epsilon.$$

Tizlenmäniň normal düzüjisi:

$$a_n = \frac{v^2}{R} = \frac{\omega^2 R^2}{R} = \omega^2 R.$$

Şeýlelikde, çyzyk (nokadyň R radiusly töweregiň dugasy boýunça geçen s ýoly, çyzyk tizligi – v , tangensial tizlenmesi – a_{τ} , normal tizlenmesi – a_n) we burç (öwrülme burçy – φ , burç tizligi – ω , burç tizlenmesi – ϵ) ululyklarynyň arasyndaky baglanyşyk aşakdaky formulalar bilen aňladylýar:

$$s = R\varphi, \quad v = R\omega, \quad a_{\tau} = R\epsilon, \quad a_n = \omega^2 R.$$

Töwerek boýunça deň üýtgeýän hereketde ($\epsilon = \text{const}$)

$$\omega = \omega_0 + \epsilon t, \quad \varphi = \omega_0 t + \epsilon t^2 / 2,$$

bu ýerde ω_0 – başlangyç burç tizligi.

II BAP. DINAMIKANYŇ ESASY KANUNLARY

§2.1. Nýutonyň birinji kanuny. Massa we güýç

Dinamika mehanikanyň esasy bölümidir. Dinamikanyň üç kanuny esasynda jisimleriň Ýeriň üstündäki we asman jisimleriniň hereketi barada geçirilen köp sanly tejribeleriň we teoretiki maglumatlaryň netijeleri Nýuton tarapyndan umumylaşdyrylýar. Nýutonyň kanunlary esasynda hereketiň dinamiki we kinematiki kanunalaýyklyklary biri-biri bilen baglanyşdyrylýar.

Nýutonyň birinji kanuny: Íslendik jisim özüniň göräli dynçlyk ýagdaýyny ýa-da deňölçegli we gönüçzykly hereketini, tä başga jisimler tarapyndan edilýän täsir ony şol ýagdaýdan üýtgetmäge mejbur edýänçä saklaýar.

Şu kesgitlemeden görnüşi ýaly, haçan-da jisime başga bir jisim tarapyndan täsir bolan wagtynda onuň dynçlyk ýagdaýy ýa-da deňölçegli we gönüçzykly hereketi üýtgeýär.

Jisime başga jisimler tarapyndan hiç hili täsiriň bolmadyk wagtynda onuň öňki tizligini saklamak häsiýetine inersiýa diýilýär. Şonuň üçin Nýutonyň birinji kanunyna inersiýa kanuny diýilýär.

Nýutonyň birinji kanunyny gös-göni tejribeler arkaly barlamak mümkin däl, sebäbi biziň daş-töweregimizdäki jisimleri, beýleki jisimleriň täsirinden goramak mümkin däl. Şeýle-de bolsa, biz köp sanly faktlary umumylaşdyryp, Nýutonyň birinji kanunynyň dogrulygyna göz ýetirýäris. Biziň daş-töweregimizdäki jisimleriň görünýän adaty dynçlyk ýagdaýy dürli jisimleriň oňa edýän täsiriniň biri-birini kompensirleýändigini bilen şertlenendir. Hereket edýän jisime başga jisimler näçe gowşak täsir etse, ol özüniň tizligini şonça hem uzak wagtlap saklaýar. Käbir başlangyç tizlik bilen zyňylan daş ýeriň üstünden typyp barýarka, üst näçe düz bolsa, ýagny başga jisimleriň edýän täsiri näçe az bolsa, ol şonça hem uzaga gider.

Bir jisime beýleki jisimler ýa-da meýdan tarapyndan edilýän mehaniki täsiri häsiýetlendirýän fiziki ululyga güýç diýilýär. Güýç jisimleriň tizliginiň üýtgemesiniň sebäbidir. Täsir belli bir tarapa ugrukdyrylandygy üçin, ol wektor ululykdyr.

Nýutonyň birinji kanuny ähli hasaplaýyş sistemalary üçin dogry däl. Mysal üçin, goý wagonyň gönüçzykly we deňölçegli hereketi hasaplaýyş sistemasy bolsun, şonda wagonyň sandyramasyny göz önünde tutmasak, wagona görä dynçlykda duran jisimlere beýleki

jisimler täsir etmese, olar öz-özünden hereketlenmeyärler. Ýöne welin wagon öwrülende, tormozlanyp, ýa-da gidişini tizlendirip başlanynda Nýutonyň birinji kanuny mese-mälim bozulyp başlaýar: şol wagta çenli dynçlykda duran jisimler gyşaryp, ýykylyp başlaýarlar. Nýutonyň birinji kanunynyň ýerine ýetýän hasaplaýyş sistemasyna inersial sistema diýilýär. Hasaplaýyş sistemasynyň inersial sistemasy diýlip, ýa-da dynçlykda duran ýa-da bolmasa başga bir inersial sistema görä deňölçegli we gönüçzykly hereket edýän sistema aýdylýar. Nýutonyň birinji kanunynyň ýerine ýetmeýän sistemasyna inersial däl sistema diýilýär.

Materiýanyň esasy häsiýetlerinden biri bolup, onuň inertlik we grawitasion häsiýetini kesgitleýän fizikii ululyga jisimiň massasy diýilýär.

§2.2. *Nýutonyň ikinji kanuny*

Nýutonyň ikinji kanuny kinematiki ululyk (tizlenme) bilen dinamiki ululygyň (güýjüň) arasyndaky özara baglanyşygy ýüze çykarýar we şeýle formulirlenýär: jisimiň özüne täsir edýän \vec{F} güýç tarapyndan alýan \vec{a} tizlenmesi, bu güýjüň ululygyna göni proporsionaldyr, onuň ugry bolsa güýç wektorynyň ugry bilen gabat gelýär, ýagny:

$$\vec{a} = k \frac{\vec{F}}{m} . \quad (2.1)$$

Bu ýerde: k – saýlanyp alnan ölçeg birliklerine bagly bolan proporsionallyk koeffisiýenti, m – onuň massasy. Eger \vec{a} , \vec{F} we m ululyklar şol bir birlikler sistemasynda alynsa, onda $k=1$ bolar we Nýutonyň ikinji kanunyny şeýle ýazmak bolar:

$$\vec{a} = \frac{\vec{F}}{m} . \quad (2.2)$$

Berlen güýjüň täsiri astynda jisim näçe az tizlenme alýan bolsa, onuň massasy şonça-da uludyr. Diýmek, dürli jisimleriň massalary olaryň deň güýçleriň täsiri astynda alýan tizlenmelerine ters proporsionaldyr, ýagny:

$$\frac{m_1}{m_2} = \frac{a_2}{a_1}.$$

Jisimiň massasynyň onuň ölçeglerine we maddasynyň tebigatyna baglydygy mekdep kursundan bellidir.

Praktiki durmuşda bir jisime birnäçe güýçleriň täsir edýän wagtlaryna hem az duş gelinmeýär. Şol ýagdaýda olaryň jisime berýän tizlenmesi Nýutonyň ikinji kanuny bilen kesgitlenilýär:

$$\vec{a} = \frac{\sum_{i=1}^n \vec{F}_i}{m} = \frac{\vec{F}}{m}.$$

Bu ýerdäki $\vec{F} = \sum_{i=1}^n \vec{F}_i$ güýje jisime goýlan n güýjüň deňtäsiredijisi (netijeleýjisi) diýilýär.

Nýutonyň ikinji kanunyny skalýar görnüşinde şeýle ýazmak bolýar:

$$a = \frac{F}{m} \quad \text{şu ýerden : } F=ma ;$$

Ýagny, güýç jisimiň massasyny şu güýjüň emele getirýän tizlenmesine köpeldilmegine san taýdan deňdir.

Belli bolşy ýaly, berlen jisimiň massasy haçan-da onuň tizligi ýagtylygyň tizligine golaýlaşyp başlanda üýtgäp başlaýar. Şu halatda hereket edýän jisimiň massasy şeýle kesgitlenilýär:

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Bu ýerde: v – hereket edýän jisimiň tizligi, m_0 – onuň dynçlyk ýagdaýyndaky massasy, $c=3.10^8$ m/s – ýagtylygyň wakuumdaky tizligi.

Jisimiň massasynyň onuň tizligine baglylygy ilkinji gezek Eýnşteýn tarapyndan subut edilen we ol relýatiwistik mehanikanyň esasyny düzýär (biz häzirlikçe diňe nusgawy mehanikanyň kanunlaryny öwrenýäris).

$a = \frac{d\vec{v}}{dt}$ formulany göz önünde tutup, Nýutonyň ikinji kanunyny şeýle görnüşde ýazýarys:

$$\vec{F} = m \frac{d\vec{v}}{dt},$$

ýa-da massany differensial alamatynyň aşagyna girizip alýarys:

$$F = \frac{d}{dt}(m\vec{v}). \quad (2.3)$$

(2.3) formuladaky massanyň tizlige $(m\vec{v})$ köpeltmek hasylynyň wektoryna jisimiň impulsy ýa-da hereket mukdary diýilýär we ol tizlik wektorynyň \vec{v} ugry bilen gabat gelýär, $d(m\vec{v})$ – impulsyň wektorynyň üýtgemesini aňladýar. (2.3) formulany şeýle görnüşde ýazýarys:

$$\vec{F}dt = d(m\vec{v}) \quad (2.4)$$

$\vec{F}dt$ wektora \vec{F} güýjüň impulsy diýilýär. (2.4) deňleme hem Nýutonyň ikinji kanunyny aňladýar: jisimiň impulsynyň (hereket mukdarynyň) üýtgemesi oňa täsir edýän güýçleriň impulsynyň üýtgemesine deňdir.

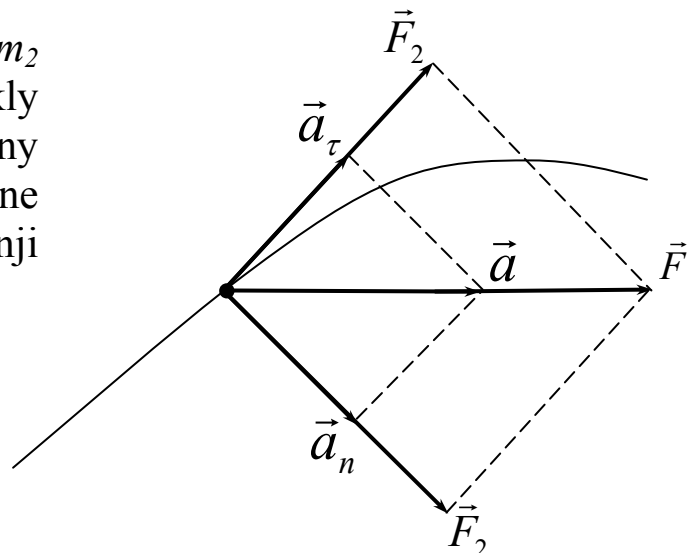
§2.3. Nýutonyň üçünji kanuny

Nýutonyň üçünji kanuny arkaly jisimleriň aralygyndaky özara täsir güýjüni kesgitleýärler. Ol şeýle aňladylýar. Iki jisimiň biri-birine bolan özara täsir güýji ululyklary boýunça deňdirler, ugurlary boýunça garşylyklydyrlar we ol güýçler bu nokatlary birleşdirýän gönüniň boýuna ugrugandyrlar:

$$\vec{F}_1 = -\vec{F}_2 \quad (2.5)$$

Mysal üçin, m_1 we m_2 massaly garşylykly zarýadlandyrylan iki sany jisimleriň özara biri-birine çekilişine seredeliň (2.1-nji surat).

2.1-nji surat.
Güýjüň we tizlenmäniň düzüjileri.



\vec{F}_1 we \vec{F}_2 güýçleriň täsiri astynda jisimler \vec{a}_1 we \vec{a}_2 tizlenmäni alýarlar. Nýutonyň ikinji kanuny esasynda ýazýarys:

$$\vec{F}_1 = m_1 \vec{a}_1 \quad \text{we} \quad \vec{F}_2 = m_2 \vec{a}_2 \quad (2.6)$$

(2.5) we (2.6) formulalary ulanyp:

$$m_1 \vec{a}_1 = -m_2 \vec{a}_2 \quad \text{ýa-da} \quad \vec{a}_1 = -\frac{m_2 \vec{a}_2}{m_1}$$

Ýagny, şol bir güýjüň täsiri astynda jisimleriň alýan tizlenmesi olaryň massalaryna ters proparsionaldyr we garşylykly tarapa ugrugandyr.

Jisimleriň özara täsirlerinde olaryň ýakyn aralykdan-da, uzak aralykdan-da, biri-biri bilen özara täsirleriniň bardygyna göz ýetirmek kyn däldir.

Ýakyndan täsire, mysal üçin, biz elimiz arkaly nähili güýç bilen stoluň gyrasyndan bassak, şolar ýaly güýç bilen stol hem biziň elimizi yzyna iterýär. Daşdan (uzak aralykdan) täsire Ýer bilen Günüň özara çekişme güýçleri mysal bolup biler. Şu ýagdaýlarda güýçler modullary boýunça biri-birine deňdirler we ugurlary boýunça garşylyklydyrlar.

§2.4. Impulsyň (hereket mukdarynyň) saklanmak kanuny

Impulsyň (hereket mukdarynyň) saklanmak kanunyny Nýutonyň kanunlaryndan getirip çykaryp bolar. Emma biz ilki bilen şu kanuny çykarmak üçin gerek bolan birnäçe düşüňjelere seredeliň. Alanynda bir bütewi hökmünde seredilýän material nokatlaryň we jisimleriň toplumyna mehaniki sistema diýilýär. Mehaniki sistemadaky material nokatlaryň özara täsir güýjüne içki, sistemanyň daşynda ýerleşen jisim tarapyndan sistemanyň içindäki jisimleriň her birine täsir edilýän güýje daşky güýçler diýilýär. Daşardan hiç hili güýç täsir etmeýän mehaniki sistema ýapyk ýa-da izolirlenen sistema diýilýär.

Izolirlenen sistemany emele getirýän iki sany material nokadyň özara täsirine seredeliň. Birinji nokadyň massasyny m_1 arkaly, onuň täsir edişýänçä bolan tizligini \vec{v}_1 özara täsirden soňkusyny \vec{v}_1^1 bilen,

değişlilikde, ikinji nokadyň massasyny m_2 özara täsire çenli bolan tizligini \vec{v}_2 soňkusyny \vec{v}_2^1 aňladalyň.

Nýutonyň ikinji kanunyny aňladýan (2.4) deňleme esasynda şeýle ýazmak bolar:

$$\left. \begin{aligned} \vec{F}_1 dt &= d(m\vec{v}_1) \\ \vec{F}_2 dt &= d(m\vec{v}_2) \end{aligned} \right\} \quad (2.7)$$

ýa-da

$$\left. \begin{aligned} \vec{F}_1 dt &= m_1 \vec{v}_1^1 - m_1 \vec{v}_2 \\ \vec{F}_2 dt &= m_2 \vec{v}_2^1 - m_2 \vec{v}_2 \end{aligned} \right\} \quad (2.8)$$

Bu ýerde dt – material nokatlaryň özara täsir edişýän wagty, \vec{F}_1 we \vec{F}_2 – olaryň täsir edişýän güýçleri. Nyutonyň üçünji kanuny esasynda:

$$\vec{F}_1 = -\vec{F}_2 \quad .$$

Şeýlelikde, (2.8) aňlatmanyň çep taraplary biri-birine deň. Şonuň üçin olaryň sag taraplaryny-da biri-birine deňläp ýazyp bolýar:

$$m_1 \vec{v}_1^1 - m_1 \vec{v}_1 = -(m_2 \vec{v}_2^1 - m_2 \vec{v}_2) \quad , \quad (2.9)$$

ýagny, iki sany material nokadyň (jisimiň) özara täsirinde olaryň impulslarynyň (hereket mukdarlarynyň) üýtgemesi biri-birine deňdir, ugurlary boýunça garşylyklydyr.

Eger-de sistema n material nokatdan düzülen bolsa (2.4) deňlemäni şeýle ýazmak bolar.

$$\sum_{i=1}^n \vec{F}_i dt = d \sum_{i=1}^n m_i \vec{v}_i = d \vec{K} \quad .$$

Bu ýerde $\vec{K} = \sum_{i=1}^n m_i \vec{v}_i$ – ähli sistemadaky impulsyň wektory.

Izolirlenen sistemada daşarky güýçler ýok, ýagny $\sum_{i=1}^n \vec{F}_i = 0$ onda $\frac{d\vec{K}}{dt} = 0$ bolar, ýa-da

$$\vec{K} = \sum_{i=1}^n m_i \vec{v}_i = const \quad . \quad (2.10)$$

Bu deňleme impulsyň saklanmak kanunyny aňladýar. Izolirlenen (ýapyk) sistemalarda impulsyň doly wektory wagtyň geçmegi bilen üýtgemeyär.

Şeýlelikde, izolirlenen sistemadaky bir jisimiň impulsynyň üýtgemegi diňe ikinji bir jisimiň impulsynyň üýtgemesiniň hasabyna bolup geçýär. Bu kanun diňe bir nusgawy mehanikanyň çäginde dogry bolman, tebigatyň esasy kanunlaryndan biri hasaplanylýar.

§2.5. *Bütindünýä dartýşma kanuny*

Mehanikanyň fundamental (esasy) kanunlarynyň biri hem bütindünýä dartýşma kanunydyr. Ýagny, Ýer we onuň üstündäki hem-de bütin dünýädäki material jisimleriň biri-birine belli bir güýç bilen dartylýandyklaryna ilkinji bolup inlis alymy Nýuton göz ýetiripdir. Şol kanuna-da bütindünýä dartýşma kanuny diýilýär. Ol kanun şeýle formulirlenýär:

Islendik iki material nokadyň özara dartýşma güýji olaryň massalaryna (m_1 we m_2) göni proporsionaldyr, aralaryndaky uzaklygyň kwadratyna bolsa ters proporsionaldyr.

$$F = G \frac{m_1 \cdot m_2}{r^2} \quad (2.11)$$

Bu formuladaky G ululyga grawitasiýa hemişeligi diýilýär. Egerde iki jisimiň massalary biri-birine deň bolup ($m_1=m_2=1$ massa birligine), bir uzynlyk birligine deň bolan aralykda ýerleşen bolsalar, onda (2.11) formulanyň esasynda

$$G = F ,$$

bolar. Diýmek, grawitasiýa hemişeligi, bir birlik massaly iki jisimiň uzynlyk birligine deň bolan aralykdan çekişýän güýçlerine san taýdan deňdir. Grawitasiýa hemişeliginiň köp sanly tejribeleriň üsti bilen alnan bahasy

$$G = 6,67 \cdot 10^{-11} m^3 / (kg \cdot s^2) .$$

Özara dartýşma güýjüniň gaty kiçi bolanlygy üçin mehanikanyň köp meseleleri çözülen-de ol hasaba alynmaýar. (Mysal üçin, massalary deňleşlikde 60 tonna deň bolan birmeňzeş iki wagonyň 20 m aralykdan biri-birine bolan dartýşma güýji 1dina ($1Nýuton = 10^5$ dina) deňdir. Bu bolsa ýuwaş şemalyň wagona edýän täsirinden-de kiçidir).

Ýeriň golaýynda ýerleşen islendik jisime F dartýşma güýji täsir edýär, şonuň täsiri astynda ol Ýeriň merkezine tarap dartylýar:

$$P = mg.$$

Bu ýerde P – agyrlyk güýji; g - erkin gaçmanyň tizlenmesi. g – niň san bahasyny iş ýüzünde duş gelýän meseleler çözüleninde $9,8m/s^2$ deň diýip alýarlar.

Eger-de Ýeriň öz okunyň töwereginde gije-gündizleýin aýlanyşyny hasaba almasaň, agyrlyk güýji we grawitasion hemişeligiň güýji biri-birine deň bolýar:

$$P = mg = F = GmM / R^2$$

Bu ýerde M – Ýeriň massasy, R – Ýeriň merkezi bilen jisimiň agyrlyk merkeziniň aralygy. Haçan-da, jisim Ýeriň üstünde ýatanda, şu formulany ulanmak bolar. Eger-de jisim Ýeriň üstünden h beýiklikde ýerleşen bolsa, onda:

$$P = GmM / (R + h).$$

Bu ýerde R – Ýeriň radiusy, h -beýiklik. Ýeriň üstünden jisimiň ýerleşýän aralygynyň artmagy bilen agyrlyk azalyp başlaýar.

§2.6. Bütindünýä dartýşma kanunynyň kömegi bilen kosmiki tizlikleriň kesgitlenilişi

Kosmiki giňişlige raketalary uçurmak üçin, öňde goýlan maksada baglylykda, olara kesgitli bir başlangyç tizlik bermeli bolýar. Ol tizlige hem kosmiki tizlik diýilýär.

Birinji kosmiki tizlik diýip, jisimiň Ýeriň töwereginde tegelek orbita boýunça hereket edip, Ýeriň emeli hemrasyna öwrülmegi üçin gerek bolan gorizonta ugrukdyrylan minimal tizlige aýdylýar.

r radiusly tegelek orbita boýunça hereket edýän hemra Ýeriň çekiş güýji täsir edýär, bu güýç hem ony merkeze ymtylýan tizlenme bilen hereket etmäge mejbur edýär.

$$GmM / r^2 = m g_1^2 / r^2.$$

Eger-de emeli hemra Ýeriň üstünden uly bolmadyk aralykda hereket edýän bolsa, onda $r \approx R$ (Ýeriň radiusy) we $g = GM / R^2$, şu ýerden:

$$v_1 = \sqrt{gR} = 7,9 \text{ km} / \text{s}.$$

Jisime Ýeriň täsir ediş sferasyndan boşamagy üçin oňa birinji kosmiki tizlik ýeterlik däl. Onuň üçin ikinji kosmiki tizlik gerek. Ikinji kosmiki tizlik diýip, Ýeriň täsir (grawitasiýa) meýdanynda jisimiň orbitasynyň paraboliki görnüşini alyp, onuň Günüň emeli hemrasyna öwrülmegi üçin gerek bolan iň kiçi tizlige aýdylýar. Jisimiň Ýeriň çekiş güýjüni ýeňip geçip, jisimiň kosmiki giňişlige gitmegi üçin onuň kinetik energiýasy ýeriň dartuw güýjüniň garşysyna edilýän işiň ululygyna deň bolmalydyr. Ýagny:

$$\frac{mv_2^2}{2} = \int_R^\infty G \frac{mM}{r} dr = G \frac{mM}{R}$$

Şu ýerden:

$$v_2 = \sqrt{2gR} = 11,2 \text{ km} / \text{s}.$$

Üçünji kosmiki tizlik diýip, jisimiň Gün sistemasynyň çäginde çykmagy üçin gerek bolan tizlige aýdylýar. Üçünji kosmiki tizlik $v_3 = 16,7 \text{ km/s}$. Jisime şeýle uly bolan başlangyç tizligi bermek çylşyrymly tehniki meseleleriň biridir.

Birinji kosmiki tizlik öňki SSSR-de 1957-nji ýylda Ýeriň ilkinji hemrasy uçurylanda, ikinji – 1959-njy ýylda raketa uçurylanda amala aşyryldy. 1961-nji ýylda Ýu.A.Gagariniň taryhy uçuşyndan soňra kosmonawtikanyň esasy ösüş döwri başlandy.

III BAP. GATY JISIMLERIŇ AÝLANMA HEREKETI

§3.1. Gozganmaýan okuň töwereginde gaty jisimiň aýlanmagy

Mehanikada gaty jisim diýip, onuň bölekleriniň hereketiň ähli dowamynda özara ýerleşiş üýtgemeyän jisime düşünilýär.

Gaty jisimiň içinden geçirilýän we onuň bilen butnawsyz bagly bolan gönüçyzygyň öz-özüne parallel bolup edýän hereketine öňe bolan hereket diýilýär. Öňe bolan hereketde gaty jisimiň hemme nokatlarynyň birmeňzeş \vec{v} tizligi we \vec{a} tizlenmesi bolýar. Öňe bolan hereketiň iň bir ýönekeý görnüşi gönüçyzykly heketdir. Bu halatda jisimiň ähli nokatlarynyň traýektorýasy parallel gönüçyzyklardyr.

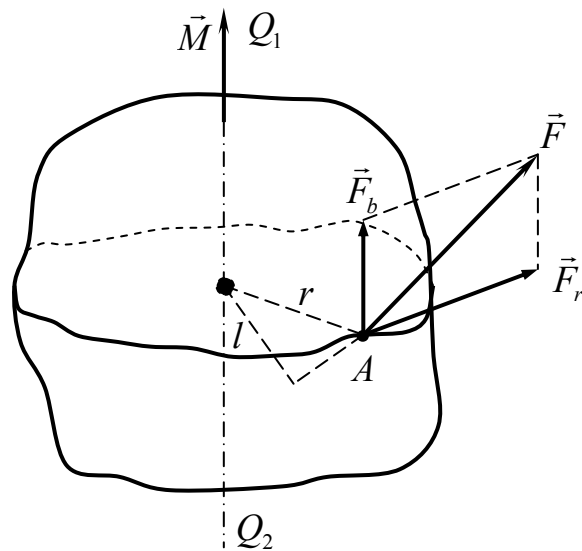
Aýlanma hereketinde gaty jisimiň ähli nokatlarynyň merkezleri bir gönüniň üstünde ýatýar. Şol gönüçyzyga bolsa aýlanma oky diýilýär.

Umumy halda gaty jisim şol bir wagtyň özünde öňe bolan hereketi-de, aýlanma hereketi-de ýerine ýetirip biler.

Gaty jisimiň aýlanma hereketi öwrenilende oňa, öwrülme burçy, burç tizligi, burç tizlenmesi ýaly düşüňjeleri girizlärler. (Biz olar barada §1.4 durup geçipdik).

§3.2. Aýlanma momenti we inersiýa momenti. Şteýneriň teoremasy

Material nokadyň öňe bolan hereketiniň dinamikasy öwrenilende öňki kinematiki ululyklaryň üstüne güýç we massa goşulypdy. Şular ýaly aýlanma hereketiniň dinamikasy öwrenileninde hem öňki kinematiki ululyklardan (öwrülme burçy, burç tizligi, burç tizlenmesi) daşgary iki sany - güýjüň momenti we inersiýa momenti diýlen täze düşüňjeler girizilýär. Güýç momenti we inersiýa momenti hakyndaky düşüňjeleriň manysyny aýdyňlaşdyrmak üçin O_1O_2 aýlanma okuň töwereginde \vec{F} güýjüň täsiri astynda aýlanýan m massaly A maddy nokadyň hereketine seredeliň (3.1-nji surat). Şu ýerde A nokada täsir edýän F güýji iki sany F_b we F_r düzüjä dargadyp bolýar. Güýjüň wertikal düzüjisi bolan F_b O_1O_2 okuň töwereginde aýlanmany döredip bilmez, ol jisimiň aýlanma okunyň ugry boýunça süýşmesini döredip biler. Şonuň üçin aýlanma hereketinde bu güýç hasaba alynmaýar.



3.1-nji surat .Jisimiň aýlanma hereketiniň çyzgysy.

Aýlanma hereketini O_1O_2 aýlanma okuna perpendikulýar bolan tekizlikde (3.1-nji surat) ýatan gorizonta düşüjiniň (F_r) döretjekdigi aýdyňdyr. Jisimi aýlanmaga mejbur edýän bu güýjüň täsiri (ony biz F diýip belläliň) onuň san bahasyna we jisimiň aýlanma oky bilen ýerleşen aralygynyň ululygyna baglydyr.

Eger-de bu aralyk nola deň bolsa, F güýç O_1O_2 aýlanma oky bilen kesişer, netijede jisim aýlanmaz.

F güýjüň ululygynyň O nokatdan (aýlanma merkezinden) geçirilen l perpendikulýar (eginiň) uzynlygyna köpeltmek hasylyna M aýlanma momenti ýa-da oka görä güýjüň momenti diýilyär:

$$M = F \cdot l . \quad (3.1)$$

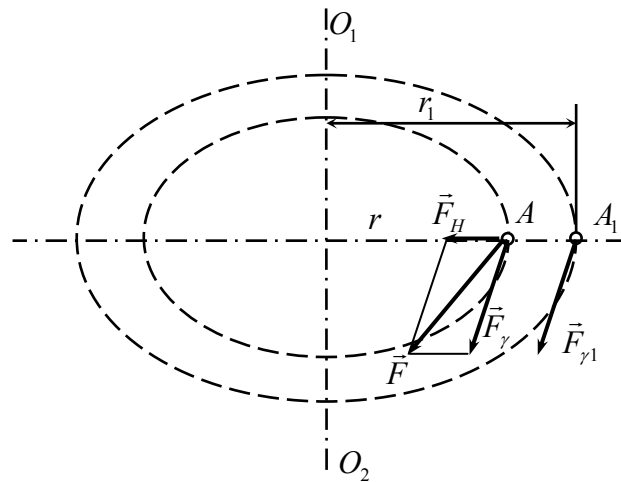
M - Halkara birlikler sistemasynda $N \cdot m$ bilen ölçeyärler.

Eger-de jisime birnäçe güýçler täsir edýän bolsalar, aýlanma okuna otnositellikde alnan şu güýçleriň momentleriniň algebraik jemi nola deň bolan ýagdaýynda jisim deňagramlylyk ýagdaýynda bolar. Şeýlelikde, jisimleriň aýlanma hereketinde diňe bir güýçleri hasaba alman, aýlanma okuna görä olaryň ýerleşişleri-de hasaba alynmalydyr.

Öňe bolan hereketiň dinamikasyny jisimiň inersiýasyny onuň massasy doly häsiýetlendirýär. Aýlanma hereketinde material nokadyň inersiýasyny diňe onuň massasy häsiýetlendirmän, ol nokadyň aýlanma okuna çenli bolan aralygyň hem uly roly bar.

Goý, m massaly A material nokat F güýjüň täsiri astynda r radiusly töwerek boýunça $O_1 O_2$ okuň daşynda deňölçegsiz hereket edýär diýip göz önüne getireliň. Onuň tangensial düzüjisi merkeze ymtylýan tizlenmäni ýüze çykarýar we burç tizlenmesine täsir etmeýär. (3.2-nji

surat). Nýutonyň ikinji kanuny esasynda $F_t = m \cdot a_t$ diýip ýazyp bilýäris. Şu deňlemäniň iki tarapyny hem r -e köpeldýäris.



3.2-nji surat. Aýlaýjy güýjüň düzüjileri.

Onda $F_t \cdot r = m a_t \cdot r$ bolar. (3.1) formulany we $a_t = r\varepsilon$ deňdigini göz önünde tutup ýazýarys:

$$M = mr^2\varepsilon = J \cdot \varepsilon. \quad (3.2)$$

Bu (3.2) deňlik aýlanma hereketi üçin dinamikanyň ikinji kanunyny aňladýar. Bu deňlemäni gönüçyzykly Nýutonyň, öňe hereketdäki ikinji kanuny bilen deňeşdirmek arkaly şeýle netijä gelmek bolar: aýlanma hereketinde F güýjüň roluny M aýlanma momenti, çyzyk tizlenmesi bolan a -nyň roluny ε burç tizlenmesi ýerine ýetirýär. Massany bolsa material nokadyň aýlanma okuna otnositel bolan inersiýa momenti bilen çalşyrmak bolar. J Nokadyň massasynyň onuň aýlanma merkezine çenli bolan aralygyň kwadratyna köpeltmek hasylyna deň bolan ululyga inersiýa momenti diýilýär:

$$J = m \cdot r^2 \quad (3.3)$$

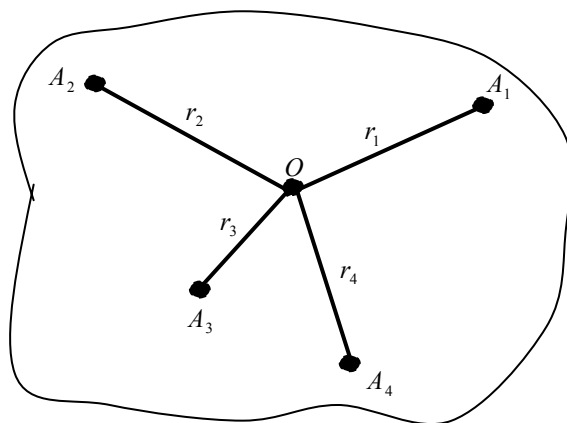
Şeýlelikde, Nýutonyň ikinji kanunyny aýlanýan jisim üçin şeýle görnüşde ýazmak bolar:

$$M = J \cdot \varepsilon \quad (3.4)$$

Bu deňlemäni başga bir A_1 material nokat üçin ýazalyň (3.2-nji surata seret).

$$M_1 = J_1 \cdot \varepsilon$$

Goý, $m=m_1$, $M=M_1$ emma $r_1>r$. Şonuň üçin A nokadyň $J=mr^2_1$ – formula bilen kesgitlenilýän inersiýa momenti A nokadyň (J) inersiýa momentinden ulydyr. Ýagny $J_1>J$, şoňa görä-de, M aýlanma momentiniň üýtgemeyän bahasynda $\varepsilon_1>\varepsilon$. Şeýlelikde, jisimiň inersiýa momenti näçe uly bolsa, hemişelik aýlanma momentiniň täsiri astynda onuň alýan burç tizlenmesi şonça-da kiçidir. Ýagny, jisimiň inersiýa momenti aýlanma hereketinde onuň inersiýa häsiýetini kesgitleýär we ol diňe bir jisimiň massasyna bagly bolman, jisimiň bölejikleriniň aýlanma okuna görä ýerleşişlerine-de baglydyr.



3.3-njy surat. Jisimiň inersiýa momentiniň kesgitlenilişi.

Jisimiň inersiýa momentini kesgitlemek üçin şu jisimi düzýän onuň ähli material nokatlarynyň ($A_1, A_2, A_3, A_4, \dots$) inersiýa momentlerini goşmak gerek (3.3-njy surat).

$$J = m_1 r_1^2 + m_2 r_2^2 + m_3 r_3^2 + \dots + m_n r_n^2$$

Şu ýerde $r_1, r_2, r_3, \dots, r_n$ – nokatlaryň, degişlilikde aýlanma okuna çenli bolan aralyklary ýa-da $J = \sum_{i=1}^n m_i r_i^2$. Umumy görnüşde, jisim tükeniksiz kiçi massaly material nokatlardan düzülip, bitewi bir jisimi emele getirýän bolsa, ouň inersiýa momenti integrirlemek arkaly tapylyp bilner:

$$J = \int_0^m r^2 dm ; \quad (3.5)$$

Jisimiň inersiýa momenti, onuň haýsy oka otnositel aýlanýandygyna we massanyň göwrüme görä nähili bölünendigine baglydyr. Biz köp hallarda jisimiň aýlanma okunyň onuň agyrylyk merkezinden geçip, jisimiň hem şol okuň töwereginde aýlanýan

hallaryna duş gelyäris. Şeýle ýagdaýda dürli jisimleriň inersiýa momentleriniň kesgitleniş formulalary 1-nji jedwelde berlendir.

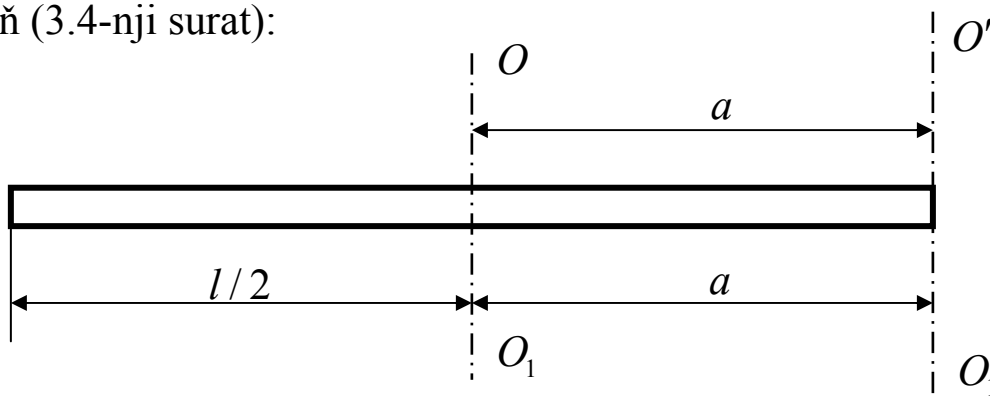
1-nji jedwel.

<i>Jisim</i>	<i>Aýlanma okunyň ýerleşşi</i>	<i>Inersiýa momenti</i>
Ýuka diwarly içi boş R radiusly halka	Onuň merkezinden geçýär	mR^2
Tutuş silindr ýa-da R radiusly disk	Onuň merkezinden geçýär	$\frac{1}{2}mR^2$
R radiusly şar	Aýlanma oky onuň merkezinden geçýär	$\frac{2}{5}mR^2$
Inçe silindr görnüşli l uzynlykly demir taýajygy	Aýlanma oky onuň merkezinden geçýär	$\frac{1}{12}ml^2$

Biziň sereden hallarymyzyň hemmesinde-de aýlanma oky olaryň merkezinden geçýär. Emma, iş ýüzünde jisimleriň, olaryň merkezinden geçýän aýlanmak okunyň daşynda däl-de, ol oka parallel bolan islendik okuň daşynda aýlanýan halatlary-da az gabat gelmeýär. Şu ýagdaýda jisimiň inersiýa momentini kesgitlemek üçin Şteýneriň teoremasy ulanylýar: onda jisimiň islendik aýlanma okuna oňnositel bolan inersiýa momentiniň üstüne jisimiň massasynyň onuň aýlanýan okuna çenli bolan uzaklygyň kwadratyna köpeltmek hasylynyň goşulmagyna deňdir:

$$J = J_c + ma^2 \quad (3.6)$$

Bu ýerde J_c – jisimiň aýlanma oky agyrylyk merkeziniň üstünden geçýän wagtyndaky inersiýa momenti, m – onuň massasy, a – inersiýa merkezinden aýlanýan oka çenli bolan aralyk. Mysal üçin, m massaly, uzynlygy l bolan ýuka silindr görnüşli demir taýajygy onuň ahyryndan geçýän, taýajyga perpendikulýar bolan O_1O' okuň töwereginde aýlanýar diýeliň (3.4-nji surat):



3.4-nji surat. Inersiýa momentiniň aýlanma okuna baglylygy.

Belli bolşy ýaly, taýajyk O O₁ simmetriýa okuna otnositel aýlanýan wagtynda onuň inersiýa momenti $J_c = \frac{1}{12}ml^2$ deň. Çyzgydan görnüşi ýaly, $a=l/2$ we onuň O₁ O₁ oka otnositel aýlanýan wagtyndaky inersiýa momenti (3.5) formula görä:

$$J = \frac{1}{12}ml^2 + m\left(\frac{l}{2}\right)^2.$$

Şu ýerde: $J = \frac{1}{3}ml^2$

Diýmek, taýajygyň inersiýa momenti ilkinji ýagdaýyna garanyňda 4 gezek artýar.

§3.3. *Aýlanma hereketiň dinamikasynyň esasy deňlemesi*

Öňe bolan hereket üçin Nýutonyň ikinji kanuny şeýle aňladylýar:

$$\vec{a} = \frac{\vec{F}}{m}$$

Eger-de jisim ähli daşarky güýçleriň netijeleýji M momentiniň täsiri astynda gozganmaýan okuň daşynda aýlanýan bolsa, ýokardaky formulany şeýle görnüşde ýazmak bolar:

$$\vec{\mathcal{E}} = \frac{\vec{M}}{J}$$

Bu ýerde $J = \int_0^m r^2 dm$ dm – massaly material nokatlaryň

birleşmesinden ybarat bolan jisimiň inersiýa momentidir. Şu aňlatmadan görnüşi ýaly, gaty jisimiň gozganmaýan okuň daşynda aýlanýan wagtyndaky burç tizlenmesi aýlanma momentine göni, inersiýa momentine bolsa ters proporsionaldyr.

Üýtgemeyän aýlanma momentinde burç tizlenmesi hem üýtgemän galýar, bu bolsa deňüýtgeýän aýlanma hereketini döredýär. Şonuň üçin jisimiň başlangyç aýlaw tizligini ω_0 bilen daşarky güýçleriň M momentiniň täsir etmeginde onuň Δt wagt geçeninden soňky burç tizligini ω bilen belläp:

$$\mathcal{E} = \frac{\omega - \omega_0}{\Delta t}$$

diýip, ýazyp bolýar. Onda (3.3) deňleme şeýle görnüşi alýar.

$$M = J \frac{\omega - \omega_0}{\Delta t} \quad \text{ýa-da} \quad M \cdot \Delta t = J\omega - J\omega_0 \quad (3.7)$$

(3.7) formuladaky (M) güýç momentiniň onuň täsir edýän wagtyna (Δt) köpeltmek hasylyna deň bolan ululyga güýçleriň momentiniň impulsy (ýa-da aýlaw momentiniň impulsy) diýilýär. Jisimiň J inersiýa momentiniň onuň burç tizligine köpeltmek hasylyna ($J\omega$) impulsyň momenti (ýa-da hereket mukdarynyň momenti) diýilýär. (3.7) deňleme dinamikanyň aýlanma hereketi üçin esasy kanunydyr. Jisime täsir edýän güýçleriň aýlaw momentiniň impulsy jisimiň impulsynyň momentiniň (hereket mukdarynyň momentiniň) üýtgemesine deňdir.

Güýçleriň momentiniň ýok wagtynda ($M=0$) hereket mukdarynyň momenti hemişelik bolup galýar. Bu netije hereket mukdarynyň momentiniň saklanmak kanunyň aňladýar.

§3.4. *Impulsyň momentiniň saklanmak kanuny*

Aýlanma hereketinde-de öňe bolan hereketdäki ýaly, Nýutonyň üçünji kanuny ulanylýar: iki sany aýlanýan jisimleriň özara täsirinde birinji jisimiň ikinji jisime täsir edýän \vec{M}_1 aýlanma momentiniň ululygy ikinji jisim tarapyndan birinji jisime täsir edýän \vec{M}_2 aýlanma momentiniň ululygyna deňdir, ugry boýunça garşylyklydyr, ýagny:

$$\vec{M}_1 = -\vec{M}_2.$$

Eger-de aýlanýan jisimleriň biri-birine täsir edişýän wagtlyry deň bolsa, jisime täsir edýän güýçleriň momentiniň impulsy hem biri-birine deňdir we ugurlary boýunça garşylyklydyr:

$$\vec{M}_1 \cdot \Delta t = -\vec{M}_2 \cdot \Delta t. \quad (3.8)$$

Şu halatda dinamikanyň aýlanma hereketi üçin esasy kanunyň üsti bilen (3.8) formulany şeýle görnüşde ýazýarys:

$$J_1(\vec{\omega}_1^1 - \vec{\omega}_1) = -J_2(\vec{\omega}_2^1 - \vec{\omega}_2). \quad (3.9)$$

Bu ýerde J_1, J_2 – birinji we ikinji jisimleriň inersiýa momentleridir. $\vec{\omega}_1^1$ we $\vec{\omega}_2^1$ – olaryň deňşililikde özara täsirden soňky, ω_1 we ω_2 – öňki burç tizlikleridir. (3.9) formulany şeýle görnüşe geçirýäris:

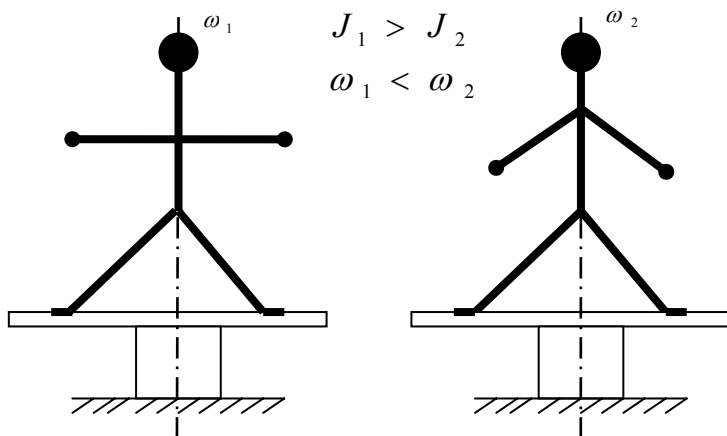
$$J_1 \vec{\omega}_1 + J_2 \vec{\omega}_2 = J_1 \vec{\omega}_1^1 + J_2 \vec{\omega}_2^1.$$

Şu ýerden görnüşi ýaly, ýapyk sistemadaky jisimleriň impulslarynyň momentleri olaryň özara täsirleri netijesinde-de üýtgemän galýar:

$$\sum_{i=1}^n J_i \vec{\omega}_i = \text{const}. \quad (3.10)$$

(3.10) formula impulsyň momentiniň saklanmak kanunyny aňladýar. Şu formuladan görnüşi ýaly, inersiýa momentiniň üýtgemeyän halyna, daşky güýçleriň ýok wagtynda, aýlanýan jisimiň burç tizligi hemişelik bolup galýar. Eger daşky güýçleriň ýok wagtynda inersiýa momenti üýtgeýän bolsa, onda $\vec{\omega}$ burç tizligi hem üýtgäp başlaýar, şoňa görä-de $J\vec{\omega}$ köpeltmek hasyly hemişelik bolup galýar, ýagny J inersiýa momenti artsa, onda $\vec{\omega}$ burç tizligi kemelýär, ýa-da tersine - $\vec{\omega}$ artsa, J kemelýär.

Hereket mukdarynyň momentiniň saklanmak kanunyny wertikal okuň töwereginde sürtülmezden, aýlanyp bilýän oturgyjyň (žukowskiniň oturgyjynyň) üstünde dik duran adamyň kömegi bilen görkezmek bolar. Goý, gapdala uzadan ellerinde daş saklap duran adam (3.5-nji surat) oturgyç bilen bilelikde $\vec{\omega}$ burç tizlikli herkete getirilsin. Eger adam ellerini aşak goýberse, onda onuň inersiýa momenti kemeler, şonuň netijesinde bolsa aýlanmagynyň $\vec{\omega}$ burç tizligi artar.



Eger adam ellerini ýene-de gapdala uzaltsa, onda $\vec{\omega}$ burç tizligi kemeler. Türgenler çylşyrymly akrobatiki oýunlary ýerine ýetirenlerinde-de, beýikden (tramplinden) suwa bökenlerinde-de, impulsyň saklanmak kanunundan ugur alýarlar.

3.5-nji surat. Oturgyçda aýlanýan adamyň inersiýa momentiniň üýtgeýşiniň mysaly.

IV BAP. IŞ WE ENERGIYA

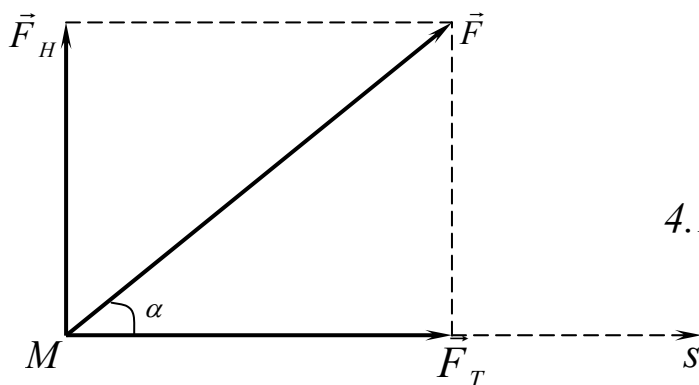
§4.1. Iş we kuwwat

Biziň daş-töweregimizi gurşap alan ähli jisimleriň orun üýtgetmesi haýsy-da bolsa bir güýjüň ýa-da birnäçe güýçleriň täsir etmeginde bolup geçýär. Bu ýerden güýçleriň we jisimleriň orun üýtgetmeleriniň özara täsirlerini öwrenmekligiň zerurlygy gelip çykýar.

Goý, M jisim hemişelik F güýjüň täsiri astynda gönüçyzykly (şu güýjüň ugruna baka) ornuny üýtgetsin we onuň goýlan nokady s aralygy geçsin. Jisime täsir edýän güýjüň onuň orun üýtgetmesiniň ululygyna köpeltmek hasylyna mehaniki iş diýilýär :

$$A = F \cdot s. \quad (4.1)$$

Eger jisime goýlan güýç ornuň üýtgeýän ugry bilen α burçuny emele getirýän bolsa (4.1-nji surat), F güýji ornuň üýtgeýän ugry bilen α burçuny emele getirýän bolsa (4.1-nji surat), F güýji ornuň üýtgeýän ugruna ugurdaş bolan F_T we oňa perpendikulýar bolan F_H düzüji güýçlere dargatmak bolar.



4.1-nji surat. Ýapgyt güýjüň işi.

Ýokarda belleýşimiz ýaly, işi diňe F_T düzüji güýç ýerine

ýetirýär, şoňa görä-de: $A = F_T \cdot s$; ýa-da $F_T = F \cdot \cos \alpha$

bolýanlygy üçin $A = F \cdot s \cdot \cos \alpha \quad (4.2)$

Şeýlelik bilen, A iş F güýjüň orun üýtgetmäniň ululygyna hem-de bu güýjüň ugry bilen üýtgeýän ugruň arasyndaky burçuň kosinusyna köpeldilmegine san taýdan deňdir.

Iş diňe san bahasy bilen häsiýetlendirilýär, şoňa görä-de ol skalýar ululykdyr.

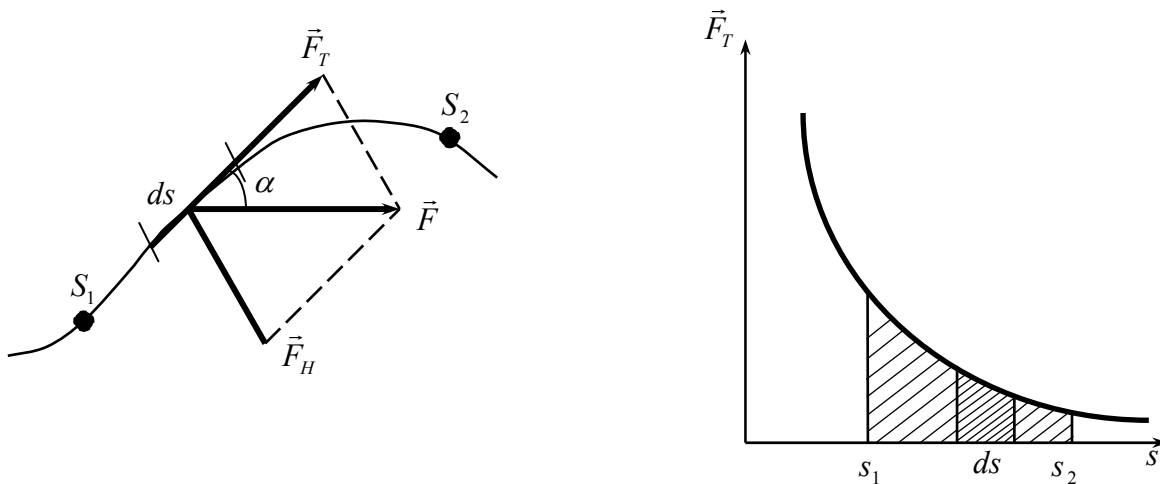
(4.2) formuladan görnüşi ýaly, edilen iş diňe jisime täsir edýän güýje we jisimiň orun üýtgetmesine bagly bolman, olaryň arasyndaky burça-da baglydyr. Onuň üç halyna seredeliň:

1. $\alpha < 90^\circ$ bolanda $\cos \alpha > 0$, diýmek, iş položitelidir. Bu halda $\cos \alpha > 0$ düzüji güýç orun üýtgetmäniň tarapyna ugrukdyrylandyr.

2. $\alpha > 90^\circ$ bolanda $\cos \alpha < 0$ bolýar, bu halda iş otrisateldir we F_T düzüji güýç orun üýtgetmäniň garşylykly tarapyna ugrukdyrylandyr. (zyňlan agyr jisim ýokarlygyna barýar, agyrlyk güýji bolsa aşaklygyna, hereketiň düzüjileri garşylykly tarapyna ugrukdyrylandyr: agyrlyk güýjüniň işi otrisateldir).

3. $\alpha = 90^\circ$ bolanda iş nola deňdir. (Jisim merkeze ymtylýan güýjüň täsiri astynda töwerek boýunça deňölçegli hereket edýär, bu halda güýç hereketiň ugruna perpendikulýar bolýar, şoňa görä-de $A=0$).

Indi işiň umumy görnüşde kesgitlenmesine seredeliň. Goý, jisim üýtgeýän güýjüň täsiri astynda egriçyzykly ýol bilen S_1 nokatdan S_2 nokada ornuny üýtgetsin (4.2-nji surat).



4.2-nji surat. Üýtgeýän güýjüň işiniň kesgitlenilişi.

Güýjüň yola baglylyk egrisiniň örän kiçi ds kesimini alalyň, şu aralykda F güýji hemişelik, onuň ugruny bolsa gönüçyzykly diýip kabul etmek bolar, ýagny:

$$dA = F \cdot ds \cdot \cos \alpha. \quad (4.3)$$

s_1 we s_2 aralykda ýerine ýetirilen doly işi integrirlemek ýoly bilen tapýarys:

$$E_{ki} = \frac{m_i r_i^2 \omega^2}{2}. \quad (4.4)$$

A doly işi grafiki görnüşde hem bermek bolar. Absissa oky boýunça S ýoluň uzynlygyny, ordinata oky boýunça bolsa F_t düzüji güýjüň bahasyny goýalyň. S_1 we S_2 nokatlardaky F_t düzüji güýjüň bahalaryny goýup, A doly işiň bütin ştrihlenen şekiliň meýdanyna deňdigini kesgitlemek kyn dälär.

Umuman, diňe bir güýçleriň ýerine ýetirýän işini däl-de, eýsem ol işiň ýerine ýetirilen wagtyň dowamlylygyny hem bilmek örän möhümdir. Edil şol bir işi ýerine ýetirýän iki mehanizmiň haýsy birisi şol işi az wagt aralygynda ýerine ýetirse, onuň oňatdygy görnüp dur. Şoňa görä-de, iş bilen bir hatarda kuwwat diýilýän täze bir ululyk girizilýär. Kuwwat diýip, ΔA işe proporsional bolan, bu işiň ýerine ýetirilen Δt wagtyna ters proporsional bolan fiziki ululyga aýdylýar. Eger-de kuwwaty N harpy bilen bellesek, onda:

$$N = \frac{\Delta A}{\Delta t} \quad (4.5)$$

Eger güýç wagta görä üýtgeşe, kuwwat hem öňküligine galmaýar. Onda (4.5) formula orta kuwwaty kesgitleýär, Δt wagt aralygynyň tükeniksiz kemelmeginde $\Delta A/\Delta t$ gatnaşygyň ymtylýan çägi mgnowen kuwwat bolýar:

$$N = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta A}{\Delta t} = \frac{dA}{dt} \quad (4.6)$$

Iş birligi – jouldyr (J). 1 J – 1 Nýuton güýjüň 1 m ýolda edýän işiniň ululygyna deňdir.

Kuwwat birligi – watt (Wt). 1 Wt – 1 s dowamynda 1 J iş edilse, ol 1 watta deňdir. (1 Wt = 1 J/s).

§4.2. Kinetik we potensial energiýalar. Sistemanyň mehaniki energiýasynyň saklanmak we öwrülmek kanuny

Material nokat hökmünde garalýan jisim haýsy hem bolsa bir güýjüň täsir etmegi netijesinde özüniň tizligini üýtgedýär. Goýlan güýjüň edýän işi jisimiň tizliginiň üýtgemegi bilen baglanyşykly. Bu baglylyk material nokadyň kinetik energiýasy diýilýän fiziki ululyk arkaly aňladylýar.

Material nokadyň kinetik energiýasyny kesgitlemek üçin goý, m massaly nokada ululygy üýtgemeyän F güýç täsir edip, onuň tizligini

v_1 bahadan v_2 baha çenli üýtgedýär diýeliň. Şu halatda t wagtyň dowamynda material nokat s ýoly geçer, F güýç bolsa

$$A = F \cdot s. \quad (4.7)$$

işi ýerine ýetirer.

Güýň hemişelik bolanlygy zerarly, hereket deňtizlenýän bolar, onuň tizlenmesi:

$$a = \frac{v_2 - v_1}{t}.$$

Nýutonyň ikinji kanunyna görä:

$$F = m \cdot a = m \frac{v_2 - v_1}{t} \quad (4.8)$$

Material nokadyň t wagtda geçen ýoluny $\langle v \rangle = \frac{v_2 + v_1}{2}$ orta tizlik arkaly kesgitleliň, bu ýerden ($s = \langle v \rangle \cdot t$ görä) alýarys:

$$s = \frac{v_2 + v_1}{2} t \quad (4.9)$$

F güýjüň hem-de s ýoluň (4.7) we (4.8) deňlikler arkaly tapylan san bahalaryny (4.7) formulada ornuna goýup, alarys:

$$A = m \frac{v_2 - v_1}{t} \frac{(v_2 + v_1)}{2} t = m \frac{(v_2 - v_1)(v_2 + v_1)}{2}$$

Bu ýerden:

$$A = \frac{mv_2^2}{2} - \frac{mv_1^2}{2} \quad (4.10)$$

Şeýlelik bilen, F güýjüň işi kinetik energiýa diýilýän ululygyň artdyrmasyyna san taýdan deňdir.

Şonda (4.10) deňligi aşakdaky görnüşde ýazmak bolar.

$$A = E_{k2} - E_{k1} = \Delta E_k \quad (4.12)$$

m massaly jisime v tizlik bermek üçin goýlan güýjüň $mv^2/2$ deň bolan položitel işi etmelidigi (4.10) deňlikden gelip çykýar.

Sistemada energiýanyň üýtgemesi bu sistema täsir edýän daşarky güýçleriň ýerine ýetirýän işine göni proporsionaldyr. Şoňa görä iş hem, energiýa hem bir ölçeg birliginde aňladylýar.

Eger daşky güýçleriň ýerine ýetirýän işi položitel bolsa ($A > 0$), sistemanyň energiýasy artýar we jisim çalt hereket eder. ($A < 0$) bolsa, sistemanyň energiýasy azalýar, jisimiň tizligi-de peselip başlar: ($A = 0$) bolan ýagdaýyndaky sistema ýapyk sistema diýilýär.

Potensial energiýa diýip, jisimleriň bölekleriniň ýa-da bölejikleriniň özara ýerleşişleri we olaryň özara täsirleri bilen häsiýetlendirilýän energiýa aýdylýar.

Maýyşgak deformirlenen pružinler, gysylan gazlar, ýeriň üstünden haýsy-da bolsa bir beýiklige galdyrylan jisimler we ş.m. potensial energiýa eýedirler.

m massaly jisimi h beýiklige galdyrmak üçin ($v = \text{const}$ bolan ýagdaýynda) ýerine ýetirilýän işiň ululugy:

$$A = Ph = mgh;$$

Bu iş ýapyk (izolirlenen) sistemanyň energiýasyny artdyrmaga gidýär. Ýagny:

$$A = \Delta E = E_2 - E_1.$$

Eger material nokadyň ýeriň üstündäki potensial energiýasyny $E_1 = 0$ diýip kabul etsek, onda

$$A = \Delta E = E_p = mgh \text{ bolar, ýa-da } E_p = mgh \quad (4.13)$$

Şunlukda, ýeriň üstünde ýatan jisimiň potensial energiýasyny nola deň diýip şertli kabul eden wagtymyzda, m massaly jisimiň h beýiklige ýokary göterilen wagtyndaky potensial energiýasy mgh deň bolar.

Käte jisimleriň özara täsiri gönüden-göni meýdanlaryň täsir etmegi arkaly amala aşyrylýar (meselem, maýyşgak güýçleriň bir nokatdan ikinji bir nokada ornuny üýtgetmegi, onuň nähili traektoriya bilen bolup geçenciligine bagly bolman, diňe onuň başlangyç we ahyrky nokatlarynyň ýagdaýlaryna baglydyr. Şeýle meýdanlara potensial meýdanlar, olardaky täsir edýän güýçlere – konserwatiw güýçler diýilýär. Eger güýçler tarapyndan ýerine ýetirilýän işiň ululugy, onuň bir nokatdan ikinji

nokada geçendäki hereketiniň traektoriyasyna bagly bolsa, onda şeýle güýçlere dissipatiw güýçler diýilýär. Oňa sürtülme güýji mysal bolup biler.

Jisimiň energiýasynyň üýtgemek prosesine seredeliň: m massaly jisim h beýiklige ýokary galdyrylan diýeliň, onda onuň potensial energiýasynyň $E_p = mgh$ bolýandygy bize belli. Jisim aşak gaçanynda $v_0 = 0$ onuň potensial energiýasy kemelýär. Aşak gaçmaklygyň ahyrynda onuň kinetik energiýasy şeýle bolar: ýeriň üstüne ýeten pursatynda onuň tizligi $v = \sqrt{2gh}$, kinetik energiýasy $E_k = \frac{mv^2}{2} = \frac{m \cdot 2gh}{2} = mgh$ bolar.

$$E_k = \frac{mv^2}{2}$$

Ýagny, aşak gaçmaklygyň ahyrynda potensial energiýanyň deregine oňa deň bolan kinetik energiýa döredi. Energiýa bir görnüşden başga bir görnüşe geçdi, ýöne welin onuň umumy mukdary üýtgemän galdy.

Ýapyk mehaniki sistema üçin jisimiň E_k kinetik energiýasy bilen E_p potensial energiýasynyň jemine deň bolan doly energiýasy hemişelik bolup galýar:

$$E = E_k + E_p = \text{const} \quad (4.14)$$

Bu ýagdaýa mehaniki energiýanyň saklanmak we öwrülme kanuny diýilýär. Ol mehanikanyň esasy kanunlarynyň iň möhüm netijeleriniň biridir. Eger bir ýagdaýdan ikinji bir ýagdaýa geçilende izolirlenen sisitemanyň kinetik energiýasy käbir ΔE_k ululyga artsa, onda onuň potensial energiýasy edil şol ululykça kemelmelidir.

§4.3. Aýlanýan we typýan gaty jisimiň kinetik energiýasy

Gozganmaýan okuň töwereginde aýlanýan gaty jisimiň kinetik energiýasyny kesgitleliň.

Jisimi massalary $m_1, m_2, m_3, m_4, \dots, m_n$, aýlanma radiuslary degişlilikde $r_1, r_2, r_3, r_4, \dots, r_n$ bolan material nokatlaryň toplumy hökmünde göz önüne getireliň. Her bir nokat $v_i = \omega r_i$ deň bolan çyzyk tizligi bilen hereket edýär. ω – ähli nokatlar üçin şol bir baha eýe bolan aýlanýan jisimiň burç tizligi. Onuň kinetik energiýasy:

$$E_{ki} = \frac{m_i v_i^2}{2}$$

deňdir, ýa-da

$$E_{ki} = \frac{m_i r_i^2 \omega^2}{2}.$$

Aýlanýan jisimiň kinetik energiýasy, onuň aýry-aýry nokatlarynyň kinetik energiýalarynyň goşulmagyna deňdir.

$$E_k = \frac{m_1 r_1^2 \omega^2}{2} + \frac{m_2 r_2^2 \omega^2}{2} + \frac{m_3 r_3^2 \omega^2}{2} + \dots + \frac{m_n r_n^2 \omega^2}{2}$$

ýa-da :

$$E_k = \frac{\omega^2}{2} \sum_{i=1}^n m_i r_i^2$$

bu ýerde : $\sum_{i=1}^n m_i r_i^2$ – J-bitewi jisimiň inersiýa momenti. Onda:

$$E_k = \frac{J\omega^2}{2} \quad (4.15)$$

(4.15) aňlatmadan görnüşi ýaly, aýlanýan gaty jisimiň kinetik energiýasy onuň aýlanma otnositellikdäki inersiýa momenti we burç tizligi bilen kesgitlenilýär.

Eger gaty jisim öz okunyň töwereginde aýlananda, aýlanma oky hereketiň бүтін dowamynda öz-özüne parallel bolup ornuny üýtgedýän bolsa, onuň doly kinetik energiýasy öňe bolan hereketiň kinetik energiýasynyň ($mv^2/2$) we aýlanma hereketiniň kinetik energiýasynyň ($J\omega^2/2$) jemine deňdir.

§4.4. Absolýut maýyşgak we maýyşgak däl urgular

Hereket mukdarynyň we energiýanyň saklanmak kanunlaryna absolýut maýyşgak we maýyşgak däl jisimleriň urgylaryna degişli hakyky fiziki meseleler çözlende gabat gelinýär. Ugry - munuň özi özara täsir edişleri çalt wagtda bolup geçýän iki ýa-da birnäçe jisimleriň çaknyşmagydyr. Mysal üçin, atomlaryň, billiard şarlarynyň çakyşmasy, gaty jisimleriň suwuklyklar we gazlar bilen özara täsirindäki bolup geçýän prosesler, partlama we ş.m.

Gaty jisimler çaknyşanlarynda olar deformirlenýärler. Eger urgudan soň jisimiň formasy ýene-de öňki ýagdaýyna gaýdyp gelýän bolsa, şeýle urgulara maýyşgak urgular diýilýär. Maýyşgak urgularda çaknyşan jisimleriň umumy kinetik energiýasy üýtgemän galýar we mehaniki energiýa energiýanyň beýleki görnüşlerine geçmeýär.

Maýyşgak däl urgularda çaknyşan jisimleriň kinetik energiýalary azda-kände energiýanyň başga görnüşine geçýär we urgudan soňra olar galyndyly defomasiýa eýe bolýarlar.

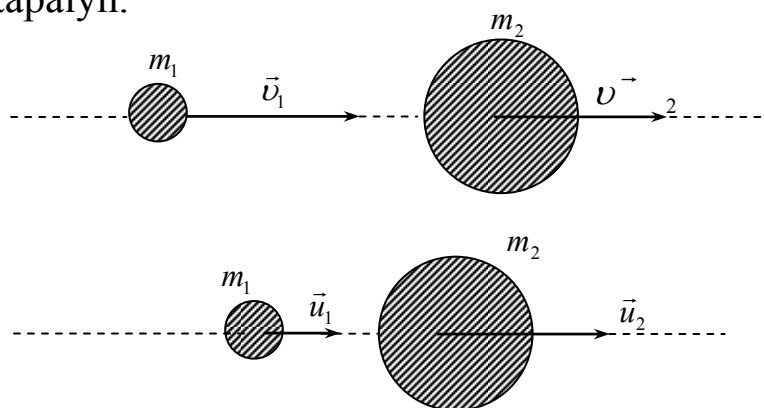
Iki sany birmenzeş şarlaryň gönüçzykly, merkezi urgularyna seredeliň. Gönüçzykly merkezi urgularda biri-biri bilen çaknyşan şarlaryň tizlikleri şarlaryň merkezlerini birleşdirýän gönüniň boýuna ýerleşendir. Sistemany izolirlenen sistema diýip kabul edýäris.

Absolýut maýyşgak urgular

Ýokarda belleýişimiz ýaly, absolýut maýyşgak urgular üçin hereket mukdarynyň saklanma kanuny we kinetik energiýanyň saklanma kanuny ýerine ýetýär.

Massalary m_1 we m_2 bolan şarlaryň urga çenli bolan tizliklerini deňişlilikde v_1 we v_2 bilen, urgudan soňky tizliklerini v'_1 we v'_2 bilen belläliň (4.3-nji surat).

Birinji şaryň v_1 tizligi ikinji şaryň v_2 tizliginden uly ($v_1 > v_2$), şonuň üçin birinji şar ikinji şaryň yzyndan ýetýär. Urgudan soňra şarlar öňkünden üýtgeşik v'_1 we v'_2 tizlikler bilen hereket edýärler. Şarlaryň tizliklerini tapalyň.



4.3-nji surat. Dürli massaly şarlaryň urgylary.

Energiýanyň saklanmak kanuny esasynda:

$$\frac{m_1 v_1^2}{2} + \frac{m_2 v_2^2}{2} = \frac{m_1 v_1'^2}{2} + \frac{m_2 v_2'^2}{2} \quad (4.16)$$

Impulsyň (hereket mukdarynyň)saklanmak kanuny esasynda ýazýarys:

$$m_1 v_1 + m_2 v_2 = m_1 v_1' + m_2 v_2' \quad (4.17)$$

(4.16) we (4.17) aňlatmalarda degişli üýtgetmeler girizip alýarys:

$$m_1(v_1' - v_1) = m_2(v_2' - v_2) \quad (4.18)$$

$$m_1(v_1'^2 - v_1^2) = m_2(v_2'^2 - v_2^2) \quad (4.19)$$

şu ýerden: $v_1 + v_1' = v_2 + v_2'$ (4.20)

(4.18), (4.19) we (4.20) deňlemeleri çözüp, tapýarys:

$$v_1' = \frac{(m_1 - m_2)v_1 + 2m_2 v_2}{m_1 + m_2} \quad (4.21)$$

$$v_2' = \frac{(m_2 - m_1)v_2 + 2m_1 v_1}{m_1 + m_2} \quad (4.22)$$

Alnan netijeleri barlamak üçin birnäçe mysallara seredeliň:

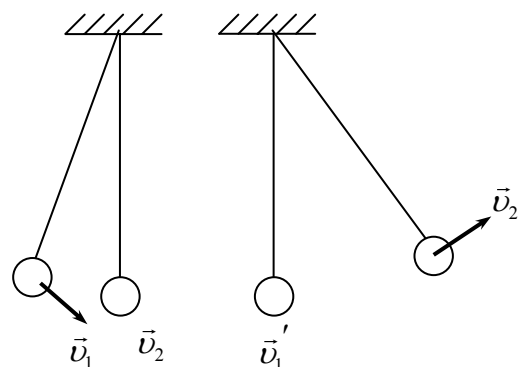
1) $v_2=0$ bolanda:

$$v_1' = \frac{(m_1 - m_2)}{m_1 + m_2} v_1 \quad (4.23)$$

$$v_2' = \frac{2m_1 v_1}{m_1 + m_2} \quad (4.24)$$

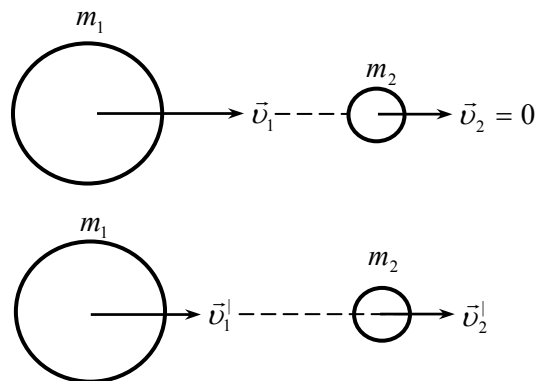
(4.23) we (4.24) deňlemeleri dürli massaly şarlar üçin barlalyň:

a) $m_1=m_2$ eger ikinji şar urga çenli gozganman, asylygy duran bolsa ($v_2=0$) (4.4-nji surat), urgudan soň birinji şar togtaýar (v_1'), ikinji şar bolsa şol bir tizlik bilen, urga çenli birinji şar nirä ugrukdyrylan bolsa, şol tarapa-da hereket edýär ($v_2'=v_1$):



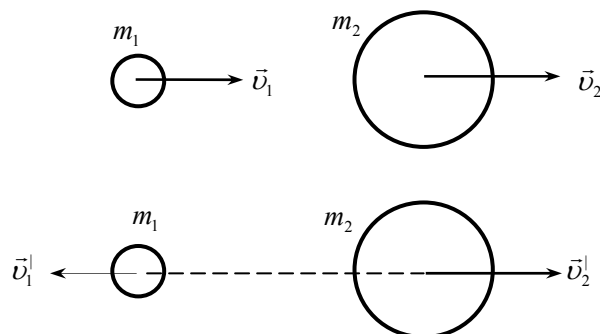
4.4-nji surat. Maýyşgak şarlaryň urgylary.

- b) $m_1 > m_2$ birinji şar urga çenli bolan ugruny dowam etdirýär. Emma, öňkä seredeniňde kiçi tizlik bilen ($v_1' < v_1$) hereket edýär. Ikinji şaryň tizligi urgudan soňra birinji şaryň urgudan soňky tizliginden uly ($v_2' > v_1'$) (4.5-nji surat).



4.5-nji surat. Dürli tizlikli we massaly şarlaryň urgylary.

- c) $m_1 < m_2$ ugry wagtynda birinji şaryň hereketiniň ugry üýtgeýär, yzyna serpikýär, ikinji şar bolsa, birinji şaryň urga çenli bolan ugry bilen hereket edýär (birnäçe kiçi tizlik bilen) (4.6-njy surat).



4.6-njy surat. Dürli massaly şarlaryň çaknyşmadan soňky tizlikleri.

- d) $m_2 > m_1$ (4.23) we (4.24) deňlemelerden görnüşi ýaly, $v_1' = v_2$, $v_2' = v_1$

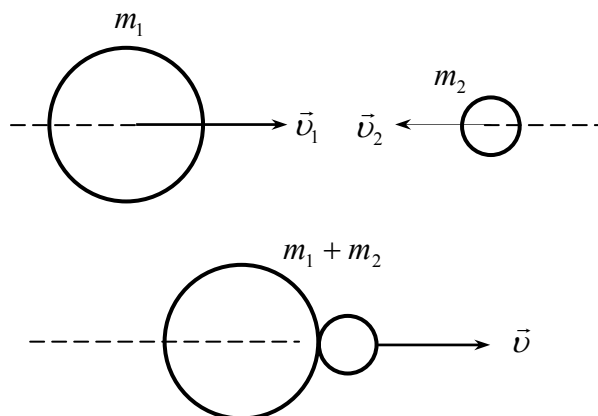
$$v_2' \approx 2m_1 v_1 / m_2 = 0$$

- e) $m_1 = m_2$ bolanda (4.21) we (4.22) aňlatma şeýle görnüşi alýar:

$$v_1' = v_2, v_2' = v_1;$$

ýagny, deň massaly şarlar tizliklerini çalyşýarlar. Absolýut maýyşgak däl urgy bolanda özara çaknyşýan iki jisim birleşip, urgudan soňra bir

bitewi jisim görnüşinde hereket edýär. Şeýle uрга plastilinden taýýarlanylýan we garşylykly ugrukdyrylan iki şaryň urgusyny mysal getirmek bolar (4.7-nji surat).



4.7-nji surat. Maýyşgak şarlaryň çaknyşmadan soňky tizlikleri.

Eger şarlaryň massalaryny m_1 we m_2 bilen, olaryň uрга çenli bolan tizliklerini v_1 we v_2 bilen bellesek, onda hereket mukdarynyň saklanma kanuny esasynda şeýle ýazmak bolar:

$$m_1 v_1 + m_2 v_2 = (m_1 + m_2) v;$$

şu ýerden:

$$v = \frac{m_1 v_1 + m_2 v_2}{m_1 + m_2} \quad (4.25)$$

Eger şarlar biri-biriniň garşysyna hereket edýän bolsalar, olar bilelikde haýsy şaryň hereket mukdary köp bolsa, şol şaryň hereket edýän ugrunda-da hereket ederler. Mysal üçin, şarlaryň massalary biri-birine deň bolsa, onda olaryň bilelikdäki tizligi

$$v = (v_1 + v_2) / 2$$

deňdir. Şeýle maýyşgak däl urgularda deformasiýanyň netijesinde kinetik energiýanyň bir bölegi ýylylyk energiýasyna ýa-da onuň başga bir görnüşlerine geçýär. Emma, sistemanyň doly energiýasy üýtgemän galýar. Şarlaryň kinetik energiýalary uрга çenli bolan energiýalaryndan az bolýar. Bu ýitgini olaryň uрга çenli bolan kinetik energiýalaryndan soňky kinetik energiýalaryny aýyrmak arkaly tapyp bolar.

$$\Delta E = \left(\frac{m_1 v_1^2}{2} + \frac{m_2 v_2^2}{2} \right) - \frac{(m_1 + m_2) v^2}{2}$$

(4.25) deňlemäni ulanyp, tapýarys:

$$\Delta E = \frac{m_1 m_2 (\nu_1 - \nu_2)^2}{2(m_1 + m_2)}$$

Eger ilki başda urulýan şar gozganmaýan bolsa ($\nu_2=0$), onda:

$$\nu = \frac{m_1 \nu_1}{m_1 + m_2}, \quad \Delta E = \frac{m_2}{m_1 + m_2} \frac{m_1 \nu_1^2}{2}$$

Haçan gozganman duran şaryň massasy örän uly bolan ýagdaýynda, ýagny, $m_2 > m$, urgudan soňky şarlaryň bilelikdäki tizligi has kiçi bolýar. $\nu < \nu_1$ (başdaky birinji şaryň tizligine görä) we urgy jisimiň ähli kinetik energiýasy diýen ýaly energiýanyň başga görnüşine geçýär, ýa-da tersine, mysal üçin, çekijiň çüýe urulan wagtynda ähli energiýasynyň galyndyly deformasiýa harç edilmän, çüýüň diwara girmegine harç edilmegi üçin çekijiň massasynyň çüýüň massasyndan uly bolmagy hökmandyr.

V BAP. MEHANIKI YRGYLDYLAR WE TOLKUNLAR

§5.1. Mehaniki yrgyldylar. Yrgyldyly herekedi häsiýetlendirýän ululyklar

Akustika, radiotekhnika, optika hem-de ylmyň, tehnikanyň beýleki bölümleri öwrenilende tolkunlar we yrgyldylar baradaky ylmy esaslanýlar.

Umumy ýagdaýda yrgyldyly prosesler diýip, deň wagt aralygynda takyk ýa-da takyga golaý gaýtalanyp durýan prosese aýdylýar. Mehanikada, aýratyn-da uçýan enjamlaryň, köprüleriň, aýratyn görnüşli maşynlaryň berkligini hasaplamakda yrgyldyly prosesleriň nazaryýetinden giňden peýdalanylýar.

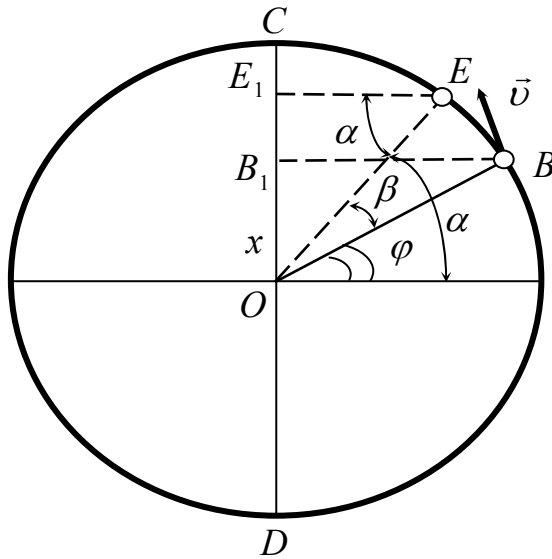
Mehaniki yrgyldylara seredeliň. Deňagramlylyk ýagdaýyndan gyşaryp, ýene-de öňki ýagdaýyna gelip, gaýtalanyp durýan mehaniki herekede yrgyldyly hereket diýilär. Yrgyldyly herekediň döremegi üçin şert gerek. Birinjiden - jisimiň durnukly deňagramlylyk ýagdaýy bolmaly. Ikinjiden - jisimi bu ýagdaýdan çykaryp, oňa belli bir energiýa bermeli. Üçünjiden - deňagramlylyk ýagdaýyndan çykarylan jisime, ony yzyna gayýtaryjy güýç täsir etmeli.

Yrgyldaýan jisime edilýän täsire görä yrgyldylar erkin (ýa-da hususy) we mejbury toparlara bölünýärler. Yrgyldaýan jisime (maddy nokada) diňe yzyna gaýtaryjy güýç täsir edýän wagtyndaky yrgylda erkin yrgyldy diýilýär. Eger yrgyldaýan jisimi gurşap alan giňişlikde hiç-hili energiýa ýitgisi bolmasa, onda erkin yrgyldy togtamaýan yrgylda öwrülýär. Emma, yrgyldaýan jisime sürtülme güýjüniň täsir edýänligi sebäpli, hakyky yrgyldylar togtatýan yrgyldylardyr.

Periodiki üýtgeýän daşky güýjüň täsiri astynda bolup geçýän yrgyldylara mejbury yrgyldylar diýilýär. Mejburi yrgyldyda yrgyldaýan jisime daşardan birsyhly energiýa berilip durulýar. Berilýän energiýa yrgyldaýan jisimiň her periodynyň dowamynda ýitirilýän energiýasyna deň bolmalydyr, we hususy yrgyldy bilen fazadaş bolmalydyr. Ulgamy togtamaýan yrgyldy etmäge mejbur edýän güýje mejbur ediji güýç diýilýär.

Jisimiň deňagramlylyk ýagdaýyndan süýşmesi sinuslar ýa-da kosinuslar kanuny boýunça bolup geçýän yrgyldylara garmoniki yrgyldylar diýilýär. Goý, B nokat v tizlik bilen töwerek boýunça deňölçegli hereket etsin. Onda bu nokadyň töweregiň islendik

diametrine bolan proyeksiasy, mysal ucin CD diametrine, O nokadyň golaýynda garmoniki yrgyldy eder.



5.1-nji surat. Yrgyldyly hereketiň töwerek boýunça hereket bilen deňeşdirilişi.

Bu ýagdaýda O nokat B nokadyň proyeksiasy bolan töwerek boýunça aýlanýan we garmoniki yrgyldy edýän B_1 nokadyň deňagramlylyk ýagdaýy bolar. (5.1-nji surat.)

Deňagramlylyk ýagdaýyndan nokadyň proyeksiýasyna çenli aralyk (OB_1) x orun üýtgetme bolar. Nokadyň deňagramlylyk ýagdaýyndan in uly süýşmesine (OC ýa-da OD) yrgyldynyň amplitudasy A diýilýär. B nokat töwerek boýunça bir aýlaw edende onuň proyeksiýasy doly bir yrgyldy edýär we başdaky B nokada dolanyp gelýär. Doly bir yrgyldy etmek üçin gerek bolan T wagta yrgyldynyň periody diýilýär. Bir perioddan soň yrgyldyny häsiýetlendirýän ähli fiziki ululyklar gytalanýar. Yrgyldayan nokat bir periodyň dowamynda dört amplituda deň bolan ýoly gecýär.

Goý, yrgyldaýan nokat başlangyç wagt pursatynda B nokatda bolsun. t wagtda onuň proyeksiýasy B nokatdan E nokada geçsin. Şonda onuň OB radiusy β burça öwrülýär. Onuň OB radiusynyň ω burç tizligi:

$$\omega = \frac{\beta}{t} \text{ bolar, bu ýerden } \beta = \omega t$$

Eger B nokadyň öwrülýän burçuny kese diametrden hasap etsek, öwrülme burçuny şeýle aňlatmak bolar:

$$\alpha = \beta + \varphi \text{ ýa-da } \alpha = \omega t + \varphi \quad (5.1)$$

OEE_1 üçburçlygyndan süýşmäni kesgitleýäris:

$$x = OE \sin \alpha \text{ ýa-da } x = A \sin(\omega t + \varphi) \quad (5.2)$$

(5.2) deňlemä garmoniki yrgyldynyň deňlemesi diýilýär. Sinus alamatynyň astynda duran ululyga, ýagny, burç $\alpha = \omega t + \varphi$ ululyga yrgyldynyň fazasy diýilýär. Faza yrgyldaýan nokadyň berlen wagt pursatyndaky ýagdaýyny häsiýetlendirýär we graduslarda ýa-da radianlarda aňladylýar.

T wagtda töweregiň OB radiusy doly bir aýlaw edýär. Ýagny, 2π radian burça öwrülýär. Onda burç tizligi:

$$\omega = \frac{2\pi}{T} \quad (5.3)$$

Bu ýerden: $T = \frac{2\pi}{\omega}$

bu ýerdäki ω ululyga garmoniki yrgyldyly hereketiň aýlaw ýa-da siklleýin ýygylgy diýilýär. Wagt birliginde bolup geçýän doly yrgyldylaryň sanyna yrgyldylaryň ýygylgy diýilýär. Ýygylgy gerslerde (Gs) ölçelýär. 1Gs bir sekuntda bir doly yrgyldy edýän yrgyldynyň ýygylgydyr. Durmuşda gersden uly kilogers we megagers diýen birlikler hem ulanylýar. 1kilogers (kGs)=1000Gs, 1Megagers (MGs)=1000000 Gs.

$$\nu = \frac{1}{T} \quad \text{ýa-da} \quad T = \frac{1}{\nu}$$

ýagny, yrgyldynyň ýygylgy ν , onuň periodyna T ters proporsionaldyr ýa-da tersine, yrgyldynyň periody onuň ýygylgyna ters proporsionaldyr.

§5.2. Garmoniki yrgyldyly hereketde tizlik we tizlenme

Yrgyldaýan maddy nokadyň süýşmesi (5.2) formula bilen kesgitlenilýär.

$$x = A \sin(\omega t + \varphi)$$

Onuň tizligi süşmeden wagta görä alnan birinji önüme deňdir:

$$v = \frac{dx}{dt} = \omega A \cos(\omega t + \varphi) \quad (5.4)$$

Yrgyldaýan nokadyň tizlenmesi tizlikden wagta görä alnan önüme deňdir:

$$a = \frac{dv}{dt} = -\omega^2 A \sin(\omega t + \varphi) \quad (5.5)$$

Şu ýerden görnüşi ýaly, garmoniki yrgyldaýan jisimiň tizlenmesi onuň deňagramlylyk ýagdaýynda süýşmesine göni proporsionaldyr we oňa garşylykly ugrukdyrylandyr. ýagny:

$$a = -\omega^2 x \quad (5.5a)$$

aýlaw ýygylgy ω -nyň T periody ýa-da yrgyldynyň ýygylgy bilen çalyşyryp, tizligi we tizlenmäni başga görnüşde aňladýarys:

$$v = 2\pi\nu A \cos(2\pi\nu t + \varphi) = \frac{2\pi}{T} A \cos\left(\frac{2\pi}{T}t + \varphi\right) \quad (5.4a.)$$

$$a = -4\pi^2\nu^2 x = -\frac{4\pi^2}{T^2} A \sin\left(\frac{2\pi}{T}t + \varphi\right) \quad (5.5b.)$$

(5.4a) we (5.5b) formulalar yrgyldaýan nokadyň tizliginiň we tizlenmesiniň yrgyldyly peosesiň T periodyna deň bolan wagta baglylykda üýtgeýän funksiýalarydygyny görkezýärler.

(5.4a.) deňlemenden iki sany netije çykarmak bolar:

- 1) garmoniki yrgyldyda tizlenme x süýşmä proporsionaldyr we ugry boýunça oňa garşylyklydyr.
- 2) gatnaşyk $a/x = -\omega^2$ hemişelik ululykdyr, sebäbi, aýlaw ýygylgy ω , berlen jisimiň ya-da ulgamyň garmoniki yrgyldysy üçin üýtgemeyär.

Diýmek, eger islendik wagat pursatynda tizlenmäniň x süýşmäniň garşysyna ugrukdyrylan ugry bolup we gatnaşyk $a/x = -\omega^2 = \text{const}$ bolsa, mehaniki yrgyldylar garmoniki yrgyldydyr. Süýşmaniň, tizligiň we tizlenmäniň wagta baglylygynyň grafigini guralyň.

Garmoniki yrgyldyly proses başlangyç fazasyz ($\varphi_0 = 0$) diýip hasaplalyň, onda yrgyldaýan nokadyň süýşmesi:

$$x = A \sin \omega t$$

Onuň tizligi bolsa:

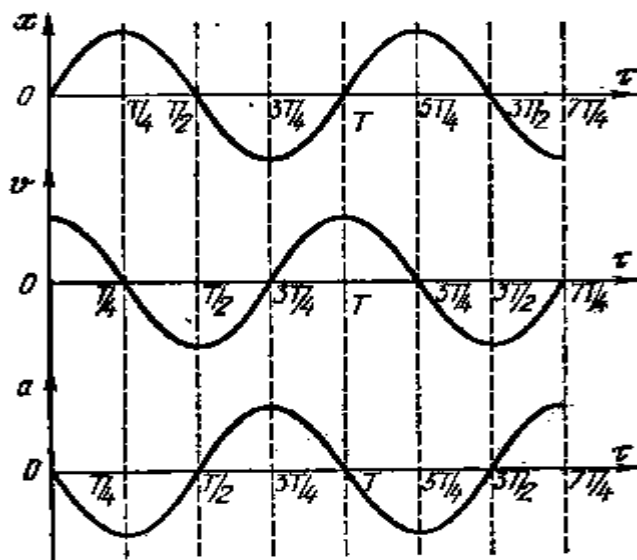
$$v = \omega A \cos \omega t = \omega A \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right) = v_0 \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right) \text{ deň bolar.}$$

Bu ýerdäki $\omega A = v_0$ tizligiň iň uly bahasyna deň bolup, oňa tizligiň amplitudasy diýilýär; tizlenme:

$$a = -\omega^2 A \sin \omega t = -a_0 \sin \omega t = a_0 \sin(\omega t + \pi),$$

Süýşmäniň, tizligiň we tizlenmäniň deňlemelerini deňeşdirip, olaryň hemmesiniň-de birmeňzeş garmoniki kanun boýunça üýtgeýändigine, emma, tizligiň fazasynyň süýşmäniň fazasyndan $\pi/2$, a tizlenmäniň fazasynyň bolsa, ondan $-\pi$ tapawutlanýandygyna göz ýetirýäris.

5.2-nji suratda ýokarda getirilen formulalara laýyklykda x süýşmäniň, v tizligiň we a tizlenmäniň wagta görä (wagt T periodyň üleşlerinde görkezilen) üýtgemesi görkezilen. Period T fazanyň 2π aralykda üýtgemesine gabat gelýär. $T/4$ -deň bolan wagt $-\pi/2$ we ş.m. Suratdan görnüşi ýaly, tizlik $T/4$, $3T/4$, $5T/4$... wagt pursatynda nola deň bolan bahalara eýe bolýar.



5.2-nji surat. Süýşmäniň, tizligiň, tizlenmäniň wagta görä üýtgemesi.

Yrgyldaýan nokadyň tizlenmesi, haçan tizlik wektory öz ugruny üýtgedende ýagny, $t=T/4$, $3T/4$, $5T/4$ we ş.m.pursatlarda özüniň iň uly bahalaryny alýar.

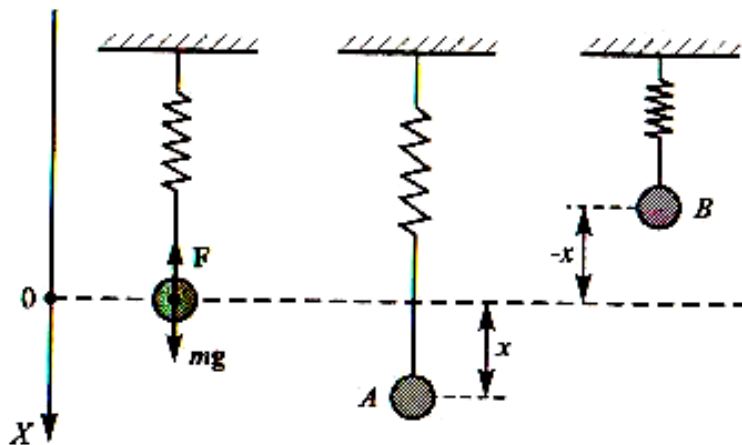
Yrgyldaýan nokat deňagramlylyk ýagdaýyndan geçende ($x=0$), haçan süýşme öz ugruny üýtgedende, tizlik iň uly baha eýe bolýar, (5.9a) formula laýyklykda tizlenme nola deň. Getirilen çyzgylardan görnüşi ýaly, nokat deňagramlylyk ýagdaýyna tarap hereket edende onuň tizlenmesiniň ugry bilen gabat gelýär, a onuň tersine hereketinde tizlenme we tizlik garşylykly, ýagny deňagramlylyga golaýlanynda tizlik çaltlaşýr, daşlaşanda haýallaýar.

Ähli sereden gatnaşyklarymyz togtamaýan yrgyldyny häsiýetlendirýär. Emma, hakyky jisimde ýa-da ulgamda bolup geçýän yrgyldylar togtamaýan yrgyldylardyr. Sebäbi, sürtülme zerarly yrgyldynyň

periody we aýlow ýygylgy üýtgemän galsa-da, yrgyldynyň amplitudasy kiçelip başlaýar.

§5.3. Maýatnikleriň yrgyldylary, pružinli maýatnik

Puržinden asylan ýüküň yrgyldysyna seredeliň (5.3-nji surat). Pružinli maýatnigiň deňagramlylyk ýagdaýynda oňa täsir edýän agyrlýk güýji P , F maýyşgaklyk Güýjine deň. Eger-de ony ox oky boýunça aşaklygyna çekip x aralyga süýşirip göýbersek, maýatnigiň süýşmesine garşylykly ugrukdyrylan pružine täsir edýän F maýyşgaklyk güýjiň täsiri astynda maýatnik erkin yrgyldap başlaýar. Gukuň kanunyna görä F güýç maýatnigiň x süýşmesiniň absolyut bahasyna göni proporsionaldyr we mydama deňagramlylyk ýagdaýyna tarap ugrykdyrylandyr. Yrgyldyly hereketdäki şeýle güýçlere yzyna gaýtaryjy maýyşgak güýçler diýilýär.



5.3-nji surat. Puržinden asylan ýüküň yrgyldylary.

Eger koordinatlar başlangyjyny puržinli maýatnigiň deňagramlylyk ýagdaýy diýip hasap etsek, we ox ok aşaklygyna ugrukdyrylan bolsa, Gukuň kanunyna görä:

$$F = -kx$$

bolar.

Bu ýerde F – täsir edýän güýç, x – maýatnigiň süýşmesiniň absolyut bahasy, k – puržiniň gatylyk koeffisiýenti. Nyutonyň ikinji kanunyna görä:

$$F = ma$$

m – maýatnigiň massasy, a – onuň tizlenmesi, ýa-da :

$$a = \frac{F}{m} = -\frac{k}{m}x = -\omega^2 x.$$

Ýagny, puržinli maýatnik sikl ýygylgy bolan erkin garmoniki yrgyldy edýär. (ω_0 – erkin yrgyldynyň hususy sikl ýygylgy).

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}$$

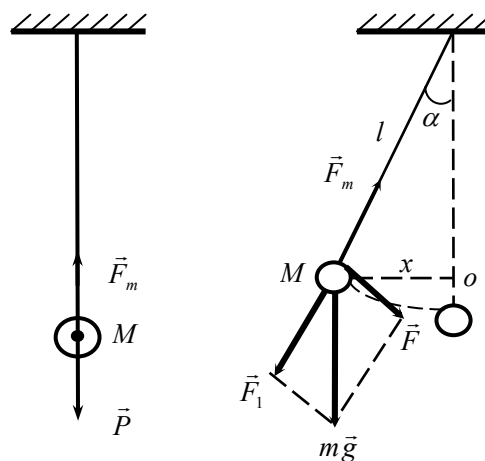
$T = \frac{2\pi}{\omega_0}$ formula esasynda puržinli maýatnikiň yrgyldysynyň periodyny kesgitleýäris:

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}} \quad (5.10)$$

Puržinli maýatnikiň periody yrgyldaýan jisimiň massasyna we puržiniň gatylygyna baglydyr.

Matematiki maýatnik

Agramsyz, süýnmeýän uzyn sapakdan asylan maddy nokada matematiki maýatnik diýilýär. (5.4-nji surat) M massaly togalak jisimiň asylan sapagy dik ýagdaýdaka, maýatnik deňagramlylyk ýagdaýnda bolýar. Şol wagtda oňa täsir edýän P agyrlýk güýji dartylan sapagyň F_m



5.4-nji surat.
Matematiki maýatnik.

maýyşgaklyk güýji bilen deňagramlaşýar. Maýatnik uly bolmadyk α burça gyşardylanda, oňa ýene-de şol güýçler täsir edýärler, ýöne indi olar bir gönüde ýatman, öz aralarynda burç bilen ugrukdyrylandyrlar. Bu iki güýjüň deňtäsi redijisi F güýç bolýar. Bu güýç hemişe maýatnikiň deňagramlylyk ýagdaýyna ugrugandyr. Ol güýjüň ululygy:

$$F = mg \sin \alpha \quad (5.11)$$

Uly bolmadyk burça gyşarmada $\sin \alpha \approx \alpha = \frac{x}{l}$: Süşmäniň we gaýtaryjy güýjüň ugurlarynyň garşylyklydygyny hasaba almak bilen, alýarys:

$$F = -mg \frac{x}{l} \quad (5.11.a)$$

Bu ýerde: x – maýatnigiň deňagramlylyk ýagdaýyndan süýşmesiniň absolýut bahasy. Nýutonyň ikinji kanunyna görä : $F=ma$ ýa-da:

$$a = \frac{F}{m} = -mg \frac{x}{ml} = -g \frac{x}{l} \quad (5.12)$$

bu ýerde: l – maýatnigiň sapagynyň uzynlygy. Minus (-) alamaty tizlenmäniň süýşmä ters ugrukdyrylandygyny aňladýar.

(5.9a) we (5.12) deňlemeleri deňeşdirip, alarys:

$$-\omega_0^2 x = -g \frac{x}{l} \quad \text{ýa-da} \quad \omega_0^2 = \frac{g}{l} \quad (5.13)$$

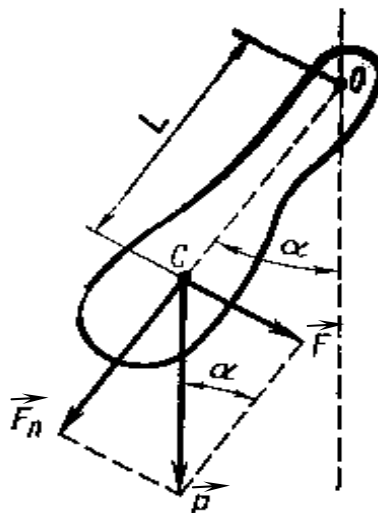
Bu ýerde $\omega_0 = \frac{2\pi}{T}$ gatnaşygy göz önünde tutup alarys:

$$\frac{4\pi^2}{T^2} = \frac{g}{l} \quad \text{ýa-da} \quad T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}} \quad (5.13a)$$

(5.13) formuladan görnüşi ýaly, matematiki maýetnigiň T periody maýatnigiň massasyna we onuň amplitudasyna bagly däl.

Fiziki maýatnik. Agyrlyk merkezinden geçmedik gozganmaýan kese oka berkidilen we agyrlyk güýjiniň täsiri astynda şu oka görä yrgyldyly hereket edýän gaty jisime fiziki maýatnik diýlýär.

Matematiki maýatnikden tapawutlylykda şeýle jisimiň massasyny maddy nokat hökmünde kabul etmek bolmaz. Uly bolmadyk burça gyşarmasynda fiziki maýatnik hem yrygyldyly hereket edýär. Agyrlyk güýji fiziki maýatnigiň c merkezine goýlan diýip hasaplalyň (5.5. surat).



5.5-nji surat. Fiziki maýatnik.

Şu ýagdaýda maýatnigi deňagramlylyk ýagdaýyna gaýtaryjy güýç F – agyrylyk güýji bolýar. Bu güýjiň O oka görä momenti:

$$M = -Fl = -mgl \cdot \sin \alpha$$

deň bolar. O oka görä güýç momentiniň alamaty maýatnigiň öwrülme burçunyň alamatyna we $\sin \alpha$ -nyň alamatyna garşylyklydyr, ýagny, sagat diliniň ugry boýunça maýatnik deňagramlylyk ýagdaýyndan α burça gyşaranda, F güýç maýatnigi sagat diliniň tersine tarap aýlamaga ymtylýar we tersine.

Aýlaýjy moment M aýlaw hereketiniň dinamikasynyň esasy deňlemesine laýyklykda:

$$M = I\mathcal{E} = I \frac{d^2 \alpha}{dt^2}$$

deňdir. Bu ýerde: I – maýatnigiň inersiýa momenti, \mathcal{E} – onuň burç tizlenmesi. Onda:

$$I = \frac{d^2 \alpha}{dt^2} = -mgl \sin \alpha$$

ýa-da:

$$\frac{d^2 \alpha}{dt^2} + \frac{mgl}{I} \sin \alpha = 0 \quad (5.15)$$

Bu deňleme fiziki maýatnigiň yrgyldysynyň differensial deňlemesidir.

Bu deňleme matematiki maýatnigiň yrgyldysynyň deňlemesinden ($\frac{d^2 \alpha}{dt^2} + \frac{g}{l} \sin \alpha = 0$) diňe $\sin \alpha$ -nyň koeffisiýenti bilen tapawutlanýar. Olaryň koeffisiýentlerini biri-birine deňläp, alýarys:

$$\frac{g}{l} = \frac{mgl}{I} \text{ bu ýerden: } l = \frac{I}{ml} \quad (5.16)$$

Formula (5.16) fiziki maýatnigiň getirilen uzynlygyny yrgyldy periody berlen fiziki maýatnigiň periodyna deň bolan matematiki maýatnigiň uzynlygyny kesgitleýär. Birnäçe özgertmelerden soňra, fiziki maýatnigiň

sikl ýygýlygy bilen garmoniki yrgyldy edýändigini göz önünde tutup, alýarys:

$$T = \frac{2\pi}{\omega_0} 2\pi \sqrt{\frac{I}{mgl}} = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}} \quad (5.17)$$

Bu ýerde: M - maýatnigiň O oka görä inersiýa momenti; l – asma nokadyndan maýatnigiň massa merkezine çenli aralyk; $I = I_0 + ml^2$ – fiziki maýatnigiň getirilen uzynlygy; g – erkin gaçmanyň tizlenmesi.

§5.4. Garmoniki yrgyldyly hereketiň energiýasy

Massasy m bolan yrgyldyly hereket edýän material nokadyň energiýasyny kesgitleliň. Nokadyň tizligi hemişelik däl, şonuň üçin onuň kinetik we potensial energiýalary-da üýtgäp durýar. Potensial energiýa jisimi deňagramlylyk ýagdaýyndan çykaryp, garmoniki yrgyldy etmäge mejbur edýän, ýagny x – süýşmäni döredýän işiň güýji bilen ölçenýär. Bu güýç yzyna gaýtaryjy F güýje deň bolup, ugry boýunça oňa garşylykly ugrukdyrylandyr. Onda:

$$E_p = \int_0^x -F dx$$

Bu ýerde: $F = -kx$, şeýlelikde:

$$E_p = \int_0^x kx dx = \frac{kx^2}{2} \quad (5.18)$$

Emma $k = m\omega^2$, a $x = A \sin(\omega t + \varphi)$. Şonuň üçin, yrgyldyly hereket edýän jisimiň potensial energiýasy:

$$E_p = \frac{1}{2} m \omega^2 A^2 \cos^2(\omega t + \varphi) \quad (5.19)$$

Yrgyldyly hereket edýän jisimiň tizligi $v = \omega A \cos(\omega t + \varphi)$, onuň kinetik energiýasy şuna deň bolýar:

$$W_k = \frac{mv^2}{2} = \frac{1}{2} m \omega^2 A^2 \cos^2(\omega t + \varphi) \quad (5.19.b)$$

Şeýlelikde, garmoniki hereket edýän jisimiň doly energiýasy:

$$E = E_k = E_p = \frac{1}{2} m \omega^2 A^2 [\sin^2(\omega t + \varphi) + \cos^2(\omega t + \varphi)]$$

emma , $\sin^2 \alpha + \cos^2 \alpha = 1$, şonuň üçin:

$$E = m \omega^2 A^2 / 2 \quad (5.20)$$

Şeýlelikde, yrgyldaýan jisimiň doly energiýasy onuň amplitudasynyň kwadrtyna proporsionaldyr we yrgyldy prosesiniň dowamynda üýtgemeyär. Çetki ýagdaýlarda yrgyldaýan jisimiň tizligi $v=0$, ýagny, doly energiýa potensial energiýa deň; deňagramlylyk ýagdaýynda süýşme $x=0$, şonuň üçin doly energiýa onuň kinetik energiýasyna deň.

§5.5. Erkin we mejbury yrgyldylar. Rezonans

Jisimi yrgyldatmak üçin ony deňagramlylyk ýagdaýyndan çykaryp, başlangyç energiýa bermeli. Ol şol berlen energiýanyň hasabyna yrgyldyly hereket eder. Başda berlen energiýanyň hasabyna bolup geçýän yrgyldylara erkin yrgyldylar diýilýär. Wagtyň geçmegi bilen yrgyldynyň amplitudasy kiçelip, ahyrynda hereket togtar. Erkin yrgyldylaryň ählisi togtayan yrgyldylardyr.

Periodiki üýtgeýän daşky güýjüň täsiri astynda bolup geçýän yrgyldylara mejbury yrgyldylar diýilýär. Mejbury yrgyldynyň ýygylgy (mejbur ediji güýjüň ýygylgy) daşky güýjüň ω üýtgeýiş ýygylgyna bagly bolýar. Mejbur ediji güýjüň garmoniki kanun boýunça üýtgeýän halyny düşündirmek ýönekeýdir. Eger-de mejbur ediji güýjüň ω üýtgeýiş ýygylgy ulgamyň ω_0 hususy yrgyldysynyň ýygylgyna deň bolanda, mejbury yrgyldynyň amplitudasy iň uly baha ýetýär. Şeýle hadysa rezonans hadysasy diýilýär.

Hemişelik täsir edýän F_d güýjüň täsiri netijesinde togtamaýan yrgyldy edýän m massaly jisimiň mejbury yrgyldysynyň amplitudasyny kesgitleliň. Goý, bu güýç t wagta görä şu deňlemä laýyklykda üýtgeýän bolsun:

$$F_{m.g} = F_0 \sin \omega t \quad (5.21)$$

bu ýerde F_0 – güýjüň amplitudasy, ω – mejbur ediji güýjüň ýygylgy.

Jisimiň ýygylgyny döredýän yzyna gaýtaryjy güýç $F = -kx$, onuň tizlenmesi $a = -\omega_0^2 x$. Nyutonyň ikinji kanunyna görä, bu güýçleriň deňtäsiredijisi

$$F_{m.g} + F = ma$$

deňdir, ýa-da $F_{m.g}$, F we a ululyklary hasaba alyp, ýazýarys:

$$F_0 \sin \omega t - kx = -m\omega^2 x$$

Şu ýerden:

$$x = \frac{F_0}{k - \omega^2} \sin \omega t \quad (5.22)$$

(5.22) deňlemedäki $k = m\omega_0^2$ ulanmak bilen alýarys (ω_0 – jisimiň (ulgamyň) yrgyldysynyň hususy ýygylgy) onda:

$$x = \frac{F_0}{m\omega_0^2 - m\omega^2} \sin \omega t$$

Bu deňlemäniň sag bölegini üýtgedip,, alýarys:

$$x = \frac{F_0 / m}{\omega_0^2 - \omega^2} \sin \omega t \quad (5.23)$$

Mejbury yrgyldynyň şu deňlemesini adaty garmoniki yrgyldynyň deňlemesi bilen deňeşdirip, mejbury yrgyldynyň ampliutdasyny tapýarys:

$$A_{mej} = \frac{F_0 / m}{\omega_0^2 - \omega^2} \quad (5.24)$$

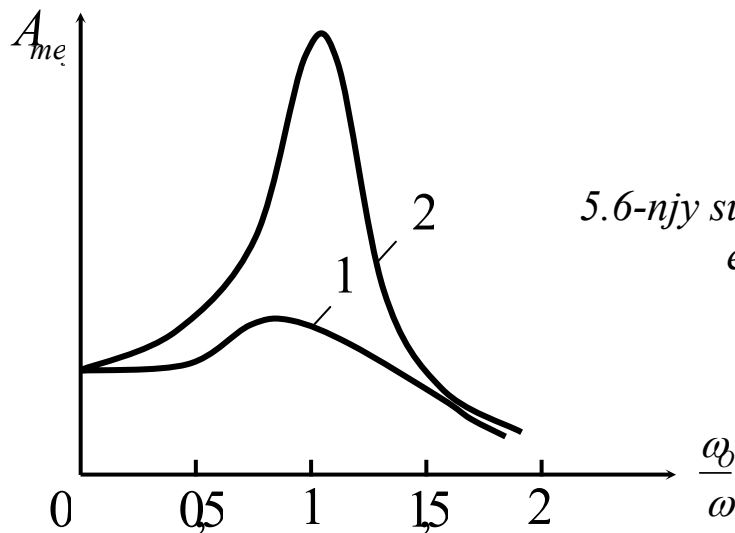
Şu aňlatmany seljerip, $(\omega_0^2 - \omega^2)$ -yň tapawudy näçe kiçi bolsa, şonça-da A_{mej} ulydygyny görýäris. Şeýlelikde, eger mejbur ediji ýygylgyk ω ulgamyň hususy ýygylgyna golaýlaşanda, yrgyldynyň amplitudasy curt-kesik artýar we rezonans hadysasy ýüze çykýar.

Köplenç togtayan yrgyldylaryň bolýandygy sebäpli, amplituda çäksiz ulalyp bilmez, ol diňe uly baha eýe bolýar.

(5.6) suratdan görnüşi ýaly, amplituda rezonans ýagdaýynda ulalýar, ýagny:

$$\omega_0 = \omega, \quad \text{ýa-da} \quad \frac{\omega_0}{\omega} = 1 \quad (5.25)$$

(5.6) suratdaky 1 egri togtaýan yrgyldyny döredýän güýjüň uly bolan ýagdaýyna, 2 egri kiçi bolan ýagdaýyna gabat gelýär. Rezonans hadysasyna durmuşda-da, tehnikada-da duş gelinýär. Ony peýdaly ýerlerinde ulanyp, zyýanly ýerlerinde bolsa rezonans bolmaz ýaly şertler döredilýär. Ýer titremesinde jaýlaryň weýran bolmagynyň bir sebäbi rezonans hadysasydyr. (5.6-njy surat)



5.6-njy surat. Rezonansyň mejbur ediji güýje baglylygy.

§5.6. Mehaniki tolkunlar. Kese we boý tolkunlar. Tolkunyň ýaýramak tizligi. Tolkun uzynlygy

Goý, yrgyldaýan nokat ähli bölejikleri özara baglanşykly gurşawda bolsun. Onda nokadyň yrgyldy energiýasy daş töwerekdäki nokatlara geçip, olaryň yrgyldamagyna sebäp bolup biler. Gurşawda yrgyldylaryň ýaýramak hadysasyna tolkun hereketi diýilýär.

Eger suwa daş oklasak, biz tolkunlaryň emele gelşiniň mysalyny alarys. Daş düşen ýerinde suwy gysyp çykaryar we ol ýerde oýtak döreýar. Bu oýtakdan çykan suw onuň gyrasyna halka şekilli örküç emele getirýär. Bu örküç ähli tarapa ýaýraýar we suwuň üsti boýunça tegelek tolkun döredýär. Daşyň deregine ýeňil agaç bölejigini suwa oklap, onuň duran ýerinde dik ugur boýunça yrgyldap duranyny göreris. Onuň döreden yrgyldysy bolsa keseligine ýaýrap gider. Bu tolkun kese tolkunynyň mysalydyr. Diýmek, yrgyldynyň bolup geçýän ugry yrgyldynyň ýaýraýan ugruna perpendikulýar bolsa, onda tolkuna kese tolkun diýilýär.

