M. M. Meredow, R. Artykow,
G. Durdyýew

FIZIKA

Ýokary okuw mekdepleri üçin
okuw kitaby

Türkmenistanyň Bilim ministrligi
tarapyndan hödürlenildi

Aşgabat
Türkmen döwlet neşirýat gullugy
2013

UOK 530.1 + 378
M 41

Meredow M. M. we başg.
M 41 **Fizika.** Ýokary okuw mekdepleri üçin okuw kitaby. – A.:Türkmen döwlet neşirýat gullugy, 2013.

Okuw kitaby S. A. Nyýazow adyndaky Türkmen oba hojalyk uniwersitetinde fizika dersiniň okuw maksatnamasy esasynda taýýarlanylyp, onda umumy fizika kursunyň degişli bölümleri gysgaça beýan edildi.

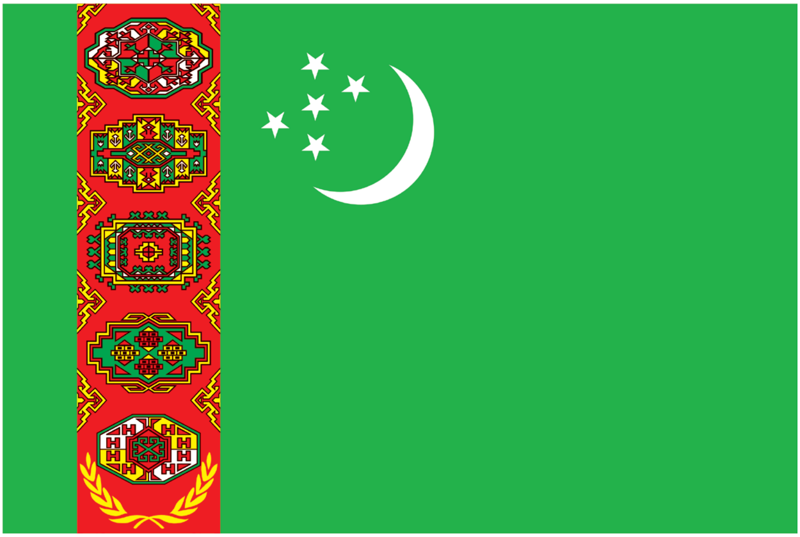
Kitapdan ýokary okuw mekdepleriniň inžener-tehniki, ykdysadyýet fakultetlerinde okaýan talyplar, şeýle hem, degişli orta hünär okuw mekdepleriň talyplary peýdalanyp bilerler.

Okuw kitabynyň I bölümini (I–VI we XVI baplar) G. Durdyýew, II bölümini (VII–XI we XV baplar) M. M. Meredow, III bölümini (XII–XIV baplar) R. Artykow ýazdylar.

TDKP № 101, 2013 KBK 22.3 ýa 73

TÜRKMENISTANYŇ PREZIDENTI
GURBANGULY BERDIMUHAMEDOW

TÜRKMENISTANYŇ DÖWLET TUGRASY



TÜRKMENISTANYŇ DÖWLET BAÝDAGY

TÜRKMENISTANYŇ
DÖWLET SENASY

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

Gaýtalama:

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

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

Gaýtalama:

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

GIRIŞ

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.

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

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

Fizika beýleki tebigy ylymlar 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. Mendeleýewiň 1869-njy ýylda açan periodiki kanuny himiýanyň we fizikanyň örän köp meselelerini çözdi.

XIX asyryň 70-nji ýyllarynda Makswelliň döreden elektromagnit teoriýasy, elektromagnit 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) häzirki zaman telewideniýesiniň we awtomatikasynyň döremegine getirdi.

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

Fizika filosofiýa bilen berk baglanyşykly bolup, energiýanyň saklanma 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 dünýägaraýşy 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 sistemasyny 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) – bu ýagtylygyň wakuumda 1/299792458 sekuntda geçýän ýolunyň uzynlygyna deň.

KILOGRAM (kg) – massanyň ölçeg birligi deregine 1889-njy ýylda Halkara kongresinde diametri we beýikligi 39 mm bolan platinanyň, iridiniň (poslamaýan) garyndysyndan taýýarlanan silindr kabul edilen. Ol Halkara býurosynda Parižiň golaýynda Sewra şäherinde saklanylýar.

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

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

KELWIN (*K*) – bu suwuň üç hal nokadynyň termodinamiki temperaturasynyň 1/273,15 bölegi.

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

KANDELA (*Kd*) – bu ýagtylyk çeşmesiniň temperaturasy platinanyň gatamak temperaturasyna deň bolanda, 101325 *Pa* basyşda, 1/60000 m^2 meýdandan perpendikulýar ugur boýunça doly şöhlelenýän ýagtylyk güýjüdir.

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

STERADIAN (*sr*) – bu 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, gönüçyzykly deňölçegli hereketiň tizliginiň formulasy esasynda $v=s/t$, s – geçilen ýol, t – wagt. Onda tizligiň döredilen birligi 1 m/s bolýar.

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

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

I

MEHANIKANYŇ FIZIKI ESASLARY

Mehanika – mehaniki hereketiň kanunalaýyklyklaryny we onuň ýüze çykmasynyň ýa-da üýtgemesiniň sebäplerini öwrenýän fizikanyň bölümidir. Mehaniki 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 italýan 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 mikroskopiki 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. Klassyki mehanikanyň ulanyş çägi barada biz soňra aýratyn durup geçeris. Häzirlikçe, diňe tizlikleri ýagtylygyň tizliginden kiçi bolan makroskopik jisimleriň hereketleri barada gürrüň etjekdiris.

Mehanika üç bölümden ybaratdyr: kinematika, dinamika, statika.

KINEMATIKA – bu 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, dinamikanyň kanunlaryndan aýratynlykda öwrenilmeýär.

I bap

ÖŇE BOLAN HEREKETIŇ KINEMATIKASY

§ 1.1. Material nokat. Hasaplama sistemasy. Traýektoriýa

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 *km* $\approx 0{,}13\cdot 10^5$ *km*-e, onuň Gün bilen aralygy bolsa $150\cdot 10^6$ *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 bellibir ölçegli jisim hökmünde garalýandygyny bellemek gerek. Mysal üçin, top okuna uçuş şertlerinde material nokat hökmünde garap bileris. Emma top okunyň uçuşyna howanyň garşylygynyň edýän täsirini hem-de uçuş wagtynda top okunyň 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 bellibir wagtda bolup geçýär. Şonuň üçin islendik jisimiň hereketini kesgitlemek üçin, onuň şol bir wagtda giňişligiň haýsy ýerinde durandygyny, bellibir 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 sistemasyna hasaplama sistemasy diýilýär. Mysal üçin, otagyň bir burçundan zyňlan şarjagazyň hereketine biz otaga otnositellikde garap bileris. Koordinatalar başlangyjyny şol burçda ýerleşdirip, onuň oklaryny diwarlaryň boýuna ugrukdyrsak, 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.

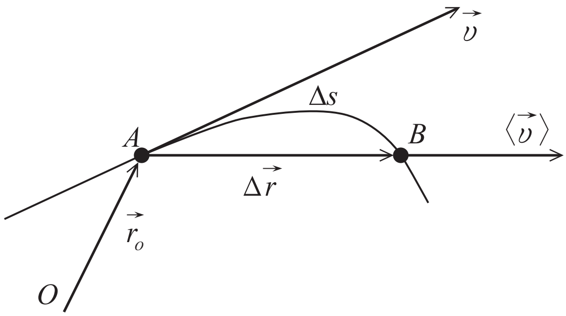
Jisimiň giňişlikde hereket edende galdyrýan yzyna *traýektoriýa* diýilýär. Traýektoriýanyň görnüşine baglylykda jisimiň hereketi gönüçyzykly ýa-da egriçyzykly bolup biler.

§ 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 pursadynda hereketiň çaltlygyny we ugruny kesgitleýän ululykdyr.

Goý, jisim egriçyzykly traýektoriýa bilen hereket edýär diýeliň. Ol t wagt pursadynda $\vec{r}_o$ radius-wektora degişli bolsun (ýagny t_0 wagt pursadynda jisimiň ýagdaýy $\vec{r}_o$ 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:

$$\langle\vec{\upsilon}\rangle = \frac{\Delta\vec{r}}{\Delta t}. \tag{1.1}$$

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 $\Delta t \to 0$ predeline geçsek, onda mgnowen pursat tizligi alyp bolýar:

$$\vec{\upsilon} = \lim_{\Delta t \to 0}\frac{\Delta\vec{r}}{\Delta t} = \frac{d\vec{r}}{dt}.$$

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

$$\upsilon = |\vec{\upsilon}| = \left|\lim_{\Delta t \to 0}\frac{\Delta\vec{r}}{\Delta t}\right| = \lim_{\Delta t \to 0}\frac{|\Delta\vec{r}\,|}{\Delta t} = \lim_{\Delta t \to 0}\frac{\Delta s}{\Delta t} = \frac{ds}{dt}.$$

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

$$\upsilon = \frac{ds}{dt}. \tag{1.2}$$

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

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

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

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

$$s = \int_t^{t+\Delta t} \upsilon dt. \tag{1.3}$$

Deňölçegli hereketde (1.3) aňlatmany şeýle ýazmak bolar:

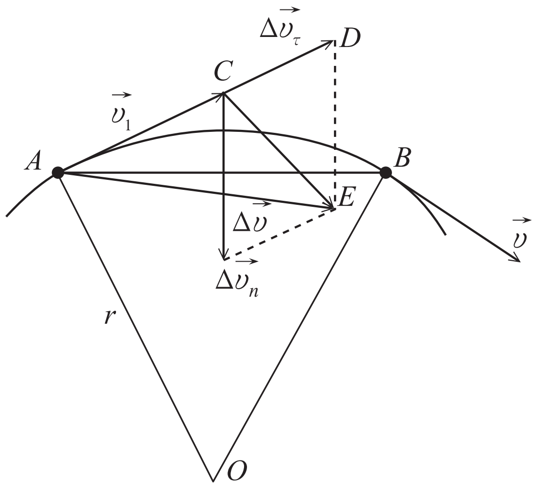
$$s = \upsilon \int_t^{t+\Delta t} dt = \upsilon \Delta t.$$

§ 1.3. Tizlenme. Tangensial we normal tizlenmeler

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

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

$$\langle\vec{a}\rangle = \frac{\Delta\vec{\upsilon}}{\Delta t}.$$



1.2-nji surat. Tizlenmäniň kesgitlenişi

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

$$\vec{a} = \lim_{\Delta t \to 0} \langle \vec{a} \rangle = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{\Delta \vec{\upsilon}}{\Delta t} = \frac{d\vec{\upsilon}}{dt}.$$

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

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

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

$\Delta\vec{\upsilon}$ wektoryň ikinji düzüjisi bolan $\Delta\vec{\upsilon}_n$ 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:

$$a_\tau = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{\Delta \upsilon_\tau}{\Delta t} = \frac{d\upsilon}{dt}.$$

Tizlenmäniň ikinji düzüjisini kesgitläliň.

Goý, Δs duga AB hordadan az tapawutlanar ýaly, B nokat A nokada ýeterlik golaý bolsun. Onda AOB we EAD üçburçluklaryň meňzeşliginden $\frac{\Delta \upsilon_n}{AB} = \frac{\upsilon_1}{r}$ deňlik gelip çykýar, şeýle-de, $AB = \upsilon \Delta t$, onda:

$$\frac{\Delta \upsilon_n}{\Delta t} = \frac{\upsilon \upsilon_1}{r}.$$

Bu ýerde haçanda $\Delta t \to 0$, $\vec{\upsilon_1} \to \vec{\upsilon}$ alarys. $\vec{\upsilon_1} \to \vec{\upsilon}$ bolanda EAD burç nola ymtylýar, onda deňýanly EAD üçburçlugyň $\vec{\upsilon}$ we $\Delta\vec{\upsilon_n}$ wektorlarynyň arasyndaky ADE burç gönüburça ymtylar. Dogrudanda, Δt nola ymtylanda $\vec{\upsilon}$ we $\Delta\vec{\upsilon_n}$ wektorlar özara perpendikulýar bolýarlar. Sebäbi tizlik wektory traýektoriýa galtaşma boýunça ugrukdyrylan, onda egrilik merkezine ugrukdyrylan $\Delta\vec{\upsilon_n}$ wektor tizlik wektoryna perpendikulýardyr.

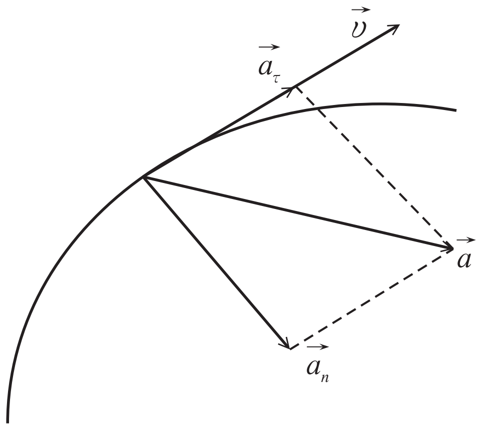
$$\frac{\Delta \upsilon_n}{\Delta t} = \frac{\upsilon \upsilon_1}{r},\ \Delta t \to 0 \text{ bolanda } \vec{\upsilon_1} \to \vec{\upsilon}, \text{ onda alarys:}$$

$$a_n = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{\Delta \upsilon_n}{\Delta t} = \frac{\upsilon \cdot \upsilon_1}{r} = \frac{\upsilon \cdot \upsilon}{r} = \frac{\upsilon^2}{r}.$$

Tizlenmäniň ikinji düzüjisine tizlenmäniň normal (perpendikulýar) düzüjisi diýilýär. Ol traýektoriýanyň 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

$$\vec{a} = \vec{a_\tau} + \vec{a_n}.$$



1.3-nji surat. Doly, tangensial we normal tizlenmeler

Tizlenmäniň tangensial düzüjisi (tangensial tizlenme) moduly boýunça tizligiň üýtgeýiş çaltlygyny kesgitleýär we ol traýektoriýanyň 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. $a_\tau = 0$, $a_0 = 0$ – gönüçyzykly deňölçegli hereket;

2. $a_\tau = const$, $a_n = 0$ – gönüçyzykly deňüýtgeýän hereket, onda:

$$a_\tau = a = \frac{\Delta\upsilon}{\Delta t} = \frac{\upsilon_2 - \upsilon_1}{t_2 - t_1}.$$

Eger-de wagtyň başlangyç momenti $t_1 = 0$ bolsa, başlangyç tizlik $\upsilon_1 = \upsilon_0$, şeýle-de, $t_2 = t$ we $\upsilon_2 = \upsilon$ bilen belläp, $a = \frac{\upsilon - \upsilon_0}{t}$ aňlatmany alarys, bu ýerden:

$$\upsilon = \upsilon_0 + at.$$

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

$$s = \int_0^t \upsilon dt = \int_0^t (\upsilon_0 + at)dt = \upsilon_0 t + \frac{at^2}{2}.$$

3. $a_\tau = f(t), \quad a_n = 0$ – üýtgeýän tizlenmeli gönüçyzykly hereket;

4. $a_\tau = 0, \quad a_n = const$, haçanda $a_\tau = 0$ bolanda tizlik moduly boýunça üýtgemeýär, diňe ugry boýunça üýtgeýär. $a_n = \frac{\upsilon^2}{r}$ formuladan, egrilik radiusynyň hemişelik bolmalydygy gelip çykýar. Bu ýagdaýda töwerek boýunça hereket deňölçegli bolýar;

5. $a_\tau = 0, \quad a_n \neq 0$, – deňölçegli egriçyzykly hereket;

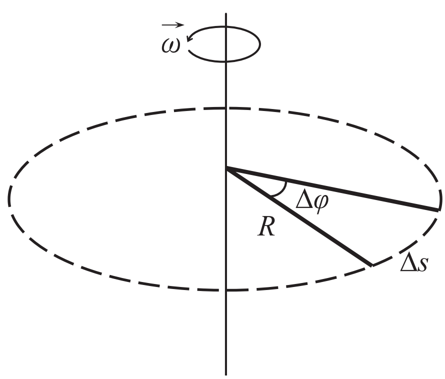
6. $a_\tau = const, \quad a_n \neq 0$ – egriçyzykly deňüýtgeýän hereket;

7. $a_\tau = f(t), \quad a_n \neq 0$ – 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 düşünjeler girizilýär.

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:



1.4-nji surat. Burç tizliginiň şekillendirilişi

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

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 (*1.4-nji sur. ser.*):

$$\upsilon = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{\Delta s}{\Delta t} = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{R\Delta \varphi}{\Delta t} = R \lim_{\Delta t \to 0} \frac{\Delta \varphi}{\Delta t} = R\omega, \quad \upsilon = R\omega.$$

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

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

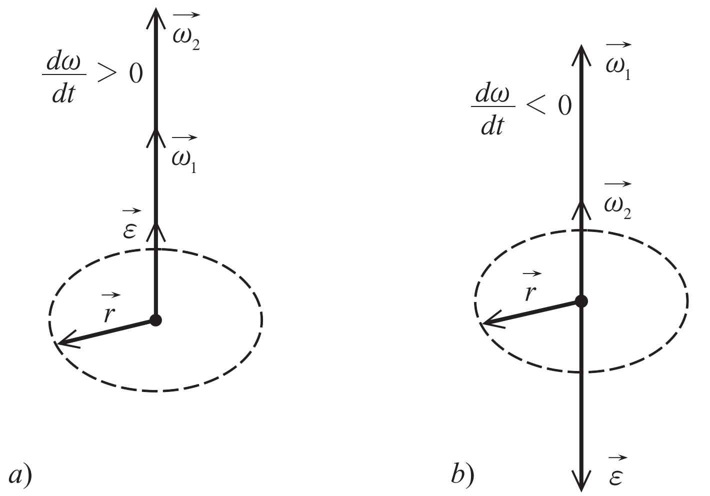
Jisimiň töwerek boýunça deňölçegli hereketinde onuň wagt birliginde ýerine ýetirýän n aýlaw sanyna *aýlaw ýygylygy* ýa-da *çyzykly ýygylyk* diýilýär. Eger-de aýlaw ýygylygyny n harpy bilen bellesek, onda:

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

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

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

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

$$a_\tau = \frac{d\upsilon}{dt}, \quad \upsilon = \omega R \quad \text{we} \quad a_\tau = \frac{d(\omega R)}{dt} = R\frac{d\omega}{dt} = R\varepsilon.$$

Tizlenmäniň normal düzüjisi:

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

Şeýlelikde, çyzyk (nokadyň R radiusly töweregiň dugasy boýunça geçen s ýoly, çyzyk tizligi – υ, 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:

$$S = R\varphi, \quad \upsilon = R\omega, \quad a_\tau = R\varepsilon, \quad a_n = \omega^2 R.$$

Töwerek boýunça deň üýtgeýän hereketde ($\varepsilon = const$)

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

bu ýerde ω_0 – başlangyç burç tizligi.

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 köpsanly tejribeleriň we teoretiki maglumatlaryň netijeleri Nýuton tarapyndan umumylaşdyrylýar. Nýutonyň kanunlary esasynda hereketiň dinamiki we kinematiki kanunalaýyklyklary biri-biri bilen baglanyşdyrylýar.

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

Şu kesgitlemeden görnüşi ýaly, haçanda jisime başga bir jisim tarapyndan täsir bolan wagtynda onuň dynçlyk ýagdaýy ýa-da deňölçegli we gönüçyzykly 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 däldir, sebäbi biziň daş-töweregimizdäki jisimleri, beýleki jisimleriň täsirinden goramak mümkin däldir. Şeýle-de bolsa, biz köpsanly faktlary umumylaşdyryp, Nýutonyň birinji kanunynyň dogrulygyna göz ýetirýäris. Biziň daş-töweregimizdäki jisimleriň görünýän adaty dynçlyk ýagdaýy dürli jisimleriň oňa edýän täsiriniň biri-birini kompensirleýändigi bilen şertlenendir. Hereket edýän jisime başga jisimler näçe gowşak täsir etse, ol özüniň tizligini şonça hem uzak wagtlap saklaýar. Käbir başlangyç tizlik bilen zyňlan daş ýeriň üstünden togalanyp 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 bellibir tarapa ugrukdyrylandygy üçin, ol wektor ululykdyr.

Nýutonyň birinji kanuny ähli hasaplaýyş sistemalary üçin dogry däldir. Mysal üçin, goý wagonyň gönüçyzykly we deňölçegli hereketi hasaplaýyş sistemasy bolsun, şonda wagonyň sandyramasyny göz öňünde tutmasak, wagona görä dynçlykda duran jisimlere beýleki jisimler täsir etmese, olar öz-özünden hereketlenmeýärler. 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, dynçlykda duran ýa-da bolmasa başga bir inersial sistema görä deňölçegli we gönüçyzykly hereket edýän sistema aýdylýar. Nýutonyň birinji kanunynyň ýerine ýetmeýän sistemasyna inersial däl sistema diýilýär.

Materiýanyň esasy häsiýetlerinden biri bolup, onuň inertlilik we grawitasion häsiýetini kesgitleýän fiziki 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: $\vec{F}$ güýjüň täsir etmeginde jisimiň alýan $\vec{a}$ tizlenmesi, bu güýjüň ululygyna göni, onuň m massasyna bolsa ters proporsionaldyr, onuň ugry güýç wektorynyň ugry bilen gabat gelýär, ýagny

$$\vec{a} = k\frac{\vec{F}}{m}. \tag{2.1}$$

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:

$$\vec{a} = \frac{\vec{F}}{m}. \tag{2.2}$$

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 sany güýjüň deňtäsiredijisi (netijeleýjisi) diýilýär.

Nýutonyň ikinji kanunyny skalýar görnüşinde şeýle ýazmak bolýar:

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

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

Belli bolşy ýaly¸ berlen jisimiň massasy, haçanda onuň tizligi ýagtylygyň tizligine golaýlaşyp başlanda üýtgäp başlaýar. Şu ýagdaýda hereket edýän jisimiň massasy şeýle kesgitlenilýär:

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

bu ýerde υ – hereket edýän jisimiň tizligi, m_0 – onuň dynçlyk ýagdaýyndaky massasy, $c=3\cdot10^8\ m/s$ – 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).

$a=\dfrac{d\vec{\upsilon}}{dt}$ formulany göz öňünde tutup, Nýutonyň ikinji kanunyny şeýle görnüşinde ýazýarys:

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

ýa-da massany differensial alamatynyň aşagyna girizip alarys:

$$F=\frac{d}{dt}(m\vec{\upsilon});\quad m\upsilon=p;\quad F=\frac{dp}{dt}. \tag{2.3}$$

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

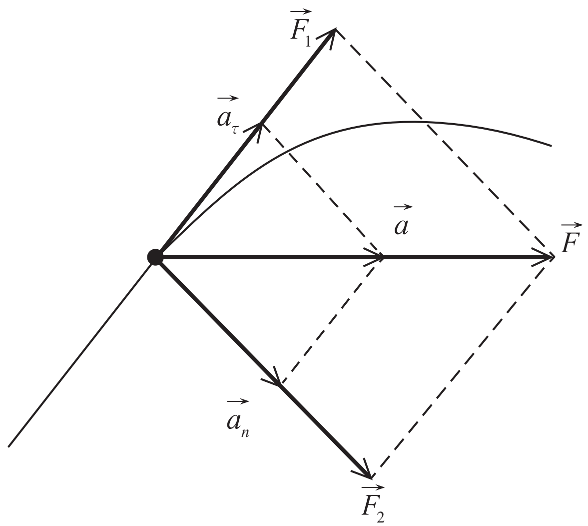
$$\vec{F}dt=d(m\vec{\upsilon}). \tag{2.4}$$

$\vec{F}dt$ 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 özaratäsir güýjüni kesgitleýärler. Ol şeýle aňladylýar. Iki jisimiň biri-birine bolan özaratäsir güýji ululyklary boýunça deňdirler, ugurlary boýunça garşylyklydyrlar we ol güýçler bu nokatlary birleşdirýän göniniň boýuna ugrugandyrlar:

$$\vec{F}_1=-\vec{F}_2. \tag{2.5}$$



2.1-nji surat. Güýjüň we tizlenmäniň düzüjileri

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

$\vec{F_1}$ we $\vec{F_2}$ güýçleriň täsiri astynda jisimler $\vec{a_1}$ we $\vec{a_2}$ tizlenmäni alýarlar. Nýutonyň ikinji kanuny esasynda ýazýarys:

$$\vec{F_1} = m_1\vec{a_1} \quad \text{we} \quad \vec{F_2} = m_2\vec{a_2}. \tag{2.6}$$

(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 proporsionaldyr we garşylykly tarapa ugrugandyr.

Jisimleriň özaratäsirlerinde olaryň ýakyn aralykdan-da, uzak aralykdan-da, biri-biri bilen özaratäsirleriniň 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) saklanma kanuny

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

Izolirlenen sistemany emele getirýän iki sany material nokadyň özaratäsirine seredeliň. Birinji nokadyň massasyny m_1 arkaly, onuň täsirleşýänçä bolan tizligini $\vec{\upsilon}_1$, özaratäsirden soňkusyny $\vec{\upsilon}_1{}'$ bilen, degişlilikde, ikinji nokadyň massasyny m_2, özaratäsire çenli bolan tizligini $\vec{\upsilon}_2$, täsirden soňky tizligini $\vec{\upsilon}_2{}'$ bilen aňladalyň.

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

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

ýa-da

$$\left.\begin{aligned} \vec{F}_1 dt &= m_1\vec{\upsilon}_1{}' - m_1\vec{\upsilon}_2 \\ \vec{F}_2 dt &= m_2\vec{\upsilon}_2{}' - m_2\vec{\upsilon}_2 \end{aligned}\right\} \qquad (2.8)$$

Bu ýerde *dt* – material nokatlaryň özaratäsirleşýän wagty, $\vec{F}_1$ we $\vec{F}_2$ – olaryň täsirleşýän güýçleri. Nýutonyň üçünji kanuny esasynda:

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

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

$$m_1\overrightarrow{\upsilon_1}' - m_1\overrightarrow{\upsilon_1} = -(m_2\overrightarrow{\upsilon_2}' - m_2\overrightarrow{\upsilon_2}), \tag{2.9}$$

ýagny iki sany material nokadyň (jisimiň) özaratäsirinde 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.

$$\sum_{i=1}^{n}\overrightarrow{F_i}dt = d\sum_{i=1}^{n}m_i\overrightarrow{\upsilon_i} = d\overrightarrow{K}.$$

Bu ýerde $\overrightarrow{K} = \sum_{i=1}^{n}m_i\overrightarrow{\upsilon_i}$ – ähli sistemadaky impulsyň wektory. Izolirlenen sistemada daşarky güýçler ýok, ýagny $\sum_{i=1}^{n}F_i = 0,$ onda $\frac{d\overrightarrow{K}}{dt} = 0$ bolar, ýa-da

$$\overrightarrow{K} = \sum_{i=1}^{n}m_i\overrightarrow{\upsilon_1} = const. \tag{2.10}$$

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

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 dartylma kanuny

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

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

$$F = G\frac{m_1 \cdot m_2}{r^2}, \tag{2.11}$$

bu ýerde G ululyk – grawitasiýa hemişeligidir. Eger-de iki jisimiň massalary biri-birine deň bolup ($m_1 = m_2 = 1\,kg$, ýagny bir massa birligine), bir uzynlyk birligine (ýagny 1 m) 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

$$G = 6,67 \cdot 10^{-11}\,\frac{N \cdot m^2}{kg^2}.$$

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

Ýeriň golaýynda ýerleşen islendik jisime F dartyşma 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 çözülende 9,8 m/s^2-ta deň diýip alýarlar.

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

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

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

$$P = GmM / (R + h)^2,$$

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

§ 2.6. Bütindünýä dartylma 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 gorizontal 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:

$$GmM/r^2 = m\upsilon_1^2/r^2.$$

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:

$$\upsilon_1 = \sqrt{gR} = 7{,}9\ km/s.$$

Jisime Ýeriň täsirleşýän sferasyndan boşamagy üçin oňa birinji kosmiki tizlik ýeterlik däldir. Şonuň üçin hem, ikinji kosmiki tizlik hökmanydyr. Ikinji kosmiki tizlik diýip, Ýeriň täsir (grawitasiýa) meýdanynda jisimiň orbitasynyň paraboliki görnüşi 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:

$$\frac{m\upsilon_2^2}{2} = \int_R^\infty G\frac{mM}{r}dr = G\frac{mM}{R}.$$

Şu ýerden:

$$\upsilon_2 = \sqrt{2gR} = 11{,}2\ km/s.$$

Üçünji kosmiki tizlik diýip, jisimiň Gün sistemasynyň çäginden çykmagy üçin gerek bolan tizlige aýdylýar. Üçünji kosmiki tizlik $\upsilon_3 = 16{,}7$ *km/s*. Jisime şeýle uly bolan başlangyç tizligi bermek çylşyrymly tehniki meseleleriň biridir.

Birinji kosmiki tizlik 1957-nji ýylda Ýeriň ilkinji hemrasy uçurylanda, ikinji – 1959-njy ýylda raketa uçurylanda amala aşyryldy. 1961-nji ýylda Ý.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 ýerleşişi üýtgemeýän 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 $\vec{\upsilon}$ tizligi we $\vec{a}$ tizlenmesi bolýar. Öňe bolan hereketiň iň bir ýönekeý görnüşi gönüçyzykly hereketdir. Bu ýagdaýda jisimiň ähli nokatlarynyň traýektoriýasy parallel gönüçyzyklardyr.

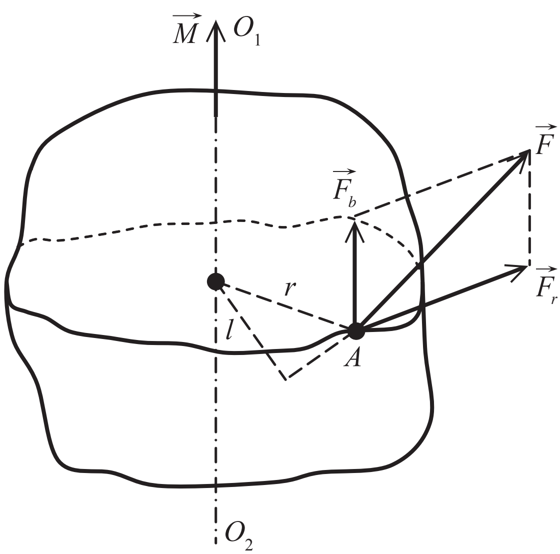
Aýlanma hereketinde gaty jisimiň ähli nokatlarynyň merkezleri bir gönüniň üstünde ýatýar. Şol gönüçyzyga bolsa aýlanma oky diýilýär.