Stoluň üstünde ýatan ýüpi alyp, onuň bir ujuny ýokaryk-aşak hereketlendireliň. Ýüpde emele gelen bükülme ýüpüň boýuna hereket eder, ýagny ýüpüň beýleki ujuna tarap ýaýrar. Bu hem kese tolkunynyň mysalydyr.

Yrgyldynyň ugry bilen onuň ýaýraýan ugry gabat gelende döreyän tolkuna boý tolkun diýilýär. Mehaniki tolkunyň döremegi üçin maddy gurşaw hökmanydyr. Yrgyldynyň çeşmesinde gurşaw deformasiýa (süýnme, gysylma, süýşme we ş. m.) sezewar bolýar we onda maýyşgak güýç döreyär. Netijede yrgyldy ýüze çykyp, ol gurşaw boýunça ýaýrap gidýär.

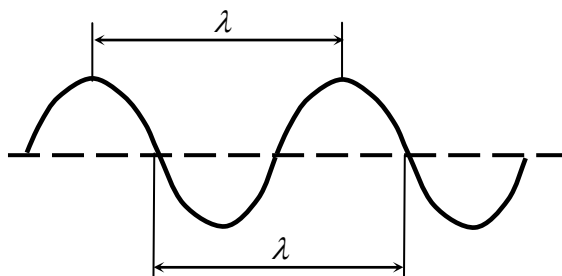
Boý tolkunlaryň döremegi üçin gurşaw gysylma ýa-da süýnme deformasiýa sezewar edilende, onda maýyşgak güýç döremeli. Bu şert gazda-da, suwuklykda-da, gaty jisimde-de kanagatlandyrylýar. Şonuň üçin boý tolkuny gazlarda-da, suwuklyklarda-da, gaty jisimlerde-de döräp, ýaýrap bilýär.

Gysylmada (ýygrylmada) ýa-da süýnmede jisimiň göwrümi üýtgemeyär. Jisimiň görnüşi üýtgäp, göwrümi üýtgemese, onda maýyşgak güýçler islendik gurşawda döremeyär. Gazlarda we suwuklyklarda maýyşgak güýç döremeyär.

Kese tolkunlaryň döremegi üçin jisimiň görnüşi üýtgände onda maýyşgaklyk güýç döremelidir. Diýmek, suwuklyklarda we gazlarda kese tolkun döräp, ýaýrap bilmez. Gaty jisimlerde maýyşgak güýçler olaryň görnüşleri üýtgände-de ýüze çykýar. Şonuň üçin gaty jisimlerde boý tolkunlary-da, kese tolkunlary-da ýaýrap bilýär.

Tolkun uzynlygy. Tolkunyň ýaýraýyş tizligi. Tolkun hereketinde ýaýraýan yrgyldy wagtyň geçmegi bilen yrgyldynyň çeşmesinden daşlaşýar. Bir periodyň dowamynda yrgyldynyň ýaýrap geçen ýoluna tolkun uzynlygy diýilýär. Ony λ – harpy bilen belgiläliň. Boý tolkunlarda iki sany goňşy ýygrylmanyň (ýa-da seýreklenmäniň) arasyndaky uzaklyk onuň tolkun uzynlygydyr.

5.7-nji suratda kese tolkunyň uzynlygy görkezilen. Tolkun berlen gurşawda belli bir tizlik bilen hereket edýär. Boý tolkunyň hereket tizligi ondaky ýygylanmanyň (ýa-da seýreklenmäniň) ýaýraýyş tizligidir.



5.7-nji surat. Kese tolkunyň uzynlygy.

Kese tolkunyň hereket tizligi onuň örküjiniň ýa-da oýunyň süýşme tizligidir.

$$\nu = \lambda / T \quad (5.26)$$

belli bolşy ýaly ýygyllyk $\nu = 1/T$ onda

$$\nu = \lambda \nu \quad (5.27)$$

Bu gatnaşyk tolkun uzynlygyny, periodyny (ýygyllygyny) we tolkun prosesiniň tizligini biri-biri bilen baglanyşdyrýar.

Gurşawyň dyklyzlygy näçe uly bolsa, şonça-da tolkunynyň ýaýraýyş tizligi kiçidir. Ikinji tarapdan, maýyşgaklygy onçakly uly bolmadyk gurşawa garanyňda, has maýyşgak gurşawda uly ähmiýete eýedir. Boý tolkunlarynyň tizligi şeýle formula bilen kesgitlenýär:

$$\nu_b = \sqrt{E / \rho} \quad (5.28)$$

Kese tolkunlaryňky

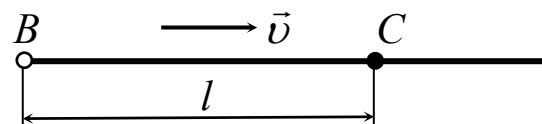
$$\nu_k = \sqrt{G / \rho} \quad \text{ýa-da} \quad \nu = \sqrt{\gamma RT} \quad (5.29)$$

bu ýerde ρ – gurşawyň dyklyzlygy, E – boý maýyşgaklyk (Ýungyň moduly) moduly, kese maýyşgaklyk (süýşme) moduly.

Köp sanly gaty jisimlerde $E > G$ bolanlygy sebäpli boý tolkunlarynyň tizligi şol bir häsiýetli gurşawda kese tolkunlaryň tizliginden uly.

$$\nu_b > \nu_k$$

Tolkun deňlemesi. Islendik wagt pursatynda tolkunynyň islendik nokadynyň süýşmesini tapmaklyga mümkinçilik berýän deňlemäni düzeliň. Goý B nokatda wibrator – yrgyldynyň çeşmesi ýerleşen bolsun (5.8-nji surat). Tolkunlar ν



5.8 – nji surat
Tolkunyň ýaýraýyşy.

tizlik bilen yrgyldynyň çeşmesinden gönüçyzygyň boýuna ýaýraýar diýeliň. B nokadyň yrgyldysynyň deňlemesi şeýle görnüşde berlen:

$$x_B = A \sin 2\pi \nu t \quad (5.30)$$

bu ýerde x_B – B nokadyň süýşmesi, A – onuň yrgyldysynyň amplitudasy, ν – ýygylgy, t – yrgyldynyň başlanýan pursatyndan bäri hasaplanýan wagt.

B nokatdan sagdaky ähli nokatlar, mysal üçin C nokat, sähelçe wagtydan soň B nokadyň yrdyldysyny gaýtalarlar. Saýlanyp alnan C nokadyň deňlemesini ýazalyň.

B nokat t wagt dowamynda yrgyldaýar. B nokatdan l aralykda ýerleşen C nokada yrgyldylar $t = \frac{l}{\nu}$ wagt arlygynda ýeter. Bu ýerde ν – tolkunynyň ýaýraýyş tizligi. Şeýlelik bilen: C nokat B nokatdan T wagt giç yrgyldap başlar. Garalan göni çyzygyň boýuna ýaýraýan tolkunlar togtamaýar diýip hasap etsek, C nokada tolkun ýetende ol A amplituda we $\omega = 2\pi\nu$ aýlaw ýygylkly yrgyldamaga başlar, ýagny onuň deňagramlylyk ýagdaýyndan t – wagta süýşmesi aşakdaky ýaly aňladylýar:

$$x = A \sin 2\pi\nu(t - t') \quad (5.31)$$

Onda (5.30) deňleme şeýle görnüşi alar.

$$x = A \sin 2\pi\nu(t - l/\nu)$$

$\nu = \lambda\nu$ – aňlatmany hasaba almak bilen alarys.

$$x = A \sin 2\pi(\nu t - \frac{l}{\lambda}) \quad \text{ýa-da} \quad x = A \sin 2\pi(\frac{t}{T} - \frac{l}{\lambda}) \quad (5.32)$$

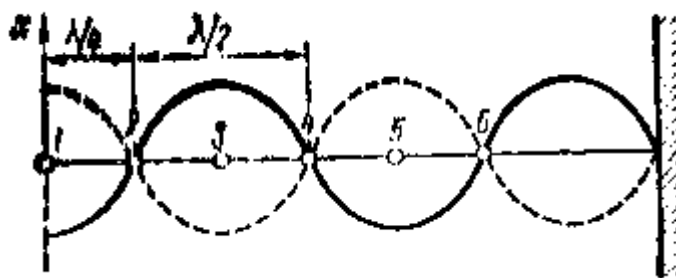
Bu deňlemä tolkunynyň ylgaw deňlemesi diýilýär we ol berlen wagt pursatynda yrgyldynyň çeşmesinden (wibratorndan) l aralykda ýerleşýän gurşawdaky islendik nokadyň süýşmesini kesgitlemäge mümkinçilik berýär.

§5.7. *Durujy tolkunlar*

Iki sany birdeň amplitudaly we birdeň periodly garşylykly ugrukdyrylan tolkunlaryň biri-biriniň üstüne düşmegi netijesinde emele gelýän tolkunlara durujy tolkunlar diýilýär. Şeýle tolkunlar göni tolkunlaryň päsgelçiligine degip yzyna serpikmeleri netijesinde döräp bilerler.(5.9-njy surat.)

Goý, wibrator (yrgyldynyň çeşmesi) tolkunyny päsgelçilige tarap goýbersin (göni tolkun). Ol päsgelçilige degip yzyna serpigýär diýeliň (serpigen tolkun).

5.9-njy suratda tolkunlaryň biri tutuş çyzyk bilen, beýlekisi punktir çyzyk bilen şekillendirilendir. Durujy tolkunynyň deňlemesini almak üçin şeýle görnüşdäki



5.9-njy surat. Durujy tolkunynyň emele gelişi.

$$x_1 = A \sin \omega(t - \Delta t) = A \sin \omega\left(t - \frac{l}{v}\right) = A \sin 2\pi\left(\frac{t}{T} - \frac{l}{\lambda}\right),$$

göni tolkunynyň deňlemesiniň üstüne oňa garşylykly ugrukdyrylan serpigen tolkunynyň (l aralygy minus alamaty bilen alýarys) deňlemesini goşmak gerek, ýagny:

$$x_2 = A \sin \omega\left[t - \frac{(-l)}{v}\right] = a \sin 2\pi\left(\frac{t}{T} + \frac{l}{\lambda}\right),$$

Şol bir wagtyň özünde birbada iki yrgylda-da gatnaşýan nokadyň süýşmesi x_1 we x_2 -niň algebraik jemine deňdir.

$$x = x_1 + x_2$$

ýagny

$$x = A \left[\sin 2\pi\left(\frac{t}{T} + \frac{l}{\lambda}\right) + \sin 2\pi\left(\frac{t}{T} - \frac{l}{\lambda}\right) \right]$$

belli bolşy ýaly $\sin \alpha + \sin \beta = 2 \sin \frac{\alpha + \beta}{2} \cos \frac{\alpha - \beta}{2}$, onda

$$x = 2A \cos \frac{2\pi l}{\lambda} \cdot \sin \frac{2\pi t}{T}, \quad (5.33)$$

(5.33) deňleme durujy tolkunynyň deňlemesidir. Ol tolkunynyň islendik nokadynyň süýşmesini kesgitleýär. (5.33) aňlatmadaky köpeldiji

$$A_{\alpha} = 2A \cos(2\pi l / \lambda) \quad (5.34)$$

wagta bagly däl we l koordinat bilen yrgyldaýan islendik nokadyň amplitudasyny kesgitleýär. Şonuň üçin durujy tolkunynyň deňlemesini şeýle görnüşde ýazmak bolar.

$$x = A_d \sin(2\pi t / T) \quad (5.35)$$

Her bir nokat T period bilen garmoniki yrgyldy edýär. Durujy tolkunynyň alnan (5.34) deňlemesindeki amplitudasy A_d tolkunynyň her bir nokady üçin kesgitlidir. Emma, tolkun her bir nokatdan ikinji bir nokada geçeninde ol l aralyga baglylykda üýtgeýär.

Eger-de l -e we ş.m. bahalary berip, olary (5.34) formulada ýerine goýanymyzda $\cos(2\pi l / \lambda)$ bahany alarys. Şeýlelikde, görkezilen nokatlarda tolkun dynçlyk ýagdaýynda galýar, sebäbi, olaryň amplitudalarynyň yrgyldysy nola deň. Bu nokatlara durujy tolkunynyň düwünleri diýilýär. (2, 4, 6 nokatlar). Tolkunynyň güberçekleri diýip nokatlaryň iň uly amplitudaly yrgyldylaryna aýdylýar (1, 3, 5 nokatlar). Güberçekleri (uly amplitudalara) l -iň $2\lambda/4; 4\lambda/4; 6\lambda/4$ deň bolan bahalary degişlidir. Diýmek, durujy tolkunynyň uzynlygy iki goňşy ýa-da düwüniniň arasyndaky uzaklyk ýarym tolkun uzynlyga deňdir.

$$\Delta l = \lambda / 2 = \lambda_d \quad (5.36)$$

bu ýerde λ – ylgaýjy tolkunynyň uzynlygy. Wagtyň berlen momentlerinde köpeldijiniň ähli nokatlar üçin birmeňzeş bahasynyň bardygy sebäpli, iki düwüniniň aralygyndaky nokatlaryň hemmesi birmeňzeş fazada yrgyldaýarlar, ýagny olar iň uly gyşarmalara bir wagtda ýetýärler, deňagramly ýagdaýynyň üstünden bir wagtda geçýärler we ş.m. Şol bir düwüniniň dürli tarapynda ýatýan nokatlar garşylykly fazalarda yrgyldaýarlar, ýagny olar gyraky, emma garşylykly alamatly süýnmelere bir wagtda ýetýärler, deňagramly ýagdaýy bir wagtda, ýöne garşylykly ugrukdyrylan tizlikler bilen geçýärler we ş.m.

Tolkun yzyna serpigeninde serpilme araçäginde ýa düwün ýa-da güberçek emele geler. Munuň özi gurşawlaryň dykyzlyklaryna baglydyr. Eger tolkun degip, yzyna serpigýän gurşaw tolkunynyň ýaýraýan gurşawyndan has dykyz bolsa, onda araçäkde düwün emele gelyär. Eger tolkunynyň yzyna serpigýän gurşawyň dykyzlygy tolkunynyň ýaýraýan gurşawyndan pes bolsa, araçäkde güberçek emele gelyär.

Tolkun has dykyz gurşawdan (päsgeçilikden) yzyna esrpigende araçäkde düwüniniň emele gelmegi tolkunynyň has dykyz gurşawdan yzyna gaýdyp, öz fazasyny göni garşylykly faza üýtgeýändigini bilen

düşündirilýär, şonda araçäkde garşylykly ugurlary bolan yrgyldylar goşulyp, düwüniň emele gelmegine eltýär.

Tolkunyň ýarym uzynlygyça aralykda fazanyň garşylykly faza üýtgeýändigini sebäpli, bu fakta ýarym tolkunynyň ýitmegi diýip atlandyrylýar.

Tolkun pes dyklykly gurşawdan yzyna serpigeninde yza serpigiýän ýerinde fazasyny üýtgetmeýär, şonuň üçinem ýarym tolkun ýetmeýär. Şol sebäplide baryň we yzyna serpigen tolkunlatyň fazalary araçäkde birmeňzeşdir, şonuň üçinem yrgyldylaryň birmeňzeş fazalarynyň goşulmagy netijesinde şol ýerde güberçek emele gelýär.

Akustika. Ses tolkunlary. Infra- we ultrasesler

Ýyglylygy 20Gs-den 20000Gs aralygynda bolan mehaniki yrgylda ses tolkunlary diýilýär. Ses adamyň gulagynyň eşidip bilýän mehaniki yrgyldylarynyň bölegidir. Ses yrgyldylaryna gazlarda, suwuklyklarda we gaty jisimlerde tolkunly proses görnüşinde ýaýrap, ýa-da şu jisimleriň çäklenen oblastlarynda durujy tolkunlary emele getirýän maýyşgak yrgyldylar diýilip düşünilýär.

Ses tolkunlarynyň ýaýraýyş tizligi gurşawyň häsiýetlerine (onuň maýyşgaklygyna, dyklylygyna) bagly bolup, gazlarda 0,2-den 1,2 km/s, suwuklyklarda 1,2-den 2 km/s, gaty jisimlerde 2-den 5 km/s tizlik bilen ýaýraýar.

Ýyglylygy 20000 Gs-den uly bolan maýyşgak tolkunlara ultrasesler, ýyglylygy 20 Gs-den kiçi bolan tolkunlara infrasesler diýilýär. Fizikanyň ses tolkunlaryny öwrenýän bölümüne akustika diýilýär. Sesi eşitmek üçin ses çeşmesinden gulaga çenli bolan giňişlikde maýyşgak gurşawyň üznüksiz bolmagy gerekdir.

Ses boý tolkunlaryna degişlidir. Ses maýyşgak gurşawda tolkun görnüşinde ýaýraýar.

Ses tolkunyny özi bilen belli bir mukdarda energiýa alyp gidýär. Sesiň güýji tolkunyny özi bilen alyp gidýän energiýasy bilen baglanyşyklydyr. Ses tolkunlarynyň ugruna perpendikulýar bolan 1m^2 meýdanly üstden her sekuntda geçýän energiýanyň mukdary bilen ölçenýän fiziki ululyga sesiň güýji diýilýär. Sesiň güýji ony kabul edijä bagly däldir. Ol diňe ses çeşmesinden çykýan yrgyldy hereketi häsiýetlendirýär. Sesiň güýji yrgyldynyň amplitudasyna baglydyr. Ol şeýle formula arkaly kesgitlenilýär:

$$I = \frac{W}{St} \quad (5.37)$$

bu ýerde I - sesiň güýji, S - meýdan, t - wagt, W - ses tolkunynyň energiýasy. Ölçeg birligi J/m^2s ýa-da Wt/m^2 . Ýokarda belleýşimiz ýaly, sesiň güýji yrgyldynyň amplitudasyňa baglydyr. Seslenýän jisimiň doly energiýasy

$$W = \frac{4\pi^2 v^2 A^2 m}{2} = 2\pi v^2 A^2 m \quad (5.38)$$

formula bilen kesgitlenilýär. Ýagny, ses tolkunynyň energiýasy ýygylgyň we amplitudanyň kwadratyna proporsionaldyr. Sesiň güýji çeşmeden daşlaşdygyça, peselýär. Ony şu formuladan görmek bolar:

$$I = \frac{W}{4\pi R^2 t} \quad (5.39)$$

bu ýerde $4\pi R^2$ – ses çeşmesini gurşap alan R radiusly sferanyň üst meýdany. R - çeşmeden kabul edijä çenli bolan uzaklyk.

Ýokarda belläp geçişimiz ýaly, ses tolkunlary suwuklyklarda we gazlarda boý tolkunlary bolup, gaty jisimlerde boý tolkunlary görnüşinde-de, kese tolkunlar görnüşinde-de, ýaýrap biler. Onuň ýaýraýyş tizligi (sesiň tizligi) gurşawyň maýyşgaklyk häsiýetine we dyklygyna baglydyr.

Gazlarda ses tolkunlarynyň ýaýraýyşyny şeýle düşündirmek bolar. Mehaniki yrgyldylarynyň çeşmesi bu yrgyldylary özüni gurşap alan gaz molekulalaryna berýär. Netijede giňişligiň kiçijik oblastynda basyş üýtgeýär. Gaz maýyşgaklyk häsiýetine eýe bolanlygy üçin ol şol bada giňelýär we gazyň bu elementar göwrümünde gazyň dyklygyny peselýär (seýrekleyär) ýokarlanan basyşly mikrooblast ses çeşmesinden barha daşlaşýar. Gysylma we seýrekleme prosesleri gaty çalt bolup geçýär, şonuň üçin gazyň basyşynyň üýtgemesi (daşky gurşaw bilen) ýylylyk çalşygy bolmazdan, bolup geçýär. Ýylylyk çalşygy bolmazdan, bolup geçýän proseslere adiabatik proses diýilýär.

Ses tolkunlarynyň ýaýramagy köp kanunalaýyklyklary termodinamikanyň bölümünde öwrenilýän adiabatiki prosesleriň nazaryýetiniň esasynda düşündirmek başartdy.

Boý tolkunlary üçin ýazan (5.28) formulamyzy ulanyp, gazlarda ses tolkunlarynyň tizligini ýazmak bolar.

$$v = \sqrt{\frac{E}{\rho}} = \sqrt{\frac{1}{\alpha \rho}} \quad (5.40)$$

bu ýerde $\alpha = 1/E$ – maýşgaklyk koefisienti, ρ – gazyň dykyzlygy.

Gazyň maýşgaklyk koefisiýentiniň onuň basyşy bilen şeýle baglanşygy bar:

$$\alpha = 1/\gamma\rho$$

deňdir. bu ýerde γ – gazyň hemişelik basyşdaky ýylylyk sygymynyň hemişelik göwrümindäki ýylylyk sygymyna gatnaşygy. Gaz halynyň deňlemesinden (orta mekdep kursundan) gazyň dykyzlygy

$$\rho = \frac{p\mu}{RT}$$

deňdir. bu ýerde μ – gazyň molýar massasy, R – gazyň uniwersal hemişeligi, T – absolýut temperatura.

Soňky iki aňlatmany (5.40) formulada ornuna goýup, alýarys:

$$v = \sqrt{\frac{\gamma P}{\rho}} = \sqrt{\frac{\gamma RT}{\mu}} \quad (5.41)$$

Getirilen formulalardan, gaz gurşagynda sesiň tizligi temperatura, gazyň molýar massasyna we onuň ýylylyk häsiýetnamasy bolup durýan adiabata görkezjisine $-\gamma$ baglydygy, gazyň basyşyna bagly dældigi gelip çykýär.

Kadaly ýagdaýda howada sesiň ýaýraýyş tizligini kesgittläliň. Şerte görä: $t = O^{\circ}S(T = 273K); \gamma = 1,40; \mu = 0,029kg/mol, R = 8,31J/(mol \cdot K)$. Bu bahalary (5.41) formulada ornuna goýup alarys

$$v = \sqrt{\frac{\gamma RT}{\mu}} = \sqrt{\frac{1,40 \cdot 8,31 \cdot 273J \cdot K \cdot mol}{0,029mol \cdot K \cdot kg}} \approx 333m/s$$

Tizligiň bu bahasy tejribe arkaly alnan bahalar bilen gabat gelýär.

§5.8. Ultrasesler we onuň ulanylyşy

Ozal belläp geçişimiz ýaly, ýygylgy 20000 Gs-den uly bolan yrgyldylara ultrasesler diýilýär. Ultrasesi adamyň gulagy eşitmeyär. It we beýleki haýwanlar oňa duýgur bolýarlar. Ultrasesiň esasy aýratynlygy - onuň uly güýjiniň bardygy we olary belli bir ugra gönükdirip bolýanlygydyr.

Ultraseleri almak üçin pýezoelektrik effekt diýilýän effekt has köp ulnylýar. Ultrases yrgyldylaryny almak üçin kwarsyň kristallary (pýezokwars) peýdalanylýar. Eger kristallografiki oklaryna görä belli bir ýagdaýda kesilip alnan kwars plastinkasyna metal obkladkalarynyň kömegi bilen üýtgeýän elektrik naprýaženiýesi goýulsa, plastinka yrgyldamaga başlar. Eger goýlan elektrik naprýaženiýesiniň ýygylgy plastinkanyň hususy mehaniki yrgyldylarynyň ýygylgyna laýyk gelse (rezonans hadysasy), onda kwars plastinkasynyň yrgyldylary has-da güýçli bolýar. Plastikanyň ölçeglerini saýlap almak bilen, ýüz mün Gs ýygylkly ultrases yrgyldylaryny almak bolar.

Ultrases tolkunlarynyň tolkun uzynlygynyň gysga bolýanlygy üçin olar tolkunlaryň egrelmek (difraksiýa) hadysasyny adaty ses tolkunlaryndan has güýçsüz ýüze çykarýarlar. Munuň özi ultrases tolkunlarynyň örän oňat gönükdirilen dessesini almaga mümkinçilik berýär.

Häzirki wagtda ultrases tehnikada, hususan-da ugrukdyrylan suwasty signalizasiýa üçin, suwuň astyndaky zatlary duýmak hem-de çuňluklary kesgitlemek üçin giňden ulanylýar.

Ultrases we ses tolkunlaryň ýaýraýyş tizligi biri-birine golaý. Ultrasesiň hem λ tolkun uzynlygyny ν ýygylgyny we tizligini v , şu gatnaşyk biri-biri bilen baglanyşdyrýar $v = \lambda \nu$, emma ultrases tolkunlarynyň uzynlygy ses tolkunlarynyň tolkun uzynlygundan kiçi. Mysal üçin, ultrasesiň tizligi $v = 330 m/s$, $v = 330 kGs$ bolsa

$$\lambda = \frac{v}{\nu} = \frac{330 m \cdot s^{-1}}{330 \cdot 10^3 ms^{-1}} = 10^{-3} m = 1 mm$$

Ultrasesiň ýygylgynyň aşaky üstünden çägi 20 kGs we ýokarky çägi häzirki wagtda 200 MGs-dende geçýär.

Suwuklykdaky jisimleriň ornuny ultrasesiň kömegi bilen kesgitlemeklige gidrolokasiýa diýilýär. Gidrolokasiýa ideýasy örän sadadyr. Ultrases baryp düşýän jisiminiň üstünden yzyna serpigýär. Ultrases tolkunlaryň çeşmesinden çykyp, yza serpikdirýän üste baryp, soňra yzyna dolanyp gelyänçä bolan uzaklygy geçýän wagty ýörite abzal bilen ölçelýär. Ultrasesiň gurşawda ýaýramak tizliginiň belli bolany üçin jisime çenli uzaklygy ölçemek aňsat.

Ultrasesiň defektoskopiýasy. Ultrasesiň tehnikada wajyp ulanylyşy öňki sowet alymy S.Y.Sokolow tarapyndan döredilen ultrases defektoskopiýasydyr. Eger ultrasesiň ýaýraýan ýerindäki metalda jaýryk

bolsa, ondan ultrases tutuşlygyna diýen ýaly yzyna serpigýär we ony kabul ediji görkezýär.

Ultrases saglygy goraýyşda näsag adamyň bedenindäki dürli hili näsazlyklary tapmak üçin ulanylýar. Mysal üçin, UZI (ultrazwukowoý indikator) edil ultrases defektoskopy ýaly işleýär. Ultrases çykaryan enjamy adamyň bedeniniň ýüzi boýunça ýöredip, böwrekde öt haltada daş barmy ýa-da ýok, bar bolsa olaryň ölçegleri nähili diýen soraga jogap berip bolýar. Bagryň çişipmi ýa-da yokdygyny kesgitlep bolýar.

Ultrases zondlary diş sogurmak üçin hem ulanylýar. Ultrases özi bilen uly energiýany alyp gidýär. Şonuň üçin ultrasesiň täsiri astynda jisimler gyzyar we basyşa sezewar bolýar. Şol sebäpli ultrasesi endamyňy massaž etmek (owkalamak) üçin, suwuň, ýagyň emulsiýasyny almak üçin we ş. m. giňden ulanylýar.

Adamda jübüt eşidiş organlarynyň bolmagy ses tolkunlarynyň ýaýraýyş ugruny kesgitlemäge mümkiinçilik berýär (bınewral effekt). Beýleki merkezleriniň gulaklara gelyän yrgyldylaryň faza tapawudyny kesgitlemäge ukyplydygy zerarly, ses tolkunlarynyň ugry kesgitlenilýär. Belent yrgyldyly ses bolanda gulaklaryň ikisindäki ses amplitudalarynyň tapawudy netijesinde sesiň gelyän ugruny seljermek bolýar. Ses subýektiw eşidilende, biz sesiň üç sany häsiýetini duýýarys: sesiň belentligini, tembrinl, gatylygyny tapawutlandyryarys. Sesiň belentligi onuň ýygylgy bilen kesgitlenýär. Sesiň gatylygy (güýji) sesiň ýaýraýyş ugruna perpendikulýar ýerleşen bir meýdan birliginden ýaýraýan ses tolkunlarynyň wagt birliginde geçirýän energiýasynyň mukdary bilen kesgitlenýär.

Ses tolkunlarynyň ses duýgysyny döretmegi üçin sesiň güýjüniň eşidiş bosagasy diýilýän käbir minimal (in kiçi) ululykdan uly bolmagy zerurdyr. Güýji eşidiş bosagasyndan aşakda ýatýan sesi gulak eşitmeýär. Ol eşidişden gaty gowşak bolýar. Eşidiş bosagasy dürli ýygyllyklar üçin dürlüdir. Adamyň gulagy 1-3 kGs aralygyndaky ýygyllykly yrgyldylary has gowy duýýar. Bu aralyk üçin eşidiş bosagasy 10^{-12} Wt/m² ululyga yetýär. Has pes we has yokary ýygyllyklary gulak has ýaramaz duýýar. 20 Gs-den kiçi we 20 kGs-dden uly ýygyllykly yrgyldylaryň güýji näçe bolsa-da, olar ses bolup eşidilmeýär.

Has uly güýçli yrgyldylar gulaga syzarlyk basyş edip, soňa baka agyrdyp başlaýar. Sesiň güýjüniň syzyş (agyry) duýgusyny döretmeýän maksimal (in uly) ululygyna duýuş bosagasy ýa-da agyry duýgusynyň bosagasy diýilýär. Agyry duýgusynyň bosagasy dürli ýygyllyklar üçin birneme dürlidir. Eşidiş bosagasy bilen agyry bosagasynyň aralygynda eşidiş aralygy ýerleşýär.

Eşidiş bosagaasynyň 1 kGs-däki $I_0=10^{-12}$ Wt/m² ululygy nolunjy dereje hökmünde kabul edilendir. Sesiň güýji köpelip, 10^2 Wt/m²-dan geçeninde agyry duýgusynyň bosagasy başlanýar.

Sesiň güýjüni häsiýetlendirmek üçin köplenç şeýle ululyk ulanylýar

$$\beta = 10 \ln \frac{I}{I_0}$$

Bu ululyk desibellerde (dB) ölçenýär: $I_0=10^{-12}$ Wt/m² - eşidiş çägi; I – berlen sesiň güýji (mysal üçin: ýuwaşja pyşyrdy – 30 dB, aýak sesi – 40 dB, gaty gürlenýän ses – 70 dB, köp adamly köçe galmagaly – 90 dB we ş.m.)

VI BAP. SUWUKLYKLARYŇ WE GAZLARYŇ MEHANIKASY

§6.1. Suwuklyklardaky we gazlardaky basyş

Gazlaryň molekulalary biri-biri bilen bagly bolman, tertipsiz, haotik hereket edýärler. Olaryň özara täsir güýçleri gaty gowşak. Şonuň üçin olar erkin hereket edýärler we biri-birleri bilen çaknyşyp, edil billiard şarlary ýaly dürli tarapa serpigýärler. Gazlar formasyny-da, göwrümini-de saklap bilmeyärler. Olaryň göwrümi ýerleşen gaplarynyň göwrümi bilen kesgitlenýärler.

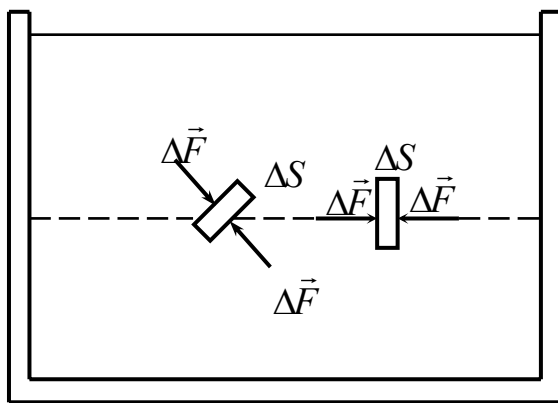
Edil gazlar ýaly, suwuklyklar-da özläriniň ýerleşen gaplarynyň formasyny alýarlar. Gazlardan tapawutlylykda, suwuklyklaryň molekulalary biri-birine degişip diýen ýaly ýerleşendirler. Şoňa görä-de, olardaky molekula gazdaka garanyňda özüni başgaça alyp barýar.

Suwuklyklaryň we gazlaryň häsiýetleri boýunça biri-birinden tapawutlanýandyklaryna garamazdan, birnäçe mehaniki hadysalaryň geçişi şol bir meňzeş deňlemeleriň üsti bilen aňladylýar. Şonuň üçin gazlaryň we suwuklyklaryň deňagyramlylyk ýagdaýlary, hasiýetleri, olaryň özara täsirleri, olardaky gaty jisimleriň hereketleri bitewilikde (meňzeşlikde) öwrenilýär. Mehanikanyň gazlaryň we suwuklyklaryň şu häsiýetlerini öwrenýän bölümüne gidroaerodinamika diýilýär.

Mehanikada suwuklyklar we gazlar üznüksüz we tükeniksiz tutuş sreda hökümünde seredilýär. Suwuklyklaryň dykzlygy basyşa gaty az bagly bolýar. Gazlaryňky bolsa, tersine.

Suwuklyga ýa-da gaza daşardan berlen basyş onuň ähli taraplaryna deň geçirilýär (Paskalyň kanuny).

Deňagyramlylyk ýagdaýynda duran suwuklygyň içinde inçejik plastinkajyk ýerleşen diýip göz önüne getireliň (6.1-nji surat).



6.1-nji surat. Suwuklygyň içindäki jisime
suwuklygyň basyşy.

Onuň nähili ýerleşendigine garamazdan, onuň dürli taraplaryndaky suwuklyklyk bölejikleri tarapyndan oňa ululuklary boýunça biri-birine deň we plastinkanyň meýdanyna perpendikulýar bolan ΔF güýçleri täsir edýär.

Suwuklyk tarapyndan täsir edýän ΔF normal güýjüniň bu güýjüň täsir edýän ΔS meýdanyna bolan gatnaşygyna deň bolan fiziki ululyga basyş diýilýär.

$$p = \frac{\Delta F}{\Delta S} \quad (6.1)$$

Halkara birlikler sistemasynda (IS) basyşyň ölçeg birligi Paskaldyr (Pa). (6.1) formula esasynda $1 \text{ Pa} = 1 \text{ N/m}^2$. Ondan başga-da, basyşy ölçemek üçin sistemadan daşary ölçeg birlikleri hem ulanylýar; simap sütüni (mm.sim.süt.), tehniki atmosfera (at), fiziki ýa-da normal atmosfera (atm) we başgalar:

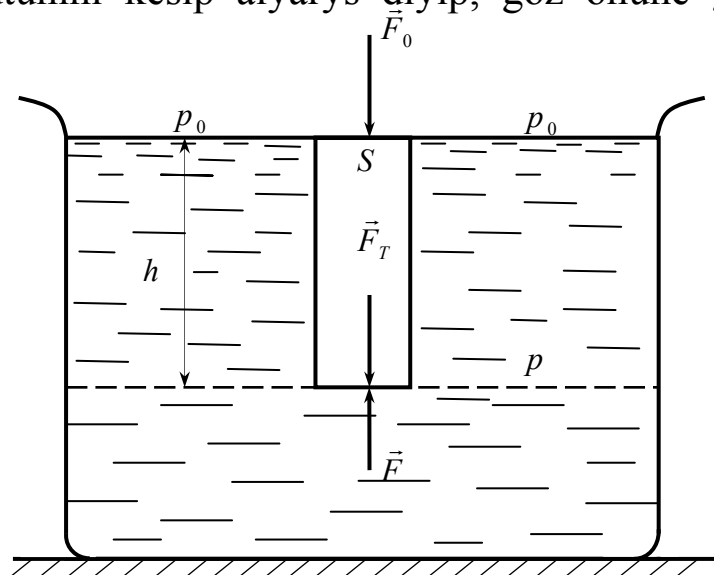
$$1 \text{ mm.sim.süt.} = 133 \text{ Pa}$$

$$1 \text{ atm.} = 1.01 \cdot 10^5 \text{ Pa}$$

$$1 \text{ at.} = 0,981 \cdot 10^5 \text{ Pa}$$

Indi dynçlykda duran, gysylmaýan suwuklygyň içindäki basyşyň bolünişine, oňa suwuklygyň agramynyň nähili täsir edýänligine seredeliň. Deňagramlylyk ýagdaýynda suwuklygyň gorizont al ugur boýunça ähli ýerinde basyşy deň, eger-de şeýle bolmadyk bolsady, onda suwuklygyň üsti tekiz bolmazdy. Gysylmaýan suwuklyk diýmeklik onuň dyklyzlygy basyşa bagly däl diýmekdir.

Goý, haýsy-da bolsa bir gabyň içinde deňagramlylyk ýagdaýynda duran suwuklygyň içinden kese-kesiginiň meýdany S deň bolan suwuklyk sütünini kesip alýarys diýip, göz önüne getireliň (6.2-nji surat).



6.2-nji surat. Suwuklykdaky jisime basyşyň kesgitlenişi.

Suwuklygyň ýokarky gatyna p_0 deň bolan basyş täsir edýär, ol suwuklygyň aşaky gatlaklaryna-da berilýär. Emma suwuklygyň aşaky gatlaklaryna ol gatlaklardan ýokarda ýerleşen gatlaklaryň agramlarynyň döredýän basyşy-da goşulýar.

Silindr görnüşinde bölüp alan sütünimiziň ýokarky üstüne täsir edýän F_0 güýç $F_0 = p_0 S$, aşaky esasyňa täsir edýän F güýç $F = p S$ deňdir.

Bu ýerde p – h çuňlukdaky basyş. Ondan başga-da, silindr sütüniniň içinde ýerleşen m massaly suwuklyklaryň agramy wertikal aşak täsir edýär (F_A) Bu güýç

$$F_A = mg = \rho h S g$$

deňdir. Bu ýerde: ρ – suwuklygyň dykyzlygy, hS – onuň göwrümi ($m = \rho V$). Gapdaldan täsir edýän güýçleriň özara deňdikleri sebäpli olary hasaba almaýarys.

Bölüp alnan suwuklyk sütüniniň deňagyramlaşan şertini ýazýarys.

$$F_0 + F_A = F \quad \text{ýa-da} \quad F_0 S + \rho g h S = p S$$

Şu aňlatmadan görnüşi ýaly, h çuňlukdaky biziň gözleýän basyşymyz:

$$p = p_0 + \rho g h \quad (6.2)$$

deňdir. Bu ýerde $p_r = \rho g h$ ululyga deň bolan basyş gidrostatiki basyş diýilýär. Eger daşarky basyş $p_0 = 0$ diýsek, onda h çuňlukdaky suwuklygyň basyşy onuň gidrostatik basyşyna deňdir, ýagny

$$p = p_r$$

Gidrostatiki basyş haýsy-da bolsa bir h çuňlukda ýerleşen gatлага ondan ýokarda ýerleşen gatlaklaryň agramynyň döredýän basyşydyr.

(6.2) formuladan görnüşi ýaly, suwuklugyn näçe çuňlaşdygyça, onuň gidrostatiki basyşy artýar, bu bolsa daşarky basyşy üýtgemeýär diýip kabul etsek, umumy basyşyň köpelmegine getirýär, şonun üçin suwuklyga çümdürilen her bir jisime Arhimediň kanuny boýunça kesgitlenilýän itekleýji güýç täsir edýär. Suwuklyga (gaza) çümdürilen her bir jisime şu suwukluk tarapyndan onuň gysyp çykaran suwuklygynyň (gazynyň) agramyna deň bolan ýokary ugrukdyrydan itekleýji güýç täsir edýär:

$$F_A = \rho g V$$

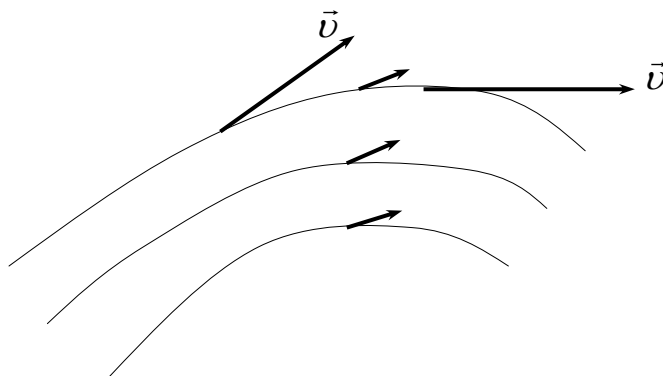
bu ýerde: F_A – Arhimediň güýji, ρ – suwuklygyň dykyzlygy, V – suwuklyga çümdürilen jisimiň göwrümi.

§6.2. Suwuklyklaryň durnugyşan akymy. Üznüksizligiň deňlemesi

Suwuklygyň hereketine garalanda, köplenç halatlarda ýeterlik derejedäki ýakynlaşma bilen, ony absolýut gysylmaýan, bir gatlak ikinji gatlag görä ornuny üýtgedeninde hiç hili sürtülme güýçleriniň (şepbeşikligiň) ýüze çykmaýan görnüşinde seredýärler.

Absolýut gysylmaýan we içki sürtülme güýçleri (şepbeşikligi) absolýut bolmadyk suwuklyklara ideal suwuklyklar diýilýär.

Suwuklyk bölejiginiň käbir kesgitli hasaplaýyş sistemasyna otnositellikde alnan hereketini kesgitleý. Şonda her bir bölejige özüniň tizlik wektory degişli bolar. Suwuklyk tutuşlygyna tizlik wektorynyň meýdany bolar. Biz tizlik wektorynyň meýdanynda ýerleşen her bir nokada suwuklyk bölejiginiň şol nokatdaky tizliginiň ugruna laýyk gelyän galtaşma çyzyklaryny geçirip bileris (6.3-nji surat).

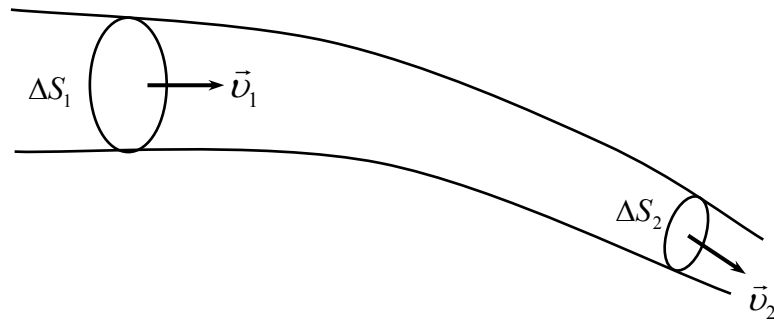


6.3-nji surat. Suwuklyk akymynyň meýdany.

Şeýle çyzyklara akýş çyzyklary diýilýär. Akýş çyzyklaryny akýş tizliginiň uly bolan ýerinde gür, haýal akýan ýerinde bolsa selçen bolar ýaly edip, geçirmek kabul edilendir. Suwuklygyň durnugyşan (stasionar) akymy bolan halda onuň her bir nokatdaky tizligi we akym çyzyklary wagta göre üýtgemeyär.

Suwuklygyň akýş çyzyklary bilen çäklenen bölegine akýş turbajygy diýilýär. Akýş turbajygynyň käbir kesiklerindäki bölejikleriniň hemmesi hereket edenlerinde akýş turbajygynyň içinde bolmagyny dowam etdirip, ondan daşary çykmaýarlar, onun içine daşyndan hem hiç bir bölejik girmeýär.

Kese-kesiginiň meýdany ΔS_1 we ΔS_2 deň bolan akýş turbasyna seredeliň (6.4-nji surat).



6.4-nji surat. Akymyň üznüksizliginiň kesgitlenilişi.

Wagt birliginde ΔS_1 kesim arkaly $\Delta S_1 v_1$ göwrümlü suwuklyk akyp geçer, bu ýerde v_1 – ΔS_1 kesimiň alnan ýerindäki suwuklygyň akýş tizligi wagt birliginde ΔS_2 kesim arkaly $\Delta S_2 v_2$ göwrümlü suwuklyk akyp geçer, bu ýerde v_2 – ΔS_2 kesimiň alnan ýerindäki akýş tizligi.

Gysylmaýan suwuklyk bolnanynda ΔS_2 kesim arkaly ΔS_1 kesimden akyp geçen suwuklygyň göwrümüne deň bolan göwrümlü suwuklyk akyp geçer, diýmek

$$\Delta S_1 v_1 = \Delta S_2 v_2$$

Bu baglanyşyk akym turbajygynyň islendik iki kesimi üçin dogrudyr. Şonuň üçin ony şeýle görnüşde ýazýarys:

$$\Delta S \cdot v = \text{const} \quad (6.3)$$

Gysylmaýan suwuklygyň akym tizliginiň akym turbajygynyň kesekesine köpeltmek hasyly, berlen akym turbajygy üçin hemişelik ululykdyr. Bu deňlemä (6.3) suwuklygyň üznüksizliginiň deňlemesi diýilýär.

§6.3. Bernulliniň deňlemesi. Suwuň akymyndaky basyş

Akýan suwuklygyň akýş turbajygynyň ΔS_1 kesiginden soňra ΔS_2 kesiginden akyp geçýän Δm massany bölüp alalyň (6.5-nji surat). Suwuklygyň giriş ΔS_1 kesikdäki tizligini v_1 arkaly, basyşyny p_1 arkaly, çykyş ΔS_2 kesikdäki tizligini v_2 , basyşyny p_2 arkaly belgiläliň. Akýş turbajygy gorizontál däl-de ýapgydyrak ýerleşipdir diýip, göz önüne getireliň. ΔS_1 kesigiň ýerleşen beýikligini h_1 arkaly ΔS_2 – kesigiňkini h_2 arkaly belgiläliň.

Δt wagtyň dowamynda ΔS_1 kesikden akyp geçýän m massaly suwuklygyň kinetik energiýasy mgh_1 we potensial energiýasy deňdir. ΔS_1 – den çepde we ΔS_2 – den sagda ýerleşen suwuklygyň

gatlaklary tarapyndan ΔS_1 we ΔS_2 kesiklere basyş güýçleriniň täsiri netijesinde iş edilýär. Ol işiň ululygy:

$$A = p_1 \Delta S_1 l_1 - p_2 \Delta S_2 l_2 \quad (6.4)$$

bu ýerde Δt wagtda suwuklygyň ΔS_1 kesikden akyp geçen l_1 ýoly $l_1 = v_1 \Delta t$, ΔS_2 kesikdäkisi $l_2 = v_2 \Delta t$ deňdir.

Şeýlelikde, suwuklyk akymynyň ýerine ýerine ýetirýän A işi

$$A = p_1 \Delta S_1 v_1 \Delta t - p_2 \Delta S_2 v_2 \Delta t \quad (6.5)$$

deňdir. Suwuklygyň ΔS_1 kesigiň üstünden akyp geçenindäki doly energiýasy

$$W_1 = m v_1^2 / 2 + m g h_1$$

ΔS_2 kesigiň üstünden geçenindäki doly energiýasy:

$$W_2 = m v_2^2 / 2 + m g h_2 \quad (6.6)$$

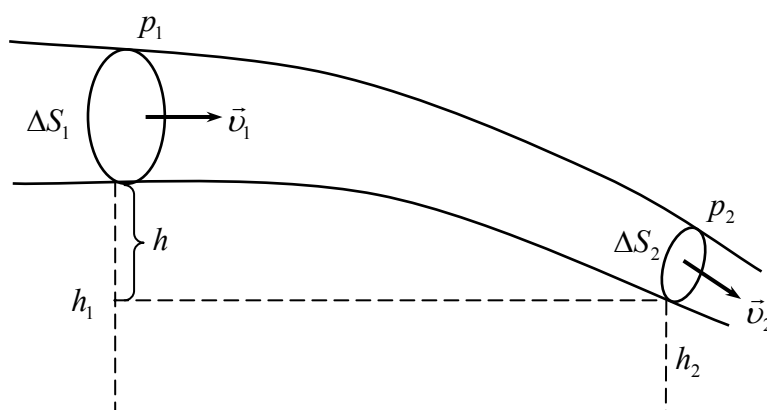
ΔS_1 we ΔS_2 kesikleriniň aralygynda hiç hili energiýanyň toplanmasy ýok. Suwuklygyň doly energiýasynyň üýtgemesi daşarky güýçleriň ýerine ýetirýän işiniň ululygyna deňdir, ýagny

$$\Delta W = -A$$

$$m_1 v_1^2 / 2 + m g h_1 - m v_2^2 / 2 - m g h_2 = p_2 \Delta S_2 v_2 \Delta t - p_1 \Delta S_1 v_1 \Delta t$$

ýa-da

$$\frac{m v_1^2}{2} + m g h_1 + p_1 \Delta S_1 v_1 \Delta t = \frac{m v_2^2}{2} + m g h_2 + p_2 \Delta S_2 v_2 \Delta t \quad (6.7)$$



6.5-nji surat. Bernulliniň deňlemesiniň kesgitlenilişi.

Çüwdürimiň üznüksizlik kanunyna göre (6.4) Δt wagtyň dowamynda ΔS_1 kesige girýän we ΔS_2 kesikden çykýan suwuklyklaryň göwrümleri deň, şonuň üçin

$$\Delta S_1 v_1 \Delta t = \Delta S_2 v_2 \Delta t = V$$

(6.7) deňlemäniň çep we sag taraplaryny V göwürme bölüp we $\rho = m/V$ dykzlygyň formulasyny göz önünde tutup, aşakdaky aňlatmany alýarys:

$$\rho \frac{v_1^2}{2} + \rho g h_1 + p_1 = \rho \frac{v_2^2}{2} + \rho g h_2 + p_2 \quad (6.8)$$

Bu deňleme ilkinji gezek görnükli fizik hem-de matematik, Peterburg akademigi Daniil Bernulli (1700-1782) tarapyndan işlenilip çykarylýar. Şonuň üçin oňa Bernulliniň deňlemesi diýilýär.

Eger ähli akymy inçejik akym turbajyklaryna bölsek, onuň her bir kesigi üçin Bernulliniň deňlemesiniň şeýle görnüşi dogrudyr.

$$\rho \frac{v^2}{2} + \rho g h + p = \text{const} \quad (6.9)$$

bu deňlemedäki p – aňlatma statiki basyş. $\rho v^2/2$ – dinamiki basyş $\rho g h$ – gidrostatiki basyş diýilýär.

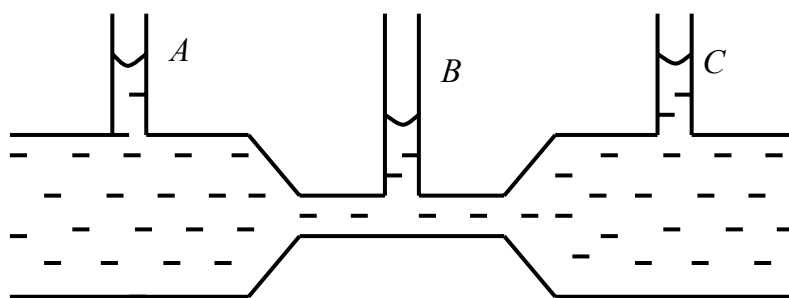
Gidrodinamikanyň köp sanly meseleleri şu deňlemäniň kömegi bilen çözülýär. Ol suw, kä halatlarda howa ýaly şepbeşikligi az bolan suwukluklar üçin dogrudyr.

Bernulliniň deňlemesiniň käbir ulanylýan ýerleri barada durup geçeliň:

Gorizonta ýerleşen ($h_1 = h_2$) akym turbajygy üçin Bernulliniň deňlemesini şeýle ýazmak bolar:

$$\rho \frac{v_1^2}{2} + p_1 = \rho \frac{v_2^2}{2} + p_2 \quad (6.10)$$

Suwuklyk dürli kesigi bolan gorizonta turbadan akanda turbanyň dar ýerlerinde suwuklugyň tizliginiň uly, emma basyşynyň kiçi bolýandygyny, giň ýerlerinde bolsa tersine, basyşyň köp bolup, tizligiň kiçi bolýandygyny (6.10) formuladan we suw çüwdürüminiň üznüksizlik deňlemesinde görmek kyn däl. Munuň hakykatdan-da şeýle bolýandygyny turbanyň boýuna A , B , C manometrleri ýerleşdirip barlap görmek bolar (6.6-njy surat).



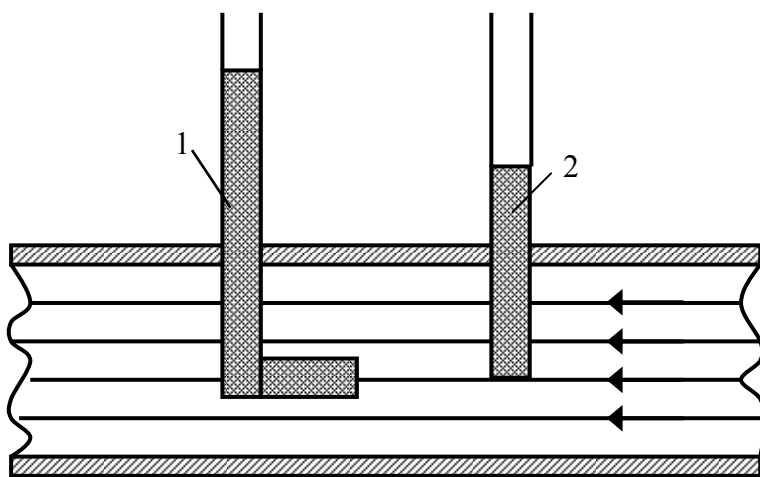
6.6-njy surat. Dürli kese-kesikli turbada basyşyň dürlüligi.

Şu manometrik turbajyklardaky suwuklyklaryň beýiklik derejeleri turbadaky p basyşy ölçär, Bernulliniň kanunyna degişlilikde, turbanyň inçelen bölegine berkidilen B manometrik turbajykdaky suwuklygyň beýikligi turbanyň giň böleklerine berkidilen A we C manometrik turbajyklardakydan pesdigini tejribe görkezýär.

Eger-de aşaky ujy akymyň garşysyna tarap egreldilen hereketsiz manometrik turbajygy (6.7-nji surat) suwuň akymynda ýerleşdirsek, onda turbajygyň ýanynda akym çyzyklary üýtgär. Suwuklygyň deşigiň önündäki tizligi nola deň bolar.

Onda (6.10) deňleme şeýle görnüşde bolar:

$$p_2 = p_1 + \rho v_1^2 / 2 \quad (6.11)$$



6.7-nji surat. Akymyň garşysyna tarap egreldilen turbada basyşyň ulalyşy.

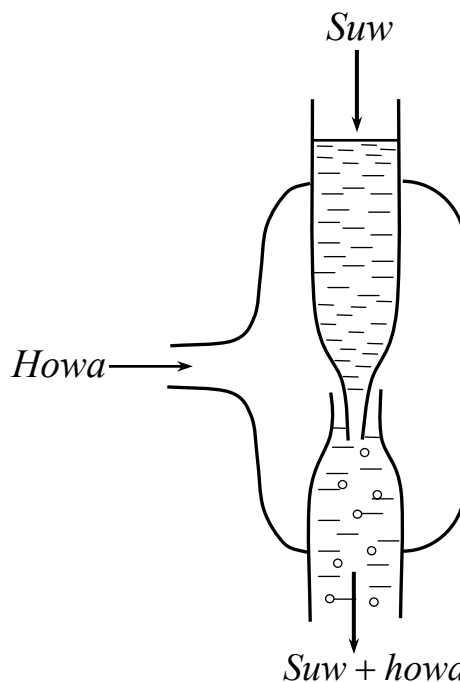
Deşigi akymyň garşysyna ugrukdyrylan manometr turbajygyna Pitonyň turbajygy hem diýilýär. Ol (6.11) formuladan görnüşi ýaly, p_1 basyşdan ρv_1^2 ululykça uly bolan p_2 basyşy, ýagny, statitiki we dinamiki (ρv_1^2) basyşlaryň jemi bolan doly basyşy ölçär. p_1 – statiki basyşy 2-nji

manometr ölçeyär. Şeýlelikde, doly basyşy we statiki basyşy (p_2 we p_1) bilip, akymyň v_1 tizligini kesgitlemek bolar.

Akymyň tizliginiň has uly bolan ýerlerinde statiki basyşyň kiçelýändigini halk hojalygynda ulanylýan birnäçe abzallaryň işleýiş prinsipleriniň esasydyr.

Mysal üçin, pulwerizatorlaryň (atyr sepiji gural) suw çüwdürüji nasoslaryň işleýiş prinsiplerine seredeliň (6.8-nji surat). Turbajygyň giň bölegindäki basyş atmosfera basyşyna deň bolsa, onda dar bölegindäki basyş atmosfera basyşyndan az bolar. Şonda çüwdürümiň sorujy täsiri ýüze çykýar.

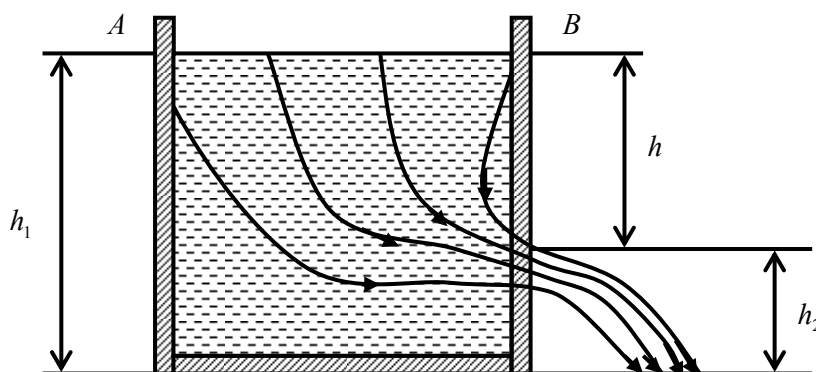
Turbajygyň daralan ujundan uly tizlik bilen çykýan suw howanyň düwmejiklerini sorýar we olary özi bilen alyp gidýär.



6.8-nji surat. Suw çüwdürüji nasoslaryň işleýiş prinsipi.

Bernulliniň deňlemesiniň kömegi bilen deşikden akyp çykýan suwuň tizligini-de kesgitlemek bolar. Eger gap giň bolup, deşigi dar bolsa (6.9-njy surat), onda gapdaky suwuklygyň tizligi azdyr, şoňa görä-de, tutuş akyma bir akym turbajygy hökmünde garamak bolar. Onda, Bernulliniň deňlemesini bu hal üçin şeýle ýazmak bolar:

$$\rho \frac{v_1^2}{2} + \rho g h_1 + p_1 = \rho \frac{v_2^2}{2} + \rho g h_2 + p_2$$



6.9-njy surat. Deşikden akyp çykýan suwuň tizliginiň kesgitlelenilişi.

Emma ýokardaky kesikdäki (AB üstäki) basyşda, aşaky deşikdäki basyş-da biri-birine (atmosfera basyşyna) deň. Ýagny $p_1=p_2$; onda ýokardaky formuladan:

$$\frac{v_1^2}{2} + gh_1 = \frac{v_2^2}{2} + gh_2$$

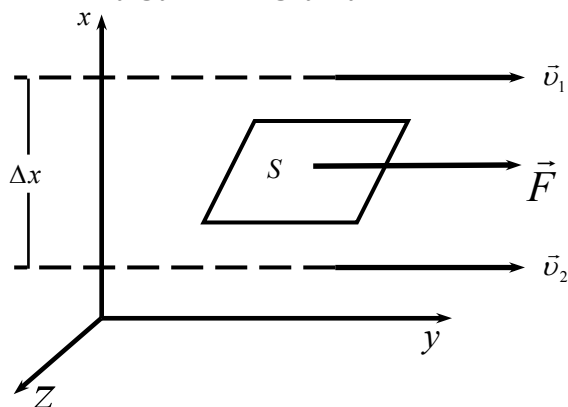
Suw çüwdürümini üznüksizliginiň deňlemesine görä, $g_2/g_1=S_1/S_2$ şu ýerde S_1 we S_2 – gabyň üstüniň we deşiginiň kese keseginiň meýdanlary. Eger $S_1>S_2$, onda $g_1^2/2$ hasaba almasa-da bolar. Onda:

$$v_2^2 = 2g(h_1 - h_2) = 2gh \quad \text{ýa-da} \quad v_2 = \sqrt{2gh}$$

Bu formula Toriçelliniň formulasy diýilýär. Bu formula çüwdürimiň h beýiklikden akyp çykanda alýan tizligi edil şol beýiklikden erkin gaçýan jisimiň alýan tizligine deňdigini görkezýär.

§6.4. Suwuklyklarda we gazlarda jisimiň hereketi. Şepbeşiklik (içki sürtülme) koeffisienti. Laminar we turbulent akymlar

Suwuklyklarda bir gatlak beýleki gatlag göreä orun çalşylanda sürtülme güýji döreýär. Has çalt hereketlenýän gatlak tarapyndan haýal hereketlenýän gatlag tizlendiriji güýç täsir edýär. Tersine, haýal hereketlenýän gatlak tarapyndan çalt hereketlenýän gatlag saklaýjy güýç täsir edýär. Şeýlelikde içki sürtülme güýji döreýär. Bu güýçler gatlaklaryň üstüne geçirilen galtaşma çyzygy boýunça ugrukdyrylandyr. Seredilýän gatlagyň meýdanynyň üsti näçe uly bolsa, içki sürtülme güýji şonça-da uludyr, hem-de gatlakdan gatlag geçendäki suwuklugyň akys tizliginiň üýtgeýiş çaltlygyna baglydyr.



6.10-njy surat. Suwuklyklarda içki sürtülme güýji.

Goý, biri-birinden Δx aralykda ýerleşen iki gatlak (6.10-njy surat) deňişlilikde v_1 we v_2 tizlik bilen akýar diýeliň. Ýagny

$$v_1 - v_2 = \Delta v$$

Δx – gatlaklaryň arasyndaky hasaplanýş ugry gatlaklaryň akýş tizligine perpendikulýardyr. Gatlakdan gatлага geçilende tizligiň üýtgeýiş çaltlygyny görkezýän $\Delta v / \Delta x$ ululyga tizlik gradienti diýilýär. Içki sürtülme güýji tizlik gradientine proporsionaldyr, diýmek

$$F = \eta \left| \frac{\Delta v}{\Delta x} \right| S \quad (6.12)$$

Suwuklygyň tebigatyna bagly bolan η proporsionallyk koeffitsientine içki sürtülme diýilýär. η näçe uly bolsa, suwuklyk ideal suwuklykdan şonça-da köp tapawutlanýar we onda içki sürtülme güýçleri-de köp döreýär.

Şepbeşiklik koeffitsientiniň halkara birlikler sistemasyndaky (IS) ölçeg birligi (6.12) formula laýyklykda $Pa \cdot s$, SGS birlikler sistemasynda şepbeşikligiň ölçeg birligi hökmünde puaz (Pz) ulanylýar.

$$1 \text{ puaz} = 1 \text{ dina} \cdot s / \text{sm}^2$$

ýa-da

$$1 \text{ Pa} \cdot s = 10 \text{ puaz}$$

Şepbeşiklik birligi puaz – fransuz alymy Puazeýliň hatyrasyna goýlan.

Suwuklygyň şepbeşikligi temperatura görä örän çalt üýtgäp, temperaturanyň ýokarlanmagy bilen kemelýär.

Suwuklygyň (gazyň) akymy laminar we turbulent görnüşinde bolup biler. Laminar (gatlaklaýyn) akymda her bir gatlagyň özi garyşyp, emma goňşy gatlak bilen garyşman gatlaklaýyn akýar, turbulent akymda suwuklygyň ähli gatlaklary biri-biri bilen garyşyp akýar. (Mysal üçin, turbanyň darajyk ýerindäki suwuklygyň akýşy).

Akymyn tizliginiň artmagy bilen laminar akym turbulent akyma hem geçip biler. Ol Reýnoldsyň sany diýilýän ölçegsiz ululyk bilen häsiýetlendirilýär:

$$R_e = \rho \langle v \rangle d / \eta = \langle v \rangle d / \nu$$

bu ýerde $\nu = \eta / \rho$ – şepbeşikligiň kinematiki koeffisienti, ρ – suwuklygyň dyklyzlygy, $\langle \nu \rangle$ – turbanyň kesiginden akyp geçýän suwuklygyň ortaça tizligi, d – uzynlyk ölçegi, mysal üçin turbanyň diametri.

Reýnoldsyň sanynyň kiçi bahalarynda ($Re=1000$) turbulent akym, uly bahalarynda ($Re=2300$ bolanda) turbulent akym bolýar. Suwuklyk turbadan akanda Reýnoldsyň sanynyň kritiki bahasynda laminar akym turbulent akyma geçýär. Turbadan akýan suw üçin Re -niň kritiki bahasy 1200-e deňdir.

§6.5. Içki sürtülme koeffisienti. Kesgitlemekligiň usullary. **Stoksuň usuly**

Içki sürtülme (şepbeşiklik) koeffisientini kesgitlemekligiň bu usuly sferik formasynda bolan uly bolmadyk jisimiň suwuklyga gaçan wagtyndaky tizligini ölçemeklige esaslanandyr.

Goý, uly bolmadyk metal şarjagazy gliseriniň içine taşlanylýar, diýip pikir edeliň. Şonda dik aşak gaçýan şara üç sany güýç täsir edýär:

agyrlık güýji $P = mg = \frac{4}{3} \pi r^3 \rho g$ (ρ – şarjagazyň dyklyzlygy), Arhimed

güýji $F_A = mg = \frac{4}{3} \pi r^3 \rho g$ (ρ – gliseriniň dyklyzlygy) we sürtülme güýji. Stoks

tarapyndan tassyklanan kanuna göre, sürtülme güýji F_c jisimiň tizliginiň (ν), şepbeşiklik koeffisientiniň (η), şaryň (r) radiusynyň köpeldilmegine deňdir, ýagny $F_c = 6\pi\eta r\nu$. Suwuklyga gaçan şarjagaz diňe ikinji momentinde tizlenip gaçmaga başlaýar: onuň gaçyş tizliginiň artdygyça F_c sürtülme güýji hem artyp, ol güýç şara täsir edýän P agyrlık güýjüni deňagramlaşdyrmaga başlaýar. Güýçleriň şunuň ýaly deňagramlaşmagyna ýetilende şar deň ölçegli hereket edip başlaýar. Onda:

$$P = F_A + F_c \quad (6.13)$$

ýa-da P , F_A we F_c ululyklaryň bahalaryny şu deňlige goýup alarys:

$$\frac{4}{3} \pi r^3 \rho g = \frac{4}{3} \pi r^3 \rho' g + 6\pi\eta r\nu$$

Bu ýerden
$$\nu = \frac{(\rho - \rho')gr^2}{9\eta} \quad (6.14)$$

Deňölçeqli hereket edýän şaryň ρ tizligini tapyp, onuň hereket edýän suwuklygynyň (gliserin) şepbeşiklik koeffisientini kesgitlep bolar. (6.14) formuladan görnüşi ýaly şarjagazyň diametri näçe kiçi bolsa, ol berlen suwuklykda şonça-da haýal gaçýar. Stoksuň formulasy diňe bir suwuklyga gaçýan şarlaryň hereket tizligini kesgitlemek üçin däl-de, suwukluk hökmünde garalýan gazly sredalardaky kiçijik şarjagazlaryň gaçmagy üçin hem ulanarlykdyr. Mysal üçin, dumanyň owunjak damjalarynyň howada aşak gaçýan tizligini (6.14) formulanyň kömegi bilen örän oňat kesgitlemek bolar.

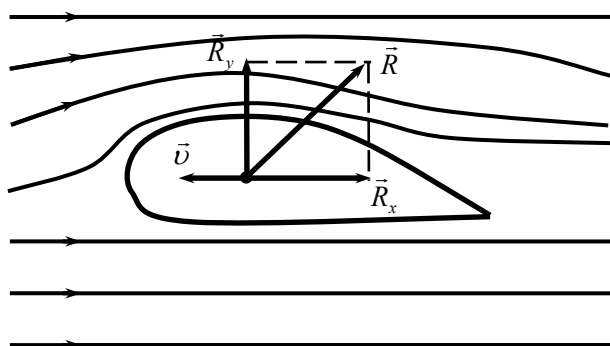
Içki sürtülme (şepbeşiklik) koeffisientini kesgitlemek üçin Puazeýliniň usuly hem ulanylýar. Bu usul inçejik kapillýar turbajygyndaky suwuklygyň laminar akymyna esaslanandyr. Ýagny

$$\eta = \frac{\pi r^4 \Delta p t}{8 V l} \quad (6.15)$$

bu ýerde r – kapillýar turbajygyň radiusy, l – onun uzynlygy, Δp – onuň ahyrlaryndaky basyşyň tapawudy, t – wagt we V – şol wagtda turbajykdan akyp geçen suwuklygyň göwrümi.

Aerogidrodinamikanyň esasy meselelerinden biri gazlarda we suwuklyklarda hereket edýän gaty jisimleriň häsiýetlerini öwrenmekden, aýratyn hem hereket edýän jisime gurşaw (howa) tarapyndan täsir edýän güýçleri öwrenmekden ybaratdyr. Bu problema awiasiýanyň, deňiz gämileriniň tizlikleriniň artdyrylmagy bilen baglanyşykly bolan birnäçe meseleleriň ýüze çykmagy bilen ösüp başlady.

Suwuklykda ýa-da gazda hereket edýän jisime iki güýç täsir edýär. Olaryň deňtäsiredijisini R bilen belläliň (6.11-nji surat).



6.11-nji surat. Uçaryň ganatynyň göteriji güýjüniň döreyişi.

Olaryň biri R_x akymyň boýuna tarap ugrukdyrylan, oňa maňlaý garşylygy we akyma perpendikulýar ugrukdyrylan R_y güýje – ýokary göteriji güýji diýilýär. Uçaryň ganatynyň göteriji güýji şeýle güýçleriň barlygyna esaslanandyr.

Eger jisim simmetrik bolup, onuň simmetriýa oky tizligiň ugry bilen gabat gelýän bolsa, oňa diňe maňlaý garşylygy täsir edýär, ýokary göteriji güýji bolsa nola deňdir.

Suwuklyklarda we gazlarda gaty jisimler hereket edenlerinde sürtülme güýçleri döreýär. Olaryň yz tarapyndan köwlenmeler emele gelýär. Köwlenmeler uly tizliklerde has-da artyp başlaýar. Şonuň bilen bir hatarda sürtülme güýji-de çürt-kesik artýar.

Gämileri gurmakda mümkin boldugyça köwlenmeleri emele getirmezlik üçin, olara çowly formany bermek örän möhümdir. Maşynlar çykarylanda-da, olaryň gapdal garşylygyny azaldar ýaly, olaryň formalaryna aýratyn üns berýärler.

II MOLEKULÝAR FIZIKANYŇ ESASLARY WE TERMODINAMIKA

VII BAP. IDEAL GAZLARYŇ MOLEKULÝAR-KINETIK TEORIÝASYNYŇ ESASLARY

§7.1. Termodinamiki ululyklar

Örän köp sanly atomlary we molekulalary özünde birleşdirýän jisimler bilen bagly bolup, olarda bolup geçýän mikroskopiki prosesleri öwrenýän fizikanyň bir bölümine molekulýar fizika we termodinamika diýilýär. Bu prosesleri öwrenmek üçin hil taýdan biri-birinden tapawutlanýan we şol bir wagtyň özünde-de biri-biriniň üstüni ýetirýän statistik (molekulýar-kinetik) we termodinamik diýilýän iki sany usul ulanylýar. Birinji usul molekulýar fizikanyň esasyňy düzýän bolsa, ikinji usul - termodinamikanyň esasyňy düzýär.

Biziň daş-töweregimizi gurşap alan gaty, suwuk we gaz görnüşindäki ähli jisimleriň molekulalardan düzülendigini, olaryň hem mydama dyngysyz hereketdedigini ykrar edýän molekulýar-kinetik teoriýanyň nukdaý nazaryndan seredip, jisimleriň gurluşlaryny, häsiýetlerini öwrenýän fizikanyň bölümine molekulýar fizika diýilýär.

Mikroskopik jisimlerde molekulalaryň sanynyň ägirt köpdüğine görä ondaky her bir molekulanyň hereketini öwrenmek mümkin däl.

Emma olaryň hereketleri belli bir statistik kanunlara boýun egýärler. Molekulýar fizikada öwrenilýän şeýle prosesler ägirt köp sanly molekulalaryň täsirleriniň netijesinde döreýän proseslerdir.

Örän köp sanly atomlardan ýa-da molekulalardan ybarat bolup, ölçegleri boýunça atomlaryň ölçeglerinden köp esse uly bolan jisimlere fizikada makroskopik jisimler diýilýär (ballondaky gaz, stakandaky suw, Ýer şary we ş.m.)

Termodinamiki deňagramlylyk ýagdaýyndaky mikroskopiki sistemanyň umumy häsiýetleriniň we bu ýagdaýlarynyň aralygyndaky geçiş proseslerini öwrenýän fizikanyň bölümine termodinamika diýilýär. Termodinamika sistemanyň bir ýagdaýdan ikinji ýagdaýa geçen wagtynda bolup geçýän mikroproseslere seretmeýär. Şeýlelik bilen hem termodinamik usuly statistik (molekulýar-kinetik) usuldan tapawutlanýar.

Termodinamikanyň hemme mazmuny termodinamikanyň kanunlary diýilýän birnäçe tassyklamalardan ybaratdyr. Bu kanunlar tejribeler arkaly tassyklanar. Termodinamikanyň ulanylýan oblastlary molekulýar-kinetiki teoriýa seredeniňde gaty giňdir. Fizikanyň ýa-da himiýanyň, termodinamikanyň kanunlaryny ulanyp bolmajak oblasty ýokdur. Ikinji bir tarapdan termodinamik usul çäkli, ol jisimiň makroskopik gurluşy barada hiç zat aýtmaýar, olarda bolup geçýän hadysalaryň mehanizmleri barada-da şeýle, ol diňe jisimleriň mikroskopik häsiýetleriniň arasyndaky baglanyşygy kesgitleýär. Häzirki wagtda ylymda we tehnikada termodinamikany-da, molekulýar-kinetik teoriýany-da peýdalanýarlar. Öňki belleýşimiz ýaly, barlag usullarynyň dürlüligine garamazdan olar biri-biriniň üstüni ýetirýärler.

Termodinamika – mikroskopik sistemalar bilen iş salyşýar. Makroskopik sistemanyň ýagdaýy wagtyň berlen momentinde ony düzýän molekulalaryň ýagdaýy bilen kesgitlenilýär. Jisimiň ähli häsiýetleri kesgitlenende onuň ýagdaýynyň üýtgeýän wagtynda tejribe arkaly ölçäp bolýjak ululyklar ulanylýar. Jisimiň (gazyň) ýagdaýyny häsiýetlendirýän bu ululyklara gaz halynyň parametrleri diýilýär. Olara dykzlyk, basyş we temperatura degişlidir.

Jisimiň massasynyň onuň göwrümüne bolan gatnaşygyna san taýdan deň bolan ululyga dykzlyk diýilýär.

$$\rho = m / V$$

Eger-de gaz haýsy hem bolsa bir gapda ýerleşdirilip, onuň meýdanyna perpendikulýar täsir edýän F daşarky güýji bu meýdanda deň bölünen bolsa, onda gazyň basyşy:

$$p = F / S$$

deňdir.

Jisimiň (gazyň) temperaturasy – bu makroskopiki sistemanyň termodinamiki deňagramlylyk ýagdaýyny häsiýetlendirýän termodinamiki ululykdyr. Termodinamiki deňagramlylyk ýagdaýyndaky izolirlenen sistemanyň ähli ýerinde temperaturalar bir meňzeşdir. Temperaturalaryň tapawudy Δt – bu berlen jisimiň beýleki jisim bilen ýylylyk deňagramlylygyndan üýtgemesidir (iki jisimiň temperaturasy birmeňzeş bolsa olaryň arasynda ýylylyk çalşygy bolmaýar, jisimler ýylylyk deňagramlylygy halyna bolýarlar).

Temperaturany kesgitlemek üçin iki şkala – selsiý şkalasy we kelwin şkalasy giňden ulanylýar.

Selsiý şkalasynda 0 nokat hökmünde ereýän buzun temperaturasy 100° temperatura hökmünde, normal atmosfera basyşynda gaýnaýan suwun temperaturasy kabul edilendir. 0 we 100 nokatlaryň arasyndaky ähli şkalany graduslar diýilýän 100 deň bölekler bölýärler, her bölüm, 1° C degişlidir. Kelwin şkalasyndaky temperaturanyň ölçegi Selsiý şkalasyndaky temperaturanyň ölçegine deňdir (gradus), emma selsiýdäki 0 şkala temperaturanyň otirisatel çäklerine –273,15° C süýşürilendir. Şonuň üçin absolýut temperaturany tapmak üçin şu aňlatmadan peýdalanýarlar:

$$T = t + 273,15$$

Bu ýerde T – absolýut temperatura, ol IS sistemasynda kelwinlerde (K) ölçenilýär, t – selsiý şkalasyndaky temperatura. Mysal üçin, 27° C temperaturasy kelwin absolýut temperatura şkalasynda aňladanymyzda

$$T = 27 + 273 = 300 K \text{ bolar.}$$

§7.2. Ideal gaz barada düşünje. Izoprossesler

Eger gazyň häsiýetlerine seredeniňde aşakdaky şertler ýerine ýetse, onda şeýle gazlara ideal gazlar diýilýär:

1. Molekulalaryň hususy göwrümi hasaba alarlykdan gaty kiçi.
2. Molekulalaryň aralarynda özara täsir güýçleri ýok.
3. Molekulalaryň özara we gabyň diwarlary bilen bolan çaknyşmalary absolýut maýyşgak urgulardyr.

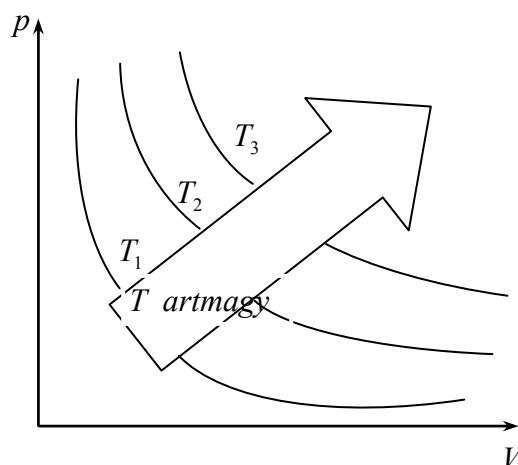
Geliý, wodorod ýaly gazlary ideal gaz hasaplamak bolar, sebäbi olaryň häsiýetleri berlen şertlerde ideal gaz kanunalaýyklyklarynyň şertlerine gabat gelýär. Molekulýar-kinetik teoriýasy açylmazdan öň tejribe üsti bilen ideal gazlaryň özlerini alyp baryşlaryna degişli birnäçe gaz kanunlary açyldy. Olar barada gysgaça durup geçeliň.

Termodinamiki sistema bir haldan beýleki bir hala geçende onuň parametrleri üýtgeýär. Haçan-da, berlen gazyň m massasy hemişelik bolup, onuň üç parametriniň (P , V ýa-da T) biriniň üýtgemeyän bahasynda bolup geçýän proseslere izoprosesler diýilýär. (*Izos* – grek sözi bolup – deň diýmekdir). Izoprosesler tebigatda giňden ýaýrapdyr we olar tehnikada köp ulanylýar.

Izotermik proses hemişelik temperaturada bolup geçýär we Boýl – Mariottyň kanunyna boýun egýär: Hemişelik temperaturada, berlen m massaly gaz üçin onuň p basyşynyň V göwrümüne köpeltmek hasyly hemişelik ululykdyr.

$$p \cdot V = \text{const} \quad (7.1)$$

Bu kanun inlis alymy Boýl (1662 ý.) we fransuz alymy Mariott (1676) tarapyndan eksperimental açylýar. Şoňa görä-de, oňa Boýluň-Mariottyň kanuny diýilýär. Bu kanunyň grafigi giperbolany şekillendirýär. (7.1-nji surat).



7.1-nji surat. Boýluň-Mariottyň kanuny.

T_1, T_2, T_3 – temperaturalara degişli bolan egri çyzyklara izotermalar diýilýär. Izobarik proses basyş hemişelik bolan ýagdaýynda ýüze çykýan prosesdir.

Ol ($p = \text{const}$) Geý – Lýussagyň kanuny arkaly aňladylýar: Hemişelik basyşda berlen gazyň massasynyň göwrümi temperatura görä çyzykly üýtgeýär:

$$V = V_0 (1 + \alpha t) \quad (7.2)$$

Bu ýerde V – gazyň $t^\circ \text{C}$ temperaturadaky göwrümi V_0 – onuň 0°C -däki göwrümi, α – ululyga göwrüme giňelmeginiň termik koeffisiýenti diýilýär. Ol hemme gazlar üçin bir meňzeşdir we $\frac{1}{273} \text{grad}^{-1}$ deňdir.

Izohorik proses hemişelik göwrümde bolup geçýär ($V = \text{const}$) we Şarlyň kanunyna boýun egýär: hemişelik göwrümde berlen gazyň massasynyň basyşy temperatura görä çyzykly üýtgeýär:

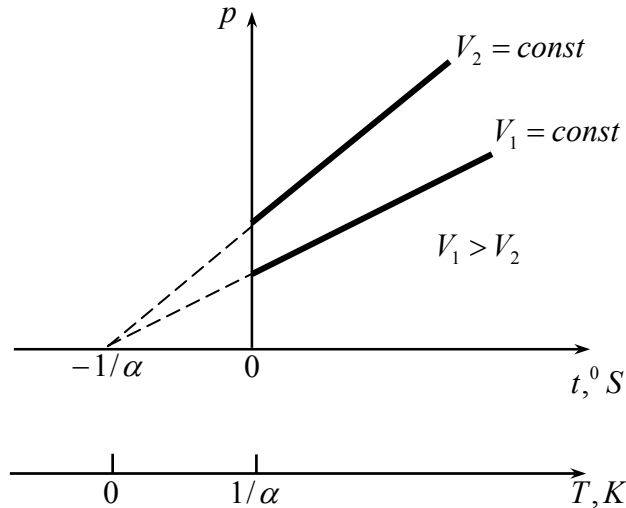
$$p = p_0 (1 + \gamma t) \quad (7.3)$$

Bu ýerde p w p_0 degişlilikde, gazyň $t^\circ \text{C}$ we 0°C temperaturadaky basyşy. γ – ululygy basyşyň termik koeffisiýenti diýilýär.

Ideal gaz üçin $\gamma = \alpha$

Bu kanunyň grafiki şekillendirilişi 7.2-nji suratda görkezilendir (izotermik proses üçin hem şuna meňzeş grafik bolýar. Diňe ordinata okundaky p -nyň deregine V bolýar).

Eger grafiki temperaturanyň otrisatel oblastyna ekstrapolirläp, (punktir çyzyk) ony absissa oky bilen kesişýänçä dowam etdirsek, ol absissa okuny $-1/\lambda$ -nokatda keser.



7.2-nji surat.
Şarlyň kanuny.

Onda $p=0$. Emma (6.3) formuladan görnüşi ýaly $p_0 \neq 0$, $(1 + \gamma t)$ köpeltmek hasyly nola deň, ýagny $(1 + \gamma t)=0$. Şu ýerden $t=-1/\gamma$ ýagny, eger $p=0$ bolsa $t=-273,15^\circ C$ bu bolsa absolýut nol temperaturasyna gabat gelýär. Dogrudan-da, absolýut nol temperatura golaýlanda, gaz gaty jisime öwrülýär, onuň üçin ideal gaz kanunlaryny ulanyp bolmaz.

Absolýut temperatura düşünjesini girizip ($T = t + 273,15$), (7.2) we (7.3) deňlemeleri başga görnüşde ýazmak bolar:

$$\frac{V}{V_0} = 1 + \frac{t}{273,15}, \quad \text{ýa-da} \quad \frac{V}{V_0} = 1 + \frac{273,15 + t}{273,15}$$

şu ýerden
$$\frac{V}{V_0} = \frac{T}{T_0}$$

bu ýerde $T_0=273,15 K$; T_0 we V_0 – ululyklaryň hemişelikdigini göz önünde tutup, izobarik poses üçin bu formulany şeýle görnüşde ýazýarys:

$$\frac{V}{T} = \text{const} \quad (7.4)$$

Şular ýaly, izohorik proses üçin-de:

$$\frac{p}{T} = \text{const} \quad (7.5)$$

diýip ýazmak bolar.

§7.3. Ideal gaz halynyň deňlenmesi

Seredip geçen gaz kanunlarymyzy jemläp, şeýle görnüşde ýazýarys:

$pV = \text{const}$ (izotermik proses, Boýl-Mariottyň kanuny)

$V/T = \text{const}$ (izobarik proses, Geý-Lýussagyň kanuny)

$p/T = \text{const}$ (izohorik proses, Şarlyň kanuny)

Bu kanunlary birleşdirip, umumy bir deňleme alyp bolýar. Ol deňlemä hem ideal gaz halynyň deňlemesi diýilýär. Onuň çykarylyşyna seredeliň.

Goý, normal şertlerde gazyň başlangyç ýagdaýy, şeýle parametrler bilen kesgittelensin – p_0 , V_0 we T_0 . Gazyň halyny şeýle yzygiderlilikde üýtgedeliň:

1. Onuň p_0 basyşyny hemişelik saklap, temperaturasyny T ululyga çenli artdyralyň, şunlukda gazyň göwrümi üýtgeýär we ol V_0 göwrümi tutar. (7.4) formula boýunça:

$$\frac{V_0}{T_0} = \frac{V'_0}{T}$$

şu ýerden

$$V'_0 = V_0 \frac{T}{T_0} \quad (7.6)$$

2. T temperaturany üýtgetmän, gazyň basyşyny p ululyga çenli üýtgedeliň. Şunlukda, gazyň göwrümi üýtgäp, V deň bolýar. Izotermiki prosesi aňladýan (7.1) formula laýyklykda ýazýarys:

$$p_0 V'_0 = pV$$

(7.6) aňlatmany ulanyp:

$$p_0 V_0 \frac{T}{T_0} = pV \quad \text{ýa-da} \quad \frac{pV}{T} = \frac{p_0 V_0}{T_0}$$

Eger P_0V_0/T_0 gatnaşygynyň hemişelik sandygyny göz önünde tutsak, onda:

$$pV/T = C \quad \text{ýa-da} \quad pV = CT \quad (7.7)$$

bu ýerdäki C – hemişelik ululyga gaz hemişeligi diýilýär.

(7.7) deňleme fransuz inženeri Klapéýron tarapyndan (1834 ý.) çykarylanlygy sebäpli, oňa Klapéýronyň deňlemesi diýilýär. Bu deňleme berlen massaly gazyň basyşynyň göwrümüne köpeltmek hasylynyň absolýut temperatura proporsionaldygyny görkezýär. (7.7) deňlemedäki C -niň san bahasy alnan gazyň mukdaryna we p , V hem T -niň ölçenýän birliklerine baglydyr.

Awogadro tarapyndan kesgitlenen kanun boýunça dürli gazlaryň grammolekulalary birdeň basyşlarda we temperaturalarda birdeň göwrümleri tutýarlar. $T_0=273,15K$ we $p_0=1,013 \cdot 10^5 Pa$ bolanda islendik gazyň grammolekulasy $V_0=22,41 \cdot 10^{-3} m^3/mol$ göwrümi tutýar. (meselem, O_2 kislorod üçin $M=0,032 kg/mol$ 32 kg/kmol).

Şoňa görä, (7.7) baglanyşyk gazyň islendik mukdaryna degişli edilmän, bir mola degişli edilip alynsa, onda hemişelik C -niň hemme gazlar üçin şol bir bahasy bardyr.

Hemme gazlar üçin umumy bolan bu hemişelik R harpy bilen belgilenip, oňa uniwersal gaz hemişeligi diýilýär. (7.7) formuladaky V göwrümiň deregine V_1 molýar göwrümi (ýagny gazyň bir molunyň göwrümini) girizip, alýarys:

$$pV_1 = RT \quad (7.8)$$

(7.7) deňlemäniň umumylaşdyrmasy bolan (7.8) deňlemäni D.I.Mendeleyew (1874 ý) takyklady. Şoňa görä-de, (7.8) formula Mendeleyewiň – Klapéýronyň deňlemesi diýilýär.

Gazyň diňe bir moly üçin dogry bolan (7.8) formulany islendik massa üçin umumylaşdyrmak aňsatdyr. Şonuň üçin gazyň molekulýar agyrlygyny μ bilen belgiläp, käbir berlen basyşda we temperaturada gazyň bir molunyň V_1 molýar göwrümi tutýandygyny göz önünde tutup, gazyň m gramynyň edil şol basyşda we temperaturada $V = \frac{m}{\mu} V_1$ göwrümi tutýandygyna göz ýetirmek kyn däl.

Bu ýerden, berlen basyşda we temperaturada gazyň m gramy üçin pV/T aňlatmanyň-da R gaz hemişeliginden m/μ esse uludygy gelip çykýar, emma gazyň hemme üýtgemelerinde pV/T aňlatmanyň hemişelik bolup galýandygyny üçin islendik m massany gaz üçin şeýle ýazyp bolýar:

$$\frac{pV}{T} = \frac{m}{\mu} R \quad \text{bu ýerden} \quad pV = \frac{m}{\mu} RT \quad (7.9)$$

(7.9) deňlemä gaz halynyň deňlemesi diýilýär we ol p , V we T ululyklary biri-biri bilen baglanyşdyrýar.

§7.4. Uniwersal gaz hemişeligiň fiziki manysy

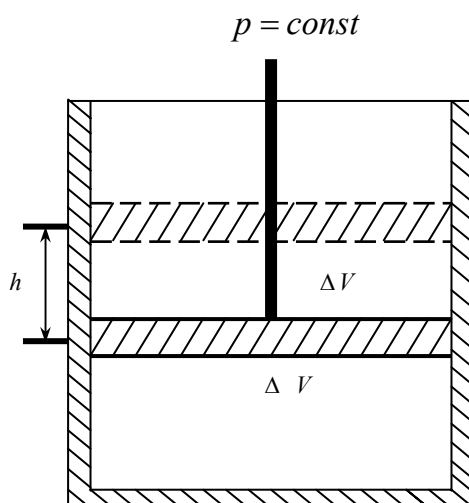
Kesgitlemä görä, uniwersal gaz hemişeligi şeýle tapylýar:

$$R = \frac{p_0 V_0}{T_0}$$

bu ýerdäki: p_0 , V_0 we T_0 – ululyklar normal şertlere degişli gaz halynyň parametrleridir. Belli bolşy ýaly (§3), $p_0 = 1,013 \cdot 10^5$ Pa, $V_0 = 22,41 \cdot 10^{-3}$ m³/mol, $T_0 = 273,15$ K tapýarys:

$$R = \frac{1,013 \cdot 10^5 \cdot 22,41 \cdot 10^{-3}}{273,15} \quad \frac{Nm^3}{m^2 molK} = 8,32 \frac{J}{molK}$$

Uniwersal gaz hemişeligiň fiziki manysyna seredeliň. Goý, silindrde porşeniň aşagynda 1 mol gaz ýerleşen bolsun, onuň göwrümi V deň (7.3-nji surat).



7.3-nji surat. Gazyň göwrümi üýtgände edilýän iş.

Porşeniň aşagyndaky gazyň basyşy daşarky atmosfera basyşyna deň

$$p = \text{const}$$

Goý, silindirdäki 1K gyzdyrylsyn. Ol giňelip, porşeni h beýiklige galdyrýar. Porşene edilýän basyş $p=F/S$ deň. Bu ýerde F porşene täsir edýän güýç, S onuň meýdany, bu ýerden:

$$F=pS$$

Şunlukda, gaz iş edýär, ýagny onuň ýerine ýetirýän işiniň ululygy

$$A = F \cdot h = pSh$$

$S \cdot h$ – köpeltmek hasyly göwrümiň artdyrmasydyr ($\Delta V = Sh$), gazyň giňelmekdäki ýerine ýetirýän işi

$$A = p \cdot \Delta V \quad (7.9 \text{ a})$$

Gyzdyrylmaga çenli bolan gaz halynyň deňlemesini şeýle ýazmak bolar:

$$pV = RT \quad (7.10)$$

Gyzdyralandan soňra gaz giňelip V_1 - göwrümi eýeleýär, onda

$$pV_1 = R(T + 1) \quad (7.11)$$

(7.11) formuladan (7.10) formulany aýyryp, tapýarys:

$$p(V_1 - V) = R \quad \text{ýa-da} \quad p \cdot \Delta V = R \quad (7.12)$$

Bu ýerde $V_1 - V = \Delta V$ göwrümiň üýtgemesi.

(7.9) we (7.12) formulalary deňeşdirip, ýazýarys:

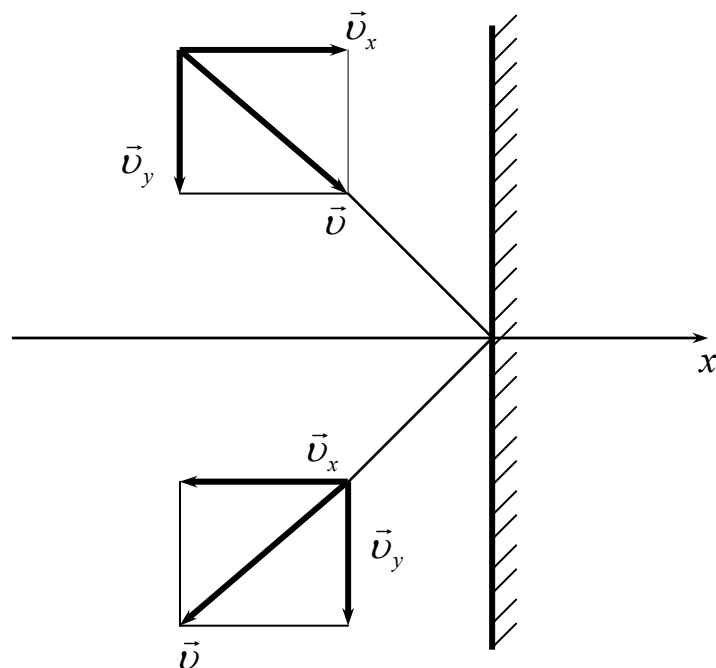
$$A = R \quad (7.13)$$

(7.13) formuladan görnüşi ýaly, uniwersal gaz hemişeligi 1 mol gazyň 1 K gyzdyrylyp, izobarik giňelenindäki ýerine ýetirýän işiniň ululygyna san taýdan deňdir.

§7.5. Gazlaryň molekulýar-kinetik teoriýasynyň esasy deňlemesi

Ideal gazyň ýerleşen gabynyň diwarlary bilen onuň içinde hereket edýän molekulalaryň özara täsir proseslerine seredeliň.

Gabyň diwaryna perpendikulýar bolan x okuny geçireliň (7.4-nji surat).



7.4-nji surat. Moekulanyň gabyň diwaryna maýyşgak urluşy.

m massaly ideal gazyň molekulasy gabyň diwaryna urulsyn. Urgy maýyşgak, molekulalaryň urga çenli we urgudan soňky tizlikleri bir-birine deň, emma olar ugurlary boýunça garşylykly. Şu ýagdaýda v tizlik wektoryny (7.4-nji surat) iki sany v_x we v_y düzüjä dargatmak bolar. Gabyň diwaryna parallel bolan v_y düzüji urgudan soňra-da öz ululygyny we ugruny üýtgetmeýär. Düzüji v_x urgudan soň öz ululygyny üýtgetmesede, ugruny üýtgedip $-v_x$ bolýar.

Nýutonyň üçünji kanuny boýunça molekula gabyň diwaryna näçe güýç bilen urlan bolsa, şonça güýç bilen-de diwar molekulany yzyna serpikdirýar. Şeýlelikde, molekula we gabyň diwary deň, emma garşylykly ugrukdyrylan güýç impulslaryny çalyşýarlar, onda

$$f \cdot \Delta t = m \cdot \Delta v$$

Tizligi düzüji v_y urgy wagtynda ululygynyň üýtgemeyänligi üçin, güýjüň impulsyny şeýle ýazýarys:

$$f \cdot \Delta t = m[v_x - (-v_x)] = 2mv_x$$

bu ýerde: f - urgy güýji, Δt - urgynyň dowamlylygy.

Indi, gapyrgasynyň uzynlygy ℓ bolan kub gaby göz önüne getireliň (7.4-nji surat). Gapda birmeňzeş gaz bar. Gazyň moleku-

lalarynyň köpçülikleýin tertipsiz hereket edýänligi sebäpli olaryň ähli tarapa hereket etmekliginiň ähtimallygy biri-birine deň. Eger kubda gazyň n – molekulasy bar diýsek wagtyň berlen momentinde $n/3$ molekula kubuň 1-nji gapyrgasyna parallel, $n/3$ – molekula 2-nji gapyrga parallel we $n/3$ molekula bolsa 3-nji gapyrgasyna parallel hereket eder.

Sag we çep gapyrgalaryň aralygyndaky molekulalaryň hereketine seredeliň.

Goý, molekulanyň tizligi v , massasy m bolsun. Maýyşgak urguda sag gapyrga urlan molekulanyň tizliginiň ugry üýtgäp, $-v$ bolar we molekula çep gapyrga tarap hereket eder. Şunuň netijesinde onuň hereketiniň mukdary $mv - m(-v) = 2mv$ ululyga üýtgär, ýagny

$$f \cdot \Delta t = 2mv$$

Şular ýaly impulsy (hereket mukdaryny) gabyň diwary hem alar. Çep gapyrgadan serpigip, molekula ýene-de sag gapyrga urlar. Molekulanyň kubuň gapyrgalaryna yzygiderli iki gezek urlan wagtynda geçen ýoly $2l$ bolar, wagty bolsa

$$\Delta t = \frac{2l}{v}$$

deň bolar. Soňky iki deňlikden Δt wagtda bir molekulanyň diwara täsir edýän ortaça güýjüni tapýarys:

$$f = \frac{2mv}{2l/v} = \frac{mv^2}{l} \quad (7.14)$$

Gazyň molekulalary $v_1, v_2, v_3, v_4, \dots, v_n$ – dürli tizlik bilen hereket edýärler. Gaz bir hilli (hemme ýerde molekulalar deň bölünen), şonuň üçin-de ähli molekulalaryň massalary deň:

$$m_1 = m_2 = m_3 = \dots = m$$

Sag we çep gapyrgalaryň arasynda ähli bar bolan molekulalaryň $n/3$ bölegi hereket edýär. Olaryň sag gapyrga bolan urgusynyň jemleýji güýji

$$F = \frac{1}{3} \left(\frac{mv_1^2}{l} + \frac{mv_2^2}{l} + \frac{mv_3^2}{l} + \dots + \frac{mv_n^2}{l} \right),$$

Hemişelik ululyk hökmünde m/l -i ýaýyň öňüne çykaryp we sag bölegini n köpeldip hem-de bölüp, alarys:

$$F = \frac{1}{3} \frac{m \cdot n (\nu_1^2 + \nu_2^2 + \nu_3^2 + \dots + \nu_n^2)}{n}$$

molekulalaryň orta kwadrat tizligini $\langle \nu_{kw}^2 \rangle$ arkaly belleýäris, onda

$$\frac{\nu_1^2 + \nu_2^2 + \nu_3^2 + \dots + \nu_n^2}{n} = \langle \nu_{kw}^2 \rangle$$

ululyk molekulalaryň tizlikleriniň kwadratlarynyň ortaça bahasydyr, ýa-da başga sözler bilen aýdanymyzda, ortaça kwadratik tizligiň kwadratydyr. Bu ýerden

$$F = \frac{1}{3} \cdot \frac{n}{l} m \langle \nu_{kw}^2 \rangle \quad (7.15)$$

Bu deňligiň sag we çep bölegini gapyrgalaryň meýdanyna $S = \ell^2$ bölüp, alarys:

$$\frac{F}{\ell^2} = \frac{1}{3} \cdot \frac{n}{\ell^3} m \langle \nu_{kw}^2 \rangle$$

Bu ýerde ℓ^2 – kubuň gapyrgalarynyň meýdany, F/ℓ^2 bolsa, diwara edilýän p basyş, ℓ^3 kubuň göwrümi, bu ýerden n/ℓ^3 ululygyň göwrüm birligindäki n_0 molekulalarynyň sanyny alarys: onda ýokardaky deňlik aşakdaky görnüşi alar

$$p = \frac{1}{3} n_0 m \langle \nu_{kw}^2 \rangle \quad (7.16)$$

Şeýlelik bilen, gazyň gabyň diwarlaryna edýän p basyşy göwrüm birligindäki n_0 molekulalaryň sany bilen, molekulalaryň m massasy bilen we olaryň $\langle \nu_{kw}^2 \rangle$ tizlikleriniň kwadratlarynyň ortaça bahasy bilen kesgitlenilýär.

(7.16) formulanyň sag bölegini 2-ä köpeldip we bölüp, oňa başga görnüş bermek bolar, onda:

$$p = \frac{2}{3} n_0 \left(\frac{m \langle \nu_{kw}^2 \rangle}{2} \right) \quad (7.17)$$

bu ýerde, köpeltmek hasyly $m \langle v_{kw}^2 \rangle / 2 = \langle W \rangle$ bir molekulanyň öňe bolan hereketiniň ortaça kinetik energiýasydyr, şoňa görä

$$p = \frac{2}{3} n_0 \langle W \rangle \quad (7.18)$$

ýagny, gazyň basyşy göwrüm birligindäki molekulalaryň öňe bolan hereketiniň ortaça kinetik energiýalarynyň $2/3$ ýaly kesgitlenilýär. (7.18) formula gazlaryň molekulýar-kinetik teoriýasynyň esasy deňlemesi diýilýär.

(7.18) formulanyň sag we çep bölegini gazyň bir molunyň V_1 göwrümüne köpeldeliň, onda:

$$pV_1 = \frac{2}{3} n_0 V_1 \langle W \rangle,$$

bu ýerde $n_0 V_1$ – V_1 molýar göwrümdäki, ýagny gazyň bir molundaky molekulalaryň sanydyr, bu san Awogadronyň sanyna deň:

$$n_0 V_1 = N_A \quad \text{bu ýerden}$$

$$p \cdot V_1 = \frac{2}{3} N_A \langle W \rangle$$

bir mol üçin gaz halynyň şeýle deňlemesi bar, ýagny

$$pV_1 = RT$$

$$\text{bu ýerden} \quad p \cdot V_1 = \frac{2}{3} N_A \langle W \rangle = RT \quad \text{ýa-da}$$

$$T = \frac{2}{3} \cdot \frac{N_A}{R} \langle W \rangle \quad (7.19)$$

Şu ýerden görnüşi ýaly, gazyň absolýut temperaturasy onuň molekulalarynyň öňe bolan hereketiniň orta kinetik energiýasyna proporsionaldyr.

(7.19) formuladan alýarys:

$$\langle W \rangle = \frac{3}{2} \frac{R}{N_A} \cdot T \quad (7.20)$$

Bu ýerdäki $R/N_A = k$ hemişelik ululyga Bolsmanyň hemişeligi diýilýär we ol uniwersal gaz hemişeliginiň Awogadro sanyna gatnaşygyna deňdir. Ýagny:

$$k = \frac{8,32 J / mol \cdot K}{6,023 \cdot 10^{23} mol^{-1}} = 1,38 \cdot 10^{-23} J / K$$

Bolsmanyň hemişeligi fizikanyň köp deňlemelerinde ulanylýan ululykdyr.

Bolsmanyň hemişeligini (7.20) formulada ýerine goýup, alarys:

$$\langle W \rangle = \frac{2}{3} kT \quad (7.21)$$

(7.21) formuladan görnüşi ýaly, molekulalaryň öňe bolan hereketiniň orta kinetik energiýasy diňe temperatura baglydyr, özüde absolýut temperatura göni proporsionaldyr. Şeýlelikde, temperaturanyň absolýut nol şkalasy şeýle fiziki mana eýe bolýar:

$$\text{Haçan } T=0 \text{ bolanda, } \frac{m \langle v_{kw}^2 \rangle}{2} = 0, \text{ ýagny } \langle v_{kw} \rangle = 0$$

Temperaturanyň absolýut nolynda molekulalaryň öňe bolan hereketi düýbünden togtýar ($v_{kw} = 0$). Emma bu temperaturada molekulalaryň we atomlaryň içindäki hereketleriň käbir görnüşleri saklanýar.

μ (7.21) formuladan molekulalaryň tizliginiň kwadratynyň ortaça bahasy üçin aşakdaky formulany alarys:

$$\langle v_{kw} \rangle = \sqrt{\langle v_{kw}^2 \rangle} = \sqrt{\frac{3kT}{m}} \quad (7.22)$$

ýa-da Bolsmanyň hemişeliginiň $k = R / N_A$ deňdigini göz önünde tutup, şeýle ýazýarys:

$$\langle v_{kw} \rangle = \sqrt{\frac{3RT}{mN_A}} \quad (7.23)$$

Emma, $m \cdot N_A = \mu$ – I moluň massasy, onda

$$\langle v_{kw} \rangle = \sqrt{\frac{3RT}{\mu}} \quad (7.24)$$

Şeýlelikde, gazyň temperaturasyny we molýar massasyny bilip, (7.21) formula esasynda molekulanyň herektiniň orta kwadrat tizligini tapmak bolar.

Molekulalaryň öňe bolan hereketiniň ortaça kinetik energiýasyny aňladýan (7.21) we molekulýar - kinetik teoriýasynyň esasy deňlemesindeki p basyşy aňladýan (7.18) formulalary birleşdirip, alýarys:

$$p = n_0 kT \quad (7.25)$$

Ýagny, gazyň basyşy göwrüm birligindäki molekulalaryň sanynyň onuň absolýut temperaturasyna köpeldilmegine göni proporsionaldyr.

§7.6. Molekulalaryň tizlikleri boýunça paýlanyşy. Makswelliň kanuny

Molekulalaryň sekunsaýyn ägirt köp sanly tertipsiz urgulara duçar bolýanlygy sebäpli, olaryň tizlikleri ululyklary boýunça-da, ugry boýunça-da dyngysyz üýtgäp durýar. Şonuň üçin, berlen belli bir wagtda şol bir berlen tizlik bilen hereket edýän molekulalaryň sanyny kesgitlep bolmaz. Emma tizlikleriň käbir kesgitli aralygynda, mysal üçin berlen v_1 we v_2 tizlikleriň arasynda bolan molekulalaryň sanyny kesgitlemek bolar.

Makswell ähtimallyk teoriýasynyň esasynda tizlikleri käbir berlen v tizlikden $v + dv$ tizlige çenli bolan tizlikler interwalyndaky Δn molekulalaryň sanyny hasaplapdyr, ol aşakdaka deňdir.

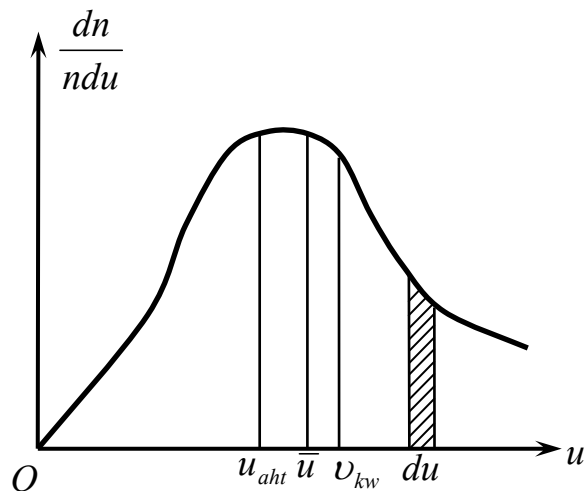
$$\Delta n = \frac{4}{\sqrt{\pi}} n e^{-v_0^2} v_0^2 dv_0 \quad (7.26)$$

bu ýerde: n – serdilýän gazyň molekulalarynyň doly sanydyr; e – natural logarifmiň esasy; $v_0 = v / v_{\text{äht}}$ otnositel tizlik, v – berlen wagtda momentindäki tizligi; $v_{\text{äht}}$ – iň ähtimal tizlik, ýagny köp molekulalaryň tizliklerine golaý bolan tizlik.

Eger koordinatlar sistemasyny gurup, onuň ordinata oky boýunça dn/ndv ululygyň bahasyny goýup, absissa oky boýunça molekulalaryň sanyna otnositel tizligiň bahasyny goýup 7.6-njy suratda görkezilen egri çyzygy almak bolar.

Tizlikleriň berlen v_0 $v + dv$ aralykda bolýan molekulalaryň dn/n otnositel sany egri çyzygyň ordinatasynyň du ululyga köpeltmek

hasylyna deňdir, ýagny, 7.6-njy suratdaky ştrihlenen sütünjigiň meýdany bilen şekillendiriler. Egri çyzygyň maksimumy iň v_{aht} tizlige degişlidir.



7.6-njy surat. Molekulalaryň tizlikler boýunça paýlanyşy.

Molekulalaryň tizlikleri boýunça bölünme kanunlaryndan iň ähtimal tizlik:

$$v_{aht} = \sqrt{\frac{2RT}{\mu}} \quad (7.27)$$

deňdir. Makswelliň molekulalaryň tizlikleri boýunça bölünişiniň egri çyzygy molekulalaryň orta arifmetiki tizliklerini tapmaklyga mümkinçilik berýär:

$$\langle v \rangle = \sqrt{\frac{8RT}{\mu}} \quad (7.28)$$

Şeýlelikde bilen, özümiziň garap geçen üç sany tizligimizi:

1) Iň ähtimal tizligi

$$v_{aht} = \sqrt{\frac{2RT}{\mu}} \approx 1,41 \sqrt{\frac{RT}{\mu}} \quad (7.27 \text{ a})$$

2) Orta arifmetik tizligi

$$\langle v \rangle = \sqrt{\frac{8RT}{\pi\mu}} \approx 1,60 \sqrt{\frac{RT}{\mu}} \quad (7.28 \text{ a})$$

3) Orta kwadratik tizligi

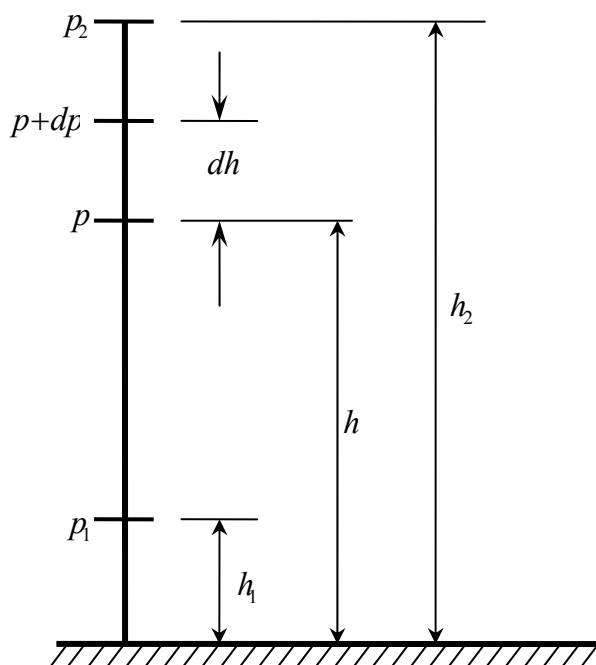
$$\langle v_{kb} \rangle = \sqrt{\frac{3RT}{\mu}} \approx 1.73 \sqrt{\frac{RT}{\mu}} \quad (7.29)$$

deňeşdirip, olaryň iň kiçisiniň iň ähtimal tizlikdigini, iň ulusynyň orta kwadrat tizlikdigini görýäris.