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 düşünjeleri girizýärler. (Biz olar barada 1.4-nji paragrafda 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 düşünjeler girizilýär. Güýç momenti we inersiýa momenti hakyndaky düşünjeleriň 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 werti-



3.1-nji surat. Jisimiň aýlanma hereketiniň çyzgysy kal düzüjisi bolan F_b O_1O_2 okuň töwereginde aýlanmany döredip bilmez, ýöne, ol jisimiň aýlanma okunyň ugry boýunça süýşmesini döredip biler. Şonuň üçin aýlanma hereketinde bu güýç hasaba alynmaýar.

Aýlanma hereketini O_1O_2 aýlanma okuna perpendikulýar bolan tekizlikde (*3.1-nji surat*) ýatan gorizontal düzüjiniň (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 egniň uzynlygyna köpeltmek hasylyna M aýlanma momenti ýa-da oka görä güýjüň momenti diýilýär:

$$M = F \cdot l. \tag{3.1}$$

M – Halkara birlikler sistemasynda $N \cdot m$ bilen ölçenilýär.

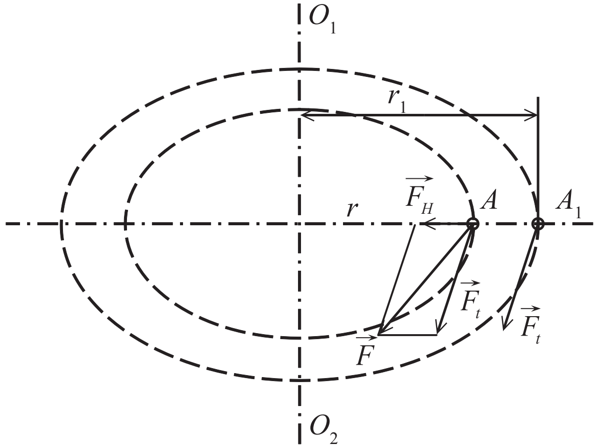
Eger-de jisime birnäçe güýçler täsir edýän bolsalar, aýlanma okuna otnositellikde alnan şu güýçleriň momentleriniň algebraik jemi nola deň bolan ýagdaýynda jisim deňagramlylyk ýagdaýynda bolar. Şeýlelikde, jisimleriň aýlanma hereketinde diňe bir güýçleri hasaba alman, aýlanma okuna görä olaryň ýerleşişleri-de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

Öňe bolan hereketiň dinamikasynda jisimiň inertliligini onuň massasy doly häsiýetlendirýär. Aýlanma hereketinde material nokadyň inertliligini 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_1O_2 okuň daşynda deňölçegsiz hereket edýär diýip göz öňüne 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.

Onda $F_t \cdot r = ma_t \cdot r$ bolar. (3.1) formulany we $a_t = r\varepsilon$-a deňdigini göz öňünde tutup, ýazýarys:

$$M = mr^2\varepsilon = J \cdot \varepsilon. \tag{3.2}$$



3.2-nji surat. Aýlaýjy güýjüň düzüjileri

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. Nokadyň massasynyň onuň aýlanma merkezine çenli bolan aralygyň kwadratyna köpeltmek hasylyna deň bolan ululyga J inersiýa momenti diýilýär:

$$J = m \cdot r^2. \tag{3.3}$$

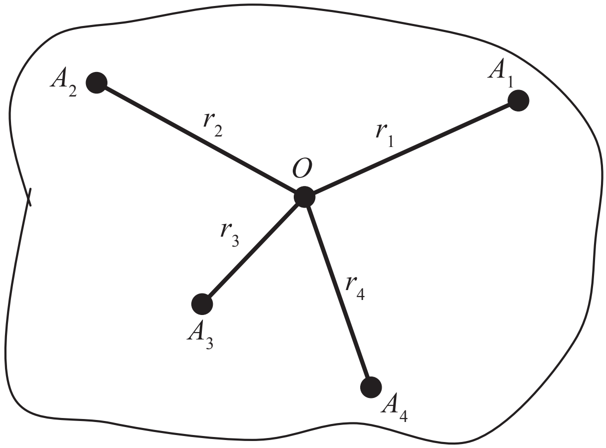
Şeýlelikde, Nýutonyň ikinji kanunyny aýlanýan jisim üçin şeýle görnüşde ýazmak bolar:

$$M = J \cdot \varepsilon. \tag{3.4}$$

Bu deňlemäni başga bir A_1 material nokat üçin ýazalyň (*3.2-nji sur. ser.*).

$$M_1 = J_1 \cdot \varepsilon.$$

Goý, $m = m_1$, $M = M_1$, emma $r_1 > r$. Şonuň üçin A nokadyň $J = mr_1^2$ – formula bilen kesgitlenilýän inersiýa momenti A nokadyň (J) inersiýa momentinden uludyr. Ýagny $J_1 > J$, şoňa görä-de, M aýlanma



3.3-nji surat. Jisimiň inersiýa momentiniň kesgitlenilişi

momentiniň üýtgemeýän 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 inertlilik häsiýetini kesgitleýär we ol diňe bir jisimiň massasyna bagly bolman, jisimiň bölejikleriniň aýlanma okuna görä ýerleşişlerine-de baglydyr.

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

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

Şu ýerde r_1, r_2, r_3, ... 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, onuň inersiýa momenti integrirlemek arkaly tapylyp bilner:

$$J = \int_0^m r^2\,dm. \tag{3.5}$$

Jisimiň inersiýa momenti, onuň haýsy oka otnositel aýlanýandygyna we massanyň göwrüme görä nähili bölünendigine baglydyr. Biz köp ýagdaýda jisimiň aýlanma okunyň onuň agyrlyk merkezinden geçip, jisimiň hem şol okuň töwereginde aýlanýan hallaryna duş gelýäris. Şeýle ýagdaýda dürli jisimleriň inersiýa momentleriniň kesgitleniş formulalary 1-nji tablisada berlendir.

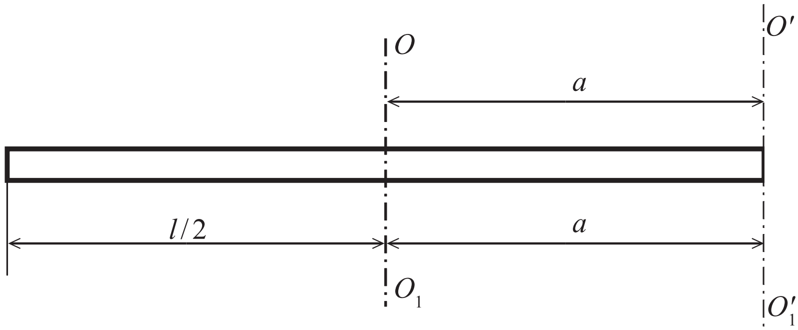
1-nji tablisa

Jisim	Aýlanma okunyň ýerleşişi	Inersiýa momenti
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	Onuň merkezinden geçýär	$\frac{2}{5}mR^2$
Inçe silindr görnüşli l uzynlykly demir taýajygy	Onuň merkezinden geçýär	$\frac{1}{12}ml^2$

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

$$J = J_c + ma^2, \tag{3.6}$$

bu ýerde J_c – jisimiň aýlanma oky agyrlyk 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 $O_1' O'$ okuň töwereginde aýlanýar diýeliň (*3.4-nji surat*):



3.4-nji surat. Inersiýa momentiniň aýlanma okuna baglylygy

Belli bolşy ýaly, taýajyk OO_1 simmetriýa okuna otnositel aýlanýan wagtynda onuň inersiýa momenti $J_c = \frac{1}{12}ml^2$ deň. Çyzgydan görnüşi ýaly, $a = l/2$ we onuň $O_1'\ O'$ oka otnositel aýlanýan wagtyndaky inersiýa momenti (3.5) formula görä:

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

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 görnüşinde ýazmak bolar:

$$\vec{\varepsilon} = \frac{\vec{M}}{J},$$

bu ýerden

$$J = \int_0^m r^2 dm,$$

dm – massaly material nokatlaryň birleşmesinden ybarat bolan jisimiň inersiýa momentidir. $\vec{\varepsilon} = M/J$ aňlatmadan görnüşi ýaly, gaty jisimiň gozganmaýan okuň daşynda aýlanýan wagtyndaky burç tizlenmesi aýlanma momentine göni, inersiýa momentine bolsa ters proporsionaldyr.

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

$$\varepsilon = \frac{\omega - \omega_0}{\Delta t},$$

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

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

(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 saklanma kanunyny aňladýar.

§ 3.4. Impulsyň momentiniň saklanma kanuny

Aýlanma hereketinde-de öňe bolan hereketdäki ýaly, Nýutonyň üçünji kanuny ulanylýar: iki sany aýlanýan jisimleriň özaratäsirinde birinji jisimiň ikinji jisime täsirleşýän $\overrightarrow{M_1}$ aýlanma momentiniň ululygy, ikinji jisim tarapyndan birinji jisime täsirleşýän $\overrightarrow{M_2}$ aýlanma momentiniň ululygyna deňdir, ugry boýunça garşylyklydyr, ýagny:

$$\overrightarrow{M_1} = -\overrightarrow{M_2}.$$

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

$$\overrightarrow{M_1} \cdot \Delta t = -\overrightarrow{M_2} \cdot \Delta t. \qquad (3.8)$$

Şu ýagdaýda dinamikanyň aýlanma hereketi üçin esasy kanunynyň üsti bilen (3.8) formulany şeýle görnüşinde ýazýarys:

$$J_1 (\overrightarrow{\omega_1}' - \overrightarrow{\omega_1}) = -J_2 (\overrightarrow{\omega_2}' - \overrightarrow{\omega_2}). \qquad (3.9)$$

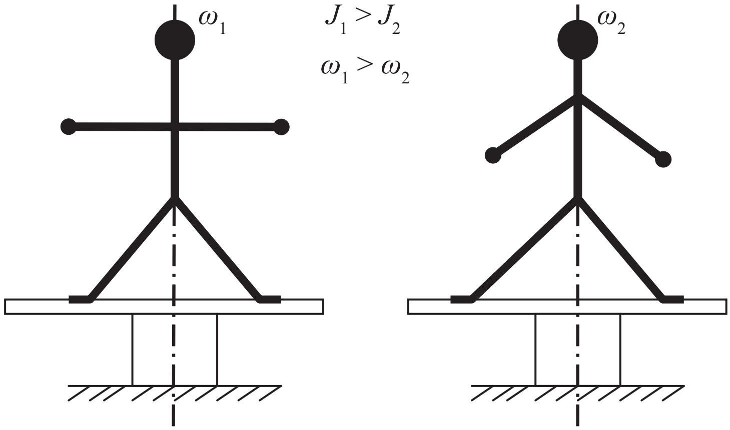
Bu ýerde J_1, J_2 – birinji we ikinji jisimleriň inersiýa momentleridir. $\overrightarrow{\omega_1}'$ we $\overrightarrow{\omega_2}'$ – olaryň degişlilikde özaratäsirden soňky, ω_1 we ω_2 – öňki burç tizlikleridir. (3.9) formulany şeýle görnüşe geçirýäris:

$$J_1\overrightarrow{\omega_1} + J_2\overrightarrow{\omega_2} = J_1\overrightarrow{\omega}' + J_2\overrightarrow{\omega_2}'.$$

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

$$\sum_{i=1}^{n} J_i\overrightarrow{\omega_i} = const. \qquad (3.10)$$

(3.10) formula impulsyň momentiniň saklanma kanunyny aňladýar. Şu formuladan görnüşi ýaly, inersiýa momentiniň üýtgemeýän halynda, daşky güýçleriň ýok wagtynda, aýlanýan jisimiň burç tizligi hemişelik bolup galýar. Eger daşky güýçleriň ýok wagtynda inersiýa momenti üýtgeýän bolsa, onda $\overrightarrow{\omega}$ burç tizligi hem üýtgäp başlaýar, şoňa görä-de, $J\overrightarrow{\omega}$ köpeltmek hasyly hemişelik bolup galýar, ýagny



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

J inersiýa momenti artsa, onda $\vec{\omega}$ burç tizligi kemelýär, tersine, $\vec{\omega}$ artsa, J kemelýär.

Hereket mukdarynyň momentiniň saklanma 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 hereketе 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 uzatsa, onda burç tizligi kemeler. Türgenler çylşyrymly akrobatiki oýunlary ýerine ýetirenlerinde-de, beýikden (tramplinden) suwa bökenlerinde-de, impulsyň saklanma kanunyndan ugur alýarlar.

IŞ WE ENERGIÝA

§ 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 özaratäsirlerini 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:

$$A = F \cdot s. \tag{4.1}$$

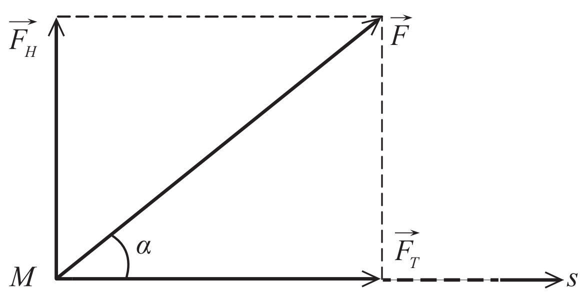
Eger jisime goýlan güýç ornuň üýtgeýän ugry bilen α burçuny emele getirýän bolsa (*4.1-nji surat*), F güýji ornuň üýtgeýän ugry bilen α burçuny emele getirýän bolsa (*4.1-nji sur. ser.*), F güýji ornuň üýtgeýän ugruna ugurdaş bolan F_T we oňa perpendikulýar bolan F_H düzüji güýçlere dargatmak bolar.

Ýokarda belleýşimiz ýaly, işi diňe F_T düzüji güýç ýerine ýetirýär, şoňa görä-de:

$$A = F_T \cdot s; \quad \text{ýa-da} \quad F_T = F \cdot \cos\alpha$$

bolýandygy üçin

$$A = F \cdot s \cdot \cos\alpha. \tag{4.2}$$



4.1-nji surat. Ýapgyt güýjüň işi

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.

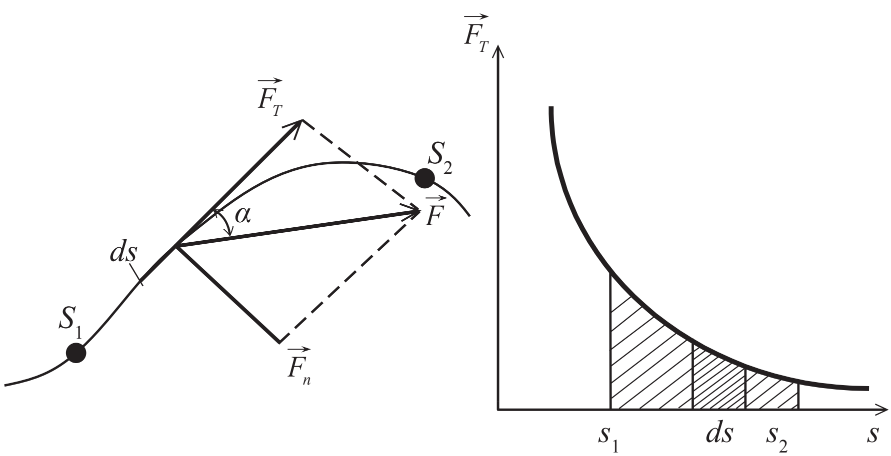
(4.2) formuladan görnüşi ýaly, edilen iş diňe jisime täsir edýän güýje we jisimiň orun üýtgetmesine bagly bolman, olaryň arasyndaky burça-da baglydyr. Onuň üç halyna seredeliň:

1. $\alpha < 90°$ bolanda $\cos\alpha > 0$, diýmek, iş položiteldir. Bu halda F_T düzüji güýç orun üýtgetmäniň tarapyna ugrukdyrylandyr.

2. $\alpha > 90°$ bolanda $\cos\alpha < 0$ bolýar, bu ýagdaýda 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. $\alpha = 90°$ 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 kesgitlemesine 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 ýola baglylyk egrisiniň örän kiçi *ds* kesimini alalyň, şu aralykda *F* güýji hemişelik, onuň ugruny bolsa gönüçyzykly diýip kabul etmek bolar, ýagny:

$$dA = F \cdot dS \cdot \cos\alpha. \tag{4.3}$$

bu ýerde $F_n = F\cos\alpha$.

S_1 we S_2 aralykda ýerine ýetirilen doly işi integrirlemek ýoly bilen tapýarys:

$$A = \int_{S_1}^{S_2} F_n dS. \tag{4.4}$$

A doly işi grafiki görnüşinde 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 däldir.

Umuman, diňe bir güýçleriň ýerine ýetirýän işini däl-de, eýsem, ol işiň ýerine ýetirilen wagtynyň dowamlylygyny hem bilmek örän möhümdir. Edil şol bir işi ýerine ýetirýän iki mehanizmiň haýsy biri şol işi az wagt aralygynda ýerine ýetirse, onuň gowy boldugydyr. 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:

$$N = \frac{\Delta A}{\Delta t}. \tag{4.5}$$

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

$$N = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{\Delta A}{\Delta t} = \frac{dA}{dt}. \tag{4.6}$$

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 wata deňdir. (1 *Wt* = 1 *J*/*s*).

§ 4.2. Kinetik we potensial energiýalar. Sistemanyň mehaniki energiýasynyň saklanma we öwrülme 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 üýtgemeýän *F* güýç täsir edip, onuň tizligini υ_1 bahadan υ_2 baha çenli üýtgedýär diýeliň. Şu ýagdaýda *t* wagtyň dowamynda material nokat *s* ýoly geçer, *F* güýç bolsa

$$A = F \cdot S. \tag{4.7}$$

işi ýerine ýetirer.

Güýjüň hemişelik bolandygy zerarly, hereket deňtizlenýän bolar, onuň tizlenmesi:

$$a = \frac{\upsilon_2 - \upsilon_1}{t}.$$

Nýutonyň ikinji kanunyna görä:

$$F = m \cdot a = m\frac{\upsilon_2 - \upsilon_1}{t}. \tag{4.8}$$

Material nokadyň *t* wagtda geçen ýoluny $\langle \upsilon \rangle = \frac{\upsilon_2 + \upsilon_1}{2}$ orta tizlik arkaly kesgitläliň, bu ýerden ($s = \langle \upsilon \rangle \cdot t$ görä) alýarys:

$$S = \frac{\upsilon_2 + \upsilon_1}{2}t. \tag{4.9}$$

F güýjüň hem-de *s* ýoluň (4.8) we (4.9) deňlikler arkaly tapylan san bahalaryny (4.7) formulada ornuna goýup, alarys:

$$A = m\frac{(\upsilon_2 - \upsilon_1)}{t}\frac{(\upsilon_2 + \upsilon_1)}{2}t = m\frac{(\upsilon_2 - \upsilon_1)(\upsilon_2 + \upsilon_1)}{2}.$$

Bu ýerden:

$$A = \frac{m\upsilon_2^2}{2} - \frac{m\upsilon_1^2}{2}. \qquad (4.10)$$

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

Şonda (4.10) deňligi aşakdaky görnüşde ýazmak bolar:

$$A = E_{k2} - E_{k1} = \Delta E_k. \qquad (4.11)$$

m massaly jisime υ tizlik bermek üçin goýlan güýjüň $m\upsilon^2/2$ 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-de energiýa 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 özaratäsirleri bilen häsiýetlendirilýän energiýa aýdylýar.

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

m massaly jisimi h beýiklige galdyrmak üçin (υ = const bolan ýagdaýynda) ýerine ýetirilýän işiň ululygy:

$$A = Ph = mgh. \qquad (4.12)$$

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

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

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 özaratäsiri gönüden-göni meýdanlaryň täsir etmegi arkaly amala aşyrylýar (meselem, maýyşgak güýçleriň bir nokatdan ikinji bir nokada ornuny üýtgetmegi, onuň nähili traýektoriýa bilen bolup geçenligine 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 ululygy, onuň bir nokatdan ikinji nokada geçendäki hereketiniň traýektoriýasyna 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 $\upsilon_0 = 0$ onuň potensial energiýasy kemelýär. Aşak gaçmaklygyň ahyrynda onuň kinetik energiýasy şeýle bolar: ýeriň üstüne ýeten pursadynda onuň tizligi $\upsilon = \sqrt{2gh}$, kinetik energiýasy $E_k = \frac{m\upsilon^2}{2} = \frac{m \cdot 2gh}{2} = mgh$ bolar:

$$E_k = \frac{m\upsilon^2}{2}.$$

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:

$$E = E_k + E_P = const. \tag{4.14}$$

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

§ 4.3. Aýlanýan we tigirlenýän gaty jisimiň kinetik energiýasy

Gozganmaýan okuň töwereginde aýlanýan gaty jisimiň kinetik energiýasyny kesgitläliň.

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

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

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:

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

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:

$$E_k = \frac{J\omega^2}{2}. \tag{4.15}$$

(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 bütin dowamynda öz-özüne parallel bolup, ornuny üýtgedýän bolsa (tigirlenýän jisim), onuň doly kinetik energiýasy öňe bolan hereketiň kinetik energiýasynyň ($m\upsilon^2/2$) we aýlanma hereketiniň kinetik energiýasynyň ($J\omega^2/2$) jemine deňdir.

§ 4.4. Absolýut maýyşgak we maýyşgak däl urgular

Hereket mukdarynyň we energiýanyň saklanma kanunlaryna absolýut maýyşgak we maýyşgak däl jisimleriň urgularyna degişli hakyky fiziki meseleler çözülende gabat gelinýär. Urgy – munuň özi özaratäsirleşmeleri çalt wagtda bolup geçýän iki ýa-da birnäçe jisimleriň çaknyşmagydyr. Mysal üçin, atomlaryň, billiard şarlarynyň çakyşmasy, gaty jisimleriň suwuklyklar we gazlar bilen özaratäsirindäki 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 çaknyşýan jisimleriň umumy kinetik energiýasy üýtgemän galýar we mehaniki energiýa energiýanyň beýleki görnüşlerine geçmeýär.

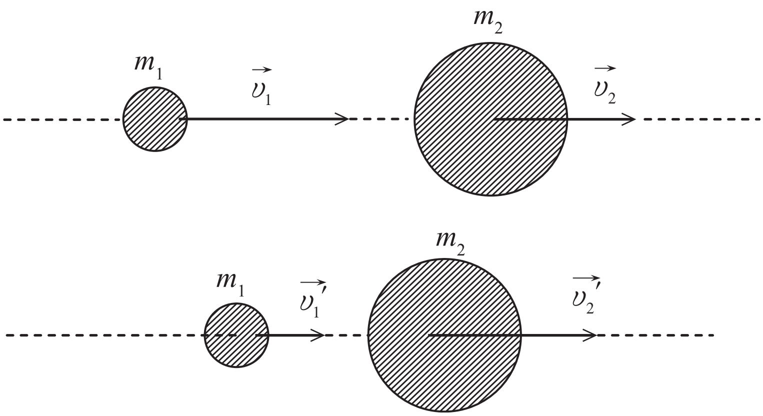
Maýyşgak däl urgularda çaknyşýan jisimleriň kinetik energiýalary azda-kände energiýanyň başga görnüşine geçýär we urgudan soňra olar galyndyly deformasiýa eýe bolýarlar.

Iki sany birmeňzeş şarlaryň gönüçyzykly, merkezi urgularyna seredeliň. Gönüçyzykly merkezi urgularda biri-biri bilen çaknyşýan şarlaryň tizlikleri şarlaryň merkezlerini birleşdirýän göniniň boýuna ýerleşendir. Sistemany izolirlenen sistema diýip kabul edýäris.

Absolýut maýyşgak urgular

Ýokarda belleýşimiz 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 degişlilikde υ_1 we υ_2 bilen, urgudan soňky tizliklerini υ_1' we υ_2' bilen belläliň (*4.3-nji surat*).



4.3-nji surat. Dürli massaly şarlaryň urgulary

Birinji şaryň υ_1 tizligi ikinji şaryň υ_2 tizliginden uly ($\upsilon_1 > \upsilon_2$), şonuň üçin birinji şar ikinji şaryň yzyndan ýetýär. Urgudan soňra şarlar öňküden üýtgeşik υ_1' we υ_2' tizlikler bilen hereket edýärler. Şarlaryň tizliklerini tapalyň.

Energiýanyň saklanma kanuny esasynda:

$$\frac{m_1\upsilon_1^2}{2} + \frac{m_2\upsilon_2^2}{2} = \frac{m_1\upsilon_1'^2}{2} + \frac{m_2\upsilon_2'^2}{2}. \qquad (4.16)$$

Impulsyň (hereket mukdarynyň) saklanma kanuny esasynda ýazýarys:

$$m_1\upsilon_1 + m_2\upsilon_2 = m_1\upsilon_1' + m_2\upsilon_2'. \qquad (4.17)$$

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

$$m_1 (\upsilon_1 - \upsilon_1') = m_2 (\upsilon_2 - \upsilon_2'), \qquad (4.18)$$

$$m_1 (\upsilon_1'^2 - \upsilon_1^2) = m_2 (\upsilon_2'^2 - \upsilon_2^2), \qquad (4.19)$$

şu ýerden:

$$\upsilon_1 + \upsilon_1' = \upsilon_2 + \upsilon_2'. \qquad (4.20)$$

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

$$\upsilon_1' = \frac{(m_1 - m_2)\upsilon_1 + 2m_2\upsilon_2}{m_1 + m_2}; \qquad (4.21)$$

$$\upsilon_2' = \frac{(m_2 - m_1)\upsilon_2 + 2m_1\upsilon_1}{m_1 + m_2}. \tag{4.22}$$

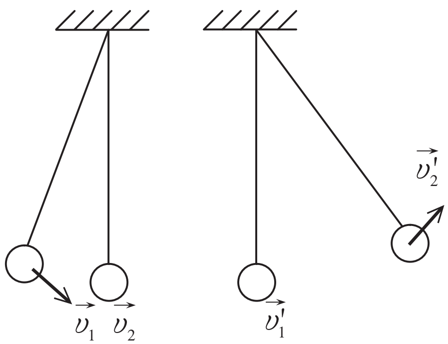
Alnan netijeleri barlamak üçin birnäçe mysallara seredeliň:

1) $\upsilon_2 = 0$ bolanda:

$$\upsilon_1' = \frac{m_1 - m_2}{m_1 + m_2}\upsilon_1; \tag{4.23}$$

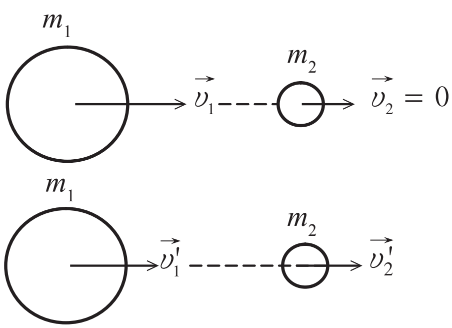
$$\upsilon_2' = \frac{2m_1\upsilon_1}{m_1 + m_2}. \tag{4.24}$$

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



4.4-nji surat. Maýyşgak şarlaryň urgulary

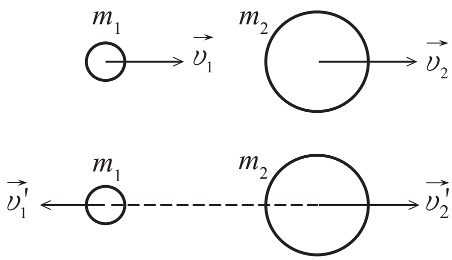
a) $m_1 = m_2$ eger ikinji şar urga çenli gozganman, asylgy duran bolsa ($\upsilon_2 = 0$) (*4.4-nji surat*), urgudan soň birinji şar togtaýar (υ_1'), ikinji şar bolsa şol bir tizlik bilen, urga çenli birinji şar nirä ugrukdyrylan bolsa, şol tarapa-da hereket edýär ($\upsilon_2' = \upsilon_1$):



4.5-nji surat. Dürli tizlikli we massaly şarlaryň urgulary

b) $m_1 > m_2$ birinji şar urga çenli bolan ugruny dowam etdirýär. Emma öňkä seredeniňde kiçi tizlik bilen ($\upsilon_1' < \upsilon_1$) hereket edýär. Ikinji şaryň tizligi urgudan soňra birinji şaryň urgudan soňky tizliginden uly ($\upsilon_2' > \upsilon_1'$) (*4.5-nji surat*).

ç) $m_1 < m_2$ urgy wagtynda birinji şaryň hereketiniň ugry üýtgeýär, yzyna serpigýär, ikinji şar bolsa, birinji şaryň urga çenli bolan ugry bilen hereket edýär (käbir kiçi tizlik bilen) (*4.6-njy surat*).



4.6-njy surat. Dürli massaly şarlaryň çaknyşmadan soňky tizlikleri

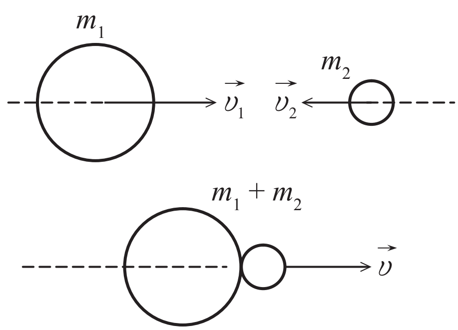
d) $m_2 > m_1$ (4.23) we (4.24) deňlemelerden görnüşi ýaly, $\upsilon_1' = \upsilon_2$, $\upsilon_2' = \upsilon_1$

$$\upsilon_2' \approx 2m_1\upsilon_1/m_2 = 0.$$

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

$$\upsilon_1' = \upsilon_2, \quad \upsilon_2' = \upsilon_1;$$

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 urga plastilinden taýýarlanylan 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 urga çenli bolan tizliklerini υ_1 we υ_2 bilen bellesek, onda hereket mukdarynyň saklanma kanuny esasynda şeýle ýazmak bolar:

$$m_1\upsilon_1 + m_2\upsilon_2 = (m_1 + m_2)\,\upsilon,$$

şu ýerden

$$\upsilon = \frac{m_1\upsilon_1 + m_2\upsilon_2}{m_1 + m_2}. \tag{4.25}$$

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

$$\upsilon = (\upsilon_1 + \upsilon_2)/2,$$

bolar. 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 urga çenli bolan energiýalaryndan az bolýar. Bu ýitgini olaryň urga çenli bolan kinetik energiýalaryndan soňky kinetik energiýalaryny aýyrmak arkaly tapyp bolar:

$$\Delta E = \left(\frac{m_1\upsilon_1^2}{2} + \frac{m_2\upsilon_2^2}{2}\right) - \frac{(m_1 + m_2)\upsilon^2}{2}.$$

(4.25) deňlemäni ulanyp, tapýarys:

$$\Delta E = \frac{m_1 m_2 (\upsilon_1 - \upsilon_2)^2}{2(m_1 + m_2)}.$$

Eger ilkibaşdaky urulýan şar gozganmaýan bolsa ($\upsilon_2 = 0$), onda:

$$\upsilon = \frac{m_1\upsilon_1}{m_1 + m_2}, \quad \Delta E = \frac{m_2}{m_1 + m_2}\frac{m_1\upsilon_1^2}{2}.$$

Haçanda gozganman duran şaryň massasy örän uly bolan ýagdaýynda, ýagny $m_2 > m$, urgudan soňky şarlaryň bilelikdäki tizligi has kiçi bolýar. $\upsilon < \upsilon_1$ (başdaky birinji şaryň tizligine görä) we urgy jisimiň ähli kinetik energiýasy diýen ýaly energiýanyň başga görnüşine geçýär, tersine, mysal üçin, çekijiň çüýe urlan 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 hereketi häsiýetlendirýän ululyklar

Akustika, radiotehnika, optika hem-de ylmyň, tehnikanyň beýleki bölümleri öwrenilende tolkunlar we yrgyldylar baradaky ylma esaslanylýar.