Temperaturanyň ýokarlanmagy bilen (6.27) formula laýyklykda iň ähtimal tizlik artýar. Netijede molekulalaryň tizlikleri boýunça bölünişini görkezýän egri çyzygyň maksimumy saga – tizlikleriň artýan tarapyna süýşýär.

§7.7. Barometrik formula

Molekulýar-kinetik teoriýanyň esasy deňlemesi çykarylanda we Makswelliň molekulalaryň tizlikleri boýunça bölünişine seredenimizde, gaz molekulalaryna olaryň bir-biri bilen urgylary bolaýmasa, daşardan hiç hili güýçler täsir etmeýär diýip çak edildi. Şonuň üçin molekulalar göwrüm boýunça ähli ýerde bir deň bölünendir. Emma, islendik gazyň molekulasyňa Ýeriň dartylma güýjüniň täsir etmegi netijesinde olar belli bir güýç bilen Ýere tarap dartylýarlar. Olaryň Ýere edýän basyşy beýiklige görä üýtgeýär.



7.7-nji surat. Howanyň basyşynyň beýiklige görä üýtgeýşi.

Basyşyň beýiklige baglylyk formulasyny çykarmak üçin gazyň molekulalarynyň massalary biri-birine deň, grawitasion meýdan birmeňzeş we temperaturany üýtgetmeýär diýeliň. Eger atmosfera basyşy h beýiklikde p deň bolsa, $h+dh$ beýiklikde $p+dp$ bolar ($dh>0$ bolanda basyşyň beýiklige görä azalýanlygy sebäpli, $dh<0$ bolar). p we $p+dp$ basyşlaryň tapawudy dh beýiklikli silindriň göwrümünde ýerleşen gazyň agramyna deň bolar (7.7-nji surat) ýagny:

$$p - (p + dp) = \rho g dh,$$

Bu ýerde ρ - h beýiklikdäki gazyň dykzlygy (dh şeýle bir kiçi aralyk bolandygy üçin bu aralykda gazyň dykzlygyny hemişelik diýip alyp bolar). Şeýlelikde:

$$dp = -\rho g dh \quad (7.30)$$

Ideal gaz halynyň deňlemesinden peýdalanyň $pV = \frac{m}{\mu} RT$ (m – gazyň massasy, μ -onuň molýar massasy) tapýarys:

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{p\mu}{RT}$$

Bu deňlemedäki ρ bahasyny (7.30) deňlemede ýerine goýup, alýarys:

$$dp = -\frac{\mu g}{RT} \cdot p dh$$

ýa-da :

$$\frac{dp}{p} = -\frac{\mu g}{RT} dh$$

Beýiklik h_1 -den h_2 -ä çenli üýtgäninde basyş p_1 -den p_2 -ä çenli üýtgeýär (7.7-nji surata seret), ýagny:

$$\int_{p_1}^{p_2} \frac{dp}{p} = -\frac{\mu g}{RT} \int_{h_1}^{h_2} dh, \quad \ln \frac{p_2}{p_1} = -\frac{\mu g}{RT} (h_2 - h_1)$$

ýa-da

$$p_2 = p_1 e^{-\mu g (h_2 - h_1) / RT} \quad (7.31)$$

Alnan (7.31) aňlatma barometrik formula diýilýär. Ol beýiklige görä atmosfera basyşyny tapmaklyga, ýa-da basyşy ölçäp, beýikligi tapmaklyga mümkinçilik berýär. Emma, beýiklik basyşy normal

atmosfera basyşyna deň bolan deňiz derejesine görä ölçenilýär. Şoňa görä (7.31) formulany şeýle görnüşde ýazmak bolar:

$$p = p_0 e^{-\mu gh / RT} \quad (7.32)$$

bu ýerde p - h beýiklikdäki basyşdyr. (Beýikligi ölçeyän enjamlaryň – altimetrleriň işleýişleri (7.32) formula esaslanandyr). Bu formula gazyň basyşynyň beýiklige görä eksponensial kemelýändigini görkezýär. Mundan başga-da, ol gazyň molekulýar agyrlygyna hem baglydyr. Gazyň molekulýar agyrlygy näçe uly bolsa, beýiklige görä onuň basyşy şonça-da çalt kemelýär.

§7.8. Bölejikleriň beýiklige görä paýlanyşy. Bolsmanyň kanuny

Geçen bölümdäki (7.32) formulany sähelçe üýtgedip, ýagny, gazlaryň molekulýar-kinetik teoriýasynyň esasy deňlemesine görä $p=nkT$ deňdigini hasaba almak bilen şeýle ýazmak bolar:

$$n = n_0 e^{-\mu gh / RT}$$

bu ýerde n we n_0 degişlilikde h beýiklikdäki we Ýeriň üstündäki molekulalaryň konsentrasiýasy (sany). Belli bolşy ýaly, molýar massa $\mu = m_0 N_A$ (N_A —Awogadro sany, m_0 —bir molekulanyň massasy), uniwersal gaz hemişeligi bolsa $R = k N_A$.

$$n = n_0 e^{-m_0 gh / kT}, \quad (7.32)$$

bu ýerde, $m_0 gh = E_n$ Ýeriň grawitasion (dartyş) meýdanyndaky molekulalaryň potensial energiýasy, ýagny:

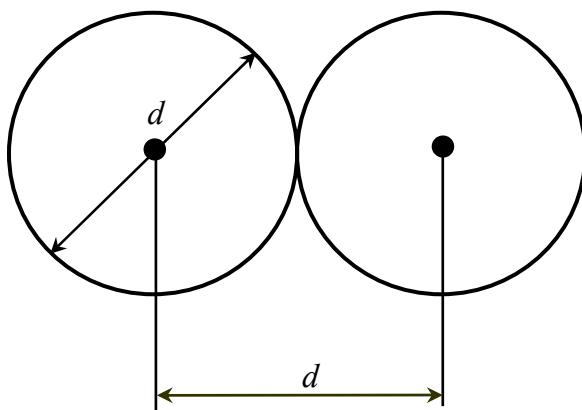
$$n = n_0 e^{-E_n / kT} \quad (7.33)$$

(7.33) formula daşky potensial meýdanyndaky molekulalaryň beýiklige görä paýlanşygyny görkezýär. Bolsman Makswelliň molekulalaryň tizlikleri boýunça bölünişik kanunyny molekulalaryň agyrlyk güýjüniň meýdanynda (umumy halda – islendik güýç meýdanynda) hereket edýän hallary üçin umumylaşdyrdy. Şonuň üçin (7.33) formula Bolsmanyň kanuny hem diýilýär.

§7.9. Çaknyşmalaryň sany we molekulalaryň erkin ýolunyň ortaça uzynlygy. Molekulalaryň effektiv diametri

Gazyň molekulalarynyň sanynyň aşa köpdügi we olaryň tertipsiz hereket edýändigini sebäpli, olar dyngysyz bir-biri bilen çaknyşýarlar. Iki sany çaknyşmanyň aralygynda molekulalar käbir ýoly geçýärler, şu ýola hem molekulalaryň erkin ýolunyň uzynlygy diýilýär. Emma, belleýşimiz ýaly, gaz molekulalarynyň köp we tertipsiz hereket edýänligi üçin iki sany çaknyşmanyň aralygynda olaryň geçen ýolunyň uzynlygy dürli-dürlüdür. Şoňa görä hem molekulalaryň erkin ýolunyň ortaça uzynlygy barada aýtmak bolar. Molekulalaryň erkin ýolunyň bu $\langle \ell \rangle$ ortaça uzynlygyny hasaplalyň.

Molekulalar bir-birleri bilen çaknyşanlarynda iki molekulanyň merkezleriniň bir-birine golaýlaşan iň kiçi (minimal) aralygyna molekulalaryň effektiv diametri diýilýär (7.8-nji surat) Ol çaknyşýan molekulalaryň tizligine (ýagny gazyň temperaturasyna) baglydyr.



7.8-nji surat. Molekulalaryň effektiv diametri.

Molekula 1s dowamynda ortaça orta arifmetiki tizlige ($\langle v \rangle$) deň bolan ýoly geçýän bolsa, $\langle z \rangle$ gazyň bir molekulasyň bir sekundaky ortaça çaknyşmalarynyň sany bolsa, onda erkin ýolunyň ortaça uzynlygy

$$\langle l \rangle = \langle v \rangle / \langle z \rangle$$

bolar. $\langle z \rangle$ ululygy tapmak üçin molekulany d diametrli şarjagaz diýip kabul edeliň. Ýene-de, ýönekeýlik üçin, molekula çaknyşmanka nirä hereket eden bolsa, çaknyşandan soň hem şol ugur bilen hereket edýär, hem-de serelilýän molekuladan beýleki molekulalaryň hemmesi hereketsiz diýip guman edeliň. Şonda molekula öz ýolunda merkezleri

onuň hereket edýän gönüçyzygyndan d -den uly bolmadyk aralykda durýan molekulalaryň ählisine degýär.

Bir sekundaky çaknyşmalaryň ortaça sany biziň göz önüne getirýän silindrimiziň içindäki molekulalaryň sanyna deňdir:

$$\langle z \rangle = nV$$

bu ýerde n – molekulalaryň konsentrasiýasy, $V = \pi d^2 \langle v \rangle$, $\langle v \rangle$ – molekulalaryň ortaça tizligi ýa-da olaryň 1 sekuntda geçen ýoly. Şeýlelikde, çaknyşmanyň ortaça sany:

$$\langle z \rangle = n\pi d^2 \langle v \rangle$$

Eger beýleki molekulalaryň hem hereketini hasaba alsak, şeýle formulanyň alynýandygyny hasaplamalar görkezýär:

$$\langle z \rangle = \sqrt{2}\pi d^2 n \langle v \rangle$$

molekulalaryň ölçegleri: $r = 10^{-8} \text{ sm}$, $n = 3 \cdot 10^{19}$ – gazyň normal şertdäki göwrüm birligindäki molekulalaryň sany, $\langle v \rangle \approx 5 \cdot 10^4 \text{ sm/s}$, onda $\langle z \rangle \approx 3 \cdot 10^9 \text{ s}^{-1}$ bolar. Diýmek, normal şertlerde molekulalar sekuntda birnäçe milliard gezek çaknyşýarlar.

Onda (7.34) formula görä:

$$\langle l \rangle = 1/(\sqrt{2}\pi d^2 n)$$

bolar. Ýagny, $\langle l \rangle$ molekulalaryň konsentrassiýasyna ters proporsionaldyr. Ikinji bir tarapdan ($p = nkT$) hemişelik temperaturada n basyşa (p) proporsionaldyr. Şeýlelikde

$$\frac{\langle l_1 \rangle}{\langle l_2 \rangle} = \frac{n_2}{n_1} = \frac{p_2}{p_1}$$

Molekulalaryň erkin ýolunyň l_1 ortaça uzynlygy hemişelik temperaturada gazyň p_1 basyşyna ters proporsionaldyr.

§7.10. Geçiş hadysalary

Gazlardaky molekulalaryň tertipsiz hereketi olaryň üznüksiz garyşmagyna eltýär, şol sebäpli, iki sany galtaşýan gaz bir-biriniň içine aralaşýar – diffundirlenýär. Gaz molekulalarynyň bir ýerden başga ýere

geçmegi gazlardaky içki sürtülme we ýylylyk geçirijilik hadysalaryna esaslanandyr. Molekulalaryň hereketi bilen düşündirilýän bu hadysalaryň hemmesine geçiş hadysalary diýilýär.

Şu ýerde bir zady anyklamak gerek. Haçan ýylylyk geçirijilik hadysalary bolanda - giňişleýin energiýanyň geçirilişi, diffuziýada-massanyň geçirilişi, içki sürtülmede bolsa - hereket mukdarynyň geçirilişi göz önünde tutulýar. Bu hadysalaryň hemesinde-de energiýanyň, massanyň we hereket mukdarynyň geçirilşinde, geçiş mydama olaryň gradiýentleriniň (belli ugur boýunça artmalarynyň) ters tarapyna ugrukdurylandyr, ýagny, ulgam özüniň termodinamik deňagramlylyk ýagdaýyna golaýlaşýar.

1. **Ýylylyk geçirijiligi.** Ilki bilen gazlarda ýylylyk geçirijiligine garap geçeliň. Makroskopiki nukdaý nazaryndan, ýylylyk geçirijilik hadysasy has gyzgyn gatladan has sowuk gatлага käbir q ýylylyk mukdarynyň geçirilmeginden ybaratdyr. Wagtyň geçmegi bilen molekulalaryň dyngysyz çaknyşmalarynyň netijesinde olaryň orta kinetik energiýalarynyň deňleşmek prosesi bolup geçýär, başga söz bilen aýdanymyzda, gatlaklaryň temperaturasy deňleşýär.

Energiýanyň ýylylyk görnüşinde geçiş prosesi Furýäniň ýylylyk geçiş kanunyna boýun egýär: wagt birliginde meýdan birliginden geçirilýän q ýylylyk mukdary, dT/dx – temperaturanyň gradiýentine göni proporsionaldyr.

$$q = -\lambda \frac{dT}{dx} \quad (7.35)$$

bu ýerde λ -gazyň düzümine we onuň häzirki bolýan şertine bagly bolan ululyk; bu ulylyga ýylylyk geçirijilik koeffisienti diýilýär. Minus alamaty q ýylylyk mukdarynyň T tempereturanyň kemelýän tarapyna geçýändigini aňladýar.

Wagt birliginde temperatura gradiýentiniň bire deň bolan wagtynda meýdan birliginden geçirilýän ýylylyk mukdaryna deň bolan ulylyga λ ýylylyk geçirijilik koeffisiýenti diýilýär.

Görnüşü ýaly, t wagtda S meýdançanyň üstünden geçýän Q ýylylyk mukdary, S meýdançanyň ululygyna, t wagta, temperaturanyň dT/dx gradiýentine proporsionaldyr:

$$Q = \lambda \frac{dT}{dx} St$$

Molekulýar-kinetik nukdaý nazaryndan Q ýylylyk mukdarynyň geçirilmegi molekulalaryň tertipsiz hereketiniň belli bir mukdardaky kinetik energiýasynyň S meýdançanyň üsti bilen geçirilmegini aňladýar.

Ýylylyk geçirijilik koeffisientini göwrüm hemişelik bolan wagtyndaky c_V gazyň udel ýylylyk sygymy (göwrüm hemişelik bolan wagtynda 1 kg gazy 1 K gyzdymak üçin gerek bolan ýylylyk mukdary) bilen we onuň dykzlygy bilen, molekulalaryň ýylylyk hereketiniň $\langle v \rangle$ orta arifmetiki tizligi bilen, hem-de olaryň erkin ýolunyň ortaça uzynlygy $\langle \ell \rangle$ bilen baglanyşdyrýan şu aşakdaky formulany alyp bolýandygyny hasaplamalar görkezýär:

$$\lambda = 1/3c_V\rho \langle v \rangle \langle \ell \rangle \quad (7.36)$$

2. *Diffuziýa*. Diffuziýa hadysasy iki sany bir-birine galtaşýan gazlaryň, suwukluklaryň hat-da gaty jisimleriň bölejikleriniň öz-özünden biri-birine geçip, garylmaklary bilen häsiýetlendirilýär. Diffuziýa hadysasynda garyşýan jisimler biri-biri bilen bölejikleriniň massalaryny çalyşýarlar. Şeýle çalyşmaklyk, garyşmaklyk olaryň dykzlyklary deňleşýänçä dowam edýär.

Molekulalar örän uly tizlik bilen hereket edýärler. Şoňa görä-de olaryň biri-biriniň içine aralaşmasy örän çalt bolup geçmelidir. Eger otagyň içinde haýsy-da bolsa bir ysly maddaly gap açylsa, onda ys otagyň hemme ýerinde derrew duýulmalydyr, çünki maddanyň molekulalaryna otagyň ölçegine deň bolan ýoly uçup geçmek üçin, diňe sekundyň onlarça ülüşlerine deň bolan wagt ýeterlikdir. Hakykatda bolsa atmosfera basyşynda gazlaryň diffuziýasynyň haýal bolup geçýändigini mälimdir: hususan-da, ysly haýal ýaýraýar. Bu derňemelerdäki ýalňyşlyk, atmosfera basyşynda molekulalaryň erkin ýolunyň uzynlygynyň gysgalygy sebäpli, molekulalaryň beýleki molekulalar bilen üznüksiz çaknyşýandygynyň we şunlukda, bir ýerde „itekleşip durýandygy“ hasaba alynmaýandygynyň ybaratdyr. Tizliginiň ululygyna garamazdan, molekula bir sekuntda özüniň duran ýerinden örän ujypsyz aralyga gidýär, onuň ýoly örän çylşyrymly we çolaşyk döwür çyzykdyr.

Maddanyň massanyň aralaşmagy Fikanyň kanunyna boýun egýär: wagt birliginde meýdan birliginiň üsti bilen geçirilýän maddanyň m massasy dykzlygynyň gardiýentine göni proporsionaldyr:

$$m = -D \frac{d\rho}{dx} \quad (7.37)$$

bu ýerde D –diffuziýa koeffisienti. Minus alamaty massanyň dykzlygynyň kemelýän tarapyna geýýändigini aňladýar.

Diffuziýa diýip, dykzlyk gradiýenti bire deň bolan wagtynda wag birliginde meýdan birliginiň üsti bilen geçirilen maddanyň massasyna deň bolan ululyga aýdylýar. Gazlaryň kinetik teoriýasynyň esasynda:

$$D = 1/3 \langle v \rangle \langle l \rangle \quad (7.38)$$

Görnüşi ýaly, D diffuziýa koeffisienti molekulalaryň hereketiniň $\langle v \rangle$ orta tizligi we erkin ýolunyň ortaça uzynlygy bilen baglanşykly ekeni.

Diffuziýanyň netijesinde t wagtyň dowamynda S meýdançadan geçirilen maddanyň M massasy S meýdanyň ulylygyna, t wagta we dykzlygynyň gradiýentine göni proporsionaldyr:

$$M = -D \frac{d\rho}{dx} St$$

3. *Içki sürtülme (Şepbeşiklik).* Gazlarda we suwukluklarda içki sürtülmäniň ýüze çykmasynyň esasy sebäbi, olara molekulýar-kinetik teoriýasy nukdaý nazaryndan garalanda molekulalaryň haotik hereket edýändikleri sebäpli, has çalt hereket edýän gatlakdan molekulalar has haýal hereket edýän gatlagga geçenlerinde özlери bilen $m v$ hereket mukdaryny getirýärler we şeýlelik bilen has haýal hereket edýän bu gatlagyň hereketini çaltlandyrýarlar. Tersine: has haýal hereket edýän gatlakdan, has çalt hereket edýän gatlagga molekulalar geçenlerinde ol gatlagy saklaýarlar. Şeýlelikde, dürli tizlikler bilen hereket edýän bu gatlaklaryň arasynda içki sürtülme ýüze çykýar. Içki sürtülme Nýutonyň kanunyna boýun egýär.

$$F = -\eta \frac{dv}{dx} \quad (7.39)$$

bu ýerde: F – üst gatlagynyň meýdan birligine täsir edýän sürtülme güýji, η -dinamiki şepbeşiklik dv/dx – tizligiň gradiýenti. Minus alamaty sürtülme güýjüniň tizligiň garşysyna ugrukdyrylandygyny görkezýär.

Dinamiki şepbeşiklik diýip tizligiň gradiýentiniň bire deň bolan wagtynda üst gatlagynyň meýdan birligine täsir edýän içki sürtülme güýjüne deň bolan ululyga aýdylýar. Dinamiki şepbeşiklik şu formula bilen kesgitlenýär:

$$\eta = 1/3 \rho \langle v \rangle \langle l \rangle \quad (7.40)$$

S meýdana täsir edýän F güýji şu meýdanyň ululygyna we $d\nu/dx$ tizlik gradiýentine proporsionaldyr:

$$F = -\eta \frac{d\nu}{dx} S$$

(7.40) formuladan görnüşi ýaly, gazlaryň molekulýar-kinetik teoriýasy, içki sürtülme koeffisientini-de (şepbeşikligi) gazyň molekulýar strukturasyny häsiýetlendirýän ululyklar bilen molekulalaryň erkin ýolunyň $\langle \ell \rangle$ ortaça uzynlygy, olaryň $\langle \nu \rangle$ orta tizligi we gazyň ρ dykzlygy bilen aňlatmaga mümkinçilik berýär.

Ikinji bir tarapdan (7.35), (7.37) we (7.39) formulalary deňeşdirip, gazlardaky geçiş hadysalarynyň kanunalaýyklykarynyň biri-birine meňzeşdigine göz ýetirýäris. Ýokardaky agzalyp geçilen – (7.35), (7.37) we (7.39) formulalar molekulýar-kinetik teoriýanyň döredilmezinden öň açylýar. Şonuň üçin Furýeniň, Fikanyň we Nýutonyň bu kanunlary makroskopik kanun bolup, λ , D we η koeffisientleriň molekulýar-kinetik manysyny açyp görkezmeýär. Bu koeffisiýentleriň getirilip çykarylşyny, olaryň uly bolandyklary sebäpli getirip oturmadyk. (7.36), (7.38) we (7.40) formulalar geçiş koeffisiýentleri we molekulalaryň ýylylyk häsiýetnamalaryny biri-birleri bilen baglanyşdyrýar. Şu formulalardan: λ ýylylyk geçirijilik, D diffuziýa we η içki sürtülme koeffisientleriniň arasynda şeýle ýönekeý baglylyk gelip çykýar:

$$\begin{cases} \eta = \rho D \\ \lambda / (\eta c_v) = 1 \end{cases}$$

Şu formulalary ulanyp, tejribe arkaly tapylýan bir ululygyň üsti bilen ikinjini tapmak bolýar.

VIII BAP. TERMODINAMIKANYŇ FIZIKI ESASLARY

§8.1. *Ulgamyň içki energiýasy*

Termodinamikanyň kanunlary termodinamikada ulanylýar. Termodinamiki ulgam (sistema) diýip, ýylylyk energiýasynyň başga görnüşlerine geçýän wagtyndaky we oňa ters bolan prosesler bilen bagly bolan makroskopik jisimleriň toplumyna düşünilýär.

Jisimleriň termodinamik sistemasyna köpsanly atomlaryň we modekulalaryň toplumu hökmünde seretmek bolar. Molekulýar-kinetik teoriýanyň nukdaý nazaryndan termodinamik sistemanyň energiýasy onuň bütewilikdäki hereketiniň kinetik energiýasyndan, daşky meýdan güýçleriniň bardygy bilen häsiýetlendirilýän potensial energiýasyndan we bu sistemanyň mikrobölejikleriniň (molekulalaryň, atomlaryň, elektronlaryň...) özara täsirleriniň we hereketleriniň içki energiýalaryndan ybaratdyr, ýagny:

$$W = W_K + W_p + U \quad (8.1)$$

bu ýerde: W_K -kinetenergiýa, W_p -potensial energiýa, U -içki energiýa.

Jisimiň içki energiýasy molekulalaryň haotik hereketleriniň (öňe bolan we aýlanma) kinetik energiýasyndan, molekulalaryň özara täsirleri bilen häsiýetlendirilýän potensial energiýasyndan, atomlaryň molekulalardaky yrgyldy hereketleriniň energiýasyndan hem-de atomlaryň we ionlaryň elektron gatlaklarynyň energiýasyndan elektrostatik we grawitasion meýdanlaryň energiýalaryndan toplanýar.

Sistemanyň içki energiýasy onuň ýagdaýy bilen kesgitlenýär. Sistemanyň halynyň üýtgeýşini p , V , T parametrler häsiýetlendirýär, şeýlelikde sistemanyň içki energiýasy hal parametrleriniň funksiýasydyr. Ýagny, $U=f(p,V,T)$ sistemanyň içki energiýasy bir bahaly funksiýadyr. Ýgny, sistemanyň her bir haly üçin içki energiýanyň belli bir kesgitli bahasy degişlidir.

Termodinamiki proseslerde sistemanyň halynyň üýtgeýän ýagdaýyndaky onuň içki energiýasynyň üýtgeýşine seredilýär.

Jisimler systemsynyň halynyň üýtgemegi sistemadaky jisimleriň birinden beýlekisine energiýanyň geçirilmesi bilen amala aşyrylýar.

Energiýanyň geçirilişi A mehaniki iş görnüşinde, ýa-da modekulalaryň ýylylyk hereketi bilen häsiýetlendirilýän Q ýylylyk mukdary görnüşinde berlip bilner.

Şeýlelikde iş we ýylylyk energiýany bermekligiň iki görnüşi hökmünde biri-biri bilen berk baglanşyklydyr.

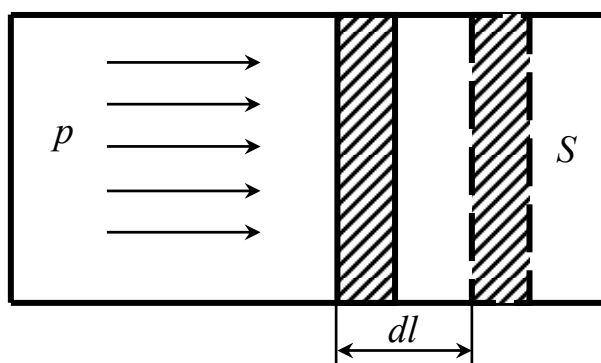
Ýylylyk işe geçip bilýär we tersine, iş - ýylylyga. (Mysal üçin, biz iki elimizi biri-birine sürtenimizde iş edýäris. Ol ýylylyk energiýasyna öwrülip, elmiz gyzyýar. Eger agzy dyky bilen ýapylan içi suwly probirkany gyzdysak, suw gaýnar we bugyň basyşy artyp, dykyny zyňar, ýylylyk işe geçýär we ş.m.)

Halkara birlikler sistemasynda iş we ýylylyk şol bir ululyklarda-Joullarda ölçenilýär.

Sistemadan daşgary ýylylygyň ölçeg birligine kaloriýa diýilýär. 1kal - 1g suwy 19,5°-dan 20,5° C çenli gyzdymak üçin gerek bolan ýylylyk mukdaryna deňdir.

§8.2. Göwrüm üýtgändäki gazyň işi

Belli bir takyk proseslere seretmek üçin öňi bilen gazyň göwrümi üýtgän wagtynda onuň ýerine ýetirýän işiniň umumy görnüşine seredeliň. Goý, gaz silindrik gapda porşeniň aşagynda ýerleşýär diýeliň. (8.1-nji surat).



8.1-nji surat. Gaz giňelende edilýän işiň kesgitlenişi.

Eger gaz giňelip, porşeni tükeniksiz kiçi bolan dl aralyga süýşürse, onuň üstünde iş edýär. Onuň ýerine ýetiren dA işiniň ululygy:

$$dA = Fdl = pSdl = pdV$$

bu ýerde S -porşeniň meýdany, $Sdl = dV$ -sistemanyň göwrüminiň üýtgemesi. Şeýlelikde

$$dA = pdV \quad (8.2)$$

Gazyň göwrüminiň V_1 -den V_2 -ä çenli üýtgän wagtyndaky onuň ýerine ýetirýän doly işini (8.2) deňlemäni integrirläp, tapýarys:

$$A = \int_{V_1}^{V_2} p dV = p(V_2 - V_1) \quad (8.3)$$

Integrirlemegiň netijesi basyş bilen göwrümiň arasyndaky baglylygyň häsiýetine görä kesgitlenilýär.

Iş üçin bu aňlatma (8.3) gaty, suwuk we gaz görnüşli jisimleriniň göwrümleriniň islendik üýtgemelerinde hem dogrudyr.

Indi, işiň alamatynyň nähili kesgitlenilýändigini barada durup geçeliň. Eger jisim (sistema) giňelýän bolsa, onuň göwrümi ulalýar, onda daşky iş položitel hasap edilýär, ýagny $A > 0$. Şu ýagdaýda gaz giňelip, daşky güýçleriň garşysyna iş edýär.

Sistema (jisim) gysylan ýagdaýynda ($dV < 0$), daşky iş otrisateldir ($A < 0$), bu halda daşky güýçler sistemanyň üstünde iş edýär.

Indi (8.3) formulanyň kömegi bilen dürli izoproseslerde gaz giňelenindäki onuň ýerine ýetirýän daşky işini hasaplalyň.

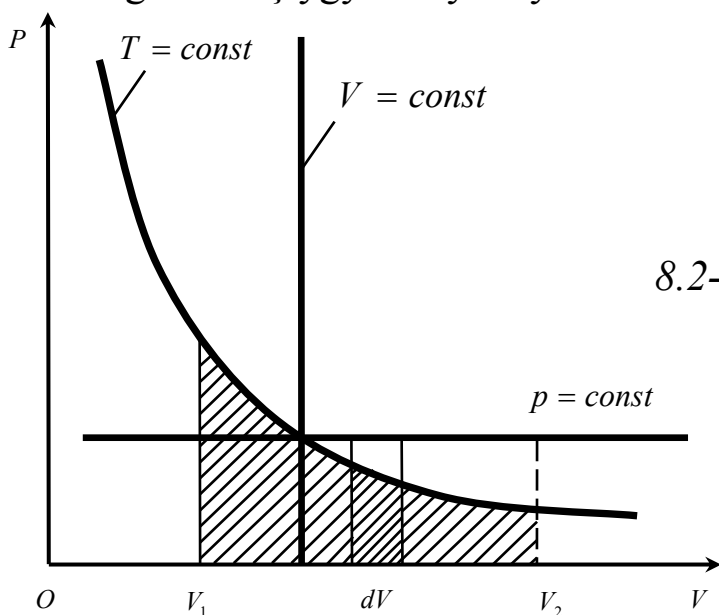
1. IZOHORIK PROSESDE (8.2-nji surat) $V = \text{const}$, şeýlelikde göwrümiň üýtgemesi $dV = 0$, şonuň üçin-de, (8.3) formuladan görnüşi ýaly, daşky iş nola deňdir.

2. IZOBARIK PROSESDE $p = \text{const}$ (8.2-nji surata seret). (8.3) formulanyň esasynda, alýarys.

$$A = p \int_{V_1}^{V_2} dV \quad \text{ýa-da}$$

$$A = p(V_2 - V_1)$$

Iş basyşy göwrümiň üýtgemesine köpeltmek arkaly tapylýar. Bu işiň ululygy 8.2-suratda esaslary $V_2 - V_1$ we beýikligi $p = \text{const}$ bilen çäklenen gönüburçlygyň meýdanyna deňdir.



8.2-nji surat. Dürli hadysalarda işiň kesgilenilişi.

3. IZOTERMİK PROSESDE $T=const$. Elementar iş 8.2-suratda esasy dV bolan zolajygyň meýdanyna deňdir. Ähli işiň ululygy (8.2-nji suratda) esaslary $V_2 - V_1$ ýokarsy $T=const$ izoterma bilen çäklenen figuranyň meýdanyna deňdir.

Ideal gaz halynyň deňlemesinden (7.9), taparys:

$$p = \frac{m}{\mu} RT \frac{1}{V}$$

Bu formuladaky p -niň bahasyny (8.3) deňlemä goýup, alarys

$$A = \int_{V_1}^{V_2} \frac{m}{\mu} RT \frac{dV}{V}$$

Gazyň m massasynyň we onuň μ molýar massanyň hem-de R we T parametrleriniň hemişelik ululykdyklaryny göz önünde tutup, ýazýarys:

$$A = \frac{m}{\mu} RT \int_{V_1}^{V_2} \frac{dV}{V} = \frac{m}{\mu} RT (\ln V_2 - \ln V_1)$$

ýa-da

$$A = \frac{m}{\mu} RT \ln \frac{V_2}{V_1} \quad (8.4)$$

Izotermik prosesiň deňlemesinden: $p_1 V_1 = p_2 V_2$ gelip çykýar. Ony ýokardaky deňlemede ornuna goýup, tapýarys:

$$A = \frac{m}{\mu} RT \ln \frac{p_1}{p_2} \quad (8.5)$$

§8.3. Ýylylyk sygymy

Termodinamikada jisimleriň ýylylyk häsiýetlerini anyklamak üçin ýylylyk sygymy diýen düşünje ulanylýar. Jisime berlen ýa-da ondan alnan Q ýylylyk mukdary şu formula bilen kesgitlenilýär:

$$dQ = mcdT$$

bu ýerde m – jisimiň massasy, c - udel ýylylyk sygymy, Δt - jisimiň temperaturasynyň üýtgemegi. Maddanyň udel ýylylyk sygymy diýip, 1kg maddany 1K gyzdyrmak üçin gerek bolan ýylylyk mukdaryna aýdylýar:

$$c = \frac{dQ}{mdT}$$

Udel ýylylyk sygymynyň ölçeg birligi - $J/kg \cdot K$

Molýar ýylylyk sygymy 1 mol maddany 1K gyzdyrmak üçin gerek bolan ýylylyk mukdaryna deň bolan ululykdyr.

$$C_m = \frac{dQ}{\nu dT} \quad (8.6)$$

bu ýerde $\nu = m/\mu$ - moluň sany. Molýar ýylylyk sygymynyň birligi - $J/(mol \cdot K)$.

c udel ýylylyk sygymy, C_m molýar ýylylyk sygymy bilen şeýle gatnaşyk arkaly baglanyşýar:

$$C_m = c\mu \quad (8.7)$$

bu ýerde μ – maddanyň molýar massasy.

Ondan başga-da, gazlar üçin iki sany ýylylyk sygymy – göwrüm hemişelik bolan wagtyndaky C_V (izohorik) we basyş hemişelik bolan wagtyndaky C_P (izobarik) udel ýylylyk sygymy ulanylýar.

§8.4. Termodinamikanyň birinji kanuny we onuň gazlardaky izoprosesler üçin ulanylyşy

Termodinamikanyň birinji kanuny (başlangyjy) energiýanyň saklanmak kanunyny aňladaýar, şoňa laýyklykda islendik izolirlenen sistemanyň energiýasy üýtgemän galýar.

Dogrudan-da, tebigatda energiýa hiç zatdan döremeýär we ýok bolmaýar: energiýanyň mukdary üýtgemeýär, ol diňe bir görnüşden başga bir görnüşe geçýär.

Energiýanyň saklanmak kanuny tebigatyň hemme hadysalarynda takyk ýerine ýetirilýär; bu kanunyň ýerine ýetmeýän hiç bir haly mälim däldir.

Bu kanun XIX asyryň ortalarynda nemes alymy, bilimi boýunça wraç R.Maýer (1814-1878) bilen inlis alymy D.Joul (1818-1889) tarapyndan açyldy hem-de nemes alymy G.Gelmigolsyň (1821-1894) işlerinde has doly takyklanyldy. Termodinamikanyň birinji kanuny bolsa ýylylyk hadysalaryna ýaýran energiýanyň saklanmak we öwrülme kanunydyr.

Umumy görnüşde, sitemсныň üstünde ýerine ýetirilen kiçi ΔA iş we sistema berlen ΔQ ýylylyk mukdary jemlenende, sistemanyň energiýasynyň üýtgemesine deňdigini energiýanyň saklanmak kanuny tassyklaýar:

$$\Delta U = \Delta A + \Delta Q \quad (8.8)$$

Termodinamikada adaty mehaniki energiýa seredilmeýär. Şonuň üçin-de, sistemanyň energiýasynyň üýtgemesi diýilende onuň içki energiýasynyň ΔU üýtgemesine düşünilýär.

Daşarky güýçleriň üstünde ýerine ýetirýän ΔA işi sistemanyň daşarky güýçleriň garşysyna ýerine ýetirýän $\Delta A'$ işine ululygy boýunça deňdir, emma alamaty boýunça garşylyklydyr ($\Delta A = -\Delta A'$). Soňky aýdanymyzy hasaba almak bilen, (8.8) deňlemäni şeýle ýazmak bolar:

Yagny: $\Delta A = -\Delta A' = -p\Delta V$

$$\Delta Q = \Delta U + \Delta A' \quad (8.9)$$

Bu ýerden termodinamikanyň birinji kanunynyň şeýle kesgitlemesi ýüze çykýar: sistema bir haldan başga hala geçende oňa beriyän ýylylyk mukdary, onuň içki energiýasynyň üýtgemegine we daşky güýçleriň garşysyna iş etmegine harç edilýär.

(8.9) deňlemäni differensial görnüşde ýazýarys:

$$dQ = dU + dA \quad (8.10)$$

bu ýerde: dU sistemanyň içki energiýasynyň tükeniksiz kiçi üýtgemesi, dA -tükeniksiz kiçi iş; dQ –tükeniksiz az bolan ýylylyk mukdary.

(8.10) aňlatmadan görnüşi ýaly, ýylylyk mukdary hem işiň we energiýanyň ölçeg birlikleri bilen, ýagny joullarda ölçenilýär.

Eger sistema periodiki başlangyç ýagdaýyna gaýdyp gelýän bolsa, onda onuň içki energiýasynyň üýtgemesi $\Delta U = 0$. Diýmek, termodinamikanyň birinji kanuny esasynda

$$dA = dQ$$

Ýagny, energiýanyň hiç bir görnüşini harçlamazdan we daşyndan ýylylyk almazdan, iş edip bilýän heretlendirijini (maşyny) gurup bolmaz. Başga söz bilen aýdanymyzda, birinji hilli ömürlük dwigateli (perpetuum mobileni) gurmak mümkin däl.

Termodinamikanyň birinji kanunynyň dürli izoproseslere ulanylyşy barada durup geçeliň.

1. IZOHORIK PROSES. Izohorikiki prosesde gazyň ýerine ýetirýän işiniň ululygy

$$dA = pdV = 0$$

Ýagny, gaz mehaniki işi ýerine ýetirmeýär. Termodinamikanyň birinji kanunyndan:

$$dQ = dU \quad (8.11)$$

Şu formuladan görnüşi ýaly, izohorik prosesde sistema berilýän ähli ýylylyk mukdary gazyň içki energiýasyny artdyrmaga harç edilýär. Göwrüm hemişelik bolanyndaky udel ýylylyk sygymy

$$c_v = \frac{1}{m} \frac{dQ}{dT}, \text{ ýa-da } C_v = \frac{1}{m} \frac{dU}{dT}$$

Bu ýerden

$$dU = mC_v dT \quad (8.12)$$

Ýagny, ideal gazyň içki energiýasynyň üýtgemesi, onuň temperaturasynyň üýtgemesine proporsionaldyr.

2. IZOBARIK PROSESDE ($p=const$) iş $dA = pdV \neq 0$ we 1 mol gaz üçin ($m=\mu$) termodinamikanyň birinji başlangyjynyň deňlemesi şeýle bolýar:

$$dQ = C_v dT + pdV \quad (8.13)$$

bu ýerde C_v – izohorik molýar ýylylyk sygymy.

Şeýlelikde, izobarik prosesde gaza berilýän ýylylyk, onuň içki energiýasyny artdyrmak üçin we daşky işi ýerine ýetirmek üçin harç edilýär.

Izobarik molýar ýylylyk sygymy

$$C_p = \frac{dQ}{dT} \text{ deňdir, bu ýerden } dQ = C_p dT$$

Soňky aňlatmany (8.13) deňlemede ýerine goýup alýarys:

$$C_p dT = C_v dT + pdV \quad (8.14)$$

gaz halynyň deňlemesine görä, 1 mol gaz üçin şeýle ýazýarys ($p=const$; $R=const$)

$$pdV = RdT$$

Onda (8.14) deňleme şeýle görnüşi alýar:

$$C_p dT = C_v dT + RdT$$

şu ýerde

$$C_p - C_v = R \quad (8.15)$$

deňlemäni alýarys. Bu aňlatma Maýeriň deňlemesi diýilýär. Ol molýar izobarik udel ýylylyk sygymynyň molýar izohorik udel ýylylyk sygymyndan uniwersal gaz hemişeliginiň ululygyça uludygyny görkezýär.

3. IZOTERMIK PROSESDE ($T=const$) $dT=0$ we içki energiýanyň üýtgemesi

$$dU = mC_v dT = 0$$

bolýar. Ýagny, gazyň içki energiýasy üýtgemeyär ($U=const$). Termodinamikanyň birinji kanunynyň esasynda, gaza berlen dQ ýylylyk mukdary doly daşarky işe sarp edilýär.

$$dQ = dA \quad \text{ýa-da} \quad dQ = pdV \quad (8.16)$$

Gazyň giňelmegi ($dV > 0$) sistemanyň daşky položitel işine degişli. hemişelik temperaturada (we içki energiýada) daşky iş gaza berilýän ýylylygyň hasabyna amala aşyrylýar.

Gaz gysylanda ($dV < 0$) gazyň ýerine ýetirýän işi otrisateldir, ýagny gysylmaklyk daşarky güýçleriň sistemanyň üstünde ýerine ýetirýän položitel işiniň netijesinde bolýar.

§8.5. *Adiabatik proses*

Adibartik proses diýip, gazyň halynyň şeýle üýtgemesine aýdylýar, ýagny ol daşary hiç hili ýylylyk berenogam, adanogam. Şeýlelikde, adiabatik proses gazyň ony gurşap alan sredasy bilen ýylylyk çalyşygynyň ýoklugyny häsiýetlendirýär. Hakykatda adiabatiki prosesi doly almak kyn. Emma käbir gaty çalt bolup geçýän prosesleri

adiabartiki prosesin hataryna goşmak bolar. Proses şeýle bir çalt bolup geçýär welin, şol wagtyň dowamynda gaz daşarky gurşaw bilen ýylylyk çalyşygyny geçirmäge ýetişmeýär. Mysal üçin, içinden ýandyrylýan hereketlendirijileriň we dizel hereketlendirijileriniň işleýşleri adiabatik prosese esaslanandyr.

Adiabatik prosesde ýylylyk berijiligi bolmaýar:

$$dQ = 0$$

we termodinamikanyň birinji kanunyny şu proses üçin şeýle ýazmak bolar:

$$dU + dA = 0$$

şu ýerde $dA = -dU$ ýa-da $PdV = -mC_V dT$ (8.17)

ýagny, gazyň ýerine ýetirýän işi diňe onuň içki energiýasynyň hasabyna bolup biler. (Iş edilende onuň energiýasy azalýar).

Gazyň adiabatik giňelmegi ($dV > 0$) daşky položitel iş bilen baglylykda geçýär, emma bu halatda içki energiýa azalýar. ($dT < 0$) we gaz sowalýar.

Adiabatik giňeleninde gazyň sowamaklyk häsiýeti tehnikada pes temperaturalary almakda giňden ulanylýar. Ammarlarda, söwda nokatlarynda ulanylýan sowadyjy gurluşlaryň (holodinlekleriň) işleýiş prinsipleri-de bugyň ýa-da gazyň adiabatik giňelmegine esaslanandyr.

Gazyň adiabatik gysylmagy ($dV < 0$) daşky otrisatel işe degişli bolýar we ol gazyň temperaturasynyň ýokarlanmagyna getirýär. ($dT > 0$) sebäbi, onuň içki energiýasy artýar. Adiabatik gysylan wagtynda gazlaryň temperaturasynyň artmagy dizel hereketlendirijilerinde giňden ulanylýar. Ýagny, olaryň silindrlerdäki howa porşeniň kömegi bilen adiabatik gysylanynda onuň temperaturasy 500^0 C-den-de ýokary geçýär. Şol wagtda silindre tozanlandyrylan (pürkölýän) ýangyç gaty gyzan howa bilen duşuşanynda şolbada ýanýar.

Goý, 1 mol gaz alnan bolsun, ýagny $m = \mu$. Onda (8.17) deňleme şeýle görnüşi alýar:

$$pdV = -C_V dT, \quad (8.18)$$

bu ýerde $C_V = \mu c_V$ şu deňlemäni gaz halynyň deňlemesine ($pV = RT$) bölüp, alarys:

$$\frac{dV}{V} = -\frac{C_V}{R} \frac{dT}{T},$$

bu ýerden

$$\frac{R}{C_V} \frac{dV}{V} + \frac{dT}{T} = 0 \quad (8.19)$$

Maýeriň deňlemesi esasynda: $R = C_p - C_V$

$$\frac{R}{C_V} = \frac{C_p - C_V}{C_V} = \frac{C_p}{C_V} - 1$$

ýylylyk sygymynyň gatnaşygyny

$$\frac{C_p}{C_V} = \gamma$$

bilen belgilesek, onda (8.19) aňlatmany şeýle görnüşde ýazmak bolar:

$$(\gamma - 1) \frac{dV}{V} + \frac{dT}{T} = 0$$

Bu aňlatmany integrirläp, alarys:

$$(\gamma - 1) \ln V + \ln T = C$$

bu ýerde C – hemişelik san. Deňlemäni üýtgedip we potencirläp (logarifmden boşadyp), alarys:

$$\ln V^{\gamma-1} + \ln T = C$$

$$TV^{\gamma-1} = \text{const} \quad (8.20)$$

Gaz halynyň deňlemesini ulanyp:

$$pV / T = R$$

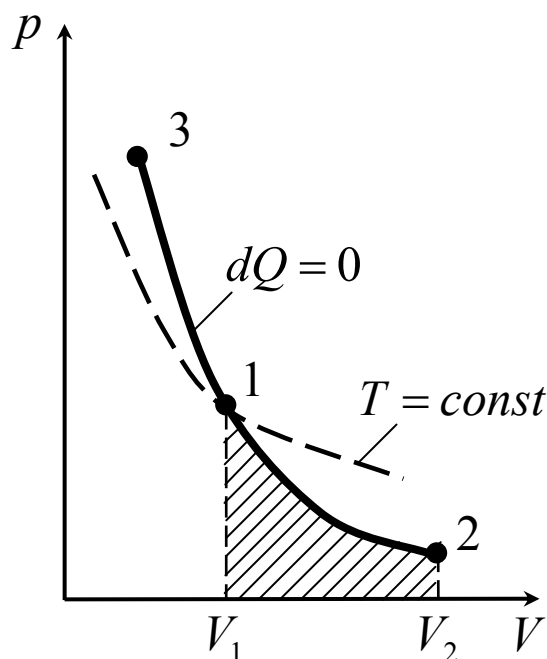
we ony (8.20) aňlatma köpeldip, alarys:

$$pV^{\gamma} = \text{const} \quad (8.21)$$

Adibatik prosesiniň deňlemesi bolan bu deňlemä Puassonyň deňlemesi diýilýär. Bu deňleme $pV = \text{const}$ izotermiki prosesiniň deňlemesine golaýdyr. (8.21) deňlemedäki göwrümiň görkezijisi $\gamma > 1$ sebäbi

$$C_p > C_v$$

Adiabatik prosesin diagrammasy (adiabata) (8.3-nji surat) p , V koordinatlarynda giperboda bilen şekillendirilýär. Surat-dan görnüşi ýaly, adiabat ($pV^\gamma = \text{const}$) izoterma ($pV = \text{const}$) seredeninde has dikiräk gidýär. Sebäbi adiabatik gysyla-nynda 1-3 gazyň basyşynyň köpeltmegi, izotermik gysyşdaky ýaly diňe bir onuň göwrüminiň kiçelmegi bilen çäklenmän, eýsem temperaturanyň hem ýokarlanmagy bilen düşündirilýär.



8.3 – nji surat

Adiabatik proses.

Praktiki durmuşda doly adiabatik ýa-da doly izotermik prosesi almak kyn. Sebäbi, iş ýüzünde doly termiki izolýasiýany amala aşyrmaklygyň bolmaýşy ýaly, ideal ýylylyk çalşygyny-da amala aşyryp bolmaýar. Hakyky hadysalar izotermik we adiabatik prosesleriň arsyndaky aralyk häsiýetde bolýarlar, olara politropik prosesler diýilýär. Olar üçin-de adiabatik prosesler üçin bolan formulalar ýaramlydyr, diňe γ ululyk C_p/C_v bien biriň arlygyndaky baha eýedir.

Indi adiabatik prosesde gazyň ýerine ýetirýän işini kesgittläň. (8.18) formulany gazyň islendik moly üçin şeýle görnüşde ýazalyň:

$$dA = -\frac{m}{\mu} C_v dT$$

Gaz V_1 göwrümden V_2 çenli adiabatik giňelende onuň temperaturasy T_1 -den T_2 -ä çenli peselýär we ideal gazyň giňelenindäki işi

$$A = \frac{m}{\mu} C_v \int_{T_1}^{T_2} dT = \frac{m}{\mu} C_v (T_1 - T_2) \quad (8.22)$$

Gaz halynyň deňlemesini we Puassonyň deňlemesini ulanyp, adiabatik prosesdäki işi üýtgedip şu görnüşe getirýäris:

$$A = -\frac{p_1 V_1}{\gamma - 1} \left[1 - \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^{\gamma - 1} \right] = \frac{RT_1}{\gamma - 1} \frac{m}{\mu} \left[1 - \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^{\gamma - 1} \right],$$

Bu ýerde

$$p_1 V_1 = \frac{m}{M} RT_1$$

Adiabatik giňelende gazyň ýerine ýetirýän işi (8.3-nji suratdaky ştrihlenen meýdan bilen kesgitlenýär, çyzgyda 2-nji egri) izotermik giňelendäkisinden (çyzgyda 1-nji egri) kiçi. Bu bolsa adiabatik giňelende gazyň sowaýandygy, izotermik giňelende bolsa oňa daşyndan berilýän ýylylyk mukdarynyň hasabyna onuň temperaturasynyň hemişelik saklanýandygy bilen düşündirilýär.

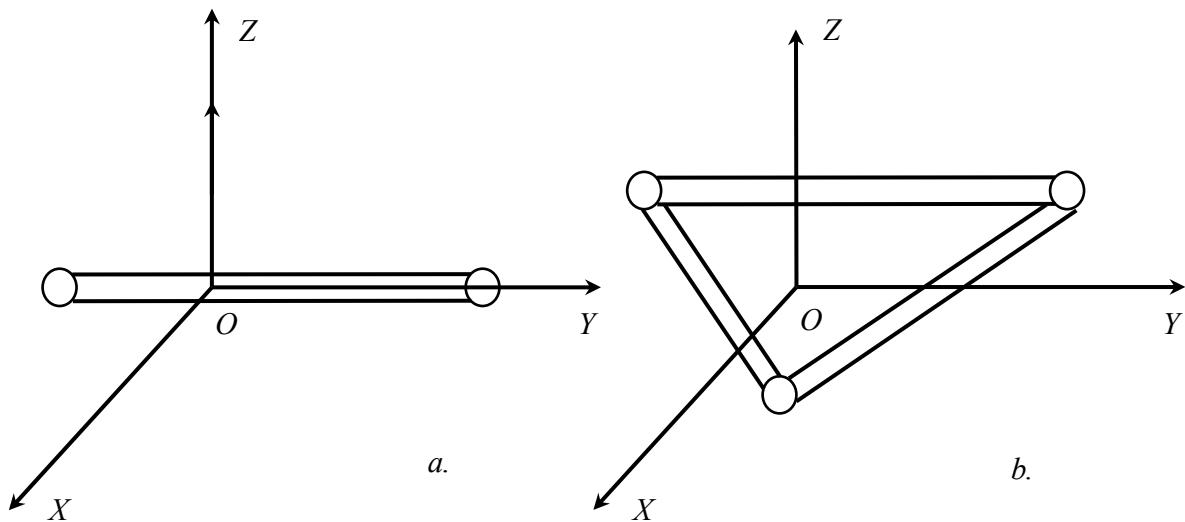
§8.6. Molekulalaryň erkinlik derejesi

Gaz molekulalaryna şol bir wagtyň özünde öňe, aýlanma we yrgyldy hereketine gatnaşýan material nokatlaryň (atomlaryň) sistemasy hökmünde seretmek bolar. Jisimiň hereketi öwrenilende, saýlap alnan koordinatlar sistemasyna görä onuň ýagdaýyny bilmek gerek bolýar. Şonuň üçin hem jisimiň erkinlik derejesi diýen düşünje girizilýär. Jisimiň giňişlikdäki ýagdaýyny doly kesgitleýän biri-birine bagly bolmadyk koordinatlaryň sanyna jisimiň erkinlik derejesi diýilýär.

Eger material nokat gönüçyzyk boýunça hereket edýän bolsa, onuň wagtyň islendik pursatyndaky ýagdaýyny kesgitlemek üçin bir OX koordinatany bilmek ýeterlikdir. Şu ýagdaýda jisimiň erkinlik derejesi bire deňdir. Eger jisim tekizlikde hereket edýän bolsa, onuň ýagdaýy OX, OY iki koordinata bilen häsiýetlendirilýär, onuň erkinlik derejesi ikä deňdir. Eger-de giňişlikde hereket edende, onuň ýagdaýy OX, OY, OZ—üç koordinata bilen häsiýetlendirilýär we onuň erkinlik derejesi üçe deňdir.

Molekulalaryň erkinlik derejesini i harpy bilen belläliň. Bir atomdan ybarat bolan molekulany material nokat hökmünde kabul edip bolar. (Mysal üçin, argon, geliý). Şeýle molekulalaryň erkinlik derejesi üçe deňdir. Molekula biri-biri bilen berk baglanşykda bolan iki atomdan

ybarat bolsa (8.4-nji surat) (wodorod, azot,) onda onuň erkinlik derejesi $i=5$ bolar (8.4-nji surat). Bu ýagdaýda ikeatomly molekula diňe bir OX, OY, OZ oklaryň ugry boýuna hereket etmän, şol bir bada olaryň daşynda hem aýlanýar. Emma onuň OY okunyň daşynda aýlanan wagtyndaky inersiýa momenti beýlekiler bilen deňeş-direniňde örän kiçi. Şonuň üçin ony hasaba almaýarlar. Şeýlelikde, ikeatomly molekulalaryň erkinlik derejesi 5-e (üçüsi öňe bolan hereketiniň, ikisi aýlanma hereketiniň netijesinde) deňdir.



8.4-nji surat. Iki- we üçatomly molekulalaryň erkinlik derejesiniň kesgitlenişi.

Berk baglansykda bolan üç we ondan-da köpatomly molekulalar, eger-de olar bir gönüniň üstünde ýatmaýan bolsalar, islendik özara perpendikulýar bolan üç oklaryň golaýynda aýlanyp bilerler. Şu halatda şeýle molekulalaryň erkinlik derejesi 6-a deňdir (8.4-nji b surat).

Eger molekulalary düzyän atomlar bir-birleri bilen gaty baglansykda bolman, aralyklary üýtgäp durýan bolsa onda molekulalaryň erkinlik derejeleri altydan köp bolup biler.

§8.7. Energiýanyň erkinlik derejesi boýunça bölünişi

Umumy görnüşde sistemanyň içki energiýasy molekulalaryň öňe bolan we aýlanma we yrgyldy hereketiniň kinetik we potensial energiýalaryndan ybaratdyr. Sistemanyň molekulalarynyň tertipsiz hereketleri wagtynda hereketiň ähli görnüşleriniň ähtimallyklary biri-birine deň we olaryň içki energiýalary olarda bar bolan erkinlik derejeleriniň sanyna deň bölünen, ýagny molekulalaryň her bir erkinlik derejesine ortaça deň energiýa degişlidir.

Molekulalaryň energiýanyň erkinlik derejeleri boýunça bölünişi baradaky teoretiki fizikada seredilýär. Ideal gazyň içki energiýasy onuň hereket edýän molekulalarynyň kinetik energiýalary bilen kesgitlenilýär.

Belli bolşy ýaly, biratomly molekulanyň orta kinetik energiýasy şeýle kesgitlenilýär:

$$\langle W \rangle = \frac{3}{2}KT$$

Şeýle molekulanyň erkinlik derejesi üçe deň. Eger orta kinetik energiýa erkinlik derejeleri boýunça deň bölünen bolsa, onda molekulanyň bir erkinlik derejesine düşýän energiýasy

$$\langle W \rangle = \frac{3}{2}KT / 3 = \frac{1}{2}KT$$

Eger gazyň molekulalarynyň erkinlik derejesiniň sany i bolsa, onuň orta kinetik energiýasy

$$\langle W \rangle = \frac{i}{2}KT$$

ýa-da gazyň 1 molundaky molekulalarynyň sanynyň N_A deňligini hasaba alanymyzda, onuň içki energiýasy:

$$U_o = \langle W \rangle N_A = \frac{i}{2}KT N_A$$

bu ýerde U_o -1 mol gazyň içki energiýasy, N_A -Awogadro sany, $k=R/N_A$ -Bolsmanyň hemişeligi, onda

$$U_o = \frac{i}{2}RT \quad (8.23)$$

Şu ýerden gazyň islendik massasy üçin onuň içki energiýasyny kesgitlemegiň formulasyny almak bolar

$$U = \frac{m}{M} \frac{i}{2}RT \quad (8.24)$$

§8.8. Gazyň ýylylyk sygymynyň kesgitlenilişi

Biratomly gazyň bir molyny alyp, hemişelik göwrümde onuň temperaturasyny I K artdyralyň. Onda ýylylyk hereketiniň ähli energiýasy diňe onuň içki energiýasyny ýokarlandyrmaga sarp edilýär.

Bir mol gazy hemişelik göwrümde I gradus gyzdyranymyzda, onuň içki energiýasynyň üýtgeýşini, ýagny molýar ýylylyk sygymyny kesgitleliň.

T temperaturada ($i=3$) biratomly bir mol gazyň içki energiýasy (8.23) formulla görä $\frac{3}{2}RT$ deň. Bir gradus ýokarlananda bolsa, $\frac{3}{2}R(T+1^\circ)$ bolar. Şeýlelikde energiýanyň artdyrylmasy

$$\frac{3}{2}R(T+1) - \frac{3}{2}RT = \frac{3}{2}R.$$

ýa-da

$$C_V = \frac{3}{2}R$$

Molýar ýylylyk sygymy köplenç halatlarda $\frac{J}{mol \cdot K}$ bilen aňladylýar. Onda soňky deňlemäniň sag tarapyndaky uniwersal gaz hemişeligini-de şol birliklerde aňlatmak gerek bolýar.

$R = 8,31 \frac{J}{mol \cdot K}$ – san bahasyny ýerine goýup alarys:

$$C_V \cong \frac{3}{2} \cdot R \approx 3 \frac{J}{mol \cdot K}$$

Şeýlelikde, bir atomly gazyň hemişelik göwrümdäki molýar basyşy üç kaloriýa deň.

C_V -niň bahasyny bilip, basyş hemişelik bolan wagtyndaky udel ýylylyk sygymyny kesgitlemek kyn däl, ýagny:

$$C_P = C_V + R$$

ýa-da

$$C_P \cong \frac{i}{2}R + R = \frac{i+2}{2}R \quad \frac{J}{mol \cdot K}$$

Şeýlelikde bir atomly gaz üçin gatnaşyk

$$\frac{C_P}{C_V} = \gamma = \frac{5}{3} = 1,67$$

bolýar.

Indi ikiatomly gazyň ýylylyk sygymyny kesgitleliň. §8.8 belli bolşy ýaly, biri- biri bilen berk baglanyşygy bolan ikiatomly gazyň molekulasyň erkinlik derejesi 5-e deňdir ($i=5$). T temperaturada onuň

içki energiýasy $\frac{5}{2}kT$ bolar. Ikiatomly gazyň 1 molunyň energiýasy – $\frac{5}{2}kTN_A = \frac{5}{2}RT$ deň.

Eger hemişelik göwrümde, gazyň temperaturasyny bir gradus ýokarlandyrsak, onda bir mol gazyň energiýasy $\frac{5}{2}R(T+1^\circ)$ bolar.

Ikiatomly gazyň hemişelik göwrümde bir gradus gyzdyrylmagy netijesinde energiýasynyň artdyrylmasy

$$C_V = \frac{5}{2}R \text{ ýa-da } C_V \cong \frac{5}{2} \cdot 2 \approx 5 \text{ kal/(grad}\cdot\text{mol) bolar.}$$

Soňra ,tapýarys: $C_P \cong 5 + 2 \approx 7 \text{ kal/(grad}\cdot\text{mol)}$, we

$$\frac{C_P}{C_V} = \gamma = \frac{7}{5} = 1.4$$

$$\text{Umumy görnüşde } C_V = \frac{i}{2}R \quad (8.25)$$

$$C_P = C_V + R = \frac{i}{2}R + R = \frac{(i+2)R}{2} \quad (8.26)$$

Molýar ýylylyk sygymlaryň gatnaşygyny (8.25) we (8.26) formulalardan bahalaryny goýup alarys:

$$\gamma = \frac{C_P}{C_V} = \frac{\frac{(i+2)R}{2}}{\frac{i}{2}R} = \frac{i+2}{i} \quad (8.26)'$$

Ýokarda görkezilen (8.25) we (8.26) formulalardan görnüşi ýaly, gazlaryň ýylylyk sygymyny üç görnüşe bölüp bolýar: biratomly, ikiatomly, üçatomly we köpatomly gazlar. Olaryň erkinlik derejesiniň sanyny, ýylylyk sygymlarynyň bahalaryny hem-de ýylylyk sygymlarynyň gatnaşyklarynyň san bahalary hasaplamalara görä aşakdaky jedwelde görkezilen.

Jedwel

<i>Gaz</i>	<i>i</i>	<i>C_V</i> , <i>J/(K·mol)</i>	<i>C_P</i> , <i>J/(K·mol)</i>	<i>γ</i>
Biratomly	3	12,48	20,80	1,67
Ikiatomly	5	20,80	29,12	1,40
Üçatomly we köpatomly	6	24,96	33,28	1,33

Ýokarda belleýşimiz ýaly, gazyň ýylylyk sygymy $\left(C = \frac{dQ}{dT}\right)$ diňe bir maddanyň häsiýetine bagly bolman, onuň prosesiniň häsiýetine, başga söz bilen aýtdanymyzda onuň temperaturasynyň haýsy şertlerde üýtgeýändigine—de baglydyr.

Şeýlelikde, izohorik prosesde $\left(\frac{dQ}{dT}\right)_V = C_V,$

Izobarik prosesde $\left(\frac{dQ}{dT}\right)_P = C_P,$

Adiabadik prosesde bolsa $\left(\frac{dQ}{dT}\right)_Q = 0,$

gazyň temperaturasynyň üýtgemegi daşky gurşaw bilen ýylylyk çalyşygy bolmadyk ýagdaýynda geçýär ($dQ=0$), emma, $dT \neq 0$. Fiziki nukdaý nazaryndan seredeniňde bu ýagdaý, gazyň nähili uly energiýany alýandygyna ýa-da berýändigine garamazdan, ol energiýa izotermiki prosesde onuň temperaturasyny üýtgedip bilmez.

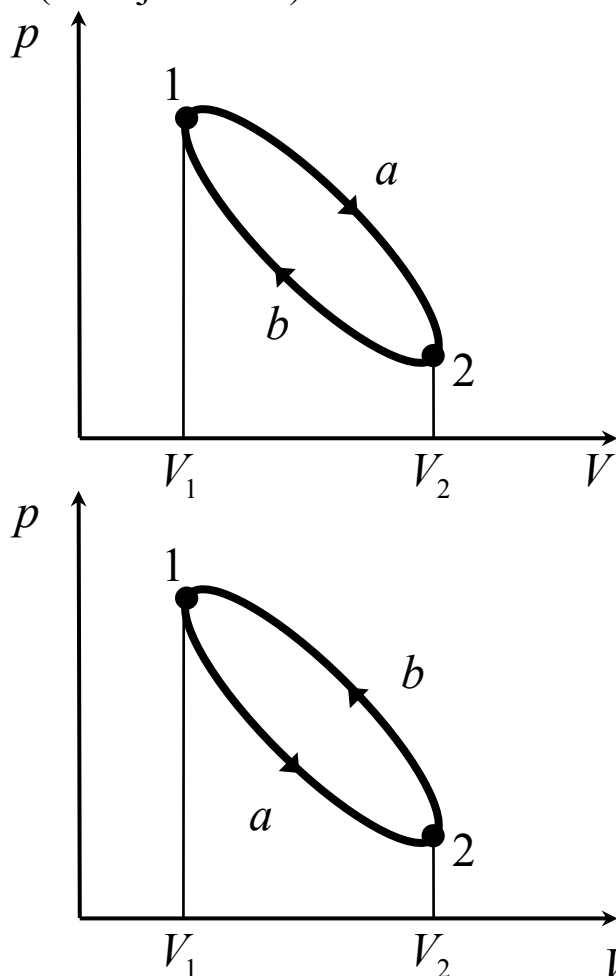
(8.25) we (8.26) formulalardan görnüşi ýaly molýar ýylylyk sygymlyry diňe molekulalaryň erkinlik derejesi bilen kesgitlenip, temperatura bagly däldirler. Molekulýar-kinetik teoriýanyň şeýle tassyklaýşy diňe biratomly gazlar üçin giň temperatura aralyklarynda ýerine ýetýär. Emma, iki- we köpatomly gazlarda teoriýa bilen tejribeleriň azda-kände gabat gelmeýşini molekulalaryň aýlanma we yrgyldama energiýalarynyň kwantlama düzgünine boýun egýändigleri bilen düşündirmek bolar.

§8.9. Aýlawly proses. Öwrülişikli we öwrülişiksiz prosesler

Sistemanyň birnäçe hallary geçip, ýene-de öňki ýagdaýyna gaýdyp gelmek prosesine aýlawly proses diýilýär. Prosesleriň diagrammsynda aýlaw (sikl) ýapykdyr (8.5-nji surat).

Ideal gazyň edýän aýlawly prosesini, gazyň giňelmek (1-2) we gysylmak (2-1) proseslerine bölmek bolar. Gaz giňelenindäki edilýän iş položitelidir. Ol $1a_2V_2V_11$ figuranyň (şekiliň) meýdany bilen kesgitlenilýär ($dV > 0$); gysylanyndaky edilýän iş otrisateldir. Ol $2b1V_1V_22$ şekiliň meýdanyna deňdir ($dV < 0$). Şeýlelikde, bir siklde ýerine ýetirilýän iş onuň öz içine alýan şekilleriniň meýdany bilen kesgitlenilýär. Eger siklde položitel iş edilýän bolsa $A = \oint p dV > 0$ (sikl sagat strelkasynyň ugry boýunça geçýär), onda oňa göni sikl (8.5-nji a surat), eger-de sikilde otrisatel iş edilýän bolsa $A = \oint p dV < 0$ (sikl sagat

strelkasynyň ugrunyň garşysyna geçýär), onda şeýle aýlaw ters aýlaw diýilýär (8.5-nji b surat).



8.5-nji surat. Göni we ters aýlawly öwrülişikli prosesler.

GÖNI AÝLAW – daşardan alnan ýylylygyň hasabyna iş edýän, periodiki işleýän ýylylyk hereketlendirijilerinde ulanylýar. Ters aýlaw maşynlarynda – daşarky güýçleriň işiniň hasabyna ýylylyk has ýokary temperaturaly jisime pes temperaturalydangeçirilýän periodik işleýän gurluşlarda ulanylýar.

Aýlawly prosesin netijesinde sistema başlangyç ýagdaýyna gaýdyp gelýär we şeýlelikde, gazyň içki energiýasynyň doly üýtgemesi nola deňdir. Şonuň üçin aýlawly proseslerde termodinamikanyň birinji kanuny şeýle görnüşde ýazylýar:

$$Q = \Delta U + A = A \quad (8.27)$$

Ýagny, aýlawda (siklde) ýerine ýetirilýän işin ululygy daşardan alnan ýylylyk mukdaryna deňdir. Emma aýlawly prosesin netijesinde sistema ýylylygy alyp-da we berip-de biler, şonuň üçin

$$Q = Q_1 - Q_2$$

Bu ýerde Q_1 we Q_2 degişlilikde sistemanyň alan we beren ýylylyk mukdarlary. Şeýlelikde, aýlawly prosesde ýylylyk hereketlendirijileriniň (dwigatelleriniň) peýdaly täsir koeffisienti şeýle kesgitlenilýär:

$$\eta = \frac{A}{Q_1} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{Q_2}{Q_1} \quad (8.28)$$

Eger termodinamik proses göni ugur boýunça-da, ters ugur boýunça-da geçip bilýän bolsa we şeýle proses ilki bada göni ugurda soňra ters ugra geçip, sistema ýene-de ilkinji halyna gaýdyp gelse, hem-de daş-töwerekdäki gurşawda hiç hili üýtgeşme bolmasa, şeýle proseslere öwrülişikli prosesler diýilýär. Şeýle şertleri kanagatlandyрмаýan islendik proseslere öwrülişiksiz prosesler diýilýär.

Ýylylygyň gyzygyn jisimden sowuk jisime geçmegi, mehaniki energiýa geçmegi öwrülişiksiz prosesleriň adaty mysallarydyr. Tebigatdaky ähli mikroskopik prosesler diňe bir kesgitli ugur boýunça bolup geçýär. Olar ters ugurlara öz-özünden geçip bilmez. Şonuň üçin, tebigatdaky öz-özünden bolup geçýän prosesleriň ählisi-de öwrülişiksiz proseslerdir we olardan has howuplusy organizimleriň garramagy we ölmegidir.

Ýylylygy sowuk jisimden gyzygyn jisime-de geçirmek bolar. Emma munuň üçin energiýany ulanýan sowadyjy gurluş gerek.

Islendik deňagramlylyk halyndaky proses öwrülişikli prosesdir. (Sistemanyň deňagramly haly diýip, onuň parametrleleriniň belli bir bahalary bolup, olara daşardan hiç hili täsir bolman, islendik uzak wagtlap üýtgemän galýan halyna aýdylýar). Öwrülişikli prosesler – haýsy hem bolsa käbir derejede hyýalylaşdyrylan hakyky proseslerdir. Olary düýpli öwrenmek esasy iki sebäbe görä örän möhümdir.

1. Tebigatda we tehnikada bolup geçýän köpsanly prosesler öwrülişikli proseslerdir.

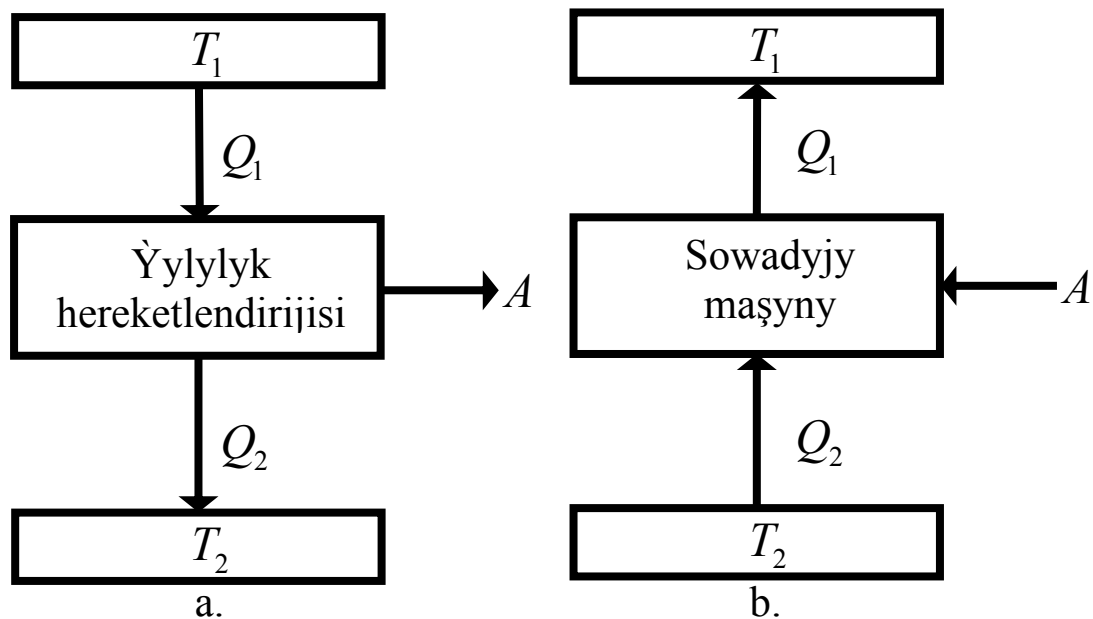
2. Öwrülişikli prosesleri ulanmaklyk ykdysady taýdan peýdalydyr we olary öwrenmeklik real ýylylyk hereketlendirijileriniň peýdaly täsir koeffisiýentini artdyrmagyň ýollaryny görkezýär.

§8.10. Termodinamikanyň ikinji başlangyjy (kanuny)

Termodinamikanyň birinji kanuny ýylylyk proseslerindäki energiýanyň saklanmak we öwürlmek kanuny bolmak bilen, birnäçe termodinamiki prosesleri praktiki durmuşda bolşy ýaly dogry beýan edip bilmeýär. Ol kanun tebigatda dolup geçýän prosesleriň ugruny

görkezmeýär. Mysal üçin, sürtülmäniň netijesinde hereket edýän jisimiň mehaniki energiýasynyň bir bölegi ýylylyk energiýasyna geçdi. Indi şol ýylylyk energiýasynyň hasabyna, onuň ýüze çykan wagtyndakly jisimiň tizligini döredip bolarmy? Termodinamikanyň birinji kanuny şeýle soraglara jogap berip bilmýär.

Termodinamikanyň ikinji kanuny ýylyk hereketlendirijileriň iş eseslaryny derňemegiň esynda döredi. Şonuň üçin ýylylyk hereketlendirijileriniň işleýşine seredeliň. (8.6-njy a surat).



8.6-njy surat. Termodinamikanyň ikinji kanunynyň esaslandyrylyşy.

Gyzdyryjy diýip atlandyrylýan T_1 ýokary temperaturaly termostatdan aýlawyň dowamynda Q_1 ýylylyk mukdary alyndy, sowadyjy diýip atlandyrylýan T_2 pes temperaturaly termostada bolsa Q_2 ýylylyk mukdary berildi we iş edildi diýip göz önüne getireliň. Ol işiň ululygy

$$A = Q_1 - Q_2$$

Ýylylyk hereketlendirijiniň peýdaly täsir koeffisientiniň (8.28) bire deň bolmagy üçin $Q_2=0$ şerti ýerine ýetirmeli, ýagny, ýylylyk hereketlendirijiniň bir ýylylyk çeşmesi bolmaly. Şeýle hereketlendiriji has gyzgyn (gyzdyryjy) we has sowuk (sowadyjy) iki sany jisimiň bolmagyny talap etmezdi, ol bolsa mümkin däl.

Fransuz inženeri S.Karno (1796-1832) ýylylyk hereketlendirijileriniň işlemegi üçin dürli temperaturaly ikiden az bolmadyk ýylylyk çeşmesiniň gerekdigini (sowadyjy we gyzdyryjy) subut etdi. Bir ýylylyk çeşmesinden işleýän ýylylyk hereketlendirijisini

döretmek mümkün dälär. Ýagny, bir çeşmeden Q_1 ýylylyk mukdaryny alyp, ony – da doly iş jisimine berip bolýan ($A=Q_1$) periodik işleýän ýylylyk dwigatelini gurmaklyk (ikinci hilli perpetuum mobile–ömürlik dwigateli) barada edilen synanşyklaryň hemmesi şowsuz çykdy.

Soňra, Saadi Karnonyň gazanan netijelerini Klauzius bilen B.Tomson umumylaşdyryp, ýeke–täk netijesi, diňe bir çeşmeden alnan ýylylyk mukdaryny, oňa ekwiwalent bolan işe geçirip bilýän periodik prosesi amala aşyrmagyň mümkin dälilik prinsipini aýtdylar.

Bu prinsip termodinamikanyň ikinji başlangyjy adyny aldy.

Termodinamikanyň ikinji başlangyjy, ikinji hilli perpetuum mobiläni, ýagny, ýylylyk mukdarynyň bir çeşmesini T_1 -den T_2 -ä çenli sowatmagyň hasabyna Q_2 iş edýän periodik işleýän maşyny gurmak mümkin dälidiginiň prinsipi görnüşinde hem aňladylyp bilner.

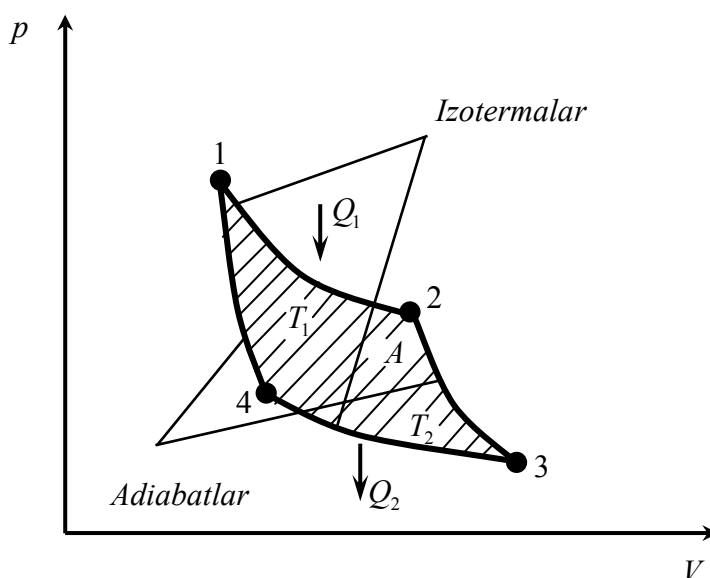
Dogrudan–da, şeýle heretlendirijini gurup bolsady, onda biziň daş töweregimizdäki gurşawdaky tükeneksiz energiýanyň hasabyna ol ömürlik işlärdi. Mysal üçin, ummanlardaky suwy 1° sowatmaklygyň özi ummasyz energiýany bererdi. Dünýä ummanlaryndaky suwuň massasy 10^{18} tonna golaýdyr, ony 1° sowadanymyzda 10^{24} J golaý ýylylyk bölünip çykardy, bu bolsa 10^{14} tonna daşkömür doly ýakylan wagtyndaky bölünip çykýan energiýa deňdir. Şeýle mukdardaky daş kömür ýüklenen demirýol düzümi 10^{10} km aralygy tutardy, bu bolsa Gün sistemasynyň ölçeglerine gabat gelýär.

Biziň sereden prosesimize ters bolan peosses (8.6 b surat) sowadyjy maşynlarynda ulanylýar. Sistema aýlawyň dowamynda has aşak T_2 temperaturada Q_2 ýylylyk mukdaryny alýar we has ýokary T_1 temperaturada Q_1 ýylylyk mukdaryny berýär. Aýlawly proses üçin $A=Q$ (8.27), emma, şerte görä $Q=Q_2-Q_1<0$, şonuň üçin $A<0$ we $Q_2-Q_1=-A$, ýa–da $Q_1=Q_2+A$ ýagny, has ýokary T_1 temperaturada sistemanyň çeşmä beren Q_1 ýylylyk mukdary, onuň has pes T_2 temperaturada çeşmeden alan Q_2 ýylylyk mukdaryndan, sistemanyň üstünde ýerine ýetirilen ululygyça uludyr. Şeýlelikde, iş etmezden, has pes gyzdyrylan jisime ýylylyk bermek mümkin däl. Bu netije R.Klauziusyň termodinamikanyň ikinji başlangyjy baradaky kesgitlemesiniň esasy manysyny düzýär: ýylylyk hiç wagt pes temperaturaly jisimden ýokary temperaturaly jisime öz–özünden geçmez.

§8.11. Karnonyň aýlawly hadysasy. Ýylylyk maşynynyň peýdaly täsir koeffisiýenti

Termodinamikanyň ikinji başlangyjyna esaslanyp we ýylylyk hereketlendirijileriniň işleýiş prinsipini derňäp, 1824-nji ýylda S. Karno aýlawly hadysasy prosesleriniň in amatlysynyň iki izotermik we iki adiabatik proseslerden ybarat bolan öwrülişikli aýlawly prosesdir diýen netijä geldi. Bu aýlawly hadysa Karnonyň aýlawy diýen ady aldy. Karnonyň aýlawyny amala aşyrmak üçin iş jisimi izotermik gysylanda, ondan degişli ýylylyk mukdaryny alýan sowadyjy hökman bolmalydyr.

Karnonyň göni aýlawyna seredeliň. İş jisimi hökmünde hereket edip bilýän porşeniň aşagynda silindr şekilli gaba salnan ideal gaz bar diýip göz önüne getireliň. Onuň peýdaly täsir koeffisiýentini (PTK) kesgitleliň.



8.7-nji surat. Karnonyň aýlawly hadysasy.

Karnonyň aýlawly hadysasy 8.7-nji suratda shematiki şekillendirilendir. Bu suratda izotermik giňelme we gysylma 1-2 we 3-4, adiabatik giňelme we gysylma 2-3 we 4-1 egri çyzyklar bilen görkezilendir.

Izotermiki prosesde $u = const$, şonuň üçin gazyň gyzdyryjydan alan Q_1 ýylylyk mukdary gazyň 1 haldan 2 hala geçendäki A_{12} edilen işiň ululygyna deňdir:

$$A_{12} = \frac{m}{M} RT_1 \ln \frac{V_2}{V_1} = Q_1 \quad (8.29)$$

2–3 aralygynda - adiabatik giňelende daşky gurşaw bilen ýylylyk çalşygy bolmaýar we A_{23} aralykda giňelendäki işi sistemanyň içki energiýasynyň üýtgetmeginiň hasabyna edilýär (8.22).

$$A_{23} = -\frac{m}{M}C_v(T_2 - T_1)$$

Izotermik gysylanda, gazyň sowadyja berýän Q_2 ýylylygy gazyň A_{34} gysyş işine deňdir:

$$A_{34} \frac{m}{M} RT_2 \ln \frac{V_4}{V_3} = -Q_2 \quad (8.30)$$

Adiabatik gysylanyndaky iş:

$$A_{41} = \frac{m}{M}C_v(T_1 - T_2) = A_{23}$$

Aýlawly prosesin netijesinde ýerine ýetirilän doly iş:

$$A = A_{12} + A_{23} + A_{34} + A_{41} = Q_1 + A_{23} - Q_2 - A_{23} = Q_1 - Q_2$$

Bu iş 8.3-nji suratdaky figuranyň ştrihlenen böleginiň meýdanyna deňdir:

(8.28) deňlemä görä, Karnonyň aýlaw hadysasynyň peýdaly täsir koeffisienti

$$\eta = \frac{A}{Q_1} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1}.$$

2-3 we 4-1 adiabatlar üçin (8.20) formulany ulanyp, alýarys:

$$T_1 V_2^{\gamma-1} = T_2 V_3^{\gamma-1}, \quad T_1 V_1^{\gamma-1} = T_2 V_4^{\gamma-1}$$

Şu ýerden :

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{V_3}{V_4} \quad (8.31)$$

(8.29) we (8.30) deňlemeleri (8.28) aňlatmada ornuna goýup, hem-de (8.31) gatnaşygy göz önüne tutup, alarys:

$$\eta = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = \frac{\frac{m}{M} RT_1 \ln \frac{V_2}{V_1} - \frac{m}{M} RT_2 \ln \frac{V_3}{V_4}}{\frac{m}{M} RT_1 \ln \frac{V_2}{V_1}} = \frac{T_1 - T_2}{T_1}$$

ýagny, Karnonyň aýlaw hadysasynyň PTK hakykatdan-da gyzdyryjynyň we sowadyjynyň temperaturalary bilen kesgitlenilýär. Ony ýokary götermek üçin gyzdyryjy bilen sowadyjynyň temperaturalarynyň tapawudyny ulaltmak gerek bolýar. Mysal üçin, $T_1=400\text{ K}$ we $T_2=300\text{ K}$ bolanda $\eta=0,25$; Eger gyzdyryjynyň temperaturasyny 100 K ýokarlatsak, sowadyjynyňkyny bolsa 50 K aşaklatsak, onda $\eta=0,5$ bolýar. Islendik real ýylylyk hereketlendirijileriniň PTK 1-den kiçidir. PTK-nyň dürli hili energiýa ýitgileri zerarly maksimal bahasy, içinden ýandyrylýan hereketlendirijilerde 44% ; bug turbinalarynda $\eta=62\%$ çemesidir.

§8.12. Entropiýa

Öwrülşikli aýlaw hadysasy boýunça işleýän Karnonyň maşynynyň peýdaly täsir koeffisientiniň tapylşyndan:

$$\eta = \frac{T - T_0}{T} = 1 - \frac{T_0}{T}$$

bu ýerde T – ýylylyk alynýan jisimiň (gyzdyryjynyň) temperaturasy, T_0 – ýylylyk berilýän jisimiň (sowadyjynyň) temperaturasy.

Gyzdyryjydan alnan Q ýylylygyň hasabyna $A=Q-Q_0$ deň bolan mehaniki işi ýerine ýetirmek bolar. PTK kesgitlemesine görä: $\eta=A/Q$, şu ýerden:

$$A=Q \eta \quad (8.32)$$

ýa-da:

$$A = Q - T_0 \frac{Q}{T} \quad (8.33)$$

(8.33) deňleme diňe bir ýylylyk maşynlaryna degişli bolman, islendik öwrülşikli aýlawlarda (sikllerde) işleýän maşynlara-da degişlidir. Ýylylyk energiýasynyň islendik öwrülüşiğinde maksimal mümkin bolan iş (8.33) deňleme bilen tapylýar.

Ýylylyk:

$$Q_0 = T_0 \frac{Q}{T} \quad (8.34)$$

sowadyjy tarapyndan alynýar we onuň işe öwürlmegi mümkin däldir.

Q/T gatnaşyk energiýanyň berlen sistemada işe öwürlip bilinmejek bölegini häsiýetlendirýär. Ol daş-töwerege ýaýran energiýanyň ölçegi bolup hyzmat edýär. Bu ululyga entropiýa diýip at berilýär.

Islendik öwrülşikli aýlawly proses üçin:

$$\oint \frac{dQ}{T} = 0 \quad (8.35)$$

diýip ýazyp bolanlygyny teoretiki derňewler görkezýär. \oint integral alamaty onuň ýapyk kontur üçin alnandygyny görkezýär. Entropiýany S harpy bilen bellemekligi ilkinji gezek Klauzius girizýär.

Onda (8.35) formulanyň esasynda, entropiýa öwrülişikli prosesler üçin şeýle ýazylýar:

$$\Delta S = 0 \quad (8.36)$$

Öwrülişiksiz aýlawly hadysany edýän sistemalaryň entropiýasynyň artýandygyny termodinamikada subut edýärler, ýagny:

$$\Delta S > 0 \quad (8.37)$$

Emma, (8.36) we (8.37) formulalaryň diňe ýapyk sistemalara degişlidigini bellemek gerek. Eger sistema daşky sreda bilen ýylylyk çalşygyny edýän bolsa, onda bu sistemanyň entropiýasy özüni dürli hili alyp barar, onda (8.36) we (8.37) formulalary - Klauziusyň deňsizligi görnüşinde ýazmak bolar:

$$\Delta S \geq 0 \quad (8.38)$$

ýagny, ýapyk sistemanyň entropiýasy ýa-da artar (öwrülişiksiz proses ýagdaýynda), ýa-da hemişelik galar (öwrülişikli proses ýagdaýynda).

XIX asyryň ortalarynda ÄLEMIŇ ÝYLYLYK HELÄKÇILIGI diýilýän problema ýüze çykdy. Äleme takyk ýapyk sistema görnüşinde seredip, we onuň üçin termodinamikanyň ikinji kanunyny ulanyp, Klauzius Älemiň entropiýasy artyp, ahyrynda özüniň maksimumyna ýetmelidir diýen netijäni çykardy. Beýle diýmeklik ýylylygyň barha gyzgyn jisimlerden sowuk jisimlere geçip, ahyrynda Älemdäki ähli jisimleriň temperaturalary deňleşmelidir diýmekligi aňladýar. Şonda ähli jisimleriň arasynda doly ýylylyk deňagramlylygy ýüze çykar we Älemdäki ähli prosesler togtar – Älemde ýylylyk heläkçiligi ýüze çykar. Ýylylyk heläkçiliginiň şeýle nädogry düşündirilmeginiň esasy sebäbi - Älemi ýapyk sistema hökmünde kabul edip bolmaýanlygyndadyr. Beýle ýylylyk heläkçiliginiň bolmajakdygyny F. Engels hem “Tebigatyň dialektikasy” atly işinde görkezdi.

IX BAP. REAL GAZLAR, SUWUKLYKLAR WE GATY JISIMLER

§9.1. Molekulalara özara täsir güýçleri

Gazlaryň molekulýar-kinetik teoriýasynda ulanylýan ideal gazyň modeli maýyşgak şarlara meňzedilýän molekulalaryň tertipsiz hereketinden yabarat bolan gazdyr. Molekulalaryň arasyndaky güýçler diňe urgy momentinde ýüze çykýar, özem olar itekleşmeleriň maýyşgak güýjüdür. Molekulalaryň ölçegleri olaryň arasyndaky ortaça uzaklyk bilen deňeşdirilende şeýle bir kiçi, şonuň üçin olary hasaba almasaň-da bolar. Şeýle model ideal gaza, ýagny Boýluň-Mariottyň we Geý-Lýussagyň kanunlaryna takyk tabyn bolan gaza degişlidir. Emma, uly basyşlarda hemme gazlar bu kanunlardan çykýarlar. Munuň sebäbi, birinjiden, molekulalaryň hususy ölçegleriniň barlygy bilen, ikinjiden, molekulalaryň arasyndaky özara täsir güýçleriniň häsiýetiniň maýyşgak şarlaryňkydan has çylşyrymlydygy bilen düşündirilýär. Basyşyň artmagy molekulalaryň aralygyny kiçeldýär. Şonuň üçin molekulanyň göwrümini we olaryň arasyndaky özara täsir güýçlerini hasaba almak gerek bolýar. Mysal üçin, normal şertlerde 1 m^3 gazda $2,69 \cdot 10^{25}$ molekula bar, olaryň tutýan göwrümi (molekulanyň radiusy 10^{-10} m golaý) 10^{-4} m^3 golaý, şeýlelikde bu molekulalaryň tutýan göwrümini gazyň göwrümi bilen (1 m^3) deňeşdireniňde, hasaba almasaň-da bolar. Emma, basyş 500 MPA ($1 \text{ at} = 101,3 \text{ kPa}$) bolanda molekulalaryň göwrümi gazyň ähli göwrüminiň ýaryny eýeleýär. Bu halatda, uly basyşlarda we pes temperaturalarda ideal gaz kanunlaryny ulanyp bolmaýar.

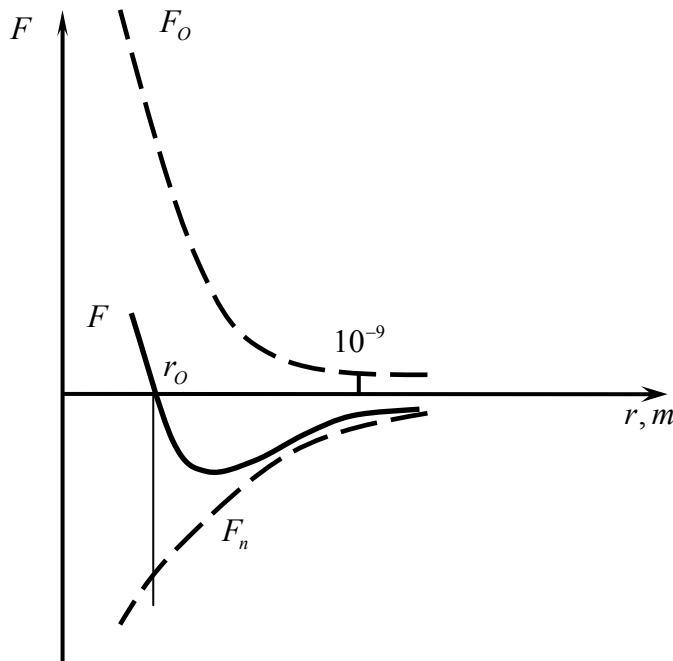
REAL GAZLARA seredileninde, olaryň häsiýetleriniň molekulalaryň özara täsirlerine baglydygyny we molekulalaryň özara täsir güýçlerini hasaba almaklygyň gerekdigini bellemek gerek.

Molekulalaryň özara täsir güýji 10^{-9} m aralykda ýüze çykýar we molekulalaryň aralygynyň artmagy bilen çalt kemelýär. Şeýle güýçlere gysga wagtlaýyn täsir ediji güýçler diýilýär.

XX asyryň başlarynda atomyň gurluşynyň öwrenilmegi we kwant mehanikasynyň ösmegi netijesinde maddanyň molekulalarynyň arasynda şol bir wagtyň özünde çekişme güýçleriniň hem-de itekleşme güýçleriniň täsir edýändigini anyklanyldy.

9.1-nji suratda molekulara güýçleriniň molekulalaryň aralygyndaky r uzaklyga baglylygynyň grafigi görkezilen. Bu ýerde

F_n we F_0 itekleşme we çekişme güýçleri, F – olaryň netijeleýji güýji. Itekleşme güýçleri položitel güýç hasap edilýär, çekişme güýçleri bolsa – otrisatel. Molekulalaryň aralygyndaky uzaklyk r , r_0 – deň bolan wagtynda netijeleýji güýç $F=0$, ýagny molekulalaryň itekleşme we çekişme güýçleri bir-birine deň. Şeýlelikde, r_0 aralykda molekulalar deňagramlylyk ýagdaýynda bolýarlar.



9.1-nji surat.
Molekulara güýçleriň
aralyga baglylygy.

Haçan-da, $r < r_0$ bolanda, itekleşme güýji agdyklyk edýär ($F_n > 0$), $r > r_0$ bolanda – çekişme güýji ($F_0 < 0$). Haçan-da, molekulalaryň aralygy $r > 10^{-9}$ m bolanda, hakykatda molekulalaryň özara täsir güýçleri ýitýär ($F=0$).

§9.2. Wan-der-Waalsyň deňlemesi

Biziň belleýişimiz ýaly (§9.1), real gazlar üçin dürli proseslere seredileninde, olaryň molekulalarynyň ölçeglerini, biri-birleri bilen özara täsirlerini hasaba almak gerek bolýar. Şonuň üçin ideal gazyň modelini we onuň halyny häsiýetlendirýän Mendeleyewiň- Klapereýronyň deňlemesini gönüden-göni ulanyp bolmaz.

Molekulalaryň hususy görümlerini, ondaky molekulalaryň özara täsir güýçlerini hasaba almak bilen, golland fizigi I.Wan-der-Waals

(1837-1923) Mendeleýewiň – Klapereýronyň deňlemesine iki sany düzediş girizýär we real gaz halyna degişli deňlemäni çykarýar.

Wan-der-Waalsyň hasaplamasyna görä, molekulalaryň erkin hereketleri üçin berlen göwrüm gabyň geometrik V göwrümünden käbir b ululykça azdyr.

Molekulalaryň hususy göwrümleri bilen baglanyşykly bolan bu b ululygy gazyň berlen mukdary üçin hemişelik diýip hasap etmek bolar: şoňa görä-de, V göwrüm gaz halynyň deňlemesinde $(V-b)$ ululyk bilen çalşyrylmalydyr.

Ideal gazyň bir moly üçin aşakdaky deňlemäni ýazyp bileris:

$$pV=RT \quad (9.1)$$

Aýdylyşy ýaly, molekulalaryň hususy ölçeglerini göz önünde tutup, biz 10^{-10} m mol göwrümi $10^{-10}m(V-b)$ ululyk bilen çalşyrmalydyrys, onda:

$$p(V-b)=RT \quad (9.2)$$

$p \rightarrow \infty$ bolanda, gazyň göwrümi $V \rightarrow 0$, ýagny, gaz tükeniksiz gysylanda, onuň göwrüminiň nola ymtylýandygy (9.2) deňlemeden gelip çykýar, bu bolsa mümkin däl; gazyň gysylmagy molekulalaryň arasyndaky boş giňişligiň kiçelmeginiň hasabyna bolýar, şoňa görä-de, uly basyşlarda molekulalar dykyz ýerleşýärler, şondan soňra gazyň gysylyjylygy has az bolmalydyr. (9.2) formula görä, $p \rightarrow \infty$ bolanda gazyň göwrümi $V - b$ bolýar, şeýlelik bilen b ululyk V mol göwrümiň örän uly basyşlarda ymtylýan göwrümidir: ol göwrüm molekulalar gaplanylanda, bir molyň düzümine girýän hemme molekulalaryň tutýan göwrümüne dendir.

b ululygyň takmynan molekulalaryň hususy göwrümleriniň döredilmegine deňdigini teoretiki hasaplamalar görkezýär.

Real gazlarda molekulalaryň arasyndaky özara täsir güýçleri daşky basyş güýçlerine goşmaça tasir edýär, netijede, gazlar gysylan ýaly bolýarlar. Bu bolsa öňki daşky basyşyň üstüne goşmaça içki basyşyň goşulmagyna getirýär; (9.1) aňlatmadaky basyşy $(p+p_i)$ ululyk bilen çalşyrmak gerek bolýar. p_i içki basyş molekulalaryň konsenrasiýasynyň kwadratyna proporsionaldyr, ýa-da gazyň göwrüminiň kwadratyna ters proporsionaldyr:

$$p_i = \frac{a}{V^2}$$

bu ýerde a – gazyň tebigatyna bagly bolan hemişelik ululykdyr.

Soňky deňlikdäki basyşyň bahasyny (9.2) aňlatmada ornuna goýup, gazyň bir moly üçin Wan-der-Waalsyň deňlemesini alarys:

$$(p + \frac{a}{V^2})(V - b) = RT \quad (9.3)$$

Wan-der-Waalsyň a we b düzedişleri berlen gaz üçin ep-esli derejeli takyklyk bilen hemişelikdir. Dürli gazlar üçin olar dürlüdürler. Olaryň san bahalary jedwellerde berilýär.

IS-sistemasynda: basyş Pa, göwrüm birligi m^3/mol (soňky deňlemede) bolsa, $a - \text{j} \text{ m}^3 / \text{mol}^2$, $b - \text{m}^3/\text{mol}$ bolýar.

Gazyň islendik m massasy üçin Wan-der-Waalsyň deňlemesi şeýle ýazylýar:

$$(p + \nu^2 \frac{a}{V^2})(V - \nu b) = \nu RT \quad (9.4)$$

bu ýerde $\nu = m / M$ – moluň sany.

§9.3. Wan-der-Waalsyň izotermalary we olaryň derňewi

Real gazyň özünü alyp barşyny barlamak üçin Wan-der-Waalsyň gazyň bir moly üçin ýazylan (9.3) deňlemesinde tapylan p basyşyň we V göwrümiň T temperatura baglylygynyň grafigine seredeliň. Görnüşi ýaly, Wan-der-Waalsyň

$$(p + \frac{a}{V^2})(V - b) = RT$$

deňlemesiniň sag we çep bölegini V^2/p köpeldip, ýaýlalary açyp, we meňzeş derejedäki V agzalary toplan, ony öwreliň: şonda alarys:

$$V^3 - (\frac{RT}{p} + b)V^2 + \frac{a}{p}V - \frac{ab}{p} = 0 \quad (9.5)$$

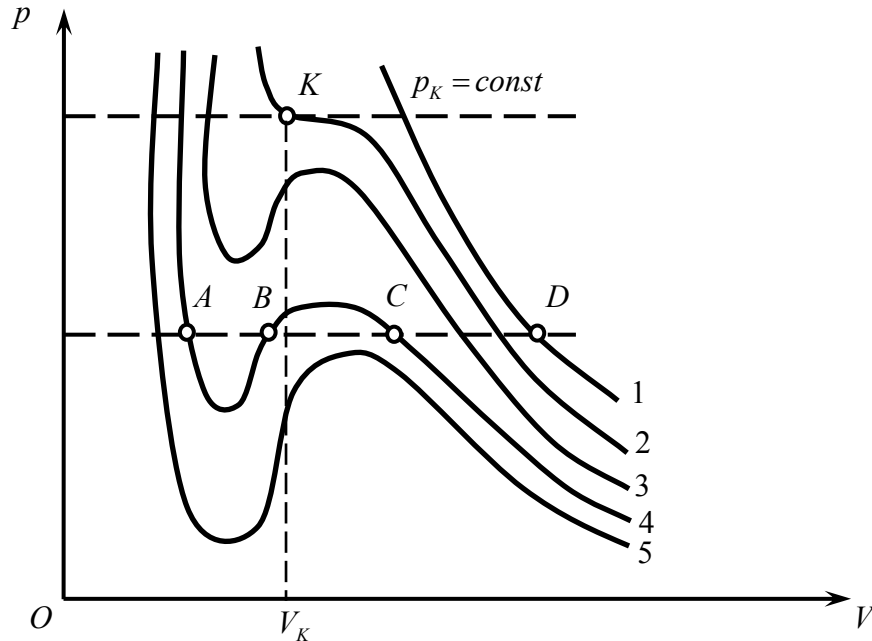
Bu ýerden, Wan-der-Waalsyň deňlemesiniň V görä üçünji derejeli deňlemedigi gös-göni görünýär. Şoňa görä-de, biz p basyşyň we T temperaturanyň bahalaryna baglylykda V göwrümiň bir, ýa-da üç dürli bahasyny alarys.

Wan-der-Waalsyň deňlemesinden dürli T üçin p -niň V baglylyk grafigini çyzyp, biz birnäçe izoterma alarys (9.2-nji surat).

Bu suratda $T = \text{const}$ bolanda, T_1, T_2, T_3, T_4, T_5 dürli temperaturalarda ($T_1 > T_2 > T_3 > T_4 > T_5$) $p = f(V)$ baglylygynyň grafigi berlen (bu temperaturalaryň her biri degişlilikde 1, 2, 3, 4, 5 izotermalara degişli). Grafikden görnüşi ýaly, temperatura näçe ýokary bolsa, izotermalar şonça-da sagrakda we ýokarrakda ýerleşýärler.

$p = f(V)$ baglylygynyň grafigine seredip, aşakdaky üç sany netijäni çykarýarys:

1. Ýokary temperaturada (T_1 - izoterma I). AD izobara izotermany diňe bir D nokatda kesýär. Şeýle ýagdaýda Wan-der-Waalsyň deňlemesiniň bir sany hakyky köki bar. Ýagny p we T ululyklaryň her bir bahasyna göwrümiň diňe bir bahasy degişlidir. Beýle diýildigi, madda ýokary temperaturalarda bir faza görnüşinde ýagny, gaz ýagdaýynda bolýar diýiligidir.



9.2-nji surat. Hakyky gazlar üçin Wan-der-Waalsyň izotermalary.

2. Uly bolmadyk temperaturalarda, 2, 3 we 4-nji izotermalarda örküçler emele gelýär.

AD izobarasy 4 izotermany A, B, C – üç nokatda kesip geçýär. Bu ýagdaýda berlen p we T -de Wan-der-Waalsyň deňlemesinde göwrüme üç sany baha degişlidir. Bu bolsa maddanyň bir wagtyň özünde üç faza halyna bolýandygyny aňladýar.

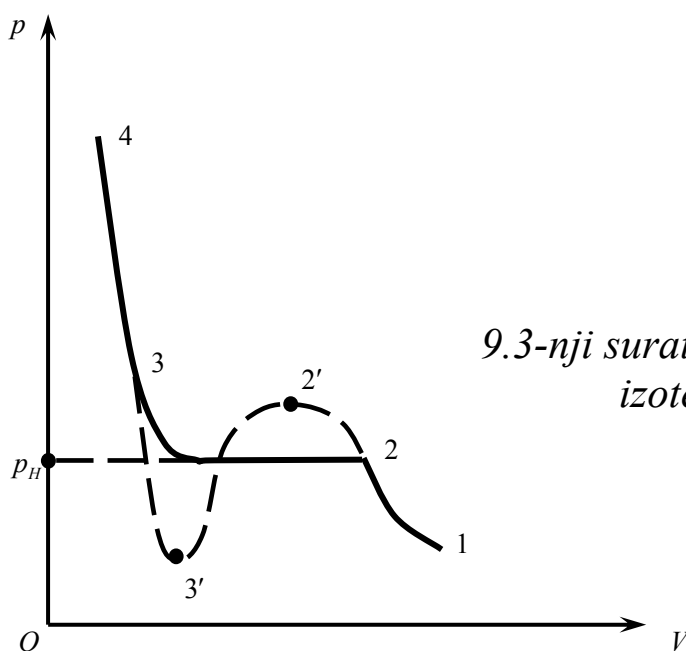
3. 5-nji izotermadan 4, 3, 2 izotermalara geçmeklik temperaturanyň ýokarlanmagy bilen başlanýar. Izotermadaky A we C örküçler insizlenip,

2 izotermada bir nokada – K öwrüm nokadyna birigýärler. Şeýlelikde, Wan-der-Waalsyň izotermalarynyň arasynda örküçli izotermalary örküçsiz izotermalardan bölüp aýyryan izoterma-da bar. Bu izoterma - kritiki izoterma, oňa degişli temperatura bolsa – T_k kritiki temperatura. Kritiki temperaturanyň örküç deregine diňe K öwrüm nokady bardyr. Bu nokatda oňa galtaşýan çyzyk absissa okuna paralleldir. K nokada kritiki nokat, oňa degişli bolan V_k göwrüme we p_k basyşa - kritiki göwrüm we kritiki basyş diýilýär. Her bir berlen madda üçin onuň kritiki temperaturasynyň, göwrüminiň we basyşynyň belli bir bahasy bardyr.

§9.4. Maddanyň kritiki haly. Faza geçişleri

Agregat halda alnan netijeleriň fiziki manysy Wan-der-Waalsyň eksperimental izotermalaryna seredenimizde äşgär görünýär. Bu barlaglaryň esasy D.I.Mendeleyewiň, M.P.Awenariusyň, T.Endrýusyň we beýleki alymlaryň tejribelerinde goýlandyr.

Wan-der-Waalsyň eksperimental izotermalaryna seredeliň. Izotermalar gazy izotermik usulda gysmak arkaly alynýar. Düşnükli bolar ýaly, galyň silindriň içinde hereketlenip bilýän porşeniň aşagynda bir mol gaz bar diýip göz önüne getireliň. Porşeni hereketlendirip, belli bir temperaturada biz gazyň basyşyny üýgedip bilýäris. Ýokary T temperaturalarda gazyň izotermalary ideal gazyň izotermalaryny ýada salýar, has pes temperaturalarda izotermalaryň häsiýetleri düýbünden başgaçadyr. Şeýle pes temperatura degişli izoterma 9.3-nji suratda shematiki şekillendirilendir.



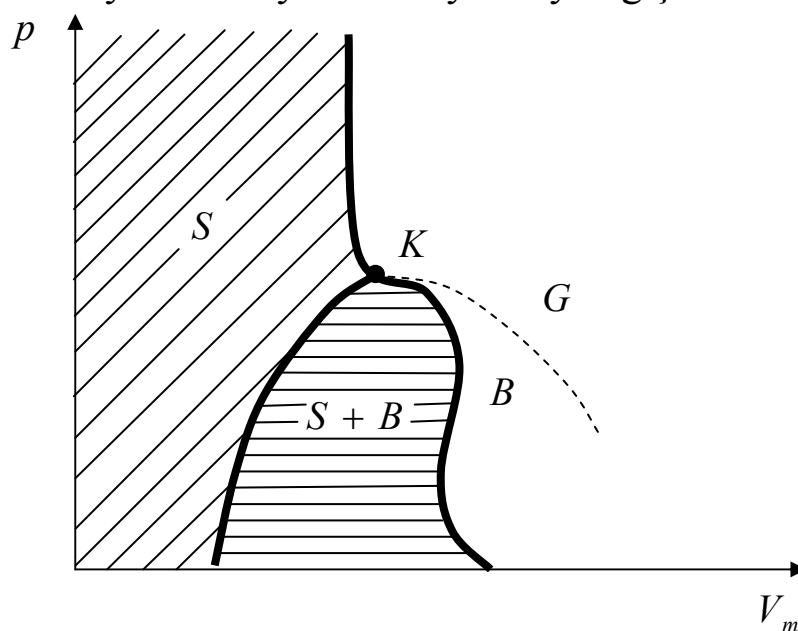
9.3-nji surat. Wan-der-Waalsyň izotermasynyň derňewi.

Uly V göwrümde porşeniň aşak inmegi bilen gazyň basyşy birsydyrgyn ýokarlanýar; prosesin bu bölegine izotermanyň 1-2 şahasy degişlidir. (9.3-nji surat). Bu aralykda Boýluň-Mariottyň gaz kanuny doly ýerine ýetirilýär we bu aralykda gaz bir fazada – gaz halynda bolýar. V_1 göwrüme degişli käbir kesgitli p_H basyşa ýetilende (izotermanyň 2 nokadynda), gazyň häsiýeti çürt-kesik üýtgeýär. Mundan beýläk göwrüm üýtgände-de, p_H basyş hemişelik bolup galýar, gazyň suwuklanma prosesi başlanýar. Göwrüm näçe kiçeldigiçe, gazyň sonçada köp mukdary suwuklyga öwrülýär. V_2 göwrüme we p_H basyşa degişli bolan 3 nokatda gazyň hemmesi doly suratda suwuk halyna geçýär. Basyşyň mundan beýläk ýokarlandyrylmagy örän uly güýç talap edýär, sebäbi, suwuklygyň gysylyjylygy azdyr. Izotermanyň 3-4 şahasy gazyň suwuk halyna degişlidir.

V_1 - V_2 gazlaryň suwuklyga öwrülýän p_H basyşyna berlen T temperaturada doýgun buglaryň maýyşgaklygy diýilýär. Göwrümlerin V_2 bahalaryna degişli bolan 2-3 aralygynda madda bir wagtyň özünde iki agregat ýagdaýynda (iki fazada) – suwuklyk we gaz halynda bolýar.

9.3-nji suratdaky 2 – 2' we 3' – 3b – aralyklaryny belli şertlerde tejribe üsti bilen-de almak bolar. Izotermanyň bu örküç giňişligine düşýän 2 – 2' aralygynda gaz öte doýgun bug görnüşinde bolýar.

Madda berlen temperaturada doýgun buglaryň maýyşgaklygyndan kiçi basyş astynda bug halyna geçmezden, suwuk halda alnyp bilner; bu hala izotermanyň 3 – 3' bölegi degişlidir. Izotermanyň aşak sallanyan 2' - 3' bölegine maddanyň bütinleý durnuksyz haly degişlidir.



9.4-nji surat. Hakyky gazyň izotermasynyň şekillendirilişi.

S – suwuklyk haly, $S+B$ – suwuklyk we bug halynda, B – bug halynda, G – gaz halynda.

9.4-nji suratdaky dürli temperaturalarda alnan real izotermalary we 9.3-nji suratdaky teoritiki we eksperimental izotermalaryň deňeşdirilişini derňäp, kritiki izotermalaryň üç oblasta bölünýändigine göz ýetirmek kyn däl (9.4-nji surat). Öwrüm nokadynyň aşagynda ýogyn egri çyzyk bilen çäklenen oblast maddalaryň iki fazadaky: suwuklyk görnüşindäki we gaz görnüşindäki (doýan bug görnüşinde) halyna degişlidir; çepdäki oblast – maddalaryň suwuk halyna, sagdaky oblast bolsa, maddalaryň gaz halyna degişlidir. Doýan buguň gaz halyndaky maddalardan esasy tapawudy – ony izotermiki gysanynda suwuklyga öwürlmegidir. Gaz bolsa, kritiki temperaturadan ýokary temperaturalarda basyş näçe ýokary bolsa-da, suwuklyga öwürülmeýär.

§9.5. *Real gazyň içki energiýasy*

Real gazyň içki energiýasy kesgitlenilende, molekulalaryň kinetik energiýalaryndan başga-da, olaryň potensial energiýalaryny-da hasaba almaly bolýar. Sebäbi, real gazyň içki energiýasy bu energiýalaryň jemine deňdir. Ýagny:

$$U = U_k + U_p \quad (9.6)$$

1-nji paragrafdan belli bolşy ýaly, molekulalaryň aralygy kiçi bolan ýagdaýynda, položitel itekleşme güýçleri ýüze çykýar we bu güýçlere položitel potensial energiýa degişlidir. Otrisetel bolan çekişme güýçlerine bolsa, otrisetel potensial energiýa degişlidir.

Molekulalaryň öňe we aýlanma hereketleriniň kinetik energiýasy ideal gazyň içki energiýasyny kesgitleýär ((8.29) aňlatma seret):

$$U_1 = \frac{i}{2} RT, \text{ ýöne } \frac{i}{2} R = C_V \text{ şonuň üçin}$$

$$U_k = U_l = C_V T \quad (9.7)$$

bu ýerde: C_V – izohorik molýar ýylylyk sygymy, T – absolýut temperaturasy.

Molekulalaryň özara täsir güýçleriniň dA işi gazyň içki basyşyny (p_i) döredip, onuň göwrüminiň üýgemegine getirýär (dV), şeýlelikde, ol işiň ululygy:

$$dA = p_i dV$$

deňdir. 9.2-nji paragrafdan belli bolşy ýaly, içki basyş $p_i=a/V^2$, şeýlelikde dU_2 işiň ýerine ýetirilmegi netijesinde potensial energiýanyň üýtgemegi

$$dU_2 = \frac{a}{V} dV$$

deňdir.

Şu aňlatmany integrirläp, alarys:

$$U_2 = -\frac{a}{V} + c$$

Integrirlemäniň c hemişeligi berlen şerte görä kesgitlenilýär. Göwrüm çäksiz ulalanda, molekulalaryň arasyndaky uzaklyk artýar, şu halatda potensial energiýany nola deň diýip almak bolar. Onda:

$$c=0$$

we çakli V göwrüm üçin potensial energiýa

$$U_n = U_2 = -\frac{a}{V} \quad (9.8)$$

bolýar. Şeýlelikde, bir mol real gazyň u içki energiýasy molekulalaryň kinetik we potensial energiýalarynyň jemine deňdir, ýagny, (9.7) we (9.8) formulalary (9.6) formulada ornuna goýup, alarys:

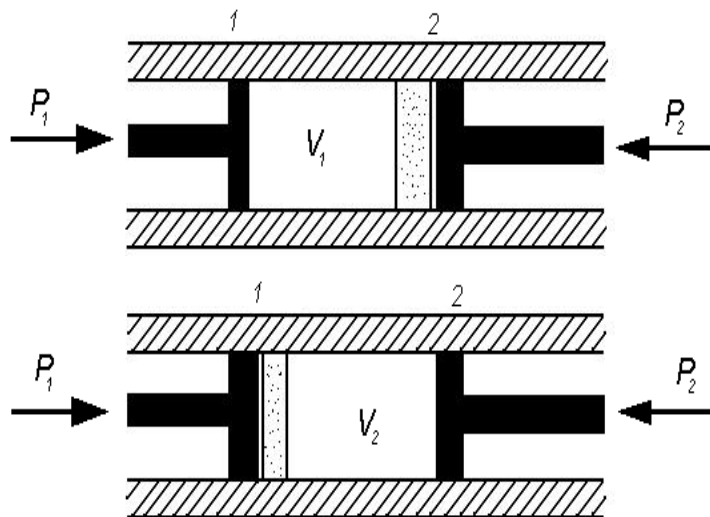
$$U = c_v T - \frac{a}{V} \quad (9.9)$$

(9.9) formuladan görnüşi ýaly, real gazyň içki energiýasy onuň T temperaturasyna we V göwrümüne baglydyr.

§9.6. Joulyň-Tomsonyň effekti

Eger U ideal gaz adiabatik giňelende iş edýän bolsa, ol sowaýar. Sebäbi, onuň ýerine ýetirýän işi içki energiýasynyň hasabyna edilýär.

Şuňa golaý, ýöne real gazlar bilen bolan prosesi – real gazyň adiabatik giňelende daşky güýçleriň ýerine ýetirýän položitel işini ilkinji gezek inlis fizikleri J.Joul (1818-1889) we U.Tomson (1824-1907) kesgitlediler.



9.5-nji surat. Joulyň-Tomsunyň effekti.

Joulyň-Tomsunyň effekteine seredeliň. 9.5-nji suratda olaryň tejribeleriniň shemasy görkezilendir. Ortasy öýjükli maddadan edilen dykyly, ýylylykdan izolirlenen silindriň içinde iki sany porşen bar. Porşenler hiç hili sürtülmesiz hereket edip bilýärler .

Goý, ilki başda dykynyň çep gapdalynda (porşen bilen aralykda) basyşy p_1 , göwrümi V_1 we temperaturasy T_1 haldayky gaz bolsun. Dykynyň sagynda gaz ýok (porşen 2 dyka degip dur). Dykynyň üstünden gaz geçenden soňra, sag tarapdaky gazyň parametrleri p_2 , V_2 we T_2 bilen häsiýetlendirilýär. Silindrdäki p_1 we p_2 basyşlar hemişelik saklanylýar. Bu şertlerde:

$$dQ=(U_2-U_1)+dA=0. \quad (9.10)$$

Gazyň ýerine ýeirýän daşky işi porşen 2-niň saga süýşeninde ýerine ýetirýän položitel işinden ($A_2-p_2V_2$) we porşen 1-iň saga hereket edeninde ýerine ýetirýän otrisatel ($A_1=p_1V_1$) işinden ybaratdyr, ýagny, doly iş $dA=A_2-A_1$ deň bolar. Bularyň bahalaryny (9.10) deňlikde goýup, alarys:

$$U_1+p_1V_1=U+p_2V_2 \quad (9.11)$$

Şeýlelikde, Joulyň-Tomsonyň effekteinde $U+pV$ ululyk üýtgemän galýar. Oňa entalpiýa diýilýär. Başga söz bilen aýdanymyzda, gaz uly basyşly çep tarapdan dykynyň üsti bilen saga geçip, adiabatik giňedeninde ol sowaýar. Şeýle-de, daşky gurşaw bilen ýylylyk

çalyşmazdan, we daşky işleri etmezden, gazyň temperaturasynyň üýtgemeginden ybarat bolan bu effekt Joulyň-Tomsonyň effekti diýen ady aldy. Ol real gazlaryň häsiýetleriniň ideal gazlaryň häsiýetlerinden tapawutlanýandygynyň netijesidir.

Basyşlaryň tapawudynyň netijesinde, gaz öýjükli maddadan ýasalan dykynyň üstünden geçende sowaýan bolsa, oňa položitel effekt, eger-de gyzyan bolsa ($\Delta T > 0$), otrisatel effekt diýip atlandyrmak kabul edilen. Gazyň geçiş şertine göre, şol bir gaz Joulyň-Tomsonyň položitel effektini-de, otrisatel effektini-de berip biler. Eger gaz giňelende gyzmaýan-da, hem-de sowamaýan-da bolsa, onda Joulyň-Tomsonyň effekti nola deňdir.

Joulyň-Tomsonyň položitel effekti gazlar gysylanda pes temperaturalary almak üçin ulanylýar.

§9.7. Suwuklyklaryň häsiýetleri. Üst dartylmasy

Suwuklyklar özleriniň agregat hallary boýunça gazlar bilen gaty jisimleriň aralygynda ýerleşendirler. Şonuň üçin olar gaz halyndaky maddalaryň-da, gaty halyndaky maddalaryň-da häsiýetlerine eýedirler. Suwuklyklar gaty jisimler ýaly kesgitli göwrümi eýeleýärler. Gazlar ýaly, ýerleşen gaplarynyň formasyny alýarlar.

Wan-der-Waalsyň deňlemesi maddanyň suwuk haldan gaz halyna kritiki nokadyň üsti bilen üznüksiz geçmeginiň mümkindigini görkezýär. Kritiki nokadyň golaýynda gaz bilen suwuklygyň tapawudy sähelçedir, şu sebäbe göre suwuklyga käbir derejede dykyz gaz hökmünde garamak bolar. Emma Wan-der-Waalsyň şol deňlemesi kritiki temperaturadan has aşak temperaturalarda suwuklyk we gaz hallarynyň arasyndaky tapawudyň has mese-mälim ýüze çykýandygyny görkezýär.

Gazlarda molekulalaryň arasyndaky uzaklyklar suwuklyklaryň molekulalarynyň arasyndakydan birnäçe esse uludyrlar. Gazda molekulalaryň ýylylyk hereketiniň ortaça kinetik energiýasy molekulalaryň arasyndaky dartýşma güýçlerini ýeňip geçmek üçin ýeterlikdir, munuň özi gaz molekulalarynyň ähli tarapa dargap, gazyň ýerleşen gabynyň ähli göwrümini eýelemegine eltýär.

Suwuklyklarda, tersine, ýylylyk hereketiniň ortaça kinetik energiýasy işme güýçlerini ýeňmäge ýeterlik däl.

Suwuklyklaryň teoriýasy häzirki wagta çenli doly işlenilip gutarylanok. Emma olaryň häsiýetleriniň örän çylşyrymlydygy baradaky ilkinji kesgilemeler Ýa.I.Frenkele (1894-1952) degişlidir. Frenkeliň teoriýasyna göre, suwuklyklardaky ýylylyk hereketi şeýle häsiýetde

bolýar. Her bir molekula käbir wagt aralygynyň dowamynda belli bir deňagramly ornunyň töwereginde yrgyldaýar. Ol deňagramly ornuny öz ölçeği ýalyrak aralyga üýtgedýär. Şeýlelik bilen, molekulalar suwuklygyň içinde belli bir ornuň töwereginde az-kem saklanyp, haýallyk bilen ornuny üýtgedip durýar.

Ondan başga-da, Ýa.I.Frenkel suwuklyklarda molekulalaryň ýylylyk hereketleriniň häsiýetlerinden ugur alyp, suwuklygyň şepbeşikliginiň temperatura baglanyşygynyň

$$\eta = Ae^{\frac{\Delta E_p}{kT}}$$

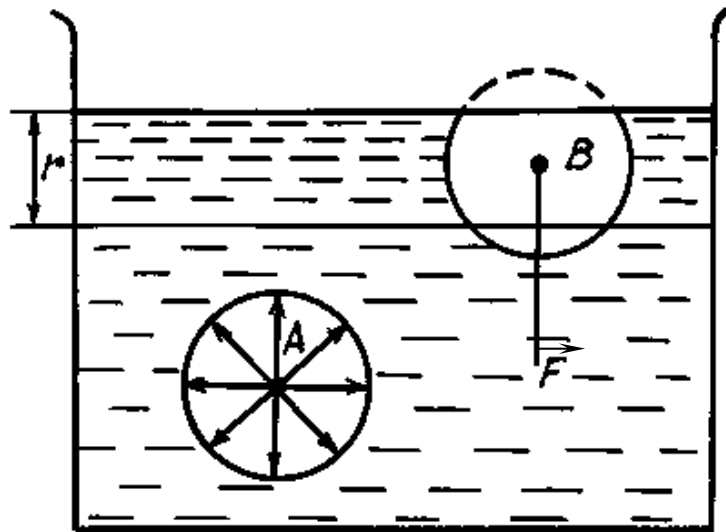
formula bilen aňladylmalydygyny görkezdi. Bu ýerde E_p – molekulanyň potensial energiýasy.

Temperaturanyň ýokarlanmagy bilen molekulanyň yrgyldy hereketiniň ýygylgy artýar, bu bolsa olaryň şepbeşikliginiň azalmagyna getirýär.

Suwuklygyň her bir molekulasynda, aralygyň artmagy bilen çalt kiçelýän goňşy molekulalar tarapyndan çekişme güýçleri täsir edýär: şeýlelikde, belli bir aralyga barandan soňra molekulara çekişme güýçlerini hasaba almaly hem bolýar. Şu aralyga ($10^{-9}m$) – molekulýar täsiriň radiusy diýilýär (r), r radiusly sfera bolsa – molekulýar täsiriň sferasy diýilýär.

Suwuklygyň içinden haýsydyr bir A molekulany bölüp alalyň (9.6-njy surat) we onuň töwereginden r radiusly sferany çyzalyň. Şu ýagdaýda diňe r radiusly sferanyň içinde bolýan molekulalaryň berlen molekula edýän täsirini hasaba almak ýeterlikdir. Şu molekulalaryň A molekula täsir edýän güýçleri dürli taraplara gönükdirilendir we orta hasap bilen kompensirlenýärler. Şeýlelik bilen, suwuklygyň içinde ýerleşen molekula beýleki molekulalaryň edýän jemleýji güýji orta hasap bilen nola deňdir. Suwuklygyň üstüniň golaýyndaky molekulalarda ýagdaý başgaçadyr. Suwuklygyň üstünden molekulýar täsiriň r radiusyndan kiçi aralykda ýerleşen B molekula garalyň.

9.6-njy suratdan görnüşi ýaly, molekulýar täsiriň sferasy suwuklygyň içine kem-käsleýin girýär, onuň bir bölegi bolsa suwuklygyň daşynda bolar. Şeýlelikde, suwuklygyň üstünde ýerleşen gazyň molekulalarynyň sany suwuklykdaky olaryň sanyndan has kiçi. Şonda B molekula dürli taraplardan täsir edýän molekulalaryň sany deň bolmaz we olaryň B molekula täsir edýän güýçleri ortaça kompensirlenmez; suwuklygyň içine tarap ugrukdyrylan jemleýji F güýç dörär.



9.6-njy surat. Suwuklygyň üst dartylmasynyň şekillendirilişi.

Şeýlelikde, suwuklygyň üstünden (ýüzünden) molekulýar täsiriň r radiusyndan kiçi aralykda bolýan her bir molekula beýleki molekulalardan suwuklygyň içine tarap gönükdirilen güýç täsir edýär. Şeýlelik bilen, üstki gatlagyň ähli molekulalarynyň jemleýji güýji suwuklyga basyş edýär. Bu basyşa molekulýar basyş diýilýär.

ÜST DARTYLMASY. Belli bir göwrümde ähli geometrik jisimlerden iň kiçi üstlusi sferadyr. Şoňa görä-de, belli bir suwuklyk massasynyň haýsy bolsa-da bir sferik däl formadan sferiki forma geçmegi onuň üstüniň kiçelmegi bilen baglydyr. Ýagny, suwuklygyň sferiki formany almagynda sebäp bolýan zat olaryň molekulýar basyş güýçleriniň täsiridir.

Suwuklygyň üstüniň boýuna baka we şol üsti çäklendirýän çyzyklara perpendikulýar täsir edýän we ony minimuma çenli kiçeltmäge ymtylýan güýje üst dartyş güýji diýilýär.

Eger üste täsir edýän güýji F bilen bellesek, onda:

$$F = \alpha l \quad (9.12)$$

bolar. Bu ýerde l – suwuklygyň üst uzynlygy.

Suwuklygyň tebigatyna bagly bolan α – koeffisiýente üst dartylmasynyň koeffisiýenti diýilýär.

(9.12) aňlatmadan:

$$\alpha = \frac{F}{l} \quad (9.13)$$

α koeffisiýentiň fiziki manysy - ol üstüň araçäginiň uzynlyk birligine düşýän üst dartyş güýjüniň ululygyny görkezýär. Ol N/m

hasabynda aňladylýar. α koeffisiýent temperatura baglydyr, temperatura ýokarlandygaça, ol kiçelýär.

Suwuklygyň temperaturasy T_k – kritiki temperatura golaýlaşanda, üst dartyş α koeffisiýenti nola ymtylýar.

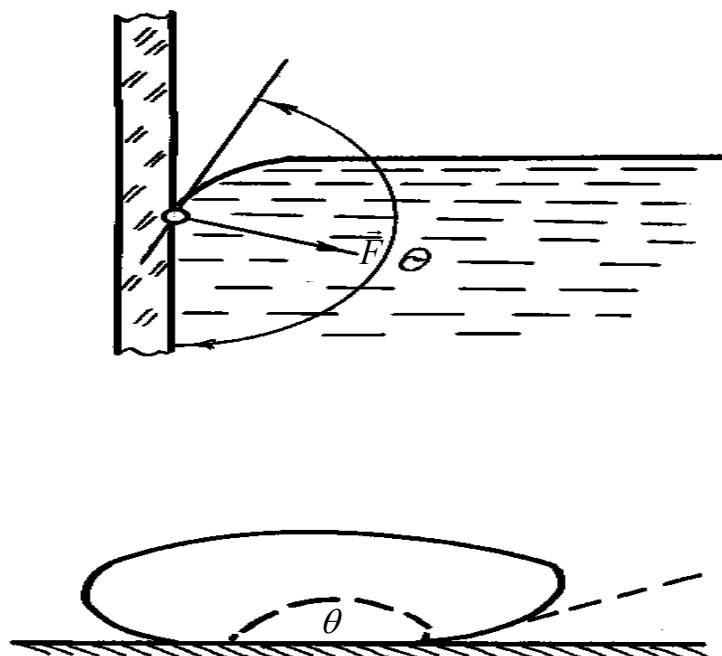
§9.8. Suwuklyk bilen gaty jisimiň araçägindäki hadysalar. Öllenmek

Suwuklyklar bilen gaty jisimleriň araçäginde öllenme ýüze çykýar. Öllenme – suwuklyklaryň molekulalary bilen gaty jisimleriň molekulalarynyň özara täsiri netijesinde döredýän we suwuklyklaryň üstlerini gaty jisimiň üstiniň ýanynda egrelmeklige getirýän hadysadyr. Suwuklyk gaty jisimlere görä ölleýän we öllemeýän – iki topara bölünýärler. Mysal üçin, suw aýnany ölleýär, parafini öllemeýär; simap aýnany öllemeýär. Emma platinany bolsa ölleýär.

Eger suwuklygyň molekulalarynyň arasyndaky özara täsir güýçleri suwuklyk bilen gaty jisimiň molekulalarynyň arasyndaky özara täsir güýçlerden uly bolsa, suwuklyk gaty jisimi öllemeýär. Öllemeýän mahalda suwuklygyň gaty jisimiň daşyna öwrülip duran gatlagynda netijeleýji güýç suwuklyk tarapa gönükdirilendir. (9.7-nji surat). Deňagramly ýagdaýda suwuklygyň üsti güýje normal ýerleşýär, şonuň netijesinde öllemeýän suwuklygyň üsti dikligine duran gaty diwaryň ýüzünde, 9.7-nji a suratda görkezilişi ýaly, ýerleşer. Öllemeýän suwuklygyň damjasy gorizontel üstde birneme maşşaran sferanyň formasyny alar (9.7-nji b surat). Suwuklygyň üstüne we gaty jisimiň üstünde geçirilen galtaşma çyzyklarynyň arasyndaky θ burça ölleme burçy ýa-da gyra burçy diýilýär.

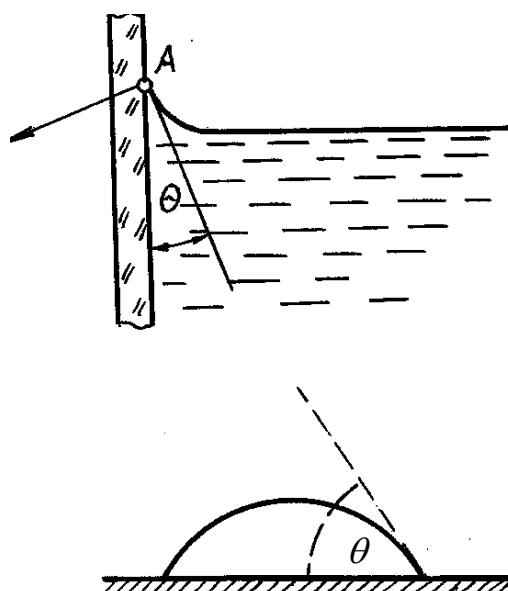
Öllenmeýän halysda gyra burçy kütek bolýar we $\pi/2 \leq \theta \leq \pi$ aralykda ýatýar. Haçanda $\theta = \pi$ bolanda suwuklyk gaty üsti doly öllemeýär.

Ikinji halatda, ýagny suwuklygyň molekulalarynyň arasyndaky özara täsir güýçleri suwuklyk bilen gaty jisimiň molekulalarynyň arasyndaky özara täsir güýçlerden az bolan wagtynda, suwuklyk gaty jisimi ölleýär. Bu halatda netijeleýji güýç gaty jisim tarapa gönükdirilendir. Şonda gyra burçy ýitidir, ýagny $0 \leq \theta \leq \pi/2$. Haçan $\theta = 0^\circ$ bolanda doly öllenme bolýar.



9.7-nji surat. Gaty jisimi öllemeyän suwuklygyň üstüniň şekillendirilişi.

9.8-nji a suratda dik (wertikal) duran gaty jisimiň ýüzünde ölleýän suwuklygyň üstüniň ýerleşişi, 9.8-nji b suratda bolsa ölleýän suwuklygyň gorizontál üstäki damjasynyň görnüşi görkezilendir. Öllenmäniň senagatda we durmuşda uly ähmiýeti bardyr. Reňklenende, ýuwlanda, fotografik materiallar işlenende, üstler lak bilen örtülende, dürli detallary biri-birine kebşirmekde we ş.m. giňden ulanylýar.

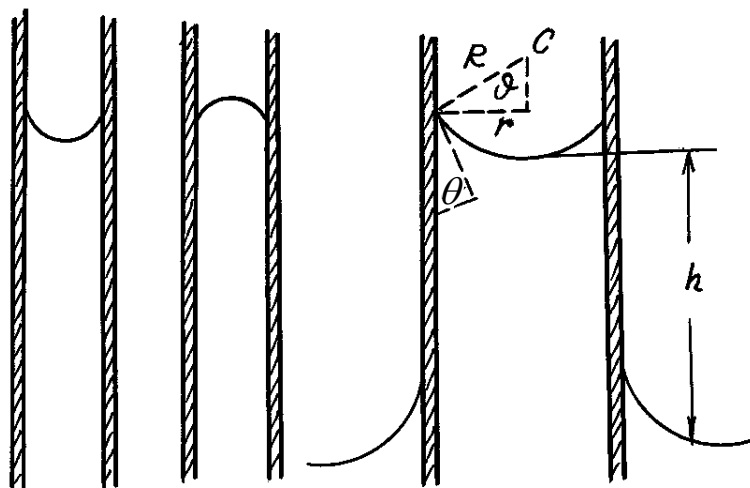


9.8-nji surat. Öllemeyän suwuklygyň üstüniň şekillendirilişi.

§9.9. Kapillýar hadysalar

Kapillýar hadysalar diýip, suwuklygyň giň turbadaky derejesi bilen deňeşdirende, onuň inçejik turbajyklarda ýokaryk galmagyna ýa-da aşak düşmegine aýdylýar.

Inçejik silindrik turbadaky ölleýän suwuklygyň üsti çöket formada bolýar. (9.9-njy a surat), öllemeýän suwuklygyňky bolsa, güberçek formada bolýar (9.9-njy b surat). Suwuklygyň şonuň ýaly egri üstlerine meniskler diýilýär.



9.10-njy surat. Inçe turbalarda suwuklygyň üstüniň egrelişi.

Bir uýy giň gapdaky suwuklygyň içine sokulan inçejik turbajyga garap geçeliň. Goý, suwuklyk turbanyň ýasalan materialyny ölleýän bolsun. Onda turbajygyň içinde suwuklygyň egri üsti (menisk) çöket bolar (9.10-njy surat) we ol turbajygyň tegelek kesiginde takmynan sferanyň formasyny alar (kapillýar ulaldylan görnüşinde görkezilen). Çöket üstüň aşagynda goşmaça otirisatel basyş peýda bolar:

$$p = 2\alpha/R$$

α – üst dartylmasyň koeffisiýenti, R – suwuklygyň üstüniň radiusy.

Giň gapdaky suwuklygyň tekiz üstüniň aşagynda goşmaça basyşyň ýokdugy sebäpli, suwuklyk turbajygyň içi bilen suwuklyk sütüniň p basyşy deňagramlaşdyrýança galyp, h beýiklige ýeter:

$$p = \rho gh$$

Bu ýerde ρ – suwuklygyň dyzyklygy, g – agyrlyk güýjüniň tizlenmesi; bu ýerden deňagramlylyk şertiniň görnüşi şeýle bolar:

$$p = \frac{2\alpha}{R} = \rho gh \quad (9.14)$$

Turbajygyň radiusyny r bilen we gyra burçuny θ bilen belläp, (9.10-njy surat) alarys:

$$R = \frac{r}{\cos \theta}$$

Bu ýerden suwuklygyň ýokary galyş beýikligi

$$h = \frac{2\alpha \cos \theta}{r\rho g} . \quad (9.15)$$

Eger suwuklyk diwary doly ölleýen bolsa, ýagny $\theta=0$, onda kapillýarda suwuklygyň ýokary göterilen beýikligi

$$h = \frac{2\alpha}{\rho gr} \quad (9.16)$$

bolar. Alnan aňlatma Jýureniň kanuny diýilýär. Kapillýaryň radiusy näçe kiçi bolsa, onda suwuklyk şonça-da ýokary göterilýär.

Eger suwuklyk turbajygyň materialyny öllemeyän bolsa, onda turbajygyň içindäki menisk güberçekdir, şol meniski döredýän basyş položitelidir we turbajykdaky suwuklygyň derejesi gabyň giň bölegindäkiden aşakdadyr. Öllemeyän suwuklygyň h derejesiniň peselişiniň ululygy hem ölleýän suwuklygyň ýokary galyş beýikligini aňladýan (9.16) aňlatma bilen kesgitlenilýär.

Kapillýarlyk hadysasy tebigatda we durmuşda uly ähmiýete eýedir.

Mysal üçin, içinden inçejik kanaljyklaryň (kapillýarlaryň) köp mukdary geçýän jisim suwy we beýleki suwuklyklary özüne örän gowy siňdirýär. Diňe suwuklyklaryň jisimiň üstüni öllemegi zerurdyr; el süpürilende el süpürgiç (polotensa) suwy özüne siňdirýär, çyranyň peltesinde kerosin kapillýarlar boýunça ýokary galýar, we şol ýerde ýanýar, köp sanly kapillýarlar arkaly toprakdaky suw ýokary galýar we güýçli bugarýar, munuň özi ösümlüklere zerur bolan çyglylygyň ýitmegine eltýär. Azyk önümlerinden, mysal üçin, çörekde, kapillýarlyk uludyr. Kapillýarlyk hadysany jaý gurluşygynda hem göz önünde tutmaly bolýar.

§9.10. Gaty jisimler we olaryň häsiýetleri. Kristallik we amorf jisimler

Gaty jisimleriň atomlary we molekulalary suwuklyklaryňkydan tapawutlylykda, kesgitli deňagramlylyk ýagdaýynyň golaýynda yrgyldap durýarlar. Olar diňe bir öz göwrümlerini däl-de, (suwuklyklardan tapawutlylykda), eýsem, formalaryny hem saklaýarlar. Gaty jisimler köplenç kristal hallarda bolýarlar. Kristallar - atomlary we molekulalary ginişlikde belli bir tertipli ýagdaýda bolýan gaty jisimlerdir.

Maddalaryň kristallik halynyň esasysy olaryň anizotropikligi – ýagny, bir hilli jisimiň dürli ugurlarda dürli häsiýetiniň bolmagydyr. Mysal üçin, kristallik jisimiň ýylylykdan giňelmesiniň koeffisiýenti, olaryň mehaniki, optiki we elektrik häsiýetleri dürli ugurlarda dürli-dürlüdürler.

Gaty jisimler, kristallik jisimlerden başga-da, amorf jisimlere hem bölünýärler. Amorf jisimlere aýna, dürli hilli aýna şekilli maddalar, smolalar, bitumlar we ş.m. degişlidir. Olaryň tebigy taýdan belli bir kesgitli formalary bolman, olara işlemegiň netijesinde dürli formalary berip bolýar. Kristallik jisimleriň her haýsysy belli bir kesgitli temperaturalarda ereýärler, amorf jisimler bolsa, birsyhly gaty haldan suwuk hala geçip durýarlar (kesgitli eremek tempratlary ýok). Olar izotropikdirler, ýagny amorf jisimleriniň ähli ugurlarda birmeňzeş häsiýetleri bardyr.

Kristallik jisimleriň dogry geometriki formalary bardyr. Ony ilkinji gezek nemes fizigi-teoretigi M.Laue (1879-1960) rentgenografik barlaglaryň netijesinde anyklady.

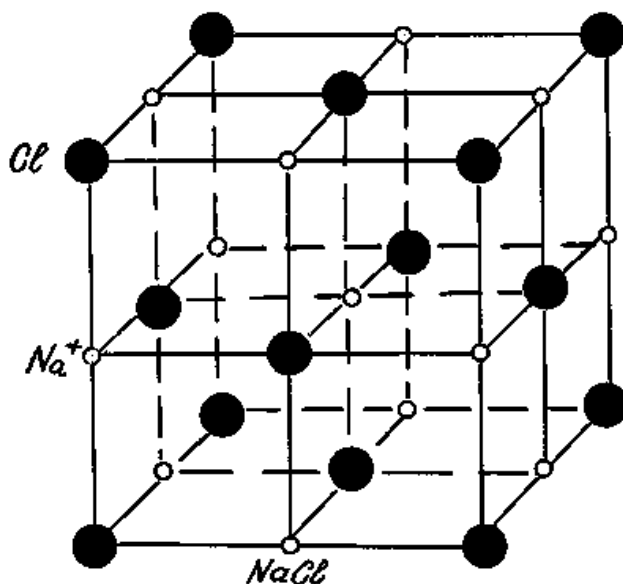
Kristalyň daşky simmetriýasy kristaly emele getirýän bölejikleriň simmetrik ýerleşişiniň netijesidir. Atomlar kristallarda biri-birine görä simmetrik ýerleşip (üç ölçegi boýunça), kristallik gözenegini emele getirýärler.

Gaty jisimi emele getirýän her bir atom ähli goňşy atomlaryň özara täsir güýçleriniň täsiri astynda bolýar. Atomlar kesgitli kristallik gözenegiň burçlarynda ýerleşende, atomlaryň her birine täsir edýän güýçler biri-birini kompensirleýär we atom deňagramlylykda durýar. Atomlar şunuň ýaly ýerleşende olaryň özara potensial energiýasynyň minimumy laýyk gelyär, bu bolsa bütün kristalyň tutuşlygyna berk bolmagyna sebäp bolýar. Şeýlelik bilen, kristalyň gurluşy örän çylşyrymly bolup, onuň berkligi içki simmetriýasy bilen şertlenendir.

Kristaly emele getirýän atomlaryň arasyndaky özara täsir güýçleri dürli häsiýetde bolýarlar. Duzlaryň kristallarynda atomlar elektriki

taýdan zarýadly bolýarlar, olar ionlardyr. Položitel we otrisatel ionlar kristal tutuşlygyna neýtral ýagdaýda galar ýaly bolup gezekleşýärler. Geteropolýar gözenek diýip atlandyrylýan şunuň ýaly ion gözeneginde bölejikleriň arasyndaky özara täsir güýçleri esasan elektrostatik güýçleridir.

9.11-nji suratda iň ýönekeý we kub sistemasyna degişli bolan nahar duzunyň ($NaCl$) kristallik gözenegi görkezilendir. Natriniň ionlary ak tegelejikler bilen şekilleňdirilendir Na^+ (olar položitel zarýadly), hloryňky bolsa, gara tegelejikler bilen – Cl^- (otrisatel zarýadly) şekillendirilýär. Bölejikleriň tebigatyna, kristallik gözenegiň düwünleriň-de ýerleşişine, olaryň aralygyndaky özara täsir güýçlerine baglylykda kristallar biziň ion ($NaCl$) kristalymyzdan başga-da, atom, metallik we molekulýar kristallaryna bölünýärler.



9.11-nji surat. Nahar duzunyň kristal gözenekleri.

Kristal gözeneginiň düwünlerinde neýtral atomlar ýerleşen bolsa, olara atom kristallary, kristal gözeneginiň düwünleri neýtral molekulalardan (kömür kislotasynyň kristaly, parafin) doldurylan bolsa, olara molekulýar kristallary diýilýär. Molekulýar kristallarynda molekulalaryň aralygyndaky özara täsir güýçleri Wan-der-Waalsyň güýçlerine degişlidir.

Metallik kristal gözeneklerine düwünleri položitel zarýadlanan ionlardan we olaryň aralary hereket edýän erkin elektronlardan ybarat bolan gözenekler digişlidir. Hereket edýän erkin elektronlaryň toplumyna elektron gazy diýilýär.

Atom kristallaryna: almaz, grafit, birnäçe organiki däl birleşmeler – ZnS , Be , Ge , Si ýaly tipiki ýarymgeçirijiler; metallik

kristallaryna: *Cu, Ag, Pt, Au* ýaly metallar, molekular kristallaryna: köp sanly organiki birleşmeler, parafin, spirt, rezin, inert gazlary – *Ne, Ar, Kr, Xe* we *CO₂, O₂, N₂* ýaly gazlar degişlidir.

Gagy jisimleri, ýene-de, monokristala we polikristala bölmek bolar. Monokristallarda – gaty jisimiň maýdaja bölejikleri bir bitewi, ýeke-täk kristallik strukturany (gurluşy) emele getirýär. Kiçijik krisdtallaryň köp sanyndan ybarat bolan gaty jisime polikristallik jisim diýilýär. Polikristallardan, metallardan başga-da mysal üçin, gant böleginiň hem polikristallik strukturasy bardyr.

§9.11. Gaty jisimleriň ýylylyk hereketi we ýylylyk sygymy. Dýulongyň-Ptiniň formulasy

Kristallik gaty jisimiň kristallik gözenegini emele getirýän her bir bölejik (atom ýa-da ion) deňagramlylyk ýagdaýynyň töwereginde yrgyldaýar. Şol yrgyldylaryň energiýasyny hem gaty jisimiň içki energiýasy düzýär. Şeýlelik bilen, gaty jisimdäki bölejikleriň hereketinden öz häsiýetleri boýunça tapawutlanýar. Gaty jisimiň kristallik gözeneginde atomyň ýa-da ionyň belli bir deňagramlylyk ýagdaýynda yrgyldamagyndan başga-da, olarda bölejikler, umuman aýdanyňda, bir ýerden başga bir ýere geçip bilýärler. Emma, bu geçişmek örän seýrek bolýar. Gaty jisimlerde diffuziýa aşa haýal bolup geçýär.

Gaty jisimleriň temperaturasy ýokarlanda, deňagramlylyk ýagdaýynda yrgyldap duran atomlaryň bu ýagdaýdan çykmalary artýar, bu bolsa olaryň ýylylykdan giňelmegine eltýär.

Gaty jisimiň 0°C temperaturadaky uzynlygyny l_0 bilen, t gradusdakysyny l_t bilen bellesek, onda onuň t temperaturadaky ulalyşyny şeýle kesgileýäris:

$$l_t = l_0 + \Delta l = l_0(1 + \alpha t).$$

Bu ýerde: α – gaty jisimiň ýylylykdan uzynlygyna giňelme koeffisiýentidir. Eger jisimiň dürli taraplara giňelişi bir deň bolmasa (anizotropik), onda temperaturanyň artmagy onuň formasynyň üýtgemegine getirýär.

Eger uzynlygyna giňelmekligi ähli ugurlar boýunça deň diýip hasap etsek, onda göwrüminiň temperatura görä üýtgemegi şeýle kanunalaýyklyga gabat gelýär:

$$V = V_0(1 + \beta t).$$

V_0 we V – jisimiň degişlilikde 0°C we t gradus temperaturadaky göwrümleri, β – göwürme giňelme koeffisiýenti. Biziň seredýän şertimizde uzynlygyna we göwürüme giňelme koeffisiýentleriniň şeýle baglanyşygy bar:

$$\beta = 3\alpha.$$

Gaty jisimleriň giňelme koeffisiýentleriniň bahasy kiçi bolup, 10^{-5} - 10^{-6} K^{-1} aralygynda ýatýaralar. Gaty jisimler gyzdyrylanda, erkin giňelip bilmeseler, onda gyzdymagyň netijesinde uly mehaniki basyşy döredip bilýärler, olary durmuşda we tehnikada hasaba almaly bolýar. Şol dartgynlyklaryň bolmazlygy üçin demirýol relslerini goýanlarynda, olaryň seplesýän ýerlerini açyk goýýarlar. Köprüler gurlanda we başga-da köp ýerlerde temperaturanyň üýtgemesini hasaba almaly bolýar.

GATY JISIMLERIŇ ÝYLYLYK SYGYMY. Kristallik gözenegi emele getirýän bölejikler (atomlar ýa-da ionlar), biri-biri bilen baglanyşyklydyrlar. Sebäbi, olaryň arasynda ep-esli derejede özara täsir güýji bardyr. Şonuň üçin-de, olaryň yrgyldylaryna baglanyşykly yrgyldylar hökmünde garamak bolar: tutuş gözenekde dürli ýygyllykly yrgyldylar ýüze çykýar, olaryň energiýalary bolsa hasaba alynmalydyr. Şeýle-de bolsa, ýeterlik ýokary temperaturalarda, haçan-da yrgyldylaryň energiýasy uly bolanda, bölejiklere baglanyşyksyz bölejikler hökmünde garamak bolar. Bölejikleriň her biri deňagramlylyk ýagdaýynyň töwereginde yrgyldyly hereket edýär. Bölejigiň yrgyldylarynyň ortaça energiýasyny kesgitlemek üçin onda kinetik energiýanyň-da, potensial energiýanyň-da ätiýaçlyk mukdarynyň (zapasynyň) bardygyny göz önünde tutmak gerek.

Atomlaryň yrgyldamasy üç ok boýunça ugrukdyrylandyr. Şonuň üçin atomyň yrgyldy hereketine üç erkinlik derejesi bolan maddy nokadyň hereketi hökmünde seretmek bolar. Energiýa erkinlik derejeleriň hemmesine deň bölünendir.

Yrgyldy hereketiniň bir erkinlik derejesine şeýle orta kinetiki energiýa düşýär:

$$\langle W_1 \rangle = kT / 2$$

Şeýle mukdarda hem potensial energiýa:

$$\langle W_2 \rangle = kT / 2$$

Şeýlelikde, atomyň bir erkinlik derejesine düşýän doly energiýasy kT , üç sany erkinlik derejesine bolsa,

$$W=3kT$$

energiýa düşýär. Maddanyň bir molunyň içki energiýasy

$$u=WN_A=3kT \cdot N_A,$$

bolar. Bu ýerde N_A – Awogadronyň sany, k – Bolsmanyň hemişeliginiň $k=R/N_A$ deňdigini hasaba alsak, onda:

$$U=3RT \quad (9.17)$$

R – uniwersal gaz hemişeligi.

Atom (ýa-da degişlilikde molýar) ýylylyk sygymy

$$C = \frac{dU}{dt}$$

deňdir. Onda (9.17) formulany hasaba alyp, şeýle ýazyp bolar:

$$C = 3R \quad (9.18)$$

ýagny, himiki taýdan ýönekeý kristallik gaty jisimleriniň molýar (atom) ýylylyk sygymy $3R$ deňdir we temperatura bagly däldir.

Bu empirik (tejribe üsti bilen alnan) kanun fransuz alymlary P.Dýulong (1785-1838) we L.Pti (1791-1820) tarapyndan açylýar. Şonuň üçin hem bu kanuna Dýulongyň we Ptiň kanuny diýilýär.

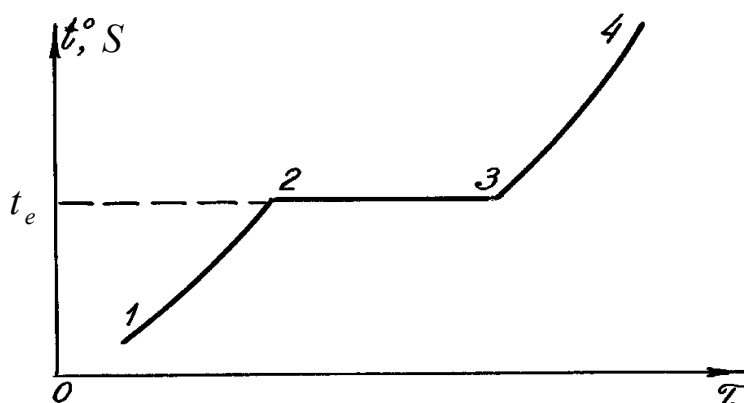
§9.12. Agregat hallaryň üýtgemegi

Tebigatdaky real jisimleriniň köpüsi üç faza halynda-da bolup biler: gaty, suwuklyk we gaz görnüşlerinde. Faza diýip, şol bir maddanyň fiziki häsiýetleri boýunça beýleki deňagramlylyk hallarynda tapawutlanýan termodinamik deňagramlylyk halyna aýdylýar. Mysal üçin, agzy ýapyk gapda duran suw iki faza halynda bolýar: suwuk faza – suw we gaz görnüşli faza – suw bugy bilen howanyň garyndysy. Eger suwa bir bölejik buzy taşlasak, ol sistema üç fazaly bolýar. Ondaky buz gaty fazadyr. Şeýlelikde, faza düşüňjesi dar we giň manyda ulanylyp, käte maddanyň agregat haly bilen gabat gelýär. Maddanyň bir fazadan ikinji bir faza geçmegine faza geçişi diýilýär. Iki jynsly faza geçişi bardyr:

BIRINJI JYNSLY faza geçişi temperaturanyň hemişeligi bilen häsiýetlendirilýär. Mysal üçin, eremeklik ýa-da gatamaklyk kesgitli ýylylyk mukdarynyň berilmegi bilen ýa-da bölünmegi bilen bolup geçýär. Birinji jynsly faza geçişine gaty jisimiň bir kristallik modifikasiýasyndan beýlekisine geçmegi hem degişlidir.

IKINJI JYNSLY faza geçişine: ferromagnit maddalarynyň (demir, nikel) kesgitli basyşlarda we temperaturada paramagnit halyna geçmegi, metallaryň we birnäçe garyndylaryň 0°K golaý temperaturada aşageçirijilik ýagdaýyna geçmegi mysal bolup biler. Bu geçişler göwrümiň we entropiýanyň hemişeliginde ýylylyk sygymynyň çörtkesik üýtgemegi bilen häsiýetlendirilýär.

Maddanyň suwuk halyndan kristallik gaty halyna geçmekligi belli bir temperatura çenli suwuklygyň sowamagyna getirýär. Şeýlelikde, bölejikleriň arasyndaky özara täsir güýçlenýär, olaryň hereketiniň intensiwligi azalýar. Çekişme güýçleriniň täsirinde bölejikleriň hereketi kristallik gözenegiň düwünleriniň golaýynda ýylylyk yrgyldylaryna öwrülýär. Kristallaşma prosesi geçýär.



9.12-nji surat. Kristallik jisim gyzdyrylanda temperaturasynyň üýtgeýişi.

Maddanyň gaty haldan suwuk hala geçmegine eremek diýilýär. Eremeklik molekulýar baglanyşygyň peselmegi, molekulalaryň hereketiniň artmagy bilen bolup geçýär. Bu prosess gaty jisimi kesgitli bir temperatura çenli gyzdyrmak arkaly amala aşyrylýar. 9.12-nji suratda kristallik jisim gyzdyrylanda onuň t temperaturasynyň τ wagta görä üýtgemesiniň grafigi görkezilendir.

Kristallik jisim ilki başda temperaturanyň artmagy bilen gaty görnüşinde (1-2 aralykda) galýar. 2 nokadyň degişli bolan temperaturasynyň her bir kristallik madda üçin kesgitli bahasy bardyr. Bu temperatura t_e eremek temperaturasy diýilýär, ol ähli eremek prosesiniň dowamynda (2-3 aralykda) üýtgemeyär. Şu ýagdaýda jisime berilýän ýylylyk diňe eremek üçin harç edilýär, ýagny, kristallik

strukturany bozmak üçin gidýär. 3 nokat eremekligiň gutaranlygyny aňladýar, 3-4 aralyk bolsa suwuklygyň gyzdyrylmagyna degişlidir.

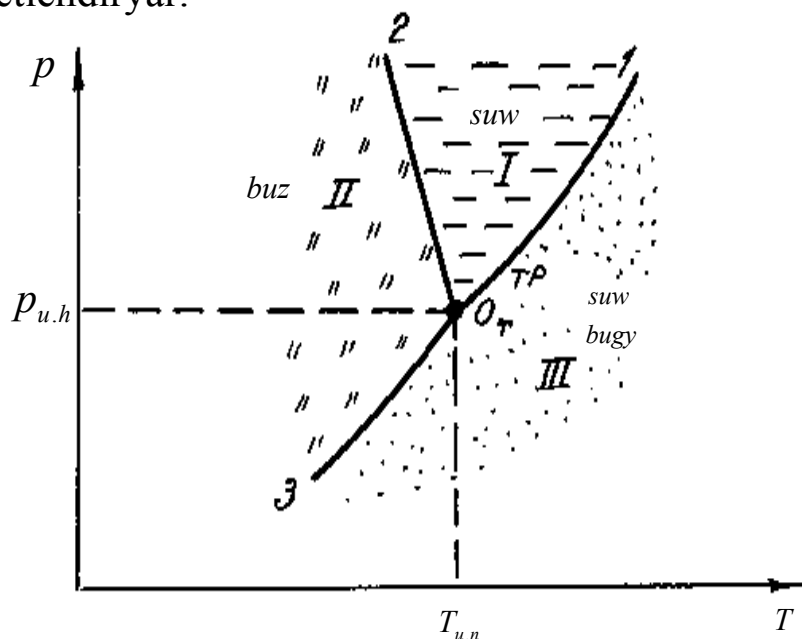
Suwuklyga geçmezden, maddanyň gaty haldan gaz halyna geçmegine sublimasiýa (wozgonka) diýilýär. Şunlukda, gaty jisimiň bugarmasy bolup geçýär. Şeýle prosese buzda, ýodda we başga-da birnäçe maddalarda gözegçilik etmek bolýar.

Faza geçişlerini geometriki şekillendirmek üçin hal diagrammasy ulanylýar.

O–2 egri çyzyk buzň eremek temperaturasynyň basyşa baglylygyny görkezýär we gaty we suwuk fazalary biri-birinden bölýär. O–3 egri çyzyk bolsa, buzň doýan bugunyň basyşynyň temperatura görä üýtgeýşini aňladýar, hem-de bu egri çyzyk gaty we gaz şekilli fazany araçäklendirýär.

Doýan buguň basyşynyň temperatura baglylygyny (suwuň mysalynda) 0–1 egri çyzyk görkezýär. Suwuklyk bilen onuň doýan bugunyň arasynda dinamiki deňagramlylyk bolan wagtynda suwuklykda buga öwrülýän we bugdan suwuklyga öwrülýän molekulalaryň sanlary deňdirler.

9.13-nji suratdaky p_d , T_d (O nokada degişli bahalar) – maddanyň üç halynyň hem deňagramlylyk ýagdaýyndaky p_d – basyşynyň we T_d temperaturasynyň ululygydyr. Ähli egrileriň kesişen O nokadyna uçluk nokady diýilýär. Şol suratdaky: G.J. – gaty faza, C- suwuk faza, G – gaz şekilli fazadyr. Üçlük nokat maddanyň birbada bilelikde üç faza görnüşinde – suwuk, gaty we gaz şekilli – fazalarda bolmaklygynyň şertini häsiýetlendirýär.



9.13-nji surat. Maddanyň üç halynyň şekillendirilişi.

Her bir maddanyň üçlük nokadyna kesgitli bahalar degişlidir. Mysal üçin, suwuň üçlük nokady üçin deňagramlylyk temperaturasy $t_d=0,00748^{\circ}\text{C}$, suwuň doýgun buglarynyň basyşy 5 mm.sim.süt. barabardyr. Suwuň üçlük nokady üçin temperaturanyň termodinamiki şkalasynda kabul edilen bahasy $T=273,15\text{ K}$; buzuň eremek temperaturasy üçlük nokadyndan $0,01^{\circ}$ aşakda ýerleşýär. Şonuň üçin temperaturalaryň Selsiýa we Kelvin şkalalarynda şeýle baglanyşygy bar.

$$t = T - 273,15^{\circ}\text{C}$$

Getirilen diagrammadan görnüşi ýaly, basyşyň üýtgemegi bilen: eremegiň temperaturasy, buga öwrülişiniň temperaturasy we sublimasiýa temperaturasy hem üýtgeýär. Faza geçişiniň netijesinde maddanyň göwrümi uly üýtgeýär.

Faza deňagramlylygy ýagdaýynda basyşyň üýtgemegi bilen temperaturanyň arasyndaky baglylyk Klapeýron-Klauziusyň deňlemesi adyny alan differensial deňleme arkaly ýazylýar:

$$\frac{dp}{dT} = \frac{q}{T\Delta V} \quad (9.19)$$

Bu ýerde dp/dT – faza diagrammasynyň egrisindäki basyşyň temperatura görä alnan önümi (proizwodnysy), q – faza geçişindäki ýylylyk, ΔV – faza geçişindäki göwrüme giňelme.

Eremegiň egrisi üçin (9.13-nji suratdaky 0-2 egri çyzyk) ΔV – göwrümiň üýtgemesi V_c – suwuklygyň we $V_{\text{гж}}$ – gaty jisimiň göwrümleriniň üýtgemegine deňdir:

$$\Delta V = V_c - V_{\text{гж}}$$

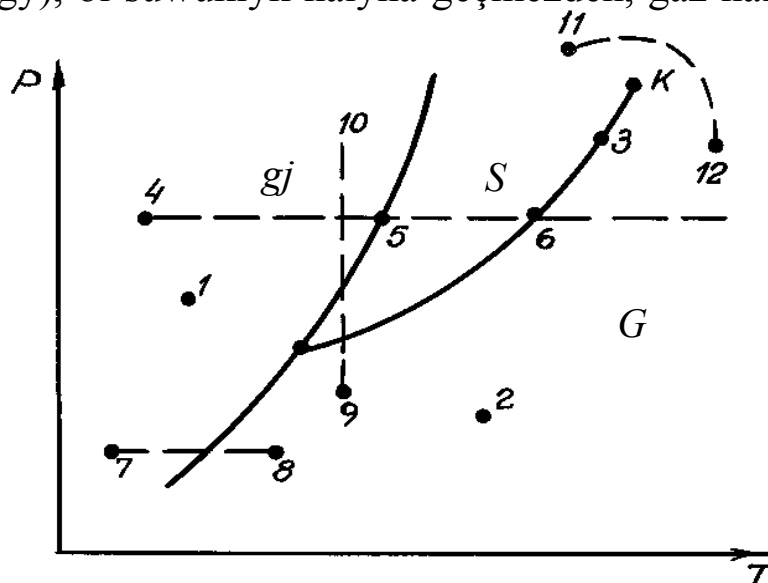
Gaty jisim-gaz (sublimasiýa: 0 – 3 egri çyzyk) halynyň deňagramlylyk ýagdaýy üçin.

Suwuklyk-gaz (0-1 egri çyzygy) deňagramlylygy üçin:

$$\Delta V = V_r - V_c \text{ bolar.}$$

Hal diagrammasy tejribe üsti bilen alnan ululyklar esasynda gurlup, berlen maddanyň kesgitli p basyşa we T temperatura görä haýsy ýagdaýda ýatandygyny anyklamaga mümkinçilik berýär. Mysal üçin, 1-nji nokada degişli bolan şertlerde madda gaty ýagdaýynda (9.14-nji surat), 2 nokatda - gaz ýagdaýynda, 3 nokatda -birbada suwuklyk we gaz ýagdaýynda bolýar.

Goý, madda 4 nokada degişli basyşda we temperaturada gaty ýagdaýynda ýatyr, ony hemişelik göwrümde gyzdysak, ol 5 nokatda ereýär, 6 nokatda bolsa buga öwrülip başlaýar. Eger madda 7 nokatda gaty ýagdaýynda ýatan bolsa, ony izobarik gyzdyranymyzda (7-8 punktir çyzygy), ol suwuklyk halyna geçmezden, gaz halyna geçýär we ş.m.



9.14-nji surat. Maddalaryň hal diagrammasy.

ELEKTROSTATIKA WE HEMIŞELIK ELEKTRIK TOGY

X BAP. ELEKTROSTATIKA

§10.1. Elektrik zaryadynyň saklanmak kanuny

Gozganmaýan elektrik zaryadlarynyň özara täsirlerini we häsiýetlerini öwrenýän elektrodinamikanyň bir bölümine elektrostatika diýilýär.

Tebigatda zaryadlaryň položitel we otrisatel – iki görnüşi bar. Položitel zaryad, mysal üçin, aýna taýajygyny derä sürtenimizde, otrisatel – ýantar taýajygyny ýüň mata sürtenimizde döreýär.

Belli bolşy ýaly, ähli jisimler atomlardan düzülýär. Atom hem öz gezeginde položitel zaryadlanan ýadrodan we onuň töwereginde aýlanýan elektronlardan ybaratdyr. Elektronlar otrisatel zaryadlanandyr. Şonuň üçin-de, bütewilikde alanymyzda atom elektrik taýdan bitarapdyr. Temperaturanyň, magnit meýdanynyň, ýagtylygyň we şuna meňzeş sebäpleriniň täsirinde atom özüniň bir ýa-da birnäçe elektronlaryny ýitirmegi mümkin. Şeýle ýagdaýda ol položitel zaryadlanan iona öwrülýär. Eger-de atom (ýa-da molekula) özüne goşmaça elektron kabul etse, ol otrisatel iona öwrülýär.

Şeýlelikde, elektrik zaryady elektronlar görnüşinde bolup biler. Şonuň üçin-de erkin elektrigiň diňe bir görnüşi – otrisatel elektronlar bardyr diýip aýtmak bolar. Eger jisimde elektronlar ýetmezçilik etse, ol položitel, artykmaçlyk etse – otrisatel zaryadlanýar.

Her bir maddanyň elektrik häsiýeti onuň atomynyň gurluşyna baglydyr. Atomlar özlerinde birnäçe elektronlary ýitirip biler. Şol wagtda olara köp gezek ionlaşan diýýärler. Atomyň ýadrosy protonlardan we neýtronlardan ybaratdyr. Her bir protonyň zaryady elektronyň zaryadynyň absolýut ululygyna deň, emma garşylykly zaryady bardyr. Neýtron elektrik taýdan zaryadsyz bölejikdir. Elektrondan we protondan başga-da köp sanly zaryadly elementar bölejikler bardyr. Elektrik zaryadsyz bölejik bolýar, emma bölejiksiz zaryad bolmaýar. Hemme zaryadlanan elementar bölejikleriň zaryady bardyr. Ol zaryadlaryň iň kiçisine, ýagny elektronyň zaryadyna deň bolan zaryada **ELEMENTAR ZARYAD** diýilýär. Amerikan fizigi R.Milliken (1968-1953) we rus fizigi A.F.Ioffe elementar zaryadyň

$e = 1.6 \cdot 10^{-19}$ kulona (Kl) deňdigini, ähli elektrik zarýadlaryň diskretdigini tejribe üsti bilen subut etdiler.

Şonuň üçin jisimler elektriklenenlerinde olaryň zarýadlarynyň ululygy elektronyň zarýadynyň ululygyça birdeň üýtgeýär.

Jisimler biziň pikirimizçe zarýadsyz ýalydyrlar. Dogry, olar elektrik taýdan bitarap. Emma islendik zarýadlanmadyk jisimde položitel zarýad-da, otrisatel zarýad-da bardyr. Olaryň sanlary biri-birlerine deň bolanlygy sebäpli, biri-birini kompensirleýärler. Elektrik taýdan zarýadlanan jisimi, goý diýeli, položitel zarýadlanan jisimi, otrisatel zarýad bilen zarýadlandyryp başlasak, onuň zarýadynyň ilki başda nola çenli azalýandygyny, soňra bolsa köpelip başlaýandygyny elektroskopyň kömegi bilen tejribede görmek kyn däl. Sebäbi, biz položitel zarýadlanan jisimi otrisatel zarýad bilen zarýadlandyryp başlanymyzda zarýadyň azalmagy başlanýar. Sebäbi, olar kompensirlenip başlaýarlar. Haçan-da elektroskopyň dili noly görkezende položitel hem-de otrisatel zarýadlar biri-birine deň. Soňra bolsa otrisatel zarýadlar agdyklyk edip başlaýar, we abzalyň görkezişi ulalyp başlaýar. Şeýle tejribäni sürtülmäniň kömegi bilen hem geçirip bolar. Eger darak bilen gury saçyňy darasaň, onda iň hereketli zarýadlanan bölejikleriň-elektronlaryň azrak bölegi saçdan daraga geçip, ony otrisatel zarýadlandyrýar, saç bolsa položitel zarýadlanýar. Şol daragy owunjak kagyz bölejiklerine golaýlatsaň, ol kagyz bölejiklerini özüne çeker, diýmek, darak zarýadlanypdyr.

Şu ýerden şeýle netije çykarmak bolar: zarýadlar döremeýärler we ýok bolmaýarlar, diňe bir jisimden beýleki bir jisime berilýärler ýa-da şol bir jisimiň içinde ornuny üýtgedýärler. Tebigatyň esasy kanunlaryndan biri bolan şu elektrik zarýadynyň saklanmak kanuny ilkinji gezek iňlis fizigi M.Faradeý (1791-1867) tarapyndan formulirlenýär.

Elektrik zarýadynyň saklanmak kanuny başgaça şeýle-de formulirlenýär. Islendik ýapyk (daşky jisimler bilen zarýad çalşygy bolmadyk) ulgamlarda olaryň içinde nähili hadysalaryň bolup geçýändiginde garamazdan, elektrik zarýadlarynyň algebralik jemi üýtgemän galýar. Ýagny:

$$\sum_{i=1}^n q_i = \text{const} \quad (10.1)$$

Sürtülme wagtynda aýna, ebonit ýaly köp materiallar elektriklenýärler. Senagatyň köp pudaklarynda has hem kagyz

senagatynda, dokma we un senagatlarynda elektrik zarýadlary şeýle bir köp toplanýarlar, olara garşy göreş çärelerini geçirmeklik uly problemalary döredýär. Mysal üçin, sintetik matalaryň gatlarynyň arasynda zarýadlar toplanýar, dokma fabriklerinde ýüplük sapaklar sürtülmaniň hasabyna elektriklenýärler, iklere we roliklere dartylýarlar hem-de üzülýärler. Ýüplük tozany çekýär we hapalanýar. Sapaklaryň elektriklenmeginiň garşysyna ýörite çäreler ulanmaly bolar.

Jisimleriň jebis kontaktda elektriklenmegi häzirki zaman elektrik nusgalaýjylarda (kitaplaryň, dokumentleriň nusgalaryny alýan maşynlarda) giňden peýdalanylýar.

§10.2. Kulonyň kanuny

Biratly zarýadlar itekleşýärler, dürli atly zarýadlar bolsa dartýşýarlar, ýagny zarýadlaryň arasynda özara täsir güýçleri ýüze çykýar. 1785-nji ýylda fransuz fizigi Ş.Kulon tejribe arkaly zarýadlanan metal şarjagazlarynyň arasynda ýüze çykýan özara täsirleriň kanunalaýyklyklaryny öwrenýär. Bu kanun diňe nokatlanç zarýad üçin dogrudyr. Zarýadlanan jisimi hemişe nokatlanç hasaplap bolmaz. Emma, jisimleriň arasyndaky uzaklyk olaryň ölçeglerinden köp esse uly bolsa, onda zarýadlanan jisimleriň görnüşleri-de, ölçegleri-de olaryň arasyndaky özara güýje onçakly täsir etmeýärler. Şeýle jisimlere nokatlanç jisimler (zarýadlar) diýýärler.

Nokatlanç zarýad elektrodinamikada mehanikadaky material nokat ýaly, elektrik zarýadlarynyň häsiýetlerini öwrenmekde uly ähmiýete eýedir.

Kulonyň kanuny: iki sany nokatlanç zarýadyň özara täsir güýji bu zarýadlaryň ululyklaryna göni proporsionaldyr, olaryň arasyndaky uzaklygyň kwadratyna bolsa ters proporsionaldyr, ýagny

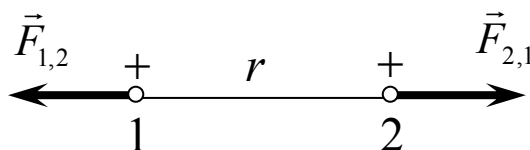
$$F = k \frac{q_1 q_2}{r^2} \quad (10.2)$$

Bu ýerde, k – ölçeg birlikleriniň saýlanyp alynyşyna bagly bolan, proporsionallýk koeffisiýenti, q_1, q_2 – degişlilikde zarýadlaryň ululygy, r – olaryň arasyndaky uzaklyk.

Iki sany gozganmaýan nokatlanç zarýadlanan jisimiň özara täsir güýji (10.1 surat) ol jisimleriň merkezlerini birikdirýän göni çyzygyň boýuna baka ugrukdyrylandyr.

Şeýle güýçlere merkezi güýçler diýilýär. Nýutonyň üçünji kanunyna laýyklykda $\vec{F}_{12} = -\vec{F}_{21}$ bolar. Eger $F > 0$ bolsa, zarýadly jisimler

özara itekleşýärler. Bu iki güýjüň deňtäsiredijisi položitel bolsa zaryadly jisimler itekleşýärler, tersine – dartýşýarlar. Olaryň arasynda ýüze çykýan F özara täsir güýjüne kulon güýji diýilýär.



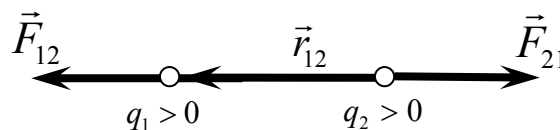
10.1-nji surat. Iki nokatlanç zaryadlaryň özara täsiri.

Kulonyň kanuny wektor görnüşinde şeýle ýazylýar:

$$\vec{F} = k \frac{q_1 q_2}{r^2} \frac{\vec{r}_{12}}{r} \quad (10.3)$$

Bu ýerde \vec{F}_{12} – q_1 zaryada q_2 zaryad tarapyndan täsir edýän güýç, \vec{r}_{12} – q_1 zaryady q_2 zaryad bilen birleşdirýän radius-wektor. $r = |\vec{r}_{12}|$ (10.2-surat).

Eger özara täsir edişýän zaryadlar birhilli we izotropik gurşawda ýerleşen bolsalar olaryň özara täsir güýçleri



10.2- surat. Dürli zaryadlaryň özara täsiri.

$$F = k \frac{q_1 q_2}{\epsilon r^2}$$

deňdir. Bu ýerdäki ϵ – ölçegsiz ululyga - gurşawyň dielektrik syzyjylygy diýilýär. Ol berlen gurşawda zaryadlaryň aralygynda döreýän F özara täsir güýjüniň wakumdaky F_o özara täsir güýjünden näçe gezek kiçidigini görkezýär:

$$\epsilon = F_o / F \quad (10.4)$$

Wakuumda $\epsilon = 1$

Halkara birlikler sistemasynda (HS) proporsionallyk koeffisiýenti $k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}$. Onda Kulonyň kanuny (zaryadyň birligi esasy däl-de, döredilen birlikdir) şeýle görnüşde ýazylýar:

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r^2} \quad (10.5)$$

Elektrik zarýadynyň ölçeg birligi hökmünde Kulon (Kl) ulanylýar. Ol tok güýjüniň ölçeg birliginiň üsti bilen aňladylýar. 1 kulon (Kl) – toguň güýji bir amper bolan wagtynda geçirijiniň kese-kesiginden 1 sekuntda geçýän elektrik zarýadydyr. Ýagny

$$1Kl = 1A \cdot s$$

(10.2) formuladaky proporsionallyk koeffisiýenti

$$k = \frac{Fr^2}{q_1 q_2} \quad (10.6)$$

aňlatma arkaly aňladylýar. Onuň (HS) ulgamyndaky ölçeg birligi $N \cdot m^2 / Kl^2$ deňdir.

Güýç nýutonlarda, uzaklyk metrlerde we zarýad kulonlarda aňladylýar. Bu koeffisiýentiň san bahasyny tejribede kesgitlemek bolar. Munuň üçin berlen uzaklykda duran iki sany belli nokatlanç zarýadyň arasyndaky özara täsir güýjüni ölçemek ýeterlikdir we F, r, q_1 hem q_2 -niň bahalaryny (10.2) formulada ornuna goýup, k -nyň bahasyny taparys.

(10.5) formuladaky ϵ_0 ululyga elektrik hemişeligi diýilýär. Ol fiziki hemişelikleriniň iň esaslaryndan biri bolup, aşakdaky baha eýedir.

$$\epsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-12} Kl^2 / (N \cdot m^2),$$

ýa-da

$$\epsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-12} \Phi / m \quad (10.7)$$

bu ýerde farad (Φ) - elektrik sygymynyň birligi.

§10.3. Elektrostatiki meýdany. Elektrik meýdanyň güýjenmesi

Zarýadlanan jisimleriniň özara täsiri nähili ýüze çykýarka? Bu täsir bir jisimden başga bir jisime nähili geçýärkä? Bu soraglar önler köp alymlary gyzyklandyrypdyr. Bu soraglara jogap berýän iki taglymat döreýär. Olar - ýakyndan täsir we aralykdan täsir taglymatlarydyr. Ikinji

täsire görä bir zarýadyň beýleki bir zarýada täsiri gös-göni boşluk arkaly hiç hili gurşawsyz şobada berilýär. Aralykdan täsir teoriýasynyň tarapdarlary jisimler öz aralarynda hiç bir gurşaw bolmasa-da, bir-biriniň bardygyny “duýmaga” ukyplydyrlar diýip düşünpdirler.

Ýakyndan täsir taglymaty boýunça bir zarýadyň beýleki zarýada täsiri diňe belli bir material gurşawyň üsti bilen, onda-da şobada berilmän, kesgitli bir tizlik bilen geçirilýär.

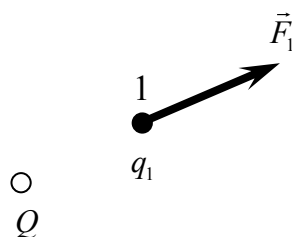
Häzirki zaman fizikasy ikinji – ýakyndan täsir teoriýasynyň tarapynda durýar. Dogrudan-da, eger zarýadlaryň özara täsiri, ýagny hereket, hiç bir gurşawsyz bir zarýaddan beýlekä geçýär diýsek, materiýasyz hereket bar diýdigimizdir. Bu bolsa manysyzdyr. Diýmek, dynçlykda duran zarýadlaryň özara täsir güýjüniň döremegi we berilmegi üçin, ol zarýadlaryň arasynda haýsy-da bolsa bir gurşaw bolmaly. Bu gurşaw hem elektrik meýdanydyr.

Zarýadyň töwereginde dörän elektrik meýdany, obýektiw reallyk bolup, biziň özümize, aňmyza bagly bolman biziň duýujy organlarymyza, olaryň barlygyny priborlaryň kömegi bilen duýanymyzdan soňra täsir edýär. Şeýlelikde, elektrik meýdany-da materiýanyň bir görnüşidir. Gozganmaýan zarýadlaryň töwereginde döreyän meýdana elektrostاتيكي meýdan diýilýär. Aýrylykda alnan bir zarýadyň meýdanynyň barlygyny, şol meýdana başga bir “synag” zarýadyny eltenimizde, olaryň arasynda, kulonyň kanuny esasynda özara täsir güýçleriniň ýüze çykýanlygy bilen duýmak bolýar. Emma, birinji zarýadyň töweregindäki meýdan, onuň meýdanyna ikinji zarýady eltmezimizden öň hem bardy, emma biz onuň bardygyny duýamyzokdyk.

Elektrostاتيكي meýdan bu meýdanyň E güýjenmesi bilen häsiýetlendirilýär. Ýokarda belleýşimiz ýaly, elektrik meýdanynyň barlygynyň esasy şerti bu meýdanda ýerleşdirilen zarýada täsir edýän güýçdür. Emma bu güýjüň ululygy meýdanyň hemme nokatlarynda birmeňzeş däl. Şol bir nokatda hem dürli ululykly zarýadlara dürli güýç täsir edýär. Şonuň üçin hem bu güýç meýdany häsiýetlendirip bilmeýär. Emma meýdanyň berlen nokadynda ýerleşen zarýada täsir edýän güýjüň ol zarýadyň ululygyna bolan gatnaşygy meýdanyň her bir nokady üçin zarýada bagly bolmaz we oňa meýdanyň häsiýetnamasy hökümünde garamak bolar.

Goý, elektrik maýdany Q zarýad tarapyndan döredilen bolsun diýeliň (10.3-nji surat). Bu meýdanyň 1 nokadynda ululyklary dürli bolan nokatlanç, $q_{0_1}, q_{0_2}, q_{0_3}, \dots, q_{0_n}$ “synag” zarýadlaryny gezek-gezegine

ýerleşdireliň, olara täsir edýän güýçleri degişlilikde $\vec{F}_1, \vec{F}_2, \vec{F}_3 \dots \vec{F}_n$ bilen belläliň. Olar-da dürli bolar.



10.3-nji surat. Zarýadyň getirilen zarýada täsiri.

Emma zarýadlaryň arasynda ýüze çykyňan özaratäsir güýçleri dürli bolsa-da, F/q gatnaşyk hemişelik bolar. Ýagny

$$\frac{\vec{F}_1}{q_{0_1}} = \frac{\vec{F}_2}{q_{0_2}} = \frac{\vec{F}_3}{q_{0_3}} = \dots = \frac{\vec{F}_n}{q_{0_n}} = \text{const}.$$

Bu gatnaşyga san taýdan deň bolan ululyga meýdanyň berlen nokadyndaky güýjemesi diýilýär. Ony E harpy bilen belgiläp alarys:

$$\vec{E} = k \frac{\vec{F}}{q} \quad (10.8)$$

Diýmek, elektrik meýdanyň berlen nokadynyň E güýjenmesi bu nokatda ýerleşdirilen položitel birlik synag zarýada täsir edýän F güýje deňdir. Güýjenme meýdanyň güýç häsiýetnamasydyr.

(10.8) formuladan görnüşi ýaly, elektrostatik meýdanyň güýjemesiniň birligi N/Kl ; Ýagny $1N/Kl$, $1Kl$ nokatlanç zarýadyna $1N$ güýç bilen täsir edýän meýdanyň güýjemesidir. $1N/Kl = 1W/m$. Ýokardaky (10.8) aňlatmadan. F güýjüň ugry q zarýadyň alamatyna bagly. Eger $q > 0$ \vec{F} güýç $\vec{F} = q \cdot \vec{E}$ \vec{E} güýjenmäniň ugruna, $q < 0$ bolanda bolsa onuň garşysyna ugrukýar.

Wektor görnüşinde ýazylan Kulonyň (10.3) kanunyndan we (10.8) formulalardan görnüşi ýaly, nokatlanç zarýadyň güýjenmesi, wektor görnüşinde şeýle ýazylýar:

$$\vec{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r^2} \frac{\vec{r}}{r}$$

ýa-da skalýar görnüşinde

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r^2} . \quad (10.9)$$

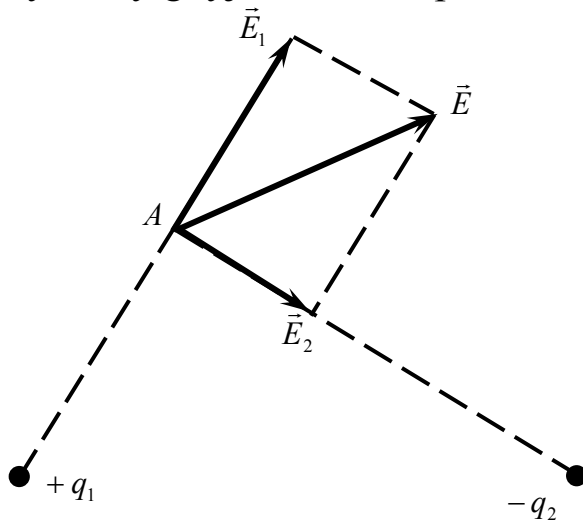
Eger meýdan $+q$ položitel zarýad tarapyndan döredilen bolsa, güýjenme wektory radiusyň boýuna zarýaddan ugrukdyrylandyr, eger meýdan $-q$ (otrisatel zarýad) tarapyndan döredilen bolsa, onda radiusyň boýuna zarýada tarap ugrukdyrylandyr.

Eger meýdan nokatlanç zarýadlaryň birnäçesi tarapyndan döredilen bolsa, onda bu meýdanda ýerleşdirilen q_0 synag zarýadyna täsir edýän güýçler wektorlary goşmak düzgüni boýunça goşulýar. Şonuň üçin meýdanyň berlen nokadyndaky zarýadlar sistemasynyň döredýän elektrik meýdanynyň güýjenmesi aýry-aýrylykda alnan her bir zarýadyň döreden güýjenme meýdanlarydyr, ýagny

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \vec{E}_3 + \dots + \sum_{i=1}^h \vec{E}_i \quad (10.10)$$

Bu düzgüne elektrik meýdanlarynyň superpozisiýa (üstüne goýma) düzgüni diýilýär.

Elektrik meýdanlarynyň superpozisiýa düzgünine görä iki sany nokatlanç $+q$ we $-q$ zarýadlaryň emele getiren meýdanlarynyň islendik nokadyndaky güýjenmesini tapmak bolar (10.4-nji surat).



\vec{E}_1 we \vec{E}_2 wektorlary goşmaklyk parallelogramyň düzgüni boýunça geçirilýär. Netijeleýji \vec{E} wektoryň ugry grafigi gurmak arkaly tapylýar, onuň absalýut ululygy bolsa, şu formula bilen hasaplanyp bilner.

10.4-nji surat. Elektrik meýdanynyň üstüne goýma düzgüni.

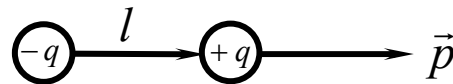
$$E = \sqrt{E_1^2 + E_2^2 - 2E_1E_2 \cos \alpha} \quad (10.11)$$

bu ýerde α – E_1 we E_2 wektorlaryň arasyndaky burç.

§10.4. Elektrik dipoly we onuň meýdany

Ululyklary boýunça deň, alamatlary boýunça garşylykly özara berk baglansykda bolan $+q$ we $-q$ iki nokatlanç zarýadlar sistemasyna elektrik dipoly diýilýär (10.5-nji surat).

Ululygy boýunça zarýadlaryň arasyndaky uzaklyga deň we dipolyň oky boýunça (iki zarýadyňam üstünden geçýän göni) otrisatel zarýaddan položitel zarýada tarap ugrukdyrylan wektora dipolyň egni diýilýär. Dipolyň esasy häsiýetnamasy elektrik dipol momenti bolup durýar. Ol otrisatel zarýaddan položitel zarýada tarap ugrukdyrylan wektor bolup, ol q zarýadyň dipolyň \vec{l} egnine köpeltmek hasylyna deňdir.



10.5 – nji surat

$$\vec{p} = q\vec{l} \quad (10.12)$$

elektrik momentiniň ugry dipolyň egniniň ugry bilen gabat gelýär.

Superpozisiýa prinsipine görä, islendik nokatdaky dipolyň elektrik meýdanynyň \vec{E} güýjemesi

$$\vec{E} = \vec{E}_+ + \vec{E}_-$$

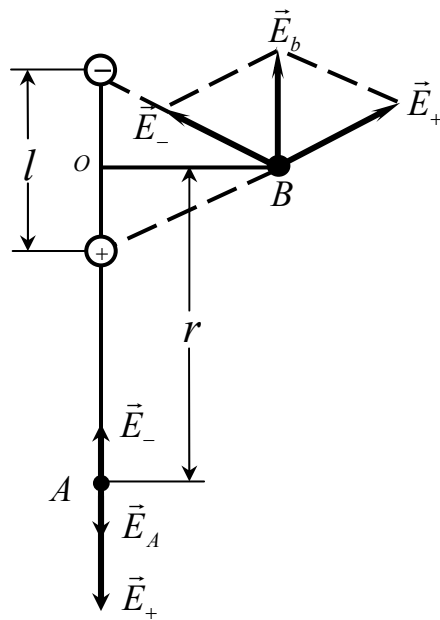
bu ýerde \vec{E}_+ we \vec{E}_- –degişlilikde položitel we otrisatel zarýadlaryň döreden meýdanlarynyň güýjemeleri. Şu formuladan peýdalanyp, dipolyň okunyň ugrunda ýerleşen we onuň ortasyndan bu oka galadyrylan perpendikulýardaky meýdanlarynyň güýjemesini hasaplalyň.

1. Dipolyň okunyň üstünde ýerleşen A nokatdaky meýdanyň güýjemesi 10.6-njy suratdan görnüşi ýaly, dipolyň A nokatdaky meýdanyň güýjenmesi dipolyň oky boýunça ugrukdyrylandyr we moduly boýunça şu aňlatma deňdir:

$$E_A = E_+ - E_-$$

A nokatdan dipolyň ortasyna çenli bolan aralygy r bilen belläliň. (10.9) formulanyň esasynda, wakuum üçin şeýle ýazýarys:

$$E_A = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \left[\frac{q}{(r-l/2)^2} - \frac{q}{(r+l/2)^2} \right] = \frac{q}{4\pi\epsilon_0} \frac{(r+l/2)^2 - (r-l/2)^2}{(r-l/2)^2 (r+l/2)^2}$$



10.6-njy surat. Dipolyň meýdany.

Dipolyň kesgitlemesine görä, $l/2 \ll r$ şonuň üçin:

$$E_A = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{2ql}{r^3} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{2p}{r^3}$$

2. Dipolyň okuna onuň ortasyndan galdyrylan perpendikulýarda ýerleşen B nokadyň güýjenmesini kesgitleliň:

B nokat zaryadlardan deň daşlykda ýerleşýär, şonuň üçin

$$E_+ = E_- = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{(r')^2 + l^2/4} \approx \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{(r')^2} \quad (10.13)$$

bu ýerde r' – B nokatdan dipolyň egniniň ortasyna çenli aralyk. Deňýanly üçburçlyklaryň meňzeşdiginden, alarys:

$$\frac{E_B}{E_+} = \frac{l}{\sqrt{(r')^2 + (l/2)^2}} \approx \frac{l}{r'},$$

bu ýerden $E_B = E_+ l / r' \quad (10.14)$

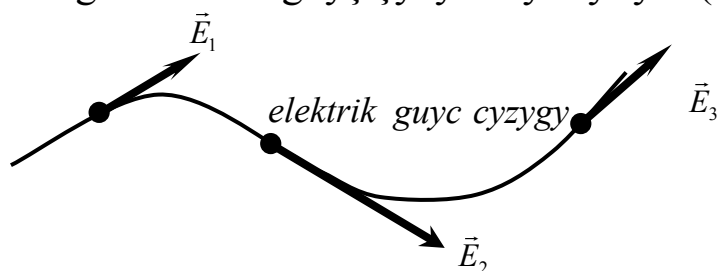
(10.14) formuladaky \vec{E}_B – nyň bahasyny (10.13) formula goýup tapýarys:

$$E_B = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{ql}{(r')^3} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{p}{(r')^3}$$

10.6-njy suratdan görnüşi ýaly, \vec{E}_B wektoryň ugry dipolyň elektrik momentiniň garşysyna ugrukdyrylandyr.

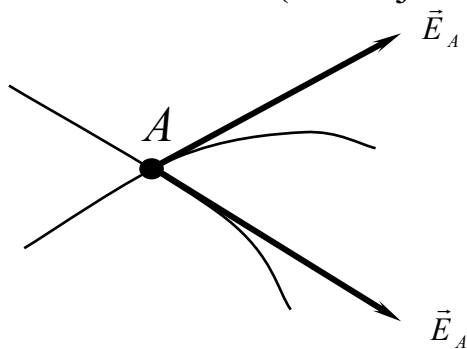
§10.5. Elektrik güýç çyzyklary. Güýjenme wektorynyň akymy. Elektrik süýşmesi

Elektrostatiki meýdanyny güýç çyzyklarynyň (güýjenme çyzyklarynyň) kömegi bilen şekillendirmek bolar. Sebäbi, ol meýdanyň her bir nokadynda güýjenmäniň ugry we ululygy bar. Meýdany güýç çyzyklarynyň kömegi bilen şekillendirmegi M.Faradeý teklipe etdi. Her bir nokadynda oňa geçirilen galtaşma bu nokatda güýjenmäniň ugry bilen gabat gelýän egrä elektrik güýç çyzyklary diýilýär (10.7-nji surat).



10.7-nji surat
Elektrik güýç çyzyklary.

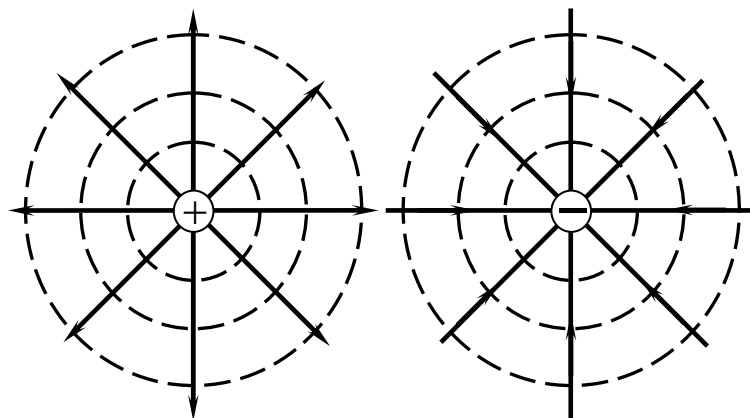
Güýç çyzyklarynyň ugry-da güýjenme wektorynyň ugry bilen gabat gelýär. Olar özara kesişmeýärler, sebäbi meýdanyň her bir nokadynda güýjenmäniň diňe bir ugry we ululygy bardyr. Eger güýç çyzyklary kesişýän bolsadylar, onda A nokatda güýjenmäniň iki ululygy, iki ugry bolardy. Emma bu mümkin däl (10.8-nji surat).



10.8 – nji surat
Güýç çyzyklarynyň ugrynyň kesgitlenilişi.

Elektrik güýç çyzyklarynyň başlangyjy-da, ahyry-da bar, ýagny olar açykdyrlar. Bu bolsa tebigatda elektrik meýdanynyň zarýad görnüşde çeşmesiniň bardygyny görkezýär. Aýry-áýrylykda alnan

položitel we otrisatel zarýadyň güýç çyzyklary 10.9-njy suratda şekillendirilipdir.



10.9 – njy surat
Aýry-aýry položitel we otrisatel
zarýadlaryň güýç çyzyklary.

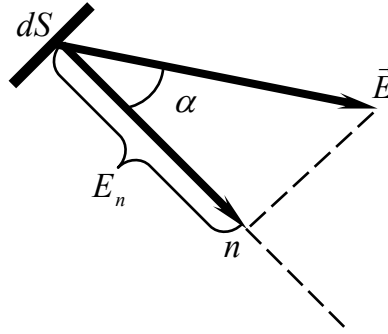
Elektrik meýdany barlamak üçin synag zarýady hökmünde položitel zarýady alypdyk we ony elektrik meýdanyna girizenimiz-de güýçler şol zarýaddan çykypdy. Şonuň üçin hem güýç çyzyklary položitel zarýaddan çykýarlar, otrisatel zarýada girýärler diýip hasaplaýarlar. Haçan-da meýdany birnäçe gozganmaýan zarýadlar emele getirseler, olaryň güýç çyzyklary dürli görnüşi alyp bilerler.

Şeýlelikde, güýç çyzyklarynyň toplумы \vec{E} wektoryň ugrunyň we ululygynyň giňişlikdäki üýtgemegini bilmeklige, elektrik meýdanynyň gurluşyny häsiýetlendirmäge mümkinçilik berýär.

Eger güýç çyzyklarynyň gurluği we ugry meýdanyň ähli ýerinde üýtgemeýän bolsa, şeýle meýdana birhilli meýdan diýilýär. Şeýle meýdanlar grafiki biri-birinden deň r aralykda ýerleşen parallel göni çyzyklar görnüşinde şekillendirilip bilner.

Güýç çyzyklarynyň diňe bir meýdanyň ugruny görkezmän, onuň güýjemesiniň hem ululygyny görkezer ýaly, çyzyklaryň syny meýdanyň \vec{E} güýjenmesine san taýdan deň bolmalydyr.

Şonda dS elementar meýdançany kesip geçýän, \vec{E} wektor bilen α burçuny emele getirýän \vec{n} normal $EdS \cos \alpha = E_n dS$ deňdir. Bu ýerde E_n – \vec{E} wektoryň düzüjisi. Bu ýerdäki $d\phi_E = E_n dS = EdS$ ululyga dS meýdançanyň üstünden geçýän güýjenme wektorynyň akymy diýilýär (10.10-njy surat).



10.10-njy surat. dS meýdançadan çykýan güýjenme wektorynyň akymy.

Bu ýerde $d\vec{S} = d\vec{S}_n$ –moduly boýunça dS -e deň bolan, ugry boýunça meýdança geçirilen \vec{n} normalyň ugry bilen gabat gelýän wektordyr. \vec{n} wektoryň ugry şertleýin kabul edilendir, ony islendik tarapa ugrukdyrmak bolar. Islendik erkin alnan S ýapyk üsti kesip geçýän \vec{E} güýjenme wektoryň akymy şeýle kesgilenýär:

$$\Phi_E = \oint_S E_n dS = \oint_S E dS \quad (10.15)$$

(bu ýerde $E_n = E \cos \alpha$).

Bu ýerde integral S ýapyk üst boýunça alynýar. \vec{E} wekroryň akymy algebraik ululyk bolup, ol diňe bir elektrik meýdanlarynyň konfigurasiýalaryna (özara ýerleşişlerine) bagly bolman, \vec{n} normalyň saýlanyp alnan ugruna hem baglydyr.

§10.6. Ostrogradskiniň – Gaussyň teoremasy

Elektrik zarýadlar sistemasynyň döreden meýdanlarynyň güýjenmesini superpozisiýa prinsipiniň kömegi bilen kesgitleýärler. Emma şu maksat üçin nemes alymy K. Gaussyň (1777-1855) islendik ýapyk üstden geçýän elektrik meýdanyň güýjenme wektorynyň akymyny kesgitlemäge mümkinçilik berýän teoremasyny ulanmaklyk bu meseläni ep-esli ýeňilleşdirýär. Başga söz bilen aýdanymyzda, Gaussyň teoremasy islendik mukdardaky zarýadlaryň döreden meýdanynyň güýjenme wektorynyň akymyny kesgitleýär. Ilki bilen merkezinde nokatlanç zarýad ýerleşen şar üstäki güýjenme wektorynyň akymyny kesgitläliň:

(10.15) formula görä $\Phi_E = \int_S E_n ds$. Emma, $E_n = E \cos \alpha$ (10.10-njy surata seret), onda şar üstde ($\cos \alpha = 1$), alarys:

$$\Phi_E = E \cdot 4\pi r^2$$

Elektrik meýdanynyň güýjenmesiniň (10.9) formulasyndan tapýarys:

$$\Phi_E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{\epsilon r^2} \cdot 4\pi r^2 = \frac{q}{\epsilon\epsilon_0}$$

ýa-da Gauss sistemasynda

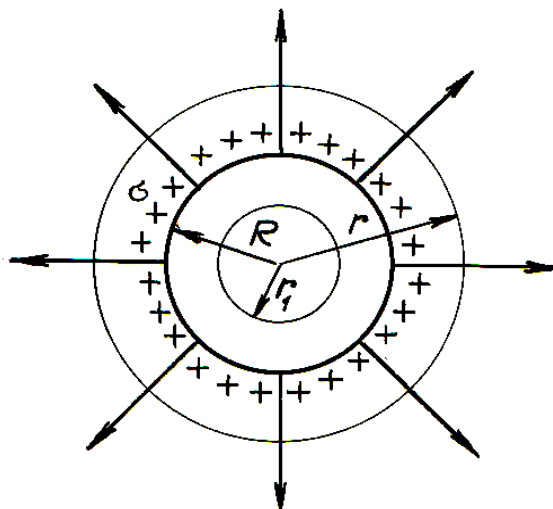
$$\Phi_E = \frac{4\pi}{\epsilon} q \quad (10.16)$$

Şeýlelikde, her bir nokatlanç zarýaddan $q/\epsilon\epsilon_a$ deň bolan güýjenme wektorynyň akymy çykýar. Şu ýagdaýy umumylaşdyryp, umumy ýagdaý üçin Ostrogradskiý - Gaussyň teoremasy çykarylýar: islendik formaly ýapyk üstdäki güýjenme wektorynyň doly akymy bu üstüň içinde ýerleşen elektrik zarýadlaryň algebraik jeminiň onuň absolýut dielektrik syzyjylygyna bölünmegine san taýdan deňdir. Ýagny:

$$\Phi_E = \frac{1}{\epsilon\epsilon_0} \sum_{i=1}^n q_i \quad (10.17)$$

bu ýerde q_i – üstüň içinde ýerleşen zarýadlar, n – zarýadlaryň sany.

Öň belläp geçişimiz ýaly, Ostrogradskiniň - Gaussyň teoremasy elektrostatik meýdanyň güýjenme wektorynyň akymyny hasaplamak üçin ulanylýar. Elektrik zarýady islendik göniçyzyk, üst we göwrüm boýunça paýlananda elektrik meýdanyny Kulonyň kanuny we superpozisiýa prinsipi boýunça hem hasaplamak bolar. Emma şeýle maksat üçin bu teoremany ulanmaklyk elektrik meýdanyny aňsatlyk bilen hasaplamaklyga getirýär. Geliň käbir mysallara seredeliň.



10.11-nji surat. R radiusly sferik üstüň elektrik meýdany.

1. Birdeň zarýadlanan sferik üstüň döredýän elektrostatik meýdanynyň güýjenmesini kesgitleliň.

Goý, R radiusly sferik üstde q zarýadlar birdeň bölünen bolsun, ýagny sferanyň islendik nokadynda zarýadlaryň üst dykzlygy birmeňzeş, sferik üstüň merkezinden r aralykda ýerleşen A nokady alalyň (10.11-nji surat).

Aňmyzda A nokadyň üstünden öňki zarýadlanan sfera simmetrik bolan täze S sferik üsti geçireliň. Eger $r > R$ bolanynda bizi gyzyklandyryýan meýdany döredýän zarýadlaryň ählisi sferik üstüň içinde galýar. Gaussyň teoremasy esasynda ýazýarys:

$$4\pi r^2 E = q / \varepsilon_0$$

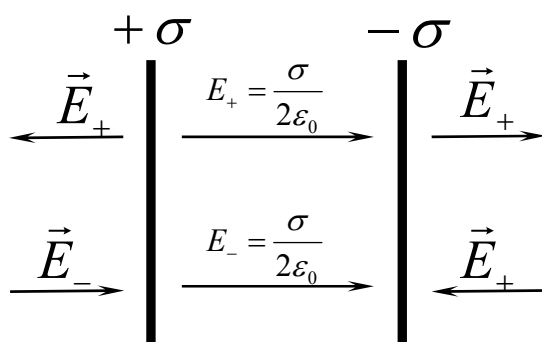
bu ýerden

$$E = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \frac{q}{r^2} (r \geq R) \quad (10.18)$$

Eger $r' < R$ bolanynda, zarýadlar ýapyk üstden daşarda ýerleşýärler. Bu ýagdaýda birdeň zarýadlanan sferik üstüň içinde elektrostatik meýdan ýokdur ($E=0$)

2. Iki sany tükeniksiz ölçegleri bolan özara parallel ýerleşen dürli atly zarýadlanan üstleriň meýdany.

Goý, tükeniksiz üstler üst dykzlyklary $+\sigma$ we $-\sigma$ bolan zarýadlar bilen birdeň zarýadlanan bolsunlar (10.12-nji surat).



10.12-nji surat. Iki özara parallel tükeniksiz üstleriň elektrik meýdany.

Şeýle tekizlikleriň döredýän meýdanyny superpozisiýa prinsipi boýunça tapmak bolar. Çyzgydan görnüşi ýaly, üstleriň elektrik meýdanlarynyň ugurlary üstlerden çepde we sagda özara garşylyklydyrlar. Şonuň üçin bu ýerde $E=0$. Üstleriň arasynda güýjenmeler ugurlary boýunça gabat gelýärler. $E = E_+ + E_-$ (E_+ we

E - Gaussyň teoremasyna görä, $E = \sigma / 2\epsilon_0$ formula bilen kesgitlenýär). Diýmek $E = \sigma / \epsilon_0$. Ýagny, meýdan diňe tekizlikleriň arasynda döreýär we ol birhillidir.

§10.7. *Elektrostatik meýdanyň işi*

Nokatlanç q_s synag zarýady elektrostatik meýdanynda dr aralyga, onuň bir nokadyndan ikinji bir nokadyna ornuny üýtgedende F güýjüň ýerine ýetirýän elementar işiniň ululygy kesgitlemä görä şeýle tapylýar:

$$dA = Fdr \cdot \cos \alpha \quad (10.19)$$

Bu ýerde $\alpha - F$ güýç bilen zarýadyň orun üýtgetmesiniň arasyndaky burç.

Soňky aňlatmany $F = qE$ hasaplap integrirläp, q_s zarýadyň meýdanynyň A nokadyndan B nokadyna geçirilenindäki (meýdan güýçleriniň garşysyna) ýerine ýetirilen işi tapýarys:

$$A = - \int_a^b Fdr \cos \alpha \quad (10.20)$$

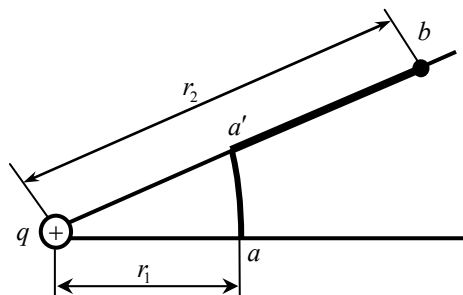
Bu ýerde $F = E \cdot q_s$, ýagny synag zarýadyna güýjenmesi E deň bolan meýdanyň her bir nokadynda täsir edýän Kulon güýji. Onda iş:

$$A = - \int_a^b E q_s dr \cos \alpha \quad (10.21)$$

Goý, integrirlemegiň netijesi birlik zarýadyň A nokatdan B nokada geçirilenindäki ýoluň uzaklygyna bagly bolsun diýeliň. Onda biz (10.21) formula görä, q_s zarýadyna A kiçi bolar ýaly gysga ýol bilen, A nokatdan B nokada geçirerdik, yzyna bolsa tersine, A uly bolar ýaly uzynrak ýol bilen onuň ornuny üýtgederdik we netijede ilki başda sarp eden energiýamyzdan uly energiýany "alardyk". Emma, bu netije elektrostatikada energiýanyň saklanmak kanunyna garşy gidýär. Şonuň üçin hem mümkin däl.

Indi bolsa hakykatdan-da, elektrostatiki meýdanda zarýad ornuny üýtgedenindäki edilýän işiň zarýadyň diňe başlangyç we ahyrky ýagdaýlaryna baglydygyny subut edeliň.

Goý, q_s synag zarýady q zarýadyň meýdanynda radiusy r_1 bolan A nokatdan radiusy r_2 bolan B nokada $aa'b$ ýol bilen süýşürilýär diýeliň (10.13 surat).



10.13-nji surat.
 q_s synag zarýady q zarýadyň meýdanynda süýşürilende işiň kesgitlenilişi.

Bu ýerde aa' aralykda hiç hili iş ýerine ýetirilmeýär, sebäbi zarýadyň orun üýtgetmesi elektrik meýdanynyň güýjenme wektoryna perpendikulýardyr. Diýmek, “synag” zarýady A nokatdan B nokada geçirilenindäki iş

$$\int_a^b E q_s dr = \frac{q q_s}{4\pi\epsilon\epsilon_0} \int_{r_1}^{r_2} \frac{dr}{r^2} = \frac{q q_s}{4\pi\epsilon\epsilon_0} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) \quad (10.22)$$

Elektrostatiki meýdanda zarýadyň islendik çylşyrymly ýol bilen A nokatdan B nokada geçirilendigine garamazdan, ahyrynda şol bir netijä gelinýär:

$$A = - \int_a^b E q_s dr \quad (10.23)$$

Ýagny, edilen işiň ululygy zarýadyň süşürilen ýoluna bagly däldir.

§10.8. Potensial. Ekwipotensial üstler

(10.23) formuladan görnüşi ýaly, zarýad A nokatdan B nokada geçirilenindäki edilen iş synag zarýadynyň hereket edýän ýolunyň traýektoriasyna bagly däldir, ol diňe bu nokatlaryň başlangyç we ahyrky ýagdaýlaryna baglydyr. Şonyň üçin iş şol zarýadyň potensial energiýasynyň kemelmegine deňdir, ýagny

$$A = -\Delta W = W_1 - W_2 \quad (10.24)$$

Eger elektrostاتيكي meýdanynda ýerine ýetirilýän iş diňe ýoluň başlangyç we ahyrky ýagdaýlaryna bagly bolsa, onda ol iki sanyň tapawudy görnüşinde aňladylyp bilner.

Islendik bir M nokady alyp q synag zaryadyny şol nokatdan A nokada geçirilen wagtyndaky ýerine ýetirilen işi $\varphi(a)$ bilen, M nokatdan B nokada geçirilen wagtyndakysyny $-\varphi(b)$ bilen belgiläp, (10.24) formulany şeýle görnüşde ýazyp bolar:

$$A = -\int_a^b E q_c dr = \varphi(a) - \varphi(b) \cdot q \quad (10.25)$$

Şu halatda M nokadyň ýagdaýynyň hiç hili roly ýok. Işin ululygy φ funksiýanyň bahalarynyň tapawudyna baglydyr.

Şu ýerdäki φ ululyk elektrostatik meýdanyň potensialydyr. Biziň başlangyç nokat hökmünde alan M nokadymyzy, ähli ýagdaýlarda-da hasaplamany ýeňilleşdirmek üçin tükeniksizlikde ýerleşdirýärlər. Tükeniksiz daşlaşdyrylan nokadyň potensialyny nola deň diýip kabul edýärlər, ýagny $\varphi_\infty = 0$.

Elektrik meýdanynyň potensialy diýip, q_s položitel zaryady tükeniksizlikden giňişligiň berlen nokadyna geçirileninde onuň alýan potensial energiýasynyň şol zaryadyň ululygyna bolan gatnaşygyna deň bolan fiziki ululyga aýdylýar, ýagny

$$\varphi = \frac{W}{q_s} \quad (10.26)$$

φ potensial skalýar ululykdyr, ol meýdanyň energetiki häsiýetnamasydyr: ol meýdanyň berlen nokadyndaky q_s zaryadyň potensial energiýasyny kesgitleýär.

(10.22) we (10.25) formulalardan q nokatlanç zaryadyň döreden meýdanynyň potensialy üçin şeýle aňlatmany alýarys:

$$\varphi = \frac{q}{4\pi\epsilon\epsilon_0 r} \quad (10.27)$$

Haçan-da meýdan erkin ýerleşen $q_1, q_2, q_3, \dots, q_n$ zaryadlaryň toplумы tarapyndan döredilen bolsa, onuň berlen nokatdaky potensialy her bir zaryadyň aýry-aýrylykda döreden $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \dots, \varphi_n$ potenciallarynyň algebraik jemine deňdir.

$$\varphi = \sum_{i=1}^n \varphi_i \quad (10.28)$$

Eger $q_1, q_2, q_3, \dots, q_n$ zaryadlary nokatlanç zaryadlar diýip kabul etsek, onda potensiyallaryň jemi

$$\varphi = \frac{1}{4\pi\epsilon\epsilon_0} \left(\frac{q_1}{r_1} + \frac{q_2}{r_2} + \frac{q_3}{r_3} + \dots + \frac{q_n}{r_n} \right) \quad (10.29)$$

bolar. Bu ýerde $r_1, r_2, r_3, \dots, r_n$ – degişlilikde $q_1, q_2, q_3, \dots, q_n$ zaryadlardan meýdanyň berlen nokadyna çenli aralyk.

Eger meýdan elektrik dipoly tarapyndan döredilen bolsa, dipolyň ortasyndan r aralykda ýerleşen onuň haýsydyr bir nokadynyň potensiyasly şu formula arkaly kesgitlenilýär:

$$\varphi = \frac{P}{4\pi\epsilon\epsilon_0 r^2} \cos \alpha \quad (10.30)$$

bu ýerde $P=q\ell$ - dipolyň elektrik momenti (ℓ - dipolyň egni), α - dipolyň \vec{r} radius -wektory bilen ℓ - egniniň arasyndaky burç ($r \gg \ell$).

Haçan nokat dipolyň okunyň üstünde ýerleşende $\alpha = 0$ we bu nokadyň potensiyaly

$$\varphi = \frac{P}{4\pi\epsilon\epsilon_0 r^2}$$

Dipolyň okuna onuň ortasyndan galdyrylan perpendikulýaryň üstünde ýatan ähli nokatlaryň potensiyaly nola deňdir ($\varphi = 0$), sebäbi $\alpha = 90^\circ$.

Eger elektrostاتيكي meýdanda q' zaryad A nokatdan B nokada ornuny üýtgetse, onda elektrik güýçleriniň garşysyna iş edilýär, ýagny ((10.24) we (10.20) formulalara seret):

$$A_{1,2} = W_1 - W_2 = -q'(\varphi_1 - \varphi_2) \quad (10.31)$$

bu ýerde φ_1 we φ_2 – meýdanynyň A we B nokatdaky potensiyallary, ýa-da

$$A_{2,1} = q'(\varphi_2 - \varphi_1) \quad (10.32)$$

Ýagny meýdanyň zaryad ornuny üýtgedende ýerine ýetirýän işiniň ululygy elektrostاتيكي meýdanda ornuny üýtgedýän q' zaryadyň ýoluň

ahyrky φ_2 we başlangyç (φ_1) nokatlaryndaky potensiyallar tawudyna köpeldilmegine deňdir we ol ýoluň görnüşine bagly dälär.

Eger potensiallary özara deň bolan nokatlary birleşdirsek, hemme nokatlarynyň potensiallary birmeňzeş bolan üst alarys. Bu üste deň potensially üst ýa-da ekwipotensial üst diýilýär. Olaryň kömegi bilen hem elektrostatik meýdany grafiki şekillendirmek bolar.

Ekwipotensial üst bilen elektrik güýç çyzyklary özara perpendikulýardyr. Ýagny elektrik güýç çyzyklary we ekwipotensial üste geçirilen galtaşma özara 90° burç emele getirýärler. Belleýşimiz ýaly, ekwipotensial üstüň ähli nokatlarynyň potensiallary özara deňdirler, ýagny, $\varphi_1 - \varphi_2 = 0$ we onuň ugruna zarýad ornuny üýtgedeninde iş edilmeýär.

§10.9. Elektrostatiki meýdanyň güýjenmesi bilen potensiallaryň arasyndaky baglanyşyk

Elektrostatiki meýdanyň güýjenmesi bilen potensiallarynyň tapawudynyň arasynda belli bir baglanyşyk bar.

Goý, zarýad birligi koordinatlary (x, y, z) we $(x+\Delta x, y, z)$ bolan iki nokadyň arasynda ornuny üýtgetsin. Şu zarýad bir nokatdan ikinji bir nokada ornuny üýtgedeninde elektrostatiki meýdanyň güýçleriniň garşysyna ýerine ýetiriljek işiň ululygy şu nokatlardaky potensiallaryň tapawudyna deňdir, ýagny

$$A_b = \varphi(x + \Delta x, y, z) - \varphi(x, y, z) = \frac{d\varphi}{dx} \Delta x$$

Ikinji bir tarapdan $A = q' \int E_s ds$, bu ýerde $E_s = \vec{E}$ güýjenme wektorynyň orun üýtgetmäniň ugruna bolan proyeksiýasy, ds - elementar orun üýtgetme. Şuňa görä, zarýad birligi ($q' = 1$) şol bir aralykda ornuny üýtgedende ýerine ýetirilýän iş

$$A_b = - \int_x^{x+\Delta x} E dx = -E_x \Delta x$$

Bu ýerde E_x -- güýjenme wektorynyň x koordinatlar okuna bolan proyeksiýasy.

Ýokardaky iki deňlemäniň sag taraplaryny deňleşdirip, alarys:

$$E_x = -\frac{d\varphi}{dx} \quad (10.33)$$

Şuňa meňzeşlikde, güýjenme wektorynyň y we z koordinatlar okuna bolan proyeksiýalaryny-da şeýle ýazmak bolar.

$$E_y = -\frac{d\varphi}{dy}, \quad E_z = -\frac{d\varphi}{dz}$$

Berlen deňlemelerdäki E_x , E_y , E_z düzüji wektorlary E bilen çalşyryp, ugrukdyryjy x , y , z koordinatlaryň ýerine \vec{n} normaly goýup ýazýarys.

$$E = -\frac{d\varphi}{dn} \quad (10.34)$$

ýa-da wektor görnüşinde

$$\vec{E} = -\frac{d\varphi}{d\vec{n}} \quad (10.35)$$

Güýç çyzyklarynyň ugry boýunça potensialyň üýtgeýşiniň çaltlygyny häsiýetlendirýän $d\varphi/dn$ ululygy, potensial gradiýenti diýilýär we $\text{grad}\varphi$ arkaly belgilenýär. Şonuň üçin öňdäki aňlatmany şeýle ýazmak bolar:

$$\vec{E} = -\text{grad}\varphi$$

Şeýlelikde, güýjenme wektory \vec{E} potensial gradientine san taýdan deňdir, emma garşylykly tarapa (potensialyň kemelýän tarapyna) ugrukdyrylandyr.

Potensiallary hemişelik φ_1 we φ_2 , aralyklary d deň bolan, iki sany tükeniksiz parallel, zaryadlanan plastinkalaryň arasyndaky elektrostatik meýdanyň güýjenmesini kesgittläliň. Plastinkalarda zaryadlar birdeň bölünen, plastinkalaryň arasyndaky elektrostatiki meýdan birhilli. Güýç çyzyklary plastinka perpendikulýar ekwipotensial üstler olara paralleldir. (10.35) formulany ulanyp ýazýarys:

$$E = \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{d} = \frac{U}{d} \quad (10.36)$$

bu ýerde $\varphi_1 - \varphi_2 = U$ – plastinkalaryň aralygyndaky potensiallar tapawudy. Oňa naprýaženiýe hem diýilýär.

Potensiallar tapawudy ýa-da naprýaženiýe elektrostatiki meýdanyň esasy häsiýetnamalarynyň biridir. Potensiallar tapawudy diýlende iki nokadyň aralygyndaky potensiallaryň tapawudy göz önünde tutulýar. Olaryň absolýut bahalaryna uly üns berilmeýär. Meýdanyň berlen nokadynyň potensialy diýleninde hem potensiallar tapawudy göz önünde tutulýar. Bu ýerde meýdanyň berlen nokadynyň potensialy bilen meýdanyň beýleki bir ikinji nokadynyň, potensialy şertleýin nol hasap edilýän nokadyň potensialy göz önünde tutulýar. (Mysal üçin, ýeriň potensialyny nol diýip kabul edýärler).

(10.36) formula laýyklykda potensial we potensiallar tapawudy (U elektrik naprýaženiýesi) halkara ölçeg birlikler sistemasynda

$$1B = \frac{1J}{1Kl}$$

bolýar.

Eger $1Kl$ zarýad iki nokadyň aralygynda ornuny üýtgedeninde $1J$ iş edilýän bolsa, onda bu nokatlaryň aralygyndaky potensiallar tapawudy 1 wolta (W) deňdir.

§10.10. Geçirijiler we dielektrikler. Dielektrikleriň polýarlanyşy

Geçirijilerde elektrik zarýadlary meýdanyň täsiri astynda erkin hereket edip bilýärler. Eger geçirijiler hökmünde suwuklyklar we gazlar ulanylsa, olarda položitel hem-de otrisatel zarýadlanan bölejikler - položitel we otrisatel ionlar we elektronlar hereket edýärler. Metallaryň geçirijiligi bolsa diňe otrisatel bölejikleriň - elektronlaryň hereketi arkaly döredilýär.

Suwuklyklar we gazlar adaty şertlerde elektrigi erbet geçirýärler. Eger-de gaz ionlaşdyrylsa, suwuklyga haýsy-da bolsa bir duzy garyp eredende, olaryň geçirijiligi artyp, oňat geçirijä öwrülýärler.

Islendik geçirijide bar bolan erkin zarýadlar daşarky elektrik meýdanynyň täsiri astynda orunlaryny üýtgedýärler, sähelçe wagtdan soň garşylykly meýdan döredip, daşky meýdany doly kompensirleýärler. Şonuň üçin geçirijiniň içindäki elektrik meýdanynyň güýjenmesi (daşarky elektrik meýdany bolsa-da) nola deňdir. ($E=0$) “Dielektrik” termini ilkinji gezek M.Faradeý tarapyndan girizilýär. Dielektriklere ebonit, farfor ýaly gaty jisimler, suwuklyklar (mysal üçin dissillirlenen suw), gazlar degişlidir.

Ýokarda belleýşimiz ýaly, daşarky şertleriň üýtgemegi netijesinde (gyzdymak, radioaktiw şöhlelenme we ş.m.) dielektrikler geçirijä öwürlip bilerler. Dielektrikleriň elektrik meýdanynda ýerleşenlerinde ýagdaýlarynyň üýtgemegini olaryň molekulýar gurluşlary bilen düşündirmek bolar.

Dielektrikleri şertleýin üç topara bölmek bolar: 1) polýar molekulaly; 2) polýar däl molekulaly; 3) kristallik.

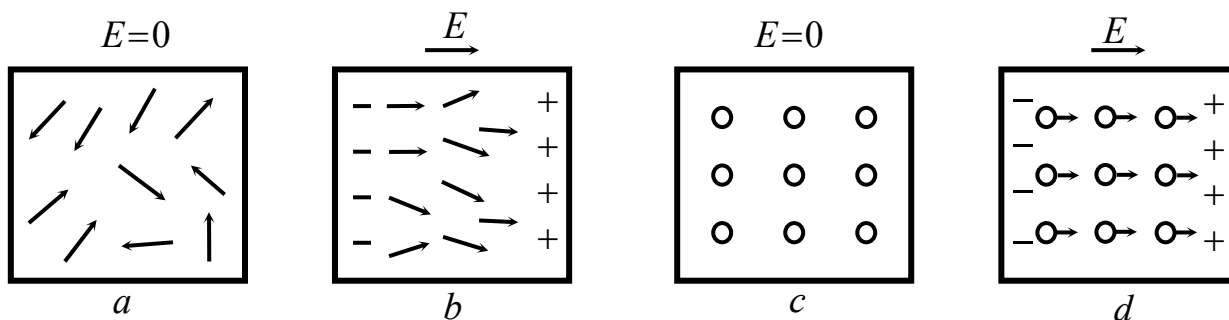
Birinji topara suw, fenol, nitrobenzol ýaly maddalar girýärler. Bu dielektrikleriň molekulalarynyň ýerleşiş simmetrik däl, olaryň položitel we otrisatel zaryadlarynyň “massa merkezleri” gabat gelmeýärler, hat-da elektrik meýdany bolmadyk wagtynda hem olar dipolyň elektrik momentine eýedirler.