Umumy ýagdaýda yrgyldyly proses 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 herekete yrgyldyly hereket diýilýär. Yrgyldyly hereketiň döremegi üçin şert gerek. Birinjiden – jisimiň durnukly deňagramlylyk ýagdaýy bolmaly. Ikinjiden – jisimi bu ýagdaýdan çykaryp, oňa bellibir energiýa bermeli. Üçünjiden – deňagramlylyk ýagdaýyndan çykarylan jisime, ony yzyna gaýtaryjy güýç täsir etmeli.

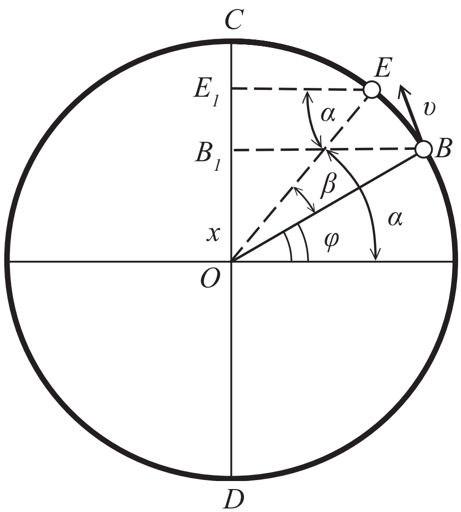
Yrgyldaýan jisime edilýän täsire görä yrgyldylar erkin (ýa-da hususy) we mejbury toparlara bölünýärler. Yrgyldaýan jisime (maddy nokada) diňe yzyna gaýtaryjy güýç täsir edýän wagtyndaky yrgylda erkin yrgyldy diýilýär. Eger yrgyldaýan jisimi gurşap alan giňişlikde hiç hili energiýa ýitgisi bolmasa, onda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

Periodiki üýtgeýän daşky güýjüň täsiri astynda bolup geçýän yrgyldylara mejbury yrgyldylar diýilýär. Mejbury yrgyldyda yrgyldaýan jisime daşardan birsyhly energiýa berlip durulýar. Berilýän energiýa yrgyldaýan jisimiň her periodynyň dowamynda ýitirilýän energiýasyna deň bolmalydyr we hususy yrgyldy bilen fazadaş bolmalydyr. Sistemany togtamaýan yrygyldy 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 *υ* tizlik bilen töwerek boýunça deňölçegli hereket etsin. Onda bu nokadyň töweregiň islendik diametrine bolan proýeksiýasy, mysal üçin *CD* diametrine, *O* nokadyň golaýynda garmoniki yrgyldy eder.

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

Deňagramlylyk ýagdaýyndan nokadyň proýeksiýasyna çenli aralyk (OB_1) *x* orun üýtgetme bolar. Nokadyň deňagramlylyk ýagdaýyndan iň uly süýşmesine (*OC* ýa-da *OD*) yrgyldynyň amplitudasy *A* diýilýär. *B* nokat töwerek boýunça bir aýlaw edende onuň proýeksiýasy 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 gaýtalanýar. Yrgyldaýan nokat bir periodyň dowamynda dört amplituda deň bolan ýoly geçýär.



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

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

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

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

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

OEE_1 üçburçlugyndan süýşmäni kesgitleýäris:

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

(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 pursadyndaky 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:

$$\omega = \frac{2\pi}{T}. \tag{5.3}$$

Bu ýerden

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

bu ýerdäki ω ululyga garmoniki yrgyldyly hereketiň aýlaw ýa-da siklleýin ýygylygy diýilýär. Wagt birliginde bolup geçýän doly yrgyldylaryň sanyna yrgyldylaryň ýygylygy diýilýär. Ýygylyk gerslerde (Gs) ölçelýär. 1Gs bir sekuntda bir doly yrgyldy edýän yrgyldynyň ýygylygydyr. Durmuşda gersden uly kilogers we megagers diýen birlikler hem ulanylýar. 1 kilogers (kGs) = 1000 Gs, 1 Megagers (MGs) = 1 000 000 Gs.

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

ýagny yrgyldynyň ýygylygy ν, onuň periodyna T ters proporsionaldyr ýa-da tersine, yrgyldynyň periody onuň ýygylygyna 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 süýşmeden wagta görä alnan birinji önüme deňdir:

$$\upsilon = \frac{dx}{dt} = \omega A\cos(\omega t + \varphi). \tag{5.4}$$

Yrgyldaýan nokadyň tizlenmesi tizlikden wagta görä alnan önüme deňdir:

$$a = \frac{d\upsilon}{dt} = -\omega^2 A\sin(\omega t + \varphi). \tag{5.5}$$

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

$$a = -\omega^2 x \tag{5.5 a}$$

aýlaw ýygylygy ω-ny T period ýa-da yrgyldynyň ýygylygy bilen çalşyryp, tizligi we tizlenmäni başga görnüşde aňladýarys:

$$\upsilon = 2\pi\nu A\cos(2\pi\nu t + \varphi) = \frac{2\pi}{T}A\cos\left(\frac{2\pi}{T}t + \varphi\right), \tag{5.5 b}$$

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

(5.5 *b*) we (5.5 *ç*) formulalar yrgyldaýan nokadyň tizliginiň we tizlenmesiniň yrgyldyly prosesiň T periodyna deň bolan wagta baglylykda üýtgeýän funksiýalardygyny görkezýärler.

(5.5 *b*) deňlemeden 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 ýygylyk ω, berlen jisimiň ýa-da sistemanyň garmoniki yrgyldysy üçin üýtgemeýär.

Diýmek, eger islendik wagt pursadynda tizlenmäniň x süýşmäniň garşysyna ugrukdyrylan ugry bolup we gatnaşyk $a/x = -\omega^2 = const$ bolsa, mehaniki yrgyldylar garmoniki yrgyldydyr. Süýşmäniň, tizligiň we tizlenmäniň wagta baglylygynyň grafigini guralyň.

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

$$x = A\sin\omega t. \tag{5.6}$$

Onuň tizligi bolsa:

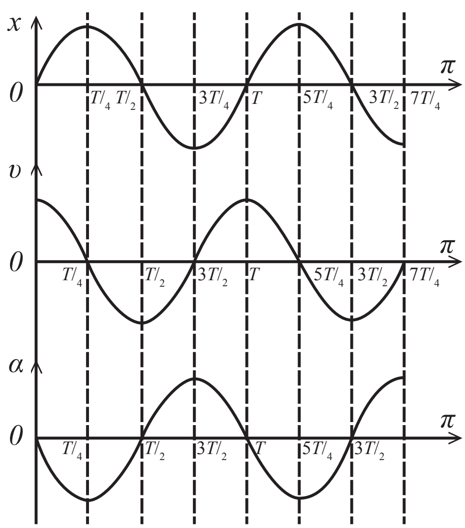
$$\upsilon = \omega A\cos\omega t = \omega A\sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right) = \upsilon_O\sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right) \quad \text{bolar.}$$

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

$$a = -\omega^2 A\sin\omega t = -a_O\sin\omega t = a_O\sin(\omega t + \pi). \tag{5.7}$$

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 π tapawutlanýandygyna göz ýetirýäris.

5.2-nji suratda ýokarda getirilen formulalara laýyklykda x süýşmäniň, υ tizligiň we a tizlenmäniň wagta görä (wagt T periodyň ülüşlerinde 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 pursadynda nola deň bolan bahalara eýe bolýar.



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

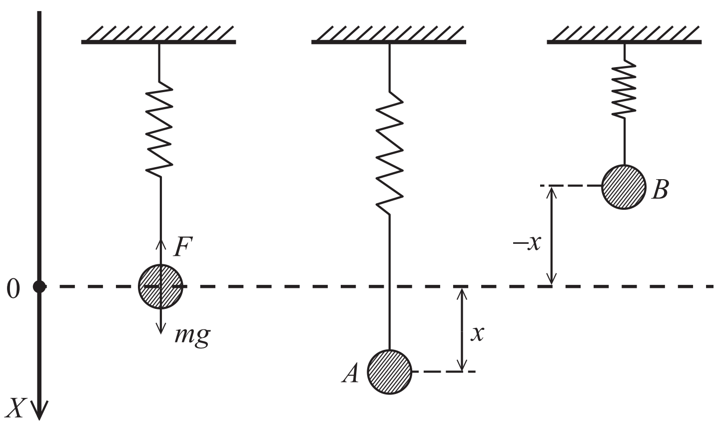
Yrgyldaýan nokadyň tizlenmesi, haçanda tizlik wektory öz ugruny üýtgedende, ýagny $t = T/4$, $3T/4$, $5T/4$ we ş.m. pursatlarda özüniň iň uly bahalaryny alýar.

Yrgyldaýan nokat deňagramlylyk ýagdaýyndan geçende ($x = 0$), haçanda süýşme öz ugruny üýtgedende, tizlik iň uly baha eýe bolýar, ýokarda görkezilen 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 çaltlaşýar, daşlaşanda haýallaýar.

Ähli sereden gatnaşyklarymyz togtamaýan yrgyldyny häsiýetlendirýär. Emma hakyky jisimde ýa-da sistemada bolup geçýän yrgyldylar togtaýan yrgyldylardyr. Sebäbi sürtülme zerarly yrgyldynyň periody we aýlaw ýygylygy üýtgemän galsa-da, yrgyldynyň amplitudasy kiçelip başlaýar.

§ 5.3. Maýatnikleriň yrgyldylary, puržinli maýatnik

Puržinden asylan ýüküň yrgyldysyna seredeliň (*5.3-nji surat*). Puržinli maýatnigiň deňagramlylyk ýagdaýynda oňa täsir edýän agyrlyk güýji P, F maýyşgaklyk güýjüne deň. Eger-de ony ox oky boýunça aşaklygyna çekip x aralyga süýşürip goýbersek, maýatnigiň



5.3-nji surat. Puržinden asylan ýüküň yrgyldylary süýşmesine garşylykly ugrukdyrylan puržine täsir edýän F maýyşgaklyk güýjüň täsiri astynda maýatnik erkin yrgyldap başlaýar. Gukuň kanunyna görä F güýç maýatnigiň x süýşmesiniň absolýut bahasyna göni proporsionaldyr we mydama deňagramlylyk ýagdaýyna tarap ugrukdyrylandyr. Yrgyldyly hereketdäki şeýle güýçlere yzyna gaýtaryjy maýyşgak güýçler diýilýär.

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

$$F = -kx, \tag{5.8}$$

bolar.

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

$$F = ma, \tag{5.9}$$

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

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

Ýagny puržinli maýatnik aýlaw ýygylygy bolan erkin garmoniki yrgyldy edýär. (ω_0 – erkin yrgyldynyň hususy aýlaw ýygylygy).

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

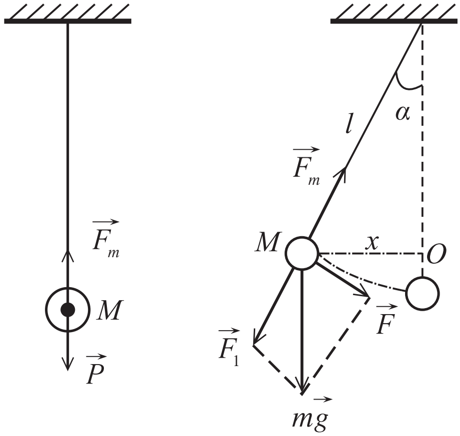
$T = \dfrac{2\pi}{\omega_0}$ formula esasynda puržinli maýatnigiň yrgyldysynyň periodyny kesgitleýäris:

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}. \tag{5.10}$$

Puržinli maýatnigiň 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 ýagdaýynda



5.4-nji surat. Matematiki maýatnik

bolýar. Şol wagtda oňa täsir edýän P agyrlyk güýji dartylan sapagyň F_m 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 deňtäsiredijisi F güýç bolýar. Bu güýç hemişe maýatnigiň deňagramlylyk ýagdaýyna ugrugandyr. Ol güýjüň ululygy:

$$F = mg \sin \alpha. \tag{5.11}$$

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

$$F = -\, mg\frac{x}{l}. \tag{5.11. a}$$

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

$$a = \frac{F}{m} = -\, mg\frac{x}{ml} = -\, g\frac{x}{l}, \tag{5.12}$$

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

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

$$-\,\omega_0^2 x = -\, g\frac{x}{l} \quad \text{ýa-da} \quad \omega_0^2 = \frac{g}{l}. \tag{5.13}$$

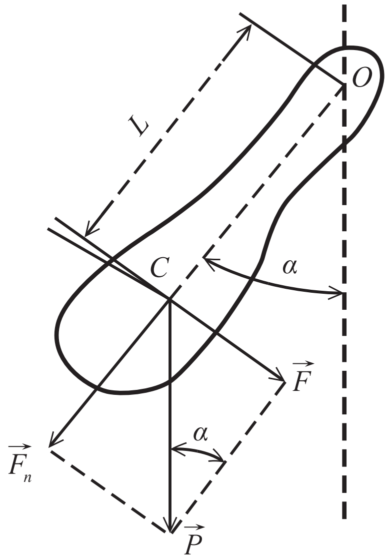
Bu ýerde $\omega_0 = \frac{2\pi}{T}$ gatnaşygy göz öňünde tutup alarys:

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

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

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

Matematiki maýatnikden tapawutlylykda şeýle jisimi maddy nokat hökmünde kabul etmek bolmaz. Uly bolmadyk burça gyşarmasynda fiziki maýatnik hem yrgyldyly hereket edýär. Agyrlyk güýji fiziki maýatnigiň C massa merkezine goýlan diýip hasaplalyň (*5.5-nji surat*).



5.5-nji surat. Fiziki maýatnigiň yrgyldysy

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

$$M = -Fl = -mgL \cdot \sin\alpha,$$

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:

$$M = I\varepsilon = I\frac{d^2\alpha}{dt^2}. \qquad (5.14)$$

deňdir. Bu ýerde I – maýatnigiň inersiýa momenti, ε – onuň burç tizlenmesi. Onda:

$$I \cdot \frac{d^2\alpha}{dt^2} = -\,mgL\sin\alpha$$

ýa-da:

$$\frac{d^2\alpha}{dt^2} + \frac{mgL}{I}\sin\alpha = 0. \qquad (5.15)$$

Bu deňleme fiziki maýatnigiň yrgyldysynyň differensial deňlemesidir.

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

$$\frac{g}{l} = \frac{mgL}{I}, \quad \text{bu ýerden} \quad L = \frac{I}{ml}. \qquad (5.16)$$

(5.16) formula fiziki maýatnigiň getirilen uzynlygyny, yrgyldy periody berlen fiziki maýatnigiň periodyna deň bolan matematiki maýatnigiň uzynlygyny kesgitleýär. Birnäçe özgertmelerden soňra, fiziki maýatnigiň sikl ýygylygy bilen garmoniki yrgyldy edýändigini göz öňünde tutup, alýarys:

$$T = \frac{2\pi}{\omega_0} = 2\pi\sqrt{\frac{I}{mgL}} = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}. \qquad (5.17)$$

Bu ýerde I – maýatnigiň O oka görä inersiýa momenti, L – asma nokadyndan maýatnigiň massa merkezine çenli aralyk, $L = I/(ml)$ – fiziki maýatnigiň getirilen uzynlygy, g – erkin gaçmanyň tizlenmesi.

§ 5.4. Garmoniki yrgyldyly hereketiň energiýasy

Massasy m bolan yrgyldyly hereket edýän material nokadyň energiýasyny kesgitläliň. 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 ölçenilýär. Bu güýç yzyna gaýtaryjy F güýje deň bolup, ugry boýunça oňa garşylykly ugrukdyrylandyr. Onda:

$$E_p = \int_0^x -Fdx.$$

Bu ýerde $F = -kx$, şeýlelikde:

$$E_p = \int_0^x kxdx = \frac{kx^2}{2}. \qquad (5.18)$$

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

$$E_p = \frac{1}{2}m\omega^2 A^2 \sin^2(\omega t + \varphi). \qquad (5.19)$$

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

$$W_k = \frac{m\upsilon^2}{2} = \frac{1}{2}m\omega^2 A^2 \cos^2(\omega t + \varphi). \qquad (5.19\ a)$$

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 $\sin^2\alpha + \cos^2\alpha = 1$ bolýanlygy üçin:

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

Şeýlelikde, yrgyldaýan jisimiň doly energiýasy onuň amplitudasynyň kwadratyna proporsionaldyr we yrgyldy prosesiň dowamynda üýtgemeýär. Çetki ýagdaýlarda yrgyldaýan jisimiň tizligi $\upsilon=0$, 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 togtaýan yrgyldylardyr.

Periodiki üýtgeýän daşky güýjüň täsiri astynda bolup geçýän yrgyldylara mejbury yrgyldylar diýilýär. Mejbury yrgyldynyň ýygylygy (mejbur ediji güýjüň ýygylygy) daşky güýjüň ω üýtgeýiş ýygylygyna bagly bolýar. Mejbur ediji güýjüň garmoniki kanun boýunça üýtgeýän halyny düşündirmek ýönekeýdir. Mejbur ediji güýjüň ω üýtgeýiş ýygylygy sistemanyň ω_o hususy yrgyldysynyň ýygylygyna 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 kesgitläliň. Goý, bu güýç t wagta görä şu deňlemä laýyklykda üýtgeýän bolsun:

$$F_{m.e} = F_0 \sin \omega t, \tag{5.21}$$

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

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

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

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

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

Şu ýerden

$$x = \frac{F_0}{k - m\omega^2} \sin \omega t. \tag{5.22}$$

(5.22) deňlemedäki k ululygy $k = m\omega_0^2$ bilen çalşyp, alýarys (ω_0 – jisimiň (sistemanyň) yrgyldysynyň hususy ýygylygy) onda:

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

Bu deňlemäniň sag bölegini üýtgedip, alarys:

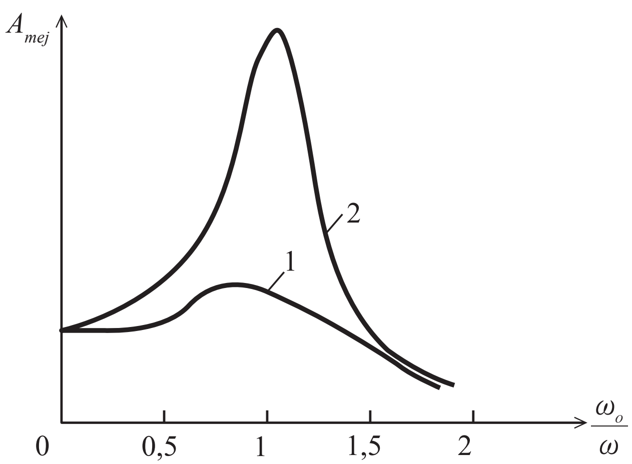
$$x = \frac{F_0}{m(\omega_0^2 - \omega^2)} \sin \omega t. \tag{5.23}$$

Mejbury yrgyldynyň şu deňlemesini adaty garmoniki yrgyldynyň deňlemesi bilen deňeşdirip, mejbury yrgyldynyň amplitudasyny taparys:

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

Şu aňlatmany seljerip, $(\omega_0^2 - \omega^2)$-yň tapawudy näçe kiçi bolsa, şonça-da A_{mej} uludygyny görýäris. Şeýlelikde, mejbur ediji ýygylyk ω sistemanyň hususy ýygylygyna golaýlaşanda, yrgyldynyň amplitudasy çürt-kesik artýar we rezonans hadysasy ýüze çykýar.

Köplenç, togtaýan yrgyldylaryň bolýandygy sebäpli, amplituda çäksiz ulalyp bilmez, ol diňe uly baha eýe bolar.



5.6-njy surat. Rezonansyň mejbur ediji güýje baglylygy

5.6-njy suratdan görnüşi ýaly, amplituda rezonans ýagdaýynda ulalýar, ýagny:

$$\omega_o = \omega \quad \text{ýa-da} \quad \frac{\omega_0}{\omega} = 1. \tag{5.25}$$

5.6-njy suratdaky egri 1 togtaýan yrgyldyny döredýän güýjüň uly bolan ýagdaýyna, egri 2 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 sur. ser.*).

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

Goý, yrgyldaýan nokat ähli bölejikleri özara baglanyşykly 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 çykarýar we ol ýerde oýtak döreýär. 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 tolkunyň 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 tolkunyň mysalydyr.

Yrgyldynyň ugry bilen onuň ýaýraýan ugry gabat gelende döreýän 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 döreýär. Netijede, yrgyldy ýüze çykyp, ol gurşaw boýunça ýaýrap gidýär.

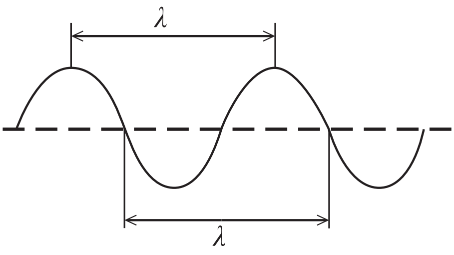
Boý tolkunlaryň döremegi üçin gurşaw gysylma ýa-da süýnme deformasiýa sezewar edilende, onda maýyşgak güýç döremeli. Bu şert gazda-da, suwuklykda-da, gaty jisimde-de kanagatlandyrylýar. Şonuň üçin boý tolkuny gazlarda-da, suwuklyklarda-da, gaty jisimlerde-de döräp, ýaýrap bilýär.

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

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 bellibir 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.

$$\upsilon = \lambda / T. \tag{5.26}$$

Belli bolşy ýaly, $\frac{1}{T} = \nu$, onda:

$$\upsilon = \lambda \nu. \tag{5.27}$$

Bu gatnaşyk tolkun uzynlygyny, periody (ýygylygy) we tolkun prosesiniň tizligini biri-biri bilen baglanyşdyrýar.

Gurşawyň dykyzlygy näçe uly bolsa, şonça-da tolkunyň ýaýraýyş tizligi kiçidir. Ikinji tarapdan, maýyşgaklygy onçakly uly bolmadyk gurşawa garanyňda, has maýyşgak gurşawda tizlik uly baha eýedir. Boý tolkunlarynyň tizligi şeýle formula bilen kesgitlenilýär:

$$\upsilon_b = \sqrt{E/\rho}\,. \tag{5.28}$$

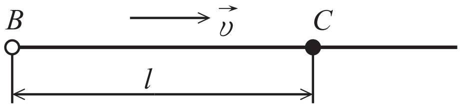
Kese tolkunlaryňky şu görnüşinde ýazylýar:

$$\upsilon_k = \sqrt{G/\rho} \quad \text{ýa-da} \quad \upsilon = \sqrt{\gamma RT}\,, \tag{5.29}$$

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

Köpsanly gaty jisimlerde $E > G$ bolandygy sebäpli boý tolkunlarynyň tizligi şol bir häsiýetli gurşawda kese tolkunlaryň tizliginden uly.

$$\upsilon_b > \upsilon_k.$$



5.8-nji surat. Tolkunyň ýaýraýşy

Tolkun deňlemesi. Islendik wagt pursadynda tolkunyň islendik nokadynyň süýşmesini tapmaga mümkinçilik berýän deňlemäni düzeliň. Goý, B nokatda wibrator – yrgyldynyň çeşmesi ýerleşen bolsun (*5.8-nji surat*). Tolkunlar υ tizlik bilen yrgyldynyň çeşmesinden gönüçyzygyň boýuna ýaýraýar diýeliň. B nokadyň yrgyldysynyň deňlemesi şeýle görnüşinde berlen:

$$x_B = A \sin 2\pi \nu t, \tag{5.30}$$

bu ýerde x_B – B nokadyň süýşmesi, A – onuň yrgyldysynyň amplitudasy, v – ýygylygy, t – yrgyldynyň başlanýan pursadyndan bäri hasaplanýan wagt.

B nokatdan sagdaky ähli nokatlar (mysal üçin, C nokat), sähelçe wagtdan 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 $t' = \frac{l}{\upsilon}$ wagt aralygynda ýeter. Bu ýerde υ – tolkunyň ýaýraýyş tizligi. Şeýlelik bilen, C nokat B nokatdan t' wagt giç yrgyldap başlar. Seredilýän gönüçyzygyň boýuna ýaýraýan tolkunlar togtamaýar diýip hasap etsek, C nokada tolkun ýetende ol A amplituda we $\omega = 2\pi v$ aýlaw ýygylykly yrgyldamaga başlar, ýagny onuň deňagramlylyk ýagdaýyndan t – wagta süýşmesi aşakdaky ýaly aňladylýar:

$$x = A\sin 2\pi v\,(t - t'). \qquad (5.\ 31)$$

Onda (5.30) deňleme şeýle görnüşi alar.

$$x = A\sin 2\pi v\,(t - l/\upsilon).$$

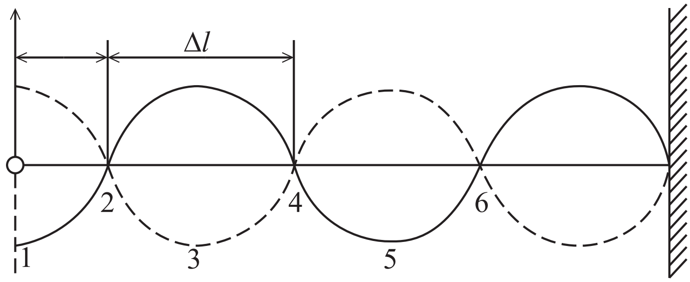
$\upsilon = \lambda v$ – aňlatmany hasaba almak bilen alarys.

$$x = A\sin 2\pi\left(vt - \frac{l}{\lambda}\right) \quad \text{ýa-da} \quad x = A\sin 2\pi\left(\frac{t}{T} - \frac{l}{\lambda}\right). \qquad (5.32)$$

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

§ 5.7. Durujy tolkunlar

Iki sany deň amplitudaly we 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*).



5.9-njy surat. Durujy tolkunyň emele gelşi

Goý, wibrator (yrgyldynyň çeşmesi) tolkuny 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 tolkunyň deňlemesini almak üçin şeýle görnüşdäki:

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

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

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

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:

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

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

$$A_d = 2A\cos(2\pi l/\lambda) \tag{5.34}$$

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

$$x = A_d \sin(2\pi t/T). \tag{5. 35}$$

Her bir nokat T period bilen garmoniki yrgyldy edýär. Durujy tolkunyň alnan (5.34) deňlemesindäki amplitudasy A_d tolkunyň 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 tolkunyň düwünleri diýilýär (2, 4, 6 nokatlar). Tolkunyň güberçekleri diýip nokatlaryň iň uly amplitudaly yrgyldylaryna aýdylýar (1, 3, 5 nokatlar). Güberçeklere (uly amplitudalara) l-iň $2\lambda/4$; $4\,\lambda/4 : 6\lambda/4$ deň bolan bahalary degişlidir. Diýmek, durujy tolkunyň uzynlygy iki goňşy güberçegiň ýa-da düwüniň arasyndaky uzaklyk ýarym tolkun uzynlyga deňdir:

$$\Delta l = \lambda/2 = \lambda_d, \tag{5.36}$$

bu ýerde λ – ylgaýjy tolkunyň uzynlygy. Wagtyň berlen momentlerinde köpeldijiniň ähli nokatlar üçin birmeňzeş bahasynyň bardygy sebäpli, iki düwüniň 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 düwüniň 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 serpigende serpilme araçäginde düwün ýa-da güberçek emele geler. Munuň özi sredalaryň dykyzlyklaryna baglydyr.

Eger tolkun degip, yzyna serpigýän sreda tolkunyň ýaýraýan sredasyndan has dykyz bolsa, onda araçäkde düwün emele gelýär. Eger tolkunyň yzyna serpigýän sredanyň dykyzlygy tolkunyň ýaýraýan sredasyndan pes bolsa, araçäkde güberçek emele gelýär.

Tolkun has dykyz sredadan (päsgelçilikden) yzyna serpigende araçäkde düwüniň emele gelmegi tolkunyň has dykyz sredadan yzyna gaýdyp, öz fazasyny göni garşylykly faza üýtgeýändigi bilen düşündirilýär, şonda araçäkde garşylykly ugurlary bolan yrgyldylar goşulyp, düwüniň emele gelmegine eltýär.

Tolkunyň ýarym uzynlygyça aralykda fazanyň garşylykly faza üýtgeýändigi sebäpli, bu fakta ýarymtolkunyň ýitmegi diýip atlandyrylýar.

Tolkun pes dykyzlykly sredadan yzyna serpigende yza serpigýän ýerinde fazasyny üýtgetmeýär, şonuň üçinem ýarymtolkun ýetmeýär. Şol sebäpli-de barýan we yzyna serpigen tolkunlaryň fazalary araçäkde birmeňzeşdir, şonuň üçinem yrgyldylaryň birmeňzeş fazalarynyň goşulmagy netijesinde şol ýerde güberçek emele gelýär.

Akustika. Ses tolkunlary. Infra- we ultrasesler

Ýygylygy 20 *Gs*-den 20 000 *Gs* 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 diýlip düşünilýär.

Ses tolkunlarynyň ýaýraýyş tizligi sredanyň häsiýetlerine (onuň maýyşgaklygyna, dykyzlygyna) 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.

Ýygylygy 20 000 *Gs*-den uly bolan maýyşgak tolkunlara ultrasesler, ýygylygy 20 *Gs*-den kiçi bolan tolkunlara infrasesler diýilýär. Fizikanyň ses tolkunlaryny öwrenýän bölümine akustika diýilýär. Sesi eşitmek üçin ses çeşmesinden gulaga çenli bolan giňişlikde maýyşgak sredanyň üznüksiz bolmagy gerekdir.

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

Ses tolkuny özi bilen bellibir mukdarda energiýa alyp gidýär. Sesiň güýji tolkunyň özi bilen alyp gidýän energiýasy bilen baglanyşyklydyr. Ses tolkunlarynyň ugruna perpendikulýar bolan 1 m^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:

$$I = \frac{W}{St}, \tag{5.37}$$

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 amplitudasyna baglydyr. Seslenýän jisimiň doly energiýasy:

$$W = \frac{4\pi^2 v^2 A^2 m}{2} = 2\pi^2 v^2 A^2 m, \tag{5.38}$$

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

$$I = \frac{W}{4\pi R^2 t}, \tag{5.39}$$

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 dykyzlygyna baglydyr.