10.14-nji a suratdan görnüşi ýaly, bu maddalaryň molekulalarynyň dipol momenti elektrik meýdany bolmadyk wagtynda haotik (tertipsiz) ugrukdyrylandyr we ähli N molekulalaryň momentleriniň wektor jemi nola deňdir:

$$\sum_{i=1}^n p_i = 0$$

Eger dielektrigi elektrik meýdanynda ýerleşdirenimizde, molekulalaryň dipol momentleri meýdanyň ugruna baka ýerleşip başlaýarlar (10.14-nji b surat). Emma molekulýar - ýylylyk haotik hereketiň täsiri netijesinde olar doly meýdanyň ugruna baka ornaşyp bilmeýärler. Bu ýagdaýda

$$\sum_{i=1}^n p_i \neq 0$$



10.14-nji surat Polýar molekulaly dielektrige elektrik meýdanynyň täsiri.

Netijede, elektrik meýdanynda ýerleşdirilen dielektrigiň bir gapdaly otrisatel, bir gapdaly bolsa položitel zaryadlanýar - dielektrik polýarlanýar. Dielektrigiň polýarlanýş derejesi onuň häsiýetine we daşky elektrik meýdanynyň güýjenmesiniň ululygyna baglydyr.

Dielektriklerin ikinji toparyna, mysal üçin, kislorod, wodorod elektrik meýdany bolmadyk wagtynda azot, benzol, polietilen, ftoroplast ýaly maddalar degişlidir. Olaryň molekulalarynyň dipol momentleri ýokdur. Olarda elektronlaryň we ýadronyň zaryadlary şeýle ýerleşen, ýagny otrisatel we položitel zaryadlaryň “massa merkezleri” gabat gelýärler. Eger polýar däl molekulany elektrik meýdanynda ýerleşdirseň, dürli atly zaryadlar garşylykly taraplara süýşýärler we molekulanyň dipol momenti döredýärler. 10.14-nji suratda tegelejekler görnüşinde dielektrigiň şeýle molekulasyň meýdan bolmadyk (ç) we bar wagtyndaky (d) ýagdaýy görkezilendir. Tegelejeklerdäki peýkamlar molekulalaryň dipol momentlerini aňladýarlar.

Dielektriklerin üçünji toparyna – gözenegi položitel we otrisatel ionlardan ybarat bolan kristallik dielektrikler (mysal üçin, NaCl, KCl) degişlidir. Şeýle dielektrige biri položitel ikinjisi otrisatel zaryadlanan iki gözenejigiň toplumy hökmünde shematiki seretmek bolar. Meýdan bolmadyk wagtynda gözenejekler simmetrik ýerleşendirler we şeýle dielektrigiň elektrik momentiniň jemi nola deňdir. Eger dielektrigi elektrik meýdanynda ýerleşdirseň gözenejekler garşylykly tarapa süýşýärler we dielektrik elektrik momentini alýar.

Elektrik meýdanynda ýerleşdirilen dürli dielektriklerde bolup geýýän şeýle prosesleri polýarlanma diýen umumy termin arkaly birleşdirmek bolar.

Birinji topara girýän dielektrikler üçin - ugrukdyrylan polýarlanma, ikinji – elektron, (ýagny esasy elektronlar süýşýärler), üçünjä – ion polýarlanmasy degişlidir. Dielektrikleri şeýle toparlara bölmeklik diňe şertleýindir. Sebäbi, real dielektriklerde birbada polýarlanmagyň ähli görnüşiniň-de bolmagy mümkindir.

Dielektrigiň ýerleşen elektrik meýdanynyň güýjenmesiniň üýtgemegi onuň polýarlanma ýagdaýyna täsir edýär. Dielektrigiň polýarlanma derejesiniň onuň molekulalarynyň dipolyň elektrik momentiniň jemi hökmünde häsiýetlendirmek $\left(\sum_{i=1}^n p_i \right)$ bolmaz, sebäbi, bu ululyk göwrüme baglydyr. Şu sebäpli-de, dielektrigiň polýarlanyşyny häsiýetlendirmek üçin polýarlanyş diýilýän ululyk girizilýär. Ol dielektrigiň elementiniň elektrik momentiniň jeminiň bu elementiň göwrümüne bolan gatnaşygyna deňdir:

$$p_e = \sum_{i=1}^n \frac{p_i}{V}$$

Bu ýerde p_i – molekulalaryň dipol momentiniň wektory, n – dielektrigiň V göwrümdäki dipol molekulalaryň sany, p_b – polýarizlanma wektory. Polýarlanma wektorynyň ölçeg birligi – Kl/m^2 .

Izotrop dielektrikleriň polýarlanma wektory onçakly uly bolmadyk E -de onuň içindäki meýdanyň güýjenmesine proporsionaldyr:

$$\vec{P} = \chi \varepsilon_0 \vec{E}$$

bu ýerde χ – maddanyň dielektrik kabul edijiligi. Ol maddanyň gurluşyna we temperaturasyna bagly bolan ölçegsiz ululykdyr.

Dielektriklerdäki zarýadlar onuň molekulalaryna degişli bolup, meýdanyň täsiri astynda biri-birleri bilen baglansyklydyrlar. Olary molekulalaryň üstünden aýryp bolmaz. Olar geçirijilerdäki erkin zarýadlar ýaly, maddanyň бүтін göwrümi boýunça erkin süýşüp bilmeýärler. Şonuň üçin hem olara baglansykly zarýadlar diýilýär.

Dielektrigiň içinde baglansykly zarýadlaryň döredýän elektrik meýdanynyň E' güýjenmesi, dielektrigi polýarlaýan daşarky elektrik meýdanynyň E_0 güýjenmesine garşylykly ugrugandyr. Dielektrigiň içindäki jemleýji meýdanyň güýjenmesi:

$$E = E_0 + E'$$

E netijeleýji meýdanyň güýjenmesi gurşawyň elektrik häsiýetine baglydyr we dielektrige goýlan daşarky meýdanyň güýjenmesine proporsionaldyr.

$$E = E_0 / \varepsilon$$

Gurşawyň dielektrik syzyjylygy $\varepsilon = E_0 / E$. Bu ululyk wakuumdaky meýdanyň güýjenmesiniň dielektrigiň içindäkä garanynda näçe gezek ululygyny görkezýär. ε ölçeg birliksiz ululykdyr.

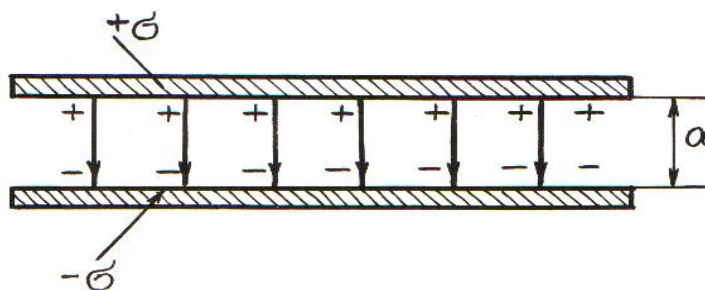
§10.11. Geçirijileriň elektrik sygymy

Islendik zarýadsyz duran jisimlere, mysal üçin, elektrostatik maşynyň, akkumulýatorlaryň, galwaniki elementleriň we ş.m. kömegi bilen zarýad berenimizde olar zarýadlanyp başlaýarlar, ýagny zarýadlanan bölejikleriň bir jisimden beýleki bir jisime geçmek prosesi başlanýar. Elektrostatiki maşynyň kömegi bilen iki sany golaý duran geçirijini zarýadlandyryp başlanymyzda olaryň biri $+(q)$ zarýady,

beýlekisi $-(q)$ zaryady alýar. Iki geçirijiniň arasynda elektrik meýdany döreýär. Olaryň arasynda potensiallar tapawudy artyp başlaýar. Geçirijilerde toplanýan zaryadlaryň sanynyň köpeldigiçe, olaryň arasyndaky naprýaženiýe-de artýar we geçirijileriň arasynda uýgun döräp, olar zaryadsyzlanyp başlaýarlar.

Indi geçirijilerde zaryadyň toplanýşyna, onuň ululygynyň nämä baglydygyna seredeliň.

Goý, iki sany her haýsynyň meýdany S bolan parallel ýerleşdirilen metal plastinalar berlen bolsun. Plastinalaryň aralygynda dielektrik syzyjylygy ϵ deň bolan dielektrik gatlagy ýerleşen. Ýokarky plastinada $+q$, aşakyda $-q$ zaryadlar toplanýar diýeliň. Olar plastinkalaryň içki üstlerinde bir hilli bölünen. Zaryadlaryň üst dykzlygy degişlilikde $\sigma_+ = \frac{q_+}{S}$ hem σ_- bolsun (10.16-njy surat).



10.16-njy surat. Parallel plastinalaryň elektrik meýdany.

Goý, bir plastinanyň potensialy φ_1 , beýlekisiniňki φ_2 bolsun. Potensiallar tapawudyna deň bolan $U = \varphi_1 - \varphi_2$ naprýaženiýäniň, E meýdanyň güýjenmesiniň we plastinkalaryň (10.16-njy surat) aralygyndaky d uzaklygyň şeýle baglanyşygy bar:

$$U = E \cdot d$$

Ikinji tarapdan, iki plastinkanyň arasyndaky meýdanyň güýjenmesi, (öň belleýşimiz ýaly),

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon \epsilon_0}$$

ululyga deň. Zaryadlaryň üst dykzlygynyň $\sigma = q/S$ deňdigini hasaba almak bilen, ýazýarys:

$$U = E \cdot d = \frac{\sigma}{\epsilon \epsilon_0} d = \frac{d}{\epsilon \epsilon_0} \frac{q}{S}, \quad (10.37)$$

ýa-da

$$U = \frac{q}{\epsilon \epsilon_0 S / d}$$

indi $\varepsilon\varepsilon_0 S/d$ gatnaşygy C bilen bellesek, onda

$$U = \frac{q}{C} \quad (10.38)$$

ýa-da

$$q = CU$$

bolar. (10.38) formuladan görnüşi ýaly, plastinkalaryň arasyndaky U naprýaženiýe q zaryada proporsionaldyr.

Bu ýerdäki C proporsionallyk koeffisiýentine geçirijiniň sygymy (ýa-da elektrik sygymy) diýilýär.

Biziň sereden iki sany geçiriji plastinkalardan ybarat bolan sistemamyza tekiz kondensatorlar diýilýär. Onda tekiz kondensatoryň sygymy (10.38) formula görä, şeýle bolar:

$$C = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 S}{d} \quad (10.39)$$

Kondensatoryň sygymy onuň plastinkalarynyň S meýdanyna, olaryň aralygynyň uzaklygyna, dielektrigiň hiline baglydyr.

Her bir aýry-aýrylykda alnan jisimiň hem elektrik sygymy bardyr. Mysal üçin dielektrik syzyjylygy ε deň bolan tükeniksiz gurşawda ýerleşen R radiusly ýekelikde ýerleşen metallik sferanyň elektrik sygymy:

$$C = \frac{q}{\varphi_1 - \varphi_2} = 4\pi\varepsilon\varepsilon_0 R \quad (10.40)$$

deňdir. Bu ýerde ikinji tekizlige (obkladka) tükeniksiz radiusly sfera hökmünde seretmek bolar. Onda $\varphi_2 = \varphi_\infty = 0$

ýa-da
$$\varphi_1 = q / (4\pi\varepsilon\varepsilon_0 R) .$$

Halkara ölçeg birlikler sistemasynda sygym birligi deregine Kl/W kabul edilendir. Bu birlige farad diýilýär.

Farad diýip, $1 Kl$ zaryad berleninde potensialy $1W$ artýan geçirijiniň sygymyna aýdylýar, ýagny

$$1F = \frac{1Kl}{1W} = 9 \cdot 10^{11} sm$$

Soňky gatnaşykdan görnüşi ýaly, radiusy $9 \cdot 10^{11}$ sm bolan wakuumda ýerleşdirilen şaryň sygymy 1 farada deňdir (Ýeriň radiusy $6,371 \cdot 10^8$ sm, elektrik sygymy $C \approx 0,7$ mF).

Şeýlelikde farad – örän uly ulylyk, şonuň üçin onuň ülüşlerinden peýdalanýarlar: mikrofara (mkF), millifara (mF), nanofara (nF) we pikofara (pF): $1 \text{ mkF} = 10^{-6} \text{ F}$, $1 \text{ mF} = 10^{-3}$, $1 \text{ nF} = 10^{-9} \text{ F}$, $1 \text{ pF} = 10^{-12} \text{ F}$ we ş.m.

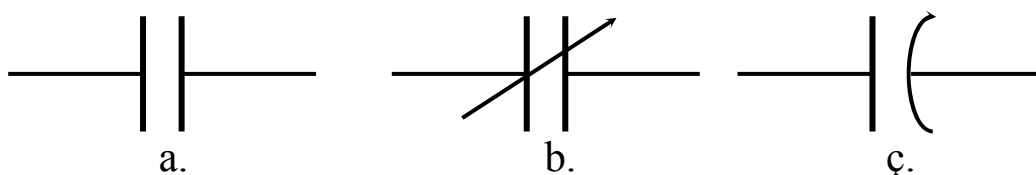
§10.12. Kondensatorlar

Geçen paragrafyň materiallaryndan görnüşine görä, geçirijiniň sygymynyň uly bolmagy üçin onuň ölçegleri hem uly bolmaly. Bu bolsa käbir kynçylyklary döredýär. Şonuň üçin, ölçegleri uly bolmadyk, emma özünde uly zarýadlary toplam bilýän, uly sygymly gurluşlar gerek bolýar. Bu gurluşlara kondensatorlar diýilýär. Kondensatoryň in ýönekeý görnüşlerinden biri, biri-birine golaý ýerleşdirilen we aralygy dielektrik gatlagy bilen bölünen birmeňzeş iki sany parallel tekizliklerden (plastinalardan) ybaratdyr. Şeýle görnüşli kondensatora tekiz kondensator diýilýär. Kondensatoryň aýry-aýrylykdaky plastinalaryna onuň obkladkalary diýilýär (10.16-njy surat). Kondensatorlar zarýadlananda onuň obkladkalaryndaky toplanan zarýadlar modullary boýunça birmeňzeş emma, alamatlary boýunça garşylyklydyrlar. Şeýle tekiz kondensatorlarda elektrik meýdanynyň güýç çyzyklary onuň položitel zarýadlanan obkladkasynda başlanýar we otrisatel zarýadlanan obkladkasynda gutarýar. Şonuň üçin elektrik meýdanynyň ählisi diýen ýaly kondensatoryň içinde ýerleşendir. Şeýle kondensatoryň sygymy (10.38) formula bilen kesgitlenilýär.

Kondensatorlaryň tehnikada dürligörnüşleri ulanylýarlar: tekiz, silindr, sfera görnüşleri. Olaryň obkladkalarynyň arasyndaky dielektrik hökmünde ulanylýan gurşawyň tebigatyna baglylykda: howa, kagyz, slýuda, keramika, elektrolit kondensatory bardyrlar.

Kondensatorlar hemişelik, üýtgeýän we ýarym üýtgeýän sygymly bolup bilerler.

Kondensatorlaryň çyzgylarda belgilenişi 10.17-nji suratda görkezilendir.

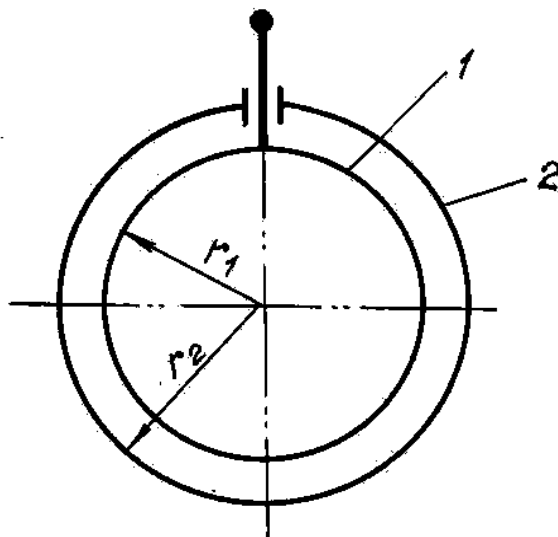


10.17-nji surat. Kondensatorlaryň çyzgylarda belgilenişi.

Bu ýerde: a hemişelik sygymly kondensator, b – üýtgeýän, ϵ – ýarym üýtgeýän sygymly kondensatorlardyr. Kondensatorlar radiokabuledijilerde, telewizorlarda, tehnikanyň dürli pudaklarynda giňden ulanylýarlar.

Käbir kondensatorlaryň gurluşy we olaryň sygymlarynyň kesgitlenilişi barada durup geçeliň:

a. Sferik (şar) kondensatory. Sferik kondensatory radiuslary deňişlilikde r_1 we r_2 bolan özara konsentrik sferalardyr (10.18-nji surat).



10.18-nji surat. Sferik kondensatoryň sygymynyň kesgitlenilişi.

Şeýle kondensatorlarda meýdan tutuşlygyna kondensatoryň içinde jemlenendir 1 we 2 konsentrik sferalaryň aralygy dielektrikden doldurylandyr. Kondensatoryň daşynda $E=0$, sebäbi, kondensatoryň içki we daşky okladkalarynyň döreden meýdanlary biri-birlerini kompensirleýärler. Obkladkalaryň aralygyndaky meýdany diňe birinji zarýadlanan sfera döredýär. (10.27) formula laýyklykda kondensatoryň obkladkalarynyň arasyndaky potensiallar tapawudy

$$\varphi_1 - \varphi_2 = \frac{q}{4\pi\epsilon\epsilon_0} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right)$$

Şeýlelikde, sferiki kondensatoryň elektrik sygymy

$$C = \frac{q}{\varphi_1 - \varphi_2} = \frac{q}{\frac{q}{4\pi\epsilon\epsilon_0} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right)} = \frac{4\pi\epsilon\epsilon_0 r_1 r_2}{r_2 - r_1} \quad (10.41)$$

(10.41) formuladan görnüşi ýaly, sferik kondensatoryň sygymy obkladkalaryň arasyndaky gurşawyň dielektrik syzyjylygyna göni proporsionaldyr.

b. Slindrik kondensator. Uzynlyklary l we radiuslary r_1 hem r_2 bolan biri-biriniň içinde ýerleşen iki sany umumy okuň daşynda ýerleşdirilen (koaksial) slindrlerden ybaratdyr.

Zarýadlanan slindriň okundan r_1 we r_2 aralykda ýerleşen sany nokadyň aralygyndaky potensiýallar tapawudy

$$\varphi_1 - \varphi_2 = \int_{r_1}^{r_2} E dr = \int_{r_1}^{r_2} \frac{\tau}{2\pi\epsilon\epsilon_0} \frac{dr}{r} = \frac{\tau}{2\pi\epsilon\epsilon_0} \ln \frac{r_2}{r_1} \quad (10.42)$$

bu ýerde: $\tau = \frac{q}{l}$ – zarýadlanan slindriň çyzyk dykyzlygy l – obkladkalaryň uzynlygy.

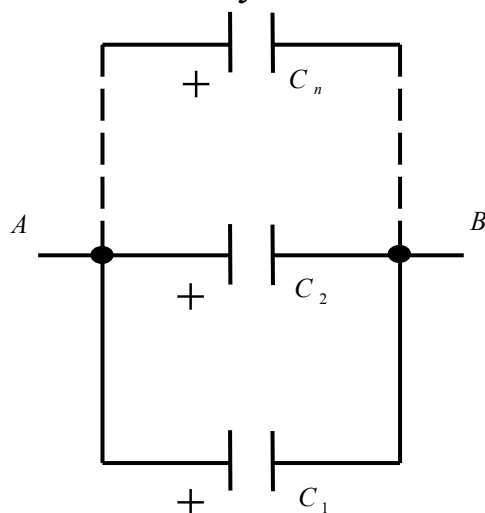
(10.42) formuladan potensiýallar tapawudynyň bahasyny ornuna goýup alarys:

$$C = \frac{q}{\varphi_1 - \varphi_2} = \frac{q}{\frac{q}{2\pi\epsilon\epsilon_0 l} \ln \frac{r_2}{r_1}} = \frac{2\pi\epsilon\epsilon_0 l}{\ln \frac{r_2}{r_1}} \quad (10.43)$$

Kondensatorlaryň birikdirilşi. Gerek elektrik sygymy almak üçin kondensatorlar özara parallel we yzygiderli birikdirilýärler.

1. Kondensatorlaryň parallel birikdirilşi (10.19-njy surat). Kondensatorlar parallel birikdirilende A we B nokatlaryň potensiýalary hemme kondensatorlar üçin umumydyr. $\Delta\varphi_{AB} = \Delta\varphi_1 = \Delta\varphi_2 = \Delta\varphi_n$ batareýanyň umumy zarýady bolsa aýry-aýrylykda alnan kondensatorlaryň zarýadlarynyň jemine deňdir:

$$q = q_1 + q_2 + \dots + q_n \quad (10.44)$$



10.19-njy surat. Kondensatorlaryň parallel birikdirilişi.

Her bir kondensator üçin şeýle ýazýarys:

$$q_1 = C_1 \Delta \varphi, \quad q_2 = C_2 \Delta \varphi, \quad q_n = C_n \Delta \varphi \quad (10.45)$$

(10.44) we (10.45) formulalaryň esasynda alýarys:

$$C_{AB} \Delta \varphi_{AB} = \Delta \varphi (C_1 + C_2 + C_3 + \dots + C_n) = \Delta \varphi_{AB} \sum_{i=1}^n C_i$$

bu ýerden

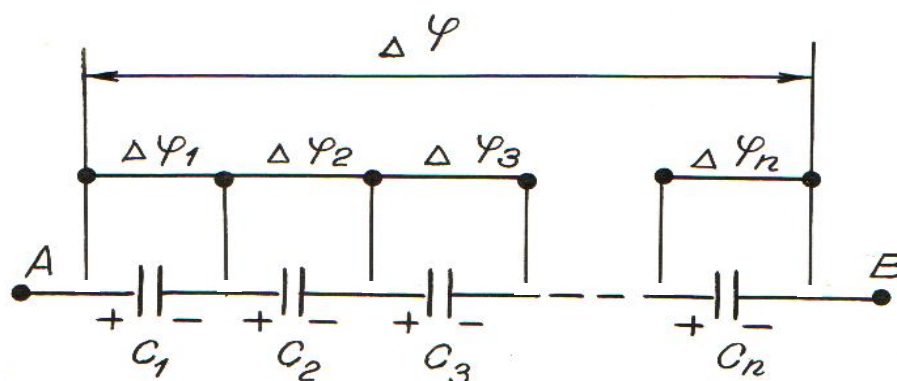
$$C_{AB} = \sum_{i=1}^n C_i \quad (10.46)$$

Diýmek, kondensatorlar parallel birikdirilende alnan batareýanyň C_{AB} umumy sygymy bu batareýa girýän kondensatorlaryň aýry-aýrylykda alnan sygymlarynyň jemine deňdir.

Şeýlikde, birnäçe kondensatorlary parallel birikdirip, örän uly elektrik sygymyny alyp bolýar.

2. Kondensatorlaryň yzygiderli birikdirilişi (10.20-nji surat).

Kondensatorlar yzygiderli birikdirilende, eger-de birinji kondensatoryň obkladkasyna q zarýad berilse, täsiriň netijesinde kondensatorlaryň ähli obkladkalaryna hem şeýle zarýad bolýar. Ýöne her bir kondensatorlaryň obkladkalary garşylykda zarýadlanýar. Şeýlelikde $q_1 = q_2 = q_3 = \dots = q_n$ diýip ýazyp bolýar.



10.20-nji surat. Kondensatorlaryň yzygiderli birikdirilişi.

Umumy potensiýallaryň tapawudy bolsa, her bir kondensatoryň obkladkalarynyň arasyndaky potensiýallaryň tapawutlarynyň jemine deňdir.

$$\Delta \varphi_{AB} = \Delta \varphi_1 + \Delta \varphi_2 + \Delta \varphi_3 \dots + \Delta \varphi_n$$

Elektrik sygymynyň kesgitlemesine göre

$$C = \frac{q}{\Delta\varphi} \quad \text{bu ýerden} \quad \Delta\varphi = \frac{q}{C}$$

onda

$$\frac{q_{AB}}{C_{AB}} = \frac{q_1}{C_1} + \frac{q_2}{C_2} + \frac{q_3}{C_3} + \dots \frac{q_n}{C_n} = q \sum_{i=1}^n \frac{1}{C_i}$$

bu ýerden

$$\frac{1}{C_{AB}} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{C_i} \quad (10.46)$$

Diýmek, birnäçe kondensator yzygiderli birikdirileninde olaryň umumy sygymynyň ters ululygy bu birleşmä girýän her bir kondensatoryň sygymalarynyň ters ululyklarynyň jemine deňdir.

§10.13. Elektrostatiki meýdanyň energiýasy. Energiýanyň dykzlygy

Eger ýekelikde ýerleşdirilen geçirijiniň q zarýady bar bolsa, onuň töwereginde elektrostatiki meýdany döreýär. Goý, geçirijiniň üstüniň potensialy φ bolsun. Indi, geçirijiniň zarýadyny dq ululykça ulaldalyň. dq zarýady tükeniksizlikden meýdanyň berlen nokadyna geçirmek üçin dA deň bolan işi ýerine ýetirmeli, ýagny

$$dA = dq (\varphi - \varphi_\infty) .$$

Emma, berlen geçirijiniň elektrostatik meýdanynyň potensialy tükeniksizlikde nola deňdir ($\varphi_\infty=0$), onda

$$dA = \varphi dq = \frac{q}{C} dq \quad (10.47)$$

bu zarýady geçirijiden tükeniksizlige geçirmek üçin hem elektrostatik meýdanyň güýçleri şu ýokardaky dA işe deň bolan işi ýerine ýetirýärler. Şeýlelikde, geçirijiniň zarýadyny dq ululyga köpeldenimizde, meýdanyň potensial energiýasy artýar, ýagny

$$dW = dA = \frac{q}{C} dq \quad (10.48)$$

(10.48) formulany integrirläp, zarýadlanan geçirijiniň zarýadynyň 0-dan q çenli artanyndaky elektrostatiiki meýdanyň potensial energiýasyny tapýarys:

$$W = \int_0^q \frac{1}{C} q dq = \frac{q^2}{2C} \quad (10.49)$$

$\varphi = \frac{q}{C}$ gatnaşygy göz önünde tutup, meýdanyň potensial energiýasyny şeýle formulalaryň üsti bilen aňlatmak bolar:

$$W = \frac{1}{2} \frac{q^2}{C}; \quad W = \frac{1}{2} C \varphi^2; \quad W = \frac{1}{2} q \varphi \quad (10.50)$$

bu ýerde q – geçirijiniň zarýady, C – onuň sygymy.

Eger elektrostatiiki meýdan birnäçe q_i nokatlanç zarýadlar sistemasy tarapyndan döredilen bolsa, onda onuň energiýasy:

$$W = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{i=n-1} q_i \varphi_i \quad (10.51)$$

bu ýerde φ_i – (q_i – zarýaddan başga) $(n-1)$ zarýadlar tarapyndan q_i zarýadyň ýerleşen nokadynda döredilen meýdanyň potensialy.

Zarýadlanan kondensator üçin potensiallar tapawudynyň $U = \frac{q}{C}$ deňdigini hasaba alyp, onuň elektrostatik meýdanynyň doly energiýasyny tapýarys:

$$W = \frac{1}{2} \frac{q^2}{C}; \quad W = \frac{1}{2} C U^2; \quad W = \frac{1}{2} U q$$

Bu formulalary kondensatorlaryň obkladkalary nähili formada bolsalar-da ulanyp bolýar.

Elektrostatik meýdanyň energiýasynyň göwrüm dykzlygy elementiň göwrüminde toplanan elektrostatiiki meýdanyň potensial energiýasynyň bu göwrümiň ululygyna bölünmegine san taýdan deňdir:

$$W_p = \frac{W}{V} \quad (10.52)$$

Göwrüm dykzlygynyň birligi 1J/m^3 .

Mysal üçin, tekiz kondensatoryň energiýasynyň göwrüm dykzlygyny kesgitleiň; kondensatoryň göwrümi $V = S \cdot d$

bu ýerde: S - plastinanyň meýdany, d - olaryň arasyndaky uzaklyk, onda

$$W_p = \frac{W}{Sd} = \frac{1}{2} \frac{CU^2}{Sd}, \quad \text{emma} \quad C = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 S}{d} \quad \text{we} \quad E = \frac{U}{d}$$

gatnaşyklary göz önünde tutup, ýazýarys:

$$W_p = \frac{1}{2} \frac{\varepsilon\varepsilon_0 S U^2}{d^2 S} = \frac{1}{2} \varepsilon\varepsilon_0 E^2 \quad (10.53)$$

ýa-da

$$W_p = \frac{1}{2} ED = \frac{1}{2} \frac{D^2}{\varepsilon\varepsilon_0} \quad (10.54)$$

bu ýerde E - dielektrik syzyjylygy ε bolan gurşawdaky elektrostatiki meýdanyň güýjenmesi ; $D = \varepsilon\varepsilon_0 E$; \vec{D} - elektrik süýşme wektory.

XI BAP. HEMIŞELIK ELEKTRIK TOGY

§11.1. Toguň güýji. Potensiallaryň tapawudy. Elektrik hereketlendiriji güýji

Elektrik zaryadynyň bir tarapa tertipli hereketine elektrik togy diýilýär. Metallarda erkin orunlaryny üýtgedýän zaryadly bolejikler elektronlardyr. Şonuň üçin metallardaky elektrik togy elektronlaryň ugrukdyrylan hereketidir.

Suwukluklardaky elektrik togy – elektronlaryň, položitel we otrisatel ionlaryň, gazlardaky bolsa – ionlaryň hereketidir. Togyň ugry deregine položitel zaryadlanan bolejikleriň hereketiniň ugry kabul edilen. Emma bu ugur metallardaky elektrik togunuň hakyky ugry bilen gabat gelmeýär.

Geçirijiniň kese-kesiginden wagt birliginde akyp geçýän elektrik mukdaryna san taýdan deň bolan fiziki ululyga toguň güýji diýilýär. Ýagny

$$I = \frac{dq}{dt} \quad (11.1)$$

Eger islendik deň wagt aralygynda geçirijiniň islendik kese-kesiginden şol bir mukdardaky elektrik zaryady geçýän bolsa, hem-de olaryň hereketleriniň ugurlary üýtgemeyän bolsa, şeýle toga hemişelik tok diýilýär, onda

$$I = \frac{q}{t}$$

Halkara birlikler sistemasynda tok guýjüniň birligi esasy birlikdir, oňa amper diýilýär we ol birlik iki sany parallel tokly gecirijileriň özara tasirinden kesgitlenilýär. (Biz oňa toklaryň magnit täsirini öwrenimizde seretjekdiris). (11.1) formuladaky zaryad birligi

$$[q] = [I][t] = A \cdot s = Kl$$

Tok guýjüniň geçirijiniň kese-kesiginiň meýdanyna bolan gatnaşygyna togyň dykzlygy diýilýär, ol şeýle formula bilen kesgitlenýär:

$$j = \frac{dI}{dS}$$

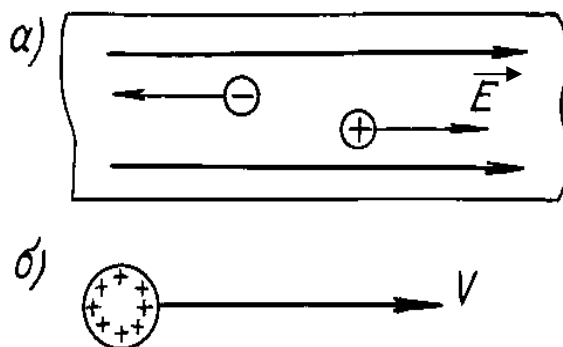
Eger tok hemişelik bolsa, onda toguň dykzlygy hem üýtgemeyär, ýagny

$$j = \frac{I}{S} = \frac{q}{S \cdot t} \quad \vec{j} = en \vec{v} .$$

Togyň dykzlygy wektor ululykdyr we ol položitel zaryadlaryň tizliginiň ugry boýunça ugrukdyrylyp, wagt birliginde meýdan birliginden akyp geçýäh elektrik zaryadlarynyň mukdaryna san taýdan dendir. HU birlikler sistemasynda toguň dykzlygy A/m^2 ölçenilýär.

Elektrik togunyň görnüşleri.

a) Eger geçirijide daşky elektrik meýdanyny döretsek we ony saklasak, onda geçirijiniň içinde ummasyz zaryadlanan bölejikler herekete geler: (11.1-nji surat) položitel zaryadlar – meýdanyň ugruna baka otrisatel zaryadlar bolsa, meýdanyň garşysyna (11.1-nji a surat) tertipli hereket ederler, ýagny geçirijide elektrik togy dörrär. Şeýle toga geçiriji tok diýilýär. Geçiriji togy döretmek üçin ýapyk elektrik zynjyry we tok çeşmesi gerek.



11.1-nji surat. Elektrik meýdany döredilen geçirijilerde zaryadlaryň hereketleriniň ugurlary.

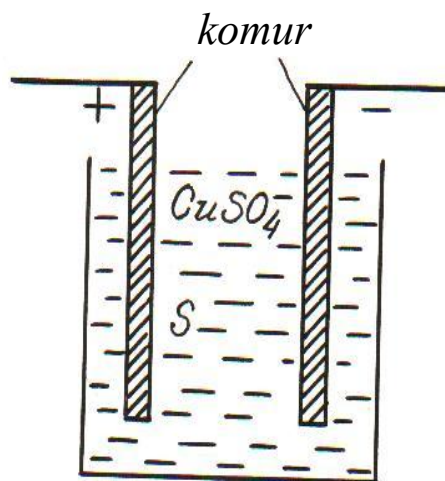
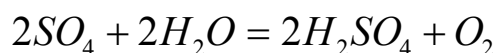
b) Goý, zaryadlanan makroskopik jisim (11.1-nji b surat) giňişlikde ornuny üýtgetsin. Şar bilen bilelikde onuň içindäki ähli zaryadlanan bölejikler-de orunlaryny uytgedýärler we olaryň tertipleşdirilen (ugrukdyrylan) hereketi döreýär, elektrik togy ýüze çykýar. Şeýle toga konweksiýa togy diýilýär.

ç) Eger zaryadlanan bölejikler daşky elektrik meýdanynyň täsiri astynda wakuumda hereket edýän bolsalar şeýle toga wakuumdaky tok diýilýär.

Elektrik togunyň tasirleri. Elektronlaryň we ionlaryň hereketini biz gözümüz bilen görüp bilmeýäris. Emma, olaryň hereketleriniň täsiri astynda ýüze çykýan käbir hadysalara seredip, elektrik togunyň barlygy we onuň ululygy barada aýdyp bileris.

a) Toguň magnit tasiri. 1820-nji ýylda Kopengagenli professory Ersted geçirijiden tok akanda, onuň golaýynda ýerleşdirilen magnit diljagazyna täsir edýändigini açdy. Sebäbi, tokly geçirijiniň töwereginde magnit meýdany döreýär. Ol hem belli bir güýç bilen magnit diljagazyna täsir edýär. Toguň magnit täsiri hazirki wagtda magnitelektrik enjamlarynyň kömegi bilen tok güýjüni ölçemekde ulanylýar.

b) Toguň himiki täsiri. Oňa ýönekeý tejribäniň üsti bilen göz ýetirmek bolar. Mis kuporosynyň (CuSO_4) suwly erginine iki sany kömür sterženini (taýajyklary) salalyň (11.2-nji surat) we ony galwaniki elementiň ýa-da akkumulýatoryň uçlaryna (polýuslaryna) birleşdireliň. Birnäçe minut geçenden soňra, sterženleri erginiň içinden çykaralyň. Biz akkumulýatoryň otrisatel polýusyna birikdirilen sterženiň ýüzünde mis gatlagynyň emele gelendigini göreris. Beýleki tok çeşmesiniň položitel polýusyna birleşdirilen steržene SO_4 galyndysy çökýär. Emma, suwa galtaşanda ol toguň barlygyna bagly bolmazdan, reaksiýa girýär.



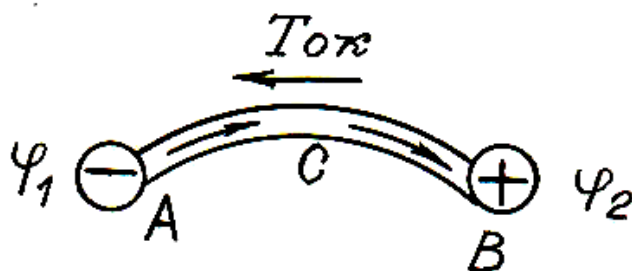
11.2-nji surat.
Toguň himiki tasiri.

Erginde kükürt kislotasy emele gelyär, kömür sterženinde bolsa gaz görnüşinde kislorod bölünýär.

ç) Toguň ýylylyk täsiri. Elektrik togy geçende geçiriji gyzýar. Metal geçirijiniň üstünden kesgitli tok güýjüni geçirip, ony gerek bolan temperatura çenli gyzdyrmak bolar. Elektrik pejiniň we ýylylyk galwanometrleriniň işleýiş prinsipini şu häsiýete esaslanandyr. Ýagny, olarda okislenmeýän maýyşgak metal geçirijiler bolup, onuň üstünden ölçeniljek bolýan tok goýberilýär, geçirijiniň uzynlygyna giňelişi boýunça hem toguň ululygyny kesgitleýärler.

Indi elektrik togunyň döreýşine we onuň döremegi üçin zerur bolan şertlere seredeliň.

Goý, potentsiallary φ_1 we φ_2 deň bolan garşylykly zaryadlanan iki sany A, B şarlar berlen bolsun. (11.3-nji surat)



11.3-nji surat. Elektrik togunyň döredýşi.

Eger-de şarlary geçiriji arkaly birleşdirsek, onda elektrik meýdanynyň täsiri astynda elektronlar ACB ugur boýunça orunlaryny üýtgedýärler, ýagny geçirijide BCA ugra baka elektrik togy döredýär we onuň ugry geçirijiniň içinde döran elektrik meýdanyň güýjenmesiniň ugry bilen gabat gelýär.

Elektrik togunyň geçmegi bilen t wagtdan soň A we B şarlaryň potentsiallarynyň tapawudy we geçirijiniň içindäki elektrik meýdanynyň güýjenmesi nola deň bolýar, tok kesilýär. Şeýlelikde, elekt döredýär. (Şarlar birleşdirilen wagty toguň güýji noldan maksimal baha çenli artýar-da, soňra ýuwaşjadan nola çenli peselýär).

Elektrik zynjyrynda toguň hemişelik bolmagy üçin A şardan B şara geçen zaryadlary ýene-de A şara geçirmek gerek. Emma B-den A şara zaryadlar elektrik güýçleriniň täsiri astynda geçip bilmeýärler. Toguň döremeginiň hökmany şerti A we B şarlaryň arasynda potentsiallaryň tapawudynyň bolmagydyr ($\Delta\varphi = \varphi_A - \varphi_B \neq 0$). Ony hemişelik saklamak üçin ulanylýan ýörite gurluşlara tok çeşmeleri diýilýär.

Tok çeşmesi hökmünde galwaniki elementleri, akkumulýatorlary, termoelementleri, elektrik generatorlaryny... ulanýarlar. Tok çeşmesi toguň hemişelik bolmagy üçin şarjagazlaryň arasynda hemişelik potentsiallar tapawudyny saklamakdan başga-da elektrik zynjyryny utgaşdyryp, ikinji meseläni-de çözüär. Ýapyk zynjyr boýunça zaryadlaryň dyngysyz hereketini döredýär.

Tok çeşmesiniň iki polýusy (yçlary) bardyr: ýokary potentsially-položitel we aşak potentsially - otrisatel. Daşky zynjyr açyk bolan wagtynda onuň otrisatel polýusynda elektronlar agdyklyk edýärler, položitel polýusynda bolsa yetmezçilik edýärler. Tok çeşmesinde zaryadlaryň bölünmesi daşgary güýçleriň kömegi bilen bolup geçýär. Zynjyr utgaşdyrylanda tutuş zynjyrdaky elektrik meýdany döredýär.

Çeşmäniň içinde zaryadlar daşgary guýýçleriň täsiri astynda kulon güýçleriniň garşysyna (otrisatel zaryadlary – polýusdan minusa tarap) hereket edýärler, galan ähli zynjyrdan bolsa olary elektrik meýdany herekete getirýär. (Zaryadlanan bölejiklere elektrostatik häsiýetli – kulon güýçlerinden başga täsir edýän güýçleriň ählisine daşgary güýçler diýilýär).

Daşgary güýçler tebigaty boýunça mehaniki, himiki, ýylylyk, biologiki we ş.m. hadysalar bilen bagly bolup, dürli-dürlüdürler. Mysal üçin, galwaniki elementlerde we akkumulýatorlarda zaryadlaryň bölünmegi himiki reaksiýanyň, hemişelik toguň generatorlarynda elektromagnit induksiya hadysasynyň esasynda bolup geçýär.

Geçirijiden we tok çeşmesinden ybarat bolan zynjyry utgaşdyranymyzda, ondan tok geçýär. Şeýlelikde, daşgary güýçler iş edýärler. Bu iş tok çeşmesiniň içinde elektrik meýdanynyň güýçleriniň garşysyna ýerine ýetirilen $A_{t,r}$ işden we çeşmäniň gurşawynyň (sredasynyň) garşylygynyň mehaniki güýjüniň garşysyna ýerine ýetirilen A_g işden ybaratdyr. Ýagny

$$A_g = A_{t,r} + A_g \quad (11.3)$$

Nokatlanç položitel zaryad ähli zynjyryň boýuna tok çeşmesini hem öz içine alyp, ornuny üýtgedenindäki daşgary güýçleriň ýerine ýetirýän işiniň bu zaryadyň ululygyna bolan gatnaşygyna tok çeşmesiniň elektrik hereketlendiriji güýji (EHG) diýilýär:

$$\mathcal{E} = \frac{A_g}{q} = \frac{A_{t,r} + A_g}{q} \quad (11.4)$$

Kesgitleme boýunça elektrik meýdanynyň garşysyna ýerine ýetirilen iş şeýle aňladylyar.

$$A_{t,r} = q(\varphi_1 - \varphi_2)$$

Eger tok çeşmesiniň polýusy açyk bolsa, $A_g = 0$, onda (2.4) fomuladan alarys:

$$\mathcal{E} = \varphi_1 - \varphi_2 \quad (11.5)$$

Ýagny, daşky zynjyr açyk bolan wagtyndaky çeşmäniň EHG onuň polýuslaryndaky potensiallaryň tapawudyna deňdir.

§11.2. Omuň kanuny. Geçirijileriň garşylygy

Geçirijiniň uçlarynda potenciallaryň tapawudy döredilende onuň içinde elektrik meýdany döreýär. Zaryadlaryň ugrukdyrylan hereketi – elektrik togy döreýär. Olar potensialy ýokary polýusdan, pes polýusa tarap hereket edýärler. Geçirijiniň ahyrlaryndaky potenciallaryň tapawudyny tok çeşmesi daşgary güýçleriň täsiri astynda üpjün edýär.

Diýmek, geçirijiden akyp geçýän tok güýjüniň ululygy bilen, onuň uçlaryndaky potenciallar tapawudynyň, ýagny naprýaženiýäniň arasynda baglanyşyk bardyr. Bu baglanyşygy nemes fizigi G.Om (1787-1854) ilkinji bolup tejribe arkaly ýüze çykarypdyr, ýagny birhilli (tok çeşmesi bolmadyk) metal geçirijiden akyp geçýän toguň ululygy onuň ahyrlaryndaky naprýaženiýä göni proporsionaldyr:

$$I = \frac{U}{R} \quad (11.6)$$

Bu ýerde R – geçirijiniň elektrik garşylygy.

(11.6) deňlemä zynjyr bölegi üçin Omuň kanuny diýilýär: geçirijidäki toguň güýji onuň uçlaryna goýlan naprýaženiýä göni proporsionaldyr we onuň garşylygyna ters proporsionaldyr. (11.6) formula garşylyk birligini kesgitlemäge mümkinçilik berýär. Garşylyk birligi omlarda (Om) ölçenilýär: 1 Om – geçirijiniň uçlaryndaky naprýaženiýe 1W bolanda ondan ululygy 1A deň bolan hemişelik tok akyp geçen wagtyndaky garşylygydyr.

$$\gamma = I/R$$

ululyga geçirijiniň elektrik geçirijiligi diýilýär. Geçirijiligiň birligi – simensdir (Sm). 1 Sm – elektrik zynjyrynyň garşylygy 1 Om bolan zynjyr böleginiň geçirijiligidir.

Geçirijiniň garşylygy onuň ölçeglerine, formalaryna hem-de onuň taýýarlanylýan materialyna baglydyr. Silindr görnüşindäki geçirijiniň R garşylygy onuň uzynlygyna göni proporsionaldyr we kese - kesiginiň S meýdanyna ters proporsionaldyr:

$$R = \rho \frac{l}{S} \quad (11.7)$$

Bu ýerde ρ – geçirijiniň materialyny häsiýetlendirýän proporsionallyk koeffisiýentidir. Oňa udel elektrik garşylygy diýilýär. Udel elektrik

garşylygynyň birligi – om· metr (Om·m). İň kiçi udel elektrik garşylykly materiallara kümüş ($\rho=1,6 \cdot 10^{-8}$ Om·m) we mis ($\rho=1,7 \cdot 10^{-8}$ Om·m) girýär. Praktikada elektrik geçirijileri hökmünde mis simleri bilen bir hatarda, udel garşylygynyň mise görä uludygyna garamazdan ($\rho=2,6 \cdot 10^{-8}$ Om·m) alýuminiý simleri hem ulanylýar.

Garşylyk üçin ýazylan (11.7) formulany (11.6) formulada ornuna goýup, Omuň kanunyny differensial görnüşinde ýazyp bolýar:

$$\frac{I}{S} = \frac{1}{\rho} \frac{U}{l}$$

bu ýerde udel garşylyga ters bolan ululyga $\gamma = \frac{1}{\rho}$ geçirijiniň udel elektrik geçirijiligi diýilýär. Onuň birligi – metrde simens (Sm/m). Geçirijidäki elektrik meýdanynyň güýjenmesiniň $U/l=E$ deňdigini we toguň dykzlygynyň $j = \frac{I}{S}$ deňdigini hasaba alyp, (11.8) formulany (Omuň kanunynyň differensial görnüşinde) şeýle ýazmak bolar:

$$j = \gamma E \quad (11.9)$$

Her bir nokatda elektrik zaryadlary \vec{E} wektoryň ugruna hereket edýärler we j , \vec{E} wektorlar ugurlary boýunça gabat gelýärler. Şonuň üçin soňky formulany şeýle görnüşe getirýäris:

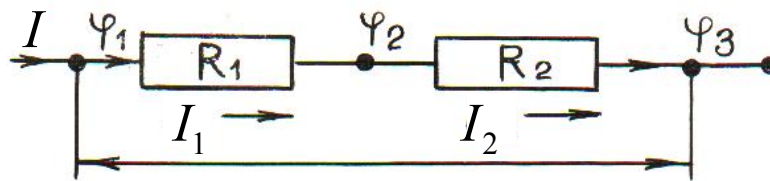
$$\vec{j} = \gamma \vec{E} \quad (11.10)$$

(11.10) formula Omuň kanunynyň differensial görnüşinde ýazylyşydyr. Bu formula geçirijiniň içindäki islendik nokadyň dykzlygyny, şol nokatdaky elektrik meýdanynyň güýjenmesi bilen baglanyşdyrýar. Bu gatnaşyk üýtgeýän meýdanlar üçin hem ulanarlykdyr.

§11.3. Geçirijileriň yzygiderli we parallel birikdirilişi

Praktikada elektrik zynjyryny birnäçe geçirijilerden düzmeli bolýar. Şol zynjyrda, öňde goýlan maksada görä, geçirijiler biri-birleri bilen esasy iki usulda – parallel we yzygiderli birikdirýärler.

a) Goý, iki geçiriji yzygiderli birikdirilen bolsun (11.4-nji surat). Şol bir berlen wagtyň dowamynda iki geçirijiniň üstünden-de şol bir zarýadyň ululygy geçýär, ýagny $I_1=I_2=I$. Birinji geçirijidäki naprýaženiýanyň peselmesi $U_1=\varphi_1-\varphi_2$ we ikinjidäki $U_2=\varphi_2-\varphi_3$ deň.



11.4-nji surat. Geçirijileriň yzygiderli birikdirilişi.

Zynjyr uçastogy üçin Omuň kanunyndan ýazýarys:

$$I_1 = \frac{U_1}{R_1}; \quad I_2 = \frac{U_2}{R_2}$$

Şu ýerden R_1 – garşylykdaky naprýaženiýäniň peselmegi

$$U_1 = I_1 R_1 = I R_1$$

R_2 garşylykdaky

$$U_2 = I_2 R_2 = I R_2$$

Soňky iki deňligi goşup, alýarys:

$$U_1 + U_2 = I R_1 + I R_2 = I(R_1 + R_2)$$

Emma $U_1 + U_2 = \varphi_1 - \varphi_2 = U$ şeýlelikde

$$U = I(R_1 + R_2)$$

n sany yzygiderli birleşdirilen geçirijilerden ybarat bolan zynjyryň umumy naprýaženiýesi

$$U = I(R_1 + R_2 + \dots + R_n)$$

ýa-da garşylygy

$$R = R_1 + R_2 + \dots + R_n \quad (11.11)$$

(11.11) formuladan görnüşi ýaly, geçirijiler yzygiderli birikdirilende olaryň umumy garşylygy geçirijileriň garşylyklarynyň jemine deňdir.

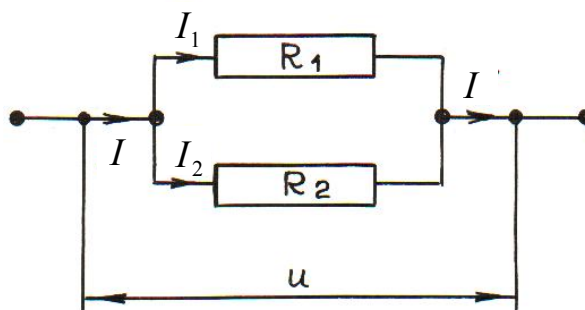
b) Geçirijiler parallel birikdirilende (11.5-nji surat) R_1 we R_2 garşylykly geçirijileriň ikisinde-de naprýaženiýanyň peselmesi bir-birine

deň bolýar, ýagny $U=U_1=U_2$, emma olaryň üstünden geçýän toklar R_1 we R_2 -niň ululygyna baglydyr. Şonuň üçin umumy tok

$$I=I_1+I_2$$

ýa-da

$$I = I_1 + I_2 = \frac{U}{R_1} + \frac{U}{R_2} = U\left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}\right)$$



11.5-nji surat. Geçirijileriň parallel birikdirilişi.

Elektrik zynjyrynyň ähli bölejiklerindäki toguň ululygyny şeýle ýazýarys:

$$I = \frac{U}{R}$$

bu ýerde R – parallel birleşdirilen geçirijileriň umumy garşylygy. Onda:

$$\frac{U}{R} = U\left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}\right)$$

Şu ýerden

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$$

Şular ýaly n sany geçirijiler parallel birikdirilenlerinde

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n} \quad (11.12)$$

ýagny, parallel birikdirilen geçirijileriň umumy geçirijiligi olaryň aýry-aýrylykda alnan geçirijilikleriniň jemine deňdir.

§11.4. Kirhgofyň kanunlary

Praktikada has çylşyrymly (şahalanan) elektrik zynjyrlaryna köp gabat gelinýär. Olardaky toguň güýjüni, napryaženiýäni we garşylygy

kesgitlemeklik belli bir kynçylyklary döredýär. Emma, elektrik zynjyryndaky bu ululyklary kesgitlemek üçin nemes fizigi G.Kirhgofyň (1824-1887) hemişelik toguň esasy kanunlaryna daýanyan kanunlaryny ulanmaklyk, meseläni ýeňilleşdirýär. Şeýlelikde, Omuň kanunynyň umumylaşdyrylan görnüşi bolan bu kanunlar iş ýüzünde islendik çylşyrymly zynjyryň ululyklaryny hasaplamaga mümkinçilik berýär.

Kirhgofyň iki kanuny (düzgüni) bar.

Şahalanýan elektrik zynjyrynyň islendik nokadynda üçden az bolmadyk tokly geçirijiler birleşen bolsalar, şeýle nokatlara düwünler diýilýär. Şunlukda, zynjyryň düwünine gelyän toklar položitel, düwünden çykýan toklar bolsa otrisatel hasap edilýär.

Kirhgofyň birinji kanuny: Elektrik zynjyrynyň düwüninde kesişýän toklaryň algebraik jemi nola deňdir:

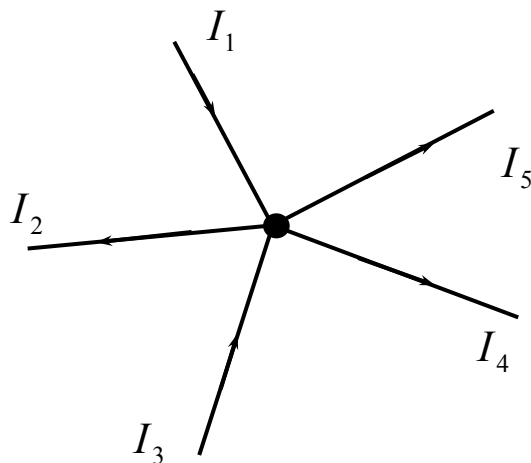
$$\sum_{i=1}^n I_i = 0 \quad (11.13)$$

Mysal üçin, 11.6-njy suratdaky toklar üçin Kirhgofyň birinji kanuny şeýle ýazylýar:

$$I_1 - I_2 + I_3 - I_4 - I_5 = 0$$

ýa-da:

$$I_1 + I_3 = I_2 + I_4 + I_5$$

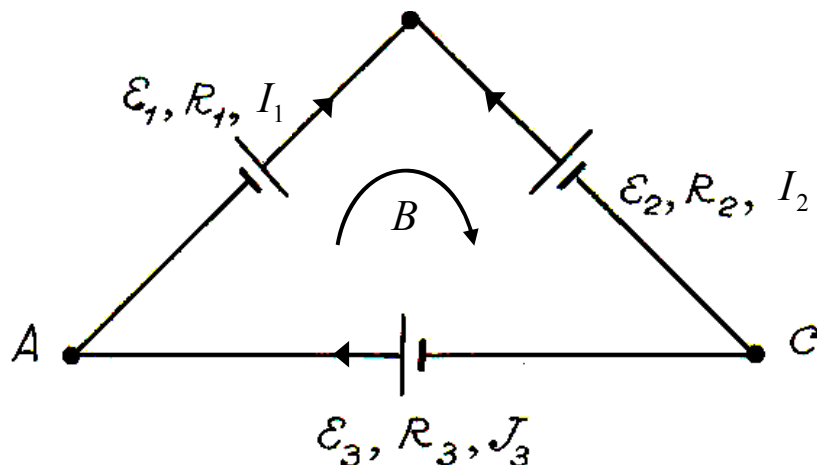


11.6-njy surat. Düwündäki toklaryň şekillendirilişi.

Kirhgofyň birinji kanuny elektrik zaryadynyň saklanmak kanunundan gelip çykýar. Dogrudan-da, şol kanuna görä, geçirijiniň hiç bir nokadynda zaryadlaryň toplanmagy we ýok bolmagy bolmaly däldir.

Ýagny, wagt birliginde zynjyryň duwunine gelýän we ondan çykýan elektrik zarýadlarynyň mukdary biri-birine deňdir.

Kirhgofyň ikinji kanuny Omuň kanunynyň çylşyrymly elektrik zynjyrlary üçin umumylaşdyrylmagyndan alnyp, ol energiýanyň saklanmak kanunyna esaslanandyr. Üç bölekden düzülen kontura (ýapyk zynjyra) seredeliň (11.7-nji surat).



11.7-nji surat. Ýapyk elektrik zynjyry (kontur).

Elektrik zynjyryny derňemek üçin ilki bilen konturyň aýlanma ugruny kesgitleýäris, onda islendik bir ugry (sagat diliniň ugru boýunça bolsun, ýa-da tersine, tapawudy ýok) položitel ugur hökmünde kabul edýäris.

Goý, biziň seredýän konturymyza aýlanma ugry sagat diliniň ugruna bolsun. Haýsy toklar ugurlary boýunça konturyň aýlanma ugry bilen gabat gelseler, $I_i R_i$ köpelmek hasyly položitel alamaty bilen, eger-de tersine bolsalar, otrisatel alamaty bilen alynýarlar. Tok çeşmesiniň elektrik hereketlendiriji güýji haçan-da konturda aýlanma ugry onuň potensialynyň ýokarlaýan ugruna gabat gelse (ýagny otrisatel polýusyndan položitele), onda EHG položitel hasap edilýär, tersine – otrisatel.

Şu düzgünden peýdalanyp, konturdaky uçastoklar (şahalar) üçin Omuň kanunyny ýazalyň:

$$\begin{cases} I_1 R_1 = \varphi_A - \varphi_B + \mathcal{E}_1 \\ -I_2 R_2 = \varphi_B - \varphi_C + \mathcal{E}_2 \\ I_3 R_3 = \varphi_C - \varphi_A + \mathcal{E}_3 \end{cases}$$

Deňlemeleri agzama-agza goşup, alarys:

$$I_1 R_1 - I_2 R_2 + I_3 R_3 = \mathcal{E}_1 - \mathcal{E}_2 + \mathcal{E}_3 \quad (11.14)$$

(11.14) deňleme Kirhgofyň ikinji kanunyny aňladýar.

Islendik ýapyk konturyň şahalanan elektrik zynjyryndaky I_i tok güýjüniň şu konturyň degişli böleklerindäki R_i garşylyga köpeltmek hasylynyň algebraik jemi, şu konturda bar bolan \mathcal{E}_K elektrik hereketlendiriji güýjüniň algebraik jemine deňdir:

$$\sum_{i=1}^n I_i R_i = \sum_{i=1}^n \mathcal{E}_K \quad (11.15)$$

Hemişelik toguň çylşyrymly (şahalanan) elektrik zynjyrlary Kirhgofyň kanunlary ulanylyp hasaplanylanda, şu aşakdaky düzgünleri göz önünde tutmaly:

1. Berlen zynjyryň her bir şahasynda toguň ugruny anyklamaly. Dogry, meseläni çözmezden, toguň ugruny görkezmek kyn. Emma, häzirki ýagdaýda berlen zynjyrdaky toguň ugruny islendikçe görkezäýmeli. Mesele çözüleniden soň, bu şahadaky toguň alamaty položitel çyksa, onda zynjyrdaky görkezilen toguň ugry dogry. Eger toguň alamaty otrisatel bolsa, onda çyzgyda görkezilen toguň ugry nädogry.

2. Konturda aýlanma ugruny saýlap almaly we oňa esaslanmaly; eger toguň ugry konturda aýlanma ugry bilen gabat gelse, onda IR -iň köpeltmek hasyly položitel, tersine – otrisatel, EHG-niň potensialynyň artýan ugry (minusdan plýusa) položitel, tersine - otrisatel.

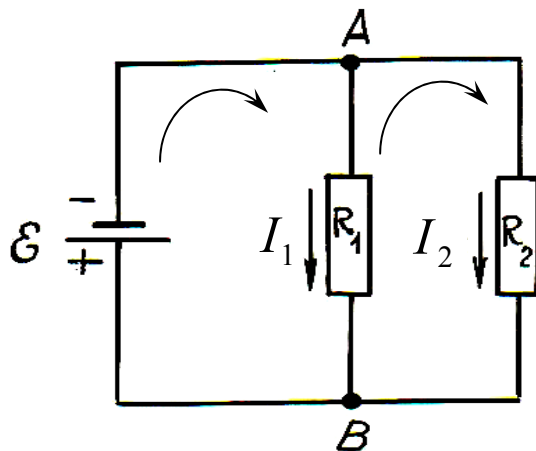
3. Berlen elektrik zynjyrynda näçe sany gözlenilýän näbelli ululyk bar bolsa, şonça-da deňleme düzmeli. Her bir seredilýän konturda, öňki seredilen kontura garanyňda, iň bolmanynda bir ululyk başga bolmaly.

Ýokarda belleýşimiz ýaly, Kirhgofyň kanunlary boýunça düzülýän deňlemeleriň sany, zynjyrdaky näbelli ululyklaryň sanyna deň bolmaly. Şeýlelikde, onuň birinji kanuny boýunça: şahalanan zynjyryň m düwünü bar bolsa, onda $(m-1)$ ýagny düwünleriň sanyndan bir deňleme az bolan biri - birine bagly bolmadyk deňlemeler sistemasyny, ikinji kanuny boýunça – (eger-de zynjyrdaky m düwün n - sany şaha bar bolsa $(n-m+1)$ deňlemeler sistemasyny ýazyp bolýar. Mysal üçin, 11.8-nji suratda görkezilen elektrik zynjyryny hasaplamak üçin Kirhgofyň kanunlary esasynda deňlemeler düzeliň:

Konturda aýlanma ugruny sagat diliniň ugruna diýip hasap edýäris. Şahalardaky toguň položitel ugruny shemada strelka arkaly görkezýäris. Berlen elektrik zynjyrynyň iki sany düwünü (A we B) bar.

Diýmek Kirhgofyň birinji kanuny boýunça $m-1$, ýagny $(m-2)$ diňe bir deňleme ýazyp bolýar. Geliň A düwün üçin ýazalyň:

$$I - I_1 - I_2 = 0 \quad (11.16)$$



11.8-nji surat. Şahalanan elektrik zynjyry.

Zynjyrdaky AR_1B , AR_2B we BEA üç şaha bar ($n=3$). Diýmek, Kirhgofyň ikinji kanuny boýunça $n-m+1=3-2+1=2$ deňleme düzüp bolýar. Berlen elektrik zynjyrynda: tok çeşmesiniň EHG we garşylyklar belli, I_1 , I_2 we I toklary tapmaly.

Berlen meseläni çözmek üçin Kirhgofyň kanunlary boýunça üç sany deňlemeler sistemasyny düzmeli. Birinji kanuny boýunça bir (11.16), ikinji kanuny boýunça: AR_2BR_1A kontur üçin:

$$I_2 R_2 - I_1 R_1 = 0 \quad (11.17)$$

we $EA R_1 B E$ kontur üçin

$$I \cdot r + I R_1 = -\mathcal{E} \quad (11.18)$$

Iki sany (11.17) we (11.18) deňlemeleri ýazýarys.

Bu ýerde r – tok çeşmesiniň garşylygy.

Netijede (11.16), (11.17) we (11.18) – üç bir-birine bagly bolmadyk deňlemeler sistemasyny aldyk. Bu deňlemeler sistemasyny bilelikde çözüp, şahalardaky näbelli I , I_1 we I_2 toklary tapyp bolýar.

§11.5. Toguň işi we kuwwaty. Joulyň-Lensiň kanuny

Goý, geçiriji U naprýaženiýeli tok çeşmesine birleşdirilen bolsun. Onuň kese-kesiginden dt wagtyň dowamynda $q=Idt$ zaryad geçýär

diýeliň. Elektrik meýdanynyň täsiri astynda q zaryad ornuny üýtgedenindäki toguň işi şeýle kesgitlenilýär:

$$dA = qU = IUdt \quad (11.19)$$

R garşylykly geçiriji üçin onda Omuň kanunynlan peýdalanyp, ýazýarys:

$$dA = I^2 R dt = \frac{U^2}{R} dt \quad (11.20)$$

(11.19) we (11.20) formulalardan toguň kuwwatyny tapýarys, ýagny

$$P = \frac{dA}{dt} = UI = I^2 R = U^2 / R \quad (11.21)$$

(11.21) aňlatma hemişelik tok üçin-de, üýtgeýän tok üçin-de dogrudyr. Eger üýtgeýän tok bolanda, bu formula kuwwatyň mgnowen bahasyny aňladýar.

Tok güýji amperlerde, naprýaženiýe – woltlarda, garşylyk – omlarda ölçenilse, onda iş joullarda, kuwwat bolsa watlarda ölçenilýär. Önümçilikde toguň işi sistemadan daşgary birliklerde hem ölçenilýär: watt-sagat (wt·sag) we kilowatt-sagat (kwt·sag): 1 Wt·sag – kuwwaty 1 Wt bolanda 1 sagadyň dowamyndaky toguň işi $1 \text{ Wt} \cdot \text{sag} = 3600 \text{ Wt} \cdot \text{s} = 3,6 \cdot 10^3 \text{ J}$; $1 \text{ Kwt} \cdot \text{sag} = 10^3 \text{ Wt} \cdot \text{sag} = 3,6 \cdot 10^6 \text{ J}$.

Eger tok gyzdyrmak üçin niýetlenen metal geçirijilerden geçýän bolsa, toguň ähli edýän işi ony gyzdyrmaga gidýär we energiýanyň saklanmak kanuny esasynda ýazýarys:

$$dQ = dA \quad (11.22)$$

Şeýlelikde (2.19), (2.20) we (2.22) formulalary ulanyp, alarys:

$$dQ = IUdt = I^2 R dt = \frac{U^2}{R} dt \quad (11.23)$$

(11.23) formulany tejribe üsti bilen 1841-nji ýylda inlis fizigi Joulyň we ondan bihabar 1842-nji ýylda rus fizigi E.H.Lensiň açandygy üçin oňa Joulyň-Lensiň kanuny diýilýär.

§11.6. Metallaryň geçirijiliginiň nusgawy elektron nazaryýeti

Maddalaryň käbir häsiýetlerini olarda bar bolan elektronlaryň hereketi esasynda düşündirýän nazaryýete elektron nazaryýeti diýilýär. Metallaryň elektrik geçirijiliginiň elektron nazaryýetiniň ilkinji başlangyjyny başlan nemes fizigi P.Drude (1863-1906) hasaplanylýar. Soňra ony ösdüren niderland fizigi H.Lorensdir. Nemes fizigi N.Rikke (1845-1915) bu nazaryýete degişli (1901) birnäçe nusgawy tejribeleri geçirýär. Ol bir ýylyň dowamynda radiuslary biri-birine deň bolan yzygiderli birikdirilen üç sany (Cu, Al, Cu) metal silindrleriniň üstünden elektrik toguny goýberýär. Silindrleriň üstünden geçen zaryadlaryň ägirt uly derejä ($\approx 8.5 \cdot 10^6$ Kl) ýetendigine garamazdan, hiç hili, hatda mikroskopiki maddanyň geçirilişiniň hem yzy duýulmandyr. Bu bolsa metallarda elektrigi geçirmekde ionlaryň gatnaşmaýandyklarynyň ilkinji tejribe arkaly subut edilişi bolýar. Soňra metallarda elektrik toguny geçirijiler 1897-nji yylda inlis fizigi D.Tomson (1856-1940) tarapyndan açylan elektronlar arkaly bolaýmasyn diýen netijä gelinýär.

Bu pikiri subut etmek üçin bölejigiň alamatyny we udel zaryadynyň ululygyny (bölejigiň zaryadynyň onuň massasyna bolan gatnaşygyny) kesgitlemek gerekdi. Bu tejribäniň ideýasy şundan ybaratdy: eger metalda onun kristalliki gözenegi bilen gowşak baglanyşykly, hereket edýän we elektrik toguny geçirýän bölejikler bar bolsa, onda geçirijini batly aýlap, birden togtadanymyzda, wagonda oturan yolagçylaryň wagonyň batly tormozlanan wagtynda öňe ymtylyşlary ýaly, öz inersiyalary boýunça öňe süýşerler. Zaryadlaryň öňe süýşmeleriniň netijesinde-de toguň impulsy döremeli. Toguň ugry boýunça zaryadly bölejigiň alamatyny, onuň ölçeglerini we geçirijiniň garşylygyny kesgitlep bolsa, bölejigiň udel zaryadyny kesgitlemek mümkin. Bu ideýany durmuşa geçirmeklik 1913-nji ýylda rus fizikleri S.L.Mandelstama (1879-1944) we N.D.Papaleksä (1880-1947) başartdy. Bu tejribäni 1916-njy ýylda amerikan fizikleri R.Tolmen (1881-1948) we B.Stýuart (1828-1887) kämilleşdirdiler.

Şeýlelik bilen metallardaky elektrik toguny döredijileriň erkin elektronlardygy doly subut edildi.

Metallarda erkin elektronlaryň bardygyny şeýle subut etmek bolar. Metalyň kristalliki gözenegi emele gelende (ionlaşan atomyň golaýlaşmaklary netijesinde) her bir atomyň ýadrosy bilen gowşak baglanyşygy bolan walentli elektronlar metalyň atomyndan aýrylyp (bölünip) “erkin” elektronlara öwrülýärler we ähli göwürüm boýunça

orunlaryny üýtgedýärler. Şeýlelikde, kristallik gözenegiň düwünlerinde metalyň ionlary, olaryň aralygynda bolsa erkin elektronlar haotik hereket edip, özboluşly elektron gazyny döredýärler. Metallaryň elektron nazaryýetine görä, bu gaz ideal gazyň häsiýetlerine eýedir.

Elektronlar öz hereketleri bilen gözenegiň ionlary bilen çaknyşýarlar, netijede elektron gazy bilen gözenegiň aralygynda ýylylyk deňagramlylygyny emele getirýärler. Drudeniň-Lorensiň nazaryýetine görä, elektronlar hem biratomly gazyň molekulalary ýaly ýylylyk hereketiniň energiýasyna eýedirler. Şonuň üçin, ideal gazyň molekulýar-kinetik nazaryýetiniň netijelerini ulanyp, elektronyň ýylylyk hereketiniň orta tizligini kesgitlep bolar:

$$\langle v \rangle = \sqrt{8KT / \pi m_0}$$

ol otag (293K) temperaturasynda $1,08 \cdot 10^5$ m/s deňdir. Elektronlaryň hereketi haotik (tertipsiz) bolanlygy sebäpli, toguň döremegine getirip bilmez.

Metal geçirijide elektrik meýdanynyň döredilmegi netijesinde elektronlaryň ýylylyk hereketinden başga-da, olaryň bir tarapa ugrugan tertipleşdirilen hereketi emele gelyär, ýagny elektrik togy döreyär. Elektronlaryň şeýle ugrukdyrylan hereketiniň orta tizligini, toguň dykzlygynyň üsti bilen aňladylan $j = ne\langle v \rangle$ formula bilen kesgitlemek bolar.

Goý, mis simi üçin toguň dykzlygyny 10 A/m^2 , togy geçirijileriň konsentrasiýasy $n = 8 \cdot 10^{28} \text{ m}^{-3}$ diýsek, onda elektronlaryň ugrukdyrylan hereketiniň orta tizligi $\langle v \rangle = 7,8 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$ deň bolýar.

§11.7. Metallaryň nusgawy nazaryýetinden elektrik togunyň esasy kanunlarynyň çykarylşy

1. Omuň kanuny. Goý, metal geçirijide güýjenmesi $E = \text{const}$ bolan elektrik meýdany döredilen bolsun. q zaryada şu meýdan tarapyndan $F = qE$ güýç täsir edýär, ol $a = F/m = qE/m$ tizlenme alýar. Netijede erkin hereket edýän elektron deňtizlenip hereket edip, erkin ylgawynyň ahyrynda şeýle tizlige eýe bolýar:

$$v_{\max} = qE \langle t \rangle / m \quad (11.24)$$

bu ýerde $\langle t \rangle$ – elektronýň gözenegiň položitel iony bilen iki yzygiderli çaknyşmasynyň arasyndaky ortaça wagty.

Drudeniň teoriýasyna görä, elektron erkin ýolunyň ahyrynda gözenekdäki ionlar bilen çaknyşyp, olara meýdanda toplanan energiýany berýär, şonuň üçin onuň ugrukdyrylan hereketiniň tizligi nola deň bolýar. Şeýlelikde, elektronýň ugrukdyrylan hereketiniň ortaça tizligi

$$\langle v \rangle = (\nu_{\max} + 0) / 2 = qE \langle t \rangle / (2m)$$

Metallaryň nusgawy nazaryýeti elektronlaryň tizlikleri boýunça bölünişini göz önünde tutmaýar, şonuň üçin erkin ylgawynyň $\langle t \rangle$ ortaça wagty onuň erkin ylgawynyň ortaça uzynlygy $\langle l \rangle$ bilen we geçirijiniň kristallik gözenegine göre elektronlaryň hereketiniň orta tizligi bilen kesgitlenilýär. Ol $\langle u \rangle + \langle g \rangle$ deňdir. ($\langle u \rangle$ – elektronlaryň ýylylyk hereketiniň ortaça tizligi).

§11.6-da görkezilişi ýaly, $\langle v \rangle \ll \langle u \rangle$ şonuň üçin

$$\langle t \rangle = \langle l \rangle / \langle u \rangle \quad (11.25)$$

$\langle t \rangle$ – niň bahasyny (11.26) formulada ornuna goýup, alarys:

$$\langle v \rangle = qE \langle l \rangle / (2m \langle u \rangle) \quad (11.26)$$

Metal geçirijide toguň dykzlygy

$$j = nq \langle v \rangle = \frac{nq^2 \langle l \rangle E}{2m \langle u \rangle} \quad (11.27)$$

deňdir. Şu ýerden görnüşi ýaly, toguň dykzlygy meýdanyň güýjenmesine proporsionaldyr, ýagny, Omuň kanunynyň differensial görnüşindäki ýazylyş formulasyny aldyk ((11.10) formula seret) j bilen E -niň arasyndaky proporsionallyk koeffisiýentine materialyň udel geçirijiligi diýilýär, ol

$$\gamma = \frac{nq^2 \langle l \rangle}{2m \langle u \rangle}$$

(11.27) formuladan görnüşi ýaly, erkin elektronlaryň konsentrasıýasy hem-de olaryň erkin ylgawynyň uzynlygy näçe uly bolsa, materialyň udel geçirijiligi-de şonça uly bolýar.

2. Joulyň-Lensiň kanuny. Elektron özüniň erkin ylgawynyň ahyrynda elektrik meýdanynyň täsir etmegi netijesinde şeýle goşmaça kinetik energiýany alýar.

$$\langle E_k \rangle = \frac{mv_{\max}^2}{2} = \frac{q^2 \langle l \rangle E^2}{2m \langle u \rangle^2} \quad (11.28)$$

Elektron ion bilen çaknyşan wagtynda bu energiýa doly gözenege berilýär we metalyň içki energiýasyny artdyrmaga, ýagny ony gyzdymaga gidýär.

Wagt birliginde elektronyň gözenegiň düwünleri bilen bolup geçýän çaknyşmalarynyň ortaça sanyny $\langle z \rangle$ diýip bellesek, onda

$$\langle z \rangle = \langle u \rangle / \langle l \rangle \quad (11.29)$$

Eger elektronlaryň konsentrasiýasy n bolsa, onda wagt birliginde $n \langle z \rangle$ çaknyşma bolýar we gözenege

$$W = n \langle z \rangle \langle E_k \rangle \quad (11.30)$$

energiýa berilýär. Bu energiýa bolsa geçirijini gyzdymaga gidýär. (11.28) we (11.29) formulalaryndaky $\langle E_k \rangle$ - nyň hem-de $\langle z \rangle$ -iň bahalaryny (11.30) formulada ornuna goýup, alarys:

$$W = \frac{nq^2 \langle l \rangle E^2}{2m \langle u \rangle} \quad (11.31)$$

Bu ýerde W – toguň udel ýylylyk kuwwaty.

(11.31) formuladaky W bilen E^2 arasyndaky proporsionallyk koeffisiýentine udel geçirijilik diýilýär, şeýlelikde, (11.31) aňlatma Joulyň-Lensiň kanunynyň differensial görnüşidir, ýagny

$$W = \gamma E^2 .$$

3. Widemanyň-Fransyň kanuny. Belli bolşy ýaly, metallar ýokary elektrik geçirijiligine eýedir. Bu bolsa metallarda elektrik toguny we ýylylygy geçirijileriň şol bir bölejiklerdigi – erkin elektronlardygy bilen düşündirilýär. Erkin elektronlar metallarda, diňe bir orunlaryny üýtgetmek bilen çäklenmän, eýsem özleri bilen hereket energiýasyny, ýagny ýylylyk energiýasyny hem äkidýärler.

1853-nji ýylda Wideman we Frans tarapyndan tejribe üsti bilen kanun açylýar. Şol kanuna göre, ýylylyk geçirijilik koeffisientiniň (λ) udel geçirijilik koeffisiýentine (γ) bolan gatnaşygy şol bir

temperaturalarda hemme metallar üçin birmeňzeşdir we absolýut temperatura göni proporsionaldyr. Ýagny:

$$\lambda / \gamma = \beta T$$

bu ýerde β – metalyň tebigatyna bagly bolmadyk hemişelik ululykdyr.

Metallaryň elementar nusgawy nazaryýeti β -nyň bahasyny tapmaklyga mümkinçilik berýär. $\beta=3(k/q)^2$, bu ýerde k -Bolsmanyň hemişeligi. Bu baha tejribe arkaly alnan netijeler bilen gabat gelýär.

Lorens elektron gazy üçin Makswelliň-Bolsmanyň statistikasyny ulanyp, hem-de şunuň bilen birlikde elektronlaryň tizlikleri boýunça bölünüşini hasaba alyp, $\beta=2(k/q)^2$ aňlatmany aldy. Bu bolsa nazaryýet bilen tejribe arkaly β -niň alnan bahalarynyň tapawudynyň artmagyna getirdi.

Şeýlelikde metallaryň nusgawy nazaryýeti Omyň we Joulyň-Lensiň kanunlaryny düşündirýär, Widemanyň-Fransyň kanunyna hil taýdan seljerme berýär. Emma ony düýpli düşündirip bilmeýär. Ondan başga-da, nusgawy elektron nazaryýetiniň käbir elektrik we termodinamik hadysalary hil we mukdar taýdan gowy düşündirýändigine garamazdan, bu nazaryýetiň käbir esaslanýan çaklamalary örän ýerliksiz, mysal üçin, metallardaky hemme elektronlaryň ýylylyk hereketleriniň tizlikleri belli bir paýlanyşyga boýun egýärler. Lorens bu paýlanyşygyň ýerine Makswell-Bolsmanyň paýlanyşygyny ulanýar. Emma ugrukdyrylan elektronlar hereket edip başlanlarynda, ýylylyk hereketine elektrik meýdany tarapyndan döredilen hereket hem goşulýar. Şeýlelikde elektronlaryň tizlikleriniň bölünüşü Makswelliň we Bolsmanyň kanunlaryna boýun egmeýär.

Şeýlelikde metallarda elektronlaryň hereketlerini kanagatlandyryan mukdar nazaryýetini nusgawy (klassyky) mehanikanyň kanunlary esasynda gurmaklygyň mümkin däldigi ýüze çykdy. Metallardaky elektronlaryň hereketini Nýutonyň nusgawy mehanikasynyň kanunlary esasynda beýan etmek bolmaz. Mysal üçin, metalda elektronlaryň ýylylyk hereketiniň orta kinetik energiýasyny otag temperaturasynda $m\langle v \rangle^2/2=3kT/2$ formula bilen kesgitleseň, onda 10^5 - 10^6 K temperatura alnar. Bu bolsa mümkin däldir. Metallaryň nusgawy elektron nazaryýerinde bolan kemçilikleri düzetmek elektrik geçirijiliginiň kwant teoriýasyna başartdy.

Kwant teoriýasy şu aşakdakylara esaslanýar:

1. Metallaryň düzümindäki elektronlaryň hemmesi erkin bolman, diňe walentli elektronlar erkin elektron gazyny döredýärler.

2. Kwant nazaryýeti boýunça elektronlaryň hereketi nusgawy mehanikanyň kanunlaryna boýun bolmaýar. Elektronynyň impulsynyň we energiýasynyň bahalary üznüksiz sanlar bilen aňladylman, diskret sanlar bilen aňladylýarlar. Energiýanyň bu diskret hataryna energetik derejeler diýilýär.

3. Elektronlaryň energiýalary (ýa-da tizlikleri) boýunça bölünişi Ferminiň-Diragyň bölünişigine boýun bolýar.

Kwant nazaryýetiniň esasynda metalyň garşylygynyň temperatura bagly üýtgeýişini-de gowy düşündirip bolýar.

Elektron nazaryýeti boýunça elektronlaryň ygrukdyrylan hereketinde olaryň kristallik gözenegiň düwünlerindäki ionlar bilen hem-de özara çaknyşmalary garşylygyň fiziki manysyny düzýär. Kwant nazaryýetine görä, düwünlerde ýerleşen ionlar garmoniki yrgyldy edýärler, elektron tolkunlary bu düwünlerde dargamaýarlar we metalyň garşylygy $T=0$ K töwereklerinde nola deň bolýar. Haçan-da temperatura nol gradus Kelwinden üýtgeşik bolanynda temperaturanyň artmagy bilen elektron tolkunlarynyň gözenegiň düwünlerinde dargamasy güýçlenip başlaýar, olaryň tolkunlarynyň uzynlygy kiçelýär, netijede garşylyk artýar. Takyk hasaplamalara görä $\langle \lambda \rangle \sim \frac{1}{T}$. Netijede $\rho \sim \frac{1}{T}$ bolup çykýar, bu bolsa tejribe bilen gabat gelýär.

§11.8. Metallaryň garşylygynyň temperatura baglylygy. Aşageçirijilik

Temperaturanyň ýokarlanmagy bilen metal geçirijileriň garşylygynyň artýandygyny tejribeler görkezýär. Gaty bir pes bolmadyk temperaturalarda olaryň udel garşylyklary absolýut temperatura göni proporsionallykda üýtgeýär, ýagny

$$\rho = \rho_0 \alpha T \quad (11.32)$$

bu ýerde ρ_0 – geçirijiniň 0 °S-däki udel garşylygy $\alpha = 1/273 \text{ K}^{-1}$ golaý bolan hemişelik koeffisiýent. Ýokarky formulany başgarak görnüşde ýazýarys:

$$\rho = \rho_0 (1 + \alpha t) \quad (11.33)$$

bu ýerde t – geçirijiniň t gradusdaky temperaturasy. Metallaryň elektron nazaryýetine görä, ideal kristallik gözenekde elektronlar hiç hili elektrik garşylygyna duçar bolmazdan hereket edýärler, ýagny $\rho=0$. Metallarda

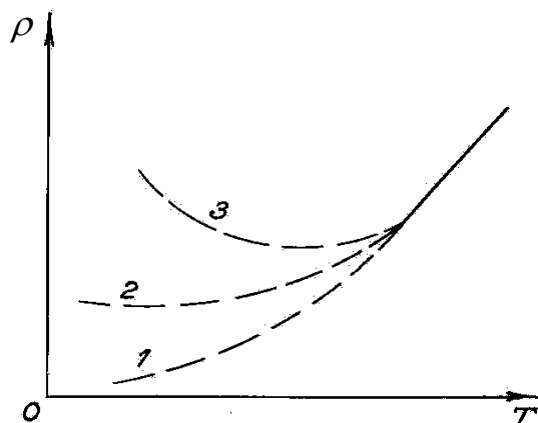
elektrik garşylygynyň ýüze çykmagynyň esasy sebäbi olarda başga garyndylaryň bolmagy, kristallik gözeneklerde käbir fiziki defektleriň ýüze çykmagy, şeýle hem metalyň atomlarynyň ýylylyk hereketi netijesinde edýän yrgyldylarynyň amplitudalarynyň temperatura baglylygy bilen düşündirilýär.

Udel elektrik garşylygynyň temperatura baglylygy çylşyrymly funksiýa bolup, onuň iki sany biri-birine bagly bolmadyk goşulyjylardan ybaratdygyny Matisseniniň düzgüni tassyklaýar. Şu düzgüne laýyklykda:

$$\rho(T) = \rho_2 + \rho_{ug}$$

bu ýerdäki ρ_2 – galyndyly udel garşylyk diýilýär, ρ_{ug} bolsa absolýut arassa metalyň garşylygyna gabat gelýän we diňe atomlaryň ýylylyk yrgyldylary bilen kesgitlenilýän metalyň ideal udel garşylygydyr.

Ýokarda belleýişimiz ýaly, ideal metalyň udel garşylygy haçan $T \rightarrow 0$, ol hem nola ymtylmaly (11.9-njy suratdaky 1 egri). Emma udel garşylygyň temperaturanyň funksiýasy bolup iki sany biri-birine bagly bolmadyk ρ_{ug} we ρ_2 goşulyjylaryň jemine deň bolanlygy sebäpli, daşgary garyndylaryň we kristallik gözenekleriň käbir defektleri sebäpli, ol nola ymtylman temperaturanyň peselmegi bilen belli bir hemişelik ρ_2 ululyga eýe bolýar (11.9-njy suratdaky 2 egri), kä halatlarda bolsa ol temperaturanyň has-da peselmegi bilen ýene-de ýokarlanyp başlaýar (11.9-njy suratdaky 3 egri). Birnäçe sap arassa metallarda temperaturanyň peselmegi bilen onuň udel garşylygyň otag temperaturasyndaky udel garşylygy bilen deňeşdireniňde 10^4 - 10^5 gezek azalandygy kesgitlenildi. Emma $\rho(T)=0$ almaklyk başartmaýar. Sebäbi daşgary garyndylary ýok edilende-de (arassa tehnologiýany ulanyp), kristallik gözeneklerde bolan defektleri aýranymyzda-da, ýene-de bir faktor, ýagny atomlaryň ýylylyk hereketi galýar. Kwant mehanikasynyň tassyklamagyna görä atomlaryň yrgyldy hereketi absolýut nol temperaturasynda-da togtamaýar.



11.9-njy surat.
Ideal metalyň udel
garşylygynyň temperatura
baglylygy.

1911-nji ýylda golland fizigi Kamerling-Onnes şol wagtlarda has arassa görnüşinde alyp bolýan simap bilen tejribe geçireninde täze, garaşylmadyk bir hadysa gabat geldi. Simabyň udel garşylygy 4,2K (-269⁰C) temperaturada şeýle bir azalyp, ölçäp bolunmajak ululyga ýetdi. Kamerling-Onnes bu hadysa ýagny, geçirijiniň udel garşylygynyň nola öwrülmeýän hadysasyna aşageçirijilik diýip at berdi. Häzirki wagtda köpsanly elementlerde (*Al, Ti, Cd, Sn, Hg, Pb we ş.m*), garyndylarda we himiki birleşmelerde aşageçirijilik hadysasynyň ýüze çykýandygy görüldi. Garyndylarda, himiki birleşmelerde käbir komponentleriň ýönekeý halyna aşageçirijilik halyna geçmän, birleşme görnüşinde şeýle hadysanyň ýüze çykýandygy anyklanyldy. Maddalaryň aşageçirijilik ýagdaýyna geçýän kesgitli temperaturalaryna kritiki temperatura (T_K) diýilýär. Kritiki temperatura dürli maddalarda dürli bolup köplenç 1-7 K aralygynda ýatýar. Emma has pes we has ýokary T_K -nyň bahalaryna hem gabat gelinýär. Aşaky jedwelde käbir maddalaryň aşageçirijilik halyna geçýän T_K temperaturalary görkezilendir.

Jedwel

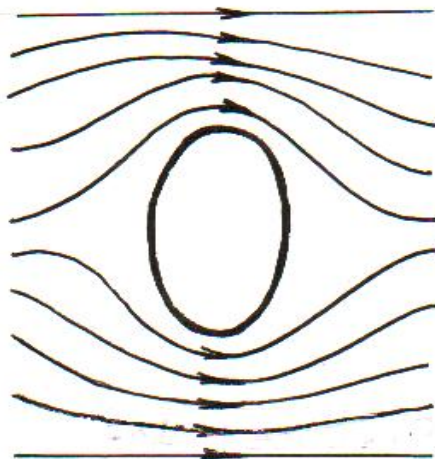
Madda	T_K , K	Madda	T_K , K
Titan	0,4	Simap	4,1
Kadmiý	0,5	Wanadiý	5,3
Sink	0,38	Gurşun	7,2
Alýuminiý	1,2	Niobiý	9,3
Galaýy	3,7	Nb ₃ Sn	18

Maddalar aşageçirijilik halyna täsin häsiýetlere eýe bolýar. Birinjiden, aşageçirijide döredilen elektrik togy köp wagtlap tok çeşmesiz dowam edýär. Sebäbi, hiç bir garşylyk bolmasa togyň peselýän wagty gaty uly bolup, onlarça gije-gündize dowam edýär. Aşageçirijiligiň häsiýetlerini öwrenmek üçin geçirilen dürli tejribeleriň esasynda şeýle netijelere gelindi:

- metallar aşageçirijilik halyna geçenlerinde onuň kristallik gözeneginiň gurluşy, mehaniki we optiki häsiýetleri üýtgemeyär.
- olaryň elektrik häsiýetleriniň birden üýtgemegi bilen bilelikde magnit we ýylylyk häsiýetleri-de hil taýdan üýtgeýär. Magnit meýdany bolmadyk wagtynda aşageçirijilik hala geçmeklik ýylylyk sygymynyň birden üýtgemegi bilen bolup geçýär. Eger magnit meýdany bar bolsa aşageçirijilik ýagdaýyna geçeninde maddanyň ýylylyk geçirijiligi we ýylylyk sygymy birden üýtgeýär.

c) ýeterlik ýokary magnit meýdany (şunuň ýaly hem aşageçirijiniň üstünden geçýän uly elektrik togy) aşageçirijilik ýagdaýyny bozýar.

Nemes fizigi W.Meýssneriň (1882-1974) görkezişi ýaly, magnit meýdany aşageçirijiniň içinde bolmaýar. Bu bolsa aşageçirijini T_K temperaturadan aşak sowadanymyzda, magnit meýdany ondan gysylýp çykarylýar (Meýssneriň effekti), (11.10-njy surat). Aşageçirijiligiň fiziki tebigaty diňe 1957-nji ýylda Landauň nazaryýeti esasynda belli boldy.



*11.10-njy surat.
Meýssneriň effekti.*

Aşageçirijilik nazaryýeti Amerikan fizikleri D.Bardin, L.Kuper we D.Şriffer tarapyndan döredildi we rus fizigi N.N.Bogolýubow tarapyndan ösdürildi.

Aşageçirijiler praktikada giňden ulanylýar. Mysal üçin, aşageçiriji magnitler magnit meýdanynda hereket edýän gaty gyzdrylan we ionlaşan gazyň çüwdürimleriniň mehaniki energiýalaryny elektrik energiýasyna öwürýän elementar bölejikleriň tizleneldirijilerinde, magnitogidrodinamiki elektrik öndürijilerde (MGD-generatorlarynda) peýdalanylýar.

Metallar örän pes temperaturalarda aşageçirijilik halyna geçýärler. Eger aşageçiriji materialyny otag temperaturasynda ýa-da ondan-da ýokarrak temperaturalarda almak başartsady, onda möhüm tehniki problemalaryň biri – sim boýunça energiýany uzak aralyga ýitgisiz geçirmek problemsy çözülerdi.

§11.9. Termoelektron emissiýasy we onuň ulanylyşy

Metallar gyzdrylanynda olardan elektronlaryň goýberilmek hadysasyna termoelektron emissiýasy diýilýär. Termoelektron emissiýa (gyzan maddadan elektronlaryň uçup çykmak) hadysasynyň fiziki manysy şundan ybaratdyr. Metallarda kadaly temperaturada dyngysyz we tertipsiz hereket edýän köp sanly (10^{29} m^{-3}) erkin elektronlar bardyr.

Eger elektron haýsy-da bolsa bir zadyň: magnit meýdanynyň, temperaturanyň artmagynyň, ýagtylygyň täsir etmegi netijesinde metalyň üstüni taşlap gitse (ondan uçup çyksa), onuň gaýdan nokadynda položitel zarýad agdaklyk edýär, ýagny metalyň üsti položitel zarýadlanýar (sebäbi, onuň üstünden uçup çykan elektronlaryň sany köp) we olar üstüň golaýynda gaýmalaşyp uçup ýören elektronlar bilen özara täsirleşýärler. Kulonyň dartýşma güýçleriniň täsiri astynda olaryň birnäçesi öňki gaýdan ýerlerine dolanyp gelýärler. Energiýalary uly bolan elektronlaryň köpüsi metalyň üstünden uçup çykyp, birnäçe atomara aralykça daşlaşýarlar, üstüň golaýynda kesgitli otrisatel zarýadly elektron buludy emele gelýär, metalyň üsti položitel zarýadlanýar. Şeýlelikde, özboluşly kondensator döreýär. Bu bolsa elektronlaryň metaldan uçup çykmaklaryna päsgelçilik döredýär. Şeýlelikde elektronlaryň metaldan üçüp çykmaklary üçin olar belli bir işi ýerine ýetirmeli bolýarlar. Bu işiň iň kiçi ululygyna çykyş işi diýilýär. Çykyş işini A harpy bilen bellesek, onda

$$A = e\varphi$$

bolýar. Bu ýerde e – elektronyň zarýady, φ – ululyga çykyş potensialy diýilýär.

Çykyş işi elektronwoltlarda (ew) ölçenilýär: 1 ew – elektronyň potensiallar tapawudy 1 W bolan meýdandan alýan energiýasydyr.

Islendik temperaturada birnäçe elektronlar metalyň üstüni taşlap gitmek üçin gerek bolan energiýa eýedirler. Olar metalyň üstünden uçup çykýarlar we özleriniň kinetik energiýalarynyň azalmagynyň hasabyna çykyş işini edýärler, ýagny:

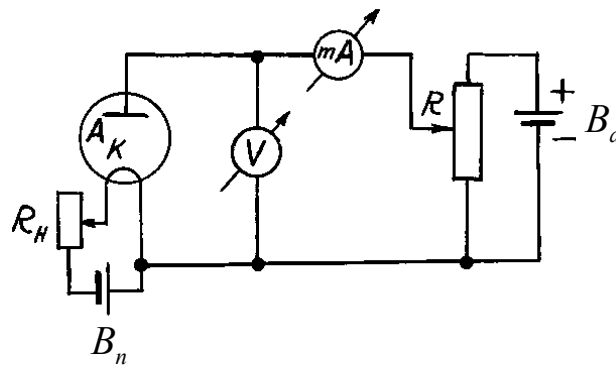
$$e\varphi = \frac{mv_1^2}{2} - \frac{mv_2^2}{2}$$

bu ýerde: m , e – degişlilikde elektronyň massasy we zarýady, v_1 we v_2 – olaryň metalyň üstünden uçup çykmazyndan öňki we soňky tizlikleri.

Eger elektronlara çykyş işini ýeňip geçer ýaly energiýa berilse, metalyň üstünden uçup çykýarlar. Olara energiýa bermekligiň termoelektron emissiýasyndan başga-da fotoelektron, ikinji elektron, awtoelektron emissiýalaryy ýaly dürli görnüşleri bar.

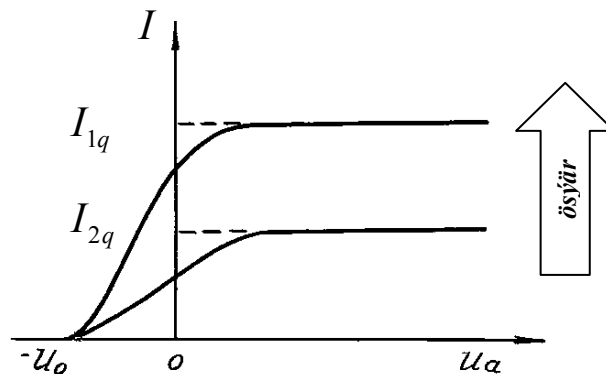
Fotoelektron emissiýasynyň kanunlaryny ýönekeý iki elektrodly çyranyň - diodyň kömegi bilen öwrenip bolýar. Ol iki sany – A anoddan we K - katoddan ybarat elektrodлары bolan, howasy sordurylyp çykarylan aýna gapdan ybaratdyr. Katod hökmünde ereme temperaturasy örän

ýokary bolan metaldan (wolframdan) taýýarlanylýan sapajyk ulanylyp, ol elektrik togy bilen gyzdýrylýar. Anod köplenç metal silindri görnüşinde taýýarlanylýar. Eger diod elektrik zynjyryna, 11.11-nji suratda görkezilişi ýaly birleşdirilse, katod gyzdýrylan wagtynda we anoda katoda görä položitel naprýaženiýe berleninde, diodyň anod zynjyrynda tok döreýär.



11.11-nji surat. Iki elektrodly çyranyň (diodyň) häsiýetnamasynyň kesgitlenilişi.

Eger tok çeşmesiniň (Ba) polýuslaryny (anoda “minus”, katoda “plýus”) çalşyrsaň, katodyň nähili gyzdýrylandygyna garamazdan, tok döremeýär. Bu bolsa katodyň otrisatel bölejikleri - elektronlary goýberýänligi bilen düşündirilýär.



11.12-nji surat. Diodyň wolt-amper häsiýetnamasy.

Eger gyzdýrylýan katodyň temperaturasyňy hemişelik saklap, I_a anod togunyň U_a anod naprýaženiýesine baglylygyny – wolt-amper häsiýetnamasyny seljerseň (11.12-nji surat), onuň çyzykly üýtgemeyänligine göz ýetirýärsiň, ýagny wakuüm diody üçin Omuň kanuny ýerine ýetirilmeyär. Termoelektron togunyň anod naprýaženiýesine baglylygy naprýaženiýanyň kiçi položitel bahalarynda, “ikiden üç” kanunyna boýun egýär. Bu kanun rus fizigi S.A.Boguslawskiý (1883-1933) we amerikan fizigi I.Lengmýur (1881-1957) tarapyndan teklip edildi. Ýagny:

$$I = BU_a^{3/2}$$

bu ýerde B – elektrodalaryň ölçeglerine we görnüşlerine hem-de olaryň özara ýerleşişlerine bagly bolan koeffisient.

Anod naprýaženiýesiniň artdyrylmany bilen anod togy belli bir inuly baha çenli artýar. I_{maks} – toga doýgun tok diýilýär. Beýle ýagdaý katoddan uçup çykýan ähli elektronlaryň anoda baryp ýetip, naprýaženiýäniň soňky artdyrylmasynyň termoelektron togunyň artmagyna getirmeýändigini aňladýar. Şeýlelikde, doýgun toguň dykzlygy katodyň materialynyň emission (elektron goýberiş) ukyplylygyny häsiýetlendirýär.

Doýgun toguň kwant statistikasyna esaslanyp, Riçardsonyň-Dýoşmanyň teoretiki formulasy boýunça kesgitlenýär:

$$I_{maks} = CST^2 e^{-A/(kT)}$$

bu ýerde S – katodyň meýdany, k – Bolsmanyň hemişeligi, A – elektronlaryň katoddan çykyş işi. T – katodyň termodinamiki temperaturasy, C – ähli metallar üçin üýtgemeyän emissiýa hemişeligi ($C = 6,02 \cdot 10^5 \text{ A/(m}^2\text{K}^2)$). Ýokardaky formuladan görnüşi ýaly, çykyş işiniň azalmagy doýgun toguň artmagyna getirýär. Şonuň üçin oksidli katodlar (mysal üçin üstüne oksid gatlagy çaýylan nikel) ulanylýar, şeýle katodlarda çykyş işi kiçi bolup, 1-1,5 W çemesindedir.

11.12-nji suratda katodyň T_1 we T_2 – iki temperaturasy üçin wolt-amper häsiýetnamasy getirilen ($T_2 > T_1$). Temperaturanyň artmagy bilen katoddan uçup çykýan elektronlaryň intensiwligi artýar, şunuň bilen birlikde şu temperatura üçin doýgun tok-da artýar. Suratdan görnüşi ýaly (11.12-nji surat), haçan anod naprýaženiýesi (U_a) nola deň bolanynda hem anod togy bar, bu bolsa käbir katoddan uçup çykan elektronlaryň çykyş işini ýeňip geçmäge ýeterlik energiýalary bolup, elektrik meýdany bolmadyk ýagdaýynda hem olaryň anoda ýetip bilýändiglerini aňladýar.

Termoelektron emissiýa hadysasy elektron wakuüm çyralarynda, rentgen trubkalarynda, elektron mikroskoplarynda we başga-da köp sanly wakuüm enjamlarynda ulanylýar.

§11.10. Kontaktdaky potentsiallar tapawudy. Woltanyň kanunlary

Eger iki sany dürli metal biri-biri bilen jebis galtaşdyrylsa, onda olaryň aralygynda potentsiallar tapawudy ýüze çykýar, oňa hem kontaktdaky potentsiallar tapawudy diýilýär.

Italýan alymy A.Wolta (1745-1827), eger *Al, Zn, Sn, Pb, Sb, Bi, Hg, Fe, Cu, Pt, Pd* metallaryny, şu ýerde ýazylyşy ýaly, yzygiderlilikde biri-biri bilen galtaşdyrsaň her bir öňki metal özüniň yz ýanyndaky metal bilen galtaşanynda onuň položitel zarýadlanýandygyny kesgitledi. Şu hatara Woltanyň hatary diýilýär. Wolta tejribe üsti bilen iki sany kanuny girizdi:

1. Iki sany dürli metal biri-biri bilen galtaşanda kontaktda döreýän potentsiallar tapawudy galtaşýan metallaryň diňe himiki düzümine we temperaturasyna baglydyr.

2. Birdeň temperaturaly yzygiderli birikdirilen birnäçe metal geçirijilerden düzülen, açyk zynjyryň ahyrlarynda döreýän potentsiallar tapawudy aralykdaky geçirijilere bagly däl, ol gös-göni çetki geçirijiler birleşdirilende döreýän potentsiallar tapawudyna deňdir.

Bu kanunlary metallaryň nusgawy nazaryýetiniň elektron teoriýasynyň esasynda düşündirip bolar.

1.Goý, çykyş işi A_1 we A_2 deň bolan iki sany metal berlen bolsun. Birinji we ikinji metallaryň çykyş işleri biri-birine deň däl diýeli: $A_2 > A_1$. Haýsy metalda elektronlaryň çykyş işi kiçi bolsa, ol beýleki metal bilen galtaşdyrylanda elektronlaryny çalt ýitirýär we položitel zarýadlanýar, ikinji metal bolsa elektronlary (araçäk oblastynyň golaýynda) kabul edip otrisatel zarýadlanýar. Şeýlelikde iki metalyň arasyndaky kontaktda potentsiallar tapawudy döreýär, ýagny:

$$U_1 = \frac{A_1 - A_2}{e} \quad (11.34)$$

bu ýerde A_1 we A_2 – deňşlilikde birinji we ikinji metallardaky çykyş işi, e - elektronyň zarýady. (11.34) formula, birinji we ikinji metallardaky erkin elektronlaryň konsentrasialary biri-birine deň, emma $A_1 \neq A_2$ ýagdaý üçin dogrudyr.

2.Goý, indi n_1 we n_2 – deňşlilikde birinji we ikinji metallaryň konsentrasialary biri-birine deň däl bolsun: $n_1 > n_2$. Şu şertde metallar biri-birine galtaşanlarynda birinji metaldan ikinji metala tarap elektronlar geçip başlaýarlar, netijede ol položitel, ikinji bolsa otrisatel

zaryadlanýar, metallaryň arasynda potentsiallar tapawudy döreýär we nazary hasaplamalara görä, ol

$$U_2 = \frac{kT}{e} \ln \frac{n_1}{n_2} \quad (11.35)$$

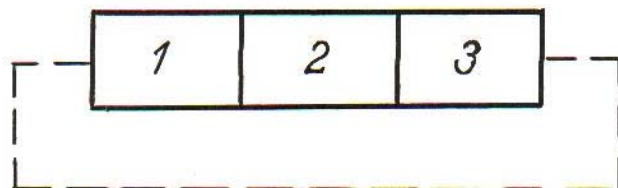
deňdir. Bu ýerde: k – Bolsmanyň hemişeligi, e – elektronyň zaryady.

Iki sebäbe görä dörän jemleýji potentsiallar tapawudy birinji we ikinji sebäpleriniň döreden potentsiallar tapawudynyň jemine deňdir, ýagny:

$$U = U_1 + U_2 = \frac{A_2 - A_1}{e} + \frac{kT}{e} \ln \frac{n_1}{n_2} \quad (11.36)$$

Bu formula Woltanyň birinji kanunynyň matematiki aňlatmasydyr. Formuladan görnüşi ýaly, kontaktdaky potentsiallar tapawudy galtaşýan geçirijileriň diňe temperaturasyna we himiki düzümine baglydyr.

Woltanyň ikinji kanuny subut etmek üçin bir temperaturada ýerleşen üç sany dürli geçirijileriň galtaşdyrylan ýagdaýyna seredeliň. (11.13-nji surat).



11.13-nji surat. Kontaktda (galtaşmada) potentsiallaryň tapawudynyň ýüze çykyşy.

Açyk zynjyryň uçlarynyň arasyndaky potentsiallar tapawudy onuň içindäki kontaktlardaky potentsiallar tapawudynyň algebraik jemine deňdir, ýagny

$$\varphi_1 - \varphi_3 = (\varphi_1 - \varphi_2) + (\varphi_2 - \varphi_3)$$

(11.36) formulany ulanyp alýarys:

$$\varphi_1 - \varphi_3 = U = -\frac{A_1 - A_3}{e} + \frac{kT}{e} \ln \frac{n_1}{n_3} \quad (11.37)$$

hakykatdan-da $\varphi_1 - \varphi_3$ aralykdaky geçirijiniň tebigatyna bagly däl.

Eger sereden metallarymyzdan ýapyk zynjyry düzsek (11.14-nji surat, punktir çyzygy), onda oňa goýlan elektrik hereketlendiriji güýji bu ýapyk zynjyrdaky potentsiallaryň algebraik jemine deňdir:

$$\mathcal{E} = (\varphi_1 - \varphi_2) + (\varphi_2 - \varphi_3) + (\varphi_3 - \varphi_1)$$

(11.37) formulany ulanyp, alarys:

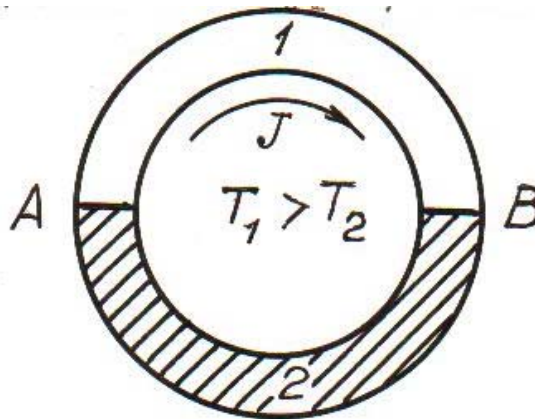
$$\mathcal{E} = -\frac{A_1 - A_2}{e} + \frac{kT}{e} \ln \frac{n_1}{n_2} - \frac{A_2 - A_3}{e} + \frac{kT}{e} \ln \frac{n_2}{n_1} - \frac{A_3 - A_1}{e} + \frac{kT}{e} \ln \frac{n_3}{n_1} = 0 \quad (11.38)$$

Şeýlelikde, bir temperaturada ýerleşdirilen birnäçe metal geçirijileriň galtaşmagyndan emele gelen ýapyk zynjyrdä diňe kontaktlardaky potensiallaryň üýtgemegi bilen elektrik hereketlendiriji güýjüniň döremeýändigini (11.38) formula subut edýär.

§11.11. Termoelektrik hadysalary we olaryň ulanylyşy

Woltanyň ikinji kanunyna görä birnäçe galtaşdyrylan metallardan emele gelen ýapyk elektrik zynjyrynda, eger-de olaryň temperaturalary hemmesinde birdeň bolsa, onda olarda EHG ýüze çykmaýar. Eger olaryň kontaktlaryndaky temperaturalar dürli bolsa, onda termoelektrik togy ýüze çykýar. Termoelektrik hadysalaryna Zeýebekiň, Peltýeniň we Tomsonyň hadysalary degişlidir.

1. Zeýebekiň hadysasy. Kontraktlarynyň arasynda dürli temperaturalar bolan yzygiderli birleşdirilen dürli maddallardan düzülen ýapyk elektrik zynjyrynda elektrik togunyň döreýändigine nemes fizigi T.Zeýebek (1770-1831) ilkinji bolup göz ýetirýär. Sepleşýän ýerleriniň temperaturalary T_1 (A kontaktda) we T_2 (B kontaktda) bolan, 1 hem-de 2 sanlar bilen bellenen iki sany metal geçirijisinden düzülen ýapyk zynjyra serediň (11.15-nji surat).



11.15-nji surat. Kontaktlary dürli temperaturaly iki geçirijide elektrik togunyň döreýişi.

Goý, $T_1 > T_2$ bolsun. Zynjyrdaky döreýän elektrik hereketlendiriji güýji \mathcal{E} iki kontaktlarda döreýän potensiallar tapawutlarynyň jemine deňdir:

$$\mathcal{E} = (\varphi_1 - \varphi_2) + (\varphi_2 - \varphi_1)$$

(11.36) formulanyň esasynda, ýazýarys:

$$\mathcal{E} = \left(-\frac{A_1 - A_2}{e} + \frac{kT_1}{e} \ln \frac{n_1}{n_2} \right) - \left(\frac{A_2 - A_1}{e} + \frac{kT_2}{e} \ln \frac{n_2}{n_1} \right) = \frac{k}{e} (T_1 - T_2) \ln \frac{n_1}{n_2}$$

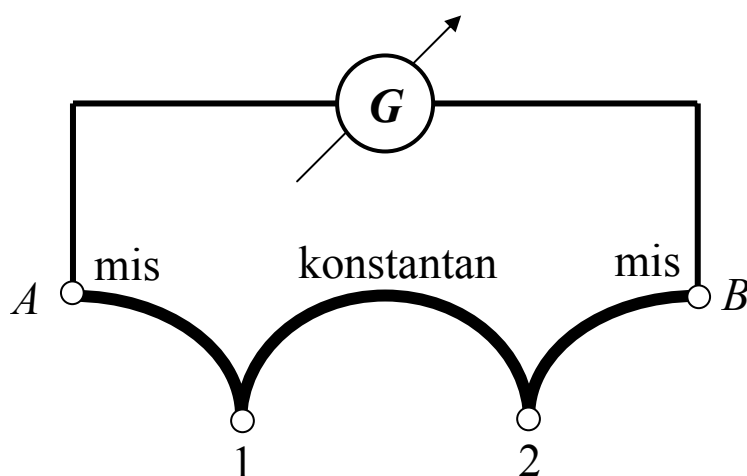
formuladaky $\frac{k}{e} \ln \frac{n_1}{n_2}$ gatnaşygy α bilen, $T_1 - T_2$ temperaturalaryň tapawudyny ΔT bilen belläp, alarys:

$$\mathcal{E} = \alpha \Delta T \quad (11.39)$$

bu ýerde α – udel termoeEHG, onuň ölçeg birligi W/K

(11.39) formuladan görnüşi ýaly, ýapyk zynjyrdaky döreýän termoelektrik hereketlendiriji güýji kontaktlardaky temperaturalaryň tapawudyna göni proporsionaldyr. Biziň sereden halymyz, $T_1 > T_2$ we $n_1 > n_2$ üçin toguň ugry 11.15-nji suratda ýaý bilen görkezilendir. Kontaktlardaky temperaturalaryň tapawudynyň alamatynyň üýtgemegi zynjyrdaky toguň ugrunyň üýtgemegine getirýär.

Zeýebekiň hadysasy temperaturalary ölçemek üçin ulanylýar. Şu maksat üçin termoelementler we termoparalar (termojübütler) – iki sany özara birleşdirilen dürli geçirijilerden ybarat bolan temperaturanyň datçikleri peýdalanylýar. 11.16-njy suratda şeýle termoparalaryň biri görkezilendir.



11.16-njy surat. Zeýebekiň hadysasyna esaslanan temperatura ölçýjiniň gurluşy.

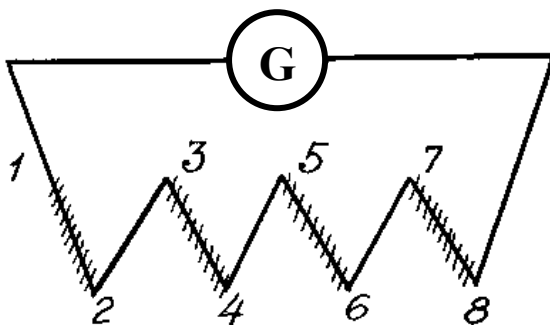
Termoparanyň mis we konstantan simleriniň birleşdirilmeginden emele gelen iki sany 1 we 2 kontakty bar. A we B nokatlar sim arkaly G galwanometriň gysgyçlaryna birikdirilýär. Kontaktlaryň biri (goý diýeli kontakt 1) temperaturasy belli bolan ýerde ýerleşdirilýär, ýagny köplenç halatlarda içinde buzly suw bolan Dýuaryň gabyna salynýar we onuň şol 0°S temperaturasy hemişelik saklanylýar. Ikinji kontakt bolsa biziň temperaturasyny ölçäjek bolýan jisimimiziň, islendik nokadynda goýlyp bilner. Şeýlelikde ýüze çykýan termoelektrik hereketlendiriji güýjüniň ululygyny bilip, bizi gyzyklandyrýan jisimimiziň temperaturasyny kesgitlep bolar.

Şeýle maksat üçin ulanylýan galwanometrleriň örän kiçi toklary ölçemekleri üçin duýgurlyklary gaty ýokary bolmaly.

Aşakda käbir jübüt metallardan taýýarlanýan termoparalaryň udel termoEHG-leriniň ortaça bahalary getirilen.

<i>Materiallar</i>	<i>TermoEHG, mkW/K</i>
Mis-konstantan	43
Kümüş-platina	12
Nikel-platina	11

Termoparalary yzygiderli birleşdirmek arkaly olaryň duýgurlygyny artdyryp bolýar. Mysal üçin, birnäçe termopara 11.17-nji suratdaky ýaly yzygiderli birleşdirilen diýeliň.



11.17-nji surat. Termojübütleriň yzygiderli birleşdirilişi.

Termoparalaryň ähli tāk kontaktlary belli bir temperaturada saklanylýar. Emele gelen termoEHG aýry-aýry termoparalarda ýüze çykýan termoEHG-leriň jemine deňdir. Şeýle gurluşlara termobatareýalar diýilýär. Termobatareýalar ýylylyk energiýalaryny elektrik energiýasyna öwürmek üçin hem ulanylýar.

Termoparalaryň ýönekeý termometrler bilen deňeşdireniňde uly artykmaçlyklary bar: olaryň duýgurlyklary ýokary ($\sim 0.01\text{K}$

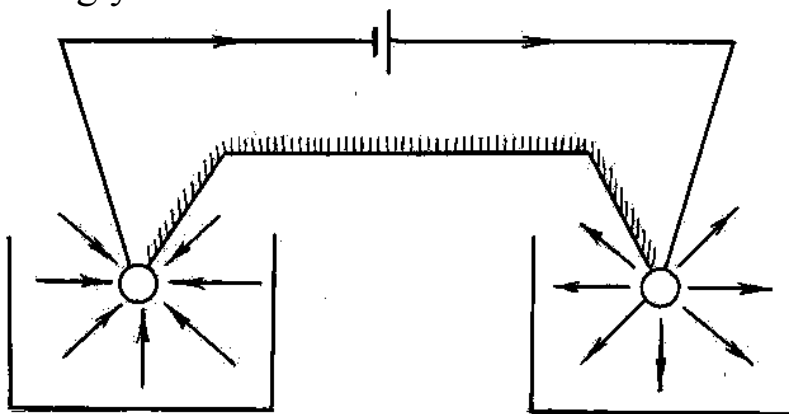
temperaturany ölçäp bilýärler), inertiligi kiçi, temperaturany giň aralyklarda ölçemeklige mümkinçilik berýär. Metal eredilýän domna peçleriniň içindäki, gazlaryň suwuklyga öwrülen wagtyndaky, başga-da şular ýaly uly we kiçi temperaturalar termoparalaryň kömegi bilen ölçenilýär.

2. Peltýeniň hadysasy. 1834-nji ýylda fransuz fizigi J.Peltýe (1785-1845) kebşirlenen ýerleri (kontaktlary) şol bir temperaturada ýerleşdirilen ($T_1=T_2$) temperaturanyň üstünden daşky EHG çeşmesi arkaly tok goýberilende toguň ugruna baglylykda, Joulyň ýylylygyndan başga-da, onuň kontaktynyň, birinde goşmaça ýylylygyň bölünýändigini (gyzýandygyny), ikinjisiniň bolsa ýylylygy kabul edýändigini (sowadygyny) tejribe arkaly subut edýär. Şeýlelikde Peltýeniň hadysasy Zeýebekiň hadysasynyň tersi bolýar.

Iki sany dürli geçirijiniň birleşmeginden emele gelen ýapyk zynjyra seredeliň (11.18-nji surat). Haçan-da zynjyrdan I elektrik togy geçende A kontakt gyzýar we ondan Q ýylylyk bölünip çykýar, B kontakt bolsa sowayar, ol Q ýylylygy ýuwudýar. Şol wagtda bölünip çykýan we ýuwdulýan ýylylyk mukdary, Joulyň bölünip çykýan ýylylygyndan tapawutlylykda, şeýle kesgitlenilýär:

$$Q = nIt \quad (11.40)$$

bu ýerde n – kontaktda birleşýän materiallaryň tebigatyna bagly bolan Peltýe koeffisiýenti, I – geçirijileriň üstünden geçýän toguň ululygy, t – onuň geçýän wagty.



11.18-nji surat. Peltýeniň hadysasynyň ýüze çykyşy.

Eger toguň ugry üýtgedilse, tersine, kontakt A gyzar, kontakt B bolsa sowar. Kontaktlarda bölünip çykýan we ýuwdulýan ýylylyk mukdaryny, olaryň üstünden geçýän I toguň ululygyny üýtgetmek arkaly dolandyryp bolýar.

Peltýäniň hadysasyny nusgawy nazaryetiň esasynda şeýle düşündirmek bolar. Haçan tok geçende A kontaktda-da B kontaktda-da potensiallar tapawudy döreýär. Diýmek potensiallar tapawudy bar bolsa, onda olarda güýjenmesi \bar{E} bolan elektrik meýdany-da döreýär. Elektrik meýdanynyň \bar{E} güýjenmesiniň ugry çyzgyda tutuş çyzyk bilen şekillendirilendir. Emma elektronlaryň hereketiniň ugry A we B kontaktlarda biri-birine gabat gelmeýär (elektronlaryň kontaktlardaky hereketiniň ugry punktir çyzyk bilen görkezilendir). Biziň seredýän ýagdaýymyzda, ýagny toguň ugry çyzgyda görkezişi ýaly bolanynda elektronlaryň hereketiniň ugry, elektrik meýdanynyň ugry bilen gabat gelýär, B kontaktda bolsa - tersine. Şeýlelikde B kontaktda elektrik meýdany elektronlaryň hereketini çaltlandyrýar, olaryň kinetik energiýalary ýokarlanan elektronlar B kontaktda metalyň ionlary bilen çaknyşyp, olara energiýalaryny berýärler, netijede B kontaktyň içki energiýasy artyp ol gyzyp başlaýar. Şuňa meňzeşlikde, A kontaktda elektrik meýdany elektronlaryň tizliklerini peseldýär, olaryň kinetik energiýalary azalýar. Olar A kontaktdaky metalyň ionlary bilen çaknyşanlarynda, tersine olaryň energiýalaryndan alýar. Netijede A kontaktyň içki energiýasy azalyp ol sowap başlaýar.

Peltýe hadysasy sowadyjy maşynlary taýýarlamakda ulanylýar. Onuň esasy aýratynlygy, ol öwrülişikli prosesdir. Onuň bu häsiýeti bolsa termostatlary taýýarlamakda, howany kondisionirlemekde (sowatmakda ýa-da gyzdymakda) giňden ulanylýar.

3. Tomsonyň hadysasy. Wilýam Tomson (Kelwin) termoelektrik hadysalaryny öwrenip we tejribe arkaly barlap group, uzynlygyna tempraturalaryň tapawudy $\Delta T = T_2 - T_1$ döredilen (birdeň gyzdyrylmadyk geçirijiden) elektrik togy geçeninde Peltýeniň ýylylygy ýaly ýylylyk bölünip çykýar ýa-da ýuwdulýar diýen netijä gelýär. Dogrudan hem bu hadysanyň döremegi üçin Peltýeniňki ýaly iki sany dürli geçiriji gerek däl. Eger metal geçirijini alyp, onuň bir ujuny gyzdyrsaň ol geçirijiniň boýunda tempraturalaryň tapawudy döreýär, ýagny $\Delta T = T_2 - T_1$. Indi geçirijiniň üstünden elektrik toguny goýberenimizde onuň uçlarynda, joulyň ýylylygyndan başga, toguň ugruna we ululygyna görä, belli bir mukdarda ýylylyk bölünip çykýar we ýuwdulýar. Oňa Tomsonyň ýylylygy diýilýär we ol şeýle kesgitlenilýär:

$$Q_T = k_T (T_2 - T_1) I t \quad (11.41)$$

bu ýerde k_T – materialyň tebigatyna bagly bolan Tomsonyň koeffisiýenti.

Tomsonyň hadysasyny gyzdyrylan geçirijiniň häsiýetiniň üýtgeýänligi bilen düşündirmek bolýar. Geçirijiniň has gyzdyrylan ujunda, onuň beýleki ujuna seredeninde, elektronlaryň tizlikleri ulalýar. Şunuň bilen bilelikde olaryň energiýalary hem artýar. Olar temperaturanyň pes tarapyna tarap diffundirlenip başlaýarlar, metalyň ionlary bilen çaknyşýarlar, öz energiýalarynyň belli bir bölegini olara berýärler, netijede içki energiýa artyp, ýylylyk mukdary bölünip çykýar. Eger elektronlar temperaturanyň artýan tarapyna hereket etseler, olar metalyň ionlarynyň energiýalarynyň hasabyna öz energiýalarynyň üstüni ýetirýärler. Netijede Tomsonyň ýylylygynyň ýuwdulmasy bolýar.

Biz ýokardaky sereden hadysalarymyza nusgawy elektron nazaryýeti esasynda seljerme berdik. Emma bu teoriýa köp soraglara jogap berip bilmeýär. Şonuň üçin bu hadysalara doly we dogry seljerme bermek üçin olara kwant mehanikasynyň nukdaý nazaryndan seredilmelidir.

§11.12. Gazlarda elektrik togy. Gazlaryň ionlaşmagy. Özbaşdak däl gaz zaryadsyzlanmalary

Gazlar onçakly uly bolmadyk temperaturalarda we atmosfera basyşyna golaý bolan basyşlarda gowy izolýatorlardyr (elektrik toguny geçirmeýänlerdir). Oňa göz ýetirmek üçin şeýle tejribe geçireliň. Tekiz kondensatory alyp, onuň disklerini (plastinkalaryny) elektrometr bilen birikdireliň we elektrometri zaryadlandyralyň. Elektrometriň zaryadynyň ep-esli wagtyň dowamynda üýtgemeýändigini görýäris. Sebäbi, tekiz kondensatoryň plastinkalarynyň arasynda ýerleşen howa elektrik toguny geçirmeýär. Bu prosesi şeýle düşündirmek bolar: gazlar kadaly şertlerde neýtral (zaryadsyz) atomlardan we molekulalardan ybaratdyr. Olarda erkin zaryadlar (elektronlar we ionlar) ýokdur. Şonuň üçin ol elektrik toguny geçirmeýär. Haçan-da gazyň molekulalarynyň belli bir bölegi ionlaşyp, ýagny onuň neýtral atomlary we molekulalary ionlara we erkin elektronlara dargap başlanyndan soňra ondan tok geçip başlar.

Gazyň düzümindäki ionlaryň garşylykly tarapa tertipli hereketine gaz zaryadsyzlanmasy diýilýär. Gaz zaryadsyzlanmasyny ýüze çykarmak üçin gazy ionlaşdyrmaly. Mysal üçin, ýokardaky mysalymyzda kondensatoryň plastinkalarynyň arasyna spirt çyrasyny eltsek, onda plastinkalaryň aralygyndaky howanyň molekulalary ionlaşýar. Elektrometriň dili nola ymtylyp başlaýar.

Şeýle gazyň haýsy hem bolsa bir ionlaşdyryjynyň kömegi bilen ionlaşdyrylmagy olardaky atomlaryň ýa-da molekulalaryň elektron

gatlagyndan bir ýa-da birnäçe elektronlary “goparýar”, netijede erkin elektronlar we položitel ionlar döreýär. Elektronlar neýtral molekulalara we atomlara hem birleşip bilerler, onda olar otrisatel ionlara öwrülýärler. Şeýlelikde, ionlaşan gazda položitel we otrisatel ionlar hem-de erkin elektronlar bardyr.

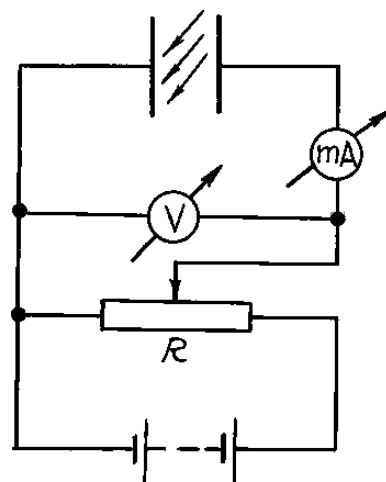
Gazlary ionlaşdyrmaklyk dürli usullar bilen: gyzdymak arkaly, gysga elektromagnit şöhleleri bilen (ultramelewşe, rentgen, γ – şöhleleri) täsir etmek arkaly, elektronlaryň, protonlaryň we α – bölejikleriň akymy bilen şöhlelendirmek arkaly we ş.m. amala aşyrylyp bilner. Molekuladan ýa-da atomdan bir elektrony “goparmak” üçin gerek bolan energiýa ionlaşdyrma energiýasy diýilýär. Dürli maddalaryň atomlarynyň ionlaşdyrma energiýasy dürli bolup, ol 4-25 eW aralygyndadyr.

Gazlarda hemişe ionlaşma prosesi bilen bir hatarda oňa ters bolan rekombinasiýa prosesi hem bolup geçýär: položitel we otrisatel ionlar, položitel ionlar we elektronlar duşuşyp, birleşýärler we täzedan neýtral atomlary we molekulalary emele getirýärler. Ionlaşdyryjylaryň täsir etmekleri netijesinde gazda nähili ionlaşma prosesi çalt bolup geçýän bolsa, şonça-da çalt rekombinasiýa (ionlaryň neýtral atomlara we molekulalara öwrülme) prosesi bolup geçýär.

Islendik howanyň düzüminde azda-kände erkin zaryadlar bar. Ol zaryadlar täze islendik şöhlenenmäniň täsir etmegi netijesinde ýa-da Ýeriň üstünde bar bolan radioaktiw elementleriň şöhlenenmeleri netijesinde döreýär. Şonuň üçin gazlaryň geçirijiligi hiç wagtda nola deň bolup bilmez. Şu sebäbe görä, islendik zaryadlanan jisimleriň wagtyň geçmegi bilen zaryadlary azalýar.

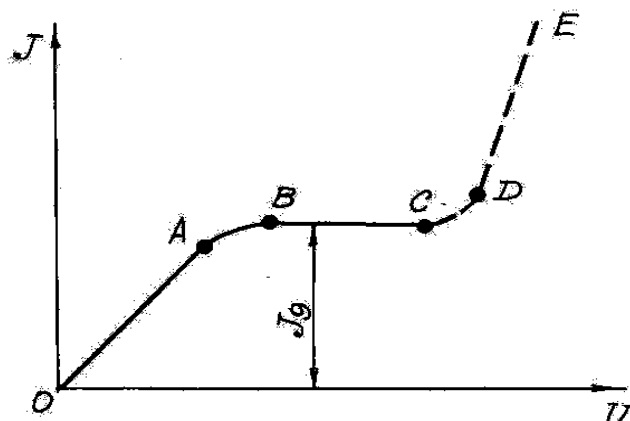
Gazyň häsiýetlerine, himiki düzümine, olaryň temperaturalaryna, basyşyna, elektrodlaryň materiallaryna we olara goýlan naprýaženiýelere, toguň dyklyzlygyna we ş.m. baglylykda gaz zaryadsyzlanmalary dürli-dürli bolýarlar.

Gaz aralygy ionlaşdyryjynyň şol bir intensiwlikdäki dyngysyz şöhlenenmesi bilen (mysal üçin, ultramelewşe şöhleleri bilen) şöhlelendirilýän elektrik zynjyryna seredeliň (11.19-njy surat).



11.19-njy surat. Gaz ionlaşanda zynjyrda toguň döreyişi.

Gaz ionlaşdyryjynyň täsiri netijesinde ionlaşýar, zynjyrdan toguň geçýändigini milliampermetr görkezýär. Döreyän toguň ululygynyň oňa goýlan naprýaženiýä baglylygynyň çyzgysy 11.20-nji suratda görkezilendir.



11.20-nji surat. Ionlaşan gazda toguň naprýaženiýä baglylygy.

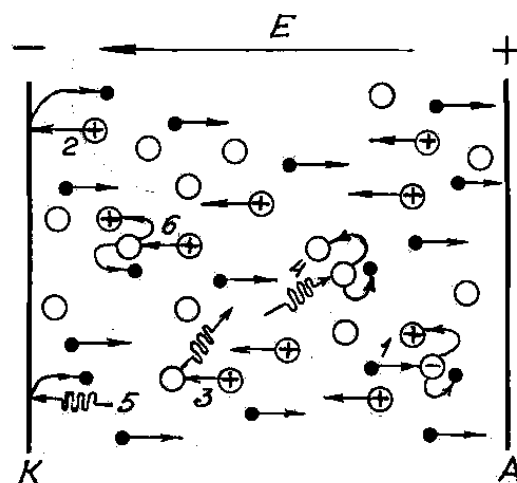
Çyzgydan görnüşi ýaly, erginiň OA aralygynda tok oňa goýlan naprýaženiýä proporsionallykda ösýär, ýagny Omuň kanuny ýerine ýetýär. Soňra naprýaženiýäniň ösmegi bilen Omuň kanuny bozulyp başlaýar. AB aralykda toguň artmagy peselip başlaýar, ahyrynda BC aralykda ol düýbinden artmaýar. Bu aralyk (BC) şeýle düşündirilýär. Daşky ionlaşdyryjy tarapyndan wagt birliginde döredilen ionlar we elektronlar şol wagt aralygynda elektrodlara baryp ýetýärler. Netijede ululygy ionlaşdyryjynyň kuwwatlylygy bilen kesgitlenilýän doýgun tok diýilýän togy alýarys. Doýgun tok ionlaşdyryjynyň ion döredip bilijilik häsiýetini kesgitleýär. Eger OC aralykda ionlaşdyryjy aýrylsa, onda gaz zarýadsyzlanmasy hem ýok bolýar. Diňe daşky ionlaşdyryjynyň täsir etmegi netijesinde bolup geçýän gaz zarýadsyzlanmalaryna özbaşdak däl gaz zarýadsyzlanmasy diýilýär.

§11.13. Özbaşdak gaz zarýadsyzlanmalary we olaryň görnüşleri

Eger elektronlaryň arasyndaky potensiallar tapawudyny has-da ulaldanymyzda toguň güýjiniň (CD we DE aralyklarda) täzedan artýandygyny tejribe görkezýär. Munuň özi gazda ionlaşdyryjynyň hasabyna emele gelýän ionlardan başga, goşmaça ionlaryň ýüze çykýandygyny aňladýar. Toguň güýji ýüz we mün esse artyp, zarýadsyzlanma prosesinde döreyän ionlaryň mukdary şeýle bir köpeliýär, hat-da zarýadsyzlanmany goldaýan daşky ionlaşdyryjyny aýyrananymyzda hem gaz zarýadsyzlanmasy dowam eder. Gazlarda daşky

ionlaşdyryjy aýrylanyndan soňra-da olarda gaz zarýadsyzlanmalary dowam etse, şeýle gaz zarýadsyzlanmalaryna özbaşdak gaz zarýadsyzlanmalary diýilýär. Indi özbaşdak gaz zarýadsyzlanmasynda näme üçin toguň birden artýandygyna düşünjek bolalyň:

Daşky ionlaşdyryjy tarapyndan döredilen uly naprýaženiýede (CD we DE aralyklarda) elektrik meýdanynyň täsiri astynda elektronlaryň tizlikleri has-da artdyrylýar, olar gazyň neýtral molekulalary bilen çaknyşyp, olary ionlaşdyrýarlar, netijede goşmaça – ikinji elektronlar we položitel ionlar emele gelýär. (11.21-nji suratdaky proses 1).



11.21-nji surat. Ionlaşdyryjynyň ikilenç elektronlary döredişi.

Položitel ionlar katoda tarap, elektronlar bolsa anoda tarap hereket edýärler. Ikinji elektronlar öz gezeginde ýene-de gazyň molekulalaryny ionlaşdyrýarlar. Şeýlelikde elektronlaryň we ionlaryň umumy sanlary elektronlaryň anoda golaýlaşdygy saýyn barha artýar. Bu hadysa CD aralykda elektrik togunyň artmagynyň sebäbi bolýar. Biziň seredip geçen ýagdaýymyzdaky prosese ionlaşdyryjy urgy diýilýär.

Emma ionizasiýalaşdyryjy urgy daşky ionlaşdyryjy aýrylandan soňra gazyň zarýadsyzlanmasynyň dowam etmegi üçin ýeterlik däldir. Gaz zarýadsyzlanmasynyň dowam etmegi üçin haýsy-da bolsa bir prosesin täsir etmegi netijesinde täze elektronlaryň döremegi gerek bolup durýar. Şeýle prosesler 11.21-nji suratda shematik görkezilendir.

1. Elektrik meýdany tarapyndan çaltlandyrylan ionlar katoda urlup ondan elektronlary “goparýarlar” (proses 2);
2. Položitel ionlar gazyň molekulalary bilen çaknyşyp, olary oýandyrylan hala geçirýärler; şeýle molekulalaryň adaty ýagdaýa geçmekleri foton goýbermek bilen amala aşýar. (proses 3);
3. Neýtral molekula tarapyndan ýuwdulýan foton ony ionlaşdyrýar, ýagny molekulanyň foton ionlaşmasy diýilýän proses bolup geçýär (proses 4);
4. Katoddan fotonlaryň täsir etmekleri netijesinde elektronlar „goparýarlar“ (proses 5).

Ahyrynda elektrodларыň aralygyndaky meýdanyň güýjenmesi şeýle bir derejä ýetýär weli, ylgaw ýolunyň uzynlygy elektronларыňka seredeniňde kiçi bolan položitel ionlar gazyň molekulasyňy ionlaşdyrmaklyga ýeterlik bolan energiýany alýarlar (proses 6) we otrisatel plastinka tarap ionларыň “sili” herekete gelýär. Haçan-da elektronларыň “silinden” başga, ýene ionларыň hem “sili” dörän wagtynda, toguň güýji naprýaženiýe artmasa-da, birden ösýär (DE aralyk).

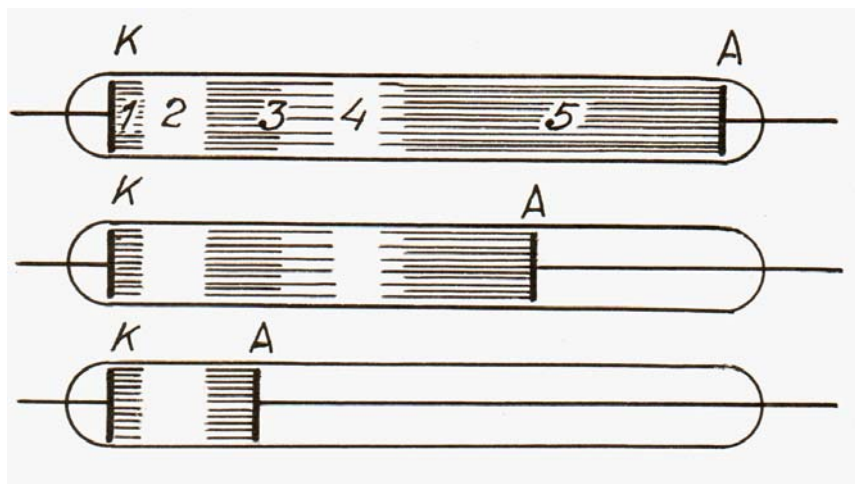
Şeýlelikde, şeýle prosesleriň ýüze çykmaklary netijesinde özbaşdak gaz zaryadсызланмасы başлаýар.

Olaryň gazyň basyşyna, elektrodларыň görnüşlerine we daşky zynjyryň ululyklaryna baglylykda özbaşdak gaz zaryadсызланмасыnyň dört görnüşi bardyr: köreýän zaryadсызланма, uçgun zaryadсызланмасы дуга we täçli zaryadсызланмалар.

1. Köreýän zaryadсызланма pes basyşlarda ýüze çykýар. Uzynlygy 30-50 sm bolan iki sany metal elektrodly aýna turbajygynyň elektrodларыnyň aralygyna birnäçe yüz wolt hemişelik naprýaženiýäni goýup, turbajygynyň içiniň howasyny sorup çykaryp başlanymyzda, haçan basyş 5.3-6.7 kPa golaýlanynda, katoddan anoda tarap uzalyp gidýän gyzyл reňkli sapajyk görnüşinde ýagtylyp, gaz zaryadсызланмасы başlanýар. Basyşyň ýene-de aşaklanmagy bilen bu sapajyk giňelip, turbanyň ähli kesegini tutýар, katodyň golaýynda gaz ýagtylanmagy peselýär. Turbadaky gazyň basyşы 0.1- 0.01 mm.sim.süt. (1.33-13.3 Pa) golaýlanynda, zaryadсызланма 11.22-nji suratdaky görkezilen görnüşde bolýар. Katodyň has golaýyndaky inçejik sapaklar görnüşindäki gatlak (birinji katod ýagtylanмасы ýa-da katod plýonkasy (1)), yz ýanyndan katod garamtyл giňişligi adyny alan garamtyл gatлак (2). Bu garamtyл giňişlik soňra ýagtylanýан gatлага (köreýän ýagtyланма (3)) geçýär. Köreýän ýagtyланма gatlagynyň katod tarapda аýдың араçаgi bolup, ol anod tarapa ýitip gidýär. Köreýän ýagtyланмадан soň, ýene-de ikinji ýa-da faradeýiň garaňky giňişligi (4) diýilýän garamtyл aralyk ýerleşýär. Bu böleklere zaryadсызланманыň katod bölekleri diýilýär. Ikinji gara giňişlikden soňra anoda çenli aralygy tutýан ýagtyланýан oblastы ýa-da položitel sütüni ýerleşýär. Kä halatlarda bu oblastыň hem birnäçe gatlaklara bölünmegi mümkin.

Köreýän zaryadсызланmada onuň esasy iki gara katod giňişligi we köreýän ýagtyланма bölegi аýратын ähmiýete eýedir. Sebäbi, zaryadсызланманы goldaýан esasy prosesler şu böleklerde bolup geçýär. Eger gaz zaryadсызланмасы bolup geçýän аýна turbасыnyň anody süýşýän edilse we ýуwaşjadan katoda tarap süýşürilse (11. 22-nji surata

seret), onda diňe onuň položitel sütün bölegi gysgalyp, katod bölegi üýtgemän galýar. Anod ýene-de katoda tarap süýşürilse indi ikinji katod gara giňişligi-de, gysgalyp başlaýar we haçan-da anod köreme ýagtylanma oblastyna baranynda ikinji katod gara giňişligi ýitýär, emma zarýadsyzlanma dowam edýär. Soňra anod ýene-de süýşürilip, birinji katod giňişligi bilen köreme ýagtylanma araçägine baranynda zarýadsyzlanma sönýär.



11.22-nji surat. Köreýän zarýadsyzlanma.

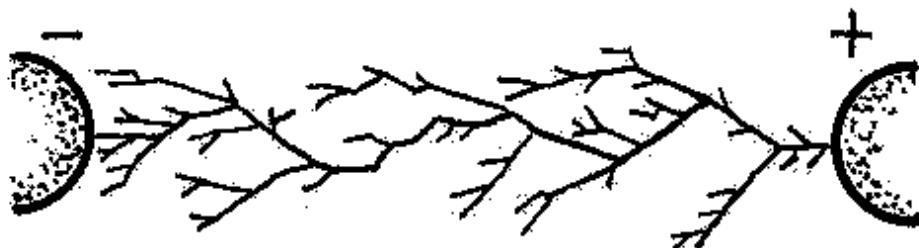
Köreýän zarýadsyzlanmasy ýagtylyk çeşmeleri hökmünde dürli gaz zarýadsyzlanmasy çyralarynda giňden ulanylýar. Gündiz ýagtylykly çyralarynda köreme zarýadsyzlanmasynyň şöhlelenmesi turbanyň içki üstüne çäýylan ýörite maddanyň gatlagy arkaly ýuwdulýar. Ol öz gezeginde ýuwdulýan şöhlelenmäniň täsiri astynda ýagtylanyp başlaýar. Gatlaga çäýylýän materiallary (lýuminoformlary) taýýarlanlarynda olaryň goýberýän şöhlelenmeleriniň gündiz ýagtylygyna golaý bolmaklygyny göz önüne tutýarlar. Şeýle turbalary ulanmaklyk gündelik ulanylýan çyralarymyza seredeniňde ykdysady tarapdan has-da peýdalydyr.

Gaz zarýadsyzlanma turbalary dürli reklama we dekoratiw maksatlar üçin-de ulanylýar. Şeýle ýagdaýda olary dürli şekiller we harplar görnüşinde taýýarlaýarlar. Turbany dürli gazlardan dolduryp, dürli görnüşdäki ýagtylanmany almak bolar: mysal üçin, neondan - gyzyň, argondan – ýaşymtyl-gök we ş.m.

Gaz zarýadsyzlanma turbalaryndaky katodyň materiallaryny üýtgedip, olary dürli naprýaženiýelerde ýanýan edip bolýar. Mysal üçin, neon çyralarynda elektrodlar hökmünde ýüzüne bariý çäýylan demir listjagazy ulanylýar. Netijede bariýde elektronlaryň çykyş işiniň kiçidigi sebäpli, çyra ýagtylandyryş setine birikdirileninde-de, işleýär. Şeýle

çyralar signallaşdyryş maksatlary üçin-de, dürli gurluşlarda görkeziji çyralary hökmünde-de ulanylýarlar.

2. Uçgun zarýadsyzlanmasy. Eger howa atmosferasynda ýerleşen elektronlaryň arasyndaky naprýaženiýäni barha artdyranymyzda, olaryň aralygynda döreýän elektrik meýdany hem birhilli meýdandan gaty bir tapawutlanmaýan bolsa, naprýaženiýäniň ululygy belli bir baha ýeteninde elektrodalaryň arasynda uçgun döräp başlaýar. Uçgun zarýadsyzlanmasy (11.23-nji surata seret) ýiti ýagtylanýan inçejik iki elektrody hem biri-birine birleşdirýän, kanaljyklar görnüşinde bolýarlar.



11.23-nji surat. Uçgun zarýadsyzlanmasy.

Elektrik uçguny elektrodalaryň arasyndaky elektrik meýdanynyň güýjenmesiniň E_k kritiki bahasy belli bir ululyga ýeteninden soňra başlanýar. Ol gazyň düzümine, onuň halyna bagly bolýar. Kadaly şertlerde, howa üçin $E_k \approx 3 \cdot 10^6 \text{ W/m}$. (E_k - nyň ululygy basyşa hem baglydyr).

Uçgun zarýadsyzlanmasynyň dowamlylygy 10^{-7} - 10^{-8} s çemesidir. Onuň şeýle çalt, gaty uly tizlikde bolup geçmekligi, görnüşleri we aýratynlyklary uçgunyň strimer teoriýasy esasynda düşündirip bilner. Şu teoriýa görä, ýiti ýagtylanýan kanallaryň emele gelmegi pes ýagtylanýan ionlaşan bölejikleriň (strimerleriň) toplumynyň döremegi netijesinde döreýär. Bu bölejikleriň toplumu gazyň zarýadsyzlanýan aralygyny kesip geçmek bilen geçiriji köprülerini emele getirýär, olardan zarýadsyzlanmanyň indiki etapynda kuwwatly elektronlaryň akymy herekete gelýär. Strimerleriň (egrem-bugram inçejik ýagtylanýan kanaljyklaryň) emele gelmekleriniň sebäpleri, diňe bir ionlaşdyryjy urgy netijesinde emele gelen elektronlaryň “sili” bolman, zarýadsyzlanma wagtynda gazyň özüniň şöhlenenmesi sebäpli ionlaşmagy netijesinde hem bolýar. Strimerler köplenç halatlarda katoddan anoda tarap (otrisatel strimerler) ugrugan bolýarlar. Emma anoddan katoda tarap hereket edýän položitel strimerler hem bardyr.

Uçgun zarýadsyzlanmasynyň esasy görnüşleriniň biri hem ýyldyrymdyr. Ýyldyrym ägirt uly elektrik uçguny görnüşinde göz önüne getirilýär. Ýyldyrymyň elektrik tebigaty ilkinji gezek Frankliniň howa

uçarlary bilen geçiren tejribeleriniň we M.W.Lomonosowyň hem-de Rihmanyň geçiren ylmy barlaglarynyň netijesinde anyklanyldy.

Ýyldyrym ýa-da bulutlaryň aralysynda, ýa-da bulut bilen Ýeriň aralygynda döreýär. Ýyldyrym çakan wagtynda toguň ululygy ummasyz ululyga ýetýär (10-dan 1000kA çenli). Ýyldyrym çakmasynyň öň ýanynda (eger ýyldyrymyň çakmasy bulut bilen Ýeriň aralygynda bolsa) olaryň aralygyndaky naprýaženiýe 10^8 - 10^9 W ýetýär.

3. Duga zarýadsyzlanmasy. Eger uçgun zarýadsyzlanmasy başlanandan soňra zynjyryň garşylygy kem-kemden azaldylsa, uçgunda toguň güýji artyp başlaýar. Haçan-da zynjyryň garşylygy ýeterlik azalanda, gaz zarýadsyzlanmasynyň täze görnüşi – duga zarýadsyzlanmasy başlaýar. Şunlukda toguň güýji birden artyp, onlarça we ýüzlerçe ampere ýetýär, gaz zarýadsyzlanmasy bolup geçýän aralykda naprýaženiýe azalyp, 60-70 wolta gelýär. Bu bolsa, zarýadsyzlanmada gaza örän uly geçirijilik berýän täze prosesleriň döremegi bilen düşündirilýär.

Elektrik dugasy ilkinji gezek 1802-nji ýylda rus akademigi W.W.Petrow tarapyndan alyndy. Duga zarýadsyzlanmasy ýagtylygyň kuwwatly çeşmesi bolup, ony prožektorlarda, proyeksion apparatlarda we kinoapparatlarda ulanýarlar.

Simap çyralaryndaky duga zarýadsyzlanmasy kuwwatly ultramelewşe şöhleleriniň çeşmesi bolmak bilen, saglyk ulgamynda giňden ulanylýar. Pes basyşlarda simabyň bugunda bolup geçýän duga zarýadsyzlanmasy üýtgeýän togy hemişelik toga öwürmek üçin simap göneldijilerinde ulanylýar. Duga zarýadsyzlanmasy metallary kebşirmekde hem ulanylýar.

4. Täçli zarýadsyzlanma birhilli däl elektrostatik meýdanynda döreýär. Silindr görnüşinde bir elektrody alyp, onuň içinde ujy ýiteldilen ikinji bir elektrody ýerleşdirýäris. Şonda, atmosfera basyşynda, elektrodalaryň aralygyna goýlan naprýaženiýäniň artmagy bilen, geçirijiniň ýiteldilen ujunyň golaýynda ýagtylanýan bölegi täji ýada salýan zarýadsyzlanma döreýär. Täçli zarýadsyzlanmada zarýadlanan ujuň golaýynda elektrik meýdanynyň güýjenmesi $3 \cdot 10^6$ W/m golaý bolanynda başlanýar. Ýokary naprýaženiýe bilen iş salşylanda täçli zarýadsyzlanmany hasaba almaly bolýar. Simlerden ýokary woltly tok geçende onuň töwereginde zyýanly toklar döreýär. Olary azaltmak üçin simlerden peýdalanylýar.

Gaz zarýadsyzlanmasy senagat gazlaryny garyndydan arassalamak üçin elektrik süzgüçlerinde ulanylýar.

§11.14. Plazma we onuň häsiýetleri

Örän pes temperaturalarda tebigatda duş gelýän ähli maddalar gaty halda bolýarlar. Gyzdymak maddanyň gaty haldan suwuk hala, soňra bolsa gaz halyna geçmegini döredýär. Has ýokary temperaturalarda örän çalt hereketlenýän atomlaryň ýa-da molekulalaryň çaknyşmagynyň hasabyna gazyň ionlaşmagy başlanyp, onda položitel we otrisatel zaryadlaryň dykzlyklary praktiki deňleşýär. Plazma – munuň özi bölekleyin ýa-da doly ionlaşan gazdyr, onda položitel we otrisatel zaryadlaryň dykzlyklary gabat gelýärler. Şeýlelikde, plazma tutuşlagyna elektrik taýdan aralyk sistemadyr. Aşayokary temperaturalarda ýüze çykýän ýokary temperaturaly plazma we gaz zaryadsyzlanmasynda ýüze çykýän gaz zaryadsyzlanma plazmasy bardyr.

Plazma, ondaky ionlaşan bölejikleriň sanynyň, onuň göwrüm birligindäki bölejikleriniň sanyna bolan gatnaşygy bilen kesgitlenýän α – ionlaşma derejesi bilen häsiýetlendirilýär.

Ionlaşma derejesiniň ululygynda görä, pes ($\alpha < 1\%$), aralyk (α – birnäçe göterim aralygynda) we doly ionlaşan ($\alpha \sim 100\%$ -e golaý) plazmalar bolýarlar.

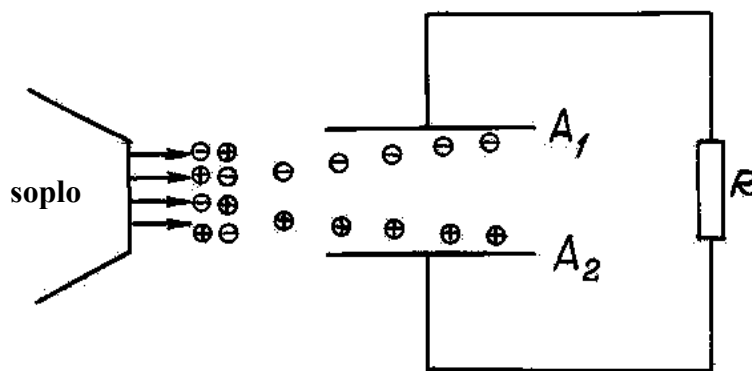
Gaz zaryadsyzlanmasy plazmasyndaky zaryadlanan bölejikler (elektronlar we ionlar) çaltlandyrylan elektrik meýdanynda bolmak bilen dürli orta kinetik energiýa eedirler. Bu bolsa, elektronlaryň T_e temperaturalarynyň ionlaryň T_i temperaturalaryna deň dældigini aňladýar, çünki $T_e > T_i$. Bu bolsa, gaz zaryadsyzlanma plazmasynyň deňagramsyzdygyny görkezýär, şonuň üçin bu plazma izotermiki däl plazma hem diýilýär. Gaz zaryadsyzlanmasy plazmasynda zaryadlanan bölejikleriň rekombinasiýa prosesi netijesinde azalmaklary elektrik meýdany tarapyndan çaltlandyrylan elektronlaryň ionlaşdyrjy urgy netijesinde doldyrylýar. Elektrik meýdanynyň täsiriniň kesilmegi bilen gaz zaryadsyzlanma plazmasy-da ýok bolýar. Ýokary temperaturaly plazma deňagramly ýa-da izotermik plazmadyr. Onda kesgitli temperaturada zaryadlanan bölejikleriň sanlarynyň azalmaklary termiki ionlaşdyrmagyň netijesinde doldyrylýar. Şeýle plazmada ony düzýän zaryadly bölejikleriň ählisiniň orta kinetik energiýalary deňdir. Maddalaryň köp bölegi şu plazma halynda bolýar. Mysal üçin, Gün, ýyldyzlar, ýyldyzlar bilen galaktikalaryň arasyndaky ginişligi doldyrýan ýyldyzzar gurşawy we ş.m. Bularyň temperaturalary onlarça million graduslara ýetýär.

Ýyldyzar gurşawynyň dykzlygy örän kiçidir, ortaça 1 sm^3 göwrüme bir atomdan hem azrak düşýär. Ýyldyzara gurşawyň atomlarynyň ionlaşmasy ýyldyzlaryň şöhlelenmesi, kosmos şöhleleri we älem ginişligini ähli ugurlar boýunça kesip geçýän, çalt hereketlenýän bölejikleriň akymy arkaly bolup geçýär. Ýyldyzlaryň plazmasyna garanynda ýyldyzara plazmasynyň temperaturasy örän pesdir.

Biziň planetamyz plazma bilen gurşalandyr. Atmosferanyň 100-300 km beýiklikdäki ýokarky gatlagy ionlaşan gazlaryň (ionosferanyň) gatlagydyr. Bu gatlakda howanyň ionlaşmagy Günün şöhlelenmesi we Günün goýberýän zaryadly bölejikleriniň akymy bilen döredilýär.

Plazma şeýle esasy häsiýetlere eedir: gazyň ýokary derejede ionlaşmasy, položitel we otrisatel zaryadlanan bölejikleriň praktiki denleşmesi, ýokary elektrik geçirijiligi (üstesine-de, plazmada tok has çalt hereket edýän elektronlar arkaly döredilýär), olaryň şöhlelenmesi, elektrik we magnit meýdanlary bilen güýçli täsirleriň we başga-da köp häsiýetleri plazmany maddalaryň aýratyn - dördünji haly diýmeklige esas döredýär.

Plazmanyň fiziki häsiýetlerini öwrenmeklik birinjiden, ol kosmos giňişliginde maddalaryň has köp ýaýran haly bolup, astrofizikanyň köp problemalaryny çözmeklige şertler döretse, ikinjiden, dolandyrylýan termoýadro sintezini amala aşyrmaklyga mümkinçilik berýär.



11.24-nji surat . Magnitogidrodinamiki öwrüji.

Plazmany ulanmaklygyň beýleki bir geljegi uly bolan ugurlarynyň biri - gazyň ýylylyk energiýasyny gönüden-göni elektrik energiýasyna öwürmekligiň usullaryny işläp taýýarlamakdan ybaratdyr. Şeýle maksatlar üçin magnitogidrodinamiki öwrüjiler ulanylýar (11.24-nji surat). Suratdan görnüşi ýaly, sopladan (ýokary gyzgylga çydaýan ýörite turba) ionlaşan ýokary temperaturaly gazyň çüwdürimi çykyp A_1 we A_2 elektrodalaryň aralygyndan geçýär.

Olaryň arasyndaky giňişlikde hereket edýän plazma (güýç çyzyklara oňa perpendikulýar bolan) kuwwatly magnit meýdany täsir edýär. Magnit meýdanynyň güýç çyzyklary zarýadlanan bölejikler bilen kesişeninde olara, zarýadlanan bölejikleriň alamatlaryna baglylykda, güýç täsir edip başlaýar. Netijede elektrik taýdan neýtral bolan plazma iki topara – otrisatel we položitel zarýadlanan bölejiklere bölünip başlaýar. Magnit meýdanynyň täsiri astynda elektronlar we otrisatel ionlar A_1 elektroda tarap, položitel ionlar bolsa A_2 elektroda tarap ymtylýarlar. Eger A_1 we A_2 elektrodlar daşarky R garşylyk arkaly birikdirilse, onda zynjyr boýunça elektrik togy akýar. Şeýle ýagdaýda plazmanyň kinetik we ýylylyk energiýalarynyň elektrik energiýasyna öwrülmesi bolup geçýär. Energiýanyň şeýle öwrülmesi bolup geçýän enjamlara magnitogidrodinamiki ginatorlary (MGDG) diýilýär.

Bulardan başga-da, plazmotronlaryň kömegi bilen alynýan aşak temperaturaly plazma, metallary kesmekde we kebşirmekde, adaty şertlerde bolmaýan birnäçe himiki birmeşmeleri almakda, gaz lazerlerinde we ş.m. ulanylýar.

§11.15. Suwuklyklarda elektrik togy

Suwuklyklar hem gaty jisimler ýaly, özleriniň elektrik geçirijiligi boýunça dielektriklere, geçirijilere we ýarymgeçirijilere bölünýärler. Mysal üçin, distillirlenen suw – dielektriklere, elektrolitleriň erginleri bolan kislotalar, aşgarlar we duzlar - geçirijilere, erän seleniň, sulfidleriň erginleri bolsa - ýarymgeçirijilere degişlidirler.

Birnäçe suwuklyklar ionlary emele getirmek arkaly dissosirlenmek häsiýetine ukyplydyrlar. Mysal üçin, suw şeýle dissosirlenýär:



Bu ýerde: H^+ – wodorodyň položitel zarýadlanan iony, OH – otrisatel zarýadlanan gidroksil topary.

Köp duzlar, kislotalar we aşgarlar hem dissosirlenmek häsiýetine eýedirler. Mysal üçin, natriýniň gidrookisi (iýiji natriý) suwda natriniň položitel ionyny we gidrokisili emele getirýär:



Eredijiniň täsir etmegi netijesinde erýän maddanyň molekulalarynyň ionlara dargamagyna elektrolitik dissosiasiya diýilýär.

Erän maddanyň dissosiasiasy derejesi

$$\alpha = \frac{n_0}{N}$$

formula bilen aňladylýan α dissosiasıya koeffisiýenti bilen kesgitlenlenilýär.

Bu ýerde: n_0 – ionlara dargan molekulalaryň sany, N – ergindäki molekulalaryň sany. Dissosiasıya koeffisiýenti noldan 1 aralygynda üýtgeýär, $\alpha=0$ bolanynda dissosiasıya bolmaýar, $\alpha=1$ bolanynda doly dissosiasıya geçýär.

Dissosiasıyanyň derejesi, ýagny, erän maddanyň molekulalarynyň ionlara bölünişi, ereýän we eredýän maddanyň tebigatyna, erginiň konsentrasıyasyna we temperaturasyna baglydyr.

Elektrolitik dissosiasıya netijesinde ionlara baý bolup, elektrik toguny geçirmeklige ukyply bolan erginlere elektrolitler diýilýär.

Ionlaşan gazlarda bolşy ýaly, erginlerde hem elektrolitik dissosiasıya prosesi bilen bir hatarda ionlaryň rekombinasiya prosesi, ýagny, dürli alamatly ionlaryň birleşip, neýtral molekulalary emele getirmeklik prosesi hem bolup geçýär.

Elektrolitlerde hem ionlaşan gazlardaky ýaly, toguň dykzlygyny şeýle formula bilen aňlatmak bolar:

$$j = qn_0(u_{o+} + u_{o-})E \quad (11.43)$$

$\alpha = n_0/N$ formulany hasaba almak bilen, alarys:

$$j = \alpha q N (u_{o+} + u_{o-})E \quad (11.44)$$

Bu ýerde: q – ionyň zaryady, u_{o+}, u_{o-} – deňşlilikde položitel we otrisatel ionlaryň süýşüjiligi, E – daşky elektrik meýdanynyň güýjenmesi.

Ionlaşan gazlardaky ýaly, elektrolitler üçin hem Omuň kanuny ýerine ýetýär.

Belli bolşy ýaly, metallarda elektrik zaryadlaryny äkidijiler erkin elektronlardyr. Olar birinji jynsly geçirijilere girýär. Olardan elektrik togy geçeninde himiki taýdan hiç hili üýtgeşme bolup geçmeýär. Ion geçirijiligine eýe bolan elektroloitler – ikinji jynsly geçirijilere deňşlidir. Şeýle geçirijileriň uçlarynda potensiallaryň tapawudy döredilse, položitel ionlar otrisatel zaryadlanan elektroda, otrisatel ionlar

bolsa – položitel elektroda tarap hereket edip başlaýarlar, ýagny erginde elektrik togy döreýär .

Şeýlelikde, katodda elektronlaryň ionlara birleşmesi netijesinde dikeldilme önüminiň, anodda elektronlaryň yetmezçiligi netijesinde okislenme önüminiň bolup geçmegine elektroliz diýilýär.

Elektroliz hadysasyny öwrenip, iňlis alymy Faradeý 1833-nji ýylda özüniň iki kanunyny açýar.

Faradeýiň birinji kanuny. Elektroliz wagtynda elektrodlarda bölünip çykýan maddanyň massasy elektrolitden akyp geçýän zaryadyň mukdaryna göni proporsionaldyr, ýagny:

$$m=kq$$

bu ýerde k –maddanyň elektrohimi ekiwalenti .

Eger t wagta elektrolitiň üstünden I hemişelik togy akyp geçýän bolsa onda:

$$m=kIt$$

bolar. k koeffisiýent elektroliz wagtynda elektrolitden 1 Kl zaryad geçeninde elektrodarda bölünip çykýan maddanyň massasyna san taýdan deňdir.

Faradeýiň ikinji kanuny. Maddanyň elektrohimi ekiwalenti onuň himiki ekiwalentine göni proporsionaldyr, ýagny

$$k = C \frac{A}{Z} \quad \text{ýa-da} \quad k = \frac{1}{F} \cdot \frac{A}{Z} \quad (11.46)$$

bu ýerde maddanyň A molýar massasynyň onuň Z walentligine bolan gatnaşygyna (A/Z), maddanyň himiki ekiwalenti diýilýär. $C=1/F$ – hemme elementler üçin hemişelik ululykdyr.

Faradeýiň birinji we ikinji kanunlaryny birleşdirip, onuň umumylaşdyrylan formulasyny alýarys:

$$m = \frac{1}{F} \frac{A}{Z} It \quad (11.47)$$

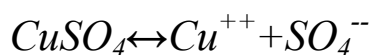
bu ýerde m – elektrodada bölünip çykan maddanyň mukdary, F – Faradeýiň sany, ol elektrodada bir kilogram ekiwalent maddanyň bölünip çykmagy üçin erginiň üstünden nähili elektrik mukdarynyň geçmelidigini görkezýär.

$F = 9,65 \cdot 10^4 \text{ Kl/mol}$, A/Z – himiki ekwiwalent, A – maddanyň bir molunyň massasy. t – elektrolitiň üstünden toguň geçen wagty, Z – maddanyň waletliligi, I – toguň güýji.

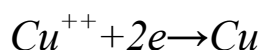
Faradeýiň hemişeligini kesgitlep, elektronyň zaryadyny aňsatlyk bilen tapyp bolýar:

$$e = \frac{F}{N_A} = \frac{9,6484 \cdot 10^4 \text{ Kl/mol}}{6,0225 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}} \approx 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Kl}$$

Elektroliz hadysasynyň ulanylyşy. Elektrolizde bolup geçýän proseslerini praktikada ulanmaklyk häzirki zaman elektrohimiýa senagatynyň ösmegine goltgy berdi. Elektrohimiýada elektroliz hadysasy wodorod, hlor, fluor, mis, sink, kobalt, arassa demir, marganes, hrom, alýuminiň we başga-da birnäçe himiki elementleri almak üçin ulanylýar. Mysal üçin, mis kuporosynyň ergininiň üstünden elektrik togy geçeninde



misiň kationlary emele gelýärler, olar katodda elektronlar bilen birleşip, metal görnüşinde misi emele getirýärler:



Elektrolitler akkumulýatorlarda has-da giňden ulanylýarlar we himiki reaksiýalaryň netijesinde tok çeşmeleri bolup hyzmat edýärler.

Elektroliz hadysasy okislenmä garşy dürli metallaryň üstüni başga metal gatlagy bilen çäymakda hem giňden ulanylýar.

§11.16. Ýarymgeçirijilerde elektrik togy. Ýarymgeçirijileriň umumy häsiýetleri

Özleriniň elektrik geçirijiligi boýunça metallar bilen dielektrikleriň aralygynda ýerleşen materiallara ýarymgeçirijiler diýilýär. Otag temperaturasynda metallaryň udel elektrik geçirijiligi $10^8 \text{ Om}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$; dielektrikleriň bolsa $10^{-8} - 10^{-10} \text{ Om}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ deňdir. Ýarymgeçiriji materiallary soňky onýyllykda elektrotehniki we elektron gurluşlarynda giňden ulanylyşa eýe boldy.

Ýarymgeçirijilere kristallik kremniý (Si), germaniý (Ge), selen (Se), fosfor (P), Mendeleyewiň periodik sistemasynyň III we V toparyndaky elementleriň birleşmelerinden emele gelen himiki

birleşmeleriň köpüsi, mysal üçin surmaly indiý we galliý (InSb, GaSb), myşýakly indiý we galliý (InAs, GaAs), fosforly indiý (InP), fosforly galliý (GaP) we başga-da birnäçe organiki birleşmeler degişlidirler.

Ýarymgeçirijileriň esasy häsiýetlerinden biri-de, olaryň garşylyklarynyň temperatura, ýagtylyga, radiasion şöhlelenmä bagly üýtgemegidir. Bu bolsa olardan temperaturany, ýagtylygy we radiasiýanyň intensiwligini ölçeýän abzallary taýýarlamaklyga mümkinçilik berýär.

Dürli ýarymgeçirijileriň kontakty arkaly geçýän toguň ugruna baglylykda, olar dürli garşylyklara eýedirler. Ýagny, olaryň bir tarapa elektrik toguny oňat geçirip, ikinji tarapa erbet geçirýän – birtaraplaýyn geçirijilik häsiýeti, elektrotehnikaда üýtgeýän elektrik toguny hemişelik toga öwürmekde, diodlary we tranzistorlary taýýarlamakda ulanylýar. Ondan başga-da, dürli ýarymgeçirijileriň kontaktlary, kesgitli şertlerde üstüne ýagtylyk düşeninde ýa-da gyzdyrylanynda, ýagtylyk ýa-da ýylylyk elektrik hereketlendiriji güýjüniň çeşmesidir. Olaryň bu häsiýeti awtomatiki gurluşlarda toguň hereketlendirijilerini döretmekde giňden ulanylýar.

Ýarymgeçirijileriň kontaktlarynda bolup geçýän aýratyn häsiýetleri sowadyjy abzallaryny (holodilnekleri) taýýarlamakda ulanylýar.

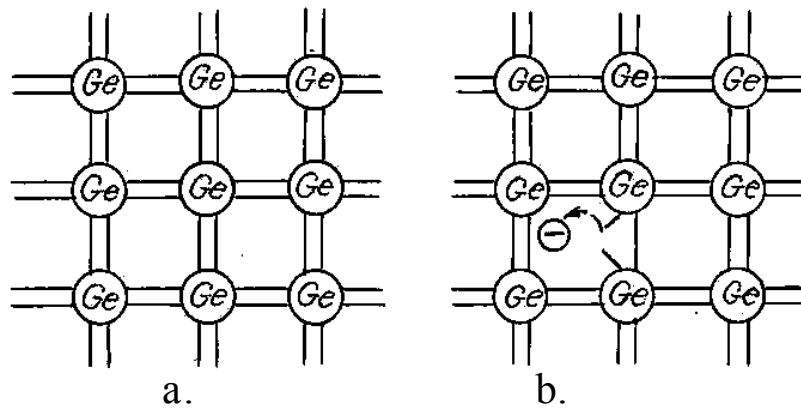
Ýarymgeçiriji enjamlaryny örän kiçi görnüşde taýýarlamak bolýar, olaryň işlemekleri üçin talap edilýän energiýa çyraly elektron gurluşlary bilen deňeşdirileninde onlarça esse kiçi, mehaniki tarapdan berk, hyzmat edişiniň çägi uly we başga-da binäçe artykmaçlyklar ýarymgeçiriji gurluşlarynyň halk hojalygynyň we tehnikanyň ähli pudaklaryna aralaşmaklygyna şert döredýär.

§11.17. Ýarymgeçerijileriň hususy elektrik geçirijiligi

Arassa ýarymgeçirijiliniň elektrik geçirijiligine hususy geçirijilik diýilýär. Mysal üçin, germaniniň (Ge) kristalyna garalyň. Germaniý atomynyň daşky elektron gatlagynda 4 elektron ýerleşýär. Bu elektronlar ýadro bilen gowşak baglanşykdadyrlar. Olara walentli elektronlar diýilýär. Ýylylygyň, ýa-da diýeli, magnit meýdanynyň täsir etmegi netijesinde bu elektronlar öz atomyny taşlap gidýärler. Diňe şu elektronlar elektrik geçirijiligine gatnaşýarlar.

Hiç hili defekti (kemçiligi) we garyndysy bolmadyk germaniý kristalynda $T=0$ K temperaturada, ýagtylyk we radiasion şöhlelenmesi bolmadyk wagtynda walentli elektronlar goňşy atomlar bilen jübüt

elektron kowalent baglanyşygyny emele getirýär. Germaniý kristalynyň strukturasynyň tekiz shemasy a suratda görkezilendir.



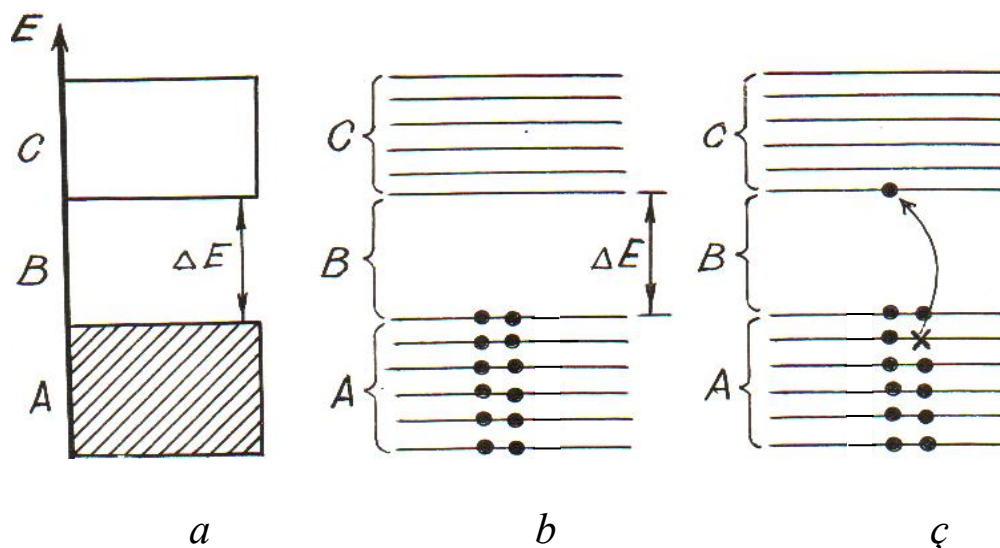
11.25-nji surat. Germaniý kristalynyň şekillendirilişi.

Şeýle ideal ýarymgeçiriji elektrik toguny düýbünden geçirmeýär. Temperaturanyň ($T > 0$ K) ýokarlamagy bilen, ýa-da ýagtylygynyň täsiri astynda walentli elektronlaryň baglanyşygy gowşap, olar atamlardan üzülip aýyrýarlar (11.25 b surat) we erkin ýagdaýa geçip, elektrik toguny geçirmeklige gatnaşýarlar. Ýarymgeçirijiniň temperaturasynyň ýokarlandygyça şeýle elektronlaryň sany artýar we ýarymgeçirijiniň udel garşylygy peselýär. Şeýlelikde, temperaturanyň ýokarlanmagy netijesinde ýarymgeçirijileriň garşylygynyň azalmagy olarda elektrik toguny geçirijileriň konsentrasıyasynyň artmagy bilen düşündirilýär.

Ýarymgeçirijileriň walentli elektronlarynyň bar bolmagy bilen şertlenen geçirijiligi elektronly geçirijilik diýilýär.

Baglanyşyk üzülende elektron ýetmeýän boş orun emele gelýär. Oňa deşijek diýilýär. Deşijekleriň bolmagy ýene-de goşmaça zaryadyň göçürilmegine getirýär. Emele gelen bu boş ýere goňşy atamlardan walentli elektronlar geçip, kadaly baglanyşygy dikeldýär, onuň gaýdan ýerinde bolsa indi täze deşijek döreýär. Täze dörän boş ýere başga bir elektron geçip, deşijek ýene süýşýär we ş. m. Netijede togy döretmeklige diňe geçiriji (erkin) elektronlar gatnaşman, eýsem baglanyşykly elektronlar-da gatnaşýarlar. Geçiriji elektronlar ýaly, baglanyşykly elektronlar-da elektrik meýdanynyň tersine hereket edýärler. Deşijekler bolsa meýdanyň ugruna hereket edip özlerini položitel zaryadlanan bölejikler ýaly alyp barýarlar. Diýmek, hiç hili garyndysy bolmadyk arassa ýarymgeçirijilerde bir wagta iki hilli geçirijilik: elektron we deşikli geçirijilik amala aşyrylýar. Elektron geçirijilige n – tipli, deşikli geçirijilige bolsa p - tipli geçirijilik diýilýär. Ýarymgeçirijileriň elektrik geçirijiligini kwant mehanikasynyň zona nazaryýetiniň esasynda hem düşündirmek bolýar.

Dielektriklerde we ýarymgeçirijilerde 0 K temperaturada walentli zona bütinleýin elektronlardan doly, geçirijilik zonasy bolsa boş. (11.26-njy surat) bu ýerde A – walentli zona, C – geçirijilik zonasy. Dielektriklerde we ýarymgeçirijilerde bu zonalar gadagan edilen B zona arkaly bölünen.



11.26-njy surat. Dielektriklerde we ýarymgeçirijilerde walentli zonalarda elektronlaryň orny.

Gadagan edilen zonanyň giňligi dürli ýarymgeçirijilerde dürli-dürlidir. Metallarda gadagan edilen zona ýok. Olarda waletli zona bilen geçirijilik zonasy biri-biri bilen galtaşandyr. Şoňa görä-de, metallar islendik temperaturada hem elektrik togyny geçirýärler.

11.26-njy b suratdan görnüşi ýaly, şu surata degişli bolan temperaturada ähli elektronlar walentli zonada ýerleşendir, şu halatda ýarymgeçiriji ideal izolýatordyr. Onda elektrik toguny geçirijiler ýok. Gyzdyrmak netijesinde walentli zonadaky elektronlaryň energiýalary artyp başlaýar. Haçan-da elektronyň alan energiýasy gadagan edilen zonanyň giňligine deň bolan ΔE energiýa ýeteninde, ol A walentli zonadan C geçirijilik zonasyna geçýär (11.26-njy suratda ç). Bu ýagdaýda A zonada (atanak arkaly bellenen) deşijek emele gelýär. Şeýlelikde, walentli we geçirijilik zonalarynda elektrik meýdanynyň täsiri astynda elektrik togunyň döremegi üçin şertler döreýär: geçirijilik zonasyna erkin elektronlaryň döremegi elektron geçirijiligini, walentli zonada bolsa boş ýerleriň emele gelmegi – deşikli geçirijiligini döredýär.

Ýarymgeçirijilerde we dielektriklerde ΔE energiýanyň ululygy bilen kesgitlenilýän gadagan zonanyň giňligi dürli-dürlidir. Köplenç halatlarda kristalyň gadagan zonasynyň giňligi 2 – 3 eW-dan uly bolsa

oňa dielektrik diýip, eger-de 1,0 – 1,5 eW-dan kiçi bolsa (otag temperaturasynda) – ýarymgeçiriji diýip şertleýin kabul edýärler. Mysal üçin, almazyň gadagan zonasynyň giňligi 5,2 eW bolup, ol dielektrik hasaplanylýar, gadagan zonalarynyň giňligi degişlilikde 0,72 we 1,09 eW -deň bolan germaniý we kremniý kristallary giňden ulanylýan ýarymgeçirijilere degişlidir.

Geçirijilik zonasyndaky elektronlaryň we walent zonadaky deşikleriň konsentrasiýalarynyň temperatura baglylygy Bolsmanyň kanunyna görä, şeýle formula bilen kesgitlenilýär (11.27-nji a surat).

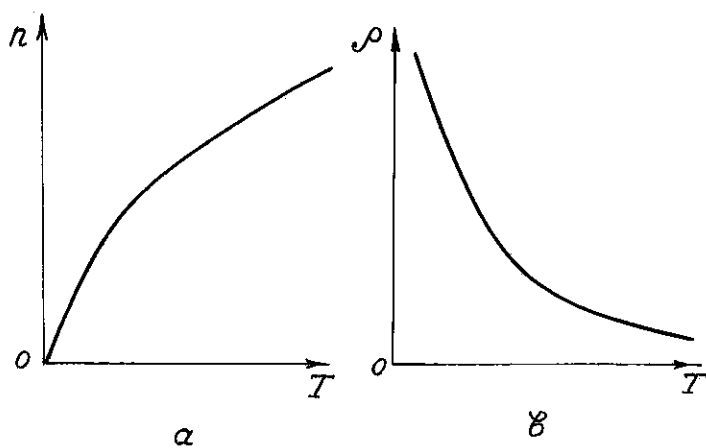
$$n = n_0 e^{-\Delta E/(2kT)} \quad (11.48)$$

bu ýerde n_0 – proporsionallyk koeffisiýenti.

Ýarymgeçirijileriň elektrik geçirijiliginiň temperatura baglylygy hem (11.48) formula ýaly kesgitlenilýär, şonuň üçin olaryň udel garşylyklarynyň temperatura baglylygyny şeýle formula arkaly aňlatmak bolar (11.26-njy b surat).

$$\rho = \rho_0 e^{\Delta E/(2kT)}$$

bu ýerde ρ_0 – proporsionallyk koeffisienti.



11.27-nji surat. Geçirijilik zonasyndaky elektronlaryň we walent zonadaky deşikleriň konsentrasiýalarynyň we ýarymgeçirijileriň elektrik geçirijiliginiň temperatura baglylyklary.

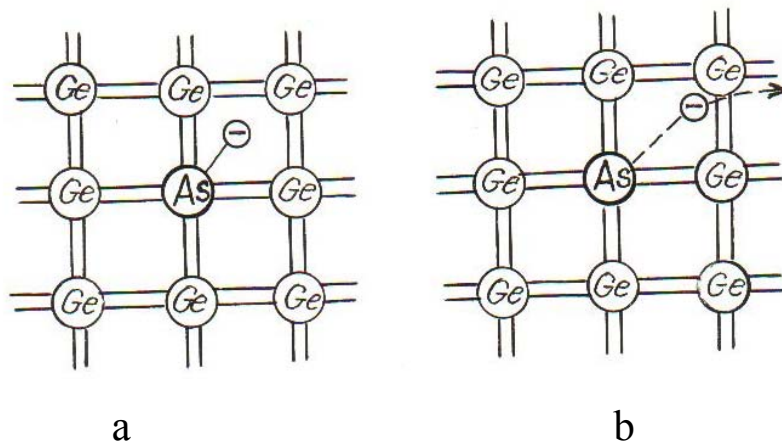
Biziň şu paragrafda sereden arassa ýarymgeçirijiniň elektrik geçirijiligine hususy elektrik geçirijiligi diýilýär.

§11.18. Ýarymgeçirijileriň garyndyly elektrik geçirijiligi

Tebigatda ideal arassa ýarymgeçirijiler ýok, olary emeli usul bilen ähli garyndylardan arassalamaklyk gaty çylşyrymly (praktiki mümkin däl). Şonuň bilen birlikde arassa ýarymgeçirijilerde ujypsyz mukdarda garyndynyň bolmagy onuň garşylygyny münlerçe esse kiçeldýär. Şeýle faktlar birinji tarapdan: ýarymgeçirijileriň häsiýetlerini üýtgetmekligiň mümkinçiligini görkezse, ikinji tarapdan berlen häsiýetli ýarym geçiriji materiallaryny taýýarlamaklygyň tehnologiýa taýdan kyndygyny aňladýar.

Garyndyly ýarymgeçirijileriň elektrik geçirijiligine täsir ediş mehanizmlerine seredileninde esasy iki ýagdaýa üns bermek gerek:

a. goý, garyndy hökmünde germaniý kristalyna uly bolmadyk mukdarda baş walentli myşýagy goşalyň (11.28-nji a surat).

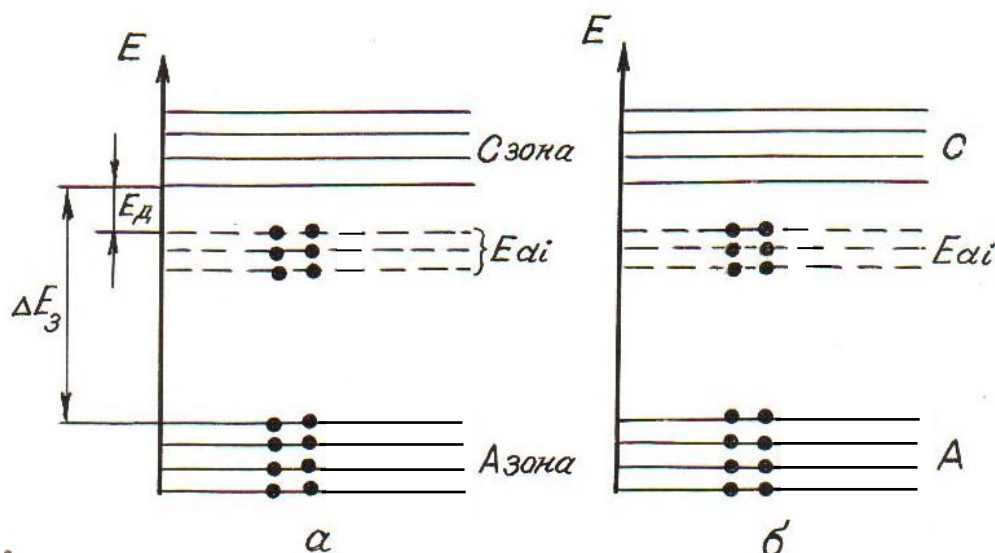


11.28-nji surat. Germaniý kristalynyň garyndyly geçirijiligi.

Myşýagyň her bir atomy özüniň daşky dört elektronlary arkaly germaniýniň goňşy dört sany atomy bilen baglanyşýar. Myşýagyň daşky 5-nji elektrony bolsa “artyp” galyp atomara baglanşygyna gatnaşmaýar (11.28-nji a surat) ýylylyk hereketiniň ýa-da başga täsirleriň netijesinde bu elektron üzülip (11.28-nji b surat) erkin bolup biler.

Myşýagyň goşulan her bir atomy ýarym geçirijide bir erkin elektrony döredýär. (Myşýagyň 0,0001 % garyndysynyň goşulmagy germaniýde erkin elektronlaryň sanyny 1000 gezeg golaý artdyrýar). Emma deşikleriň sany artmaýar, ýagny “artykmaç” elektronlaryň öz atomlaryndan üzülmepleri bilen olaryň atomara baglanşyklary bozulmaýar. Netijede germaniý erkin elektronlaryň hasabyna “baýlaşýar”. Şonuň üçin hem myşýak germaniýde elektron geçirijiligini döredýär. (elektrik toguny geçirijileriň esasy elektronlar bolanlygy

sebäpli) we şeýle geçirijilige n – tipli geçirijilik, bu geçirijiligiň agdyklyk edýän ýarymgeçirijisine n – tipli ýarymgeçiriji diýilýär. Şeýle elektrik geçirijiligini döredýän garynda – donor (beriji) garyndylar diýilýär. Garyndyly elektrik geçirijiligini zona nazaryýeti arkaly şeýle düşündirmek bolar. Mysýak gadagan edilen zonanyň (ΔE) ýokarsynda, geçirijilik zonasynyň (C zonanyň) golaýynda galyndyly energetiki derejeleri emele getirýär. (11.29-njy a surat).



11.29-njy surat. Geçirijilik zonasynyň golaýyndaky energetiki derejeler.

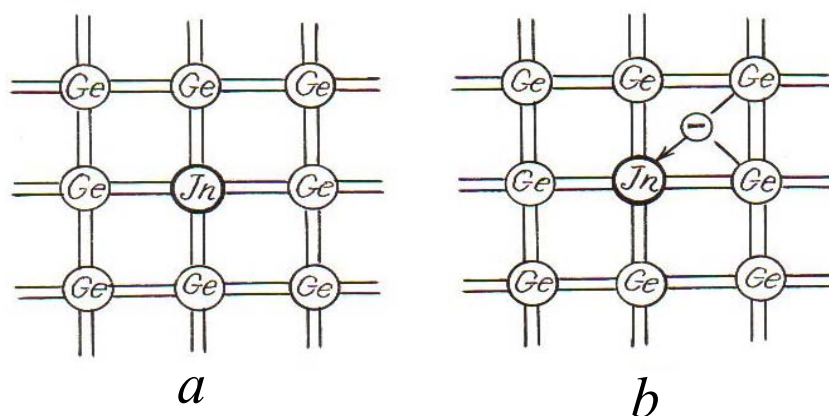
Bu energetiki derejeleriň energiýalarynyň ululygyny E_{di} bilen beläliň. E_{di} C zonadan 0,01 eW aşakda ýerleşýär ($E_{di} \approx 0,01$ eW). Haçan $T \approx 0$ K bolan wagtynda bu derejeler we walentli zonada ýerleşen derejeleriň ählisi elektronlardan doly (11.29-njy a surat). Haçanda $T > 0$ K bolup başlanynda garyndynyň emele getiren derejelerindäki elektronlar C zona geçip başlaýarlar we ýarymgeçiriji elektrik toguny geçirip başlaýar (11.29-njy b surat). Haçan garyndyly derejelerdäki elektronlaryň ählisi C – zona geçip gutaranyndan soňra (sebäbi $E_{di} \ll \Delta E$) energiýanyň artmagy bilen elektronlar A zonadan C zona geçip başlaýarlar indi garyndyly elektrik geçirijiligi, elektrik meýdanynyň täsiri astynda, hususy elektrik geçirijiligine syrygýar.

b. Goý, germaniý kristalyna Mendeleyewiň periodik tablisasynyň üçünji toparynda ýerleşen indiýniň uly bolmadyk mukdaryny goşalyň. Belleýşimiz ýaly germaniý dört walentli indiý bolsa üç walentli. Indiýniň her bir atomy özüniň üç sany daşky elektronlary arkaly goňşy germaniýniň atomlarynyň üç elektrony bilen berk

baglanyşyga girýär. Indiýniň daşky gatlagynda dördünji elektronyň ýoklugy sebäpli germaniýniň dördünji atomy bilen bolan baglanyşyk gaty gowşak bolýar (11.30-njy a surat).

Şeýlelikde germaniý kristalyna goşulan indiýniň her bir atomy onda bir deşik emele getirýär. Emme erkin elektronlaryň sany artmaýar.

Netijede germaniý deşijekleriň hasabyna baýlaşýar. Garyndyly deşikli geçirijilik esasy bolup durýar. 11.30-njy b suratdan görnüşi ýaly indiý atomynyň daşky gatlagyndaky boş ýere goňşy atomdan bir elektron geçýär we ş. m. Şeýlelikde indiý germaniýde deşikli geçirijiligi ýa-da p – tipli geçirijiligi döredýär.



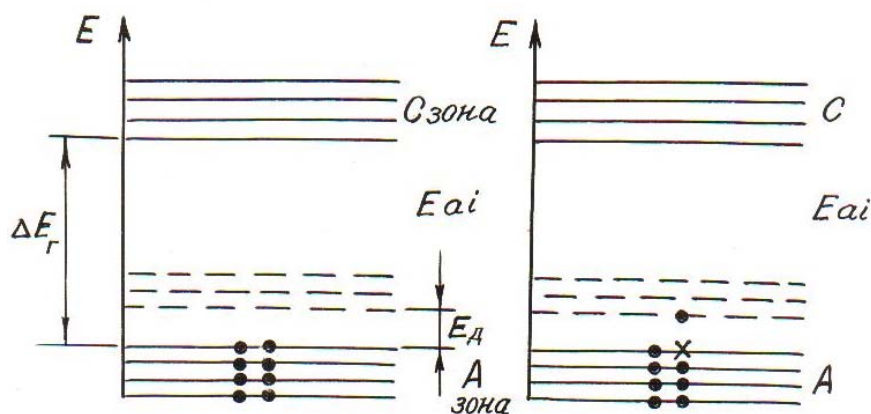
11.30-njy surat. Garyndyly deşikli geçirijiligiň ýüze çykyşy.

Şeýle garyndylara akseptor (kabul ediji) garyndylar diýilýär. Şeýle elektrik geçirijiliginiň agdyklyk edýän ýarymgeçirijisine bolsa p – tipli ýarymgeçiriji diýilýär.

Garyndyly ýarymgeçirijiler şol bir wagtyň özünde garyndyly elektrik geçirijiligine-de, hususy elektrik geçirijiligine-de eýedirler. Emma p – tipli ýarymgeçirijilerde esasy elektrik togyny geçirijiler deşikler bolsa p – tipli ýarymgeçirijiler-de – elektronlardyr.

Zona nazaryýetiniň esasynda ýarymgeçirijileriň deşikli elektrik geçirijiligini şeýle düşündirmek bolar.

Üç walentli garyndynyň goşulmagy netijesinde gadagan edilen zonanyň aşaky böleginde (A zonasynyň ýokarysynda) 0 K temperaturada hiç hili elektronlar bolmadyk energetiki derejeler döreýär. (11.31-nji a surat). Haçan temperatura $T > 0$ K bolanda walentli (A) zonadan elektronlaryň akseptorly garyndynyň emele getiren derejesine geçmekliginiň ähtimallygy artyp başlaýar (11.31-nji b surat). Sebäbi $E_a \ll \Delta E$. Walentli zonadaky elektronlaryň ýerleri boş galyp deşikli geçirijigiň döremegine şert döreýär.



11.31-nji surat. Akseptorly garyndynyň energetiki derejeleri.

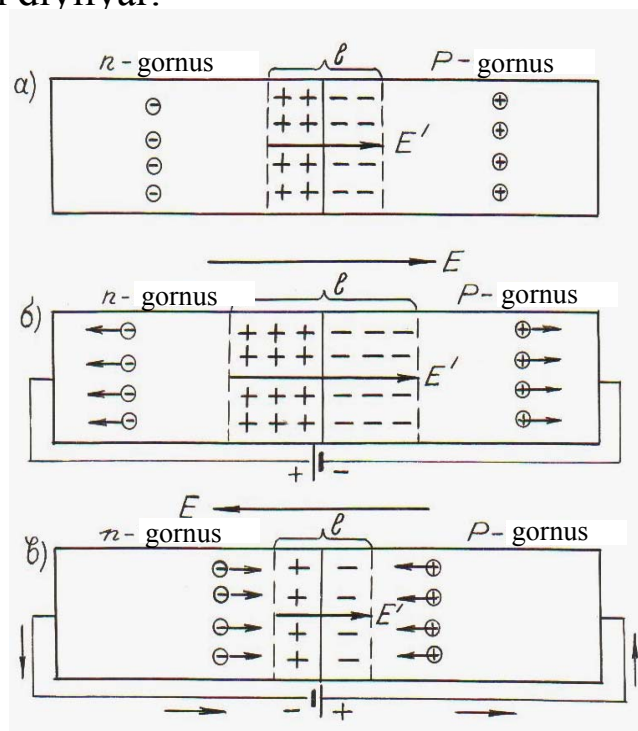
Şeýlelikde, ýarymgeçiriji kristalyna degişli garyndynyň az mukdaryny goşmak arkaly onuň ululygyny-da, hat-da ýarymgeçirijiniň geçirijiliginiň tipini-de üýtgedip bolýar. Gerek bolan elektrik häsiýetli garyndyly ýarymgeçirijileri taýýarlamak esasy meseleleriň biri bolup durýar.

§11.19. *p we n – tipli ýarymgeçirijileriň kontakty arkaly elektrik togunyň geçişi*

Häzirki zaman ýarymgeçirijileriň fizikasynda *p-n* geçiş ýa-da elektron – deşikli geçiş uly ähmiýete eýedir, geçiş iki sany dürli görnüşli: *p* – görnüşli (deşikli) we *n* – görnüşli (elektronly) ýarymgeçirijiniň kontaktynda emele gelýär (11.32-nji surat). *n* – görnüşli ýarymgeçirijide erkin elektronlaryň konsentrasiýasy köp olar bu oblastda elektrik toguny esasy geçirijiler bolup durýar, deşikler bolsa esasy däller hasap edilýär. *p* – oblastda deşikler esasy togy geçirijiler elektronlar bolsa esasy däl. Haçanda elektrik geçirijiligi boýunça iki dürli (*p-n* – görnüşli) ýarymgeçirijiler galtaşanlarynda, bu galtaşan üst arkaly elektronly ýarymgeçirijiden erkin elektronlar *p* – oblata tarap (*n*→*p*) we deşikler bolsa garşylykly tarap (*p*→*n*) diffuziýa arkaly aralaşyp başlaýarlar. Netijede, araçäk gatlagyň *p* – ýarymgeçiriji tarapy otrisatel zaryadlanýar, *n* – ýarymgeçiriji tarapy bolsa – položitel, ýagny kontaktyň zonynda “ikigat elektrik gatlagy” emele gelýär (11.32-nji a surat). Bu gatlakda dörän elektrik meýdanynyň *E'* güýjenmesi elektronlaryň *n*→*p* ugra baka deşikleriň bolsa *p*→*n* ugra baka geçmeklerine päsgelçilik döredip başlaýar. Netijede elektrik meýdanynyň *E'* güýjenmesiniň belli bir bahasynda, elektronlaryň we

deşikleriň kontakt arkalary görkezilen ugurlara aralaşmaklygy togtap deňagramlylyk ýagdaýy emele gelýär.

Tehnikada ulanylýan ýarymgeçirijileriň köpüsiniň kontaktynda emele gelen ℓ gatlagyň galyňlygy 10^{-5} sm golaý bolup, ondaky kontakt potentsiallarynyň tapawudy 10^{-1} W golaýdyr. Şeýle potentsiallar tapawudyny (potensial päsgelçiligini) diňe ýokary temperaturalarda uly kinetik energiýalara eýe bolan elektronlar we deşikler ýeňip geçip biler. Bu gatlak kadaly temperaturada garşylygynyň örän ulydygy sebäpli elektronlaryň p – oblasta ($n \rightarrow p$) we deşikleriň n oblasta ($p \rightarrow n$) geçmeklerine mümkinçilik bermeýär. Şonuň üçin bu ℓ araçäk gatlagyna ýapyjy gatlak hem diýilýär.



11.32-nji surat. p we n – tipli ýarymgeçirijileriň kontakty arkaly elektrik togunyň geçişi.

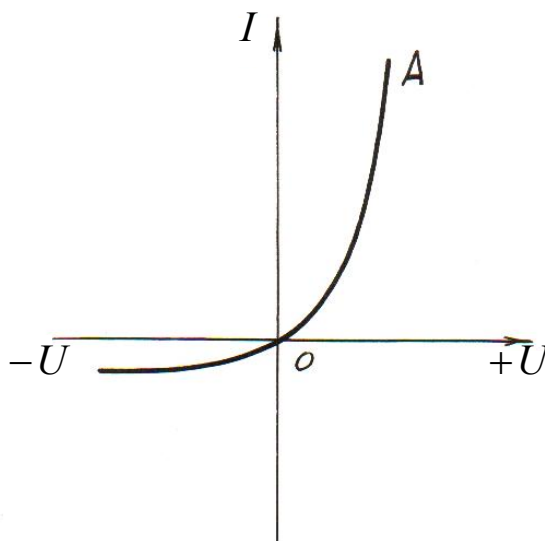
Ýapyjy gatlagyň garşylygyny daşky elektrik meýdanyň kömegi bilen üýtgetmek mümkin. Geliň, p - n geçişli ýarymgeçirijini elektrik zynjyryna utgaşdyralyň (11.32-nji b surat). Ilki bilen p – görnüşli ýarymgeçirijiniň potentsialy otrisatel bolar ýaly, n – görnüşli ýarymgeçirijiniň bolsa položitel bolar ýaly edip, olary tok çeşmesiniň polýuslaryna birikdireliň. Onda daşky meýdanyň, E güýjenmesi kontaktdaky elektrik meýdanynyň E' güýjemesi bilen ugry biýunça gabat gelýär. n – oblastdaky erkin elektronlar tok çeşmesiniň polžitel polyusyna tarap, p – oblastdaky deşijekler bolsa – otrisatel polyusyna tarap süýşýärler. Ýapyjy gatlak giňelýär, onuň garşylygy artýar. Kontakt arkaly tok geçmeýär munuň sebäbi şeýledir. Daşky elektrik meýdany,

indi esasy däl äkidijileriň ýagny p – oblastdaky elektronlaryň hem-de n – oblastyndaky deşijekleriň ýapyjy gatlak arkaly geçmekligine goltgy berýär. Şeýlelikde, kontakt arkaly elektronlar p – oblastyndan n – oblasta, deşijekler bolsa n – oblastdan p – oblasta göçýärler. Emma p – görnüşli geçirijide erkin elektronlaryň, n – görnüşli ýarymgeçiride bolsa deşijekleriň konsentrasiýalarynyň az bolanlygy sebäpli, n - p – geçişň geçirijiligi gaty az bolup, garşylygy diýseň köpdür. Praktiki, togy geçirmeýän geçişň bu ugruna ters geçiş diýilýär.

p - n – geçişe berikdirilen tok çeşmesiniň polýuslaryny uýtgedeliň (11.32-nji ç surat). onda daşky meýdanyň E güýjenmesiniň ugru E' güýjenmäniň ugruna garşylykly ugrukdyrylandyr. Erkin elektronlar we deşijekler biri-birlerine garşy orunlaryny uýtgedýärler. Ýapyjy gatlak kiçelýär, onuň garşylygy azalýar. Daşky goýlan naprýaženiýaniň belli bir bahasynda ýapyjy gatlagyň garşylygy ol ýarymgeçirijileriň öz garşylyklaryna deň bolýar (ýapyjy gatlak “ýitýär”). Ýarymgeçirijiler arkaly uly tok geçýär. Onuň elektrik toguny geçirýän bu ugruna göni geçiş diýilýär.

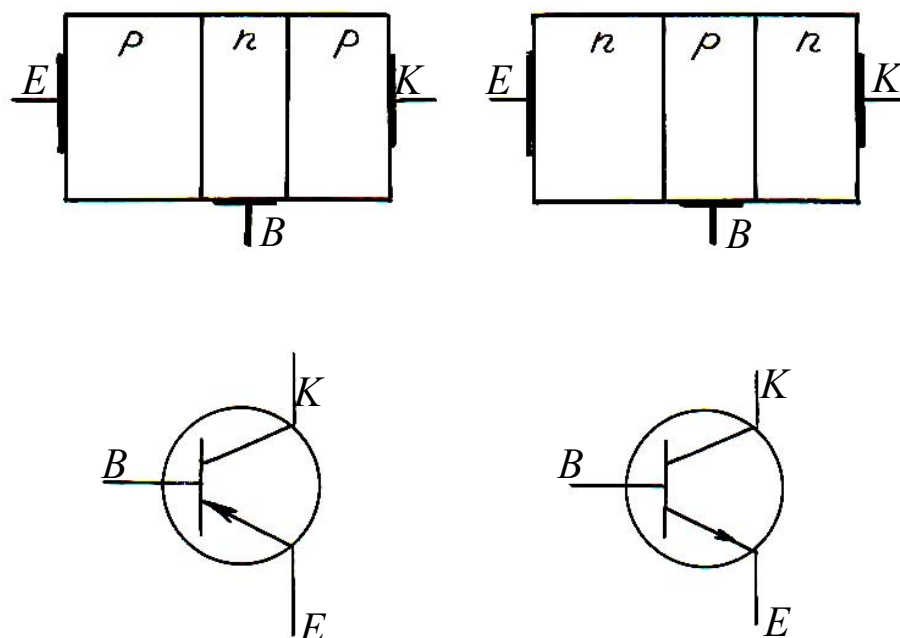
Şeýlelikde P - n geçiş iki elektrodly wakuum çyralary (diodlary) ýaly bir taraplaýyn geçirijilige eýedir. P - n – geçişň şu häsiýetini uýtgeýän togy göneltmek üçin ulanýarlar. Ýarym periodyň dowamynda, haçan-da p – görnüşli ýarymgeçirijiniň potensialy položitel bolanda, tok p - n geçişň üsti bilen erkin geçýär.

Indiki ýarym periodda – tok praktiki nola deňdir. (11.33-nji suratda p - n geçişň (ýarymgeçiriji diodyň) üstünden geçýän togyň oňa goýlan naprýaženiýa baglylygyň (wolt-amper häsiýetnamasynyň) çyzgysy görkezilendir. Bu ýerde egriniň 0 A şahasy göni geçişe, 0 W bolsa – ters geçişe degişlidir.



11.33-nji surat. p - n geçişň wolt-amper häsiýetnamasy.

$p-n$ – geçişin bu häsiýetlerini elektrik yrgyldylaryny güýçlendirmek we generirlemek üçin peýdalanmak bolar. häzirki wagtda esasan ýarymgeçirijili triodlar ýa-da tranzistorlar diýilýän gurluşlar giňden ulanylýar. Tranzistorlarda iki $p-n$ – geçiş bolup, olaryň iki görnüşü bardyr: $p-n-p$ we $n-p-n$ – görnüşli (11.34-nji suratda olaryň görnüşleri we şertli belgilenişleri görkezilendir).



11.34-nji surat. Tranzistorlaryň gurluşlary we şekillendirilişleri.

Tranzistoryň ortaky bölegine baza (esas) diýilýär we ol üç elektrodly elektron çyralaryndaky (trioddaky) toruň roluny ýerine ýetirýär. Üstki bölekleriň birine emitter beýlekisine – kollektor diýilýär, emitter trioddaky katodyň, kollektor bolsa anodyň roluny ýerine ýetirýär.

Tranzistorlar häzirki zaman tehnikasynda giňden ulanylýarlar. Olar ylmy, senagat we durmuş abzallarynyň elektrik zyrjylarynyň köpüsinde elektron çyralarynyň ornuny eýelediler. Tranzistorly radiopriýomnikler döredi. Tranzistorlaryň, ýarymgeçirijili diodlar ýaly, elektron çyralaryndan artykmaçlygy uly ozaly bilen ep-esli kuwwat talap edýän we gyzmagy üçin wagt gerek bolýan nakalyň ýoklugydyr. Ondan başga-da olar ölçegleri boýunça-da, massalary boýunça-da, elektron çyralaryndan onlarça esse kiçidir. Olaryň işleýän napraženiýeleri-de pes.

Termistorlar. Ýarymgeçirijileriň elektrik garşylygy temperatura ep-esli derejede bagly bolup üýtgeýär. Olaryň bu häsiýeti ýarymgeçirijili zynjyrdaky toguň güýji boýunça temperaturany ölçemek üçin peýdalanylýar. Şeýle abzallara termistorlar ýa-da termorezistorlar diýilýär.

Termistorlar ölçegleri boýunça birnäçe mikrometrden birnäçe santimetre çenli bolup, olar sterženler, turbajagazlar, diskler, şaýbalar we monjuklar görnüşinde çykarylýar. Termistorlar köplenç halatlarda 170-den 570 K aralygyndaky temperaturalary ölçemek üçin ulanylýarlar. Onda başga-da örän pes ($\sim 4-80$ K) we örän ýokary (1300 K) temperaturalary ölçemek üçin niýetlenen termistorlar hem bar. Termistorlar temperaturalary uzak aralykdan ölçemek, ýangyna garşy signal beriji abzallar hökmünde hem ulanylýarlar.

Fotorezistorlar. Ýarymgeçirijileriň elektrik geçirijiligi diňe gyzdyrlanda ýokarlanman, eýsem ýagtylandyrylanda hem ýokarlanýar. Ýarymgeçirijileriň bu häsiýetiniň peýdalanylýan abzallaryna fotorezistorlar ýa-da fotogarşylyklar diýilýär. Fotorezistorlaryň kiçiligi ýokary duýgurlygy olary ylmyň we tehnikanyň dürli oblastlarynda gowşak ýagtylyk akymyny ölçemek we hasaba almak üçin ulanmaga mümkinçilik berýär. Fotorezistorlar arkaly detallaryň üstüniň hilini kesgitleýärler, ölçeglerini barlaýarlar we ş.m.

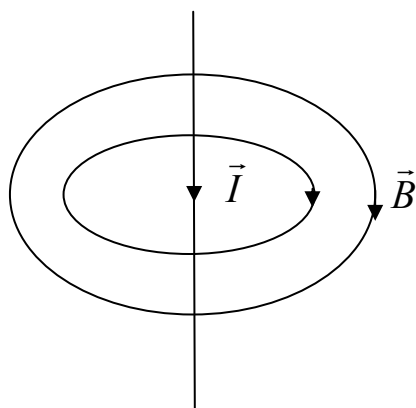
XII BAP. ELEKTROMAGNIT MEÝDANY

§12.1. Magnit meýdany. Magnit meýdanynyň güýç çyzyklary. Burawjygyň düzgüni

XIX asyrda geçirilen tejribeler islendik hereket edýän zarýadyň magnit häsiýetlerini ýüze çykarýandygyny görkezdi. Gozganmaýan elektrik zarýady elektrik meýdanynyň üsti bilen elektrik zarýadlaryna täsir edýär. Magnit peýkamyna ol zarýad tasir etmeýär. Magnit täsiri diňe hereket edýän zarýadlara (we üytgemeýän elektrik meýdanlaryna) mahsusdyr.

Hereket edýän zarýadlaryň (elektrik togunyň) töwereginde meýdanyň ýene bir görnüşiniň – magnit meýdanynyň ýüze çykýandygy anyklanyldy. Hereket edýän zarýadlar magnit meýdanynyň üsti bilen magnit ýa-da başga hereket edýän zarýadlar bilen özara täsir edişýärler.

Magnit meýdanynyň güýç meýdany bolanlygy üçin ony çyzgyda güýç çyzyklarynyň üsti bilen suratlandyryp bolýar. Magnit güýç çyzygynyň islendik nokadyna geçirilen galtaşmanyň ugry şol nokatda magnit meýdanynyň magnit peýkamynyň demirgazyk polýusyna täsir edýän güýjüniň ugry bilen gabat gelmeli. Tejribede magnit meýdanynyň güýç çyzyklarynyň şekilini magnit peýkamlarynyň ýa-da ownuk demir bölejikleriniň kömegi bilen alyp bolýar. Magnit meýdanynda magnit peýkamlary güýç çyzyklarynyň ugry boýunça ýerleşdirilýär. Güýç çyzyklarynyň ugry magnit peýkamlarynyň günorta polýusynda demirgazyk polýusyna tarap ugry bilen gabat gelýär. Daniýa fizigi H.K.Erstediniň 1820-nji ýylda geçiren tejribesi netijesinde gönüçyzykly simden akýan J toguň magnit meýdanynyň güýç çyzyklarynyň şol sime perpendikulýar bolan we merkezleri simiň üstünde ýatýan töwerekleri emele getirýändigini anyklanyldy.



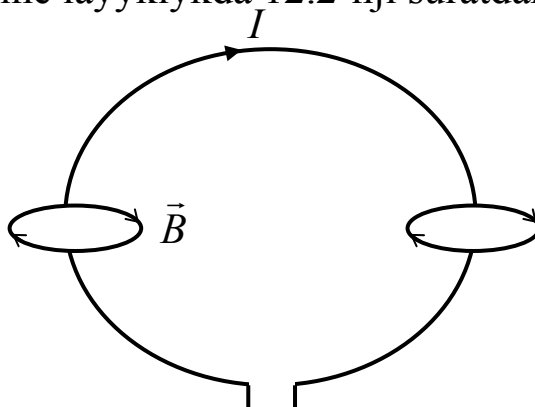
*12.1-nji surat. Gönü toguň
magnit induksiýasy.*

Güýç çyzyklarynyň ugry sag hyryň ýa-da sag elniň düzgüni bilen kesgitlenilýär.

Toguň ugry bilen hereket edýän burawjygyň ujunyň ugry, sapynyň aýlanýan ugry bilen bolsa, magnit güýç çyzyklarynyň ugry gabat gelýär.

Elektrostatiki meýdanyň güýç çyzyklaryndan tapawutlylykda magnit meýdanynyň güýç çyzyklary ýapyk bolýarlar, ýagny, olaryň başlangyjy we ahyrlary bolmaýar.

Töwerek boýunça akýan toguň magnit meýdanynyň görnüşi burawjygyň düzgünine laýyklykda 12.2-nji suratdaky ýaly bolar.



12.2-nji surat. Halka görnüşli toguň magnit induksiýasy.

1820-nji ýylda fransuz fizigi A.M.Amper hemişelik magnitleriň magnit täsirlerini olaryň içinde örän kiçi töwerek boýunça hereket edýän aýlaw toklarynyň barlygy bilen düşündirdi. Bu aýlaw toklary elektronlaryň öz hususy oklarynyň daşynda we ýadronyň daşynda aýlanmalary netijesinde emele gelýär.

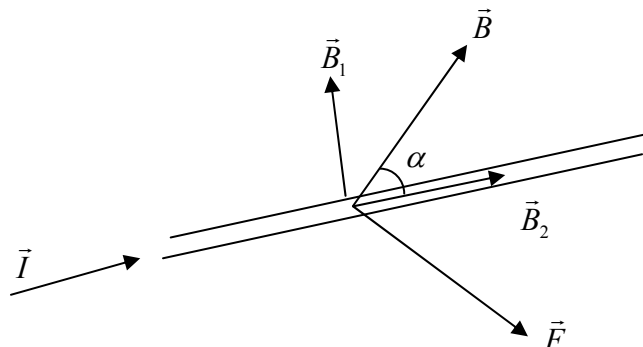
Maddanyň magnit täsirleri atomlardaky we molekulalardaky örän kiçi aýlaw toklary bilen baglanyşyklydyr.

§12.2. Amperiň güýji. Çep elniň düzgüni

Tokly geçirijileriň özara magnit täsirini ilkinji bolup Amper öwrenýär. Birinji tokly geçirijiniň magnit meýdany ikinji tokly geçirijä belli bir güýç bilen täsir edýär we ikinji tokly geçirijiniň magnit meýdany birinji tokly geçirijä täsir edýär. Magnit meýdanynyň tokly geçirijä edýän täsir güýjüne Amperiň güýji diýlýär.

Geçirilen tejribeler Amperiň güýjüniň tokly geçirijä täsir edýän magnit meýdanynyň induksiýasynyň wektorynyň modulyna proporsionaldygyny görkezýär. Ondan başga-da, Amperiň güýjüniň geçirijiden akýan toga baglylygy kesgitlendi. Toguň güýjüniň ulalmagy bilen Amperiň güýji hem ulalýar. Amperiň güýji geçirijiniň uzynlygyna,

\vec{B} vektor bilen geçirijiniň emele getirýän burçuna baglydyr. Goý, \vec{B} magnit induksiýasynyň wektory tokly geçirijiniň kesiminiň ugry bilen (toguň elementi bilen) α burçy emele getirýän bolsun. Onda ýüze çykýan F güýji şeýle şekillendirip bolar.



12.3-nji surat. Magnit meýdanynyň tokly geçirijä täsiri.

Geçirilen tejribeler tokly geçirijiniň ugry bilen ugrukdyrylan magnit meýdanynyň toga hiç hili täsir etmeýänligini görkezýär. Şonuň üçin tokly geçirijä täsir edýän F güýjüň moduly diňe geçirijä perpendikulýar bolan B wektorynyň düzüjisine, ýagny, $B_2 = B \sin \alpha$ baglydyr.

Toguň elementi bilen α burçuny emele getiren B magnit induksiýaly magnit meýdany tarapyndan üstünden güýji I deň bolan elektrik togy akýan $d\ell$ uzynlykly geçirijä täsir edýän F güýjüň moduly şeýle tapylýar:

$$dF = BI \ell \sin \alpha \quad (12.1)$$

Bu aňlatma Amperiň kanunynyň matematiki görnüşidir.

Amperiň kanuny:

Magnit meýdany tarapyndan tokly geçirijä täsir edýän güýç magnit meýdanynyň induksiýasyna, toguň güýjüne, geçirijiniň uzynlygyna we toguň ugry bilen magnit induksiýasynyň arasyndaky burçuň sinusyna göni proporsionaldyr. Amperiň güýjüniň ugry çep eliň düzgüni bilen kesgitlenýär.

Eger çep eliň aýasy B magnit induksiýasynyň wektorlary aýa girer ýaly ýerleşdirilse, uzadylan dört barmak toguň ugry bilen gabat gelse, onda gönüburç bilen duran başam barmak magnit meýdany tarapyndan tokly geçirijä täsir edýän Amperiň güýjüniň ugruny görkezýär.

(12.1) aňlatmadan ℓ uzynlykly gönüçyzykly geçiriji üçin (eger $\alpha = 90^\circ$ bolsa) alarys:

$$F = BI \ell \quad (12.2)$$

Bu aňlatmadan magnit meýdanynyň induksiýasynyň fiziki manysyny anyklap bolýar.

Magnit meýdanynyň induksiýasynyň moduly üstünden 1A tok akýan 1 metr uzynlykly göni geçirijä magnit meýdany tarapyndan täsir edýän güýje san taýdan deň bolan ululykdyr. Eger täsir edýän güýç 1 Nyutona deň bolsa, onda magnit meýdanynyň induksiýasynyň wektorynyň moduly 1 Tesla deň diýip kabul edilýär.

§12.3. Lorensiň güýji

Ýokarda belleýsimiz ýaly, magnit meýdanynda ýerleşen tokly geçirijä Amperiň güýji täsir edýär. Elektrik togunyň zarýadlanan bölejikleriň tertipleşdirilen hereketidigini göz önünde tutsak, onda Amperiň güýji zarýadlanan bölejiklere magnit meýdany tarapyndan täsir edýän güýçleriň jemidir diýip aydyp bolýar. Magnit meýdanynda hereket edýän zarýadlanan bölejige täsir edýän güýje maddanyň gurluşynyň elektron nazaryýetini esaslandyryjy, golland fizigi G.Lorensiň hormatyna Lorens güýji diýilýär. Bu güýji Amperiň kanunynyň kömegi bilen kesgitlemek bolar. Amperiň (12.2) aňlatmasyna laýyklykda zarýadlanan bölejige traýektoriýanyň ℓ uzynlykly böleginde magnit meýdany tarapyndan täsir edýän güýç:

$$F = BI\ell \sin \alpha.$$

Biziň bilişimiz ýaly, toguň güýji:

$$I = \frac{q}{t}$$

Bu ýerde: t - q zarýadyň traýektoriýanyň ℓ uzynlykly bölegini geçýän wagty. Şonuň üçin Lorens güýji:

$$F = B \frac{q}{t} \ell \sin \alpha \quad (12.3)$$

Ýöne:

$$v = \frac{\ell}{t} \quad (12.4)$$

Bu ýerde: v - zarýadlanan bölejigiň hereketiniň tizligi;
 α - tizligiň wektory bilen magnit induksiýasynyň wektorynyň arasyndaky burç.

$$F = qBv \sin \alpha \quad (12.5)$$

F , v we B ululyklaryň ugurlary özara perpendikulýardyr.

Lorens güýjüniň ugruny çep elin düzgüni boýunça kesgitlap bolar. Düzgündäki güýjün ugry diýip (eger zarýad položitel bolsa) v we B wektor ululyklaryň köpeltmek hasylynyň emele getirýän wektorynyň ugruny kabul etmeli. Eger hereket edýän zarýad otrisatel bolsa, onda güýjün ugry bilen tizligiň ugry gapma-garşylykly bolýar.

Lorens güýjüniň v tizlige perpendikulýar bolanlygy üçin ol diňe zarýadyň tizliginiň ugruny üýtgedýär, tizligiň moduly üýtgemän galýar. Bu ýerden iki wajyp netije çykarylýar:

1. Lorens güýjüniň işi nola deň, sebäbi hemişelik magnit meýdany içinde hereket edip barýan zarýadlanan bölejigiň üstünde iş etmeýär (bölejigiň kinetik energiýasyny üýtgetmeýär).

2. Lorens güýjüniň täsiri astynda bölejik töwerek boýunça hereket edýär. Lorens güýji merkeze ymtylýan güýç bolýar.

Bu töweregiň radiusyny tapmak üçin merkeze ymtylýan we Lorens güýçlerini deňleýäris:

$$\frac{mv^2}{r} = Bqv \quad \text{ýa-da} \quad r = \frac{mv}{qB} \quad (12.6)$$

bu ýerde: m – bölejigiň massasy.

Şeýlelik bilen bölejigiň hereket edýän töwereginiň radiusy bölejigiň tizligine göni proporsional we magnit meýdanynyň induksiýasyna ters proporsional.

Bölejigiň töwerek boýunça aýlanma periody töweregiň s uzynlygynyň bölejigiň v tizligine bolan gatnaşygyna deň:

$$T = \frac{s}{v} = \frac{2\pi r}{v}$$

(12.6) aňlatmany göz önünde tutsak,

$$T = \frac{2\pi m}{qB} \quad (12.7)$$

Diýmek, bölejigiň magnit meýdanynda aýlanma periody zarýadyň q ululygyna we B magnit induksiýasyna ters baglydyr.

XIII BAP. ELEKTROMAGNIT İNDUKSIÝASY

§13.1. Elektromagnit induksiýasy hakynda Faradeýiň kanuny. Lensiň düzgüni

Elektrik togunyň töwereginde magnit meýdanynyň döreýändigini bellidir. Bu hadysa magnit meýdanynyň kömegi bilen tok döretmek synanyşyklaryna itekledi. 1831-nji ýylda inlis alymy Faradeý elektromagnit iduksiýasy hadysasyny açdy. Bu kanuna laýyklykda, elektrik geçiriji ýapyk konturyň giňişligindäki magnit akymy:

$$\Phi = B \cdot S \quad (13.1)$$

üýtgände, induksion tok diýilýän tok döreýär. Bu hadysa elektromagnit induksiýasy diýilýär. Induksion toguň ululygynyň magnit akymynyň üýtgeýiş tizligine baglydygy tejribeleriň üsti bilen subut edildi.

Utgaşan geçirijide, ýagny ýapyk konturda toguň döremegi zynjyrdan induksiýanyň EHG-iň ýüze çykandygyny aňladýar. Onda bu EHG:

$$\mathcal{E}_i \sim \frac{d\Phi}{dt} \quad (13.2)$$

Tok geçirýän konturda oňa inderilen perpendikulýaryň ugry bu EHG-iň alamatyny magnit akymynyň üýtgemesiniň alamaty bilen baglanyşdyrýar. Toguň magnit meýdany kesgitlenende, bu ugruň sag nurbat kanuny boýunça kesgitlenýändigini subut edilipdi. Onda:

$$\mathcal{E}_i = -\frac{d\Phi}{dt} \quad (13.3)$$

gelip çykýar. Bu aňlatma Faradeýiň kanunynyň aňlatmasydyr. Bu aňlatmadaky minus alamaty 1833-nji ýylda getirilip çykarylan Lensiň düzgüni bilen düşündirilýär:

Induksion toguň ugry ol toguň döredýän magnit meýdany, togy döreden magnit meýdanynyň üýtgemesine päsgelçilik berer ýaly bolup ugrukdyrylandyr.

Lensiň düzgüni magnit meýdanynda ýerleşen geçirijide we onuň töwereginde energiýanyň saklanmak kanunyndan alynýar:

$$\mathcal{E}Jdt = J^2 Rdt + Id\Phi \quad (13.4)$$

ýa-da, dt bölsek:

$$J\left(\mathcal{E} - \frac{d\Phi}{dt}\right) = J^2 R \quad (13.5)$$

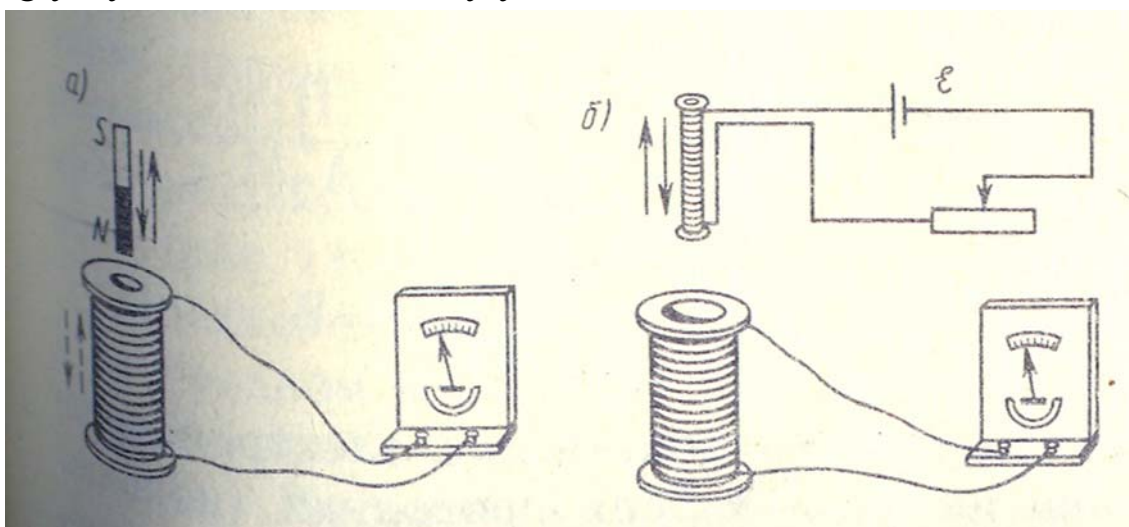
Onda:

$$J = \frac{1}{R} \left(\mathcal{E} - \frac{d\Phi}{dt} \right) \quad (13.6)$$

Elektromagnit induksiýasynyň ölçeg birligi :

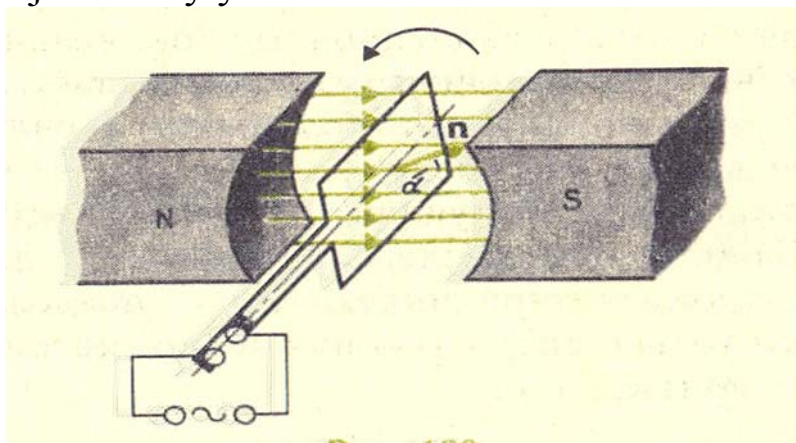
$$\left[\frac{d\Phi}{dt} \right] = \frac{Wb}{s} = \frac{Tl \cdot m^2}{s} = \frac{N \cdot m^2}{A \cdot m \cdot s} = \frac{J}{A \cdot s} = \frac{A \cdot W \cdot s}{A \cdot s} = Wolt \quad (13.7)$$

Elektromagnit induksiýasy hadysasy mehaniki energiýany elektrik energiýasyna öwürmekde ulanylýar.