Gazlarda ses tolkunlarynyň ýaýraýşyny şeýle düşündirmek bolar. Mehaniki yrgyldylarynyň çeşmesi bu yrgyldylary özüni gurşap alan gaz molekulalaryna berýär. Netijede, giňişligiň kiçijik oblastynda basyş üýtgeýär. Gaz maýyşgaklyk häsiýete eýe bolanlygy üçin, ol şol bada giňelýär we gazyň bu elementar göwrüminde gazyň dykyzlygy peselýär (seýreklenýär), 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 ýaýramagynyň köp kanunalaýyklyklaryny termodinamikanyň bölüminde öwrenilýän adiabatiki prosesleriň teoriýasynyň esasynda düşündirmek başartdy.

Boý tolkunlary üçin ýazylan (5.28) formulany ulanyp, gazlarda ses tolkunlarynyň tizligini şeýle ýazmak bolar:

$$\upsilon = \sqrt{\frac{E}{\rho}} = \sqrt{\frac{1}{\alpha\rho}}, \tag{5.40}$$

bu ýerde $\alpha = 1/E$ – maýyşgaklyk koeffisiýenti, ρ – gazyň dykyzlygy.

Gazyň maýyşgaklyk koeffisiýentiniň onuň basyşy bilen şeýle baglanyşygy bar:

$$\alpha = 1/\gamma p.$$

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

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

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

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

$$\upsilon = \sqrt{\frac{\gamma p}{\rho}} = \sqrt{\frac{\gamma RT}{\mu}}. \tag{5.41}$$

Getirilen formulalardan, gaz gurşawynda sesiň tizligi temperatura, gazyň molýar massasyna we onuň ýylylyk häsiýetnamasy bolup durýan adiabata görkezijisine – γ baglydygy, gazyň basyşyna bagly däldigi gelip çykýar.

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

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

Tizligiň bu bahasy tejribe arkaly alnan bahalar bilen gabat gelýär.

§ 5.8. Ultrases we onuň ulanylyşy

Ozal belläp geçişimiz ýaly, ýygylygy 20 000 *Gs*-den uly bolan yrgyldylara ultrasesler diýilýär. Ultrasesi adamyň gulagy eşitmeýär. It we beýleki haýwanlar oňa duýgur bolýarlar. Ultrasesiň esasy aýratynlygy – onuň uly güýjüniň bardygy we olary bellibir ugra gönükdirip bolýanlygydyr.

Ultrasesleri almak üçin pýezoelektrik effekt diýilýän effekt has köp ulanylýar. Ultrases yrgyldylaryny almak üçin kwarsyň kristallary (pýezokwars) peýdalanylýar. Eger kristallografiki oklaryna görä bellibir ýagdaýda kesilip alnan kwars plastinkasyna metal obkladkalarynyň (gatlaklarynyň) kömegi bilen üýtgeýän elektrik naprýaženiýesi goýulsa, plastinka yrgyldamaga başlar. Eger goýlan elektrik naprýaženiýesiniň ýygylygy plastinkanyň hususy mehaniki yrgyldylarynyň ýygylygyna laýyk gelse (rezonans hadysasy), onda kwars plastinkasynyň yrgyldylary has-da güýçli bolýar. Plastinkanyň ölçeglerini saýlap almak bilen, ýüz müňlerçe *Gs* ýygylykly ultrases yrgyldylaryny almak bolar.

Ultrases tolkunlarynyň tolkun uzynlygynyň gysga bolýandygy 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 barlaglarda, suwuň astyndaky zatlary duýmak hem-de çuňluklary kesgitlemek üçin giňden ulanylýar.

Ultrases we ses tolkunlarynyň ýaýraýyş tizligi biri-birine golaý. Ultrasesiň hem λ tolkun uzynlygyny, ν ýygylygyny we υ tizligini şu gatnaşyk biri-biri bilen baglanyşdyrýar $\upsilon = \frac{\lambda}{T} = \lambda\nu$, emma ultrases tolkunlarynyň uzynlygy ses tolkunlarynyň tolkun uzynlygyndan kiçi. Mysal üçin, ultrasesiň tizligi $\upsilon = 330\ m/s$, ýygylygy $\nu = 330\ kGs$ bolsa,

$$\lambda = \frac{\upsilon}{\nu} = \frac{330\ m \cdot s^{-1}}{330 \cdot 10^3 s^{-1}} = 10^{-3} m = 1\, mm.$$

Ultrasesiň ýygylygynyň aşaky çägi 20 *kGs* we ýokarky çägi häzirki wagtda 200 *MGs*-den-de 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 gelýänçä bolan uzaklygy geçýän wagty ýörite abzal bilen ölçelýär. Ultrasesiň gurşawda ýaýramak tizliginiň belli bolany üçin jisime çenli uzaklygy ölçemek aňsat.

Ultrases defektoskopiýasy. Ultrasesiň tehnikada wajyp ulanylyşy alym S. Y. Sokolow tarapyndan döredilen ultrases defektoskopiýasydyr. Eger ultrasesiň ýaýraýan ýerindäki metalda jaýryk bar 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) ultrases defektoskopy ýaly işleýär. Ultrases çykarýan enjamy adamyň bedeniniň ýüzi boýunça ýöredip, böwrekde, öt haltada daş bardygyny ýa-da ýokdugyny, bar bolsa olaryň ölçeglerini kesgitläp bolýar. Bagryň ölçegleri boýunça onuň çişini kesgitläp bolýar.

Ultrases zondlary diş sogurmak üçin hem ulanylýar. Ultrases özi bilen uly energiýany alyp gidýär. Şonuň üçin ultrasesiň täsiri astynda jisimler gyzýar 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 mümkinçilik berýär (binewral effekt). Beýni merkezleriniň gulaklara gelýän yrgyldylaryň faza tapawudyny kesgitlemäge ukyplydygy sebäpli, ses tolkunlarynyň ugry kesgitlenilýär. Belent yrgyldyly ses bolanda gulaklaryň ikisindäki ses amplitudalarynyň tapawudy netijesinde sesiň gelýän ugruny seljermek bolýar. Ses subýektiw häsiýetlidigi üçin, biz sesiň üç sany häsiýetini duýýarys: sesiň belentligini, tembrini, gatylygyny tapawutlandyrýarys. Sesiň belentligi onuň ýygylygy bilen kesgitlenilýär. Sesiň gatylygy (güýji) sesiň ýaýraýyş ugruna perpendikulýar ýerleşen bir meýdan birliginden ýaýraýan ses tolkunlarynyň wagt birliginde geçirýän energiýasynyň mukdary bilen kesgitlenýär.

Ses tolkunlarynyň ses duýgusyny döretmegi üçin sesiň güýjüniň eşidiş bosagasy diýilýän käbir minimal (iň kiçi) ululykdan uly bolmagy zerurdyr. Güýji eşidiş bosagasyndan aşakda ýatýan sesi gulak eşitmeýär. Ol eşiderden gaty gowşak bolýar. Eşidiş bosagasy dürli ýygylyklar üçin dürlüdir. Adamyň gulagy 1–3 *kGs* aralygyndaky ýygylykly yrgyldylary has gowy duýýar. Bu aralyk üçin eşidiş bosagasy 10^{-12} Wt/m^2 ululyga ýetýär. Has pes we has ýokary ýygylyklary gulak has ýaramaz duýýar. 20 *Gs*-den kiçi we 20 *kGs*-den uly ýygylykly 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 (iň uly) ululygyna duýuş bosagasy ýa-da agyry duýgusynyň bosagasy diýilýär. Agyry duýgusynyň bosagasy dürli ýygylyklar üçin birneme dürlüdir. Eşidiş bosagasy bilen agyry bosagasynyň aralygynda eşidiş aralygy ýerleşýär.

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

Sesiň güýjüni häsiýetlendirmek üçin, köplenç, şeýle ululyk ulanylýar:

$$\beta = 10 \ln \frac{I}{I_O}.$$

Bu ululyk desibellerde (*dB*) ölçenýär: $I_O = 10^{-12}$ Wt/m^2 – 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.).

SUWUKLYKLARYŇ WE GAZLARYŇ MEHANIKASY

§ 6.1. Suwuklyklardaky we gazlardaky basyş

Gazlaryň molekulalary biri-biri bilen bagly bolman, tertipsiz, haotik hereket edýärler. Olaryň özaratäsir 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 bilmeýärler. Olaryň göwrümi ýerleşen gaplarynyň göwrümi bilen kesgitlenýär.

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

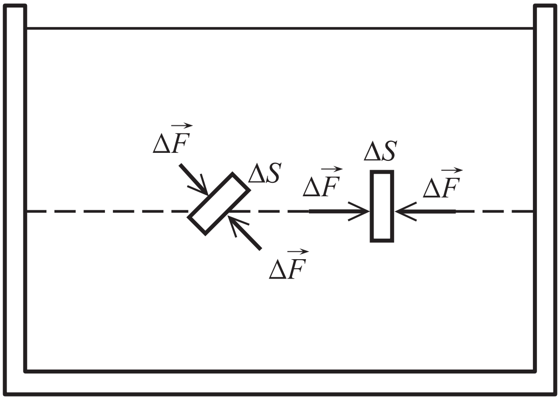
Suwuklyklaryň we gazlaryň häsiýetleri boýunça biri-birinden tapawutlanýandyklaryna garamazdan, birnäçe mehaniki hadysalaryň geçişi şol birmeňzeş deňlemeleriň üsti bilen aňladylýar. Şonuň üçin gazlaryň we suwuklyklaryň deňagramlylyk ýagdaýlary, häsiýetleri, olaryň özaratäsirleri, olardaky gaty jisimleriň hereketleri bitewülikde (meňzeşlikde) öwrenilýär. Mehanikanyň gazlaryň we suwuklyklaryň şu häsiýetlerini öwrenýän bölümine gidroaerodinamika diýilýär.

Mehanikada suwuklyklar we gazlar üznüksiz we tükeniksiz tutuş gurşaw hökmünde seredilýär. Suwuklyklaryň dykyzlygy basyşa örän az bagly bolýar. Gazlaryňky bolsa, tersine.

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

Deňagramlylyk ýagdaýynda duran suwuklygyň içinde inçejik plastinkajyk ýerleşen diýip göz öňüne getireliň (*6.1-nji surat*).

Onuň nähili ýerleşendigine garamazdan, onuň dürli taraplaryndaky suwuklyk bölejikleri tarapyndan şeýle-de, ululyklary boýunça



6.1-nji surat. Suwuklygyň içindäki jisime suwuklygyň basyşy

biri-birine deň we plastinkanyň meýdanyna perpendikulýar bolan ΔF güýçleri täsir edýär.

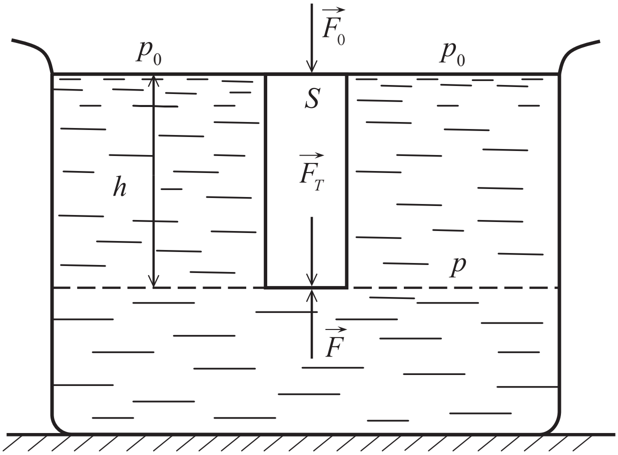
Suwuklyk tarapyndan täsir edýän ΔF normal güýjüniň bu güýjüň täsir edýän ΔS meýdanyna bolan gatnaşygyna deň bolan fiziki ululyga basyş diýilýär we şeýle görnüşde ýazylýar:

$$p = \frac{\Delta F}{\Delta S}. \tag{6.1}$$

Halkara birlikler sistemasynda (IS) basyşyň ölçeg birligi Paskaldyr (Pa). (6.1) formula esasynda $1\ Pa = 1\ N/m^2$. 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:

$$1\ mm.sim.süt. = 133\ Pa;$$
$$1\ atm = 1{,}01 \cdot 10^5\ Pa;$$
$$1\ at = 0{,}981 \cdot 10^5\ Pa.$$

Indi dynçlykda duran, gysylmaýan suwuklygyň içindäki basyşyň bölünişine, oňa suwuklygyň agramynyň nähili täsirleşýändigine seredeliň. Deňagramlylyk ýagdaýynda suwuklygyň kese ugry boýunça ähli ýerinde basyşy deň, eger-de şeýle bolmadyk bolsady, onda suwuklygyň üsti tekiz bolmazdy. Gysylmaýan suwuklyk diýmeklik onuň dykyzlygy basyşa bagly däl diýmekdir.



6.2-nji surat. Suwuklykdaky jisime basyşyň kesgitlenilişi

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

Suwuklygyň ýokarky gatlagyna p_0 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 $F_0=p_0S$, aşaky esasyna täsir edýän F güýç $F=pS$ deňdir.

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

$$F_A = mg = \rho hSg.$$

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 deňagramlaşan şertini ýazýarys:

$$F_0 + F_A = F \quad \text{ýa-da} \quad p_0S + \rho ghS = pS.$$

Şu aňlatmadan görnüşi ýaly, h çuňlukdaky biziň gözleýän basyşymyz:

$$p = p_0 + \rho gh. \tag{6.2}$$

Bu ýerde $p_h = \rho gh$ ululyga deň bolan basyşa gidrostatiki basyş diýilýär. Eger daşarky basyş $p_0 = 0$ bolsa, onda h çuňlukdaky suwuklygyň basyşy onuň gidrostatiki basyşyna deňdir, ýagny

$$p = p_h.$$

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

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

$$F_A = \rho gV,$$

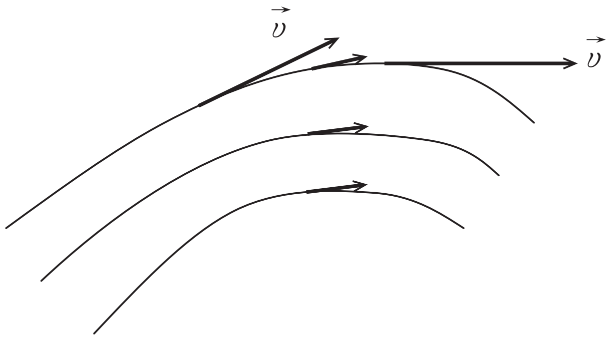
bu ýerde F_A – Arhimediň güýji, ρ – suwuklygyň dykyzlygy, V – suwuklyga çümdürilen jisimiň göwrümi.

§ 6.2. Suwuklyklaryň durnugyşan akymy. Üznüksizlik deňlemesi

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

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

Suwuklyk bölejiginiň käbir kesgitli hasaplaýyş sistemasyna görä alnan hereketini kesgitläliň. Şonda her bir bölejige özüniň tizlik wektory degişli bolar. Suwuklyk tutuşlygyna tizlik wektorynyň meýdany



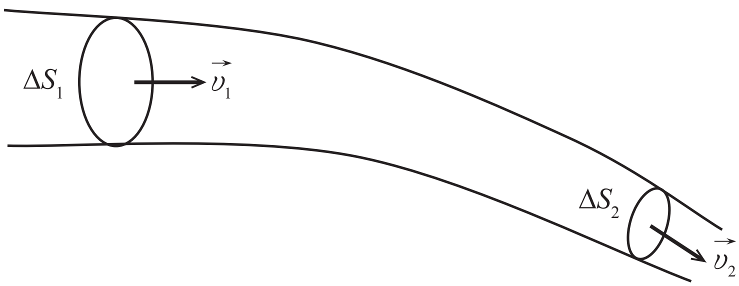
6.3-nji surat. Suwuklyk akymynyň meýdany

bolar. Biz tizlik wektorynyň meýdanynda ýerleşen her bir nokada suwuklyk bölejiginiň şol nokatdaky tizliginiň ugruna laýyk gelýän galtaşma çyzyklaryny geçirip bileris (*6.3-nji surat*).

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

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

Kese kesiginiň meýdany ΔS_1 we ΔS_2 bolan akym turbasyna serediliň (*6.4-nji surat*).



6.4-nji surat. Akymyň üznüksizliginiň kesgitlenilişi

Wagt birliginde ΔS_1 kesim arkaly $\Delta S_1 \cdot \upsilon_1$ göwrümli suwuklyk akyp geçer, bu ýerde $\upsilon_1 - \Delta S_1$ kesimiň alnan ýerindäki suwuklygyň akyş tizligi, şeýle-de, wagt birliginde ΔS_2 kesim arkaly $\Delta S_2 \cdot \upsilon_2$ göwrümli suwuklyk akyp geçer. Bu ýerde $\upsilon_2 - \Delta S_2$ kesimiň alnan ýerindäki akyş tizligi.

Gysylmaýan suwuklyk bolanda ΔS_2 kesim arkaly ΔS_1 kesimden akyp geçen suwuklygyň göwrümine deň bolan göwrümli suwuklyk akyp geçer, diýmek,

$$\Delta S_1 \upsilon_1 = \Delta S_2 \upsilon_2.$$

Bu baglanyşyk akym turbajygynyň islendik iki kesimi üçin dogrudyr. Şonuň üçin hem, ony şeýle görnüşde ýazarys:

$$\Delta S \cdot \upsilon = const. \tag{6.3}$$

Gysylmaýan suwuklygyň akym tizliginiň akym turbajygynyň kese kesigine 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 akyş turbajygynyň ΔS_1 kesiginden soňra ΔS_2 kesiginden akyp geçýän Δm massany bölüp alalyň (*6.5-nji surat*). Suwuklygyň giriş ΔS_1 kesikdäki tizligini υ_1 arkaly, basyşyny p_1 arkaly, çykyş S_2 kesikdäki tizligini υ_2 ,basyşyny p_2 arkaly belgiläliň. Akyş turbajygy gorizontal däl-de, ýapgydyrak ýerleşipdir diýip, göz öňüne 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 $\frac{m\upsilon_1^2}{2}$ we potensial energiýasy mgh_1-e 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:

$$A = p_1 \Delta S_1 l_1 - p_2 \Delta S_2 l_2, \tag{6.4}$$

bu ýerde Δt wagtda suwuklygyň ΔS_1 kesikden akyp geçen l_1 ýoly $l_1 = \upsilon_1 \Delta t$, ΔS_2 kesikdäkisi $l_2 = \upsilon_2 \Delta t_2$-ä deňdir.

Şeýlelikde, suwuklyk akymynyň ýerine ýetirýän A işi

$$A = p_1 \Delta S_1 \upsilon_2 \Delta t - p_2 \Delta S_2 \upsilon_2 \Delta t. \qquad (6.5)$$

Suwuklygyň ΔS_1 kesigiň üstünden akyp geçenindäki doly energiýasy:

$$W_1 = m\upsilon_1^2/2 + mgh_1.$$

ΔS_2 kesigiň üstünden geçenindäki doly energiýasy:

$$W_2 = m\upsilon_2^2/2 + mgh_2. \qquad (6.6)$$

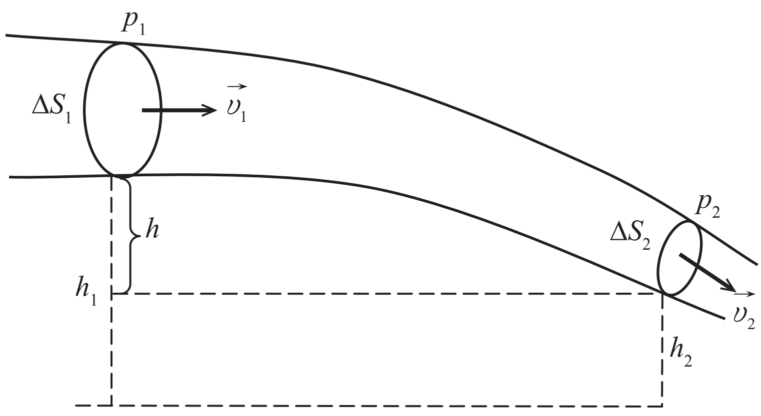
ΔS_1 we ΔS_2 kesikleriň aralygynda hiç hili energiýanyň toplanmasy ýok. Suwuklygyň doly energiýasynyň üýtgemesi daşarky güýçleriň ýerine ýetirýän işiniň ululygyna deňdir, ýagny

$$\Delta W = -A.$$

$$m_1 \upsilon_1^2/2 + mgh_1 - m\upsilon_2^2/2 - mgh_2 = p_2 \Delta S_2 \upsilon_2 \Delta t - p_1 \Delta S_1 \upsilon_1 \Delta t$$

ýa-da

$$\frac{m\upsilon_1^2}{2} + mgh_1 + p_1 \Delta S_1 \upsilon_1 \Delta t = \frac{m\upsilon_2^2}{2} + mgh_2 + p_2 \Delta S_2 \upsilon_2 \Delta t. \qquad (6.7)$$



6.5-nji surat. Bernulliniň deňlemesiniň kesgitlenilişi

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

$$\Delta S_1 \upsilon_1 \Delta t = \Delta S_2 \upsilon_2 \Delta t = V.$$

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

$$\rho\frac{\upsilon_1^2}{2} + \rho g h_1 + p_1 = \rho\frac{\upsilon_2^2}{2} + \rho g h_2 + p_2. \qquad (6.8)$$

Bu deňleme ilkinji gezek görnükli fizik hem-de matematik Danil Bernulli (1700–1782 ý.) 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.

$$\rho\frac{\upsilon^2}{2} + \rho g h + p = const, \qquad (6.9)$$

bu deňlemedäki p – ululyga statiki basyş, $\rho\upsilon^2/2$ – dinamiki basyş, $\rho g h$ – gidrostatiki basyş diýilýär.

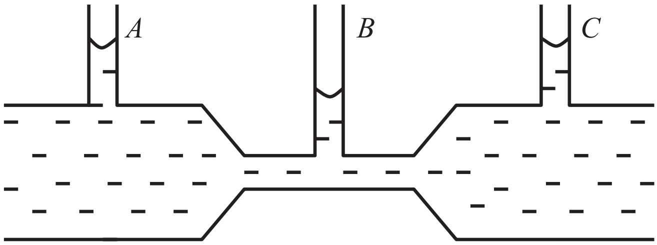
Gidrodinamikanyň köpsanly meseleleri şu deňlemäniň kömegi bilen çözülýär. Ol suw, kä halatlarda howa ýaly şepbeşikligi az bolan suwuklyklar we gazlar üçin dogrudyr.

Bernulliniň deňlemesiniň käbir ulanylýan ýerleri barada durup geçeliň:

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

$$\rho\frac{\upsilon_1^2}{2} + p_1 = \rho\frac{\upsilon_2^2}{2} + p_2. \qquad (6.10)$$

Suwuklyk dürli kesigi bolan gorizontal turbadan akanda turbanyň dar ýerlerinde suwuklygyň tizliginiň uly, emma basyşynyň kiçi bolýandygyny, giň ýerlerinde bolsa, tersine, basyşyň köp bolup, tizligiň kiçi bolýandygyny (6.10) formuladan we suw çüwdüriminiň üznüksizlik deňlemesinden görmek kyn däl. Munuň hakykatdan-da şeýle



6.6-njy surat. Dürli kese kesikli turbada basyşyň dürlüligi

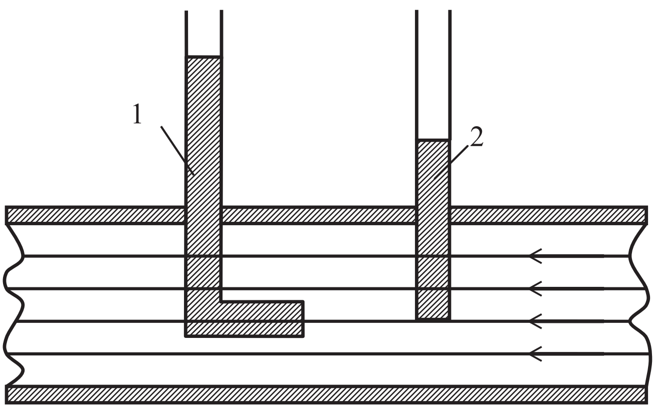
bolýandygyny turbanyň boýuna A, B, C manometrleri ýerleşdirip barlap görmek bolar (*6.6-njy surat*).

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 öňündäki tizligi nola deň bolar.

Onda (6.10) deňleme şeýle görnüşde bolar:

$$p_2 = p_1 + \frac{\rho \upsilon_1^2}{2}. \qquad (6.11)$$

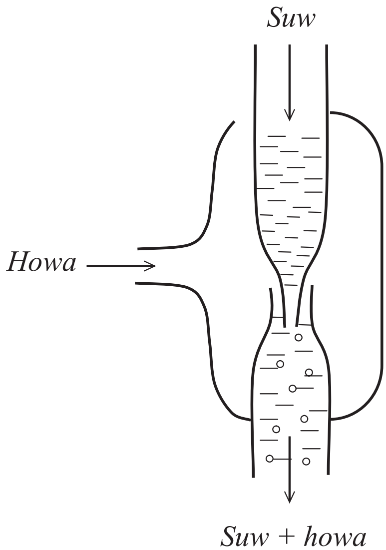


6.7-nji surat. Akymyň garşysyna tarap egreldilen turbada basyşyň ulalyşy

Deşigi akymyň garşysyna ugrukdyrylan manometr turbajygyna Pitonyň turbajygy hem diýilýär. Ol (6.11) formuladan görnüşi ýaly, p_1 basyşdan $\rho\upsilon_1^2/2$ ululykça uly bolan p_2 basyşy, ýagny statiki we dinamiki $(\rho\upsilon_1^2/2)$ basyşlaryň jemi bolan doly basyşy ölçär. p_1 – statiki basyşy 2-nji manometr ölçeýär. Şeýlelikde, doly basyşy we statiki basyşy (p_2 we p_1) anyklap, akymyň υ_1 tizligini kesgitlemek bolar.

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

Mysal üçin, pulwerizatorlaryň (atyr sepiji gural), suw çüwdüriji 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 çüwdürimiň sorujy täsiri ýüze çykýar.



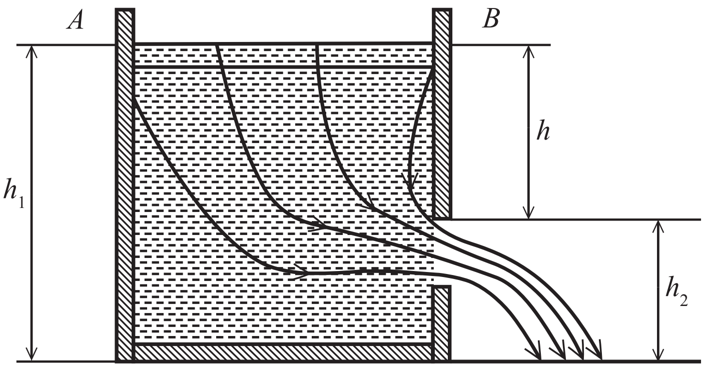
6.8-nji surat. Suw çüwdüriji nasoslaryň işleýiş prinsipi

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

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:

$$\rho\frac{\upsilon_1^2}{2} + \rho g h_1 + p_1 = \rho\frac{\upsilon_2^2}{2} + \rho g h_2 + p_2.$$

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



6.9-njy surat. Deşikden akyp çykýan suwuň tizliginiň kesgitlenilişi

$$\frac{\upsilon_1^2}{2} + gh_1 = \frac{\upsilon_2^2}{2} + gh_2.$$

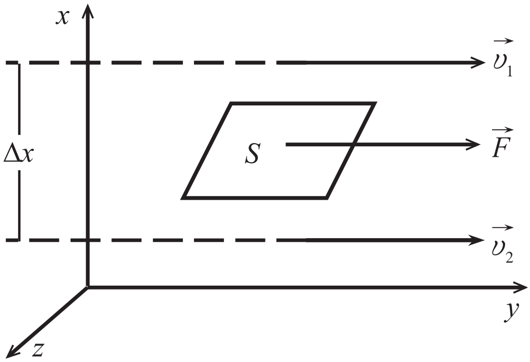
Suw çüwdürimini üznüksizliginiň deňlemesine görä, $\upsilon_2/\upsilon_1 = S_1/S_2$. Şu ýerde S_1 we S_2 – gabyň üstüniň we deşiginiň kese kesiginiň meýdanlary. Eger $S_1 > S_2$, onda $\upsilon_1^2/2$ hasaba almasa-da bolar. Onda:

$$\upsilon_2^2 = 2g(h_1 - h_2) = 2gh \quad \text{ýa-da} \quad \upsilon_2 = \sqrt{2gh}.$$

Bu formula Torriçelliniň 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) koeffisiýenti. Laminar we turbulent akymlar

Suwuklyklarda bir gatlak beýleki gatlaga görä orun çalşyranynda sürtülme güýji döreýär. Has çalt hereketlenýän gatlak tarapyndan haýal hereketlenýän gatlaga tizlendiriji güýç täsir edýär. Tersine, haýal hereketlenýän gatlak tarapyndan çalt hereketlenýän gatlaga saklaýjy güýç täsir edýär. Şeýlelikde, içki sürtülme güýji döreýär. Bu güýçler gatlaklaryň üstüne geçirilen galtaşma çyzygy boýunça ugrukdyrylan-



6.10-njy surat. Suwuklyklarda içki sürtülme güýji

dyr. Seredilýän gatlagyň meýdanynyň üsti näçe uly bolsa, içki sürtülme güýji şonça-da uludyr, hem-de gatlakdan gatlaga geçendäki suwuklygyň akyş tizliginiň üýtgeýiş çaltlygyna baglydyr.

Goý, biri-birinden Δx aralykda ýerleşen iki gatlak (*6.10-njy surat*) degişlilikde, υ_1 we υ_2 tizlik bilen akýar diýeliň. Ýagny

$$\upsilon_1 - \upsilon_2 = \Delta\upsilon.$$

Δx – gatlaklaryň arasyndaky hasaplanyş ugry gatlaklaryň akyş tizligine perpendikulýardyr. Gatlakdan-gatlaga geçilende tizligiň üýtgeýiş çaltlygyny görkezýän $\Delta\upsilon/\Delta x$ ululyga tizlik gradiýenti diýilýär. Içki sürtülme güýji tizlik gradiýentine proporsionaldyr, diýmek,

$$F = \eta\left|\frac{\Delta\upsilon}{\Delta x}\right|S. \tag{6.12}$$

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

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

$$1\ Puaz = 1\ dina \cdot s/sm^2$$

ýa-da

$$1\ Pa \cdot s = 10\ Puaz.$$

Şepbeşiklik birligi Puaz – fransuz alymy Puazeýliň hatyrasyna goýlan.