13.1-nji surat. Elektromagnit induksiýasy hadysasy barada Faradeýiň tejribesi.

Bu hadysa öwrülişikli bolanlygy sebäpli, elektrik energiýasyny mehaniki energiýa hem öwürmek bolýar. Bu maksatlarda elektrik hereketlendirijiler ulanylýarlar.



13.2-nji surat. Elektromagnit induksiýasy hadysasy esasynda elektrik toguny öndürijiniň (generatorýň) işleýiş esasy.

§13.2. Induktivlik. Öz-özünden induksiýa. Özara induksiýa

Utgaşan (ýapyk) geçirijide akýan toguň öz töwereginde magnit meýdanyny döredýändigini bilýäris. Bu magnit meýdanynyň geçirijä ilişen Φ magnit akymy

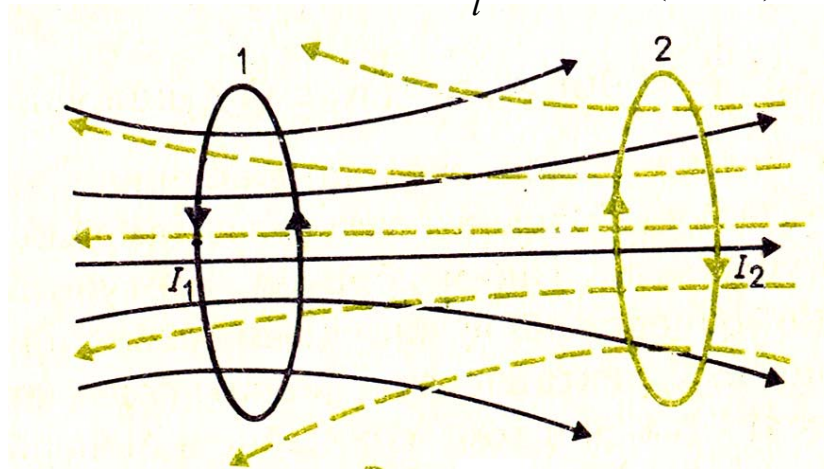
$$\Phi = LI \quad (13.8)$$

I tok güýjüne bagly. Bu ýerde L ululyga konturyň (ýapyk geçirijiniň) induktiwligi diýilýär. Geçirijide akýan tok üýtgände onda döreýän induksiýanyň EHG-ine öz-özünden induktiwlik diýilýär.

$$[L] = \frac{Wb}{A} = \frac{W \cdot s}{A} = Gn; (Genri) \quad (13.9)$$

Tükeniksiz uzyn (uly uzynlykly) solenoidiň doly magnit akymy

$$\Phi = \Phi_o N = NBS = \mu_o \mu \frac{N^2 I}{l} S \quad (13.10)$$



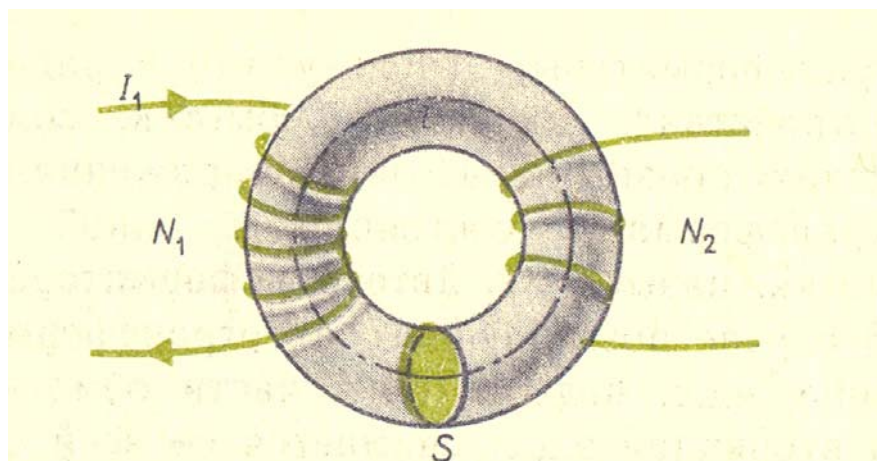
13.3-nji surat. Üýtgeýän I_1 we I_2 halka görnüşli tokly geçirijilerde özara induksiýa hadysasynyň ýüze çykyşy.

N_1 - birinji tegegiň sarymlarynyň sany;

N_2 - ikinji tegegiň sarymlarynyň sany;

l - halka görnüşli özeniň ortasy boýunça uzynlygy;

S - özeniň kese-kesiginiň meýdany;



13.4-nji surat .
Özara induktivligiň kesgitlenişi.

§13.3. Magnit meýdanynyň energiýasy. Elektromagnitiň öz ýakoryny çekiji güýji

Magnit meýdany hem elektrik meýdany ýaly energiýa eýedir. Magnit meýdanynyň energiýasy bu meýdany döretmek üçin gerek bolan toguň işine deňdir. I tok güýji bolan L induktivlikli tegegi derňäliň. Bu tegek (13.8) aňlatma boýunça kesgitlenýän magnit akymyny özüne ilişdirýär. Tok güýji dI ululyga üýtgände magnit akymy hem $d\Phi = LdI$ ululyga üýtgär. Bu ýagdaýda ýerine ýetirilýän iş:

$$dA = Id\Phi = LI dI \quad (13.15)$$

bolar. Onda Φ magnit akymyny döretmek üçin gerek bolan iş:

$$A = \int_0^J LJ dJ = \frac{LI^2}{2} \quad (13.16)$$

deň bolar.

Eger, hususy halda, ýagny, takyk şertde, magnit meýdany uzyn tegegiň içinde bolup, onuň hemme ýeri birmeňzeş bolsa, bu iş:

$$W = \frac{1}{2} \mu_0 \mu \frac{N^2 I^2}{l} S \quad (13.17)$$

energiýa deň bolar.

Onda uzyn tegekde (solenoidde) I tok güýjüniň döredýän magnit induksiýasynyň

$$B = \frac{\mu_0 NJ}{l} \quad (13.18)$$

bolýandygyny, hem-de

$$B = \mu_0 \mu H \quad (13.19)$$

aňlatmany nazarda tutsak:

$$W = \frac{B^2}{2\mu_0\mu} V = \frac{BH}{2} V \quad (13.20)$$

gelip çykýar. Bu ýerde:

$$V = S \cdot l \quad (13.21)$$

uzyn tegegiň (solenoidiň) göwrümi. Onda solenoidiň energiýasynyň göwrüm dyklyzlygy:

$$W = \frac{W}{V} = \frac{B^2}{2\mu_0\mu} = \frac{\mu_0 \mu H^2}{2} = \frac{BH}{2}; \quad (13.22)$$

bolýar. Umuman, bu aňlatmanyň dia- we paramagnetiklere degişlidigini bellemek gerek. Magnit meýdanynyň B induksiýasynyň onuň H güýjenmesi bilen çyzykly baglanyşykda bolmadyk ferromagnetikler üçin bu aňlatma çylşyrymlaşýar.

Elektromagnit - tegek boýunça elektrik togy akyp geçende, magnitleşýän adaty tok geçiriji tegekden we gatlakly ferromagnit özenden ybarat bolan elektrotehniki gurluş. Elektromagnit, esasan, magnit akymyny we güýji döretmekde ulanylýar. Gurluş aýratynlyklaryna garamazdan, elektromagnit adatça tok geçiriji sarymly tegekden, magnitlenýän özenden we mehanizm tarapyndan herekede getirilýän detallara (maşyn şaýlaryna) güýç berýän ýakordan (magnit geçirijiniň hereket edýän bölegi) ybaratdyr.

Elektromagnitiň öz ýakoryny çekýän güýji onuň hemişelik ýa-da üýtgeýän tokda işleýändigine, gurluşyna, tegegiň görnüşine, tegegiň ýasalan geçirijisine we ş. m. bagly bolup, umuman, Makswelliň aňlatmasy bilen kesgitlenýär. Üýtgeýän toguň III -görnüşli özenli elektromagniti üçin bu güýç şeýle kesgitlenýär:

$$F = 4 \cdot 10^5 B^2 S \quad B = 0,4\pi \frac{IN}{l} \mu_o \mu . \quad (13.23)$$

Ol ferromagnit häsiýetli şaýlary hereketlendirmek üçin (elektromagnit muftasy we ş.m.), ikilenç ulanyljak, zyňylan metal böleklerini ulaglara ýüklemek we düşürmek üçin ulanylýar.

§13.4. Transformator. Magnit hadysalarynyň ulanylyşy

Üýtgeýän tok çeşmesiniň naprýaženiýesini ulanyja laýyk gelýän naprýaženiýä öwürmek üçin niýetlenen elektromagnit gurluşyna transformator (öwrüji) diýilýär. Transformatoryň işleýşi özara induksiýa hadysasyna esaslanandyr. Ol umumy özeniň daşyna saralan iki sany tegeklerden ybarat. Onuň birinjisi - tok çeşmesine birikdirilýäni, sarymlarynyň sany N_1 , ikinjisi bolsa - ulanyja birikdirilýäni, sarymlarynyň sany N_2 . Bu enjam rus alymlary Ýabloçkow we Usagin tarapyndan döredildi. Birinji tegekde üýtgeýän EHG-i bolan çeşme şol tegekde I üýtgeýän tok güýjüni döredýär. Ol tok güýji umumy özende (özara izolirlenen hem-de jebis gysylyp ýasalan III - ýa-da II - şekilli polat gatlaklarda) Φ magnit akymyny döredýär. Elektromagnit induksiýasy kanunynyň deňlemesine laýyklykda, birinji tegekde döreýän tok güýji :

$$\mathcal{E}_1 - \frac{d}{dt}(N_1\Phi) = J_1 R_1 \quad (13.24)$$

aňlatmadan kesgitlenýär. Ýygy-ýygydan (çalt) üýtgeýän toklarda $IR=0$ bolýanlygy sebäpli :

$$\mathcal{E}_1 \approx N_1 \frac{d\Phi}{dt} \quad (13.25)$$

Ikinji tegekde döreýän induksiýanyň EHG-i bolsa, degişlilikde:

$$\mathcal{E}_2 \approx -N_2 \frac{d\Phi}{dt} \quad (13.26)$$

bolar. Bu iki aňlatmalardan :

$$\mathcal{E}_2 = -\frac{N_2}{N_1} \mathcal{E}_1 \quad (13.27)$$

gelip çykýar. Minus alamaty birinji we ikinji tegeklerdäki EHG-leriň fazalarynyň garşylyklydygyny görkezýär.

Transformatoryň tegekleriniň ikisinde-de toguň kuwwatlaryny deň hasap etsek:

$$\mathcal{E}_2 I_2 \approx \mathcal{E}_1 I_1 \quad (13.28)$$

fazalaryň ugurlaryny hasaba almasak, san bahalaryň gatnaşygy :

$$k = \frac{\mathcal{E}_2}{\mathcal{E}_1} \approx \frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1} = 1 \quad (13.29)$$

ululyga transformatoryň öwürme (transformasiýa) koeffisiýenti diýilýär. $k > 1$ bolanda transformator ýokarlandyryjy bolýar, ýagny ulanyja berilýän naprýaženiýe transformatoryň I sargylaryndakydan uly bolýar. $k < 1$ bolanda peseldiji transformator bolýar. Onda ulanyja berilýän naprýaženiýe tok çeşmesiniň naprýaženiýesinden kiçi bolýar.

Magnit induksiýasy hadysasy "magneto" atly gurluşda galyndyly magnit meýdanynyň hasabyna EGH döretmekde ulanylýar. Bu gurluş uly bolmadyk kuwwatly içinden ýandyrylýan dwigatelleri elektrik togy bilen üpjün etmekde ulanylýar.

Starteri (içinden ýandyrylýan dwigateli işe başladyjy gurluşy) işe goşujyda (wtýagiwaýuşaýa katuska - WK) hemişelik toguň hasabyna hemişelik magnit meýdanyny döretmegiň hasabyna elektromagnit ýüze çykarylýar. Elektromagnit starteri elektrodwigateli işe goşýar, ýagny ony elektrik zynjyryna utgaşdyrýar. Starter işe goşulan bada elektromagnitiň toguny kesýärler.

"Bobina" diýip atlandyrylýan, ýangyç-howa garyndysyna elektrik uçgunyny bermegi üpjün edýän gurluş hem özboluşly transformatordyr. Ol hem elektromagnit induksiýasy hadysasynyň esasynda işleýär. Elektromagnit induksiýasy hadysasy aeroportlarda metal detektorynda ulanylýar. Onda bir tegekde I_0 tok B_0 magnit induksiýasyny döredýär. Ikinji tegek bilen birinji tegegiň arasyna giren adamda metal bar bolsa, onda Lensiň düzgüni boýunça köwlenme togy we oňa degişli B' magnit induksiýasy döräp, ikinji tegekde I' duýduryjy togy ýüze çykarýar. Ikinji tegek metal bardygyny ýagtylyk we ses duýduryjylary arkaly duýdyrýar.

Uly tekizlikli bütewi geçirijilerde köwlenme induksoin (Fuko) toklary ol geçirijileri gyzdymak üçin ulanylýarlar. Bu esasyda metal erediji elektrik peçleri hem-de öý hojalygynda ulanylýan mikrotolkun (SWÇ-) peçleri işleýärler.

Elektromagnit induksiýasy hadysasy wideo we audio maglumatlary magnit ýazgylarynda ýazmaga we soňra okamaga mümkinçilik berýär. Magnit ýazgy ýazylanda C - görnüşli ferromagnetikden ýasalan ýazyjy başjagaz (golowka), onuň arasyndan magnit lentasy (zolagy) geçende, onuň magnit domenlerini (molekulalaryny) ýazylýan maglumatla laýyk tertipleýär. Habar okalanda bu maglumatlar okaýan başjagazda (golowkada) deňişli magnit meýdanyny we induksion togy döredýär. Ol tok bolsa, deňişli şekili ýada sesi ýüze çykarýär.

Bulardan başga-da, uly toklaryň kömegi bilen güýçli magnit meýdanyny döredip, magnitlenen suwlary ulanýarlar. Olardan ýerleriň şorlaryny azaltmakda netijeli peýdalanylýar.

Içimlik suwlary şorlaşan suwlardan almak üçin magnitlenen suwlary doňduryp, eredýärlär.

XIV BAP. ÝAGTYLYGYŇ TEBİGATY

§14.1. Giriş

Optika – fizikanyň ýagtylygyň tebigatyny, ýagtylyk hadysalarynyň kanunalaýyklyklaryny hem-de ýagtylygyň maddalar bilen özara täsirlerini öwrenýän bölümdir.

Ýagtylygyň tebigaty barada iki sany taglymat bar: Nýuton tarapyndan esaslandyrylan korpuskulýar taglymaty we Makswell tarapyndan esaslandyrylan tolkun taglymaty. Korpuskulýar taglymata laýyklykda, ýagtylyk çeşmeden uçup çykýan örän uly tizlikli bölejikleriň korpuskulalaryň üznüksiz akymydyr. Tolkun taglymatyna laýkylykda, ýagtylyk çeşmeden uly tizlik bilen ýaraýan tolkundyr. Tolkun älemi doldurup duran hyýaly maýyşgak gurşawda -“dünýä efirinde” ýaýraýar diýilip hasap edilipdir. Soň, 1881-nji ýylda amerikan fizigi A.A.Maýkelson ýagtylygyň ýaýramagy üçin maýyşgak gurşawyň hökman daldigini, netijede “dünýä efiriniň” yokduguny subut etdi. Şeýlelikde, bu taglymat çäkli bolup galdy. Öňe sürülen bu iki taglymatlar ýagtylygyň serpikmegini we döwürmegini esaslandyryp bilseler-de, interferensiýa, difraksiýa, polýarlanma ýaly hadysalary fiziki esasyda düşündürmek üçin ýeterlik bolmadylar.

Optikanyň esasy kanunlary – ýagtylygyň gönüçyzykly ýaýramagy, serpikmegi, döwürmegi gadym döwürlerden bäri belli bolupdyrlar. Ýagtylygyň hökman gönüçyzyk boýunça ugrukdylýanlygyny b.e. öň 430-nji ýylda Platon, bir dury maddadan ikinjä geçende döwlip, ýene-de gönüçyzyk boýunça ugrukýandygyny Aristotel we Ptolomeý b.e. öň 350-nji ýylda kesgitlepdirler.

Ýagtylygyň gönüçyzykly ýaýramak kanuny: birmeňzeş gurşawda ýagtylyk gönüçyzykly ýaýraýar.

Nokatlanç ýagtylyk çeşmesinden çykýan şöhledenmäniň inçe konusyny çyzyk hökümünde kabul edip, oňa şöhle diýýärler.

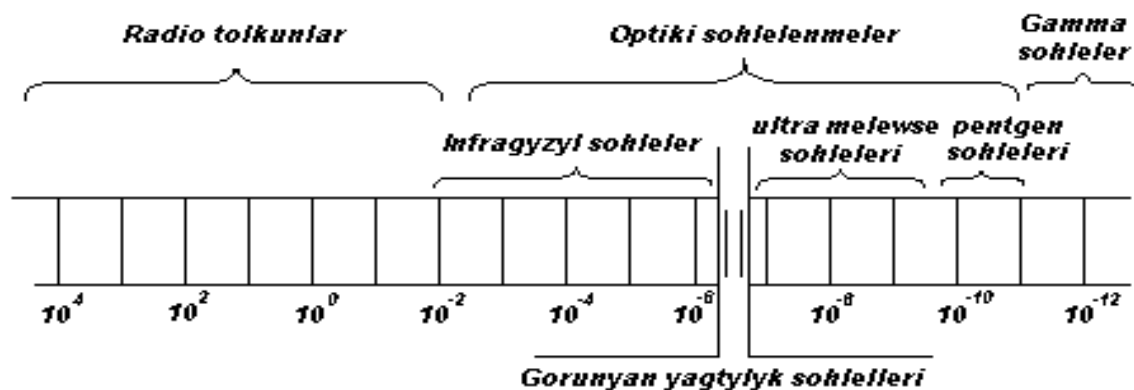
Şöhledenmäniň ähli energiýasy “şöhle” diýip atlandyrylýan çyzyk boýunça geçirilýär diýip hasap edilýär. Ýagtylyk hadysalaryny şeýle düşündirýän bölüme geometrik optika diýilýär. Ýagtylygyň gönüçyzykly ýaýramak hadysasy Ýeriň üstünde ýerleşen zatlaryň aralyklaryny, beýikliklerini kesgitlemekde ulanylýar. Nokatlanç ýagtylyk çeşmesinden jisimiň üstüne ýagtylyk düşende onuň takyk çäkli kölegesiniň emele gelmegi, bular bilen bagly, Günüň tutulmagy, Aýyň tutulmagy geometrik optikanyň kanunlary bilen düşündirilýärler.

Elektrik we magnit meýdanlary bilelikde ýaýraýan elektromagnit tolkunlaryny emele getirýärler. Lebedewiň we Gersiň tejribelerinde ol tolkunlaryň ýagtylygynyň tizligine deň bolan tizlik bilen ýaýraýandygy subut edildi. Bu bolsa, ýagtylygynyň elektromagnit tolkundygy barada netije çykarmaga şert dörettdi.

Ýagtylygynyň tizliginiň ($c=300000$ km/s) örän ululygy sebäpli, ony tejribede kesgitlemek kyn. 1676–njy ýylda Rýemer Ýupiteriň hemralarynyň üstünde Gün tutulmasynyň (garaňkyda bolmalarynyň) gözegçilikleri netijesinde ilkinji gezek ýagtylygynyň tizligini kesgitlemäge synanyşdy. Şonda ol ýagtylygynyň tizligini 215000 km/s barabar görnüşinde ölçedi. 1727-nji ýylda Bredli bu ululygyny 303000 km/s, 1849-njy ýylda Fizo 313000 km/s deňdigini ölçeglerde görkezdi. Häzirki döwürde wakuumda ýagtylygynyň tizligi

$$c=299792,5 \pm 0,1 \text{ km/s} \quad (14.1)$$

hasap edilýär.

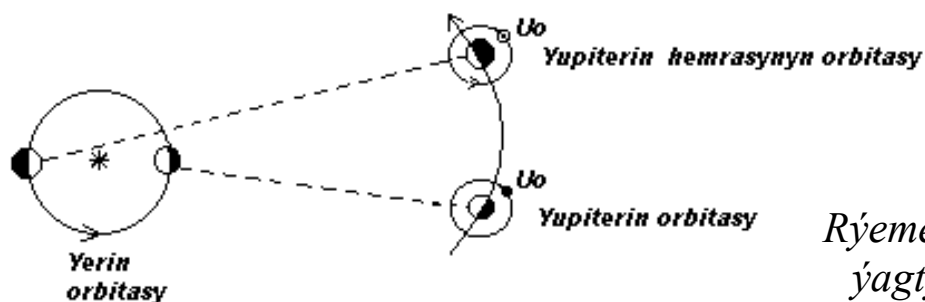


14.1-nji surat. Elektromagnit tolkunlarynyň şkalasy.

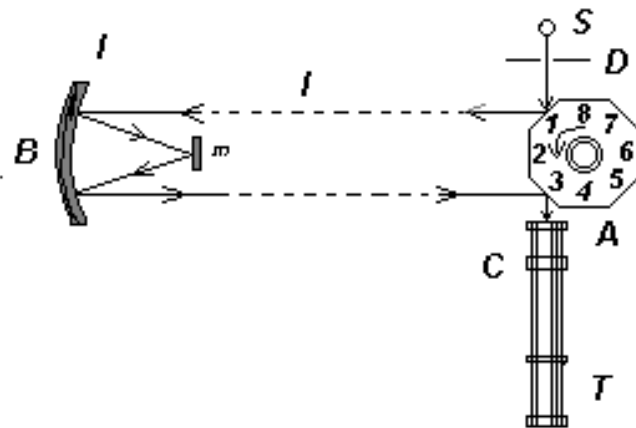
Makswelliň teoriýasyna görä, ýagtylyk - elektromagnit tolkun, gurşawda

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon\mu}} \quad (14.2)$$

tizlik bilen ýaýraýar.



14.2-nji surat.
Rýemeriň tejribesinde
ýagtylygynyň tizliginiň
kesgitlenişi.



14.3-nji surat.
Ýagtylygyň tizliginiň kesgitlenişi.

Elektromagnit tolkunlary – özara perpendikulýar ýaýraýan elektrik we magnit tolkunlarydyr. Olar giňişlikde garmoniki üýtgeýän elektrik we magnit meýdanlary bolup, Makswelliň deňlemeleri bilen aňladylýar:

$$\oint_L \vec{E} d\vec{l} = - \int_S \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} d\vec{S} \quad \oint_S \vec{B} d\vec{S} = 0 \quad (14.3)$$

$$\oint_{\Pi} \vec{H} d\vec{l} = \int_S (\vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}) d\vec{S} \quad \oint_S \vec{D} d\vec{S} = \int_V \rho dV$$

Bu ýerde: \vec{D} – elektrik meýdanynyň täsir güýjüni aňladýan, elektrik süýşme diýip atlandyrylýan ululyk. Onuň ölçeg birligi – Kl/m^2 ;

\vec{B} – magnit induksiýasy, ýagny, magnit meýdanynyň mukdar häsiýetnamasydyr. Onuň ölçeg birligi – $1 \text{ Tesla} = 1 \text{ N/(A} \cdot \text{m)}$;

\vec{E} – elektrik meýdanynyň güýjenmesi;

\vec{H} – magnit meýdanynyň güýjenmesi;

\oint, \int – degişlilikde kontur (daşky çäk) hem-de meýdan

boýunça alynýan integrallar;

\vec{j} – geçirijilik togunuň dykzlygy. Onuň ölçeg birligi A/m^2 ;

ρ – toguň göwrüm dykzlygy. Onuň ölçeg birligi A/m^3 ;

$\frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$ – süýşme togunyň dykzlygy;

Segnetoelektrik bolmadyk we ferromagnit däl maddalarda $\vec{D}, \vec{E}, \vec{B}, \vec{H}, \vec{j}$ ululyklar şeýle baglanyşýarlar:

$$\begin{aligned}
\vec{D} &= \varepsilon_o \varepsilon \vec{E} \\
\vec{B} &= \mu_o \mu \vec{H} \\
\vec{j} &= \gamma \vec{E}
\end{aligned}
\tag{14.4}$$

Bu ýerde: γ - maddanyň udel geçirijiligi;

Durnukly elektrik ($E=const$) we magnit ($H=const$) meýdanlary üçin Makswelliň deňlemeleri şeýle aňladylýar:

$$\begin{aligned}
\oint_L \vec{E} d\vec{l} &= 0 & \oint_S \vec{B} d\vec{S} &= 0 \\
\oint_L \vec{H} d\vec{l} &= I & \oint_S \vec{D} d\vec{S} &= 0
\end{aligned}
\tag{14.5}$$

Wektor derňewlerinde Stoksyň we Gaussyň

$$\begin{aligned}
\oint_L \vec{A} d\vec{l} &= \int_S \text{rot} \vec{A} d\vec{S} \\
\oint_S \vec{A} d\vec{S} &= \int_V \text{div} \vec{A} dV
\end{aligned}
\tag{14.6}$$

teoremlaryna esaslanyp, Makswelliň integral deňlemeler sistemasyny differensial görnüşde aňladyp bolýar:

$$\begin{aligned}
\text{rot} \vec{E} &= -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} & \text{div} \vec{D} &= \rho \\
\text{rot} \vec{H} &= \vec{j} + \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} & \text{div} \vec{B} &= 0
\end{aligned}
\tag{14.7}$$

Elektromagnit teoriýasynda we tolkun optikasynda bu deňlemeler mehanikada Nýutonyň hereket kanunlary ýaly ähmiýete eýelirler.

Bu deňlemelerden elektrik meýdanynyň çeşmesiniň elektrik zaryadlary ýa-da wagta görä üýtgeýän magnit meýdany, magnit meýdanynyň bolsa hereketlenýän elektrik zaryadlary ýa-da üýtgeýän elektrik meýdany tarapyndan döredilýänligi ýüze çykýar. Tebigatda elektrik zaryadlary bardyr, magnit zaryadlary ýokdur.

(14.3) birinjisi elektrik E güýjenmesiniň we magnit meýlanynyň B induksiýasynyň özara baglanyşygyny aňladyp, ol Faradeýiň tejribe

üsti bilen açan elektromagnit induksiýasy hadysasynyň umumylaşdyrmasydyr.

Ikinji deňleme magnit zaryadlarynyň ýokdugyny görkezýär, ýagny elektromagnit meýdanyndaky islendik hyýaly üst boýynça magnit induksiýasynyň akymynyň nola deňdigini aňladýar.

Üçünji deňleme bolsa, geçirijilik we süýşme toklarynyň döredýän magnit meýdanynyň güýjenmesini aňladýar.

Dördünji deňlemede süýşme wektorynyň D akymy bilen bitewi üst bilen çäklenen göwrümdäki erkin zaryadlaryň ρ mukdary baglanyşdyrylýar. Ol Ostrogradskiniň we Gaussyň bütewi üstden geçýän elektrik süýşme akymynyň üstüň içindäki erkin elektrik zaryadlary bilen kesgitlenýändigini baradaky teoremasyny umumylaşdyrýar.

Makswelliň teoriýasynyň esasy netijeleriniň biri - elektromagnit tolkunlarynyň barlygydyr.

§14.2. Geometriki optika

Adamyň gözleriniň kabul edip bilýän ýagtylyk tolkunlarynyň tolkun uzynlyklarynyň örän gysgalygy ($8 \cdot 10^{-7}$ - $4 \cdot 10^{-7}$ m) sebäpli, ony şöhle diýip atlandyrylan käbir çyzyk boýunça ýaýraýar diýip hasap edýärler. Optikanyň bu bölümine geometriki ýa-da şöhle optikasy diýilýär. Ýagtylyk energiýasynyň akymynyň ýagtylyk tolkunlarynyň üstlerine perpendikulýar ugurlara ýagtylyk şöhleleri diýilýär. Optikanyň esasy dört sany kanunlary bar: optiki birmeňzeş gurşawda ýagtylygyň gönüçyzykly ýaýramak kanuny, ýagtylyk şöhleleriniň özara baglanyşykly dældigi baradaky kanun; (bu kanun diňe şöhle optikasynda dogry); ýagtylygyň serpişme kanuny; ýagtylygyň döwürleme kanuny.

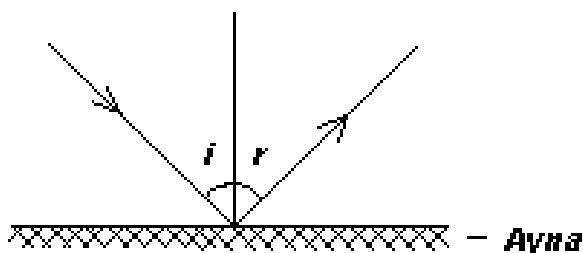
Ýagtylygyň gönüçyzykly ýaýramak kanuny: optiki birmeňzeş gurşawda ýagtylyk gönüçyzykly ýaýraýar. Optiki birmeňzeş gurşaw – bu islendik ugur boýunça, islendik ýerinde ýagtylygyň ýaýramak tizligi deň bolan gurşawdyr. Bu kanunyň subudy – dury däl jisimleriň üstlerine nokatlanç ýagtylyk çeşmesinden ýagtylyk düşürilende, olaryň takyk çäkli kölegeleriniň emele gelmegidir. Nokatlanç ýagtylyk çeşmesi - öz ölçegleri şöhlelendirilýän predmetiň hem-de oňa çenli aralygyň ululyklaryndan örän kiçi bolan çeşmedir. Ýagtylyk dar yşdan geçirilse, ýagtylygyň gönüçyzykly ýaýramak kanuny bozulýar, yşyň takyk şekili emele gelmeýär. Kölege ýarymkölegeden soň ýüze çykýar. Bu ýagdaý

yş näçe dar bolsa, şonça-da täsirli emele gelýär: yşyň ýarymkölegesi ulalýar.

Ýagtylyk şöhleleriniň özara baglansykly dældigi baradaky kanun ýagtylyk şöhleleri özara kesişen ýerlerinde biri-birine täsir ýetirmeýärler diýmekdir. Şöhleleriň kesişmegi olaryň ýaýramagyna hiç hili täsir ýetirmeýärler, ýagny, kesişýän ýagtylyklar öz ugurlaryny hiç hili üýtgewsiz dowam etdirýärler. Kesişip geçen ýagtylyk şöhleleri düşen ýerlerini kesişmedik ýagdaýyndaky ýaly ýagtyldýarlar. Bu kanun intensiwligi uly bolmadyk şöhleler üçin dogrudyr. Intensiwligi örän ýokary bolan ýagtylyk şöhleleri kesişen ýerlerinde krossmodulýasiýa diýilýän hadysany ýüze çykarýar. Kesişip geçen şöhleleriň kesişmeden soň täsirleri üýtgeýärler.

Ýagtylygyň üçünji kanuny – ýagtylygyň serpikme kanuny. Ol kanuna laýyklykda, ýagtylyk ýylmanak üstden serpigýär; serpigen şöhle, düşýän şöhle we ol şöhleleriň düşýän nokadyna inderilen perpendikulýar bir tekizlikde ýatýarlar; serpikme burçy (r) düşme (i) burçuna deňdir:

$$\angle r = \angle i ;$$

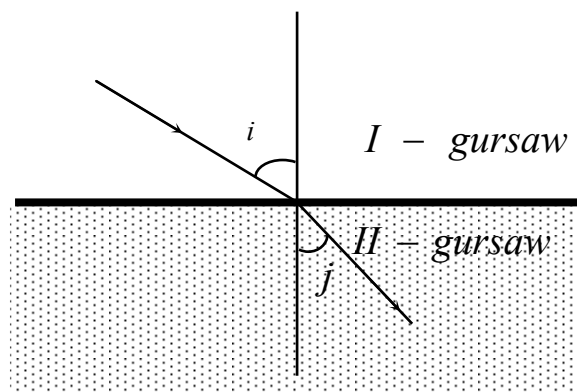


14.4-nji surat. Ýagtylygyň serpikme kanuny.

Dördünji kanun – ýagtylygyň bir gurşawdan başga gurşawa geçende döwürleme kanuny. Oňa laýyklykda, düşýän şöhle, döwürlen şöhle we ol şöhläniň düşýän nokadyna inderilen perpendikulýar bir tekizlikde ýatýarlar; düşme burçunyň sinusynyň döwürleme burçunyň sinusyna bolan gatnaşygy berlen iki gurşaw üçin hemişelikdir:

$$\frac{\sin i}{\sin \gamma} = n_{21} \quad (14.8)$$

Bu ýerde: n_{21} – ikinji gurşawyň birinji gurşawa görä döwürleme görkezijisi. Bu döwürleme görkeziji şol iki gurşawyň absolyut döwürleme görkezijileriniň gatnaşygyna deňdir:



14.5-nji surat. Ýagtylygyň döwülme kanuny.

$$n_{21} = \frac{n_2}{n_1} \quad (14.9)$$

Gurşawyň absolýut döwülme görkezijisi diýip, ýagtylygyň wakuumdaky (howasyz boşlukda) tizliginiň ($c = 300000 \frac{km}{s}$) şol gurşawdaky faza (v) tizligine bolan gatnaşygyna aýdylýar:

$$n = \frac{c}{v} \quad (14.10)$$

Umuman, $v = \sqrt{\varepsilon\mu}$ bolýanlygyny bellemek gerek. Eger gurşawyň absolýut döwülme görkezijisi uly bolsa, onda ol gurşawa optiki dykyz gurşaw diýilýär. Eger ýagtylyk optiki kiçi dykyzlykly gurşawdan optiki dykyz gurşawa geçse, oňnositel n_{21} döwülme görkeziji 1-den uly bolýar:

$$\frac{\sin \iota}{\sin \gamma} = \frac{n_2}{n_1} = n_{21} > 1 \quad (14.11)$$

Eger, tersine, ýagtylyk optiki dykyz gurşawdan optiki dykyzlygy kiçi gurşawa geçse, onda döwülme burçy γ düşme ι burçdan uly bolýar:

$$\angle \gamma > \angle \iota \quad \text{we} \quad \frac{\sin \iota}{\sin \gamma} < 1. \quad (14.12)$$

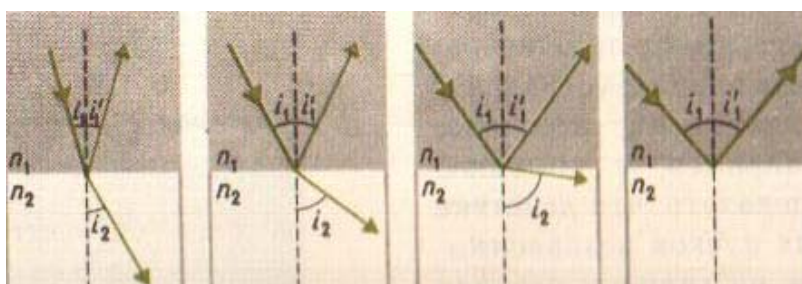
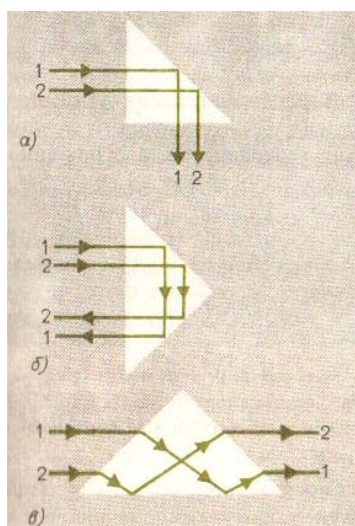
Şonda ι düşme burçunyň käbir $\iota_{aňryçäk}$ bahasynda $\gamma = \frac{\pi}{2}$ baha golaýlaýar. Bu ýagdaýda ýagtylyk ikinji gurşawa geçmeýär. Döwülen şöhle iki

gurşawyň çäginde ýaýraýar. Bu hadysa ýagtylygyň doly yzyna serpikmesi diýilýär. Bu şertde:

$$\sin \iota = \sin \iota_a = \frac{n_2}{n_1} = n_{21} \quad (14.13)$$

bolýar. Bu hadysa doly serpikdiriji aýna prizmalarynda (ýagtylygyň ýaýraýan ýoluny üýtgetmek maksady üçin) ulanylýar. Ýagtylyk aýnadan howa geçende, uly burç döwürlýär. Aýnanyň döwürme görkezijisi $n_{aýna}=1,5$, howanyňky bolsa $n_{howa}=1,0$. Şonuň üçin $\arcsin \frac{1}{1,5} = 42^\circ$ burç bilen aýnadan çykmaly şöhle doly yzyna serpikmä sezewar bolýar.

Bu hadysa refraktometrlerde (döwürme görkezijilerini kesgitleýjilerde), binokllarda (dürbülerde), periskoplarda (bukyda, suwuň aşagynda we ş.m. ýokaryny görmek üçin ulanylýan ýörite enjamlarda), swetowodlarda (ýagtylygy geçiriji maýşygak aýna taýajyklaryndan ybarat toplumly ýagtylyk geçirijilerde) ulanylýar.



14.6-njy (b) surat. Ýagtylygyň doly serpikmesi.

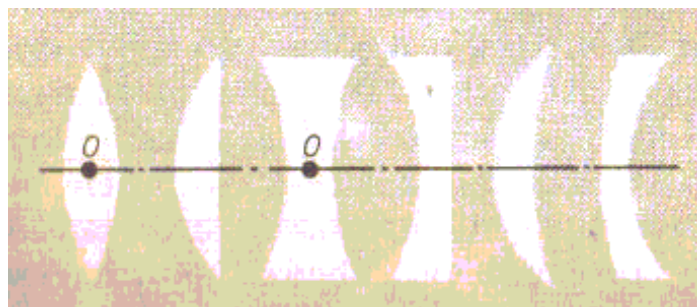
14.6-njy (a) surat. Ýagtylygyň üçgranly prizmada döwürmegi.

§14.3. Ýuka linzalar. Mikroskop

Iki tarapy ýylma üstler bilen çäklenen dury jisime linza diýilýär. Adatça olaryň bir üstleri sferik (şaryň bölegi) ýa-da silindrik, beýlekisi bolsa sferik ýa-da tekiz bolýarlar. Linzalar ýylma üstlerine düşen ýagtylyk şöhlelerini döwürp şekil emele getirmäge ukyplydyrlar. Adatça, olar aýnadan, kwarsdan, kristallardan, plastmassalardan we ş.m. dury

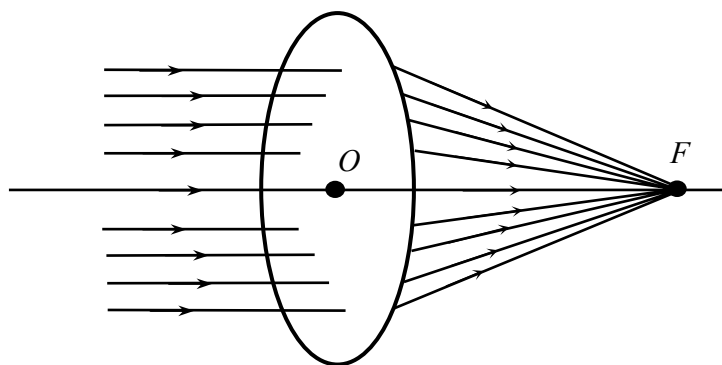
(ýagtylygy geçirýän) maddalardan ýasalýar. Daşky görnüşleri boýunça linzalar şu toparlara bölünýärler:

- 1) iki taraplary güberçek;
- 2) bir tarapy güberçek, beýlekisi tekiz;
- 3) iki tarapy oyuk;
- 4) bir tarapy oyuk, beýlekisi tekiz;
- 5) bir tarapy güberçek, beýlekisi oyuk;
- 6) bir tarapy oyuk, beýlekisi güberçek;



14.7-nji surat. Linzalaryň görnüşleri.

Linzanyň galyňlygy onuň üst radiuslaryndan örän kiçi bolsa, oňa ýuka linza diýilýär. Islendik linzanyň optiki merkezi bolýar. Linzanyň üstleriniň egrilik merkezlerinden geçýän gönüçyzyga linzanyň baş optiki oky diýilýär. Baş optiki okuň üstünde ýatýan optiki merkezden geçýän ýagtylyk şöhleleri linzadan döwürlmän geçýärler.



14.8-nji surat. Güberçek linzada parallel şöhleleriň döwürlişi.

Iki tarapy güberçek linzalar ýygnaýjy linzalary bolýar. Onuň üstüne düşýän parallel ýagtylyk şöhleleri linzadan geçip, bir F nokatda jemlenip geçýärler. Ol F nokada linzanyň fokusy diýilýär. Linzanyň merkezinden F nokadyna çenli aralyga linzanyň fokus aralygy diýilýär. Linzanyň F fokus aralygynyň onuň geometriki ölçeglerine we döwürleme görkezijisine baglylygyna ýuka linzanyň formulasy diýilýär:

$$\frac{1}{F} = (n-1) \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \quad (14.14)$$

Bu ýerde:

$$n = \frac{n_1}{n_2},$$

n_1 - gursawyň absolýut döwülme görkezijisi; n_2 –linzanyň absolýut döwülme görkezijisi;

R_1 we R_2 – linzanyň üstleriniň egrilik radiuslary;

F – linzanyň fokus aralygy .

Iki tarapy oýuk linzanyň üstüne düşýän parallel söhleler linzadan geçende, dargayarlar. Ol söhleleriň hyýaly dowamlary linzanyň söhle gelyän tarapynda bir nokatda ýygnaýarlar. Bu linzanyň OF fokus aralygy hyýaly bolup, ol otrisatel baha eýedir. Ýagny, bu görnüşli linzalaryň egrilik radiuslary minus alamatlary bilen alynýarlar. Eger linzanyň bir tarapy tekiz bolsa, onda linzanyň optiki güýjüniň ýokarda görkezilen aňlatmasynda degişli radius tükeniksiz deň hasap edilýär. Eger linzanyň bir tarapy oýuk, beýleki tarapy güberçek bolsa, oýuk tarapyň egrilik radiusy minus alamaty bilen alynýar. Galyňlygy egrilik radiuslaryndan köp kiçi bolan linzalara ýuka linzalar diýilýär. Ýokarda belleýşimiz ýaly, linzalaryň optiki merkezinden geçýän ýagtylyk söhleleri döwürlän geçýärler. Linzanyň egrilik merkezinden geçýän gönüçyzyga linzanyň baş optiki oky diýilýär. Linzanyň merkezinden baş optiki oka perpendikulýar geçýän tekizlige linzanyň baş tekizligi diýilýär.

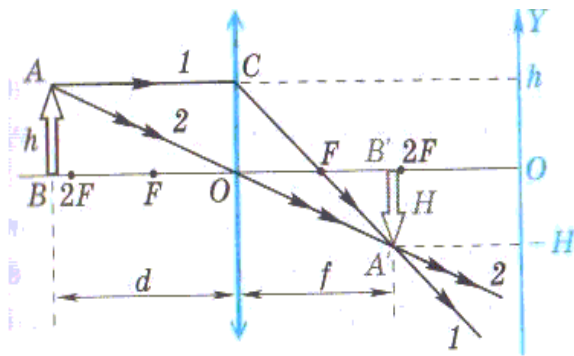
$$D = \frac{1}{F} \quad (14.15)$$

ululyga linzanyň optiki güýji diýilýär. Onuň ölçeg birligi – d gioptriya. 1 dioptriya – fokus aralygy 1 metr bolan linzanyň optiki güýjüdür.

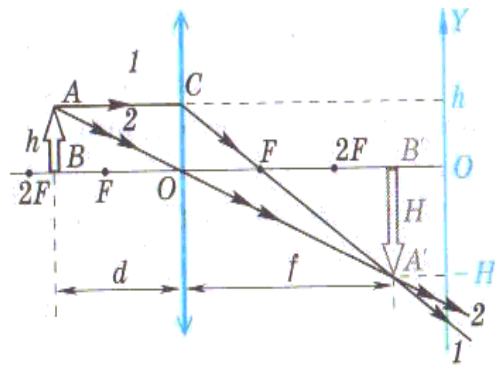
Iki tarapy güberçek (ýygnaýjy) linzanyň optiki güýji položitel, oýuk (dargadyjy) linzanyň optiki güýji otrisateldir.

$$D = \frac{1}{F} = -(n-1) \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \quad (14.16)$$

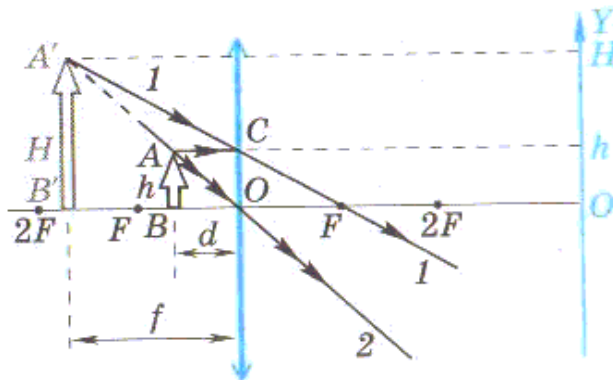
Linzalarda predmetiň (jisimiň) şekili şeýle gurulýar:



a.



b.



ç.

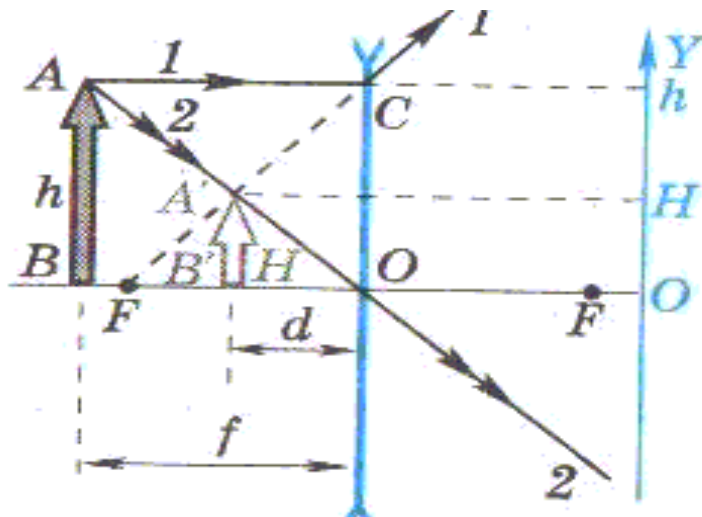
14.9-njy surat.
Linzalarda şekiliň gurulyşy.

AB predmetiň ýygnaýjy linzada $A'B'$ şekiliniň gurluşy:

$d > 2F$ – şekil hakyky, kiçijik, ters;

$F < d < 2F$ – şekil hakyky, ulalan, ters;

$d < F$ – şekil hakyky, ulalan, göni;



14.10-njy surat.
Oýuk linzada şekiliň
gurulyşy.

Oýuk linzada dik predmetiň şekiliniň gurluşy.

Suratlarda: d – predmetden linza çenli aralyk;

F – fokus aralygy;

h – predmetiň beýikligi;

H – şekiliň beýikligi.

Ýuka linzada d , f , F ululyklary baglanyşdyrýan aňlatma linzanyň formulasy diýilýär.

Suratlardaky a we b ýagdaýlar üçin bu baglanyşyk:

$$\frac{1}{F} = \frac{1}{d} + \frac{1}{f} \quad (14.17)$$

ç ýagdaý ($d < F$) üçin

$$\frac{1}{F} = \frac{1}{d} - \frac{1}{f} \quad (14.18)$$

boljakdygyny geometrik subut etmek kyn däl. Şekiliň H ölçeginiň predmetiň h ölçegine gatnaşygyna linzanyň ulaldyşy diýilýär:

$$\gamma = \frac{H}{h} \quad (14.19)$$

Suratlardan görnüşi ýaly, $\triangle AOB \sim \triangle A'O'B'$, onda:

$$\gamma = \frac{H}{h} = \frac{f}{d} \quad \text{we} \quad \gamma = \frac{H}{h} = \frac{f - F}{F} \quad (14.20)$$

ç) ýagdaýda bolsa :

$$\gamma = \frac{H}{h} = \frac{f + F}{F} \quad (14.21)$$

bolýandygy linzanyň formulalaryny onuň ulaldyşy bilen baglanyşdyrýar. Oýuk linza üçin 14.10-njy suratdan

$$-\frac{1}{|F|} = \frac{1}{d} - \frac{1}{|f|} \quad (14.22)$$

gelip çykýar. Hakyky fokus aralygy položitel: $F = |F|$ hyýaly – otrisatel: $F = -|F|$. Linzadan hakyky şekile çenli aralyk položitel hasaplanýar: $f = |f|$

§14.4. Esasy fotometriki ululyklar

Fotometriki ýagtylyk ululyklary elektromagnit tolkunlarynyň 380 nm-den 760 nm-e ($3,8 \cdot 10^{-7}$ - $7,6 \cdot 10^{-7}$ m) çenli tolkun uzynlyklary aralygyndaky energiýany adamyň gözüniň kabuledijiligi boýunça kesgitleýärler. Olar fiziki - fiziologiki ululyklardyr. Adamyň gözüniň görüjiligi $V(\lambda)$ otnositel spektral ululyk bolup, onuň iň netijeli täsirli bahasy $\lambda = 555$ nm-e gabat gelýär. bu tolkun uzynlygynda $V(\lambda) = V(555) = 1$ kabul edilendir.

Görüş duýgulary boýunça bahalandyrylýan energiýa akymyna ýagtylyk akymy c diýilýär. Energetiki şöhlelenmäniň 1 watta deň bahasynyň ýaşyl (555 nm) tolkuna degişli akymy 683 lýmene hasaplanýar. 1 watt gök ýagtylygyň (480 nm) görünijiligi $V(\lambda)=V(480)=0,14$ bolup, akymy $\Phi_v=683 \cdot 0,14=95,62$ lýmene barabar bolýar.

Umuman:

$$\Phi_v = 683 \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} V(\lambda) \cdot r \cdot (\lambda T_1) d\lambda \quad (14.23)$$

Plankyň kanunyna laýyklykda :

$$r(\lambda T_1) = \frac{2c^2 \pi h}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1} \quad (14.24)$$

$$V(\lambda) = e^{-72 \left(\frac{\lambda}{\lambda_m} - 1 \right)^2} \quad (14.25)$$

Bu ýerde: $\lambda_m=555$ nm (Bu tolkun uzynlykda V iň uly bolup, $V=1$ baha eýe bolýar)

Onda, görünýän ýagtylykda absolýut gara jisimiň döredýän ýagtylanyşy

$$M_v = 683 \int_{480nm}^{760nm} \frac{2c^2 \pi 4}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1} \cdot e^{-72 \left(\frac{\lambda}{\lambda_m} - 1 \right)^2} d\lambda \quad (14.26)$$

bolar.

Adamyň derisiniň iň ýokary duýgurlygy $\lambda=296,7$ nm-e gabat gelýär. Ultramelewşe tolkunlaryň bakterisid täsiriniň maksimal netijeliligi 254 nm-e gabat gelýär.

$$E_v = \frac{d\Phi_v}{ds} \quad - \text{ýagtylanyş, ölçeg birligi: lýuks (1 lýuks=1 lýmene/m}^2\text{)}$$

$$L_v = \frac{I_v}{\Delta S \cos i} = \frac{d\Phi_v}{\Delta S d\omega \cos i} \quad - \text{ýagty derejesi,}$$

ölçeg birligi: nit (1 nit=1kd/m²)

Ýagtylyk güýji kandelalarda aňladylyar. Kandela inlisçeden terjime edilende “şem” (sweça) sözünü aňladýar.

Esasy fotometriki ululyklar we olaryň birlikleri ýagtylygyň we onuň çeşmeleriniň intensiwligini ölçemek meselelerini öwrenýän optikanyň bölümüne fotometriýa diýilýär. Fotometriýada şeýle ululyklar ulanylýar:

1. energetiki – optiki şöhlelenmeleriniň energetiki ululyklaryny we olaryň şöhlelenmeleriniň kabuledijilere edýän täsirini häsiýetlendirýär.
2. ýagtylyk – gözüň ortaça duýujylygyndan ugur alyp, ýagtylygyň fiziologiki täsirini we göze täsir edişiniň bahalandyrylyşyny häsiýetlendirýär.

I. Energetiki ululyklar

Φ_e şöhlelenme akymy – W şöhlelenme energiýasynyň b_v şöhlelenmäniň bolup geçen wagtyna bolan gatnaşygy bilen kesgitlenýän ululykdyr.

$$\Phi_e = W/t \quad (14.27)$$

Şöhlelenme akymynyň birligi – watt (Wt).

Energetiki ýagtylanyş (şöhlelenmek) R_e – tekizligiň goýberýän Φ_e şöhlelenme akymynyň şu akymyň kesip geçýän S kesigiň meýdanyna bolan gatnaşygyna deň bolan ululykdyr.

$$R_e = \Phi_e/S \quad (14.28)$$

ýagny, bu şöhlelenme akymyň üst dykzlygydyr. Energetiki ýagtylanyşyň birligi – kwadrat metrde watt (Wt/m²)

Ýagtylygyň energetiki güýji (şöhlelenme güýji) I_e – ýagtylygyň nokatlanç çeşmesi baradaky düşünje arkaly kesgitlenýär.

Ýagtylygyň energetiki güýji I_e çeşmäniň Φ_e şöhlelenme akymynyň bu şöhlelenmäniň ýaýraýan çägindäki ω göwrüm burçuna bolan gatnaşygyna deň bolan ululykdyr.

$$I_e = \Phi_e/\omega \quad (14.29)$$

Ýagtylygyň energetiki güýjüniň birligi – steradianda watt (Wt/sr)

Energetiki nurlulyk (şöhleleniş) B_e – Şöhlelenýän üstüň elementiniň ΔI_e energetiki ýagtylyk güýjüniň bu elementiň ΔS meýdanynyň proyeksiýasynyň gözegçilik edilýän ugra perpendikulýar tekizlige bolan gatnaşygyna deň bolan ululykdyr.

$$B_e = \Delta I_e / \Delta S \quad (14.30)$$

Energetiki nurlulygyň birligi kwadrat metr-steradianda watt ($\text{Wt}/(\text{sr} \cdot \text{m}^2)$)

Energetiki ýagtylandyryş (şöhlelendiriş) E_e – ýagtylandyrylýan üst birligine düşýän şöhlelenme akymynyň ululygyny häsiýetlendirýär. Energetiki ýagtylandyryşyň birligi energetiki ýagtylygyň birligi bilen gabat gelýär (Wt/m^2).

II. Ýagtylyk ululyklary

Optiki ölçeglerde (ölçemelerinde) dürli şöhleleri kabuledijiler ulanylýar (mysal üçin, göz, fotoelementler, fotoköpeldijiler (fotoumnožiteller)). Olar dürli tolkun uzynlykly energiýalar üçin dürli duýujylyga eýedirlir.

Her bir şöhle kabulediji özüniň dürli tolkun uzynlykly ýagtylyga duýgurlyk egrisi bilen häsiýetlendirilýär. Şonuň üçin ýagtylyk ölçegleri energetiki, obýektiwlikden tapawutlylykda subýektiw häsiýetdedir, olar üçin diňe görüňýän ýagtylykda ulanylýan ýagtylyk birlikleri girizilýär.

Halkara birlikler ulgamynda (HU) esasy ýagtylyk birligi hökmünde, ýokarda kesgitlemesi berlen kandela (Kd) ulanylýar.

Ýagtylyk birlikleriniň kesgitlemeleri-de, energetiki birlikleriniň kesgitlemelerine meňzeş.

Ýagtylyk akymy Φ – ýagtylyk duýujylygyny ýüze çykarýan optiki şöhlelenmäniň kuwwaty (berlen spektral duýujylygynda onuň ýagtylygy saýlap kabuledijä edýän täsiri) ýaly kesgitlenýär.

Ýagtylyk akymynyň birligi – lýumen (lm), içki göwrüm burçy 1 sr , ýagtylyk güýji 1 Kd bolan nokatlanç ýagtylyk çeşmesiniň goýberýän ýagtylyk akymy (içki göwrüm burçunda şöhlelenme meýdany birdeň bolanda) $1 \text{ lm} = 1 \text{ Kd} \cdot \text{sr}$

Nurlanyş R şeýle gatnaşyk bilen kesgitlenýär:

$$R = \Phi / S \quad (14.31)$$

Nurlanyş birligi – kwadrat metrde lýumen (lm/m^2)

Ýagtylyk – bu birnäçe ugurlarda ýagtylanýan üstüň ululygy, şu ugurlardaky I ýagtylyk güýjüniň, berlen ugra perpendikulýar bolan tekizligiň, ýagtylanýan üstüniň S meýdanynyň proyeksiýasyna bolan gatnaşygyna deňdir.

$$B\varphi = I / (S \cdot \cos\varphi) \quad (14.32)$$

Ýagtylyk birligi – kwadrat metrde kandela (Kd/m^2)

Ýagtylandyryş E – üste düşýän Φ ýagtylyk akymynyň bu üstüň S meýdanyna bolan gatnaşygy bilen kesgitlenýän ululykdyr.

$$E = \Phi / S \quad (14.33)$$

Ýagtylandyryşyň birligi – lýuks (lk). 1 lk 1 m^2 üste 1 lm ýagtylyk akymy düşenindäki üstüň ýagtylandyrylyşydyr (1 lk = 1 lm/m^2).

§14.5. Ýagtylygyň interferensiýasy

Ýagtylyk tolkunlarynyň interferensiýasy

Periodlary bir-birine deň bolan, giňişlikde ýaýraýan iki we birnäçe tolkunlaryň goşulmagy netijesinde netijeleşiji yrgyldynyň güýçlenmegine ýa-da peselmegine tolkunlaryň interferensiýasy diýilýär. Ol goşulyşýan yrgyldylaryň faza gatnaşygyna baglydyr.

Tolkunlaryň interferensiýasynyň ýüze çykmagynyň möhüm şerti olaryň kogerentligidir, ýagny olaryň ýygýlyklarynyň deň, fazalarynyň tapawudynyň wagta görä hemişelik bolmagydyr. Bu şerti diňe monohromatik ýagtylyk tolkunlary ýerine ýetirýärler. Şu şert ýerine ýetirilende, interferensiýa hadysasy diňe bir ýagtylyk tolkunlarynda däl, ses tolkunlarynda-da, radiotolkunlarynda-da ýüze çykýar.

Ýagtylyk tolkunlary üçin-de, şeýle hem islendik beýlekiler üçin-de, superpozisiýa prinsipi ýerine ýetýär. Belli bolşy ýaly, ýagtylygyň elektromagnit tebigaty bar, onuň üçin bu prinsipi ulanmaklyk, bir nokat arkaly geçýän iki ýagtylyk tolkunynyň elektrik (magnit) meýdanynyň netijeleşiji güýjenmesiniň hersi aýry-aýrylykda alnan elektrik (magnit) meýdanlarynyň güýjenmeleriniň wektor jemine deňdigini aňladýar.

Hususy halda, haçan-da meýdanlaryň emele getirýän güýjenmeleri ululyklary boýunça deň, ugurlary boýunça garşylykly bolanynda netijeleşiji güýjenme nola deň, ýagtylyk ýagtylygy öçürýär we tersine, eger-de goşulyşýan tolkunlaryň elektrik meýdanlarynyň güýjenmeleriniň wektorlarynyň ugry bir tarapa ugrugan bolsa, ýagtylygyň intensiwligi artýar (ýagtylyk ýagtylygy güýçlendirýär).

Netijeleşiji yrgyldynyň amplitudasy seredilýän yrgyldylaryň amplitudalaryny geometrik goşmak arkaly kesgitlenýär:

$$A^2 = A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2 \cos(\varphi_2 - \varphi_1) \quad (14.34)$$

(14.34) deňlemäni seljerip, şeýle netije çykarýarys:

1. eger $\varphi_2 - \varphi_1 = 0; 2\pi; 4\pi; \dots 2k\pi$ bolsa, (bu ýerde: $k=0, 1, 2, 3, \dots$) onda $\cos(\varphi_2 - \varphi_1) = 1$ we $A = A_1 + A_2$. (14.35)

2. eger $\varphi_2 - \varphi_1 = \pi; 3\pi; 5\pi; \dots (2k+1)\pi$, (bu ýerde: $k=0, 1, 2, 3, \dots$) onda $\cos(\varphi_2 - \varphi_1) = -1$ we $A = A_1 - A_2$. (14.36)

Birinji ýagdaýda netijeleşýji yrgyldy artýar (güýçlenýär), ikinjide peselýär. Eger $A_1 = A_2$ bolsa, onda $A_{\max} = 2A$ we $A_{\min} = 0$. Ahyrky ýagdaýda ýagtylygy ýagtylygyň doly öçürmesi bolýar.

Adatça, bu şert fazalaryň tapawutlary arkaly däl-de, tolkunlaryň geçýän ýolunyň δ tapawudy bilen kesgitlenýär. Belli bolşy ýaly, $\varphi = \pi$ faza ýarym tolkun uzynlygyna $\frac{\lambda}{2}$ tolkuna deň. Onda maksimumlar şertini şeýle formulirlmek bolar.

Goşulyşýan yrgyldylaryň ýollarynyň tapawudy ýarym tolkun uzynlygynyň jübüt sanyna ýa-da tolkun uzynlygynyň bitin sanyna deň bolanynda netijeleşýji yrgyldynyň maksimal güýçlenmesi bolýar, ýagny

$$\delta = 2k \frac{\lambda}{2} = k\lambda \quad (14.37)$$

Şular ýaly-da minimumlar şerti formulirlenýär: goşulyşýan yrgyldylaryň ýollarynyň tapawudy ýarym tolkun uzynlygynyň täk sanyna deň bolanynda netijeleşýji yrgyldynyň peselmesi bolýar, ýagny

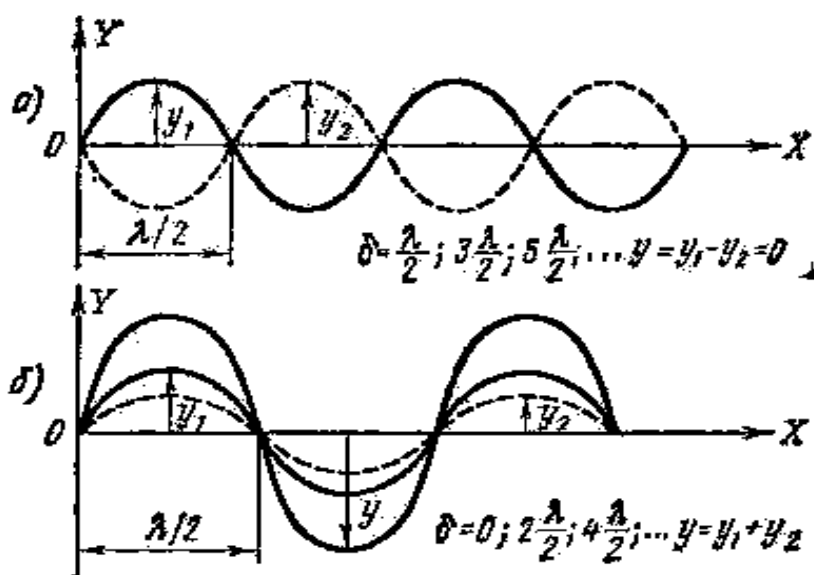
$$\delta = (2k + 1) \frac{\lambda}{2} \quad (14.38)$$

bu ýerde: $k=0, 1, 2, 3, \dots$ interferensiýa maksimumynyň ýa-da minimumynyň tertibi diýilýär.

14.11 - nji suratda deň amplitudaly tolkunlaryň interferensiýasy şekillendirilen.

Eger ýollaryň tapawudy ýarym tolkun uzynlygynyň täk sanyna deň bolsa, ýagtylygyň öwrülmesi bolýar (ýagtylyk ýagtylygy yok edýär) (14.11-nji a surat), şunda y_1 we y_2 süýşmesiniň alamatlary dürli, netijeleşýji süýşme $y=0$. Eger tolkunlaryň ýollarynyň tapawudy ýarym tolkun uzynlygynyň jübüt sanyna deň bolsa, ýagtylygyň güýçlenmesi

bolýar (14.11-nji b surat). y_1 , y_2 -niň süýşmesiniň birmeňzeş alamatlary bar we $y=y_1+y_2$.



14.11-nji surat. Deň amplitudaly tolkunlaryň interferensiýasy.

Interferensiýanyň ulanylyşy

Işleýşi interferensiýa hadysasyna esaslanan interferometrler dürli maksatlar üçin giňden ulanylýar. Mysal üçin, ýagtylyk tolkunlarynyň uzynlyklaryny takyk ölçemek, gazlaryň we başga maddalaryň döwürleme görkezijilerini kesgitlemek, iki şöhleli interferometriň we mikroskopyň birikdirilmesinden emele gelen interferension mikroskopy biologiyada gury maddanyň konsentrasiýasynyň döwürleme görkezijisini we dury mikroobyektleriň galyňlygyny ölçemek üçin giňden ulanylýar.

Interferensiýanyň kömegi bilen önümiň üstüniň bejerilişiniň hiline 10^{-6} sm-e çenli takyklyk bilen baha bermek bolýar we ş.m.

§14.6. Ýagtylygyň difraksiýasy

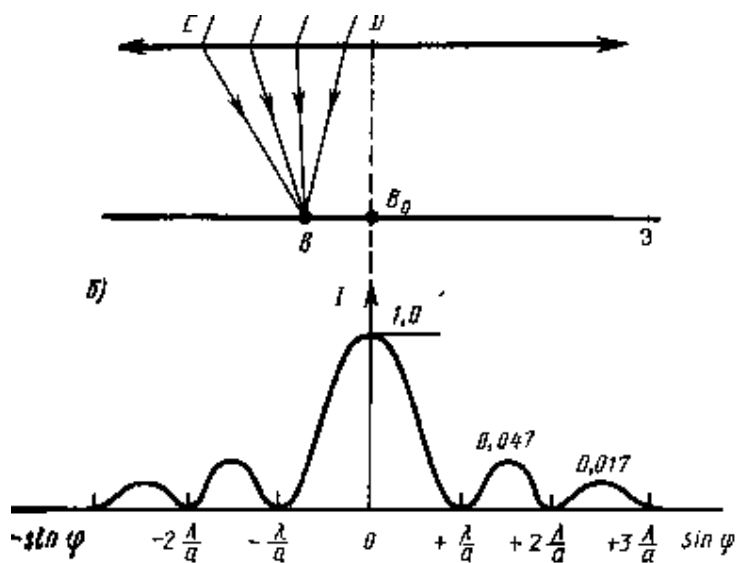
Ýagtylyk tolkunlarynyň gönüçyzykly ýaýramagyndan gyşaryp, päsgelçilikleriň daşyndan öwrülip geçmegine ýagtylygyň difraksiýasy diýilýär. Ýagtylygyň difraksiýasy onuň tolkun uzynlygyndan kiçi (ýa-da deňräk) yşlardan ýa-da dury däl ekranyň gyrasyndan geçende anyk ýüze çykýar. Tejribelerde ýagtylyk tolkunynyň difraksiýasyny yşlaryň ýa-da päsgelçilikleriň öçlegleri tolkun uzynlygy bilen bir tertipde bolsa (10 esseden köp tapawut etmese), ýa-da difraksiýa syn edilýän nokat yşdan ýa-da päsgelçilikden uly aralykda ýerleşen bolsa görmek bolýar.

1. Eger ýagtylygyň difraksiýasy ekranda käbir gutarnykly aralykda ýerleşen päsgelçiliklerden ýa-da yşdan ýüze çykýan bolsa, onda oňa Freneliň difraksiýasy diýilýär. Bu difraksiýa sferik ýagtylyk tolkunlarynyň difraksiýasydyr. Freneliň difraksiýasynda ekranda päsgelçiligiň (ýa-da yşyň) difraksion şekili emele gelýär. Freneliň difraksiýasynda difraksiýanyň şekilini Freneliň zonalary usulyny ulanyp anyklamak bolýar.

2. Tekiz ýagtylyk tolkunlarynyň, ýagny, parallel ýagtylyk şöhleleriniň difraksiýasyna Fraungoferiň difraksiýasy diýilýär. Nemes fizigi Ýozef Fraungofer 1821-1826-njy ýyllar aralygynda tekiz ýagtylyk tolkunlarynyň, ýa-da kä-te aýdylyşy ýaly, parallel şöhleleriň difraksiýasyny öwrenen alym. Ol spektrleri barlamak üçin difraksion gözenegi ilkinji ulalanlaryň biri hasaplanylýar.

Fraungoferiň difraksiýasynyň uly amaly ähmiýeti bolup, ol haçan-da ýagtylyk şöhlesi we päsgelçilik nokady difraksiýany emele getirýän päsgelçilikden tükeniksiz uzak aralykda ýerleşende ýüze çykýar. Şeýle görnüşli difraksiýany döretmek üçin ýygnaýjy linzanyň fokusynda ýagtylyk çeşmesini ýerleşdirip, difraksiýanyň şekiline päsgelçiligiň aňrasynda ýerleşen ikinji ýygnaýjy linzanyň fokal tekizliginde gözegçilik etmek ýeterlikdir.

Tükeniksiz uzyn yşly Fraungoferiň difraksiýasyna seredeliň (praktiki şeýle ýagdaý üçin yşyň uzynlygy ininden has ulurak bolmagy ýeterlikdir). Goý, monohromatik ýagtylyk tolkuny ini a bolan darajyk yşyň tekizligine düşsün (14.12-nji surat).



14.12-nji surat. Fraungoferiň difraksiýasynyň emele gelişi.

Yşdan φ erkin ugurlara gidýän çetki MC we ND şöhleleriň arasyndaky optiki ýoluň tapawudy:

$$\Delta = NF = a \sin \varphi \quad (14.39)$$

bu ýerde $F - ND$ şöhlä M nokatdan geçirilen perpendikulýaryň esasy.

Yşyň MN tekizligindäki tolkun üstüniň açyk bölegini M yşyň gapyrgalaryna parallel bolan zolak görnüşinde Freneliň zonalaryna dargadalyň. Her bir zonanyň ini bu zonalaryň çetindäki ýoluň tapawudy $\lambda/2$ deň bolar ýaly edilip alynýar, ýagny yşyň ähli ininde $\Delta: \lambda/2$ zona ýerleşmeli. Görnüşi ýaly, yşa ýagtylyk kadaly düşýär, yşyň tekizligi tolkunyň öň üsti bilen gabat gelýär. Şeýlelikde yşyň tekizligindäki tolkunyň öň üstleriniň ähli nokatlary birmeňzeş fazada yrgyldaýarlar. Saýlanyp alnan Freneliň zonalarynyň meýdanlarynyň deň we gözegçilik edilýän ugra ýapgytlyklarynyň birmeňzeş bolandygy sebäpli yşyň tekizligindäki ikilenji tolkunlaryň amplitudalary deň.

(14.39) aňlatmadan görnüşi ýaly, yşyň ininde ýerleşýän Freneliň zonalarynyň sany φ burça baglydyr. Öz gezeginde Freneliň zonalarynyň sany-da bir-biriniň üstüne düşýän ähli ikilenji tolkunlaryň netijesine bagly.

Ýagtylygyň interferensiýasy netijesinde her bir jübüt goňşy zonalaryň yrgyldylary özara biri-birilerini ýok edýändikleri sebäpli Freneliň her bir jübüt goňşy zonasynyň netijeleýji yrgyldysynyň amplitudasy nola deňdir.

Şeýlelikde, eger Freneliň zonalarynyň sany jübüt bolsa:

$$a \sin \varphi = \pm 2m \frac{\lambda}{2} (m = 1, 2, 3 \dots) \quad (14.40)$$

B nokatda difraksiýa minimumy döreyär (doly garaňky), eger-de Freneliň zonalarynyň sany tak bolsa:

$$a \sin \varphi = \pm (2m + 1) \frac{\lambda}{2} (m = 1, 2, 3 \dots) \quad (14.41)$$

bir sany kompensirlenmedik (ýok edilmedik) Freneliň zonasy arkaly difraksiýa maksimumy ýüze çykýar. Göni ugurda ($\varphi = 0$) yş Freneliň bir zonasy ýaly täsir edýär we bu ugurda ýagtylyk uly intensiwlikde ýaýraýar, ýagny B_0 nokatda merkezi difraksiýa maksimumy bolýar.

(14.39) we (14.40) aňlatmalaryň şertlerinden amplitudanyň (şeylede intensiwligiň nola deň) ($\sin\varphi_{\min}=\pm m\lambda/a$) ýa-da maksimal baha ($\sin\varphi_{\max}=\pm(2m+1)\lambda/2a$) eýe bolan nokatlaryň ugurlaryny tapmak bolar.

Difraksiýa netijesinde ekranda ýagtylygyň intensiwliginiň bölünişi (difraksiýa spektri) 14.12-nji b suratda görkezilendir.

Merkezi we indiki maksimumlarda intensiwligiň şeýle gatnaşykdaýygyny hasaplamalar görkezýär:

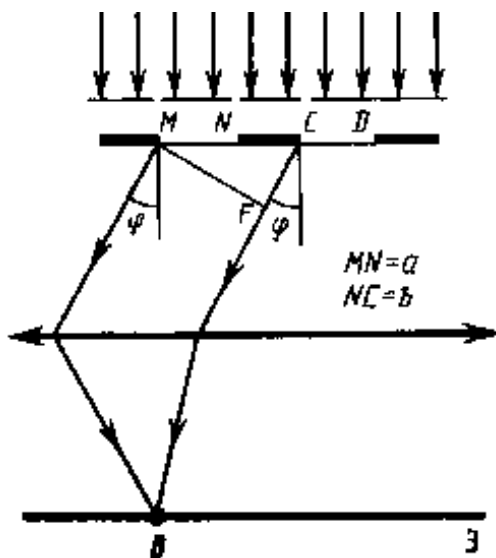
1:0,047:0,017:0,0083..., ýagny, ýagtylyk energiýasynyň esasy bölegi merkezi maksimumda jemlelendir. Yşyň daralmagynyň merkezi maksimumyň köremegine (aýdyňlaşmazlygyna), onuň ýagtylygynyň azalmagyna (bu beýleki maksimumlara-da degişli) getirýändigini tejribeler we geçirilen degişli hasaplamalar görkezýär. Tersine, yş näçe giň ($a>\lambda$) bolsa, şekil şonça-da ýagty. Difraksiýa zolagy insiz we olaryň sany köp bolýar. Haçan $a\gg\lambda$ bolanda merkezi ýagtylyk çeşmesiniň aýdyň şekili alynýar, ýagny, ýagtylygyň gönüçyzykly ýaýramasy bolýar.

Difraksiýa maksimumlarynyň ýagdaýy tolkun uzynlygyna – λ bagly, şonuň üçin difraksiýanyň seredilen görnüşleri diňe monohromik ýagtylygya degişlidir.

Yş ak ýagtylyk bilen ýagtylandyrylanda merkezi maksimum ak zolak görnüşinde bolýar, ol ähli tolkun uzynlyklary üçin umumydyr. ($\varphi=0$ ýagdaýda ähli λ üçin ýoluň tapawudy nola deň). Gapdalkdaky maksimumlar älemgoşar reňkinde reňklenen, sebäbi maksimumlar şerti islendik derejeli maksimumlar, dürli λ üçin dürli-dürli. Şeýlelikde, merkezi maksimumyň sagynda we çepinde birinji derejeli ($m=1$), ikinji ($m=2$) we beýleki derejeli maksimumlar emele gelýärler. Olaryň ählisiniň yaşyl gyrasy merkezi maksimum tarapynda ýerleşendir.

Difraksiýa gözenegindäki Fraungoferiň difraksiýasy

Ýönekeylik üçin goňşy MN we CD yşlary bolan difraksiýa gözenegine seredeliň.



14.13-nji surat.
Difraksiýa gözeneginde
Fraungoferiň difraksiýasy.

Eger her bir dury yşyň giňligi a , yşlaryň aralygyndaky dury däl aralyklaryň ini b bolsa, onda $d=a+b$ ululyga difraksion gözenegiň hemişeligi (periody) diýilýär.

Goý, tekiz monohromatik ýagtylyk tolkuny gözenegiň tekizligine kadaly düşsün. Yşlar bir-birlerinden deň aralykda ýerleşýärler, goňşy iki yşdan gidýän şöhleleriniň ýollarynyň tapawudy şu ugurda ähli difraksion gözeneginiň çäginde birmeňzeş:

$$\Delta = CF = (a+b)\sin\varphi = d\sin\varphi \quad (14.42)$$

Görnüşi ýaly, yşdan ýagtylygyň ýaýramaýan ugurlaryna ol iki yş bolanynda-da ýaýramaýar, ýagny öňki (baş) intensiwligiň minimumlary (14.40) aňlatmanyň şerti bilen kesgitlenýän ugurlarda ýüze çykýar.

$$a \sin\varphi = \pm m\lambda (m=1, 2, 3, \dots) \quad (14.43)$$

Ondan başga-da, iki yşyň goýberýän ýagtylyk şöhleleri özara interferensiýa netijesinde birnäçe ugurlarda biri-birleriniň intensiwliklerini has-da kiçeldýärler, ýagny goşmaça minimumlary döredýärler. Görnüşi ýaly, goşmaça minimumlar şöhleleriň ýollarynyň tapawudy $\lambda/2, 3\lambda/2, \dots$ deň bolan ugurlarda emele gelýär (mysal üçin, iki yşyň-da iň çetki çepdäki M we C nokatlaryň ugurlarynda).

Şeýlelikde, (14.42) hasaba almak bilen goşmaça minimumlaryň şertini ýazýarys:

$$d\sin\varphi = \pm(2m+1)\lambda/2 \quad (m=0, 1, 2 \dots)$$

Tersine, bir yşyň täsiri beýlekileriň täsirini güýçlendirýär, eger

$$d\sin\varphi = \pm 2m \lambda/2 = \pm m\lambda \quad (m=0, 1, 2 \dots) \quad (14.44)$$

Ýagny, (14.44) aňlatma baş maksimumlar şertini goýýar.

Şeýlelikde, iki yş üçin difraksiýanyň doly şekili şeýle şert bilen kesgitlenýär:

baş minimumlar:

$$a\sin\varphi = \lambda, 2\lambda, 3\lambda \dots$$

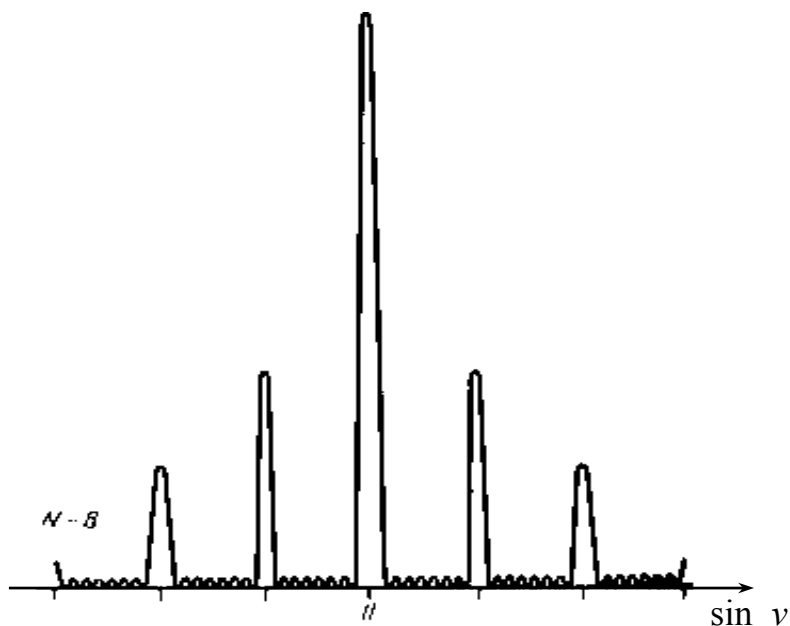
goşmaça minimumlar:

$$d\sin\varphi = \frac{\lambda}{2}, \frac{3}{2}\lambda, \frac{5}{2}\lambda \dots$$

baş maksimumlar:

$$d \sin \varphi = 0, \lambda, 2\lambda, 3\lambda \dots$$

Ýagny iki baş maksimumlaryň arasynda bir goşmaça minimum ýerleşýär:



14.14-nji surat. Difraksiýa gözeneginde Fraungoferiň difraksiýasynyň maksimumlary.

Şular ýaly üç yşly difraksion gözeneginde her bir iki sany baş maksimumyň aralygynda iki sany goşmaça minimum, dört yşda – üç sany goşmaça minimumlar ýerleşýär.

Eger difraksion gözenek N yşdan durýan bolsa, baş minimumlar şerti (14.43) aňlatma bilen, baş maksimumlar şerti (14.44) aňlatma bilen kesgitlenýär. Goşmaça minimumlar şerti:

$$d \sin \varphi = m' \lambda / N$$

$$(m' = 1, 2, \dots, N-1, N+1, \dots, 2N-1, 2N+1, \dots) \quad (14.45)$$

Bu ýerde $m' = 0, N, 2N, \dots$ -den başga ähli bitin san bahalaryny kabul edip biler. Ýagny, (14.45) aňlatmanyň şertiniň (14.44) aňlatmanyň şertine öwrülmeýän bahalary.

Şeýlelik bilen, N sany yş bolan ýagdaýynda iki sany baş maksimumyň aralygynda gaty gowşak ýagtylykly ikilenji maksimumlar arkaly bölünen $(N-1)$ goşmaça minimum ýerleşýär.

Yşlaryň sany näçe köp bolsa, gözenek arkaly şonça-da köp mukdarda ýagtylyk energiýasy geçýär we şonça-da goňşy baş maksimumlaryň aralygynda köp minimumlar ýerleşýär. Şeýlelikde, maksimumlar has ýiti we ýagty bolýar. 14.14-nji suratda sekiz yşyň

döredýän difraksiýasynyň şekili görkezilen. $\sin\varphi$ burçuň modulynyň birden uly bolmaýanlygy sebäpli (14.44) aňlatmanyň şertine görä baş maksimumlaryň sany

$$m \leq d/\lambda$$

gözenegiň periodynyň tolkun uzynlygyna bolan gatnaşygy bilen kesgitlenýär.

§14.7. Ýagtylygyň dispersiýasy

Ýagtylygyň gurşawlarda döwürmegi diňe ol gurşawlaryň häsiýetleri (olarda ýagtylygyň ýaýraýyş aýratynlyklary we ş.m) bilen bagly bolman, eýsem ýagtylygyň tolkun uzynlygy bilen hem bagly bolup durýar. Hemme ýeri optiki birmeňzeş bolan gurşawa takyk tolkun uzynlykly (kesgitli reňkli) ýagtylyk düşende, onuň belli ugur boýunça döwürlip ýaýraýandygyny belläp geçipdik. Bu hadysa diňe gurşawa bagly bolmak bilen çäklenmeýär. Ol gurşawa düşýän ýagtylygyň tolkun uzynlygyna (ýa-da) ýygylgyna hem baglydyr. Ýagny, şol bir gurşawda dürli tolkun uzynlykly ýagtylyklar dürli tizlikler bilen ýaýraýarlar. Netijede, şol bir gurşaw dürli tolkun uzynlykly (ýa-da ýygylkly, reňkli) ýagtylygy dürli hili döwürler.

Gurşawda ýagtylygyň döwürme görkezijisiniň tolkun uzynlyga baglylygyna ýagtylygyň dispersiýasy diýilýär. Umuman, dispersiýa diýmek, ýagtylygyň saýlanylmagy, ýagny onuň interferensiýa, difraksiýa hadysalarda döwürleninde-de, dürli burçlar boýunça döwürmegine düşünilýär. Bu nukdaý nazardan interferensiýadaky dispersiýa, difraksiýadaky dispersiýa we çylşyrymly (ak) ýagtylygyň üçgranly dury aýnadan geçende döwürlip ýüze çykýan dispersiýalary tapawutlanýarlar.

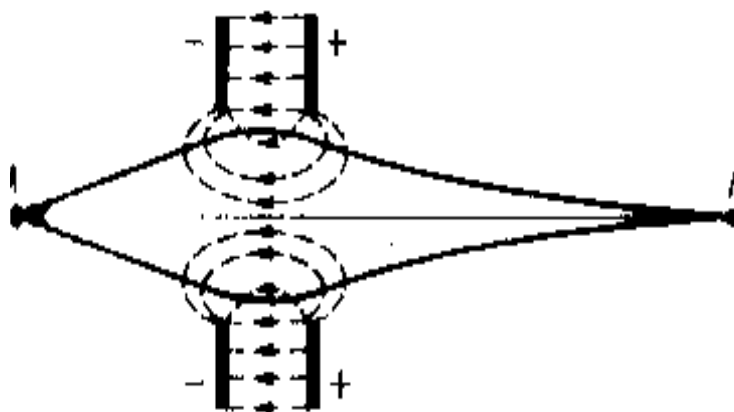
Ýagtylygyň dispersiýasy şeýle aňladylýar:

$$n=f(\lambda) \quad (14.46)$$

Bu ýerde: n – gurşawda ýagtylygyň döwürme görkezijisi, λ – gurşawa düşýän ýagtylygyň tolkun uzynlygy.

Ak ýagtylyk üçgranly dury aýna prizma düşende dürli (7 sany atlary kabul edilen) reňklere dargap, dispersiýany ýüze çykaryar. Eger bir reňkli (bir ýygylkly) ýagtylyk depe burçy A bolan dury, döwürme görkezijisi n bolan maddadan ýasalan üçgranly prizma α_1 burç bilen

düşürilse, onuň çep we sag granlarynda (gapyrgalarynda) döwülip, ol φ burç boýunça çykar.



14.15-nji surat. Elektrostatiki linza.

Çyzgydan görnüşine görä:

$$\varphi = (\alpha_1 - \beta_1) + (\alpha_2 - \beta_2) = \alpha_1 + \alpha_2 - A \quad (14.47)$$

Eger A we α_1 burçlary kiçi hasap etsek, onda α_2 , β_1 , β_2 burçlar hem kiçidirler we olaryň sinuslaryna derek burçlaryň radian bahalaryny ulanyp bolar. Onda

$$\frac{\alpha_1}{\beta_1} = n; \quad \frac{\beta_2}{\alpha_2} = \frac{1}{n}; \quad (14.48)$$

we $\beta_1 + \beta_2 = A \quad (14.49)$

bolýandygy sebäpli

$$\alpha_2 = \beta_2 n = n(A - \beta_1) = n(A - \alpha_1/n) = nA - \alpha_1 \quad (14.50)$$

ýagny,

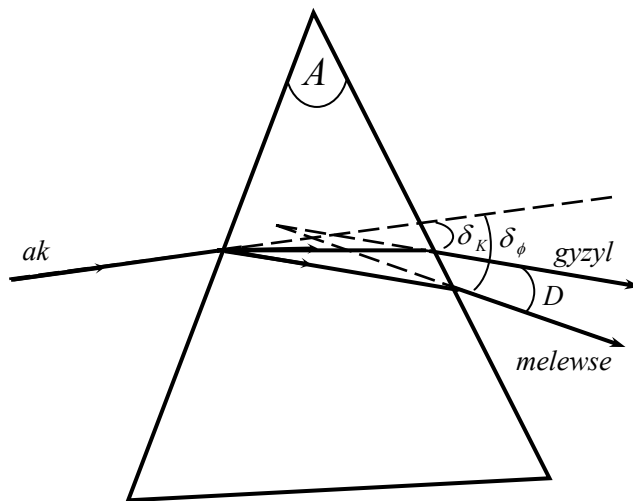
$$\alpha_1 + \alpha_2 = nA \quad (14.51)$$

hem-de (14.51) we (14.47) aňlatmalardan

$$\varphi = A(n - 1) \quad (14.52)$$

gelip çykýar. Ýagny, prizma düşýän şöhläniň çykanda gyşaryan burçy prizmanyň A depe burçuna we döwülme görkezijisine bagly.

Eger-de bu ýagdaýda bir reňkli (monohromatik) däl-de, ak reňkli (köp tolkun uzynlykly) ýagtylyk düşürilse, döwülip çykan şöhle dürli reňkli, dürli burçlar boýunça prizmadan çykarlar.



14.16-nji surat. Üçgranly prizmada ak ýagtylygyň dispersiýasy.

Eger tolkun uzynlygy kiçelende döwülme görkeziji ulalsa, şeýle dispersiýa normal dispersiýa diýilýär. Dispersiýanyň ululygy:

$$D = \frac{dn}{d\lambda} \quad (14.53)$$

aňlatma bilen aňladylýar. Şeýlelikde, λ ululygyň kiçelmeginde

$$\left| \frac{dn}{d\lambda} \right| > 0 \quad (14.54)$$

şert ýüze çyksa, bu normal dispersiýadyr. Eger-de λ kiçelende n hem kiçelse, anomal (normal däl) dispersiýa diýilýär.

Aýna prizmada normal dispersiýa bolup geçýänligi sebäpli, melewşe (tolkun uzynlygy kiçi bolan) reňkli ýagtylyk gyzyl ýagtylykdan köp gyşarýar. Ýagny onuň döwülme görkezijisi uly.

Dispersiýanyň gyraky şöhleleriniň gyşarma burçlarynyň arasyndaky burça dispersiýa burçy diýilýär:

$$D = \delta_m - \delta_g = (n_m - n_g)A \quad (14.55)$$

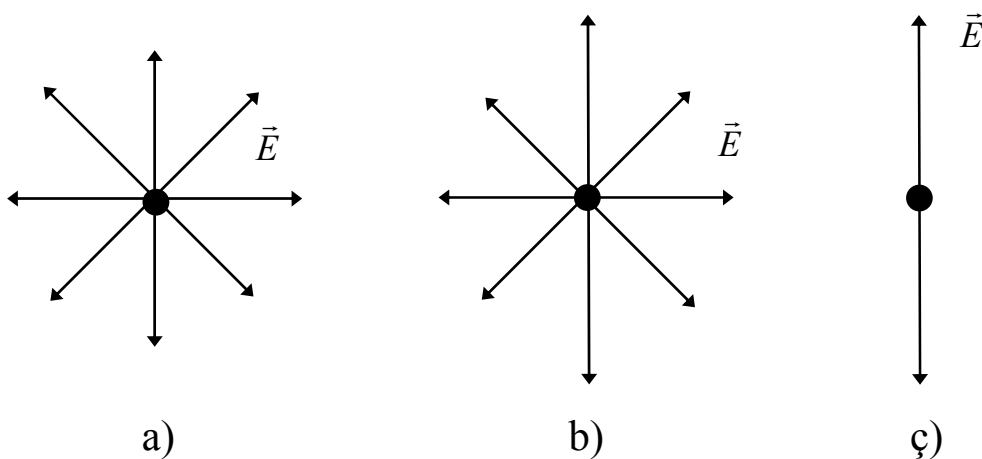
Bu hadysanyň esasynda maddalaryň spektral derňewlerini geçirip, olaryň himiki düzümlerini kesgitlemekde prizmalı spektrograflar ulanylýar.

§14.8. Ýagtylygyň polýarlanmagy

Tebigy we polýarlanan ýagtylyklar bolýarlar. Ýagtylyk köpsanly atomlaryň şöhlenenmesidir. Eger-de köpsanly ýönekeý elektromagnit tolkunlarynyň içinden islendik birini bölüp alsak, ony özara perpendikulýar bolan elektrik (\vec{E}) we magnit (\vec{H}) meýdanlarynyň güýjenme wektorlarynyň yrgyldylary hökmünde göz önüne getirmek bolar. Sebäbi, elektromagnit tolkuny kese tolkundyr, \vec{E}, \vec{H} wektorlaryň ikisi-de tizlik wektoryna (şöhläniň ýaýraýan ugruna) perpendikulýar bolan tekizlikde yrgyldaýarlar. Elektromagnit tolkunynyň şu wektorlaryň biri boýunça yrgyldamagy mümkin däl. \vec{E} güýjenmeli üýgeýän elektrik meýdany, şol kanun boýunça üýgeýän \vec{H} güýjenmeli magnit meýdanyny döredýär we tersine.

Ýagtylygyň madda bilen himiki, fiziologiki we beýleki özara täsirleri esasy elektrik yrgyldylary arkaly häsiýetlendirilýändigigi sebäpli, köplenç halatlarda \vec{E} wektoryň yrgyldylaryna seredilýär, emma şeýle ýagdaýlarda-da, \vec{E} wektora perpendikulýar bolan \vec{H} wektoryň bardygyny-da ýatdan çykarmak bolmaz.

Goý, ýagtylyk şöhlesi çeşmeden okyja tarap ýaýraýar diýip göz önüne getireliň (14.17-nji a surat). \vec{E} wektoryň ähli taraplara deňölçepli ýerleşmegi köpsanly atomlaryň bitertip şöhlenenmegi we olaryň ýaýraýan ugruna perpendikulýar her dürli ugurly yrgyldylaryň bardygy bilen düşündirilýär.



14.17-nji surat. Ýagtylygyň dürli görnüşli polýarlanmalary.

Ýaýramak ugruna perpendikulýar bolan, ähli ugurlar boýunça yrgyldaýan ýagtylyk tolkunyna tebigy ýa-da polýarlanmadyk ýagtylyk diýilýär. Adaty şertlerde ýagtylyk çeşmesi diňe şu hili tolkuny döredýärler. Bu bolsa şöhlenenýän jisimi emele getirýän her bir atomyň şöhlenenme intensiwliginiň ortaça ähli ugurlar boýunça deňdigi sebäpli

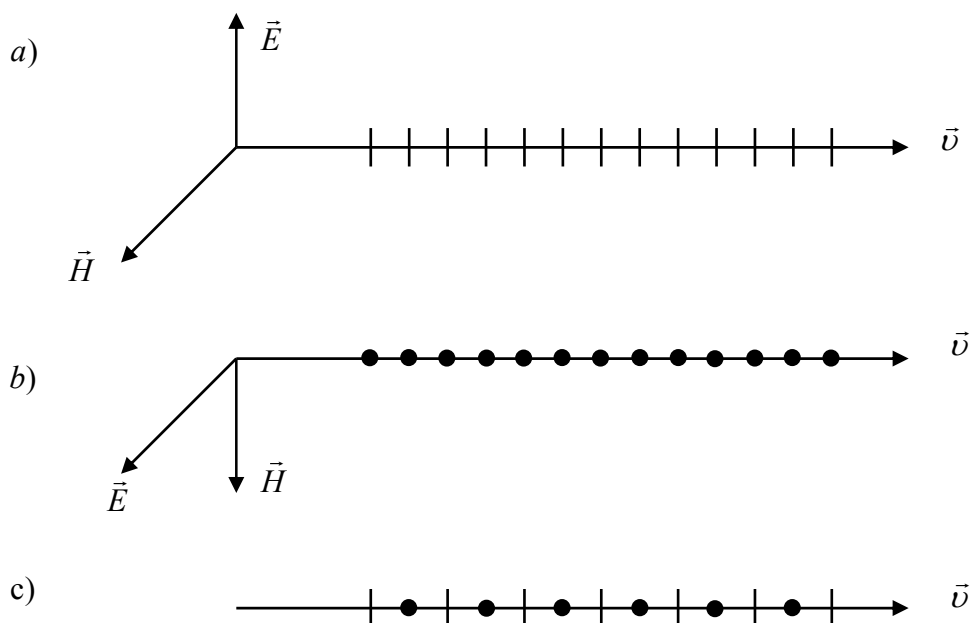
tebigy ýagtylykda \vec{E} wektoryň yrgyldysynyň amplitudasynyň ähli tekizliklerde-de deňdigi bilen düşündirilýär. Käte ýagtylyk şöhlesiniň \vec{E} wektorynyň yrgyldysynyň amplitudasy dürli tekizliklerde deň bolmaýar.

Eger-de ýagtylyga daşky täsiriň ýa-da ýagtylyk çeşmesiniň içki aýratynlygynyň netijesinde tolkunynyň haýsydyr bir ugra yrgyldamasy beýlekiler bilen deňeşdirilende agdyklyk edýän bolsa, şeýle ýagtylyga kem-käsleýin polýarlanan diýilýär (14.17-nji b surat).

Ýokarda belleýşimiz ýaly, polýarlanmadyk (tebigy) ýagtylygy köp sanly ýönekeý şöhlelenijiler - atomlar göýberýärler. Aýratyn alnan mikrobölejikler mydama polýarlanan elektromagnit tolkunlaryny şöhlelendirýärler. Ýörite gurluşlaryň (polýaroidleriň) kömegi bilen tebigy ýagtylyk dessesiniň içinden \vec{E} wektoryň yrgyldysynyň tekizliginde belli bir, şöhläniň ýaýraýan ugruna perpendikulýar bolan ýagtylygy bölüp alyp bolar (14.17-nji ç surat). Şeýle şöhle doly polýarlanandyr.

Elektrik meýdanynyň \vec{E} güýjenme wektorynyň yrgyldylarynyň bolup geçýän tekizligine yrgyldy tekizligi diýilýär. Magnit meýdanynyň \vec{H} güýjenme wektorynyň yrgyldaýan tekizligine polýarlanma tekizligi diýilýär.

14.18-nji suratda \vec{E} wektoryň yrgyldaýan tekizliginiň belgilenişi görkezilendir.



14.18-nji surat. \vec{E} wektoryň yrgyldaýan tekizliginiň belgilenişi.

Eger \vec{E} wektor çyzgy (suratyň ýerleşen) tekizliginde yrgyldaýan bolsa, onda şu ýagdaýda \vec{g} tizlik wektorynyň ugrunda oňa perpendikulýar bolan birnäçe hatar çyzyklar bilen (14.18-nji a surat), eger-de çyzga perpendikulýar bolan tekizlikde bolsa, birnäçe nokat arkaly (14.18-nji b surat) belgilenýär. Tebigy (polýarlanmadyk) şöhle (14.18-nji ç surat) \vec{g} wektoryň üstünde çalyşyp gelyän çyzyjaklar we nokatlar bilen şekillendirilýär. Asmanyň kesgitli böleklerinden gelyän ýagtylygyň mydama ep-esli polýarlanandygyna garamazdan, gündizki ýagtylygy polýarlanmadyk ýagtylyk hökmünde kabul etmek bolar. Emeli ýagtylyk çeşmeleri, düzgün boýunça, kem-käsleýin polýarlanan ýagtylyk berýärler. Elektrik çyrasynyň wolfram sapajygy 15-20 %-e çenli polýarlanan ýagtylygy şöhlelendirýär, simap çyralary 5-8 %-e çenli, lüminessent çyralary güýçli polýarlanan ýagtylygy goýberýärler.

Ýagtylygyň kem-käsleýin polýarlanyşy polýarlama derejesi bilen häsiýetlendirilýär we şu formula arkaly kesgitlenilýär:

$$P = \frac{I_{maks} - I_{min}}{I_{maks} + I_{min}} \quad (14.56)$$

Bu ýerde I_{maks} we I_{min} – \vec{E} wektoryň iki özara perpendikulýar bolan düzüjisine (komponentine) degişli bolan ýagtylygyň maksimal we minimal intensiwlikleri.

Tekiz polýarlanan ýagtylyk üçin $I_{min}=0$ we $P=1$; emeli ýagtylyk üçin $I_{maks}=I_{min}$ we $P=0$.

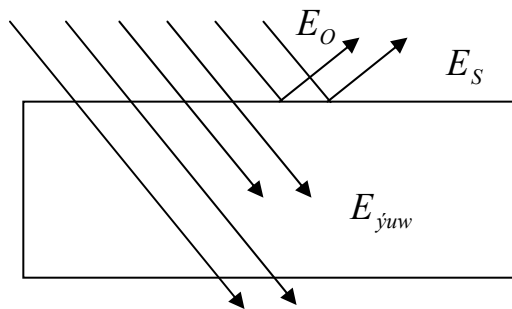
Netije. Interferensiya we difraksiya hadysalary ýaýraýan ýagtylygyň tolkun häsiýetleriniň bardygyny doly subut etdi. Tolkun optikasynyň esasyny goýan Ýung we Frenel ýagtylyk tolkunlaryny uzak wagtlap ses tolkunlaryna meňzeş, boý tolkunlarydyr diýip hasaplapdyrlar. Emma, soňky ýyllarda turmalin kristaly we polýariodler bilen geçirilen tejribeler ýagtylyk tolkunynyň kese tolkunlardygyny doly subut etdi.

Polýarlanan ýagtylyk ylmy barlaglarynda we tehnikada giňden ulanylýar. Mysal üçin, köp halatlarda haýsydyr bir obýektiň ýagtylygyny ýuwaşjadan üýtgetmek gerek bolýar. Şonda ýagtylyk çeşmesiniň önünde polýarlaýjyny we analizatory goýup, soňra analizatory ýuwaşjadan aýlap obýektiň ýagtylygyny iň uly ýagtylykdan, tä doly garaňkyraýança üýtgetmek bolar. Bulardan başga-da, polýarlanmagy bezeg (owadanlyk) maksatlary üçin (witrinalar gurlanynda, teatrda sahna oýunlary goýlanynda we ş.m), geologiyada we ylmyň-tehnikanyň dürli ulgamlarynda ulanylýarlar.

XV BAP. ÝYLYLYK ŞÖHLELENMESI

§15.1. Ýylylyk şöhlelenmesi. Şöhlelenmäniň deňagramlygy. Kirhgofyň kanuny

Temperaturasy absolýut noldan ýokary bolan jisimler elktromagnit şöhlelerini goýberýärler. Jisimler näçe gyzdyrylsa (temperaturasy artdyrylsa), olaryň şöhle goýberijiligi hem artýar. Goýberilen şöhleler başga jisimlere siňýärler we olary gyzdyrýarlar. Şoňa görä-de, bu şöhlelere ýylylyk şöhleleri, bu hadysa bolsa ýylylyk şöhlelenmesi diýilýär. Belli bir temperaturada jisimiň üst birliginden wagt birliginde goýberilýän şöhleleriň energiýasyna jisimiň şöhle goýberiş ukyby diýilýär. Ony E harpy bilen belläliň. Goý, bir jisimiň üstüne E_0 şöhle energiýasy düşýän bolsun.



15.1-nji surat.
Şöhlelenmäniň serpidirilişi,
ýywdulyşy we geçirilişi.

Onda ýagtylyk şöhlesiniň bir bölegi serpigýär ($E_s < E_0$), ýene-de bir bölegi ýuwdulýar ($E_{yuw} < E_0$), galan bölegi bolsa şöhlelenýän üstden geçýär ($E_g < E_0$). Umumy energiýanyň deňlemesi şeýle aňladylar:

$$E_0 = E_s + E_{yuw} + E_g \quad (15.1)$$

Bu deňlemäniň iki tarapynda doly E_0 energiýa bölüp, alarys:

$$1 = \frac{E_s}{E_0} + \frac{E_{yuw}}{E_0} + \frac{E_g}{E_0} \quad (15.2)$$

Bu ýerde: $\frac{E_s}{E_0} = \rho$ – jisimiň şöhläni serpidirmek ukyby ýa-da serpikme koeffisiýenti,

$\frac{E_{yuw}}{E_0} = \alpha$ – şöhläni ýuwutmak ukyby ýa-da ýuwdulma koeffisiýenti,

$\frac{E_s}{E_o} = r$ – ýagtylyk şöhesini goýbermek ukyby ýa-da goýberijilik koeffisiýenti.

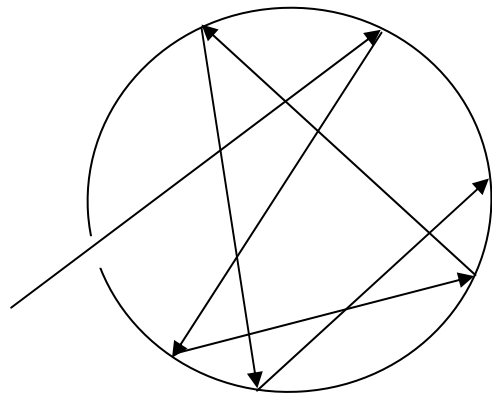
(15.2) aňlatma görä, bu koeffisiýentleriň arasynda şeýle baglanyşyk bardyr:

$$1 = \rho + \alpha + r \quad (15.3)$$

r ululyk jisimiň durulygyny aňladýar. Jisimiň durulygy onuň galyňlygyna we materialyna baglydyr. Gaty jisimleriň köpüsi dury däl-dirler $r=0$.

$$1 = \rho + \alpha \quad (15.4)$$

Üstüne düşýän şöhleleriň ählisini özüne doly siňdirýän (ýuwudýan) jisime absolýut gara jisim diýilýär ($E_{yuv} = E_o$) we $\alpha=1$. Älemdäki käbir "gara deşik" diýilýän jisimler absolýut gara jisime meňzeşdirler. Emma biziň tebigatymyzda absolýut gara jisim ýokdyr. Şoňa görä-de, ylymda we tehniki derňewlerde absolýut gara jisime meňzeş jisimleri, mysal üçin, içi boş şar, (15.2-nji surat) emeli usullar bilen ýasaýarlar.



15.2-nji surat. Absolýut gara jisimiň şekillendirilişi.

Deşikden şaryň içine girýän şöhle onuň içki üstünden birnäçe gezek serpikme netijesinde onuň energiýasy şara siňýär we ondan daşary çykmaýar. Şoňa görä-de, şaryň içi garaňky bolup görünýär.

Jisimleriň şöhle siňdiriş we goýberiş ukyby şöhläniň tolkun uzynlygyna, jisimiň reňkine we temperaturasyna bagly bolýar.

Käbir jisimleriň şöhle siňdiriş ukyplary:

a) Ak reňkli jisimler (kagyz, gar, hek we ş.m.) $\alpha=0,15-0,20$

b) Gara jisimler (kömür, gara reňkli mata, tüsse gurumy we ş.m.) $\alpha=0,8+0,95$

ç) Absolýut gara jisimler. $\alpha=1$.

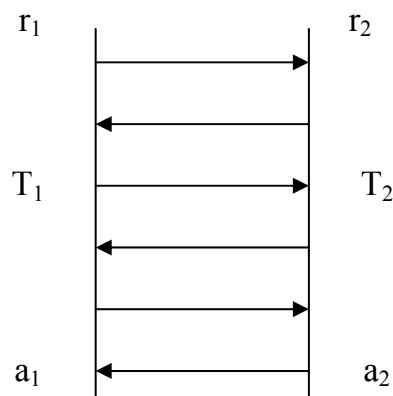
Beýleki jisimleriň şöhläni siňdirijilik ukyplary ak we gara jisimleriň aralygynda bolýarlar.

Jisimlerin hemişe ýylylyk şöhlelerini goýberýändigleri sebäpli ýapyk ulgamdaky jisimlerde bir-birleri bilen ýylylyk çalşygy netijesinde deňagramlyk ýagdaýy döreýär.

Ýapyk ulgamdaky iki jisimiň arasyndaky şöhlelenmäniň deňagramlyk ýagdaýyna seredeliň. Jisimlerin şöhle goýberiş ukyplary deňişlilikde r_1 we r_2 , şöhle siňdiriş ukyplary α_1 we α_2 , temperaturalary T_1 we T_2 bolsun.

Birinji jisimiň (15.3-nji surat) şöhle goýberiş ukyby ikinji jisimiňkiden n gezek köp, ýagny,

$$r_1 = n r_2 \quad (15.5)$$



15.3-nji surat. Şöhlelenenmäniň deňagramlylygy.

Deňagramlylyk ýagdaýynda jisim näçe energiýany özüne siňdirse, ikinji jisimiňki şonça azalmaly:

$$\alpha_1 = n \alpha_2 \quad (15.6)$$

Bu deňlikleriň gatnaşygyny ýazalyň:

$$\frac{r_1}{d_1} = \frac{n r_2}{n d_2} = \frac{r_2}{a_2} \quad (15.7)$$

Eger ulgamda iki jisimden başga-da absolyut gara jisim bar bolsa, bu gatnaşyk aşakdaky ýaly ýazylar:

$$\frac{r_1}{d_1} = \frac{r_2}{d_2} = \frac{R_0}{a_0} \quad (15.8)$$

Absolýut gara jisim üçin $\alpha_0 = 1$, onda:

$$\frac{r_1}{d_1} = \frac{r_2}{d_2} = R_0 \quad (15.9)$$

Diýmek, jisimiň şöhle goýberiş ukybynyň, şöhle siňdriş ukybyna bolan gatnaşygy absolyut gara jisimiň şöhle goýberiş ukybyna deňdir. Bu kesgitlemä Kirhgofyň kanuny diýilýär:

$$\frac{r}{a} = R_0 \quad (15.10)$$

§15.2. Absolyut gara jisimiň şöhlelendirişiniň kanunlary.
Stefanyň-Bolsmanyň kanuny. Winiň kanuny. Optiki pirometrler

Absolyut gara jisimiň şöhle goýberijilik ukyby onuň absolyut temperaturasynyň dördünji derejesine proporsionaldyr:

$$R_0 = \sigma T^4 \quad (15.11)$$

Bu ýerde: σ – Stefanyň-Bolsmanyň hemişeligi, $\sigma = 5,67 \cdot 10^8 \frac{Wt}{m^2 K^4}$;

T – jisimiň absolyut temperaturasy.

Bu gatnaşyk 1879-njy ýylda Awstriýa fizigi Ýozef Stefan tarapyndan tejribe arkaly alnan. Emma, alym bu formulanyň dogrudygyny tejribe arkaly barlap görmezden, ony diňe bir absolyut gara jisimler üçin däl-de, ähli jisimler üçin dogrudyr diýip nädogry pikir edýär. Onuň hakykatdan-da şeýledigini elektrodinamikanyň elektromagnit tolkunlarynyň energiýalarynyň dykyzlygy we ýagtylygyň basyşy arasyndaky gatnaşyklaryň esasynda termodinamikanyň prinsiplerini ilkinji gezek şöhlelenme üçin ulanyp, alymyň watandaşy Lýudwig Bolsman 1884-nji ýylda nazaryet taýdan subut edýär. Şonuň üçin bu kanuna Stefanyň-Bolsmanyň kanuny diýilýär. Stefanyň-Bolsmanyň kanuny hem Plankyň formulasyndan gelip çykýar:

$$R_0 = \int_0^\infty r_x d\lambda = \int_0^\infty \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{hc/\lambda kT} - 1} d\lambda = \sigma T^4 \quad (15.12)$$

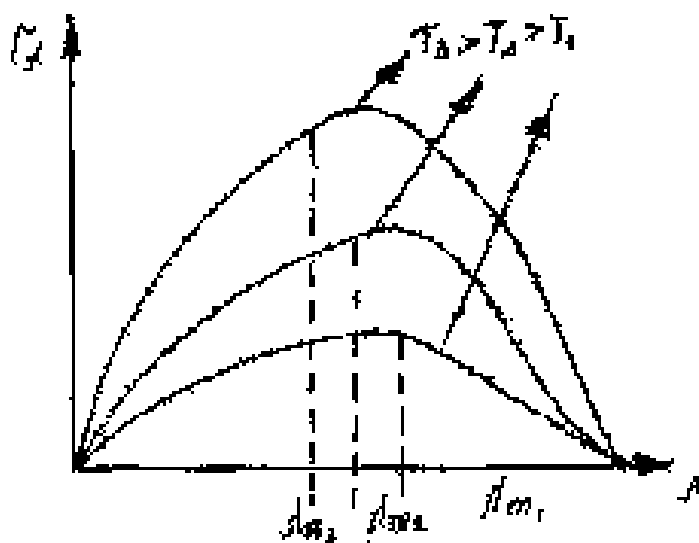
Görnüşi ýaly, meýdany S bolan absolyut gara jisimiň t wagtyň dowamynda ähli tolkun uzynlyklarynda goýberýän şöhlelenme energiýasynyň jemi şeýle formula bilen kesgitlenip bilner:

$$E = \sigma T^4 St \quad (15.13)$$

Ýylylyk şöhlelenmesiniň kanunlary ýylylyk tehnikasynda şöhle energiýasynyň akymyny kesgitlemekde, optiki pirometriýada, astronomiýada asman ýagtylgyçlarynyň tempreturasyny kesgitlemekde giňden ulanylýar.