Suwuklygyň şepbeşikligi temperatura baglylykda 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 akyşy).

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

$$Re = \frac{\rho\langle\upsilon\rangle d}{\eta} = \frac{\langle\upsilon\rangle d}{\nu},$$

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

Reýnoldsyň sanynyň kiçi bahalarynda (Re = 1 000) laminar akym, uly bahalarynda (Re = 2 300 bolanda) turbulent akym bolýar. Suwuklyk turbadan akanda Reýnoldsyň sanynyň kritiki bahasynda laminar akym turbulent akyma geçýär. Turbadan akýan suw üçin Re-niň kritiki bahasy 2 300-e deňdir.

§ 6.5. Içki sürtülme koeffisiýenti. Kesgitlemekligiň usullary. Stoksuň usuly

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

Uly bolmadyk metal şarjagaz gliseriniň içine taşlanylýar, diýip pikir edeliň. Şonda dik aşak gaçýan şara üç sany güýç täsir edýär: agyrlyk güýji $P = mg = \frac{4}{3}\pi r^3 \rho g$ (ρ – şarjagazyň dykyzlygy), Arhimed güýji $F_A = mg = \frac{4}{3}\pi r^3 \rho' g$ (ρ' – gliseriniň dykyzlygy) we sürtülme güýji. Stoks tarapyndan tassyklanan kanuna göra, sürtülme güýji F_s jisimiň tizliginiň (υ), şepbeşiklik koeffisiýentiniň (η), şaryň (r) radiusynyň köpeldilmegine deňdir, ýagny $F_s = 6\pi\eta r\upsilon$. Suwuklyga gaçan şarjagaz diňe ilkinji momentinde tizlenip gaçmaga başlaýar: onuň gaçyş tizliginiň artdygyça F_s sürtülme güýji hem artyp, ol güýç şara täsir edýän P agyrlyk güýjüni deňagramlaşdyrmaga başlaýar. Güýçleriň şunuň ýaly deňagramlaşmagyna ýetilende şar deňölçegli hereket edip başlaýar. Onda:

$$P = F_A + F_s \tag{6.13}$$

ýa-da P, F_A we F_s ulylyklaryň bahalaryny şu deňlige goýup alarys:

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

Bu ýerden
$$\upsilon = \frac{(\rho - \rho')gr^2}{9\eta}. \tag{6.14}$$

Deňölçegli hereket edýän şaryň υ tizligini tapyp, onuň hereket edýän suwuklygynyň (gliseriniň) şepbeşiklik koeffisiýentini kesgitläp 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, suwuklyk 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) koeffisiýentini kesgitlemek üçin Puazeýliň usuly hem ulanylýar. Bu usul inçejik kapillýar turbajygyndaky suwuklygyň laminar akymyna esaslanandyr. Ýagny

$$\eta = \frac{\pi r^4 \Delta p t}{8Vl}, \tag{6.15}$$

bu ýerde r – kapillýar turbajygynyň radiusy, l – onuň uzynlygy, Δp – onuň ahyrlaryndaky basyşlaryň 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 sreda (howa) tarapyndan täsir edýän güýçleri öwrenmekden ybaratdyr. Bu mesele awiasiýanyň, deňiz gämileriniň tizlikleriniň artdyrylmagy bilen baglanyşykly bolan birnäçe meseleleriň ýüze çykmagy bilen ösüp başlady.

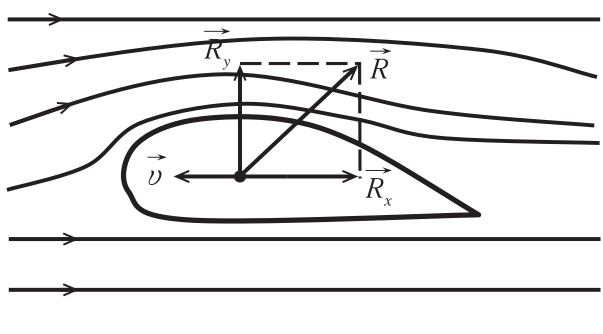
Suwuklykda ýa-da gazda hereket edýän jisime iki güýç täsir edýär. Olaryň deňtäsiredijisini R bilen belläliň (*6.11-nji surat*).

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.



6.11-nji surat. Uçaryň ganatynyň göteriji güýjüniň döreýşi

II

MOLEKULÝAR FIZIKANYŇ ESASLARY WE TERMODINAMIKA

VII bap

IDEAL GAZLARYŇ MOLEKULÝAR-KINETIK TEORIÝASYNYŇ ESASLARY

§ 7.1. Termodinamiki ululyklar

Örän köpsanly 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 esasyny düzýän bolsa, ikinji usul – termodinamikanyň esasyny 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 nukdaýnazaryndan seredip, jisimleriň gurluşlaryny, häsiýetlerini öwrenýän fizikanyň bölümine molekulýar fizika diýilýär.

Makroskopik jisimlerde molekulalaryň sanynyň ägirt köpdügine görä ondaky her bir molekulanyň hereketini öwrenmek mümkin däl.

Emma olaryň hereketleri bellibir statistik kanunlara boýun egýärler. Molekulýar fizikada öwrenilýän şeýle prosesler ägirt köpsanly molekulalaryň täsirleriniň netijesinde döreýän proseslerdir.

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

Termodinamiki deňagramlylyk ýagdaýyndaky makroskopiki sistemanyň umumy häsiýetlerini 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, termodinamiki usul statistik (molekulýar-kinetik) usuldan tapawutlanýar.

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

Termodinamika – makroskopik 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 bolaýjak ululyklar ulanylýar. Jisimiň (gazyň) ýagdaýyny häsiýetlendirýän bu ululyklara gaz halynyň parametrleri diýilýär. Olara dykyzlyk, basyş we temperatura degişlidir.

Jisimiň massasynyň onuň göwrümine bolan gatnaşygyna san taýdan deň bolan ululyga dykyzlyk diýilýär:

$$\rho = m / V.$$

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

$$p = F / S.$$

Jisimiň (gazyň) temperaturasy – bu makroskopiki sistemanyň termodinamiki deňagramlylyk ýagdaýyny häsiýetlendirýän termodinamiki ululykdyr. Termodinamiki deňagramlylyk ýagdaýyndaky izolirlenen sistemanyň ähli ýerinde temperaturalar birmeňzeşdir. 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 halynda bolýarlar).

Temperaturany kesgitlemek üçin, Selsiý şkalasy we Kelwin şkalasy giňden ulanylýar.

Selsiý şkalasynda 0 nokat hökmünde ereýän buzuň temperaturasy 100 °C temperatura hökmünde, normal atmosfera basyşynda gaýnaýan suwuň temperaturasy kabul edilendir. 0 we 100 nokatlaryň arasyndaky ähli şkalany graduslar diýilýän 100 böleklere bölýärler, her bölüm 1 °C degişlidir. Kelwin şkalasyndaky temperaturanyň ölçegi Selsiý şkalasyndaky temperaturanyň ölçegine deňdir (gradus), emma Selsidäki 0 şkala temperaturanyň otrisatel 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. Izoprosesler

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 özaratäsir güýçleri ýok.
3. Molekulalaryň özara we gabyň diwarlary bilen bolan çaknyşmalary absolýut maýyşgak urgulardyr.

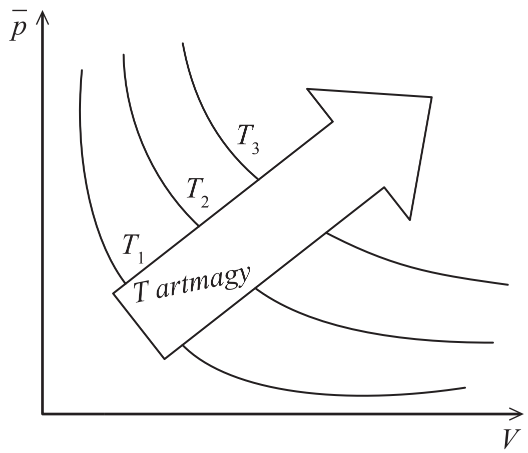
Geliý, wodorod ýaly gazlary ideal gaz hasaplamak bolar, sebäbi olaryň häsiýetleri berlen şertlerde ideal gaz kanunalaýyklyklarynyň şertlerine gabat gelýär. Molekulýar-kinetik teoriýasy açylmazyndan öň tejribe üsti bilen ideal gazlaryň özlerini alyp baryşlaryna degişli birnäçe gaz kanunlary açyldy. Olar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

Termodinamiki sistema bir haldan beýleki bir hala geçende onuň parametrleri üýtgeýär. Haçanda, berlen gazyň m massasy hemişelik bolup, onuň üç parametriniň (p, V ýa-da T) biriniň üýtgemeýän 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 Boýluň – Mariottyň kanunyna boýun egýär. Hemişelik temperaturada, berlen m massaly gaz üçin onuň p basyşynyň V göwrümine köpeltmek hasyly hemişelik ululykdyr:

$$p \cdot V = const. \tag{7.1}$$

Bu kanun iňlis alymy Boýl (1662 ý.) we fransuz alymy Mariott (1676 ý.) 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 ($p = const$) Geý – Lýussagyň kanuny arkaly aňladylýar. Hemişelik basyşda berlen gazyň massasynyň göwrümi temperatura görä çyzykly üýtgeýär:

$$V = V_0 (1 + \alpha t), \tag{7.2}$$

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

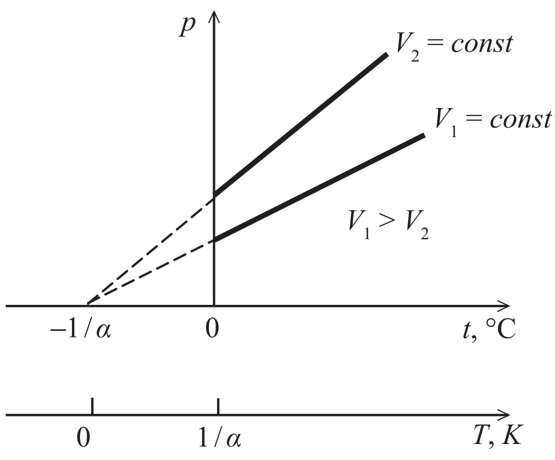
Izohorik proses hemişelik göwrümde bolup geçýär ($V = const$) we Şarlyň kanunyna boýun egýär: hemişelik göwrümde berlen gazyň massasynyň basyşy temperatura görä çyzykly üýtgeýär:

$$p = p_0 (1 + \gamma t), \tag{7.3}$$

bu ýerde p we p_0 degişlilikde, gazyň t °C we 0 °C temperaturalardaky basyşy. γ – ululyga basyşyň termik koeffisiýenti diýilýär.

Ideal gaz üçin, $\gamma = \alpha$.

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



7.2-nji surat. Şarlyň kanuny

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

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, $t = –273{,}15\,°C$ 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:

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

şu ýerden $\dfrac{V}{V_0} = \dfrac{T}{T_0}$,

bu ýerde $T_0 = 273{,}15\ K$, T_0 we V_0 – ululyklaryň hemişelikdigini göz öňünde tutup, izobarik proses üçin bu formulany şeýle görnüşde ýazýarys:

$$\frac{V}{T} = const. \tag{7.4}$$

Şular ýaly, izohorik proses üçin-de:

$$\frac{p}{T} = const \tag{7.5}$$

diýip ýazmak bolar.

§ 7.3. Ideal gaz halynyň deňlemesi

Seredip geçen gaz kanunlarymyzy jemläp, şeýle görnüşde ýazýarys:

$pV = const$ (izotermik proses, Boýluň-Mariottyň kanuny);

$V/T = const$ (izobarik proses, Geý-Lýussagyň kanuny);

$p/T = const$ (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 p_0, V_0 we T_0 parametrler bilen kesgitlensin. 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 tapýarys:

$$\frac{V_0}{T_0} = \frac{V_0'}{T},$$

şu ýerden

$$V_0' = V_0 \frac{T}{T_0}. \tag{7.6}$$

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 $P_0 V_0 / T_0$ gatnaşygynyň hemişelik sandygyny göz öňünde tutsak, onda:

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

bu ýerdäki C – hemişelik ululyga gaz hemişeligi diýilýär.

(7.7) deňleme fransuz inženeri Klapeýron tarapyndan (1834 ý.) çykarylanlygy sebäpli, oňa Klapeýronyň deňlemesi diýilýär. Bu deňleme berlen massaly gazyň basyşynyň göwrümine 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. $T_0 = 273{,}15\ K$ 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:

$$pV_1 = RT. \tag{7.8}$$

(7.7) deňlemäniň umumylaşdyrmasy bolan (7.8) deňlemäni D. I. Mendeleýew (1874 ý.) takyklady. Şoňa görä-de, (7.8) formula Mendeleýewiň – Klapeýronyň 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 öňünde 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 galýandygy üçin islendik m massaly gaz üçin şeýle ýazyp bolýar:

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

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

§ 7.4. Uniwersal gaz hemişeliginiň 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-nji paragrafda), $p_0 = 1{,}013 \cdot 10^5\,Pa$, $V_0 = 22{,}41 \cdot 10^{-3}\ m^3/mol$, $T_0 = 273{,}15\ K$ tapýarys:

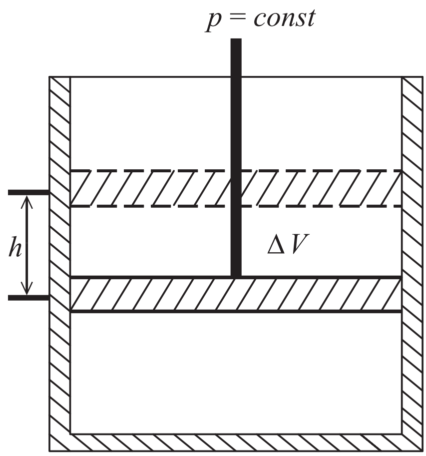
$$R = \frac{1{,}013 \cdot 10^5 \cdot 22{,}41 \cdot 10^{-3}\ Nm^3}{273{,}15\ m^2 mol \cdot K} = 8{,}32 \frac{J}{mol \cdot K}.$$

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

Porşeniň aşagyndaky gazyň basyşy daşarky atmosfera basyşyna deň:

$$p = const.$$

Goý, silindrdäki gaz $1\,K$ 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:



7.3-nji surat. Gazyň göwrümi üýtgände edilýän iş

$$F = pS.$$

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:

$$A = p \cdot \Delta V. \qquad (7.9\ a)$$

Gyzdyrylmaga çenli bolan gaz halynyň deňlemesini şeýle ýazmak bolar:

$$pV = RT. \qquad (7.10)$$

Gyzdyrylandan soňra gaz giňelip, V_1 – göwrümi eýeleýär, onda

$$pV_1 = R(T + 1). \qquad (7.11)$$

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

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

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

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

$$A = R. \qquad (7.13)$$

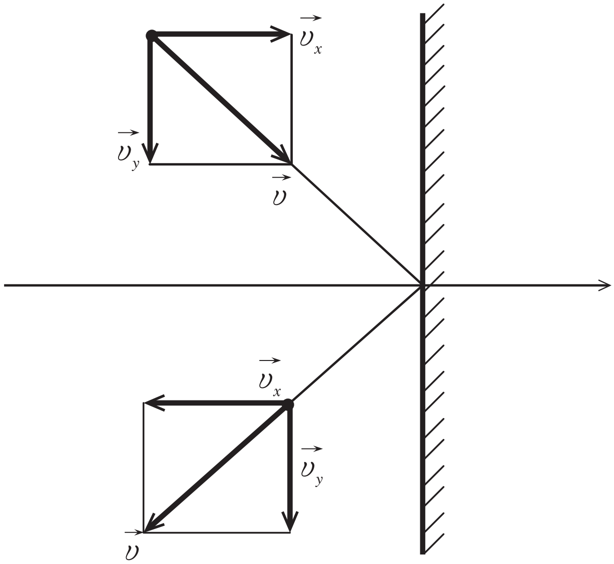
(7.13) formuladan görnüşi ýaly, uniwersal gaz hemişeligi 1 *mol* gazyň 1 *K* gyzdyrylyp, izobarik giňelenindäki ýerine ýetirýän işiniň ululygyna san taýdan deňdir.

§ 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*).

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 υ tizlik wektoryny (*7.4-nji sur. ser.*) iki sany υ_x we υ_y düzüjä dargatmak bolar. Gabyň diwaryna parallel bolan υ_y düzüji urgudan soňra-da öz ululygyny we ugruny üýtgetmeýär. Düzüji υ_x urgudan soň öz ululygyny üýtgetmese-de, ugruny üýtgedip $-\upsilon_x$ bolýar.

Nýutonyň üçünji kanuny boýunça molekula gabyň diwaryna näçe güýç bilen urlan bolsa, şonça güýç bilen-de diwar molekulany



7.4-nji surat. Molekulanyň gabyň diwaryna maýyşgak urluşy

yzyna serpikdirýär. Şeýlelikde, molekula we gabyň diwary deň, emma garşylykly ugrukdyrylan güýç impulslaryny çalyşýarlar, onda

$$f \cdot \Delta t = m \cdot \Delta \upsilon.$$

Tizligiň υ_y düzüjisiniň urgy wagtynda ululygynyň üýtgemeýänligi üçin, güýjüň impulsyny şeýle ýazýarys:

$$f \cdot \Delta t = m\,[\upsilon_x - (-\upsilon_x)] = 2m\upsilon_x,$$

bu ýerde f – urgy güýji, Δt – urgynyň dowamlylygy.

Indi, gapyrgasynyň uzynlygy ℓ bolan kub gaby göz öňüne getireliň. Gapda birmeňzeş gaz bar. Gazyň molekulalarynyň 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 υ, massasy m bolsun. Maýyşgak urguda sag gapyrga urlan molekulanyň tizliginiň ugry üýtgäp, $-\upsilon$ bolar we molekula çep gapyrga tarap hereket eder. Şunuň netijesinde onuň hereketiniň mukdary $m\upsilon - m(-\upsilon) = 2m\upsilon$ ululyga üýtgär, ýagny

$$f \cdot \Delta t = 2m\upsilon.$$

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

$$\Delta t = \frac{2l}{\upsilon},$$

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

$$f = \frac{2m\upsilon}{2l/\upsilon} = \frac{m\upsilon^2}{l}. \qquad (7.14)$$

Gazyň molekulalary $\upsilon_1, \upsilon_2, \upsilon_3, \upsilon_4, ... \upsilon_n$ – dürli tizlik bilen hereket edýärler. Gaz bir hilli (hemme ýerde molekulalar deň bölünen), şonuň üçin-de ähli molekulalaryň massalary deň:

$$m_1 = m_2 = m_3 = \cdots = m.$$

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

$$F = \frac{1}{3}\left(\frac{m\upsilon_1^2}{l} + \frac{m\upsilon_3^2}{l} - \frac{m\upsilon_3^2}{l} + \ldots + \frac{m\upsilon_n^2}{l}\right).$$

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

$$F = \frac{1}{3}\frac{m \cdot n(\upsilon_1^2 + \upsilon_2^2 + \upsilon_3^2 + \ldots + \upsilon_n^2)}{ln},$$

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

$$\frac{\upsilon_1^2 + \upsilon_2^2 + \upsilon_3^2 + \ldots + \upsilon_n^2}{n} = \langle \upsilon_{kw}^2 \rangle,$$

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

$$F = \frac{1}{3} \cdot \frac{n}{l} m\langle \upsilon_{kw}^2 \rangle. \tag{7.15}$$

Bu deňligiň sag we çep böleklerini gapyrgalaryň meýdanyna ($S = l^2$) bölüp, alarys:

$$\frac{F}{l^2} = \frac{1}{3} \cdot \frac{n}{l^3} m\langle \upsilon^2 \rangle.$$

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 deregine göwrüm birligindäki n_0 molekulalarynyň sanyny alarys: onda ýokardaky deňlik aşakdaky görnüşi alar:

$$p = \frac{1}{3} n_0 m\langle \upsilon_{kw}^2 \rangle. \tag{7.16}$$

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

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

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

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

$$p = \frac{2}{3} n_0 \langle W \rangle, \tag{7.18}$$

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

(7.18) formulanyň sag we çep böleklerini gazyň bir molunyň V_1 göwrümine 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:

$$n_0 V_1 = N_A \quad \text{bu ýerden} \quad p \cdot V_1 = \frac{2}{3} N_A \langle W \rangle.$$

1 mol üçin gaz halynyň şeýle deňlemesi bar, ýagny

$$pV_1 = RT,$$

bu ýerden

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

ýa-da

$$T = \frac{2}{3} \cdot \frac{N_A}{R} \langle W \rangle. \tag{7.19}$$

Şu ýerden görnüşi ýaly, gazyň absolýut temperaturasy onuň molekulalarynyň öňe hereketiniň orta kinetik energiýasyna proporsionaldyr.

(7.19) formuladan alarys:

$$\langle W \rangle = \frac{3}{2} \frac{R}{N_A} \cdot T. \tag{7.20}$$

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:

$$\langle W \rangle = \frac{3}{2} kT. \tag{7.21}$$

(7.21) formuladan görnüşi ýaly, molekulalaryň öňe bolan hereketiniň orta kinetik energiýasy diňe temperatura baglydyr, şeýle-de absolýut temperatura göni proporsionaldyr. Şeýlelikde, temperaturanyň absolýut nol şkalasy şeýle fiziki mana eýe bolýar:

Haçanda $T = 0$ bolanda, $\frac{m\langle \upsilon_{kw}^2 \rangle}{2} = 0$, ýagny $\langle \upsilon_{kw} \rangle = 0$.

Temperaturanyň absolýut nolunda molekulalaryň öňe bolan hereketi düýbünden togtaýar ($\upsilon_{kw} = 0$). Emma bu temperaturada molekulalaryň we atomlaryň içindäki hereketleriň käbir görnüşleri saklanýar.

(7.21) formuladan molekulalaryň tizliginiň kwadratynyň ortaça bahasy üçin aşakdaky formulany alarys:

$$\langle \upsilon_{kw} \rangle = \sqrt{\langle \upsilon_{kw}^2 \rangle} = \sqrt{\frac{3kT}{m}} \tag{7.22}$$

ýa-da Bolsmanyň hemişeliginiň $k = R/N_A$ deňdigini göz öňünde tutup, şeýle ýazýarys:

$$\langle \upsilon_{kw} \rangle = \sqrt{\frac{3RT}{mN_A}}. \tag{7.23}$$

Emma, $m \cdot N_A = \mu$ – bir moluň massasy, onda

$$\langle \upsilon_{kw} \rangle = \sqrt{\frac{3RT}{\mu}}. \tag{7.24}$$

Şeýlelikde, gazyň temperaturasyny we molýar massasyny bilip, (7.21) formula esasynda molekulanyň hereketiniň orta kwadrat tizligini tapmak bolar.

Molekulalaryň öňe bolan hereketiniň ortaça kinetik energiýasyny aňladýan (7.21) we molekulýar – kinetik teoriýanyň esasy deňlemesindäki p basyşy aňladýan (7.18) formulalary birleşdirip, alýarys:

$$p = n_0 kT. \tag{7.25}$$

Ýagny gazyň basyşy göwrüm birligindäki molekulalaryň sanynyň onuň absolýut temperaturasyna köpeldilmegine göni proporsionaldyr.

§ 7.6. Molekulalaryň tizlikleri boýunça paýlanyşy. Makswelliň kanuny

Molekulalaryň sekuntsaýyn ägirt köpsanly tertipsiz urgulara duçar bolýanlygy sebäpli, olaryň tizlikleri ululyklary boýunça-da, ugry boýunça-da dyngysyz üýtgäp durýar. Şonuň üçin, berlen bellibir wagtda şol bir berlen tizlik bilen hereket edýän molekulalaryň sanyny kesgitläp bolmaz. Emma tizlikleriň käbir kesgitli aralygynda, mysal üçin, berlen υ_1 we υ_2 tizlikleriň arasynda bolan molekulalaryň sanyny kesgitlemek bolar.

Makswell ähtimallyk teoriýasynyň (nazaryýetiniň) esasynda tizlikleri käbir berlen υ tizlikden $\upsilon + d\upsilon$ tizlige çenli bolan tizlikler interwalyndaky dn molekulalaryň sanyny hasaplapdyr, ol aşakdaka deňdir:

$$\frac{dn}{n} = \frac{4}{\sqrt{\pi}}\left(\frac{m}{2kT}\right)^{3/2} \cdot e^{-\frac{m\upsilon^2}{2kT}}\upsilon^2 d\upsilon. \qquad (7.26)$$

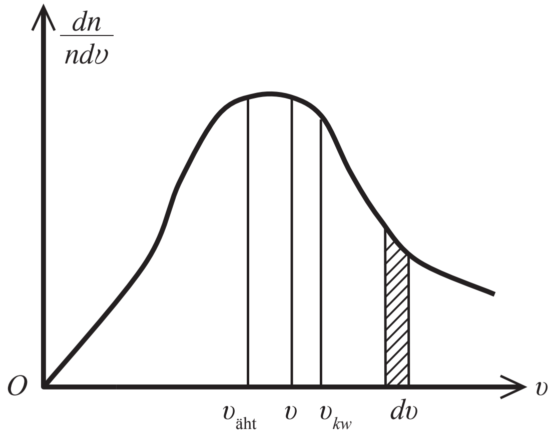
bu ýerde n – seredilýän gazyň molekulalarynyň doly sanydyr, e – natural logarifmiň esasy, $u_0 = \upsilon/\upsilon_{\text{äht}}$ otnositel tizlik, υ – berlen wagt momentindäki tizligi, $\upsilon_{\text{äht}}$-iň ähtimal tizlik, ýagny köp molekulalaryň tizliklerine golaý bolan tizlik.

Eger koordinatalar sistemasyny gurup, onuň ordinata oky boýunça $dn/nd\upsilon$ ululygyň bahasyny goýup, absissa oky boýunça molekulalaryň sanyna otnositel tizligiň bahasyny goýup, 7.6-njy suratda görkezilen egri çyzygy almak bolar.

Tizlikleriň berlen υ_0 $\upsilon + d\upsilon$ 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 ähtimal $\upsilon_{\text{äht}}$ tizlige degişlidir.

Molekulalaryň tizlikleri boýunça bölünme kanunlaryndan iň ähtimal tizlik

$$\upsilon_{\text{äht}} = \sqrt{\frac{2RT}{\mu}}. \qquad (7.27)$$



7.6-njy surat. Molekulalaryň tizlikler boýunça paýlanyşy

Makswelliň molekulalaryň tizlikleri boýunça bölünişiniň egri-çyzygy molekulalaryň orta arifmetiki tizliklerini tapmaklyga mümkinçilik berýär:

$$\langle \upsilon \rangle = \sqrt{\frac{8RT}{\pi\mu}}. \tag{7.28}$$

Şeýlelikde, seredip geçilen üç sany tizligi:

1) iň ähtimal tizligi

$$\upsilon_{\text{äht}} = \sqrt{\frac{2RT}{\mu}} \approx 1,41\sqrt{\frac{RT}{\mu}}; \tag{7.28 a}$$

2) orta arifmetik tizligi

$$\langle \upsilon \rangle = \sqrt{\frac{8RT}{\pi\mu}} \approx 1.60\sqrt{\frac{RT}{\mu}}; \tag{7.28 b}$$

3) orta kwadratik tizligi

$$\langle \upsilon_{kb} \rangle = \sqrt{\frac{3RT}{\mu}} \approx 1.73\sqrt{\frac{RT}{\mu}} \tag{7.29}$$

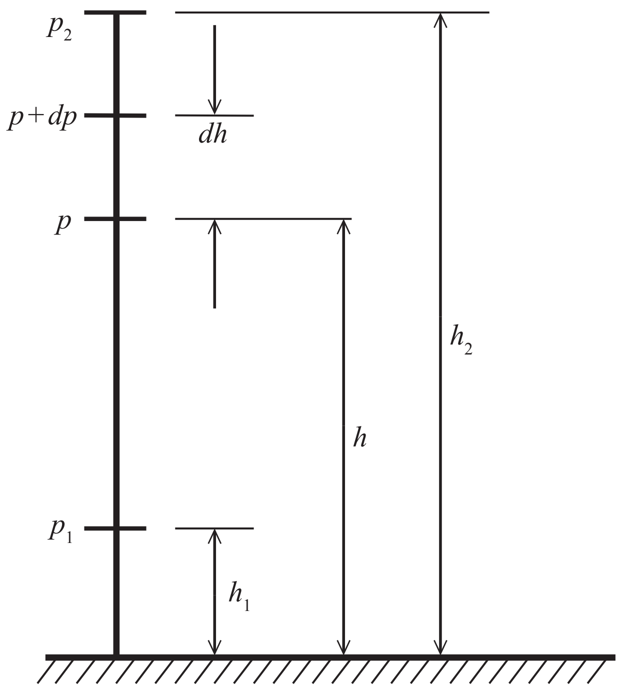
deňeşdirip, olaryň iň kiçisiniň iň ähtimal tizlikdigini, iň ulusynyň orta kwadrat tizlikdigini görýäris.

Temperaturanyň ýokarlanmagy bilen (7.27) 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 (nazaryýetiň) esasy deňlemesi çykarylanda we Makswelliň molekulalaryň tizlikleri boýunça bölünişine seredenimizde, gaz molekulalaryna olaryň bir-biri bilen urgulary bolaýmasa, daşardan hiç hili güýçler täsir etmeýär diýip çak edildi. Şonuň üçin molekulalar göwrüm boýunça ähli ýerde bir deň bölünendir. Emma, islendik gazyň molekulasyna Ýeriň dartylma güýjüniň täsir etmegi netijesinde olar bellibir güýç bilen Ýere tarap dartylýarlar. Olaryň Ýere edýän basyşy beýiklige görä üýtgeýär.

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, $dp < 0$



7.7-nji surat. Howanyň basyşynyň beýiklige görä üýtgeýşi bolar). p we $p + dp$ basyşlaryň tapawudy dh beýiklikli silindriň göwrüminde ýerleşen gazyň agramyna deň bolar (*7.7-nji surat*) ýagny:

$$p - (p + dp) = \rho g dh.$$

Bu ýerde $\rho - h$ beýiklikdäki gazyň dykyzlygy (dh şeýle bir kiçi aralyk bolandygy üçin bu aralykda gazyň dykyzlygyny hemişelik diýip alyp bolar). Şeýlelikde:

$$dp = -\rho g dh. \tag{7.30}$$

Ideal gaz halynyň deňlemesinden peýdalanyp $pV = \frac{m}{\mu}RT$ (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, alarys:

$$dp = -\frac{\mu g}{RT} \cdot p dh,$$

ýa-da:

$$\frac{dp}{p} = -\frac{\mu g}{RT} dh.$$

Beýiklik h_1-den h_2-ä çenli üýtgände basyş p_1-den p_2-ä çenli üýtgeýär (*7.7-nji sur. ser.*), ýagny:

$$\int_{P_1}^{P_2} \frac{dp}{p} = -\frac{\mu g}{RT} \int_{h_1}^{h_2} dh, \;\; \ln\frac{p_2}{p_1} = -\frac{\mu g}{RT}(h_2 - h_1),$$

ýa-da

$$p_2 = p_1 e^{-\mu g (h_2 - h_1)/RT}. \tag{7.31}$$

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:

$$p = p_0 e^{-\mu gh/RT}, \tag{7.32}$$

bu ýerde $p-h$ beýiklikdäki basyşdyr (Beýikligi ölçeýän 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 nazaryýetiniň 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 (göwrüm birligindäki sany). Belli bolşy ýaly, molýar massa $\mu = m_0 N_A$ (N_A – Awogadro sany, m_0 – bir molekulanyň massasy), uniwersal gaz hemişeligi bolsa $R = kN_A$, onda

$$n = n_0 e^{-m_0 gh/kT}, \tag{7.32}$$

bu ýerde, $m_0 gh = E_n$ Ýeriň grawitasion (dartyş) meýdanyndaky molekulalaryň potensial energiýasy, ýagny:

$$n = n_0 e^{-E_n/kT}. \tag{7. 33}$$

(7.33) formula daşky potensial meýdanyndaky molekulalaryň beýiklige görä paýlanyşygyny 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.

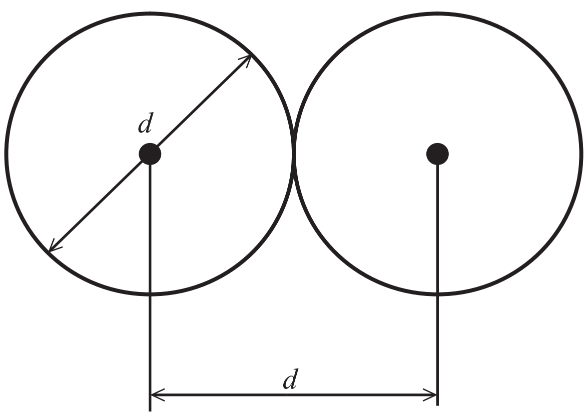
§ 7.9. Çaknyşmalaryň sany we molekulalaryň erkin ýolunyň ortaça uzynlygy. Molekulalaryň effektiw diametri

Gazyň molekulalarynyň sanynyň aşa köpdügi we olaryň tertipsiz hereket edýändigi 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 edýändigi üçin iki sany çaknyşmanyň aralygynda olaryň geçen ýolunyň uzynlygy dürli-dürlüdir. Şoňa görä hem, molekulalaryň erkin ýolunyň ortaça uzynlygy barada aýtmak bolar. Molekulalaryň erkin ýolunyň bu $\langle l \rangle$ ortaça uzynlygyny hasaplalyň.

Molekulalar bir-birleri bilen çaknyşanlarynda iki molekulanyň merkezleriniň bir-birine golaýlaşan iň kiçi (minimal) aralygyna molekulalaryň effektiw diametri diýilýär (*7.8-nji surat*). Ol çaknyşýan molekulalaryň tizligine (ýagny gazyň temperaturasyna) baglydyr.

Molekula 1 *s* dowamynda ortaça orta arıfmetiki tizlige ($\langle v \rangle$) deň bolan ýoly geçýän bolsa, $\langle z \rangle$ gazyň bir molekulasynyň bir sekuntdaky ortaça çaknyşmalarynyň sany bolsa, onda erkin ýolunyň ortaça uzynlygy

$$\langle l \rangle = \langle v \rangle / \langle z \rangle \tag{7.34}$$



7.8-nji surat. Molekulalaryň effektiw diametri bolar. $\langle z \rangle$ ululygy kesgitlemek üçin molekulany d diametrli şarjagaz diýip kabul edeliň. Şeýle-de, görşümiz ýaly, molekula çaknyşmanka nirä hereket eden bolsa, çaknyşandan soň hem şol ugur bilen hereket edýär, görlen molekuladan beýleki molekulalaryň hemmesi hereketsiz diýip güman edeliň. Şonda molekula öz ýolunda merkezleri onuň hereket edýän gönüçyzygyndan d-den uly bolmadyk aralykda durýan molekulalaryň ählisine degýär.

Bir sekuntdaky çaknyşmalaryň ortaça sany biziň göz öňüne getirýän silindrimiziň içindäki molekulalaryň sanyna deňdir:

$$\langle z \rangle = n \cdot V,$$

bu ýerde n – molekulalaryň konsentrasiýasy, $V = \pi d^2 \cdot \langle \upsilon \rangle$, $\langle \upsilon \rangle$ – molekulalaryň ortaça tizligi ýa-da olaryň 1 sekuntda geçen ýoly. Şeýlelikde, çaknyşmanyň ortaça sany:

$$\langle z \rangle = n\pi d^2 \cdot \langle \upsilon \rangle.$$

Eger beýleki molekulalaryň hem hereketini hasaba alsak, aşakdaky formulanyň alynýandygyny hasaplamalar görkezýär:

$$\langle z \rangle = \sqrt{2}\,\pi d^2 n \cdot \langle \upsilon \rangle.$$

Molekulalaryň ölçegleri $r = 10^{-8}$ sm, $n = 3 \cdot 10^{19}$ – gazyň normal şertdäki göwrüm birligindäki molekulasynyň sany, $\langle \upsilon \rangle \approx 5 \cdot 10^4$ sm/s bolsa, onda $\langle z \rangle \cong 3 \cdot 10^9\ s^{-1}$ bolar. Diýmek, normal şertlerde molekulalar sekuntda birnäçe milliard gezek çaknyşýarlar.

Onda (7.34) formula görä:

$$\langle l \rangle = 1/(\sqrt{2}\,\pi d^2 \cdot n)$$

bolar. Ýagny $\langle l \rangle$ molekulalaryň konsentrasiýasyna 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. Haçanda ýylylyk geçirijilik hadysalary bolanda, giňişleýin energiýanyň geçirilişi, diffuziýada massanyň geçirilişi, içki sürtülmede bolsa, hereket mukdarynyň geçirilişi göz öňünde tutulýar. Bu hadysalaryň hemmesinde-de energiýanyň, massanyň we hereket mukdarynyň geçirilişinde, geçiş mydama olaryň gradiýentleriniň (belli ugur boýunça artmalarynyň) ters tarapyna ugrukdyrylandyr, ýagny sistema özüniň termodinamik deňagramlylyk ýagdaýyna golaýlaşýar.

1. Ýylylyk geçirijiligi. Ilki bilen gazlarda ýylylyk geçirijiligine garap geçeliň. Makroskopiki nukdaýnazaryndan, ýylylyk geçirijilik hadysasy has gyzgyn gatlakdan has sowuk gatlaga 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 Furýeniň ýylylyk geçiş kanunyna boýun egýär: wagt birliginde meýdan birliginden geçirilýän q ýylylyk mukdary, dT/dx – temperaturanyň gradiýentine göni proporsionaldyr:

$$q = -\lambda \frac{dT}{dx}, \tag{7.35}$$

bu ýerde λ – gazyň düzümine we onuň häzirki bolýan şertine bagly bolan ululyk, bu ululyga ýylylyk geçirijilik koeffisiýenti diýilýär. Minus alamaty q ýylylyk mukdarynyň T temperaturanyň kemelýän tarapyna geçýändigini aňladýar.

Wagt birliginde temperatura gradiýentiniň bire deň bolan wagtynda meýdan birliginden geçirilýän ýylylyk mukdaryna deň bolan ululyga λ ýylylyk geçirijilik koeffisiýenti diýilýär.

Görşümiz 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 nukdaýnazaryndan Q ýylylyk mukdarynyň geçirilmegi molekulalaryň tertipsiz hereketiniň bellibir mukdardaky kinetik energiýasynyň S meýdançanyň üsti bilen geçirilmegini aňladýar.

Ýylylyk geçirijilik koeffisiýentini göwrüm hemişelik bolan wagtyndaky c_V gazyň udel ýylylyk sygymy (göwrüm hemişelik bolan wagtynda 1 kg gazy 1 K gyzdyrmak üçin gerek bolan ýylylyk mukdary) we onuň dykyzlygy bilen, molekulalaryň ýylylyk hereketiniň $\langle v \rangle$ orta arifmetiki tizligi hem-de olaryň erkin ýolunyň ortaça uzynlygy $\langle l \rangle$ bilen baglanyşdyrýan şu aşakdaky formulany alyp bolýandygyny hasaplamalar görkezýär:

$$\lambda = 1/3 c_V \rho \langle v \rangle \langle l \rangle. \tag{7.36}$$

2. Diffuziýa. Diffuziýa hadysasy iki sany bir-birine galtaşýan gazlaryň, suwuklyklaryň, hatda 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 dykyzlyklary 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 geçýändigi mälimdir: hususan-da, yslar 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 alynmaýandygyndan ybaratdyr. Tizliginiň ululygyna garamazdan, molekula bir sekuntda özüniň duran ýerinden örän ujypsyz aralyga gidýär, onuň ýoly örän çylşyrymly we çolaşyk döwük çyzykdyr.

Maddanyň massasynyň aralaşmagy Fikanyň kanunyna boýun egýär: wagt birliginde meýdan birliginiň üsti bilen geçirilýän maddanyň m massasy dykyzlygyň gradiýentine göni proporsionaldyr:

$$m = -D\frac{d\rho}{dx}, \tag{7.37}$$

bu ýerde D – diffuziýa koeffisiýenti. Minus alamaty massanyň dykyzlygynyň kemelýän tarapyna geçýändigini aňladýar.

Diffuziýa diýip, dykyzlyk gradiýenti bire deň bolan wagtynda wagt birliginde meýdan birliginiň üsti bilen geçirilen maddanyň massasyna deň bolan ululyga aýdylýar. Gazlaryň kinetik teoriýasynyň (nazaryýetiniň) esasynda:

$$D = 1/3\ \langle v \rangle \langle l \rangle. \tag{7.38}$$

Görnüşi ýaly, D diffuziýa koeffisiýenti molekulalaryň hereketiniň $\langle v \rangle$ orta tizligi we erkin ýolunyň ortaça uzynlygy bilen baglanyşykly ekeni.

Diffuziýanyň netijesinde t wagtyň dowamynda S meýdançadan geçirilen maddanyň m massasy S meýdanyň ululygyna, t wagta we dykyzlygyň gradiýentine göni proporsionaldyr:

$$m = -D\frac{d\rho}{dx}St.$$

3. Içki sürtülme (Şepbeşiklik). Gazlarda we suwuklyklarda içki sürtülmäniň ýüze çykmasynyň esasy sebäbi, olara molekulýar-kinetik (nazaryýeti) nukdaýnazaryndan seredilende molekulalaryň haotik hereket edýändikleri sebäpli, has çalt hereket edýän gatlakdan molekulalar has haýal hereket edýän gatlaga geçenlerinde özleri bilen

$m\upsilon$ hereket mukdaryny getirýärler we şeýlelik bilen, has haýal hereket edýän bu gatlagyň hereketini çaltlandyrýarlar. Tersine, has haýal hereket edýän gatlakdan, has çalt hereket edýän gatlaga molekulalar geçenlerinde ol gatlagy saklaýarlar. Şeýlelikde, dürli tizlikler bilen hereket edýän bu gatlaklaryň arasynda içki sürtülme ýüze çykýar. Içki sürtülme Nýutonyň kanunyna boýun egýär:

$$F = -\eta \frac{d\upsilon}{dx}, \tag{7.39}$$

bu ýerde F – üst gatlagynyň meýdan birligine täsir edýän sürtülme güýji, η-dinamiki şepbeşiklik, $d\upsilon/dx$ – 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:

$$\eta = 1/3\rho \langle \upsilon \rangle \langle l \rangle. \tag{7.40}$$

S meýdana täsir edýän F güýji şu meýdanyň ululygyna we $d\upsilon / dx$ tizlik gradiýentine proporsionaldyr:

$$F = -\eta \frac{d\upsilon}{dx} S.$$

(7.40) formuladan görnüşi ýaly, gazlaryň molekulýar-kinetik teoriýasy, içki sürtülme koeffisiýentini-de (şepbeşikligi) gazyň molekulýar gurluşyny häsiýetlendirýän ululyklar bilen molekulalaryň erkin ýolunyň $\langle \ell \rangle$ ortaça uzynlygy, olaryň $\langle \upsilon \rangle$ orta tizligi we gazyň ρ dykyzlygy bilen aňlatmaga mümkinçilik berýär.

Ikinji bir tarapdan (7.35), (7.37) we (7.39) formulalary deňeşdirip, gazlardaky geçiş hadysalarynyň kanunalaýyklyklarynyň 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 koeffisiýentleriň molekulýar-kinetik manysyny açyp görkezmeýär. Bu koeffisiýentleriň getirilip çykarylyşyny, 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 koeffisiýentleriniň 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 ELEMENTLERI WE ESASY KANUNLARY

§ 8.1. Sistemanyň içki energiýasy

Termodinamikanyň kanunlary termodinamikada ulanylýar. Termodinamiki 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 molekulalaryň toplumy hökmünde seretmek bolar. Molekulýar-kinetik nazaryýetiniň nukdaýnazaryndan termodinamik sistemanyň energiýasy onuň bitewülikdäki hereketiniň kinetik energiýasyndan, daşky meýdan güýçleriniň bardygy bilen häsiýetlendirilýän potensial energiýasyndan we bu sistemanyň mikrobölejikleriniň (molekulalaryň, atomlaryň, elektronlaryň...) özaratäsirleriniň we hereketleriniň içki energiýalaryndan ybaratdyr, ýagny:

$$W = W_K + W_p + U, \tag{8.1}$$

bu ýerde W_K – kinetik energiýa, W_p – potensial energiýa, U – içki energiýa.

Jisimiň içki energiýasy molekulalaryň haotik hereketleriniň (öňe bolan we aýlanma) kinetik energiýasyndan, molekulalaryň özaratäsirleri 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. Ýagny sistemanyň her bir haly üçin içki energiýanyň bellibir kesgitli bahasy degişlidir.

Termodinamiki proseslerde sistemanyň halynyň üýtgeýän ýagdaýyndaky onuň içki energiýasynyň üýtgeýşine seredilýär.

Jisimler sistemasynyň halynyň üýtgemegi sistemadaky jisimleriň birinden beýlekisine energiýanyň geçirilmesi bilen amala aşyrylýar.

Energiýanyň geçirilişi *A* mehaniki iş görnüşinde ýa-da molekulalaryň ýylylyk hereketi bilen häsiýetlendirilýän *Q* ýylylyk mukdary görnüşinde berlip bilner.

Şeýlelikde, iş we ýylylyk – energiýany bermekligiň iki görnüşi hökmünde biri-biri bilen berk baglanyşyklydyr.

Ýylylyk işe geçip bilýär we tersine, iş – ýylylyga. (Mysal üçin, biz iki elimizi biri-birine sürtenimizde iş edýäris. Ol ýylylyk energiýasyna öwrülip, elimiz gyzýar. Eger agzy dyky bilen ýapylan içi suwly probirkany gyzdyrsak, suw gaýnar we buguň basyşy artyp, dykyny zyňar, ýylylyk işe geçýär we ş.m.).

Halkara birlikler sistemasynda iş we ýylylyk şol bir ululyklarda – Joullarda ölçenilýär.

Sistemadan daşary ýylylygyň ölçeg birligine kaloriýa diýilýär. 1 *kal* – 1 *g* suwy 19,5 °C-den 20,5 °C-ä çenli gyzdyrmak üçin gerek bolan ýylylyk mukdaryna deňdir.

§ 8.2. Göwrüm üýtgändäki gazyň işi

Bellibir 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*).

Eger gaz giňelip, porşeni tükeniksiz kiçi bolan $d\ell$ aralyga süýşürse, onuň üstünde iş edýär. Onuň ýerine ýetiren dA işiniň ululygy:

$$dA = Fdl = pSdl = pdV,$$

bu ýerde S – porşeniň meýdany, $Sd\ell = dV$ – sistemanyň göwrüminiň üýtgemesi. Şeýlelikde,

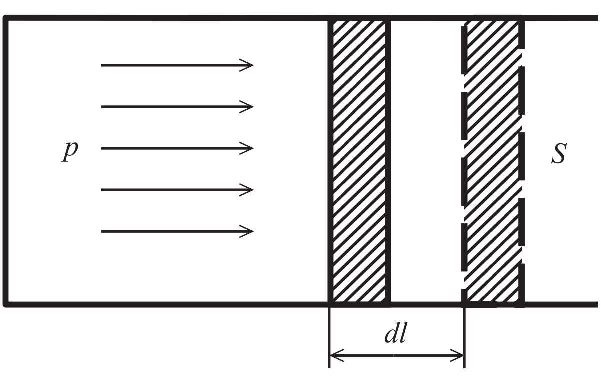
$$dA = pdV. \tag{8.2}$$

Gazyň göwrüminiň V_1-den V_2-ä çenli üýtgän wagtyndaky onuň ýerine ýetirýän doly işini (8.2) deňlemäni integrirläp, tapýarys:

$$A = \int_{V_1}^{V_2} pdV = p(V_2 - V_1). \tag{8.3}$$

Integrirlemegiň netijesi basyş bilen göwrümiň arasyndaky baglylygyň häsiýetine görä kesgitlenilýär.

Iş üçin bu aňlatma (8.3) gaty, suwuk we gaz görnüşli jisimleriň göwrümleriniň islendik üýtgemelerinde hem dogrudyr.



8.1-nji surat. Gaz giňelende edilýän işiň kesgitlenilişi

Indi, işiň alamatynyň nähili kesgitlenilýändigi 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.

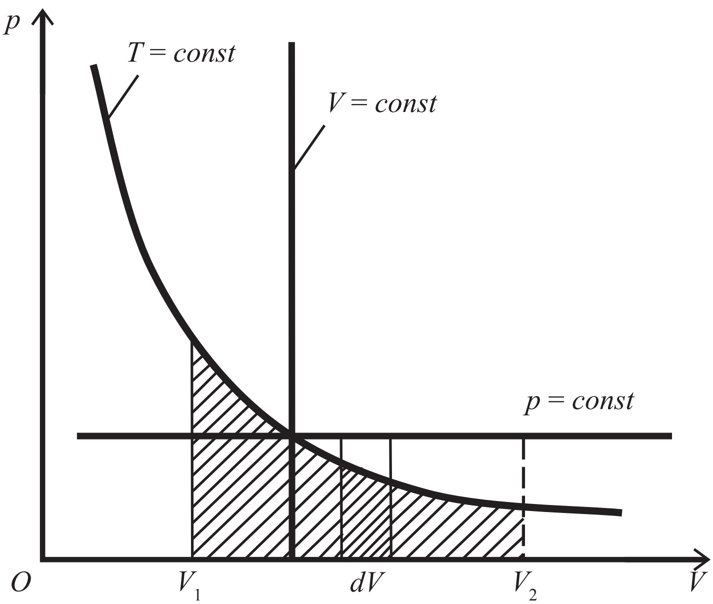
Sistema (jisim) gysylan ýagdaýynda ($dV < 0$), daşky iş otrisateldir ($A < 0$), bu halda daşky güýçler sistemanyň üstünde iş edýär.

Indi (8.3) formulanyň kömegi bilen dürli izoproseslerde gaz giňelenindäki onuň ýerine ýetirýän daşky işini hasaplalyň.

1. Izohorik prosesde (*8.2-nji surat*) $V = const$, şeýlelikde, göwrümiň üýtgemesi $dV = 0$, şonuň üçin-de, (8.3) formuladan görnüşi ýaly, daşky iş nola deňdir.

2. Izobarik prosesde $p = const$ (*8.2-nji sur. ser.*). (8.3) formulanyň esasynda, alarys:

$$A = p\int_{V_1}^{V_2} dV \quad \text{ýa-da} \quad A = p(V_2 - V_1).$$



8.2-nji surat. Dürli hadysalarda işiň kesgitlenilişi

Iş basyşy göwrümiň üýtgemesine köpeltmek arkaly tapylýar. Bu işiň ululygy 8.2-nji suratda esaslary $V_2 - V_1$ we beýikligi $p = const$ bilen çäklenen gönüburçlugyň meýdanyna deňdir.

3. Izotermik prosesde $T = const$. Elementar iş 8.2-nji 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 (7.9) deňlemesinden, 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 öňünde 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

$$A = \frac{m}{\mu} RT \ln \frac{V_2}{V_1}. \tag{8.4}$$

Izotermik prosesiň deňlemesinden: $p_1 V_1 = p_2 V_2$ gelip çykýar. Ony ýokardaky deňlemede ornuna goýup, tapýarys:

$$A = \frac{m}{\mu} RT \ln \frac{p_1}{p_2}. \tag{8.5}$$

§ 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, 1 *kg* maddany 1 *K* 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 1 *K* gyzdyrmak üçin gerek bolan ýylylyk mukdaryna deň bolan ululykdyr:

$$C_m = \frac{dQ}{vdT}, \tag{8.6}$$

bu ýerde $v = m/\mu$ – moluň sany. Molýar ýylylyk sygymynyň birligi – $J/(mol \cdot K)$.

c udel ýylylyk sygymy, C_m molýar ýylylyk sygymy bilen şeýle gatnaşyk arkaly baglanyşýar:

$$C_m = c\mu, \tag{8.7}$$

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 saklanma kanunyny aňladýar, 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 saklanma 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 lukman R. Maýer (1814–1878) bilen iňlis alymy D. Joul (1818–1889) tarapyndan açyldy hem-de nemes alymy G. Gelmgolsyň (1821–1894) işlerinde has doly takyklanyldy. Termodinamikanyň birinji kanuny bolsa ýylylyk hadysalaryna ýaýran energiýanyň saklanma we öwrülme kanunydyr.

Umumy görnüşde, sistemanyň üstünde ýerine ýetirilen kiçi ΔA iş we sistema berlen ΔQ ýylylyk mukdary jemlenende, sistemanyň energiýasynyň üýtgemesine deňdigini energiýanyň saklanma kanuny tassyklaýar:

$$\Delta U = \Delta A + \Delta Q. \tag{8.8}$$

Termodinamikada adaty mehaniki energiýa seredilmeýär. Şonuň üçin-de, sistemanyň energiýasynyň üýtgemesi diýlende, 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:

Ýagny $\Delta A = -\Delta A' = -p\Delta V$:

$$\Delta Q = \Delta U + \Delta A'. \tag{8.9}$$

Bu ýerden termodinamikanyň birinji kanunynyň şeýle kesgitlemesi ýüze çykýar: sistema bir haldan başga hala geçende oňa berilýän ýylylyk mukdary, onuň içki energiýasynyň üýtgemegine we daşky güýçleriň garşysyna iş etmegine harç edilýär.

(8.9) deňlemäni differensial görnüşde ýazýarys:

$$dQ = dU + dA, \tag{8.10}$$

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 hereketlendirijini (maşyny) gurup bolmaz. Başga söz bilen aýdanymyzda, birinji hilli ömürlik hereketlendirijini (perpetuum mobileni) gurmak mümkin däldir.

Termodinamikanyň birinji kanunynyň dürli izoproseslere ulanylyşy barada durup geçeliň.

1. Izohorik proses. Izohorik prosesde gazyň ýerine ýetirýän işiniň ululygy

$$dA = pdV = 0.$$

Ýagny gaz mehaniki işi ýerine ýetirmeýär. Termodinamikanyň birinji kanunyndan:

$$dQ = dU. \tag{8.11}$$

Şu formuladan görnüşi ýaly, izohorik prosesde sistema berilýän ähli ýylylyk mukdary gazyň içki energiýasyny artdyrmaga harç edilýär. Göwrüm hemişelik bolanyndaky udel ýylylyk sygymy

$$c_V = \frac{1}{m}\frac{dQ}{dT} \quad \text{ýa-da} \quad c_V = \frac{1}{m}\frac{dU}{dT}.$$

Bu ýerden:

$$dU = mc_V\, dT. \tag{8.12}$$

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:

$$dQ = C_V\, dT + pdV, \tag{8.13}$$

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

$$C_P = \frac{dQ}{dT} \quad \text{deňdir, bu ýerden} \quad dQ = C_P dT.$$

Soňky aňlatmany (8.13) deňlemede ýerine goýup alýarys:

$$C_P dT = C_V\, dT + pdV, \tag{8.14}$$

gaz halynyň deňlemesine görä, 1 mol gaz üçin şeýle ýazýarys ($p = const$; $R = const$):

$$pdV = RdT.$$

Onda (8.14) deňleme şeýle görnüşi alýar:

$$C_P dT = C_V\, dT + RdT,$$

bu ýerden

$$C_P - C_V = R, \tag{8.15}$$

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 üýtgemeýär ($U = const$). Termodinamikanyň birinji kanunynyň esasynda, gaza berlen dQ ýylylyk mukdary doly daşarky işe sarp edilýär:

$$dQ = dA, \quad \text{ýa-da} \quad dQ = pdV. \tag{8.16}$$

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

Adiabatik proses diýip, gazyň halynyň şeýle üýtgemesine aýdylýar, ýagny ol daşary hiç hili ýylylyk berenogam, alanogam. Şeýlelikde, adiabatik proses gazyň ony gurşap alan sredasy bilen ýylylyk çalşygynyň ýoklugyny häsiýetlendirýär. Hakykatda adiabatik prosesi doly almak kyn. Emma käbir örän çalt bolup geçýän prosesleri adiabatiki prosesiň hataryna goşmak bolar. Proses şeýle bir çalt bolup geçýär welin, şol wagtyň dowamynda gaz daşarky gurşaw bilen ýylylyk çalşygyny geçirmäge ýetişmeýär. Mysal üçin, içinden ýandyrylýan hereketlendirijileriň we dizel hereketlendirijileriniň işleýişleri adiabatik prosese esaslanandyr.

Adiabatik prosesde ýylylyk berijiligi we alnyşy bolmaýar:

$$dQ = 0,$$

şeýlelikde, termodinamikanyň birinji kanunyny şu proses üçin şeýle ýazmak bolar:

$$dU + dA = 0,$$

bu ýerden $$dA = -dU \quad \text{ýa-da} \quad pdV = -mc_V\, dT, \tag{8.17}$$

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 sowaýar.

Adiabatik giňeleninde gazyň sowamaklyk häsiýeti tehnikada pes temperaturalary almakda giňden ulanylýar. Ammarlarda, söwda nokatlarynda ulanylýan sowadyjy gurluşlaryň (holodilnikleriň) işleýiş prinsipleri-de buguň 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 silindrlerindäki howa porşeniň kömegi bilen adiabatik gysylanynda onuň temperaturasy 500 °C-den-de ýokary geçýär. Şol wagtda silindre tozanlandyrylan (pürkülen) ýangyç gaty gyzan howa bilen gabatlaşanynda, şolbada ýanýar.

Goý, 1 *mol* gaz alnan bolsun, ýagny $m = \mu$. Onda (8.17) deňleme şeýle görnüşi alýar:

$$pdV = -C_V\, dT, \tag{8.18}$$

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:

$$\frac{R}{C_V}\frac{dV}{V} + \frac{dT}{T} = 0. \tag{8.19}$$

Maýeriň deňlemesi esasynda: $R = C_P - C_V$ şeýle-de,

$$\frac{R}{C_V} = \frac{C_P - C_V}{C_V} = \frac{C_P}{C_V} - 1.$$

Ýylylyk sygymlarynyň 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 potensirläp (logarifmden boşadyp), alýarys:

$$\ln V^{\gamma - 1} + \ln T = C,$$

$$TV^{\gamma - 1} = const. \tag{8.20}$$

Gaz halynyň deňlemesini ulanyp:

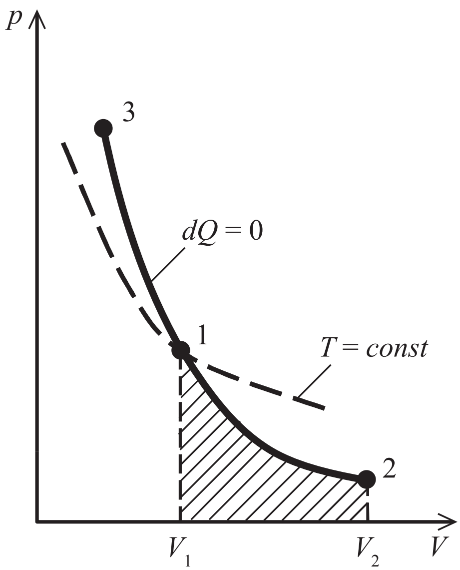
$$pV/T = R,$$

ony (8.20) aňlatma köpeldip, alarys:

$$pV^{\gamma} = const. \qquad (8.21)$$

Adiabatik prosesiň deňlemesi bolan bu deňlemä Puassonyň deňlemesi diýilýär. Bu deňleme $pV = const$ izotermik prosesiň deňlemesine golaýdyr. (8.21) deňlemedäki göwrümiň görkezijisi $\gamma > 1$, sebäbi deňlemäni şu görnüşinde ýazmak bolar:

$$C_P > C_V.$$



8.3-nji surat. Adiabatik proses

Adiabatik prosesiň diagrammasy (adiabata) (*8.3-nji surat*) p, V koordinatlarynda giperbola bilen şekillendirilýär. Suratdan görnüşi ýaly, adiabata ($pV^{\gamma} = const$) izoterma ($pV = const$) seredeniňde, has dikräk gidýär. Sebäbi adiabatik gysylanynda 1–3 gazyň basyşynyň köpelmegi, izotermik gysyşdaky ýaly diňe bir onuň göwrüminiň kiçelmegi bilen çäklenmän, eýsem, temperaturanyň hem ýokarlanmagy bilen düşündirilýär.

Praktiki 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 arasyndaky aralyk häsiýetde bolýarlar, olara politropik prosesler diýilýär. Olar üçin-de adiabatik prosesler üçin bolan formulalar ýaramlydyr, diňe γ ululyk C_p/C_V bilen biriň aralygyndaky baha eýedir.

Indi adiabatik prosesde gazyň ýerine ýetirýän işini kesgitläliň. (8.18) formulany gazyň islendik moly üçin şeýle görnüşde ýazalyň:

$$dA = -\frac{m}{\mu} C_V dT.$$

Gaz V_1 göwrümden V_2-ä çenli adiabatik giňelende onuň temperaturasy T_1-den T_2-ä çenli peselýär we ideal gazyň giňelenindäki işi şu aşakdaky görnüşde ýazylýar:

$$A = -\frac{m}{\mu} C_V \int_{T_1}^{T_2} dT = \frac{m}{\mu} C_V (T_1 - T_2). \quad (8.22)$$

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,

$$p_1 V_1 = \frac{m}{\mu} RT_1.$$

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 temperaturasynyň hemişelik saklanýandygy bilen düşündirilýär.