Makswelliň nazaryýetine görä, elektromagnit tolkunlarynyň, şol sanda ýylylyk şöhleleriniň çeşmesi hereket edýän zarýadlardyr. Ýylylyk şöhlelerini dürli ýygylýklar bilen yrgyldaýan atomlar goýberýärler. Şoňa görä-de, ýylylyk şöhleleri dürli ýygylýkly elktromagnit tolkunlardyr.

Şoňa görä-de, ýylylyk şöhlelenmäniň kanunlary her bir tolkun uzynlykly şöhlelenmä degişlidir.



15.4-nji surat. Şöhlelenmäniň dürli temperaturalarda ýygylýklara görä paýlanyşlary.

15.4-nji suratda ýylylyk şöhlelenme spektrinde energiýanyň bölünişiniň çyzgysy görkezilendir.

Dürli tempraturalarda absolýut gara jisimleriň spektrinde energiýanyň bölünişini içgin öwrenmeklik şeýle kanunalaýyklara getirýär:

1. Absolýut gara jisimleriň şöhlelenme spektrleri tutuş spektrlerdir.
2. Şöhlelenme spektrinde energiýanyň bölünişi tolkun uzynlygyna bagly. Tolkun uzynlygynyň artmagy bilen energiýa şöhlelenmesiniň spektral dykyzlygy r_x artýar, birnäçe λ_m -de (tolkun uzynlygynda) uly baha (maksimuma) eýe bolup, soňra kiçelýär.
3. Temperaturanyň ýokarlanmagy bilen şöhlelenme maksimumy has gysga tolkun uzynlygyna tarap süýşýär.

Gaty gyzdyrylan jisim has-da gyzarýar, tempraturanyň artmagy bilen barha agymtyl bolup başlaýar. Bu bolsa ýylylyk şöhlelenme intensiwliginiň maksimumynyň jisimiň tempraturasynyň artmagy bilen

spektriň ahyryna (melewşä), ýagny, gysga tolkun uzynlygyna tarap süýşýändigini tassyklaýar.

Absolýut gara jisimiň şöhlelenme spektrindäki energetiki ýagtylanmasynyň spektral dykyzlygynyň gabat gelyän λ_m tolkun uzynlygy Winiň süýşme düzgüni bilen kesgitlenýär:

$$\lambda_m = \frac{c}{T} \quad (15.14)$$

bu ýerde $c = 2,8979 \cdot 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{K}$ – Winiň hemişeligi, T – jisimiň absolýut temperaturasy.

(15.14) formula Winiň kanuny hem diýilýär.

§15.3. Fotoeffekt. Fotoeffektiň kanunlary. Fotoeffektiň nazaryýeti

Fotoelektrik effekti. Fotoeffektiň kanunlary. Fotoeffektiň nazaryýeti

Ínfragyzyl şöhleleriň, görünýän ýagtylygyň, ultramelewşe, rentgen şöhleleriniň we energiýasy uly bolmadyk gamma kwantlaryň madda bilen özara täsiri netijesinde, olardan elektronlaryň goparylmasy bolup geçýär.

Ýagtylygyň täsir etmegi netijesinde gaty we suwuk jisimleriniň üstünden elektronlaryň goparylmak (uçyp çykmak) hadysasyna fotoeffekt diýilýär.

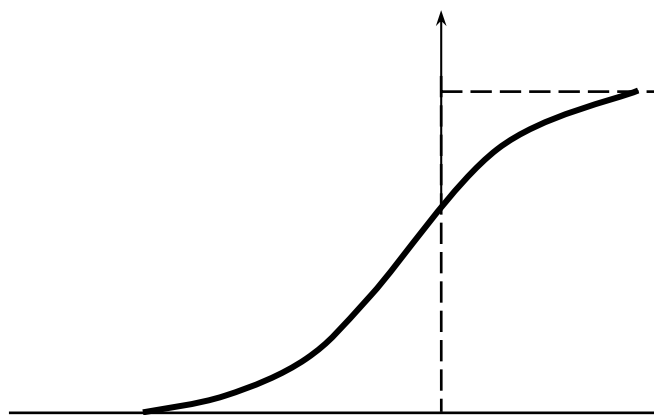
Ýagtylygyň täsiri netijesinde gazyň atomlarynyň we molekulalarynyň ionlaşmagyna fotoionizasiýa hadysasy diýilýär.

Fotoeffekt hadysasy esasy iki görnüşde – daşky we içki görnüşde bolýar. Fotoeffekt hadysasynyň geçmeginde şöhlelendirilýän materialyň (geçiriji, ýarymgeçiriji, dielektrik) elektrik häsiýeti we onuň üstüne düşýän fotonyň (ýagtylyk bölejiginiň) energiýasy uly ähmiýete eýedir. Sebäbi, her bir materialyň üstünden elektronlary goparmak üçin minimal (iň kiçi) energiýa gerek bolýar, eger-de fotonyň energiýasy şondan kiçi bolsa, onda fotoeffekt ýüze çykmaýar.

1887-nji ýylda nemes fizigi G.Gers tarapyndan açylan we görnükli rus fizigi Stoletow tarapyndan bu ajaýyp hadysanyň ykjam öwrenilmegi ýagtylygyň tebigaty baradaky düşüňjeleriň ösüşinde öňe ädilen möhüm ädim boldy.

Fotoeffekt barada has doly düşüňje almak we maddanyň üstüne ýagtylyk düşende ondan goparylýan elektronlaryň (fotoelektronlaryň) sanynyň nämä baglydygyny, hem-de olaryň tizliginiň ýa-da kinetik energiýanyň nämä bilen kesgitlenýändigini aýdyňlaşdyrmak üçin Stoletow tarapyndan şeýle tejribe geçirilen (15.5-nji surat).

Içinden howasy çykarylan aýna gabyň içine iki elektrod salýarlar. Ýagtylyk diňe bir görünyän ýagtylyk üçin dury bolman, eýsem ultramelewşe şöhlelenmeler üçin hem dury bolan kwars "penjiresi" arkaly gabyň içindäki elektrodalaryň birine düşýär. Elektrodlara napreženiýe berilip, ony potenciometriň kömegi bilen üýtgetmek we woltmetr bilen ölçemek bolýar. Ýşyklandyrylan elektroda tok çeşmesiniň otrisatel polýusyny birikdirýärler. Ýagtylygyň täsiri astynda bu elektrod elektronlary çykarýar, olar elektrik meýdanynda hereket edenlerinde elektrik togy döreýär. Pes naprýaženiýelerde ýagtylyk tarapyndan goparylan elektronlaryň hemmesi beýleki elektroda ýetmeýär. Eger şöhlelenmäniň intensiwligini üýtgetmän, elektrodalaryň arasyndaky potensiallarynyň tapawudy ulaldylsa, onda toguň güýji artýar. Käbir naprýaženiýede ol maksimal baha ýetip, şondan soň artmaýar (15.5a-njy surat).



15.5a-nji surat. Doýgunlatma fototogy.

I_d toguň güýjüniň maksimal (iň uly) bahasyna doýgunlatma togy diýilýär. Doýgunlatma togy ýagtylandyrylýan elektrodyň bir sekuntda goýberen elektronlarynyň sany bilen kesgitlenýär.

Bu tejribede şöhlelenmäniň intesiwliliginiň ululygyny üýtgedip, ýönekeý baglanyşygy takykklamak başartdy: bir sekundyň dowamynda ýagtylyk tarapyndan metalyň üstünden goparylan elektronlaryň sany ýagtylyk tolkunlarynyň şol wagtda siňdirýän energiýasyna göni proporsionaldyr. Ýagny, ýagtylyk dessesiniň energiýasy näçe köp bolsa, onuň täsiri sonça-da netijelidir.

Indi bolsa, elektronlaryň kinetik energiýalarynyň ýa-da tizlikleriniň ölçelişiniň üstünde durup geçeliň. 15.5a suratdan görnüşi ýaly, tok çeşmesiniň naprýaženiýesi nola deň bolan ýagdaýynda-da fototok nola deň däl. Munuň özi naprýaženiýäň yok wagtynda hem ýagtylygyň goparan elektronlarynyň bir böleginiň sagdaky elektroda ýetýändigini aňladýar. Eger tok çeşmesiniň polýarlygy üýtgedilse, onda

toguň güýji kiçeler we ters polýarlygyň käbir U_s naprýaženiýesinde ol nola deň bolar. Bu bolsa elektrik meýdanynyň goparylan elektronlary doly togtaýança saklaýandygyny, soňra bolsa olary elektroda gaýtaryandygyny aňladýar.

Saklaýjy U_s naprýaženiýe ýagtylygyň goparan elektronlaryň maksimal kinetik energiýasyna baglydyr. Saklaýjy naprýaženiýäni ölçäp, elektronlaryň kinetik energiýasynyň maksimal bahasyny kesgitlep bolar:

$$\frac{mv^2}{2} = eU_s$$

Ýagtylygyň intensiwligi (ýagtylygyň akymynyň dykzlygy) üýtgände saklanýan naprýaženiýe üýtgemeyär. Munuň özi elektronlaryň kinetik energiýasynyň üýtgemeyändigini aňladýar. Ýagtylygyň tolkun nazaryýetiniň nukdaý nazaryndan seredilende bu fakt düşnüksizdir. Ýagtylygyň intensiwligi näçe güýçli bolsa, ýagtylyk tolkununyň elektromagnit meýdany tarapyndan elektronlara şonça-da uly güýçler täsir edýär, diýmek elektronlara şonça-da köp energiýa berilmeli ýaly bolýar.

Ýagtylygyň goparan elektronlarynyň energiýasynyň diňe ýagtylygyň ýygylgyna baglydygy tejribelerde ýüze çykarylady. Fotoelektronlaryň maksimal kinetik energiýasy ýagtylygyň ýygylgy bilen göni ösýär we ýagtylygyň intensiwligine bagly bolmaýar. Ýokarda belleýşimiz ýaly, eger ýagtylygyň ýygylgy berlen madda üçin käbir kesgitlenen v_{min} minimal ýygylgyndan kiçi bolsa, onda fotoeffekt ýüze çykmaýar.

Fotoeffektiň nazaryýeti

Fotoeffekt hadysasyny Makswelliň elektrodinamika degişli kanunlarynyň esasynda düşündirmegiň synanyşyklary hiç bir netije bermedi.

Plankyň ýagtylygyň üznükli goýberilýändigini baradaky ideýasyny ösdürmek bilen, Eýnşteýn 1905-nji ýylda fotoeffekti düşündirdi. Fotoeffektiň tejribe arkaly alnan kanunlarynda Eýnşteýn ýagtylygyň üznükli gurluşynyň bardygynyň we aýry-aýry üleşler bien siňdirlýändiginiň hem ynandyryjy subudyny görüpdir. Şöhlelenmäniň her bir üleşiniň E energiýasy Plankyň çaklamasyna görä ýagtylygyň ýygylgyna proporsionaldyr:

$$E = h\nu \quad (15.15)$$

Bu ýerde h – Plankyň hemişeligi, $h=6,63 \cdot 10^{-34}$ J·s

Plankyň görkezişi ýaly, ýagtylygyň aýry-aýry ülüşler bilen şöhlelendirilmeginden ýagtylyk şöhlesiniň üznükli gurluşy gelip çykanok. Ýagyş hem ýere damja-damja bolup düşýär ahyryn, emma suwuň üznükli gurluşy bardyr we bölünmeýän bölejiklerden – damjalardan ybaratdyr diýip asla aýtmak bolmaz. Ýagtylygyň üznükli gurluşynyň bardygyny, diňe fotoeffekt hadysasy görkezdi: ýagtylyk energiýasynyň şöhlelendirilen $E=h\nu$ üleşi özboluşlylygyny soň hem saklaýar. Üleş diňe tutuşlaýyn siňdirilip bilner.

Fotoelektronyň kinetik energiýasyny energiýanyň saklanmak kanunyny ulanyp tapmak bolar. Ýagtylygyň üleşiniň $h\nu$ energiýasy A_c çykyş işine, ýagny maddadan elektrony goparmak üçin gerek bolan işe we elektrona kinetik energiýa bermäge gidýär. Diýmek:

$$h\nu = A_c + \frac{mv^2}{2} \quad (15.16)$$

Bu deňleme fotoeffekte degişli bolan esasy faktlary düşündirýär. Ýagtylygyň intensiwligi Eýnşteýniň pikirine görä, ýagtylyk dessesindäki energiýanyň kwantlarynyň (ülüşleriniň) sanyna proporsionaldyr we şoňa görä, metaldan goparylan elektronlaryň sanyny kesgitleýär. Elektronlaryň tizlikleri bolsa (15.16) aňlatma laýyklykda ýagtylygyň ýygylýgy we maddanyň jynsyna hem onuň üstüniň ýagdaýyna bagly bolan çykyş işi bilen kesgитlenýär. Ol ýagtylygyň intensiwligine bagly däl.

Fotoeffekt her bir madda üçin, ýagtylygyň ν ýygylýgy käbir iň kiçi ν_{min} bahadan uly bolanda ýüze çykýar. Elektrona kinetik energiýa bermän, ony metaldan goparmak üçin hem A_c çykyş işini ýerine ýetirmeli. Diýmek kwantyň energiýasy bu işden uly bolmalydyr:

$$h\nu > A$$

Aňryçäk ν_{min} ýygylýga fotoeffektiň gyzyl araçägi (serhedi) diýilýär. Ol şeýle aňladylýar:

$$\nu_{min} = \frac{A}{h} \quad (15.17)$$

A_c çykyş işi maddanyň jynsyna baglydyr. Şoňa görä hem dürli maddalar üçin fotoeffektiň aňryçäk ν_{min} ýygylýgy dürlüdür.

Eýnşteýniň (15.16) deňlemesinden peýdalanyp, Plankyň h hemişeligini kesgitlemek bolar. Munuň üçin ýagtylygyň ýygylgyny we A_c çykyş işini tejribede kesgitlemek, fotoelektronlaryň kinetik energiýasyny ölçemek gerek. Şeýle ölçemeler we hasaplamalar $h=6,63 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ ululygy berýärler.

Bu ululyk Plankyň düýpden başga hadysany – ýylylyk şöhlelenmesini teoretiki öwreneninde alan ululygy bilen gabat gelýär.

Plankyň hemişeliginiň dürli usullar bilen kesgitlenen bahalarynyň gabat gelmekleri maddanyň ýagtylygy şöhlelelendirmeginiň we siňdirmeginiň üznükli häsiýetiniň bardygyny doly tassyklaýar.

§15.4. Fotonlar. Komptonyň effekti. Fotoeffektiň ulanylyşy

Häzirki zaman fizikasynda fotona elementar bölejikleriň biri hökmünde garalýar. Elementar bölejikleriň jedweli onlarça ýyllaryň dowamynda fotondan başlanýar. Ýagtylyk goýberilende we siňdirilende özüni ýygylga bagly bolan $E=h\nu$ energiýaly bölejikleriň akymy ýaly alyp barýar. Ýagtylygyň şöhlelenýän we siňdirilýän mahalynda ýüze çykýan häsiýetlerine korpuskulýar häsiýetler diýilýär. Ýagtylyk bölejikleriniň özüne bolsa foton ýa-da ýagtylyk kwanty diýilýär.

Fotonyň hem beýleki bölejikleriňki ýaly, kesgitli $h\nu$ energiýasy bardyr. Fotonyň energiýasy köplenç ν ýygylk arkaly däl-de, $\omega = 2\pi\nu$ aýlaw ýygylk bilen aňladýarlar. Şunda proporsionallyk koeffisiýenti hökmünde h ululygyň deregine \hbar ululygy ulanylýar (çyzylan aş diýip okalýar), ol häzirki maglumatlara görä:

$$\hbar = 1,05 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$$

Onda fotonyň energiýasy şeýle aňladylýar:

$$E = h\nu = \hbar\omega \quad (15.18)$$

Görälik nazarýetine laýyklykda, energiýa mydama massa bilen $E=mc^2$ aňlatma arkaly baglanyşyklydyr. Fotonyň energiýasy $h\nu$ deň bolany üçin onuň m massasy aşakdaky ýaly kesgitlenýär:

$$m = \frac{h\nu}{c^2} \quad (15.19)$$

Fotonyň m dynçlyk massasy ýokdur, ýagny ol dynçlyk ýagdaýynda bolmaýar. Dörän dessine c tizlik alýan (15.19) formula bilen kesgitlenýän massa hereket edýän fotonyň massasydyr. Fotonyň belli m massasy we tizligi boýunça onuň impulsyny kesgitläp bolar:

$$P = mc = \frac{hv}{c} = \frac{h}{\lambda}$$

Fotonyň impulsy ýagtylyk şöhlesi boýunça ugrukdyrylandyr. Ýygylýk näçe uly bolsa, fotonyň energiýasy we impulsy şonça-da uludyr, ýagtylygyň korpuskulýar häsiýeti şonça-da aýdyň ýüze çykýar. Plankyň hemişeliginiň kiçiligi sebäpli, görüňýän ýagtylygyň fotonlarynyň energiýasy juda ujypsyzdyr. Yaşyl ýagtylyga laýyk gelýän fotonlaryň $4 \cdot 10^{-19}$ J energiýasy bolýar. Muňa garamazdan S.I.Wawilowyň ajaýyp tejribelerinde adamyň gözüniň kwant birliklerinde ölçelýän ýagtylandyryşyň tapawudyny duýmaga ukyply iň duýgur abzallaryň biridigi anyklandy.

Komptonyň effekti

Erkin elektronlarda rentgen we gamma şöhleler ýaýranda, elektromagnit şöhlemenmäniň kwant häsiýetleri has aýdyň ýüze çykýar. Şonda, ýaýraýan şöhläniň tolkun uzynlygynyň düşýän şöhläniň tolkun uzynlygy bilen deňeşdireniňde, uzalýandygyna gözegçilik edilýär. Bu hadysa 1922-nji ýylda amerikan fizigi A.Kompton (1892-1962) tarapyndan açyldy.

Elektromagnit meýdanynyň nusgawy nazaryýetine laýyklykda erkin elektronlarda şöhläniň ýaýramagy tolkun uzynlygynyň ýaýramagy bilen ugurdaş bolmaly däldir. ν ýygylýkly düşýän şöhle şol bir ýygylýkdaky elektronlaryň mejbury yrgyldylaryny döredýär. Yrgyldyly elektronlar ν ýygylýkly elektromagnit tolkunlaryny ikilenç şöhlelelendirýärler. Bu ýaýraýan şöhledir. Onuň $\lambda = \frac{c}{\nu}$ tolkun uzynlygy düşýän şöhlemenmäniň tolkun uzynlygy bilen deň bolmalydyr.

Fotonlar $E = h\nu$ energiýaly we $p = \frac{h}{\lambda} = \frac{h\nu}{c}$ impulsy ýagtylygyň bölejikleridir diýen düşüňjeleriň esasynda tolkunlaryň uzynlygynyň ýaýranda üýtgeýändigini (Komptonyň effekti) düşündirmek mümkin boldy. Foton bilen elektron çaknyşanda, impulsyň we energiýanyň saklanmak kanunyny peýdalanmak bilen, tolkun uzynlygynyň üýtgeýişini kesgitlemek bolar

$$h\nu + E_0 = h\nu' + E, \quad (15.20)$$

Bu ýerde: $E_0 = m_0 c^2$ we E – deňişlilikde elektronyň başlangyç (çaknyşma çenli) hem-de ahyrky energiýasy (m_0 – dynçlykdaky elektronyň massasy), ν' – ýaýraýan fotonyň ýygylgy.

Impusyň saklanmak kanunyna laýyklykda:

$$p = p' + p_e \quad (15.21)$$

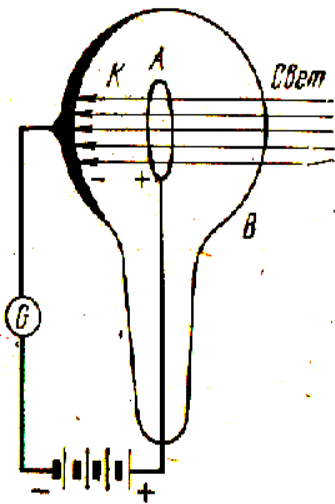
Energiýanyň (15.20) we impulsyň (15.21) saklanmak kanunlaryndan θ ýaýrama burçuna baglylykda ýaýraýan söhlelenmäniň tolkun uzynlygynyň üýtgeýşini kesgitlemek bolar:

$$\Delta\lambda = \lambda^1 - \lambda = 2\nu_k \sin^2 \frac{\theta}{2}; \quad (15.22)$$

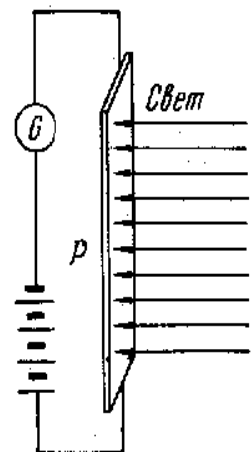
Bu ýerde: $\lambda_k = \frac{h}{m_0 c} = 2,4 \cdot 10^{-10} \text{ m}$ – elektronyň Kompton tolkun uzynlygy diýilýän hemişelik ululyk.

Fotoeffektiň ulanylyşy

Ýagtylygyň tebigatyna has çuň düşünmek üçin fotoeffektiň açylmagynyň örän uly ähmiýeti boldy. Emma ylmyň gymmaty diňe bizi gurşap alan dünýäniň çylşyrymly we köpdürli düzülişini düşündirmekden ybarat bolman, eýsem onuň biziň ygtyýarymyza berýän serişdelerini ulanylyp önümçiligi kämilleşdirmekden, jemgyýetiň maddy we medeni ýaşaýş şertlerini gowulandyrmakdan hem ybaratdyr.



15.6-njy surat. Wakuum fotoelementi.



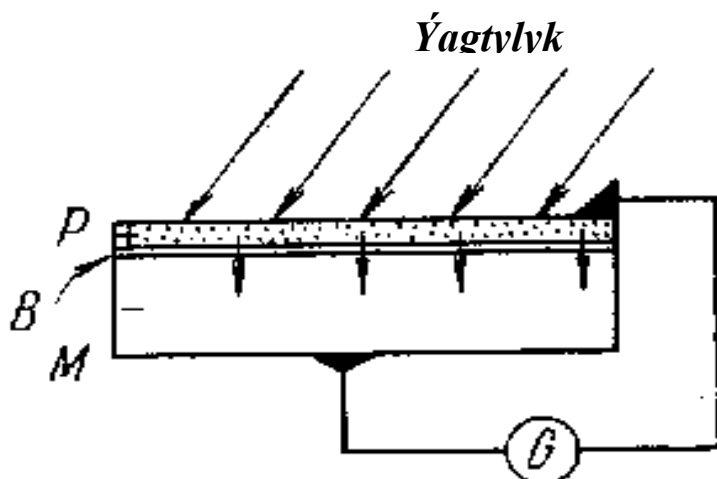
15.7-nji surat. Ýarymgeçirijili fotogarşylyk.

Fotoeffektiň kömegi bilen kino "dil açdy" we hereketlenýän şekilleri bermek mümkin boldy. Fotoeffekte esaslanyp gurlan abzallar

önümleriň ölçeglerini islendik adamdan gowy barlaýar, maýaklary, köçe çyralaryny we ş.m. öz wagtynda ýakyp, söndürýär.

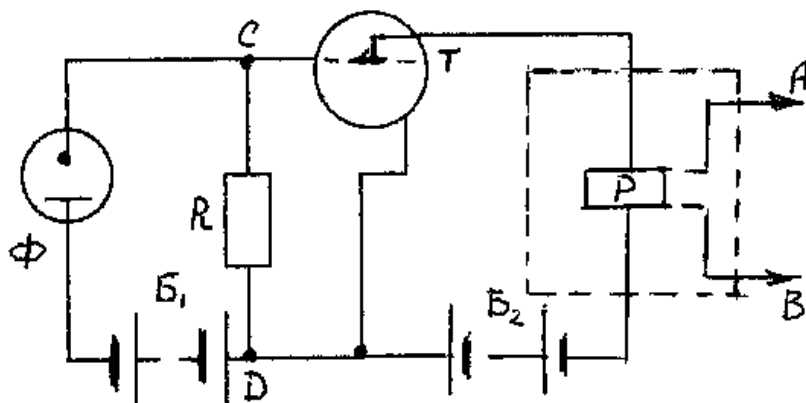
Bularyň hemmesi has kämilleşen gurluşlaryň – fotoelementleriň oýlanyp tapylmagy mynasybetli mümkin boldy, olarda ýagtylgyň energiýasy elektrik togunyň energiýasyny dolandyrýar, ýa-da oňa öwrülýär.

15.8-nji suratdan görüşi ýaly, ýagtylyk fotoelementiň katodyna düşende, zynjyrdaky elektrik togy emele gelýär, ol tok bolsa ol ýa-da beýleki reläni işledýär ýa-da duruzýar. Fotoelementin rele bilen utgaşdyrylmagv köp dürli görüji awtomatlarv döretmäge mümkinçilik berdi.



15.8-nji surat. Yarymgeçirijili fotoelektrik çeşme.

Fotoelementiň üstüne ýagtylyk düşende (15.9-njy surat) R rezistor arkaly Gl batareýanyň zynjyryndan gowşak tok gidýär. Rezistoryň uçlaryna tranzistoryň bazasy we emmitery birikdirilen. Bazanyň potensialy emmiteryň potensialyndan ýokarydyr hem-de tranzistoryň kollektor zynjyrynda tok ýokdur. Haçan-da, adamyň eli howply zona gabat gelende, ol fotogarşylyga düşýän ýagtylygyň akymynyň önüni ýapýar.



15.9-njy surat.
Fotoelektriki
dolandyryjy gurluş.

Emitter – baza geçiş, esasy äkidiji üçin açylýar we kollektoryň zynjyryna birleşdirilen reläniň sarymlarynyň üsti bilen tok geçýär we rele

işleýär. Biziň bu sereden hadysalarymyza daşky fotoeffekt diýilýär. Bulardan başga-da, ýarymgeçirijilerdäki fotoelektrik hadysalar dürli maksatlar üçin giňden ulanylýar.

§15.5. Optiki kwant generatorlary (lazerler)

Lazer sözi “Light Amplification by stimulated Emission of Radiation” diýen inlis sözleriniň ilkinji harplarynyň goşulmagyndan emele gelen söz bolup, türkmen diline terjime edilende indusirlenen (mejbury) şöhlelenmäniň kömegi bilen ýagtylygy güýçlendirmegi aňladýar.

Lazer näme diýlen soraga akademik N.G.Basow şeýle jogap berýär: “Lazer - ýylylyk, himiki, elektrik energiýalaryny elektromagnit meýdanynyň - lazer şöhlesiniň energiýasyna öwürýän gurluşdyr. Şeýle özgertmede energiýanyň bir bölegi gürrüňsiz ýitýär, ýöne netijede alnan lazer energiýasy juda ýokary hillidir. Lazer energiýasynyň hili onuň ýokary dykyzlygy we juda uly aralyga bermek mümkinçiligi bilen kesgitlenýär.

Lazer şöhlesiniň diametrini ýagtylyk tolkunynyň uzynlygyna deň bolan kiçijik menejikde ýygnap bolýar we şu günki mümkinçiliklerden peýdalanylýan ýadro partlamasynyň energiýasynyň dykyzlygyndanam uly dykyzlykly energiýany alyp bolýar. Lazer şöhlelenmesiniň kömegi bilen eýýäm temperaturanyň, basyşyň, magnit induksiýasynyň in ýokary bahalary alyndy. Galyberse-de, lazer şöhlesi uly sygymly maglumat göteriji bolup, şu maksat bilen maglumat bermekde we gaýtadan işlemekde düýpgöter täze serişdedir”.

1954-nji ýyly elektromagnit şöhleleriniň kwant generatorynyň döredilen ýyly diýip hasaplamak bolar. Şol ýyl rus alymlar N.G.Basow we A.M.Prohorow elektromagnit tolkunlaryny güýçlendirmek we generirlemek üçin indusirlenen şöhleleriň kwant ulgamyny ulanmaklygy teklipl etdiler. Soňra öz ideýalaryny durmuşa geçirip, molekulýar generatory dörettdiler. Şol ýyl hem amerikan fizikleri Ç.Taunsyň we onuň işgärleriniň ammiak molekulasynda elektromagnit şöhleleriniň molekulýar kwant generatorlary baradaky işleri çap edildi. Şeýle generatorlaryň şöhleleriniň tolkun uzynlygy 1.27sm deňdir. Bu ilkinji iş kwant elektronikasynyň ösüşiniň başlangyjy boldy. Döredilen molekulýar generatorynda iki energetiki derejeleriň arasyndaky geçişler ulanylýardy. Soňra N.G.Basow we A.M.Prohorow elektromagnit tolkunlaryny generirlemek we güýçlendirmek üçin üç energetiki derejeleriň arasyndaky geçişleri ulanmaklygy teklipl etdiler.

Şeýlelikde, tebigy ýagdaýda elektromagnit şöhleleriniň optiki diapazonynda işleýän kwant generatorlaryny döretmek meselesi ýüze çykdy. Ýagtylygy güýçlendirmegiň usuly (prinsipi) 1940-njy ýylda öňki sowet fizigi B.A.Fabrikant tarapyndan teklipl edilipdi.

1961-nji ýylda N.G.Basow, O.N.Krotin, A.M.Prohorow ýarymgeçirijili lazerleri döretmekligi teklipl etdiler. 1963-nji ýylda ABŞ we öňki SSSR-de ilkinji arsenid galliý materialynyň esasynda ýarymgeçiriji lazeri döredildi.

Elektromagnit şöhlelenmeleriniň kwant generatorlarynyň ylmy we amaly ähmiýeti diýseň uludyr. 1964-nji ýylda kwant generatorlaryny döretmekde, kwant elektronikasyny ösdürmekde ýerine ýetiren işleri üçin rus fizikleri N.G.Basowa, A.M.Prohorowa we amerikan fizigi Ç.Taunsa Nobel baýragy berildi.

Häzirki wagtda giňden ulanylýan lazerler işçi jisimleriniň (aktiw gurşawyň) görnüşi boýunça gaty jisim, gaz, ýarymgeçirijili we suwuklykly lazerlere bölünýärler. Maddada elektronlaryň ýokary derejedäki sanyny aşaky esasy derejä seredeniňde köplügini döretmek (nakaçka) üçin optiki, ýylylyk, himiki we elektriki usullar ulanylýar.

Lazerleriň esasy hökmany üç düzüm bölegi (komponenti) bolmaly:

1. İşçi jisimi, onda elektronlaryň konsentrasiýasynyň (göwrüm birligindäki sanynyň) köplügi döredilýär.
2. Nakaçka - işçi jisiminde elektronlaryň köplügini döretmek üçin ulanylýan gurluş.
3. Optiki rezonator - giňişlikde fotonlaryň akym ugruny saýlaýan we çykýan ýagtylyk desselerini emele getirýän gurluş.

Eger atomlar esasy 1-nji ýagdaýda ýerleşen bolsalar, olaryň bir bölegi daşky şöhlelenmäniň täsir etmeginde mejbury geçiş edip, ýokary energiýaly 2-nji ýagdaýa geçýärler we oýandyrylan halda bolýarlar.

Oýandyrylan 2-nji ýagdaýda duran atomlar sähelçe wagtdan soň hiç hili daşky güýçleriň täsiri bolmazdan, öz-özünden pes energiýaly (biziň ýagdaýymyzda esasy ýagdaý hasaplanýan) E_1 ýagdaýa geçýärler we artykmaç energiýalaryny elektromagnit şöhlelenmesi görnüşinde (energiýasy $h\nu=E_2-E_1$ deň bolan) fotony goýbermek arkaly şöhlelenýärler.

Oýandyrylan atomlaryň hiç hili daşky güýçleriň täsiri bolmazdan, foton goýbermeklik (şöhlelenmek) prosesine spontan ýa-da öz-özünden şöhlelenme diýilýär (15.10-njy surat). Öz-özünden bolup geçýän şeýle geçişleriň ähtimallygy näçe uly bolsa, atomyň oýandyrylan ýagdaýynda “ýaşayan” (bolýan) wagty şonça-da az bolýar. Sebäbi, şeýle geçişler özara baglanyşyksyz we kogerent däldirler (birmeňzeş tolkun uzynlykly,

fazalarynyň tapawudy hemişelik bolan ylalaşykly tolkunlara kogerent tolkunlar diýilýär).

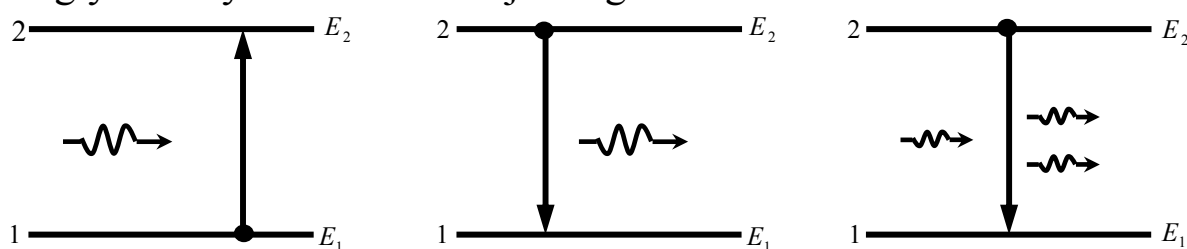
1916-njy ýylda A.Eýnşteýn maddanyň termodinamiki deňagramlylygynyň hem-de onuň göýberýän we siňdirýän şöhlemenmesiniň arasynda tejribede ýüze çykýan prosesleri düşündirmek üçin siňdirilýän we öz-özünden şöhlenenýän şöhlemenmelerden başga-da, täze üçünji bir hil taýdan täze görnüşli özara täsiriň bolmalydygyny teklipl etdi. Eger oýandyrlan 2 ýagdaýdaky atoma $h\nu = E_2 - E_1$ şerti kanagatlandyrylan daşardan şöhlemenme täsir etse mejbury (indusirlenen) geçiş ýüze çykýar we oýandyrlan atom energiýasy pes bolan $h\nu = E_2 - E_1$ deň bolan fotony şöhlelendirip, energiýasy pes bolan 1 esasy ýagdaya geçýär (15.10-njy ç surat). Şeýle geçişde şu geçiş döreden fotona goşmaça atomyň özü-de foton goýberýär. Şeýle geçişleriň netijesinde ýüze çykýan şöhlemenmä iki sany foton gatnaşýar. Ilkinji foton-oýandyrylan atomy şöhlelendirmäge mejbur eden foton, ikinjisi oýandyrylan atomyň goýberýän fotony. Şöhlelendirilen fotonlar bir ugra tarap hereket edýärler we beýleki oýandyrylan atomlar bilen duşuşyp, mejbury geçişleri ýüze çykarýarlar. Şeýlelikde, olaryň sany barha artýar. Bu şöhlemenmäniň ajaýyp aýratynlygy induşirlenen şöhlemenmede soňky dörän fotonlar, ilkinji fotonlardan ýygyllyklary boýunça-da, polýarlanyşy boýunça-da tapawutlamaýarlar.

Mejbury şöhlemenme kwant nazaryýetiniň dilinde atomyň ýokary energetik haldan aşaky (pes) energetik hala geçmegini aňladýar, emma bu adaty şöhlemenmede bolşy ýaly öz-özünden bolman, daşky täsiriň astynda bolýar.

Ilkinji işçi jisimi gaty jisim bolan, spektiriň görüňän çäklerinde işleýän (tolkun uzynlygy 0.6943 mkm) rubin lazeri 1960-njy ýylda ABŞ-da (T.Meýman) döredilýär. Onda N.G.Basow tarapyndan teklipl edilen üç derejeli ulgam ulanylýar.

Siňdirme, öz-özünden we mejbury şöhlemenme

Atomlar $E_1, E_2, E_3 \dots$ energiýalara eýe bolan kesgitli (kwant) hallarynda bolup bilerler. Biz ýönekeýlik üçin diňe E_1 we E_2 energiýalara eýe bolan iki derejeli ulgama serederis:



15.10-njy surat.

a) siňdirme

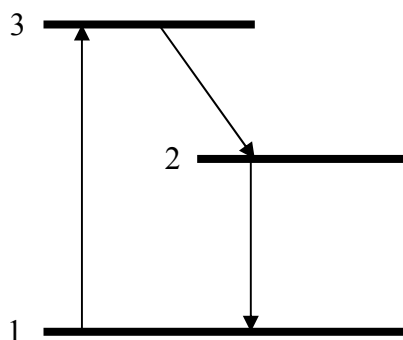
b) öz-özünden şöhlemenme

ç) mejbury şöhlemenme

Üç derejeli sistema. Ýokarda belleýşimiz ýaly, atomlary oýandyrylan ýagdaýda bolan ulgamy almagyň dürli usullary bar. Rubin lazerinde şeýle maksat üçin ýörite kuwwatly çyra ulanylýar. Atomlar ýagtylygy siňdirmegiň hasabyna oýandyrylýar.

Emma energiýanyň iki derejesi lazeriň işlemegi üçin ýeterlik däl. Çyranyň ýagtylygy näçe kuwwatly bolsa-da, oýandyrylan atomlaryň sany oýandyrylmadyk atomlaryň sanyndan köp bolup bilmez. Sebäbi, ýagtylyk şol bir wagtyň özünde atomlary oýandyrýar we ýokary derejeden aşaky derejä indusirlenen geçişlerini döredýär.

Üç energetik derejäni peýdalanmak bilen ýagdaýdan çykalga tapyldy (15.11-nji suratda üç energetik dereje şekillendirilendir).



15.11-nji surat. Oýandyrylan atomyň üç energetiki derejeleri.

Daşky täsir bolmadyk 1-nji ýagdaýda ulgamyň dürli energetik ýagdaýlarda bolýan wagtyň (ýaşayyş wagtyň) birden däl bolmagynyň uly ähmiýeti bardyr. Üçünji dereje elektronlar oýandyrylan ýagdaýda bolup örän az, ortaça 10^{-8} s töweregi ýaşayarlar. Soňra öz-özünden 2-nji ýagdaýa ýagtylyk şöhlelendirmän geçýärler. Bu ýagdaýa durgunly däl (metastabil) ýagdaý diýilýär. Olaryň bu ýagdaýda „ýaşayan“ wagtlary üçünji ýagdaý bilen deňşdireniňde 100 000 esse (10^{-3} s) uly. Şonuň üçin bu ýagdaý lazerlerde gysga wagtlaýyn energiýany toplamak hökmünde ulanylýar.

Hususan-da, lazeriň ähli täsir ediş mehanizmi, ýagny, şeýle durnukly däl derejelerde mümkin boldugyça köp energiýany toplap, soňra-da ony birbada goýbermekden ybarat bolup durýar. Şonuň üçin durnukly däl derejelere mümkin boldugyça köp sanly atomlary „zyňmak“ gerek. Şeýle maksat üçin optiki nakaçka ulanylýar. Kristalyň daşynda ýerleşen ýagtylyk çeşmesi - pružin görnüşli gaz zarýadsyzlanma çyrasy energiýany şöhlelendirýär. Sygymy birnäçe mň mikrofrad bolan kondensatorlaryň batareýasyndan gelýän toguň impulsy

çyranyň ýagty ýalpyldysyny döredýär. Ol şöhleler dury rubin kristalynyň içine aralaşýar.

Sähelçe wagtdan soň durnukly däl 2-nji energetik derejede elektronlaryň (ýaşajylaryň) köplügi döredilýär.

Öz-özünden 2-1 geçişleriň netjesinde dürli ugurlar boýunça tolkunlar şöhlelendirilip başlanýar. Olardan kristalyň okuna burç bilen gidýänleri okdan çykyp, soňraky proseslerde hiç hili rol oýnamaýarlar. Kristalyň oky boýunça gidýän tolkun bolsa, onuň uçlaryndan köp gezek serpigýär. Ol hromyň oýandyrylan ionlarynyň industirlenen şöhlelenmesini döredýär we çalt güýçlenýär. Rubin çybygynyň bir ujuny aýnalaýyn, beýlekisini bolsa ýarym dury edýärler. Bu uçdan gyzyly ýagtylygyň kuwwatly gysga wagtyly (dowamlylygy ýüz mikrosekunt töweregi) impulsy çykýar. Ähli atomlaryň ylalaşykly şöhlelenýändigleri sebäpli tolkun kogerentdir we juda kuwwatlydyr, sebäbi, indusirlenen şöhlelenmede ähli toplanan energiýa örän az wagtyň dowamynda kristaldan şöhle görnüşinde çykyp gidýär.

Lazerleriň işleýşini ýönekeý dörttaktly hereketlendirijileriň işleýişleri ýaly-da düşündirmek bolar:

1. takt. Nakaçka. Daşky ýagtylyk çeşmesi bilen işçi jisimini oýandyrmak we onuň atomlaryny energiýanyň oýandyrylan derejelerine geçirmek;
2. takt. Gysyş. Berlen energiýanyň köp bölegini durnukly däl derejelere geçirmek;
3. takt. Otlamak. Her bir kwantyň ýyldyrym çaltlygynda mejbury şöhlelenmäni goýbermegini döretmek;
4. takt. Çykyş. Gapdal üstleriň aralygynda „ylgap“ ýören ýagtylyk kwantlary durnukly däl derejeleri boşadýarlar. Ýagtylyk şöhlesi kuwwatly kogerent impulsar görnüşinde kristaldan çykýarlar.

Lazerleriň görnüşleri: Rubin lazerleriň işçi jisimi Al_2O_3 alýumin okisi bolup, oňa 0,03-0,05% möçberinde üç walentli hromyň ionlary goşulýar. Olar impuls kadasynda işleýärler. Rubinden başga-da, gaty jisim lazerleri hökmünde ýarymgeçirijili (CaAs) we aýna (flýuorit kalsiý – CaF_2 , uran, samariý ýa-da neodim goşulan) lazerler ulanylýar. Bulardan başga-da, mysal üçin, geliýiniň we neonyň garyndysyndan taýýarlanan gaz lazerleri bar. Aýratyn hem kömürturşy gazynyň - CO_2 -niň esasynda taýýarlanan lazer giňden ulanylýar. Onuň peýdaly täsir koeffisienti 33% ýetýär (kuwwaty 18 kWt). Bu lazeriň şöhlesi hiç bir kynçylyksyz, kerpijiň içinden geçip, ony ýakyp bilýär.

Häzirki wagtda işçi jisimi suwuklyk (gadoliniň, neodimiň we samariniň erginlerinden) bolan lazerler hem ulanylýar. Olar spektriň

ýaşyl böleginde (0,58 mkm) işleýärler. Bu şöhleler suwuň çuňluguna gowy aralaşyp bilýärler.

Lazerleriň ulanyluşy: Lazer şöhlelerini aragatnaşyk üçin, aýratyn hem ýagtylygy siňdirýän bulutlaryň ýok ýeri bolan älem giňişliginde ulanmaklygyň geljegi uludyr.

Lazer şöhlesiniň ägirt uly kuwwatlylary wakuumda materiallary bugartmak, kebşirmek we ş. m. üçin peýdalanylýar. Lazer şöhlesiniň kömegi bilen hirurgiýa operasiýalaryny geçirmek bolýar, meselem: gözüň düýbünden gopan torjagazlaryny “seplemek” bolýar, lazer şöhleleriniň kogerentligini peýdalanyň, jisimleriň göwrümleýin şekillerini alyp bolýar.

Lazerler ýagtylyk lokatorlaryny amala aşyrmaga mümkinçilik berýär, olaryň kömegi bilen predmetlere çenli uzaklyklary birnäçe millimetrlere çenli takyklyk bilen ölçäp bolýar. Şeýle takyklyk bilen ölçemek radiolokatorlar üçin mümkin däl.

Atomlary ýa-da molekulalary lazer şöhlelenmesi bilen oýandyryp, olaryň arasynda adaty şertlerde bolmaýan, himiki reaksiýalary ýüze çykaryp bolýar.

Lazer kuwwatly ýagtylyk çeşmesidir. Mysal üçin: rubin çybygy nakaçkada $W=20Wt$ energiýa aldy we $10^{-3}s$ şöhlelendirildi diýeliň, onda şöhlelenme akymy $\phi_e=20/10^{-3} J/s=2 \cdot 10^4 Wt$ bolýar. Bu şöhlelenmäni $1mm^2$ üste fokuslap, $\phi_e/S=2 \cdot 10^4/10^{-6} Wt/m^2=2 \cdot 10^{10} Wt/m^2$ energiýa alyp bolýar. Şeýle kuwwatly şöhle bilen islendik gaty materiallary kesmek, olarda kiçijik deşijekleri emele getirmek bolar.

Lazerleriň ulanylýan ýerleri şeýle giň, olaryň baryny sanap geçmek mümkin däl.

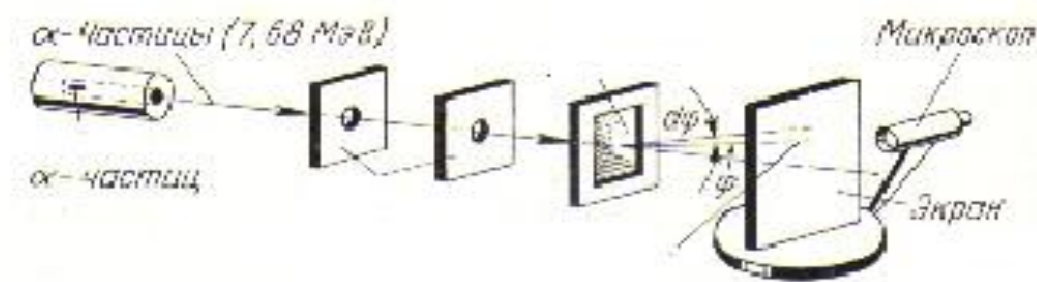
XVI BAP. ATOM WE ÝADRONYŇ GURLUŞY

§16.1. Atomyň we atom ýadrosynyň gurluşy. Rezerfordyň tejribeleri. Atomyň planetar modeli. Boruň kwant postulatlary

Atomyň çylşyrymly gurluşynyň açylmagy, atomyň ähli geljekki ösüşinde yz galdyrýan häzirki zaman fizikasynyň emele gelmeginde möhüm etap bolup, kwant mehanikasynyň döremegine getirdi.

Tomsonyň modeli. Alymlar atomyň gurluşy baradaky dogry düşünelere birbada gelmediler. Atomyň ilkinji modelini elektrony açan inlis fizigi J.J.Tomson teklip etdi. Tomsonyň pikirine görä, atomyň položitel zaryady onuň bütün göwrümini tutýar we şol göwrümde hemişelik dykzlyk bilen bölünendir. In bir ýönekeý atom bolan wodorodyň atomy 10^{-8} sm görnüşindäki şarjagaz (sfera) bolup, onuň içinde deňagramlyk ýagdaýda elektron ýerleşendir. Otrisatel elektronlar we ýadrodaky položitel zaryadlar özara itekleşme we dartýşma güýçleriniň täsiri netijesinde deňagramlyk ýagdaýda bolýarlar. Deňagramlyk ýagdaýyndaky elektronlar belli bir aralykda yrgyldyly hereket edýärler we ýagtylygy şöhlendirýärler. Emma Tomsonyň teklip eden bu modeli atomda položitel zaryadlaryň bölünişi barada geçirilen tejribelere doly garşy çykdy we bu model atom spektrindäki kanunalaýyklyklary düşündirip bilmedi. 1911-nji ýylda inlis fizigi E. Rezerfordyň geçiren tejribeleri düýbünden başga atom modeline getirdi.

Rezerfordyň tejribeleri. Radiý we birnäçe radiaktiw elementler α -bölejikleriniň çeşmeleri bolup hyzmat edip bilerler. Şol wagta çenli α -bölejikler barada köp zatlar bellidi: onuň massasy $6,7 \cdot 10^{-27}$ kg bolsa elektronyň massasyndan 8000 gezege golaý uly, položitel zaryady bolsa elektronyň zaryadyndan 2 esse uly bolan, ýagtylygyň tizligine golaý ($\approx 10^7$ m/s) tizlik bilen hereket edýän iki gezek ionlaşdyrylan geliý atomlarydyr. Rezerford α -bölejikleriň çeşmesi hökmünde radiýni ulanýar. Geçirilen tejribäniň netijelerine esaslanyp, ol birnäçe gram agramly daşjagazyň awtoulag bilen çaknyşanda onuň tizligini duýarlyk üýtgedip bilmeýşi ýaly, elektronlar hem massalarynyň kiçidigi sebäpli α -bölejikleriň traýektoriyasyny duýarlyk derejede üýtgedip bilmezler, α -bölejikleriň hereket ugruny bölejikleriň diňe atomyň položitel zaryadlanan bölegi üýtgedip biler diýen netijä gelýär.



16.1-nji surat.Rezerfordyň tejribesi.

Suratdan görnüşi ýaly, gurşun silindriň içinde ýerleşdirilen radiýden çykýan bölejikleriň dessesi diafragma hökmünde ulanylýan gurşun kollimatoryndan geçip,altynyň (barlanylýan material) ýukajyk folgasyna düşýär. Energiýasy 5 MeW bolan bölejikler galyňlygy millimetriň ýüzden bir üleşüne golaý bolan altyn folgasyndand geçenlerinde olaryň 20000-inden diňe biri 90° gyşarypdyr. α -bölejikler folgadan geçip darganlaryndan soň kükürtli sink bilen örtülen ýarym dury ekrana düşýär. Her bir bölejik ekrana urlanda ýalpyldy döreýär we ony mikroskop arkaly görmek bolýar.

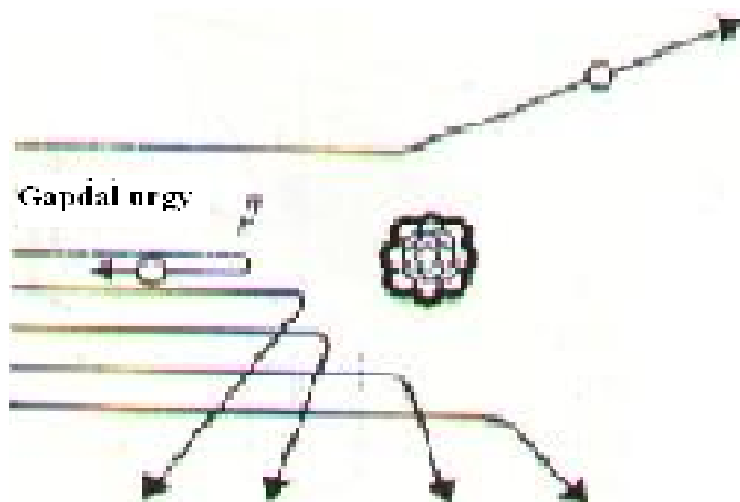
Gowy wakuumda abzalyň içinde folga ýokka, ekranda bölejikleriň insizje dessesiniň döreden ýagtylyk zolagy döräpdir. Emma, dessaniň ýolunda folga goýlanda α -bölejikler dargap, ekranyň köp meýdançasyny tutupdyrlar.

Rezerford tejribede alnan netijeleri seljerip, elektronlaryň massalaryna garanyňda iki esse uly massaly, ägirt uly tizlik bilen hereket edýän α -bölejikleriň gyşarmasy, eger-de folgada Tomsonyň teklipe eden modelindäki ýaly položitel zaryadlar бүтін göwrüm boýunça ýerleşmän, bir-birlerinden ýeterlik daşlykda topbak görnüşinde (örän kiçi ýerde) jemlenen bolsa, diňe şol halda α -bölejigiň yzyna zyňylmagy ýa-da gyşarmagy mümkindir diýen netijä gelýär. Şeýlelikde Rezerford, atom merkezinde ýadrosy bolan şol ýadroda-da onuň ähli massasy we ähli položitel zaryady toplanan kiçijik jisimlerdir diýen netijä gelipdir.

Ýadrodan dürli uzaklyklara gyşaran α -bölejikleriň traýektoriyasy 16.2-nji suratda görkezilendir. Dürli burçlara gyşaran α -bölejikleriň sanyny hasaplap, Rezerford ýadronyň ölçeglerini kesgitleýär.

Ýadronyň diametri dürli ýadrolar üçin dürli bolup, 10^{-12} - 10^{-13} sm töweregindedir. Atomyň özüniň ölçegi 10^{-8} sm. Diýmek, ýadronyň ölçegi atomyň ölçeginden yüz mün esse kiçidir. Ýadronyň zaryady elektronyň zaryady birlik deregine kabul edilende elektronyň zaryadyny

şol himiki elementiň Mendeleyewiň jedwelindäki tertip belgisine köpeldilmegine deňdir (Z_e).



16.2-nji surat. Ýadrodan gyşaran α – bölejikleriň trayektoriyalary.

Atomyň planetar modeli. Rezerfordyň tejribelerinden atomyň planetar modeli gös-göni gelip çykýar. Merkezinde položitel zarýadlanan ýadro ýerleşip, atomyň ähli massasy diýen ýaly şonda jemlenendir. Atom tutuşlygyna bitarapdyr. Şoňa görä atomyň içindäki elektronlaryň sany onuň ýadrosynda ýerleşen položitel zarýadly bölejikleriň (protonlaryň) sanyna deňdir. Elektronlar, planetalaryň Günüň daşynda aýlanyşlary ýaly, ýadronyň töwereginde hereket edýärler. Elektronlaryň hereketleriniň şeýle häsiýeti ýadronyň kulon güýçleriniň edýän täsiri bilen kesgitlenýär.

Elektronlar ýadronyň töwereginde orbitalar boýunça tizlenmeli hereket edýärler. Makswelliň elektrodinamikadaky kanunyna görä, tizlenip hereket edýän zarýad özüniň ýadronyň töweregindäki aýlanma ýygylgyna deň ýykylykly elektromagnit tolkunlaryny şöhlendirmelidir. Şöhlelen elektronlar öz energiýalaryny azaldýarlar, Nýutonyň mehanikasyna we Makswelliň elektrodinamikasyna esaslanyp geçirilen takyk hasaplamalara görä elektron 10^{-8} s çemesi wagtyň dowamynda ýadronyň üstüne gaçyp, atom öz ýaşamagyny bes etmelidir. Emma bu ýerde tejribe bilen nazaryýet gabat gelmeýär.

Atomlar durnukly. Olar ýaşamaklaryny bes etmeýärler. Bu ýerden atomyň içinde bolup geçýän hadysalary düşündirmek üçin nusgawy mehanikanyň kanunlaryny ulanyp bolmaýanlygy gelip çykýar.

Boruň kwant postulatlary. Tejribe bilen nazaryýetiň arasynda ýüze çykan bu gapma-garşylykdan 1913-nji ýylda Daniýa fizigi Nils Bor

çykalga tapdy. Ol ilkinji bolup ýagtylyk şöhlelenmelerini nazaryýeti baradaky çaklamalaryny üç sany postulat görnüşinde teklipti.

1-nji postulat. Elektronlar atomda birnäçe stasionar orbitalarda şöhlelenmän hereket edýärler.

2-nji postulat. Stasionar orbitalar bolup elektronyň hereket mukdarynyň momenti (impulsy) $m v_n r_n$ bütün sanlara deň bolan orbitalar hasaplanylýar.

$$m v_n r_n = n \frac{h}{2\pi} \quad (16.1)$$

bu ýerde n – bütün sanlar (baş kwant sany $n=1,2,3,\dots$)

h – plankyň hemişeligi $h=6,63 \cdot 10^{-34}$ J·s.

m – elektronyň massasy, v_n -elektronyň n -orbitadaky tizligi.

r_n – n orbitanyň radiusy.

3-nji postulat. Elektron islendik daşky (2-nji) stasionar orbitadan golaýdaky stasionar orbita geçende atom, energiýasy $h\nu=E_2-E_1$ deň bolan ýagtylyk üşüni (fotony) göýberýär. Şeýlelikde, ol $\Delta E=E_2-E_1$ ululykda energiýasyny ýitirýär.

Ýitirilen energiýanyň ululygy elektronyň haýsy orbitadan haýsysyna geçýändigine baglydyr.

Atom fotony ýuwdanynda oňa ters bolan proses bolup geçýär. Ol golaýdaky orbitadan daşky orbita geçip, oýandyrylan ýagdaýda bolýar.

§16.2. Atom ýadrosynyň düzümi. Izotoplar. Ýadro güýçleri

Atom ýadrosy protonlardan we neýtronlardan ybaratdyr. Protonlaryň položitel zaryady bolup, ululygy boýunça elektronyň zaryadyna deňdir, emma alamaty boýunça garşylyklydyr. Protonyň massasy elektronyň massasyndan 1836,12 gezek, neýtronyň massasy bolsa elektronyň massasyndan 1838,65 gezek uludyr.

Ýokarda belleýşimiz ýaly, dürli atom ýadrolarynyň çyzykly ölçegi $3 \cdot 10^{-13}$ -den 10^{-12} sm aralygyndadyr, ýagny atomyň diametrinden 100.000 gezek kiçidir. Biri - birinden 10^{-13} sm aralykda ýerleşen protonlar ägirt uly güýç bilen itekleşýänler-de bolsalar, olar böleklere dargap gitmeýärler. Ýadronyň şeýle durnuklylygy, ýadroaky bölejikleriň arasynda ýadro güýçleri diýen aýratyn güýçleriň barlygy bilen düşündirilýär. Islendik himiki elementiň atomy ýa-da ýadrosy şeýle belgilenýär.



bu ýerde: A-ýadrodaky protonlaryň we neýtronlaryň sanyna deň bolan massa sany, Z-ýadrodaky zaryadlanan bölejikleriň (protonlaryň) sanyna deň bolan zaryad sany. Ýadronyň zaryady Ze deň, e-elektronyň zaryadyna deň bolan elementar zaryad. Mysal üçin ${}^{235}_{92}U$. Uran ýadrosy 92 protondan, $A-Z=235-92=143$ neýtrondan ybaratdyr.

Ýadronyň massasy ony emele getirýän protonlaryň we neýtronlaryň massalarynyň jemine deňdir.

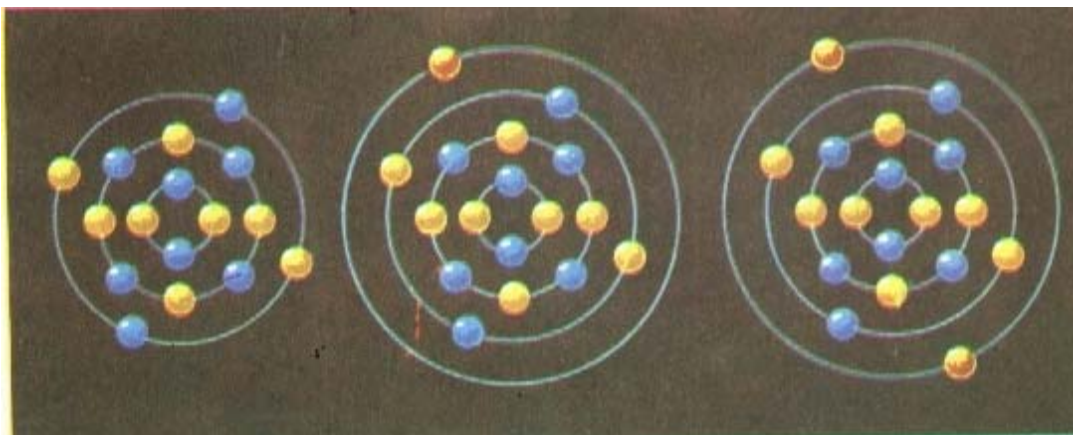
Birmeňzeş zaryadly, emma dürli massaly ýadrolara izotoplar diýilýär. Bir himiki elementiň izotoplarynyň birmeňzeş zaryad sany we dürli massa sany bardyr. Häzirki wagtda ähli himiki elementleriň izotoplarynyň bardygy anyklanyldy. Käbir elementleriň diňe durnuksyz (ýagny, radioaktiw) izotoplary bardyr. Tebigatda bar bolan elementleriň iň agyry uranyňam ($A=238,235$), iň ýeňili - wodorodyňam ($A=1,2,3$) izotoplary bardyr, Wodorodyň izotoplary biri-birinden massalary boýunça üç esse tapawutlanýarlar.

2_1H - izotopa deýteriý diýilýär. Ol durnukly (ýagny radioaktiw däl). Deýteriý kislorod bilen birleşende agyr suwy emele getirýär. Onuň fiziki häsiýetleri adaty suwuň häsiýetlerinden duýarlykly tapawutlanýar.

Atom massasy 3-e deň bolan (3_1H) wodorodyň izotopyna tritiý diýilýär. Ol ýarym dargama periody 12 ýyla deň bolan β -radioaktiwlidir.

16.3-nji suratda kislorodyň üç sany durnukly izotoplary görkezilendir. ${}^{16}_8O$, ${}^{17}_8O$, ${}^{18}_8O$.

Şol bir himiki elementiň izotopy bir meňzeş himiki häsiýete eýedir. Şu sebäpli-de, olar Mendeleyewiň periodiki jedwelinde bir öýjükde ýerleşýärler.



16.3-nji surat. Kislorodyň izotoplary.

Birmeňzeş massa sanly (A), emma (Z) zaryad sanlary dürli bolan ýadrolara izobarlar diýilýär. Meselem ${}^{79}_{36}Kr$, ${}^{79}_{36}Pb$. Izobarlar dürli fiziki we

dürli himiki häsiýetli elementler bolandyklary üçin olar Mendeleyewiň periodiki jedwelinde dürli öýjüklerde ýerleşýärler.

§16.3. Atom ýadrosynyň baglanyşyk energiýasy. Massa defekti

Materia hasaplanylýan bölejikleriň arasynda bize belli bolan üç sany özaratäsir güýçleri bardyr: Olar grawitasiýa, elektromagnit we ýadro güýçleridir. Grawitasiýa güýçleriniň uly massaly jisimleriň özara täsirinde ähmiýeti uly bolup, atom hadysalarynda olary hasaba almasaňda bolýar. Elektromagnit güýçleri iki sany nokatlanç zarýadlanan jisimleriň arasynda 10^{-8} sm aralyklarda täsir edýär. Ýadro güýçleri örän kiçi aralyklarda, ýagny atom ýadrosynyň diametrine golaýrak aralykda täsir edýär. Ýadroda ýerleşen bölejiklere iç tarapyndan ony döwjek bolýan ýeterlik uly bolan itekleşme Kulon güýçleri täsir edýär. Emma, atom ýadrosynda ýerleşen protonlary we neýtronlary ululygy boýunça ägirt uly bolan ýadro güýçleri dargamakdan saklaýar. (Nuklony ýadrodan çykarmak üçin örän uly iş etmeli, ýadro ägirt uly energiýa bermeli.)

Ýadrony aýry-aýry nuklonlara doly bölmek üçin gerek bolan energiýa ýadronyň baglanyşyk energiýasy diýilýär. Energiýanyň saklanmak kanunynyň esasynda baglanyşyk energiýasy aýry-aýry bölejiklerden ýadro emele gelende bölünip çykýan energiýa deňdir diýmek bolar.

Energiýanyň saklanmak kanunyna görä, ýadrodaky nuklonlaryň energiýasy olar birleşmeden öňki energiýalaryndan baglanyşyk (E_{bagl}) energiýalarynyň ululygyça azdyr. Beýleki tarapdan, massanyň we energiýanyň proporsionallyk kanunyna görä, sistemanyň energiýasynyň üýtgemesi sistemanyň massasynyň üýtgemegi bilen bolup geçýär:

$$\Delta E = \Delta mc^2 \quad (16.2)$$

Bu ýerde c -ýagtylygyň wakuumdaky tizligi. Seredýän halymyzda ΔE ýadronyň baglanyşyk energiýasydyr.

Çylşyrymly ýadronyň massasynyň ony emele getirýän bölejikleriň (protonlaryň we neýtronlaryň) massalarynyň jeminden kiçidigini tejribeler görkezýär. Olaryň tapawudyna massa defekti diýilýär. Ýagny,

$$\Delta M = M_0 - \sum_i m_i > 0 \quad (16.3)$$

bu ýerde: M_0 - ýadrony emele getirýän ähli bölejikleriň massalarynyň jemi. A_ZM - ýadronyň massasy. Belli bolşy ýaly:

$$M_0 = Zm_p + (A - Z)m_n \quad (16.4)$$

bu ýerde: m_p, m_n - deňşlilikde – protonyň we neýtronyň massalary.

$$\Delta M = Zm_p + (A - Z)m_n - {}^A_ZM \quad (16.5)$$

Massa defekti ýadrony ony emele getiren nuklonlara doly dargatmak üçin gerek bolan energiýanyň mukdaryny görkezýär. Ol ýokarda belleýşimiz ýaly, (16.2) formula bilen kesgitlenýär. ΔE ululyga izotopyň baglanyşyk energiýasy diýilýär we ol gönüden-göni ýadronyň durnuklylygynyň ölçegi bolup durýar.

Eger massa defekti atom massa birliginde ($1 \text{ a.m.b} = 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$) aňladylan bolsa, baglanyşyk energiýasyny şeýle aňlatma bilen kesgitlemek bolar:

$$\Delta E = 931 \Delta M \quad \text{MeV}. \quad (16.6)$$

bu ýerde 931 - proporsionallyk koeffisiýenti.

Baglanyşyk energiýasynyň ululygy barada şeýle mysal getirmek bolar: 4g geliý emele gelende 1,5-2 wagon daşkömür ýanan wagtynda bölünip çykýan energiýa deň energiýa bölünip çykýar.

Udel baglanyşyk energiýasynyň A massa sanyna baglylygy ýadronyň häsiýetleri barada möhüm maglumatlary berip biler.

Ýadronyň bir nuklonyna düşýän baglanyşyk energiýasyna udel baglanyşyk energiýasy diýilýär

$$\mathcal{E} = \frac{\Delta E}{A} = \frac{\Delta MC^2}{A} \quad (16.7)$$

Ýadro güýçleri tebigaty boýunça elektrik güýçleri däl, onuň ululygy bölejigiň zaryadyna bagly däl. Şonuň üçin neýtron-neýtron, proton-proton we neýtron-proton jübütleriniň arasynda täsir edýän ýadro güýçleri bir meňzeşdir. Emma, atom belgileriniň artmagy bilen protonlaryň arasyndaky elektrostatiği itekleşme güýçleri barha artýar. Şonuň üçin Mendeleýewiň periodiki jedweliniň ahyrynda ýerleşen elementleriň ýadrolarynyň, tallýýden başlap, radioakdiwdikleri tebygydyr.

§16.4. Radioaktiwlik. Alfa, beta we gamma-şöhlelenmeleri

Fransuz alymy Bekkerel gün ýagtylygy bilen şöhlelendirilen maddalaryň häsiýetlerini öwrenipdir. Ol bir gezek fotoplastinkany dykyz gara kagyza dolap, onuň üstüne uran duzunyň owuntygyny döküp, ony Günüň açyk ýagtysynda goýýar. Plastinka işlenip bejerilende onuň üstüne duz dökülen ýerleri garalypdyr. Ol uranyň rentgen şöhlelenmesine meňzeş, dury däl jisimleriň içinden geçip fotoplastinka täsir edýän nähilidir bir şöhlelenmäni döredýändigini görýär. Bekkerel bu şöhlelenme gün şöhleleriniň täsir etmeginde döreýändir diýip pikir edýär. Tejribäni gaýtalajak bolýar. Emma howa bulutly bolanlygy sebäpli, gaýtalap bilmeýär. Bekkerel plastinkanyň üstünde uranyň duzy bilen örtülen mis atanagyny goýup, olary stolyň çekerine salypdyr. Iki dün geçenden soň, plastinkany işläninde, onuň üstünde atanagyň açyk kölegesiniň görnüşinde garalmany görýär. Bu bolsa uranyň duzlarynyň öz-özünden haýsydyr bir şöhlelenmäni döredýändigini aňladýar. Diýmek, uran duzlary görünmeýän şöhleleri göýberýär, ýagtylanmany ýüze çykarýar, dury däl jisimleriň içinden geçýär, gazlary ionlaşdyrýar, fotoplastinkany garaldýar.

Şeýlelikde, Bekkerel tarapyndan 1896-njy ýylda açylan bu hadysa radioaktiwlik hadysasy adyny aldy. Uran duzlarynyň öz-özünden şöhlelenmegine tebigy radioaktiw şöhleleri diýilýär. Pýer Kýuri, Mariýa Sklodowskaýa Kýuri, Rezerford tarapyndan geçirilen soňky barlaglar tebigy radioaktiwlik diňe bir urana häsiýetli bolman aktiniý, toriý, poloniý we radiý ýaly köp sanly agyr himiki elementlere-de degişlidigini görkezdi (tertipleşdirilýän 83-den uly bolan himiki elementleriň ählisiniň radioaktiwligi soňra anyklanyldy).

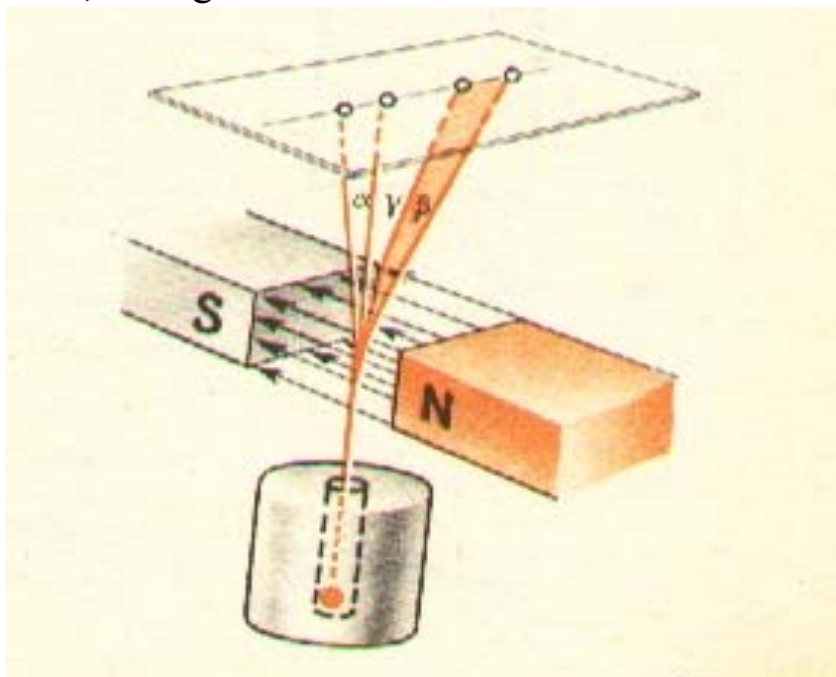
Radioaktiw şöhlelenmäniň çylşyrymly düzümi bolup, oňa alfa-şöhlesi, beta-şöhlesi we gamma şöhlesi adyny alan üç görnüşli şöhleler girýär. Bu şöhleleriň tebigaty we esasy häsiýetleri bilen tanyşalyň.

1. Alfa şöhleleri elektrik we magnit meýdanlarynda gyşarýarlar. Olar alfa şöhleleri adyny alan ${}^4_2\text{He}$ geliý atomynyň ýadrosynyň akymydyr. 16.3-nji suratda alfa bölejikleriň akymynyň ugruna perpendikulýar bolan magnit meýdanynda olaryň gyşaryşy görkezilendir. Her bir bölejigiň $+2e$ deň bolan položitel zarýady we 4 - deň bolan massa sany bardyr. Alfa bölejikleri radioaktiw elementiň ýadrosyndan 14000-20000 km/s tizlik bilen çykýar.

Maddanyň içinden geçip, α - bölejikler onuň atomlaryny ionlaşdyrýar, olara özüniň elektrik meýdany bilen täsir edýär. (maddanyň atomyndan elektronlary gysyp çykarýar). Atomlary ionlaşdyrmaga energiýalaryny harçlap, α - bölejikler togtaýar we özüne iki elektrony kabul edip, geliý atomyna öwrülýärler.

α - şöhleleriniň iň kiçi geçijilik ukyby bardyr, şol bir wagtyň özünde ionlaşdyryjy ukyby has-da uludyr. (1 sm aralykda 30.000 jübüt iony emele getirýär). Galyňlygy 0.1mm bolan kagyz gatlagy α -bölejikler üçin eýýäm dury däldir. Eger gurşun plastinkasyndaky deşigi kagyz listi bilen ýapsak, onda fotoplastinkada α -şöhlelenmä degişli menek görünmez. Ol galyňlygy 0,06 mm bolan alýumin gatlagynda doly ýuwdulýar.

2. Beta şöhleleri elektrik meýdanynda-da, magnit meýdanynda-da güýçli gyşarýarlar. Olar β -bölejikleri diýip atlandyrylýan elektronlaryň akymydyr. Olaryň massasy 7350 gezek α -bölejikleriň massasyndan kiçidir. β -bölejikleriň orta tizligi 160000 km/s golaý. Suratda magnit meýdanynda β -bölejikleriň gyşaryşy görkezilendir. Şol bir radioaktiw elementiň ýadrosy tizligi 0-a golaý bolan we ýagtylygyň tizligine golaý bolan β -bölejikleri göýberýär. Bu bolsa β -bölejikleriň dessesiniň magnit meýdanynda giňelmegine getirýär. β -bölejikleriň massalary kiçi, tizlikleri uly, bir elementar zaryada eýe, ionlaşdyryjy ukyby α - bölejikleriňkiden 100 gezek kiçi. Olaryň ylgaw ýoly (ýokary energiýada) howada 40 m, alýuminide 2 sm, biologiki tende - 6 sm. deňdir.



16.4-nji surat. α, β, γ - şöhleleriň magnit meýdanynda gyşaryşy.

3. Gamma şöhleleri. Öz häsiýetleri boýunça γ -şöhleleri roentgen şöhlelerini ýada salýar. Emma olaryň geçirijilik ukyby rentgen

şöhleleriniňkiden has-da uludyr. γ - şöhleleri has gysga tolkun uzynlygy bolan elektromagnit tolkunlarydyr ($\gamma=10^{-8}$ - 10^{-11} sm). Olaryň tizligi ähli elektromagnit tolkunlarynyň tizligi ýaly - 300000 km/s golaýdyr. Ýokarda belleýşimiz ýaly, rentgen we γ şöhleleri bir-birlerinden öz gelip çykyşlary we energiýalary boýunça tapawutlanýarlar. Rentgen şöhleleri çalt hereket edýän elektronlar birden togtadylan wagtynda ýüze çykýan bolsa, γ - şöhleleri ýadro öwrülmelerinde ýüze çykýar. Onuň islendik madda bilen özara täsirinde üç sany häsiýeti ýüke çykýar: fotoeffekt, komptonyň effekti we elektron-pozitron jübütiniň emele gelmegidir.

§16.5. Süýşme düzgüni. Radioaktiw dargama kanuny. Ýarymdargama periody

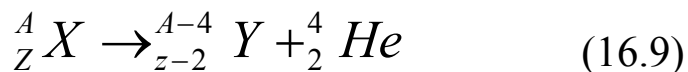
Radioaktiw şöhlelenmede şöhlelenýän elementiň atomy başga bir elementiň atomyna öwrülýär. Bu proses süýşme düzgünine boýun egýär. Bu düzgün radioaktiw dargama mejbur bolan izotopyň massa sanyny emele gelen izotopyň massa sany bilen baglanşdyrýar.

β bölejik göýberilende ýadronyň zaryady bir birlik artýar, β -bölejigiň massasynyň kiçidigi sebäpli massa sany üýtgemän galýar. Şeýlelikde, β -dargamada radioaktiw element atom belgisi bir birlik uly bolan elemente öwrülýär, massa öňküligine galýar. Başgaça aýdanymyzda, β - dargamada element massa sany üýtgemesiz periodiki ulgamda bir belgi saga süýşýär, ýagny:



Mysal üçin: ${}_{83}^{210}\text{Bi} \rightarrow {}_{84}^{210}\text{Po} + \beta^-$

α - bölejik göýberilende ýadronyň zaryady iki birlik, massa sany bolsa - 4 birlik kemelýär, ýagny, α - dargamada elementiň massa sany dört birlik kemelip, ol iki belgi çepe süýşýär:



Mysal üçin ${}_{84}^{210}\text{Po} \rightarrow {}_{82}^{206}\text{Pb} + {}_2^4\text{He}$

Periodiki ulgamda radioaktiw elementiň süýşmesini kesgitleýän (16.8) we (16.9) düzgüne radioaktiw süýşme düzgüni diýilýär. Ol ilkinji gezek 1913-nji ýylda inlis fizigi we himigi J.Soddi tarapyndan we ondan bihabar, nemes fizigi we himigi K.Faýans tarapyndan açylýar (Soddi-Faýans kanuny).

Radioaktiv dargama radioaktiv elementiň atom sanynyň kem-kemden azalmagyna getirýär. Ol tötänleýin häsiýete eýe bolup, haýsy atomyň haçan dargajakdygyny öňünden aýtmak mümkin däl. Ýöne diňe her bir atomyň kesgitli wagt aralygynda dargama ähtimallygyny aýtmak bolar.

dt wagtda dargaýan dN atomlaryň sany, radioaktiv elementiň atomlarynyň umumy N sanyna we dargama wagtyna proporsionaldyr.

$$dN = -\lambda N dt, \quad (16.10)$$

bu ýerde λ - berlen elementiň proporsionallyk koeffisiýenti oňa dargama hemişeligi diýilýär. Minus alamaty radioaktiv elementiň atomlarynyň sanynyň wagta görä azalýandygyny aňladýar. (16.10) deňlemeden, tapýarys

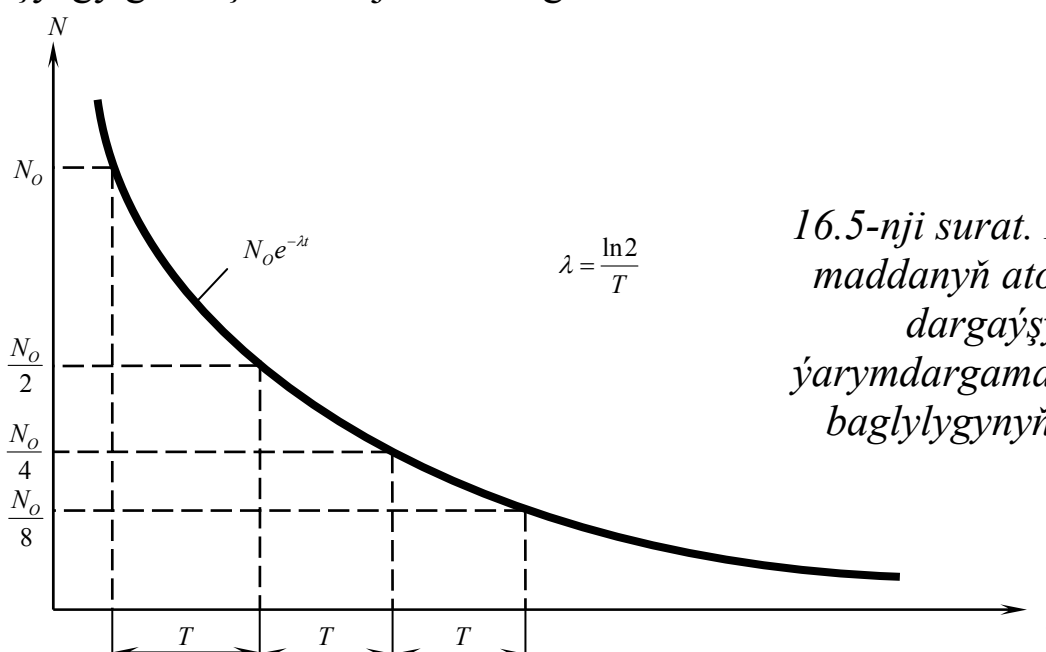
$$\lambda = \frac{dN}{N dt}$$

Ýagny, dargama hemişeligi berlen elementiň atomlarynyň sanynyň wagta baglylykda göräli azalmagyna deňdir.

(16.10) deňlemäni $t=0$ -dan t aralygynda integrirläp, alýarys

$$N = N_0 e^{-\lambda t} \quad (16.11)$$

bu ýerde: N_0 - başlangyç wagt pursatyndaky elementiň atomlarynyň sany, N - şol bir elementiň t wagt geçeninden soňky galan atomlarynyň sany. (16.11) gatnaşyga radioaktiv dargama kanuny diýilýär. Bu kanunyň çyzgy görnüşi 16.5-nji suratda görkezilendir.



16.5-nji surat. Radioaktiv maddanyň atomlarynyň dargaýşynyň ýarymdargama periodyna baglylygynyň çyzgysy.

Radioaktiv elementiniň dargaýşyny häsiýetlendirmek üçin ýarymdargama periody diýen düşünje girizilýär.

Berlen elementiň atomlarynyň mukdarynyň iki esse azalýan wagtyna ýarymdargama periody T diýilýär. (16.11) aňlatmadan

$$e^{-\lambda T} = \frac{1}{2}, \text{ bu ýerden : } T = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{0,693}{\lambda} \quad (16.12)$$

Dargama hemişeligine ters bagly bolan ululyga radioaktiv atomyň ortaça ýaşayan wagty τ diýilýär.

$$\tau = \frac{1}{\lambda}, \text{ diýmek, } T = \tau \ln 2$$

Bu ýerden: $T = \tau \ln 2$; $\tau = 1,44 \cdot T$. Ýagny, radioaktiv atomyň ortaça ýaşayan wagty ýarymdargama periodyndan 1,5 essä golaý uly.

Ýarymdargama periodyna düşünmek üçin şeýle mysal getireliň: Poloniýniň $^{210}_{84}\text{Po}$ periody $T=140$ gün. Diýmek, 1g poloniýden 140 günden soňra 0,5g galýar. Ýenede 140 günden 0,5 gramyň ýary, ýagny 0,25g galýar. Şeýlelikde, her 140 günden poloniniň galan atomlarynyň sany ýarym-ýarymdan azalyp barýar. Geň galaýmaly fakt, Poloniýniň 560 günden soňky galan 1/16 gramy ähli häsiýetleri boýunça şol başdakysyndan hiç hili tapawutlanmaýar. Bu bolsa ýadronyň häsiýetleriniň kem-kemden üýtgäp, ewolýusiýa netijesinde ýadronyň dargaýandygyny aňlatmaýar. Diýmek, radioaktiv ýadronyň häsiýeti wagtyň geçmegi bilen üýtgemeyär, „ýadro garramaýar“. Bu häsiýet ähli radioaktiv elementlere-de, ähli radioaktiv öwrülmelere-de degişlidir.

Radioaktiv elementiň lsekynyň dowamynda dargaýan atomlarynyň sanyna, bu elementiň aktiwligi diýilýär.

$$a = \left| \frac{dN}{dt} \right|, \quad (16.13)$$

(16.10), (16.11) we (16.12) aňlatmalardan: $a = \lambda N = \frac{N \ln 2}{T}$ ýagny, elementiň aktiwligi onuň mukdaryna göni proporsional bolup, ýarymdargama periodyna ters proporsionadyr. Aktiwligiň birligi deregine 1g radiniň aktiwligi kabul edilen, oňa Kýuri diýilýär (Ku).
1 Ku=3,7·10¹⁰ dargama/s

§16.6. Radioaktiv elementleriň topary

Himiki elementiň radioaktiv dargamasynyň önümi-de radioaktiv bolup biler. Şonuň üçin radioaktiv dargama prosesi köp sanly aralyk derejelerden geçip, radioaktiv elementleriň zynjyryny emele getirýär, ahyrynda bolsa durnukly elementde gutarýar. Elementleriň şeýle zynjyryna radioaktiv maşgalalar diýilýär.

Häzirki wagta çenli dört sany radioaktiv maşgalanyň barlygy anyklanyldy.

1. Uran – radiýniň maşgalasy $^{238}_{92}\text{U}$ - den başlanýar ($T = 4,5 \cdot 10^9$ ýyl) we durnukly $^{206}_{82}\text{Pb}$ gurşun izotopynda gutarýar.
2. Neptunlaryň maşgalasy: transuran elementi bolan neptuniýden $^{237}_{93}\text{Np}$ başlanýar ($T = 2,2 \cdot 10^6$ ýyl) we $^{209}_{83}\text{Bi}$ wismut izotopynda gutarýar. Şu ýerde bir zady bellemek gerek. Tebigy neptuniý doly dargap gutaranlygy sebäpli Ýerde ýok, häzirki wagtda ony emeli ýadro reaksiýalary arkaly alýarlar.
3. Aktiniýleriň maşgalasy $^{235}_{92}\text{AcU}$ - aktiniý urandan başlanýar ($T = 7,3 \cdot 10^8$ ýyl) we $^{207}_{82}\text{Pb}$ gurşunyň izotopynda gutarýar.
4. Toriýleriň maşgalalary: $^{232}_{90}\text{Th}$ toriýden başlap ($T = 1,4 \cdot 10^{10}$ ýyl) $^{208}_{82}\text{Pb}$ gurşunyň izotopynda gutarýar.

Jedwel. Uran toriýniň radioaktiv maşgalasynyň häsiýetnamalary.

<i>T/n</i>	<i>Element</i>	<i>Belgilenişi</i>	<i>Dargamanyň görnüşi</i>	<i>Ýarymdargama periody</i>
1	Uran	$^{238}_{92}\text{U}$	α	$4,5 \cdot 10^9$ ýyl
2	Toriý	$^{234}_{90}\text{Th}$	β	24,1 gün
3	Protaktiniý	$^{234}_{91}\text{Ra}$	β	1,14 min
4	Uran	$^{234}_{92}\text{U}$	α	$2,7 \cdot 10^6$ ýyl
5	Toriý	$^{230}_{90}\text{Th}$	α	$8,2 \cdot 10^4$ ýyl
6	Radiý	$^{226}_{88}\text{Ra}$	α	1622 ýyl
7	Radon	$^{222}_{86}\text{Rn}$	α	3,8 gün
8	Poloniý	$^{218}_{84}\text{Po}$	α	3,05 min
9	Gurşun	$^{214}_{84}\text{Pb}$	β	26,8 gün
10	Wismut	$^{214}_{83}\text{Bi}$	β, α	19,7 min
11	Poloniý	$^{214}_{84}\text{Po}$	α	$1,5 \cdot 10^{-4}$ S
12	Talliý	$^{210}_{81}\text{Tl}$	β	1,32 min
13	Gurşun	$^{210}_{82}\text{Pb}$	β	22,2 ýyl
14	Wismut	$^{210}_{83}\text{Bi}$	β	4,97 gün
15	Poloniý	$^{210}_{84}\text{Po}$	α	139 gün
16	Gurşun	$^{206}_{82}\text{Pb}$	durnukly	∞

Ýokardaky jedwelde uran toriýniň radioaktiw maşgalasynyň ähli agzalary ýerleşdirilen. (Enelik elementleriň aşagynda gyzyk elementleri ýerleşdirilen) jedwelde radioaktiw dargamanyň görnüşleri, ýarymdargama periodlary görkezilendir.

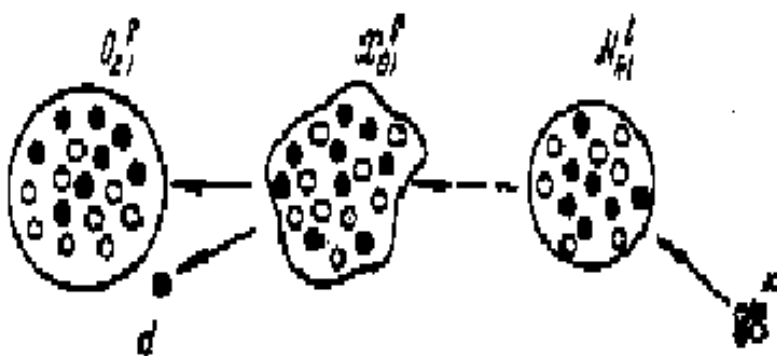
Şu jedwelden we süýşme düzgüninden peýdalanyp, ähli zynjyr boýunça şu maşgalada bolup geçýän radioaktiw öwrülmeleri häsiýetlendirmek bolar.

§16.7. Ýadro reaksiýalary. Emeli radioaktiwlik

Tebigy radioaktiwlik hadysasyny içgin öwrenmeklik radioaktiw dargamanyň netijesinde bir elementiň ýadrosynyň başga bir elementiň ýadrosyna öwrülmegi atom ýadrosynyň içinde bolup geçýän prosesler bilen häsiýetlendirilýändigini doly anyklandy. Diýmek, emeli radioaktiwligi amala aşyrmak üçin, diňe elementiň ýadrosyna täsir edip ony dargamaga mejbur etmeli. Bu meseläniň üstünde dünýäniň alymlary işläp başadylar.

Şeýle maksat bilen ilkinji etmeli ýadro reaksiýasy 1919-njy ýylda inlis alymy E.Rezerford tarapyndan amala aşyryldy. Reaksiýa azotdan doldurylan Wilsoneyň kamerasynda geçirilýär. Ol azodyň ýadrosyny bombalamak üçin α - bölejikleri ulanýar. Azot şöhlelenendirilelinden soňra kamerada kislorod atomynyň izotopy we wodorodyň atomynyň ýadrosy, ýagny proton emele gelýär.

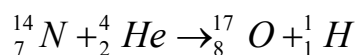
Bu reaksiýa şeýle tertipde geçýär.



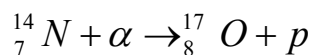
16.6-njy surat. Azodyň kisloroda öwrüliş reaksiýasy.

α - bölejik azodyň atomynyň ýadrosyna degip ${}^{14}_7\text{N}$, onda ýuwdulýar, durnuksyz aralyk ýadro - ftor izotopynyň ýadrosy ${}^{18}_9\text{F}$ emele gelýär. Ol şol pursatda özünden bir proton göýberip, kislorodyň ${}^{17}_8\text{O}$

izotopynyň atomynyň ýadrosyna öwrülýär. Bu reaksiýany şeýle görnüşde ýazmak bolar:



ýa-da

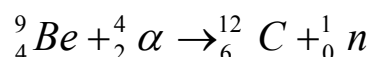


Reaksiýa netijesinde ilkinji gezek protonyň bardygy ýüze çykarylýar.

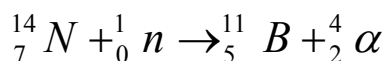
Jedwel. Emeli-radioaktiw izotoplaryň häsiýetnamalary.

<i>t/n</i>	<i>Element</i>	<i>belgilenişi</i>	<i>Dargamanyň görnüşü</i>	<i>Ýarymdargama periody</i>
1	Uglerod	${}^{14}_6\text{C}$	β^-	5720 ýyl
2	Azot	${}^{13}_7\text{N}$	β^+	9,9 min
3	Kislород	${}^{15}_8\text{O}$	β^+	2,1 min
4	Natriý	${}^{24}_{11}\text{Na}$	β^-, γ	2,6 ýyl
5	Fosfor	${}^{32}_{15}\text{P}$	β^-	14,3 gün
6	Kükürt	${}^{35}_{16}\text{S}$	β^-	87,1 gün
7	Kaliý	${}^{42}_{19}\text{K}$	β^-, γ	12,4 sagat
8	Kalsiý	${}^{45}_{20}\text{Ca}$	β^-	152 gün
9	Marganes	${}^{56}_{25}\text{Mn}$	β^-, γ	26 sagat
10	Demir	${}^{59}_{26}\text{Fe}$	β^-, γ	46,3 gün
11	Kobalt	${}^{60}_{27}\text{Co}$	β^-, γ	5,3 ýyl
12	Sink	${}^{65}_{30}\text{Zn}$	β^+, γ	250 gün
13	Myşýak	${}^{76}_{33}\text{As}$	β^-, γ	26,8 sagat
14	Ýod	${}^{131}_{53}\text{I}$	β^-, γ	8 Gün

1932-nji ýylda inlis fizigi D.Çedwik tarapyndan geçirilen ýadro reaksiýasyna seredeliň. Berilliý ${}^9_4\text{Be}$ plastinkajygy α - bölejik bilen bombalanynda plastinka α - bölejigi tutup, özünden neýtron göýberýär we uglerodyň ${}^{12}_6\text{C}$ ýadrosyna öwrülýär.



Berilliýden çykan neýtron azotdan doldurylan Wilsonyň kamerasyna barýar we azodyň ${}^{14}_7\text{N}$ ýadrosyna degip, boruň ${}^{11}_5\text{B}$ ýadrosyny hem-de α - bölejigi emele getirýär.



Häzirki wagtda her bir himiki elementiň birnäçe izotoplarynyň bardygy ýüze çykarylady. Olaryň umumy sany 1500-den-de gowurakdyr.

Jedwelde biologiýada we oba hojalygynda has köp ulanylýan emeli-radioaktiw izotoplaryň birnäçesiniň häsiýetnamalary görkezilendir.

§16.8. Radioaktiw izotoplaryň ulanylyşy we radioaktiw şöhlemenmäniň biologiki täsiri

Radioaktiw izotoplar ylymda, saglyk ulgamynda we tehnikada γ - şöhleleriň oňaly çesmeleri bolup giňden ulanylýar. Esasan hem radioaktiw kobalt ${}^{60}_{27}\text{Co}$ peýdalanýar. Olar oba hojalygynda-da giň ulanyşa eýe boldy. Ösümlikleriň - pagtanyň, kelemiň, kartoşkanyň rediskanyň we başga-da dürli ösümlikleriň tohumlaryny γ - şöhleleriniň uly bolmadyk dozasy bilen şöhlelendirmeklik belli bir derejede olaryň hasylylygyny artdyrýar.

Radiasiýanyň uly dozalary ösümliklerde we mikroorganizmlerde mutasiýa döredip, käbir ýagdaýlarda täze oňat häsiýetli mutasiýalaryň ýüze çykmagyna getirýär. Şeýle ýol bilen bugdaýyň, noýbanyň pagtanyň we beýleki ekinleriň gymmatly sortlary döredilýär, şeýle hem antibiotikleri ösdürmekde ulanylýan ýokary önümlü organizmler alynýar. Radioaktiw izotoplaryň γ - şöhlemenmesi zyýanly mör-möjekler bilen göreşde we iýmit önümlerini konserwirlemekde hem ulanylýar.

Şöhlemenmäniň biologiki täsiri. Radioaktiw maddalaryň şöhlemenmeleri ähli janly organizmlere juda güýçli täsir edýär. Hatda, doly siňdirilende jisimiň temperaturasyny bary ýogy $0,001^{\circ}\text{S}$ ýokarlandyrýan has gowşak şöhlemenme-de öýjükleriň ýaşayşyny bozýar. Sebäbi, janly öýjük aýry-aýry ýerlerine sähelçe zyýan ýetende-de kadaly ýaşap bilmeýän çylşyrymly mehanizmdir.

Janly organizmlere şöhlemenmäniň täsiri şöhlemenme dozasy bilen häsiýetlendirilýär. Ol şeýle formula bilen kesgitlenýär:

$$D = E / m$$

bu ýerde D - şöhlemenmäniň siňdirilen dozasy, E - ionlaşdyryjy şöhlemenmäniň siňdirilen energiýasy, m – şöhlelendirilýän maddanyň massasy. Ölçeg birligi $1\text{J}/1\text{kg}=1$ greý (Gr). Şöhlemenme bilen işleýän

adamlar üçin bir ýylky şöhlelenme dozasy 0,05 Gr. Gysga wagtda alnan 3-10 Gr şöhlelenme dozasy ölüm howpludyr. Şöhlelenme dozasy rentgenlerde-de ölçenýär $1R \approx 0,01Gr$. deňdir.

ULANYLAN EDEBİYATLAR:

1. Фриш С.Э., Тиморева А.В. Курс общей физики.Т. I-III. - М.:Высшая школа, 1960.
2. Грабовский Р.И. Курс физики. (учебное пособие для сельскохозяйственных институтов).-М.: Лань,2007.
3. Детлаф А.А., Яворский Б.М. Курс физики. –М.:Высшая школа, 1989.
4. Зисман Г.А., Тодес О.М.Курс общей физики.Т. 1-3. –М.: Наука,1970.
5. Дмитриева В.Ф. Курс физики. –М.: Высшая школа, 2005 .
6. Трофимова Т.И. Курс физики. -М.: Высшая школа, 2003.
7. Савельев С.П. Курс общей физики. м.1-5. М.: Астрель-2007г.
8. Белановский А.С. Основы биофизики в ветеринарии -М.: ВО. Агропромиздат,1989.
9. Волькенштейн М.В. Биофизика. -М.: Наука, 1988.
10. Ремизов А.Н. Медицинская и биологическая физика.- М.:Высшая школа, 1987.
11. Бондарев Б.В., Спирин Г.Г. Курс общей физики. -М.: 2005.
12. Стрелков С.П. Механика. –М.: 1956
13. Кикоин А.К., Кикоин И.К. Молекулярная физика. –М.: 1976.
14. Калашников С.Г. Электричество. –М.: 1975.
15. Волькенштейн В.С. Сборник задач по общему курсу физики. М.: 1985.
16. Çaryýew A.A. Fizikanyň esasy kanunlary. -A: Türkmen döwlet neşirýat gullugy, 2001.
17. Allakow Ö., Gurbangeldiýew G. Mehanika.-A: Türkmen döwlet neşirýat gullugy, 2006.
18. Nurgeldiýew A., Bekmyradow Ö., Akmyradow B.Molekulýar fizika we termodinamika.- A: Türkmen döwlet neşirýat gullugy, 2006.
19. Gurbanmuhammedow A. Elektrik we magnit hadysalary.- A: Türkmen döwlet neşirýat gullugy, 2006.
20. Ataýew A. Atom we ýadro fizikasy .- Aşgabat:Türkmen döwlet neşirýat gullugy, 2006.
21. Awliýakulyýew J., Ataýew G. Kwant fizikasy.- Aşgabat:Türkmen döwlet neşirýat gullugy, 2008.
22. Gurbangeldiýew G., Allakow Ö., Toýlyýew G., Jumagulyýew R. Fizikadan düşündirişli sözlük.- Aşgabat:Türkmen döwlet neşirýat gullugy, 2005.

23. Meredow M.M., Bäşimow B.R., Ataýew A.A. Inženerçilik fizikasy. (amaly okuwlaryň toplумы) -A.: 2004.
24. Meredow M.M. Inženerçilik fizikasy. (umumy okuwlaryň toplумы). –A.: 2005.
25. Meredow M.M. Inženerçilik fizikasy. (tejribe okuwlaryň toplумы). –A.: 2005.
26. Мяликгулиев Г. Руско-Туркменский словарь физических терминов. –А.: 1973.
27. Кухлинг Х. Х. Справочник по физике.- М.: Наука, 1982.

MAZMUNY

<i>Giriş</i>	9
I. MEHANİKANYŇ FİZİKİ ESASLARY	
I bap. Öňe bolan hereketiň kinematikasy	
§1.1. Material nokat. Hasaplama sistemasy. Traektoriya	13
§1.2. Tizlik	14
§1.3. Tizlenme. Tangensial we normal tizlenmeler	16
§1.4. Burç tizligi we çyzyk tizligi. Olaryň arasyndaky baglanyşyk	19
II bap. Dinamikanyň esasy kanunlary	
§2.1. Nýutonyň birinji kanuny. Massa we güýç	22
§2.2. Nýutonyň ikinji kanuny	23
§2.3. Nýutonyň üçünjü kanuny	25
§2.4. İmpulsyň (hereket mukdarynyň) saklanmak kanuny	26
§2.5. Bütindünyä dartyşma kanuny	28
§2.6. Bütindünyä dartyşma kanunynyň kömegi bilen kosmiki tizlikleriň kesgitlenilişi	29
III bap. Gaty jisimleriň aýlanma hereketi	
§3.1. Gozganmaýan okuň töwereginde gaty jisimiň aýlanmagy	31
§3.2. Aýlanma momenti we inersiýa momenti. Şteýneriň teoreması	31
§3.3. Aýlanma hereketiň dinamikasynyň esasy deňlemesi	36
§3.4. Impuls momentiniň saklanmak kanuny	37
IV bap. İş we energiýa	
§4.1. İş we kuwwat	39
§4.2. Kinetik we potensial energiýalar. Sistemanyň mehaniki energiýasynyň saklanmak we öwürlmek kanuny	41
§4.3. Aýlanýan we typýan gaty jisimiň kinetik energiýasy	44
§4.4. Absolýut maýyşgak we maýyşgak däl urgular	45
V bap. Mehaniki yrgyldylar we tolkunlar	
§5.1. Mehaniki yrgyldylar. Yrgyldyly herekedi häsiýetlendirýän ululyklar	51
§5.2. Garmoniki yrgyldyly hereketde tizlik we tizlenme	53
§5.3. Maýatnikleriň yrgyldylary, pružinli maýatnik	56
§5.4. Garmoniki yrgyldyly hereketiň energiýasy	60

§5.5. Erkin we mejbury yrgyldylar. Rezonans	61
§5.6. Mehaniki tolkunlar. Kese we boý tolkunlar. Tolkunyň ýaýramak tizligi. Tolkun uzynlygy	63
§5.7. Durujy tolkunlar	66
§5.8. Ultrasesler we onuň ulanylyşy	71

VI bap. Suwuklyklaryň we gazlaryň mehanikasy

§6.1. Suwuklyklardaky we gazlardaky basyş	75
§6.2. Suwuklyklaryň durnugyşan akymy. Üznüksizligiň deňlemesi	78
§6.3. Bernulliniň deňlemesi. Suwuň akymyndaky basyş	79
§6.4. Suwuklyklarda we gazlarda jisimiň hereketi. Şepbeşiklik (içki sürtülme) koeffisiýenti. Laminar we turbulent akymlar	84
§6.5. İçki sürtülme koeffisiýenti. Kesgitlemekligiň usullary. Stoksuň usuly	86

II. MOLEKULÝAR FIZIKINYŇ ESASLARY WE TERMODINAMIKA

VII bap. Ideal gazlaryň molekulýar-kinetik teoriýasynyň esaslary

§7.1. Termodinamiki ululyklar	89
§7.2. Ideal gaz barada düşünje. Izoprosesler	91
§7.3. Ideal gaz halynyň deňlenmesi	94
§7.4. Uniwersal gaz hemişeliginiň fiziki manysy	96
§7.5. Gazlaryň molekulýar-kinetik teoriýasynyň esasy deňlemesi	97
§7.6. Molekulalaryň tizlikleri boýunça paýlanyşy. Makswelliň kanuny	103
§7.7 Barometrik formula	105
§7.8 Bölejikleriň beýiklige görä paýlanyşy. Bolsmanyň kanuny	107
§7.9 Çaknyşmalaryň sany we molekulalaryň erkin ýolunyň ortaça uzynlygy. Molekulalaryň effektiv diametri	108
§7.10. Geçiş hadysalary	109

VIII bap. Termodinamikanyň fiziki esaslary

§8.1. Ulgamyň içki energiýasy	114
§8.2. Göwrüm üýtgändäki gazyň işi	115
§8.3. Ýylylyk sygymy	117

§8.4. Termodinamikanyň birinji kanuny we onuň gazlardaky izoprosesler üçin ulanylşy	118
§8.5. Adiabatik proses	121
§8.6. Molekulalaryň erkinlik derejesi	125
§8.7. Energiýanyň erkinlik derejesi boýunça bölünişi	126
§8.8. Gazyň ýylylyk sygymynyň kesgitlenişi	127
§8.9. Aýlawly proses. Öwrülşikli we öwrülşiksiz prosesler	130
§8.10. Termodinamikanyň ikinji başlangyjy (kanuny)	132
§8.11. Karnonyň aýlawly hadysasy. Ýylylyk maşynynyň peýdaly täsir koeffisiýenti	135
§8.12. Entropiýa	137

IX bap. Real gazlar, suwuklyklar we gaty jisimler

§9.1. Molekulalaryň özara täsir güýçleri	139
§9.2. Wan-der-Waalsyň deňlemesi	140
§9.3. Wan-der-Waalsyň izotermalary we olaryň derňewi	142
§9.4. Maddanyň kritiki haly. Faza geçişleri	144
§9.5. Real gazyň içki energiýasy	146
§9.6. Joulyň-Tomsonyň effekti	147
§9.7. Suwuklyklaryň häsiýetleri. Üst dartylmasy	149
§9.8. Suwuklyk bilen gaty jisimiň araçägindäki hadysalar. Öllenmek	152
§9.9. Kapillýar hadysalar	154
§9.10. Gaty jisimler we olaryň häsiýetleri. Kristallik we amorf jisimler	156
§9.11. Gaty jisimleriň ýylylyk hereketi we ýylylyk sygymy. Dýulongyň - Ptiniň formulasy	158
§9.12. Agregat hallaryň üýtgemegi	160

III.ELEKTROSTATIKA WE HEMIŞELIK ELEKTRIK TOGY

X bap. Elektrostatika

§10.1. Elektrik zaryadynyň saklanmak kanuny	165
§10.2. Kulonyň kanuny	167
§10.3. Elektrostatiki meýdany. Elektrik meýdanynyň güýjenmesi	169
§10.4. Elektrik dipoly we onuň meýdany	173
§10.5. Elektrik güýç çyzyklary. Güýjenme wektorynyň akymy. Elektrik süýşmesi	175
§10.6. Ostrogradskiniň –Gaussyň teoremasy	177
§10.7. Elektrostatik meýdanyň işi	180

§10.8. Potensial. Ekwipotensial üstler	181
§10.9. Elektrostatiki meýdanyň güýjenmesi bilen potensiallaryň tapawudynyň arasyndaky baglanyşyk	184
§10.10. Geçirijiler we dielektrikler. Dielektrikleriň polýarlanyşy	186
§10.11. Geçirijileriň elektrik sygymy	189
§10.12. Kondensatorlar	192
§10.13. Elektrostatiki meýdanyň energiýasy. Energiýanyň dykyzlygy	196

XI bap. Hemişelik elektrik togy

§11.1. Toguň güýji. Potensiallaryň tapawudy. Elektrik hereketlendiriji güýji	199
§11.2. Omun kanuny. Geçirijileriň garşylygy	204
§11.3. Geçirijileriň yzygiderli we parallel birikdirilişi	205
§11.4. Kirhgofyň kanunlary	207
§11.5. Toguň işi we kuwwaty. Joulyň-Lensiň kanuny	211
§11.6. Metallaryň elektrik geçirijiliginiň nusgawy elektron nazaryýeti	213
§11.7. Metallaryň nusgawy nazaryýetinden elektrik togunyň esasy kanunlarynyň çykarylyşy	214
§11.8. Metallaryň garşylygynyň temperatura baglylygy. Aşageçirijilik	218
§11.9. Termoelektron emissiýasy we onuň ulanylyşy	221
§11.10. Birikmedäki potensiallar tapawudy. Woltanyň kanunlary	225
§11.11. Termoelektrik hadysalary we olaryň ulunylyşy	227
§11.12. Gazlarda elektrik togy. Gazlaryň ionlaşmagy. Özbaşdak däl gaz zaryadsyzlanmalary	232
§11.13. Özbaşdak gaz zaryadsyzlanmalary we olaryň görnüşleri	234
§11.14. Plazma we onuň häsiýetleri	240
§11.15. Suwuklyklarda elektrik togy	242
§11.16. Ýarymgeçirijilerde elektrik togy. Ýarymgeçirijileriň umumy häsiýetleri	245
§11.17. Ýarymgeçirijileriň hususy elektrik geçirijiligi	246
§11.18. Ýarymgeçirijileriň garyndyly elektrik geçirijiligi	250
§11.19. p we n – tipli ýarymgeçirijileriň kontakty arkaly elektrik togunyň geçişi	253

XII bap. Elektromagnit meýdany

§12.1. Magnit meýdany. Magnit meýdanynyň güýç çyzyklary.

Burawjygyň düzgüni 258

§12.2. Amperiň güýji. Çep eliň düzgüni 259

§12.3. Lorensiň güýji 261

XIII bap. Elektromagnit induksiýasy

§13.1. Elektromagnit induksiýasy hakynda Faradeýiň kanuny.

Lensiň düzgüni 263

§13.2. Induktivlik. Öz-özünden induksiýa. Özara induksiýa 265

§13.3. Magnit meýdanynyň energiýasy. Elektromagnitiň öz
ýakoryny çekiji güýji 266

§13.4. Transformator. Magnit hadysalarynyň ulanylyşy 268

XIV. ÝAGTYLYGYŇ TEBIGATY

§14.1. Giriş 271

§14.2. Geometriki optika 275

§14.3. Ýuka linzalar. Mikroskop 278

§14.4. Esasy fotometriki ululyklar 282

§14.5. Ýagtylygyň interferensiýasy 286

§14.6. Ýagtylygyň difraksiýasy 288

§14.7. Ýagtylygyň dispersiýasy 294

§14.8. Ýagtylygyň polýarlanmagy 297

XV bap. Ýylylyk şöhlelenmesi

§15.1. Ýylylyk şöhlelenmesi. Şöhlelenmäniň deňagramlygy.

Kirhgofyň kanuny 300

§15.2. Absolýut gara jisimiň şöhlelenişiniň kanunlary. Stefanyň-

Bolsmanyň kanuny. Winiň kanuny.

Optiki pirometrler 303

§15.3. Fotoeffekt. Fotoeffektiň kanunlary.

Fotoeffektiň nazaryýeti 305

§15.4. Fotonlar. Komptonyň effekti.

Fotoeffektiň ulanylyşy 309

§15.5. Optiki kwant generatorlary (lazerler) 313

XVI bap. Atomyň we ýadronyň gurluşy

§16.1. Atomyň we atom ýadrosynyň gurluşy. Rezerfordyň
tejribeleri. Atomyň planetar modeli.

<i>Boruň kwant postulatlary</i>	319
<i>§16.2. Atom ýadrosynyň düzümi. Izotoplar.</i>	
<i>Ýadro güýçleri</i>	322
<i>§16.3. Atom ýadrosynyň baglanyşyk energiýasy.</i>	
<i>Massa defekti</i>	324
<i>§16.4. Radioaktiwlik. Alfa, beta we gamma-şöhlelenmeleri</i>	326
<i>§16.5. Süýşme düzgüni. Radioaktiw dargama kanuny.</i>	
<i>Ýarymdargama periody</i>	328
<i>§16.6. Radioaktiw elementleriň topary</i>	331
<i>§16.7. Ýadro reaksiýalary. Emeli radioaktiwlik</i>	332
<i>§16.8. Radioaktiw izotoplaryň ulanylyşy we radioaktiw</i>	
<i>şöhlelenmäniň biologiki täsiri</i>	334
<i>Ulanylan edebiýatlar</i>	336
<i>Mazmuny</i>	338