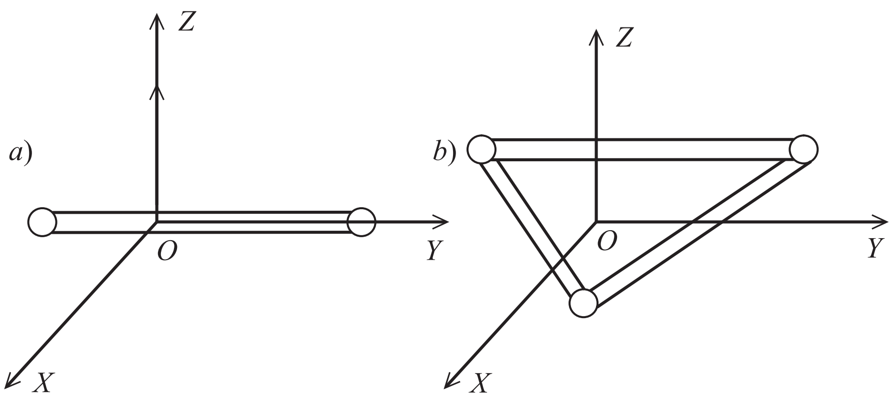
§ 8.6. Molekulalaryň erkinlik derejesi

Gaz molekulalaryna şol bir wagtyň özünde öňe, aýlanma we yrgyldy hereketine gatnaşýan material nokatlaryň (atomlaryň) sistemasy hökmünde seretmek bolar. Jisimiň hereketi öwrenilende, saýlap alnan koordinatalar 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 pursadyndaky 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 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 baglanyşykda bolan iki atomdan ybarat bolsa (*8.4-nji surat*) (wodorod, azot), onuň erkinlik derejesi $i = 5$ bolar (*8.4-nji a surat*). Bu ýagdaýda ikiatomly molekula diňe bir *OX*, *OY*, *OZ* oklaryň ugry boýunça hereket etmän, şol bir wagtda olaryň daşynda hem aýlanýar. Emma onuň *OY* okunyň daşynda aýlanan wagtyndaky inersiýa momenti örän kiçi. Şonuň üçin ony hasaba almaýarlar. Şeýlelikde, ikiatomly molekulalaryň erkinlik derejesi 5-e (üçüsi öňe bolan hereketiň, ikisi aýlanma hereketiň netijesinde) deňdir.

Bir göniniň üstünde ýatmaýan berk baglanyşykda bolan üç we ondan-da köpatomly molekulalar islendik özara perpendikulýar bolan



8.4-nji surat. Iki we üçatomly molekulanyň erkinlik derejesiniň kesgitlenilişi üç okuň golaýynda aýlanyp bilerler. Şu halatda molekulalaryň erkinlik derejesi 6-a deňdir (*8.4-nji b surat*).

Eger molekulalary düzýän atomlar bir-birleri bilen gaty baglanyşykda bolman, aralyklary üýtgäp durýan bolsa, onda molekulanyň erkinlik derejeleri altydan köp bolup biler.

§ 8.7. Energiýanyň erkinlik derejesi boýunça bölünişi

Umumy görnüşde sistemanyň içki energiýasy molekulalaryň öňe bolan, aýlanma we yrgyldyly hereketleriniň kinetik we potensial energiýalaryndan ybaratdyr. Sistemanyň molekulalarynyň tertipsiz hereketleri wagtynda hereketiň ähli görnüşleriniň ähtimallyklary biri-birine deň we olaryň içki energiýalary olaryň erkinlik derejeleriniň sanyna deň bölünen, ýagny molekulanyň her bir erkinlik derejesine ortaça deň energiýa degişlidir.

Molekulalaryň energiýanyň erkinlik derejeleri boýunça bölünişi 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 şu aşakdaky ýaly bolar:

$$\langle W \rangle = \frac{3}{2} kT/3 = \frac{1}{2} kT.$$

Eger gazyň molekulasynyň 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:

$$U_O = \langle W \rangle N_A = \frac{i}{2} kTN_A,$$

bu ýerde U_O – 1 *mol* gazyň içki energiýasy, N_A – Awogadro sany, $k = R/N_A$ – Bolsmanyň hemişeligi, onda:

$$U_O = \frac{i}{2} RT. \tag{8.23}$$

Bu ýerden gazyň islendik massasy üçin, onuň içki energiýasyny kesgitlemegiň formulasyny almak bolar:

$$U = \frac{m}{\mu} \frac{i}{2} RT. \tag{8.24}$$

§ 8.8. Gazyň ýylylyk sygymynyň kesgitlenilişi

Biratomly gazyň bir moluny alyp, hemişelik göwrümde onuň temperaturasyny I K artdyralyň. Onda ýylylyk hereketiniň ähli energiýasy diňe onuň içki energiýasyny ýokarlandyrmaga sarp edilýär.

1 *mol* gazy hemişelik göwrümde 1° gyzdyranymyzda, onuň içki energiýasynyň üýtgeýşini, ýagny molýar ýylylyk sygymyny kesgitläliň.

T temperaturada biratomly ($i = 3$) bir mol gazyň içki energiýasy (8.23) formula görä $\frac{3}{2}RT$ deň. Bir gradus ýokarlananda bolsa, $\frac{3}{2}R(T + 1^\circ)$ bolar. Şeýlelikde, energiýanyň artdyrylmasy (şeýle ýazylýar ΔW):

$$\frac{3}{2}R(T+1) - \frac{3}{2}RT = \frac{3}{2}R$$

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.

$R = 8,31\dfrac{J}{mol \cdot K}$ san bahasyny ýerine goýup alarys:

$$C_V \cong \frac{3}{2} \cdot R \approx 12,48\frac{J}{mol \cdot K}.$$

Şeýlelikde, biratomly gazyň hemişelik göwrümdäki molýar ýylylyk sygymy üç kaloriýa deň.

C_V-niň bahasyny bilip, basyş hemişelik bolan wagtyndaky udel ýylylyk sygymyny kesgitlemek kyn däldir, ýagny:

$$C_P = C_V + R$$

ýa-da

$$C_P \cong \frac{i}{2}R + R = \frac{i+2}{2}R \cdot \frac{J}{mol \cdot K}.$$

Şeýlelikde, biratomly gaz üçin gatnaşyk

$$\frac{C_P}{C_V} = \gamma = \frac{5}{3} = 1,67$$

bolýar.

Indi ikiatomly gazyň ýylylyk sygymyny kesgitläliň. (8.6-njy paragrafdan) belli bolşy ýaly, biri-biri bilen berk baglanyşygy bolan ikiatomly gazyň molekulasynyň erkinlik derejesi 5-e deňdir ($i = 5$). T temperaturada onuň içki energiýasy $\frac{5}{2}kT$ bolar. Ikiatomly gazyň 1 molunyň energiýasy $\frac{5}{2}kTN_A = \frac{5}{2}RT$.

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

$$C_V = \frac{5}{2}R \quad \text{ýa-da} \quad C_V \cong \frac{5}{2} \cdot 2 \approx 5 \quad J/(grad \cdot mol) \text{ bolar.}$$

Soňra, tapýarys: $C_P \cong 5 + 2 \approx 7\ J/(grad \cdot mol)$, we

$$\frac{C_P}{C_V} = \gamma = \frac{7}{5} = 1,4.$$

Umumy görnüşde: $$C_V = \frac{i}{2}R, \tag{8.25}$$

$$C_P = C_V + R = \frac{i}{2}R + R = \frac{(i+2)R}{2}. \tag{8.26}$$

Molýar ýylylyk sygymlaryň gatnaşygyny (8.25) we (8.26) formulalardan bahalaryny goýup, alarys:

$$\gamma = \frac{C_P}{C_V} = \frac{\frac{(i+2)R}{2}}{\frac{i}{2}R} = \frac{i+2}{i}. \tag{8.26 a}$$

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 derejeleriniň sany, ýylylyk sygymlarynyň bahalary hem-de ýylylyk sygymlarynyň gatnaşyklarynyň san bahalary hasaplamalara görä, aşakdaky tablisada görkezilen.

tablisa

Gaz	i	C_V, $J/(K \cdot mol)$	C_P, $J/(K \cdot mol)$	γ
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 aýdanymyzda onuň temperaturasynyň haýsy şertlerde üýtgeýändigine-de baglydyr.

Şeýlelikde, izohorik prosesde: $\left(\frac{dQ}{dT}\right)_V = C_V;$

izobarik prosesde: $\left(\frac{dQ}{dT}\right)_P = C_P;$

adiabatik prosesde bolsa $\left(\frac{dQ}{dT}\right)_Q = 0,$

gazyň temperaturasynyň üýtgemegi daşky gurşaw bilen ýylylyk çalşygy bolmadyk ýagdaýynda geçýär ($dQ = 0$), emma $dT \neq 0$. Fiziki nukdaýnazaryndan seredeniňde bu ýagdaý, gazyň nähili uly energiýany alýandygyna ýa-da berýändigine garamazdan, ol energiýa izotermiki prosesde onuň temperaturasyny üýtgedip bilmez.

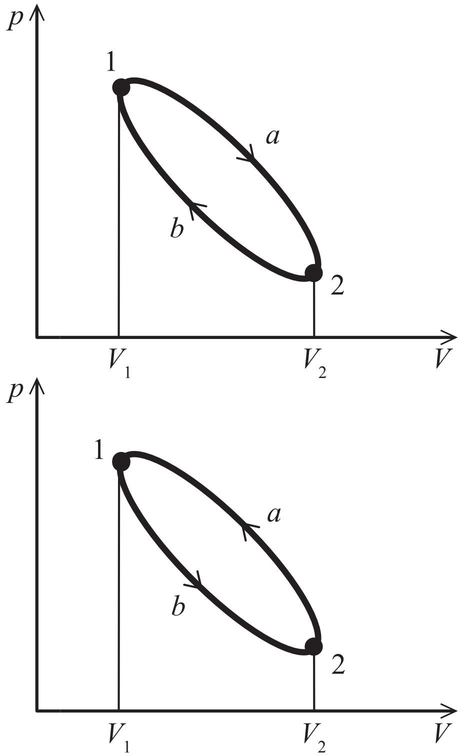
(8.25) we (8.26) formulalardan görnüşi ýaly molýar ýylylyk sygymlary diňe molekulalaryň erkinlik derejesi bilen kesgitlenip, temperatura bagly däldirler. Molekulýar-kinetik teoriýanyň (nazaryýetiniň), şeýle tassyklaýşy diňe biratomly gazlar üçin giň temperatura aralyklarynda ýerine ýetýär. Emma iki we köpatomly gazlarda teoriýa (nazaryýet) bilen tejribeleriň azda-kände gabat gelmeýşini molekulalaryň aýlanma we yrgyldama energiýalarynyň kwantlama düzgünine boýun egýändikleri 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 diagrammasynda aýlaw (sikl) ýapykdyr (*8.5-nji surat*).

Ideal (hyýaly) gazyň edýän aýlawly prosesini, gazyň giňelmek (1–2) we gysylmak (2–1) proseslerine bölmek bolar. Gaz giňelendäki edilýän iş položiteldir. Ol $1a_2V_2V_11$ figuranyň (şekiliň) meýdany bilen kesgitlenilýär ($dV > 0$); gysylanyndaky edilýän iş otrisateldir. Ol $2b_1V_1V_22$ 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, $A = \oint pdV > 0$ (sikl sagat diliniň aýlanýan ugry boýunça geçýär), onda oňa göni sikl (*8.5-nji a surat*), eger-de siklde otrisatel iş edilýän bolsa, $A = \oint pdV < 0$ (sikl sagat diliniň ugrunyň garşysyna geçýär), onda şeýle aýlawa ters aýlaw diýilýär (*8.5-nji b surat*).

Göni aýlaw daşardan alnan ýylylygyň hasabyna iş edýän, periodiki işleýän, ýylylyk hereketlendirijilerinde ulanylýar. Ters aýlaw, daşarky güýçleriň işiniň hasabyna ýylylyk pes temperaturaly jisimden



8.5-nji surat. Göni we ters aýlawly öwrülişikli prosesler

has ýokary temperaturaly jisime geçirilýän periodik işleýän gurluşlarda ulanylýar.

Aýlawly prosesiň netijesinde sistema başlangyç ýagdaýyna gaýdyp gelýär we 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 işiň ululygy daşardan alnan ýylylyk mukdaryna deňdir. Emma aýlawly prosesiň netijesinde sistema ýylylygy alyp hem-de berip 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 peýdaly täsir koeffisiýenti (PTK) şeýle kesgitlenýär:

$$\eta = \frac{A}{Q_1} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{Q_2}{Q_1}. \quad (8.28)$$

Eger termodinamiki proses göni ugur hem-de ters ugur boýunçada geçip bilýän bolsa, proses ilki göni ugra, soňra ters ugra geçip, sistema ýene-de ilkinji halyna gaýdyp gelse, daş-töwerekdäki gurşawda hiç hili üýtgeşme bolmasa, şeýle proseslere öwrülişikli prosesler, şeýle şertleri kanagatlandyrmaýan islendik proseslere öwrülişiksiz prosesler diýilýär.

Ýylylygyň gyzgyn jisimden sowuk jisime geçmegi, mehaniki energiýa öwrülmegi öwrülişiksiz prosesleriň adaty mysallarydyr. Tebigatdaky ähli makroskopik 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 howplusy organizmleriň garramagy we ölmegidir.

Ýylylygy sowuk jisimden gyzgyn jisime-de geçirmek bolar. Emma munuň üçin energiýany ulanýan sowadyjy gurluş gerek.

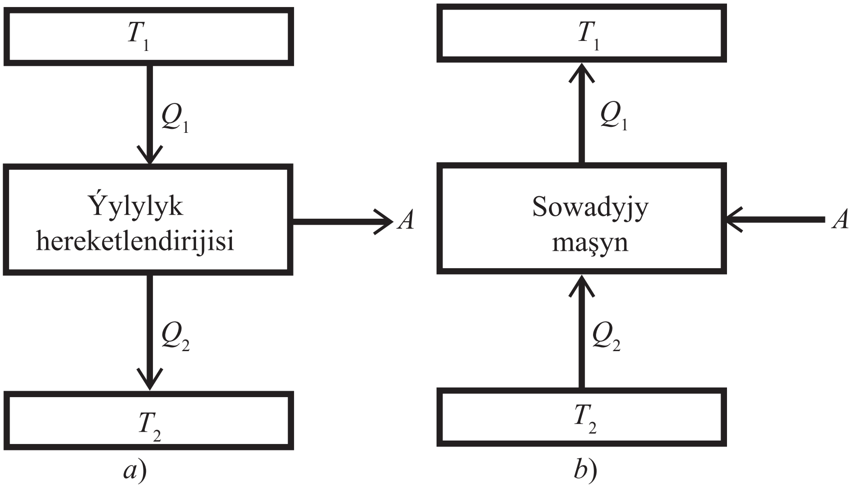
Islendik deňagramlylyk halyndaky proses öwrülişikli prosesdir. (Sistemanyň deňagramly haly diýip, onuň ululyklarynyň bellibir bahalary bolup, daşardan hiç hili täsir bolman, islendik uzak wagtlap üýtgemän galýan halyna aýdylýar). Öwrülişikli prosesler haýsy hem bolsa, käbir derejede hyýalylaşdyrylan 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 hakyky ýylylyk hereketlendirijileriniň peýdaly täsir koeffisiýentini (PTK) artdyrmagyň ýollaryny görkezýär.

§ 8.10. Termodinamikanyň ikinji başlangyjy (kanuny)

Termodinamikanyň birinji kanuny ýylylyk proseslerindäki energiýanyň saklanma we öwrülme 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 wagtyndaky jisimiň tizligini döredip bolarmy? Termodinamikanyň birinji kanuny şeýle soraglara jogap berip bilmeýär.



8.6-njy surat. Termodinamikanyň ikinji kanunynyň esaslandyrylyşy

Termodinamikanyň ikinji kanuny ýylylyk hereketlendirijileriň iş esaslaryny derňemegiň esasynda döredi. Şonuň üçin, ýylylyk hereketlendirijileriniň işleýşine seredeliň (*8.6-njy a surat*).

Gyzdyryjy diýip atlandyrylýan T_1 ýokary temperaturaly termostatdan aýlawyň dowamynda Q_1 ýylylyk mukdary alyndy, sowadyjy diýip atlandyrylýan T_2 pes temperaturaly termostada Q_2 ýylylyk mukdary berildi we iş edildi diýip göz öňüne getireliň. Ol işiň ululygy şu görnüşinde ýazylýar:

$$A = Q_1 - Q_2.$$

Ýylylyk hereketlendirijiniň peýdaly täsir koeffisiýentiniň (PTK) (8.28) formulada bire deň bolmagy üçin $Q_2 = 0$ şert ýerine ýetmeli, ýagny ýylylyk hereketlendirijiniň diňe 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 mümkin däldir. Ýagny bir çeşmeden Q_1 ýylylyk mukdaryny alyp, ony-da doly iş jisimine berip bolýan ($A = Q_1$) periodik işleýän ýylylyk hereketlendirijisini gurmaklyk (ikinji hilli perpetuum mobile – ömürlik dwigateli) barada edilen synanyşyklaryň hemmesi şowsuz çykdy.

Soňra, Saadi Karnonyň gazanan netijelerini Klauzius bilen B. Tomson umumylaşdyryp, diňe bir çeşmeden alnan ýylylyk mukdaryny, oňa ekwiwalent bolan işe geçirip bilýän periodik prosesi amala aşyrmagyň mümkin dällik 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 däldiginiň prinsipi görnüşinde hem aňladylyp bilner.

Dogrudan-da, şeýle hereketlendirijini gurup bolsady, onda biziň daş-töweregimizdäki gurşawdaky tükeniksiz 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.

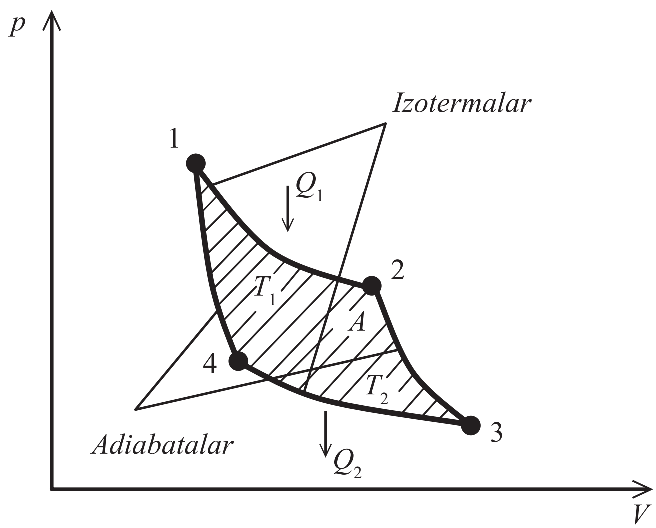
Biziň sereden prosesimize ters bolan proses (*8.6-njy b surat*) sowadyjy maşynlarynda ulanylýar. Sistema aýlawyň dowamynda has aşak T_2 temperaturada Q_2 ýylylyk mukdaryny alýar we has ýokary T_1 temperaturada Q_1 ýylylyk mukdaryny berýär. Aýlawly proses üçin $A = Q$ (8.27), emma şerte görä, $Q = Q_2 - Q_1 < O$, şonuň üçin $A < 0$ we $Q_2 - Q_1 = -A$ ýa-da 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 işiň 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 (PTK)

Termodinamikanyň ikinji başlangyjyna esaslanyp, ýylylyk hereketlendirijileriniň işleýiş prinsipini derňäp, 1824-nji ýylda S. Karno aýlawly proseslerin (hadysalaryň) iň 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. Iş jisimi hökmünde hereket edip bilýän porşeniň aşagynda silindr şekilli gaba salnan ideal gaz bar diýip, göz öňüne getireliň. Onuň peýdaly täsir koeffisiýentini (PTK) kesgitläliň.

Karnonyň aýlawly hadysasy 8.7-nji suratda 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.



8.7-nji surat. Karnonyň aýlawly hadysasy

Izotermik prosesde $T = const$, şonuň üçin gazyň gyzdyryjydan alan Q_1 ýylylyk mukdary gazyň 1-nji haldan 2-nji ýagdaýa geçendäki A_{12} edilen işiň ululygyna deňdir:

$$A_{12} = \frac{m}{\mu} RT_1 \ln \frac{V_2}{V_1} = Q_1. \qquad (8.29)$$

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):

$$A_{23} = -\frac{m}{\mu} C_V (T_2 - T_1).$$

Izotermik gysylanda, gazyň sowadyja berýän Q_2 ýylylygy gazyň A_{34} gysyş işine deňdir:

$$A_{34} = \frac{m}{\mu} RT_2 \ln \frac{V_4}{V_3} = - Q_2. \qquad (8.30)$$

Adiabatik gysylanyndaky iş:

$$A_{41} = \frac{m}{\mu} C_V (T_1 - T_2) = A_{23}.$$

Aýlawly prosesiň netijesinde ýerine ýetirilýän 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 şekiliň ştrihlenen böleginiň meýdanyna deňdir:

(8.28) deňlemä görä, Karnonyň aýlaw hadysasynyň peýdaly täsir koeffisienti (PTK):

$$\eta = \frac{A}{Q_1} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1}.$$

2–3 we 4–1 adiabatalar üçin (8.20) formulany ulanyp, alarys:

$$T_1 V_2^{\gamma-1} = T_2 V_3^{\gamma-1}, \quad T_1 V_1^{\gamma-1} = T_2 V_4^{\gamma-1}.$$

Bu ýerden:

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{V_3}{V_4}. \qquad (8.31)$$

(8.29) we (8.30) deňlemeleri (8.28) aňlatmada ornuna goýup, hem-de (8.31) gatnaşygy göz öňüne tutup, alarys:

$$\eta = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = \frac{\frac{m}{\mu} RT_1 \ln\frac{V_2}{V_1} - \frac{m}{\mu} RT_2 \ln\frac{V_3}{V_4}}{\frac{m}{\mu} RT_1 \ln\frac{V_2}{V_1}} = \frac{T_1 - T_2}{T_1},$$

ýagny Karnonyň aýlaw hadysasynyň PTK hakykatdan-da gyzdyryjynyň we sowadyjynyň temperaturalary bilen kesgitlenilýär. Ony artdyrmak üçin gyzdyryjy bilen sowadyjynyň temperaturalarynyň tapawudyny ulaltmak gerek bolýar. Mysal üçin, $T_1 = 400\ K$ we $T_2 = 300\ K$ 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

Öwrülişikli aýlaw hadysasy boýunça işleýän Karnonyň maşynynyň peýdaly täsir koeffisiýentiniň (PTK) tapylyşyndan:

$$\eta = \frac{T - T_0}{T} = 1 - \frac{T_0}{T},$$

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:

$$A = Q\,\eta, \tag{8.32}$$

ýa-da

$$A = Q - T_0 \frac{Q}{T}. \tag{8.33}$$

(8.33) deňleme diňe bir ýylylyk maşynlaryna degişli bolman, islendik öwrülişikli aýlawlarda (sikllerde) işleýän maşynlara-da degişlidir. Ýylylyk energiýasynyň islendik öwrülişiginde iň uly mümkin bolan iş (8.33) deňleme bilen tapylýar. Deňlemedäki:

$$Q_0 = T_0 \frac{Q}{T}, \tag{8.34}$$

ýylylyk sowadyjy tarapyndan alynýar we onuň işe öwrülmegi mümkin däldir.

Q/*T* gatnaşyk berlen sistemada energiýanyň işe öwrülip bilinmejek bölegini häsiýetlendirýär. Ol daş-töwerege ýaýran energiýanyň ölçegi bolup hyzmat edýär. Bu ululyga *entropiýa* diýip at berilýär.

Islendik öwrülişikli aýlawly proses üçin:

$$\oint \frac{dQ}{T} = 0 \tag{8.35}$$

diýip, ýazyp bolýandygyny 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:

$$\Delta S = 0. \tag{8.36}$$

Öwrülişiksiz aýlawly hadysany amala aşyrýan sistemalaryň entropiýasynyň artýandygyny termodinamikada subut edýärler, ýagny:

$$\Delta S > 0. \tag{8.37}$$

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:

$$\Delta S \geq 0. \tag{8.38}$$

ýagny ýapyk sistemanyň entropiýasy ýa-ha artar (öwrülişiksiz proses ýagdaýynda), ýa-da hemişelik galar (öwrülişikli proses ýagdaýynda).

10. Sargyt № 3303

XIX asyryň ortalarynda **Älemiň ýylylyk heläkçiligi** diýilýän mesele ýüze çykdy. Äleme takyk ýapyk sistema görnüşinde seredip, 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 çykarar 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 (HAKYKY) GAZLAR, SUWUKLYKLAR WE GATY JISIMLER

§ 9.1. Molekulalaryň özaratäsir güýçleri

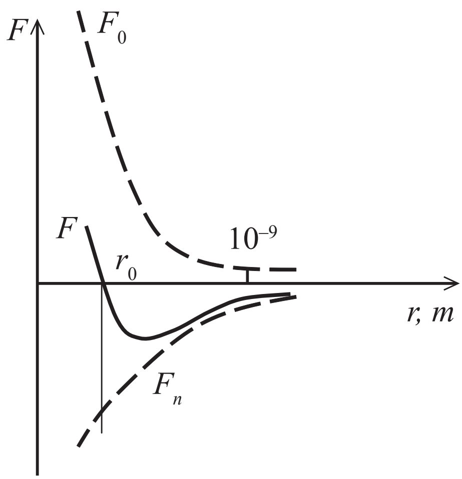
Gazlaryň molekulýar-kinetik teoriýasynda ulanylýan ideal (hyýaly) gazyň modeli, maýyşgak şarlara meňzedilýän molekulalaryň tertipsiz hereketinden ybarat bolan gazdyr. Molekulalaryň arasyndaky güýçler diňe urgy wagtynda ýüze çykýar, özem olar itekleşmeleriň maýyşgak güýjüdir. Molekulalaryň ölçegleri olaryň arasyndaky ortaça uzaklyk bilen deňeşdirilende 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, ikinjiden, molekulalaryň arasyndaky özaratäsir güýçleriniň häsiýetiniň maýyşgak şarlaryňkydan has çylşyrymlydygy bilen düşündirilýär. Basyşyň artmagy molekulalaryň aralygyny kiçeldýär. Şonuň üçin molekulanyň göwrümini we olaryň arasyndaky özaratäsir güýçlerini hasaba almak gerek bolýar. Mysal üçin, kadaly 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 atm = 101,3 *kPa*) bolanda molekulalaryň göwrümi gazyň ähli göwrüminiň ýaryny eýeleýär. Bu uly basyşlarda we pes temperaturalarda ideal gaz kanunlaryny ulanyp bolmaýar.

Real (hakyky) gazlara seredileninde, olaryň häsiýetleriniň molekulalaryň özaratäsirlerine baglydygyny we molekulalaryň özaratäsir güýçlerini hasaba almaklygyň gerekdigini bellemek gerek.

Molekulalaryň özaratäsir 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 edýändigi 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, çekişme güýçleri bolsa, otrisatel güýç hasap edilýär. Molekulalaryň aralygyndaky r uzaklyk r, r_0-la deň bolan wagtynda netijeleýji güýç $F = 0$, ýagny molekulalaryň itekleşme we çekişme güýçleri biri-birine deň.



9.1-nji surat. Molekulalaryň güýçleriň aralyga baglylygy

Şeýlelikde, r_O aralykda molekulalar deňagramlylyk ýagdaýynda bolýarlar.

Haçanda, $r < r_O$ bolanda, itekleşme güýji ($F_n > 0$), $r > r_O$ bolanda, çekişme güýji ($F_0 < 0$) agdyklyk edýär. Haçanda, molekulalaryň aralygy $r > 10^{-9}$ m bolanynda, molekulalaryň özaratäsir güýçleri ýitýär ($F = 0$).

§ 9.2. Wan-der-Waalsyň deňlemesi

Biziň belleýşimiz ýaly (9.1-nji paragrafda), real (hyýaly) gazlar üçin dürli proseslere seredilende, olaryň molekulalarynyň ölçeglerini, biri-birleri bilen özaratäsirlerini hasaba almak gerek bolýar. Şonuň üçin ideal (hyýaly) gazyň modelini we onuň ýagdaýyny häsiýetlendirýän Mendeleýewiň – Klapeýronyň deňlemesini gönüden-göni ulanyp bolmaz.

Molekulalaryň hususy göwrümlerini, ondaky molekulalaryň özaratäsir güýçlerini hasaba almak bilen, golland fizigi I. Wan-der-Waals (1837–1923) Mendeleýewiň – Klapeýronyň 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 göwrüminden 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:

$$pV = RT. \tag{9.1}$$

Aýdylyşy ýaly, molekulalaryň hususy ölçeglerini göz öňünde tutup, bir mol göwrümi $(V - b)$ ululyk bilen çalşyrmalydyrys, onda:

$$p(V - b) = RT. \tag{9.2}$$

$p \to \infty$ bolanda, gazyň göwrümi $V \to 0$, ýagny gaz tükeniksiz gysylanda, onuň göwrüminiň nola ymtylýandygy (9.2) deňlemeden gelip çykýar, bu bolsa mümkin däldir; 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, $p \to \infty$ bolanda gazyň göwrümi $V - b$ bolýar, şeýlelik bilen, b ululyk V mol göwrümiň örän uly basyşlarda ymtylýan göwrümidir: ol göwrüm molekulalar gaplanylanda, bir moluň düzümine girýän hemme molekulalaryň tutýan göwrümine deňdir.

b ululygyň, takmynan, molekulalaryň hususy göwrümleriniň köpeldilmegine deňdigini teoretiki hasaplamalar görkezýär.

Real (hakyky) gazlarda molekulalaryň arasyndaky özaratäsir güýçleri daşky basyş güýçlerine goşmaça täsir 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 konsentrasiýasynyň 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 alýarys:

$$\left(p + \frac{a}{V^2}\right)(V - b) = RT. \tag{9.3}$$

Wan-der-Waalsyň a we b düzedişleri berlen gaz üçin bellibir derejeli takyklyk bilen hemişelikdir. Dürli gazlar üçin olar dürlüdirler. Olaryň san bahalary tablisada berilýär.

HS-de basyş Pa, göwrüm birligi m^3/mol (soňky deňlemede) bolsa, $a - J \cdot m^3 /mol^2$, $b - m^3/mol$ bolýar.

Gazyň islendik m massasy üçin Wan-der-Waalsyň deňlemesi şeýle ýazylýar:

$$\left(p + \nu^2 \frac{a}{V^2}\right)(V - \nu b) = \nu RT, \tag{9.4}$$

bu ýerde $\nu = m/\mu$ – moluň sany.

§ 9.3. Wan-der-Waalsyň izotermalary we olaryň derňewi

Real gazyň özüni 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

$$\left(p + \frac{a}{V^2}\right)(V - b) = RT,$$

deňlemesiniň sag we çep bölegini V^2/p köpeldip, ýaýlary açyp meňzeş derejedäki V agzalary toplap, alarys:

$$V^3 - \left(\frac{RT}{p} + b\right)V^2 + \frac{a}{p}V - \frac{ab}{p} = 0. \qquad (9.5)$$

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, üç ýa-da dürli bahasyny alarys.

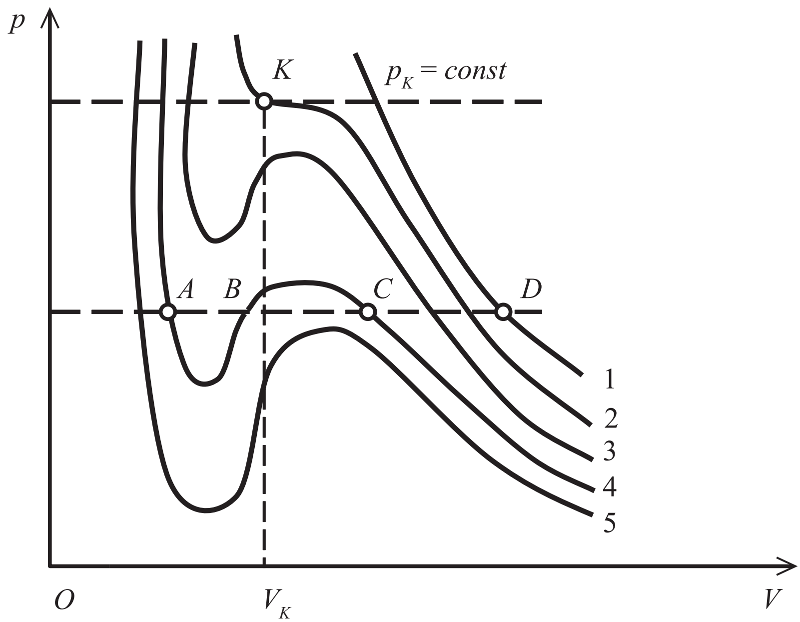
Wan-der-Waalsyň deňlemesinden dürli T üçin p-niň V baglylyk grafigini çyzyp, biz birnäçe izoterma alarys (*9.2-nji surat*).

Bu suratda $T = const$ 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.

$p = f(V)$ baglylygyň grafigine seredip, aşakdaky üç sany netijäni çykarýarys:

1. Ýokary temperaturada (1 izoterma – T_1). 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 diýildigidir.

2. Uly bolmadyk temperaturalarda, 2, 3 we 4-nji izotermalarda örküçler emele gelýär.



9.2-nji surat. Hakyky gazlar üçin Wan-der-Waalsyň izotermalary

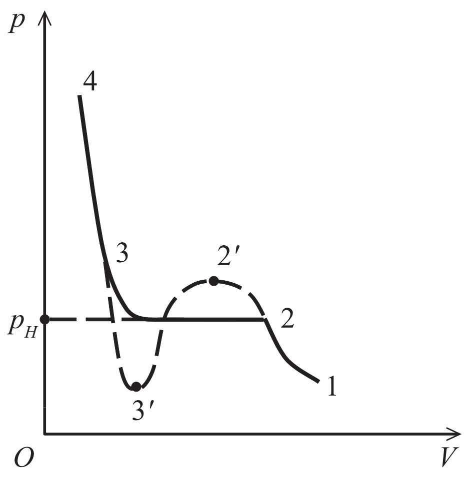
AD izobarasy 4 izotermany *A*, *B*, *C* – üç nokatda kesip geçýär. Bu ýagdaýda berlen *p* we *T*-de Wan-der-Waalsyň deňlemesinde göwrüme üç sany baha degişlidir. Bu bolsa maddanyň bir wagtyň özünde üç faza ýagdaýynda bolýandygyny aňladýar.

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 aýyrýan izoterma-da bar. Bu izoterma-kritiki izoterma, oňa degişli temperatura – T_k kritiki temperaturadyr. 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 bellibir bahasy bardyr.

§ 9.4. Maddanyň kritiki haly. Faza geçişleri

Agregat halda alnan netijeleriň fiziki manysy Wan-der-Waalsyň eksperimental (tejribe arkaly alnan) izotermalaryna seredenimizde äşgär görünýär. Bu barlaglaryň esasy D. I. Mendeleýewiň, 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 öňüne getireliň. Porşeni hereketlendirip, bellibir 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 şekillendirilendir.



9.3-nji surat. Wan-der-Waalsyň izotermasynyň derňewi

Uly V göwrümde porşeniň aşak inmegi bilen gazyň basyşy birsydyrgyn ýokarlanýar; prosesiň bu bölegine izotermanyň 1–2 şahasy degişlidir (*9.3-nji surat*). Bu aralykda Boýluň–Mariottyň gaz kanuny doly ýerine ýetýär we 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 şonça-da köp mukdary suwuklyga öwrülýär. V_2 göwrüme we p_H basyşa degişli bolan 3 nokatda gazyň hemmesi doly suratda suwuk ýagdaýyna geçýär. Basyşyň mundan beýläk ýokarlandyrylmagy örän uly güýç talap edýär, sebäbi, suwuklygyň gysylyjylygy azdyr. Izotermanyň 3–4 şahasy gazyň suwuk ýagdaýyna degişlidir.

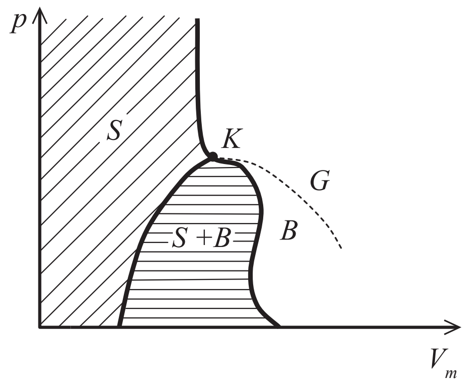
$V_1 - V_2$ göwrümde gazlaryň suwuklyga öwrülýän p_H basyşyna berlen T temperaturada doýgun buglaryň maýyşgaklygy diýilýär. Göwrümleriň V_2 bahalaryna degişli bolan $2-3$ aralygynda madda bir wagtyň özünde iki agregat ýagdaýynda (iki fazada) – suwuklyk we gaz ýagdaýynda bolýar.

9.3-nji suratdaky $2-2'$ we $3'-3$ – 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 sallanýan $2'-3'$ bölegine maddanyň bütinleý durnuksyz haly degişlidir.

9.4-nji suratdaky dürli temperaturalarda S – suwuklyk, $S+B$ – suwuklyk we bug, B – bug, G – gaz ýagdaýynda.

Alnan real izotermalary we 9.3-nji suratdaky teoretiki we eksperimental izotermalaryň seljermelerini derňäp, kritiki izotermanyň üç oblasta bölünýändigine göz ýetirmek kyn däl (*9.4-nji surat*). Öwrüm nokadynyň aşagynda ýogyn egri çyzyk bilen çäklenen oblast maddalaryň iki fazadaky: suwuklyk we gaz görnüşindäki (doýan bug görnüşinde) halyna degişlidir; çepdäki oblast – maddalaryň suwuk halyna, sagdaky oblast – maddalaryň gaz halyna degişlidir. Doýan buguň gaz halyndaky maddalardan esasy tapawudy – ony izotermiki gysanyňda suwuklyga öwrülmegidir. Gaz



9.4-nji surat. Hakyky gazyň izotermasynyň şekillendirilişi bolsa, kritiki temperaturadan ýokary temperaturalarda basyş näçe ýokary bolsa-da, suwuklyga öwrülmeýär.

§ 9.5. Real (hakyky) gazyň içki energiýasy

Real gazyň içki energiýasy kesgitlenende, molekulalaryň kinetik energiýalaryndan başga-da, olaryň potensial energiýalaryny-da hasaba almaly bolýar. Sebäbi, real gazyň içki energiýasy bu energiýalaryň jemine deňdir. Ýagny:

$$U = U_k + U_p. \tag{9.6}$$

9.1-nji paragrafdan belli bolşy ýaly, molekulalaryň aralygy kiçi bolan ýagdaýynda, položitel itekleşme güýçleri ýüze çykýar we olara položitel potensial energiýa degişlidir. Otrisatel bolan çekişme güýçlerine bolsa, otrisatel potensial energiýa degişlidir.

Molekulalaryň öňe we aýlanma hereketleriniň kinetik energiýasy ideal gazyň içki energiýasyny kesgitleýär ((8.29) aňlatma seret):

$$U_1 = \frac{i}{2}RT, \quad \text{ýöne} \quad \frac{i}{2}R = C_V \quad \text{şonuň üçin}$$

$$U_k = U_1 = C_V\, T, \tag{9.7}$$

bu ýerde C_V – izohorik molýar ýylylyk sygymy, T – absolýut temperatura.

Molekulalaryň özaratäsir güýçleriniň dA işi gazyň içki basyşyny (p_i) döredip, onuň göwrüminiň üýtgemegine 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 üýtgemesi

$$dU_2 = \frac{a}{V^2}dV,$$

deňdir.

Şu aňlatmany integrirläp, alarys:

$$U_2 = -\frac{a}{V} + c.$$

Integrirlemäniň hemişeligi c berlen şerte görä kesgitlenýär. Göwrüm çäksiz ulalanda, molekulalaryň arasyndaky uzaklyk artýar, şu halatda potensial energiýany nola deň diýip almak bolar. Onda:

$$c = 0$$

we çäkli V göwrüm üçin potensial energiýa

$$U_n = U_2 = -\frac{a}{V}, \tag{9.8}$$

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:

$$U = C_V T - \frac{a}{V}. \tag{9.9}$$

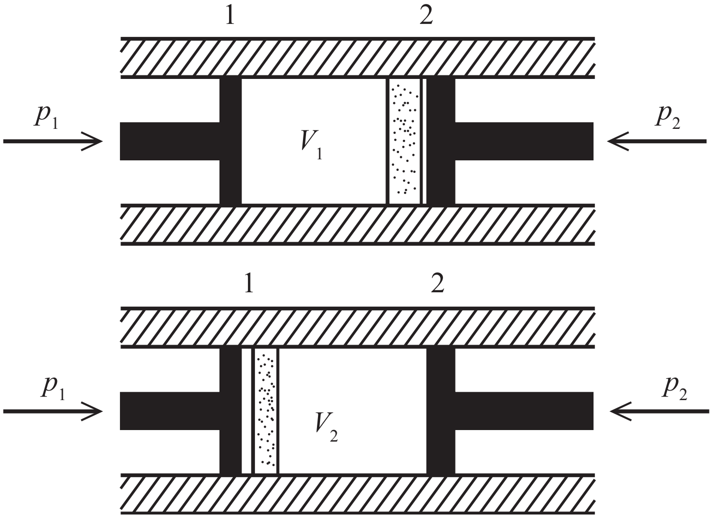
(9.9) formuladan görnüşi ýaly, real gazyň içki energiýasy onuň T temperaturasyna we V göwrümine baglydyr.

§ 9.6. Joulyň-Tomsonyň effekti

Eger U energiýaly 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 iňlis fizikleri J. Joul (1818–1889) we U. Tomson (1824–1907) kesgitlediler.

Joulyň-Tomsonyň effektine seredeliň. 9.5-nji suratda olaryň tejribeleriniň şekili görkezilendir. Ortasy öýjükli maddadan edilen dykyly, ýylylykdan izolirlenen silindriň içinde iki sany porşen bar. Porşenler hiç hili sürtülmesiz hereket edip bilýärler.



9.5-nji surat. Joulyň-Tomsonyň effekti

Goý, ilkibaşda dykynyň çep gapdalynda (porşen bilen aralykda) basyşy p_1, göwrümi V_1 we temperaturasy T_1 haldaky gaz bolsun. Dykynyň sagynda gaz ýok (porşen 2 dyka degip dur). Dykynyň üstünden gaz geçenden soňra, sag tarapdaky gazyň ululyklary p_2, V_2 we T_2 bilen häsiýetlendirilýär. Silindrdäki p_1 we p_2 basyşlar hemişelik saklanylýar. Bu şertlerde:

$$dQ = (U_2 - U_1) + dA = 0. \tag{9.10}$$

Gazyň ýerine ýetirýän daşky işi porşen 2-niň saga süýşeninde ýerine ýetirýän položitel işinden ($A_2 = p_2 V_2$) we porşen 1-iň saga hereket edeninde ýerine ýetirýän otrisatel ($A_1 = p_1 V_1$) işinden ybaratdyr, ýagny doly iş $dA = A_2 - A_1$-e deň bolar. Bularyň bahalaryny (9.10) deňlikde goýup, alarys:

$$U_1 + p_1 V_1 = U_2 + p_2 V_2. \tag{9.11}$$

Şeýlelikde, Joulyň-Tomsonyň effektinde $U + pV$ ululyk üýtgemän galýar. Oňa entalpiýa diýilýär. Başga söz bilen aýdanymyzda, gaz uly basyşly çep tarapdan dykynyň üsti bilen saga geçip, adiabatik giňeldileninde 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 gyzýan bolsa ($\Delta T > 0$), otrisatel effekt diýip atlandyrmak kabul edilen. Gazyň geçiş şertine göra, şol bir gaz Joulyň-Tomsonyň položitel effektini-de, otrisatel effektini-de berip biler. Eger gaz giňelende gyzmaýan-da, 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 görä 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 dartylma 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 ilişme güýçlerini ýeňmäge ýeterlik däldir.

Suwuklyklaryň teoriýasy häzirki wagta çenli doly işlenilip gutarylanok. Emma olaryň häsiýetleriniň örän çylşyrymlydygy baradaky ilkinji kesgitlemeler Ý. I. Frenkele (1894–1952) degişlidir. Frenkeliň teoriýasyna görä, suwuklyklardaky ýylylyk hereketi şeýle häsiýetde bolýar. Her bir molekula käbir wagt aralygynyň dowamynda bellibir deňagramly ornunyň töwereginde yrgyldaýar. Ol deňagramly ornuny öz ölçegi ýalyrak aralyga üýtgedýär. Şeýlelik bilen, molekulalar suwuklygyň içinde bellibir ornuň töwereginde az-kem saklanyp, haýallyk bilen ornuny üýtgedip durýar.

Ondan başga-da, Ý. 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 ýygylygy artýar, bu bolsa olaryň şepbeşikliginiň azalmagyna getirýär.

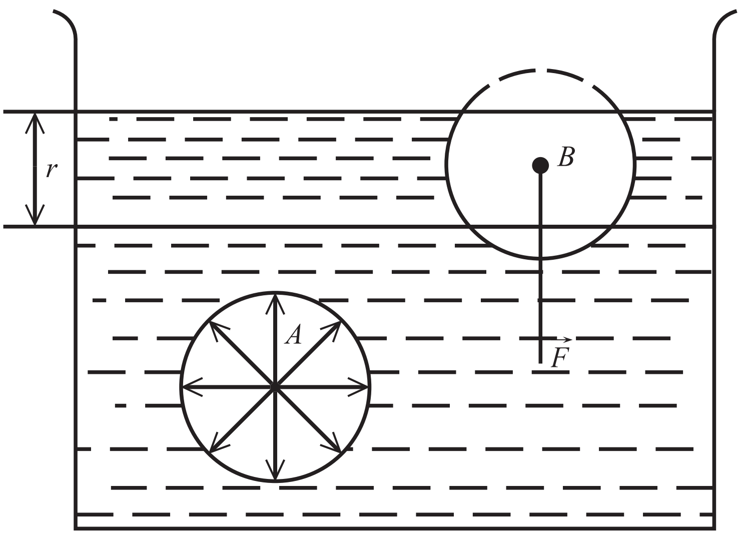
Suwuklygyň her bir molekulasyna, aralygyň artmagy bilen çalt kiçelýän goňşy molekulalar tarapyndan çekişme güýçleri täsir edýär: şeýlelikde, bellibir aralyga barandan soňra molekulara çekişme güýçlerini hasaba almaly hem bolýar. Şu aralyga (10^{-9} *m*) – molekulýar täsiriň radiusy (*r*) diýilýär, *r* 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 seredeliň.

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.

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. Bellibir göwrümde ähli dogry geometrik formaly jisimlerden iň kiçi üstlüsi sferadyr. Şoňa görä-de, bellibir suwuklyk massasynyň haýsy bolsa-da bir sferik däl formadan sferiki forma geçmegi onuň üstüniň kiçelmegi bilen baglydyr. Ýagny suwuklygyň



9.6-njy surat. Suwuklygyň üst dartylmasynyň şekillendirilişi 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:

$$F = \alpha l, \tag{9.12}$$

bolar. Bu ýerde l – suwuklygyň üst uzynlygy.

Suwuklygyň tebigatyna bagly bolan α – koeffisiýente üst dartylmasynyň koeffisiýenti diýilýär.

(9.12) aňlatmadan:

$$\alpha = \frac{F}{l}. \tag{9.13}$$

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 ýokarlandygyça, ol kiçelýär.

Suwuklygyň temperaturasy T_k – kritiki temperatura golaýlaşanda, üst dartyş koeffisiýenti α nola ymtylýar.

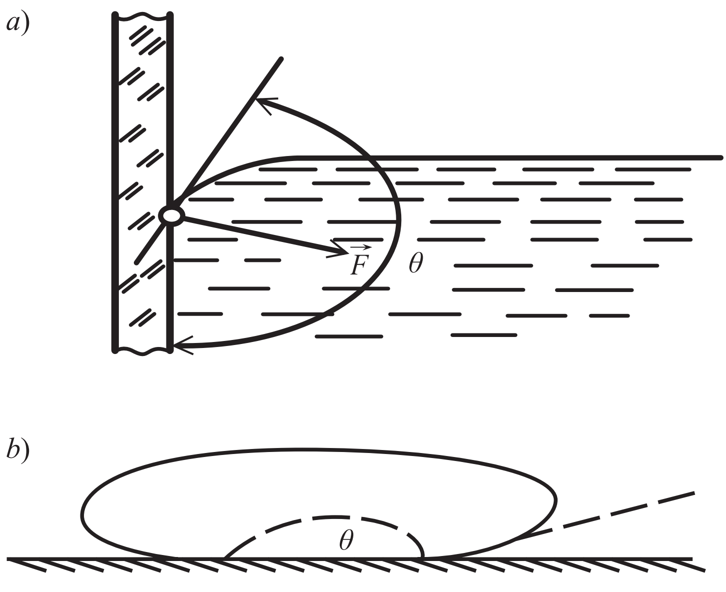
§ 9.8. Suwuklyk bilen gaty jisimiň araçägindäki hadysalar. Öllenmek

Suwuklyklar bilen gaty jisimleriň araçäginde öllenme ýüze çykýar. Öllenme – bu suwuklyklaryň molekulalary bilen gaty jisimleriň molekulalarynyň özaratäsiri netijesinde döredýän we suwuklyklaryň üstlerini gaty jisimiň üstüniň 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.

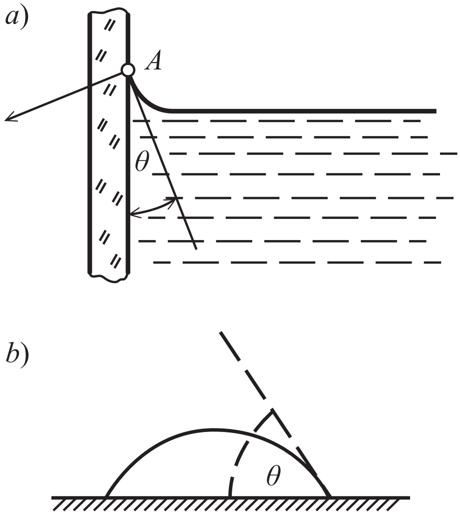
Eger suwuklygyň molekulalarynyň arasyndaky özaratäsir güýçleri suwuklyk bilen gaty jisimiň molekulalarynyň arasyndaky özaratäsir güýçlerden uly bolsa, suwuklyk gaty jisimi öllemeýär. Öllemeýän mahalda suwuklygyň gaty jisimiň daşyna öwrülip duran gatlagynda netijeleýji güýç suwuklyk tarapa gönükdirilendir (*9.7-nji a 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 gorizontal 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 halynda gyra burçy kütek bolýar we $\pi/2 \le \theta \le \pi$ aralykda ýatýar. Haçanda $\theta = \pi$ bolanda suwuklyk gaty üsti doly öllemeýär.

Ikinji halatda, ýagny suwuklygyň molekulalarynyň arasyndaky özaratäsir güýçleri suwuklyk bilen gaty jisimiň molekulalarynyň arasyndaky özaratäsir güýçlerden az bolan wagtynda, suwuklyk gaty jisimi ölleýär. Bu halatda netijeleýji güýç gaty jisim tarapa gönükdirilendir. Şonda gyra burçy ýitidir, ýagny $0 \le \theta \le \pi/2$. Haçanda $\theta = 0°$ bolanda doly öllenme bolýar.



9.7-nji surat. Gaty jisimi öllemeýän suwuklygyň üstüniň şekillendirilişi

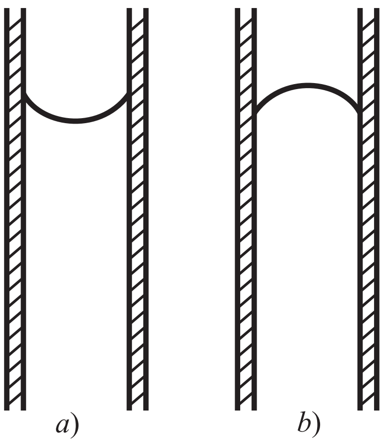


9.8-nji surat. Ölleýän suwuklygyň üstüniň şekillendirilişi

9.8-nji *a* suratda dik (wertikal) duran gaty jisimiň ýüzünde ölleýän suwuklygyň üstüniň ýerleşişi, 9.8-nji *b* suratda bolsa ölleýän suwuklygyň gorizontal üstdäki damjasynyň görnüşi görkezilendir. Öllenmäniň senagatda we durmuşda uly ähmiýeti bardyr. Reňklenende, ýuwlanda, fotografik materiallar işlenende, üstler lak bilen örtülende, dürli detallary biri-birine kebşirlemekde we ş.m. giňden ulanylýar.

§ 9.9. Kapillýar hadysalar

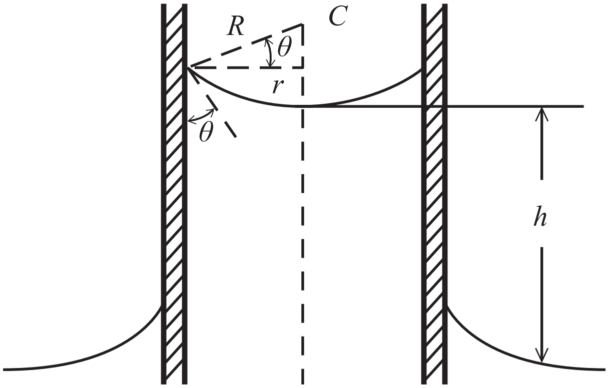
Kapillýar hadysalar diýip, suwuklygyň giň turbadaky derejesi bilen deňeşdirende, onuň inçejik turbajyklarda ýokaryk galmagyna ýa-da aşak düşmegine aýdylýar.



9.9-njy surat. Inçe turbalarda suwuklygyň üstüniň egrelişi

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.

Bir ujy giň gapdaky suwuklygyň içine sokulan inçejik turbajyga garap geçeliň. Goý, suwuklyk turbanyň ýasalan materialyny ölleýän bol-



9.10-njy surat. Inçe turbalarda suwuklygyň kapillýarlyk netijesinde ýokary galýan beýikliginiň kesgitlenilişi

sun. 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 otrisatel basyş peýda bolar:

$$p = 2\alpha / R,$$

bu ýerde α – üst dartylma koeffisiýenti, R – suwuklygyň üstüniň radiusy.

Giň gapdaky suwuklygyň tekiz üstüniň aşagynda goşmaça basyşyň ýokdugy sebäpli, suwuklyk turbajygyň içi bilen suwuklyk sütüniniň p basyşy deňagramlaşdyrýança galyp, h beýiklige ýeter:

$$p = \rho g h.$$

Bu ýerde ρ – suwuklygyň dykyzlygy, g – agyrlyk güýjüniň tizlenmesi, bu ýerden deňagramlylyk şertiniň görnüşi şeýle bolar:

$$p = \frac{2\alpha}{R} = \rho g h. \qquad (9.14)$$

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

$$h = \frac{2\alpha \cos\theta}{r\rho g}. \qquad (9.15)$$

Eger suwuklyk diwary doly ölleýän bolsa, ýagny $\theta = 0$, onda kapillýarda suwuklygyň ýokary göterilen beýikligi

$$h = \frac{2\alpha}{\rho g r}, \qquad (9.16)$$

bolar. Alnan aňlatma Jýureniň kanuny diýilýär. Kapillýaryň radiusy näçe kiçi bolsa, onda suwuklyk şonça-da ýokary göterilýär.

Eger suwuklyk turbajygyň materialyny öllemeýän bolsa, onda turbajygyň içindäki menisk güberçekdir, şol meniski döredýän basyş položiteldir we turbajykdaky suwuklygyň derejesi gabyň giň bölegindäkiden aşakdadyr. Öllemeýän 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 ösümliklere zerur bolan çyglylygyň ýitmegine eltýär. Azyk önümlerinde, mysal üçin, çörekde, kapillýarlyk uludyr. Kapillýarlyk hadysany jaý gurluşygynda hem göz öňünde 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 giňişlikde bellibir 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-dürlüdirler.

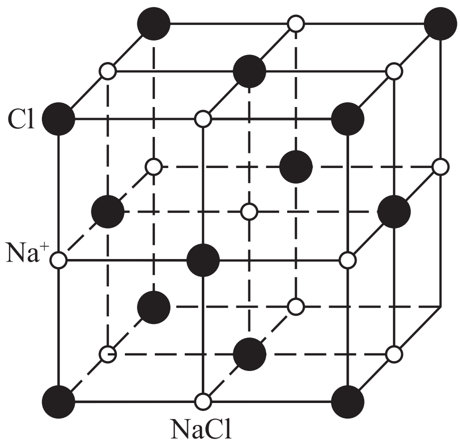
Gaty jisimler, kristallik jisimlerden başga-da, amorf jisimlere hem bölünýärler. Amorf jisimlere aýna, dürli hilli aýna şekilli maddalar, smolalar, bitumlar we ş.m. degişlidir. Olaryň tebigy taýdan bellibir kesgitli formalary bolman, olara işlemegiň netijesinde dürli formalary berip bolýar. Kristallik jisimleriň her haýsysy bellibir kesgitli temperaturalarda ereýärler, amorf jisimler bolsa, birsyhly gaty haldan suwuk hala geçip durýarlar (kesgitli eremek temperaturalary ýok). Olar izotropikdirler, ýagny amorf jisimleriň 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 (üç ölçegi boýunça) simmetrik ýerleşip, kristallik gözenegini emele getirýärler.

Gaty jisimi emele getirýän her bir atom ähli goňşy atomlaryň özaratäsir 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 gelýär, bu bolsa bütin kristalyň tutuşlygyna berk bolmagyna sebäp bolýar. Şeýlelik bilen, kristalyň gurluşy örän çylşyrymly bolup, onuň berkligi içki simmetriýasy bilen şertlenendir.

Kristaly emele getirýän atomlaryň arasyndaky özaratäsir güýçleri dürli häsiýetde bolýarlar. Duzlaryň kristallarynda atomlar elektrik



9.11-nji surat. Nahar duzunyň kristal gözenekleri

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 özaratäsir 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 şekillendirilendir Na^+ (olar položitel zarýadly), hloryňky bolsa, gara tegelejikler bilen – Cl^- (otrisatel zarýadly) şekillendirilýär. Bölejikleriň tebigatyna, kristallik gözenegiň düwünlerinde ýerleşişine, olaryň aralygyndaky özaratäsir güýçlerine baglylykda kristallar biziň ion (NaCl) kristalymyzdan başga-da, atom, metallik we molekulýar kristallaryna bölünýärler.

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 özaratäsir güýçleri Wan-der-Waalsyň güýçlerine degişlidir.

Metallik kristal gözeneklerine düwünleri položitel zarýadlanan ionlardan we olaryň aralary hereket edýän erkin elektronlardan ybarat bolan gözenekler degişlidir. Hereket edýän erkin elektronlaryň toplumyna elektron gazy diýilýär.

Atom kristallaryna: almaz, grafit, birnäçe organiki däl birleşmeler – ZnS, Be, Ge, Si ýaly nusgawy ýarymgeçirijiler; metallik kristallaryna: Cu, Ag, Pt, Au ýaly metallar, molekulalar kristallaryna: köpsanly organiki birleşmeler, parafin, spirt, rezin, inert gazlary – Ne, Ar, Kr, Xe we CO_2, O_2, N_2 ýaly gazlar degişlidir.

Gaty jisimleri, ýene-de, monokristala we polikristala bölmek bolar. Monokristallarda – gaty jisimiň maýdaja bölejikleri bir bitewi, ýeke-täk kristallik strukturany (gurluşy) emele getirýär. Kiçijik kristallaryň köp sanyndan ybarat bolan gaty jisime polikristallik jisim diýilýär. Polikristallardan, metallardan başga-da, mysal üçin, gant böleginiň hem polikristallik görnüşli gurluşlysy 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 ionuň bellibir 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 ýokarlananda, 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 kesgitleýäris:

$$l_t = l_0 + \Delta l = l_0 (1 + \alpha t).$$

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 – göwrüme giňelme koeffisiýenti. Biziň seredýän şertimizde uzynlygyna we göwrümine giňelme koeffisiýentleriniň şeýle baglanyşygy bar:

$$\beta = 3\alpha.$$

Gaty jisimleriň giňelme koeffisiýentleriniň bahasy kiçi bolup, $10^{-5} - 10^{-6}\ K^{-1}$ aralygynda ýatýarlar. Gaty jisimler gyzdyrylanda, erkin giňelip bilmeseler, onda gyzdyrmagyň netijesinde uly mehaniki basyşy döredip bilýärler, olary durmuşda we tehnikada hasaba almaly bolýar. Şol dartgynlyklaryň bolmazlygy üçin demirýol relslerini goýanlarynda, olaryň sepleşýän 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 özaratäsir güýji bardyr. Şonuň üçin-de, olaryň yrgyldylaryna baglanyşykly yrgyldylar hökmünde garamak bolar: tutuş gözenekde dürli ýygylykly yrgyldylar ýüze çykýar, olaryň energiýalary bolsa hasaba alynmalydyr. Şeýle-de bolsa, ýeterlik ýokary temperaturalarda, haçanda 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 öňünde 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

$$W = 3\,kT,$$

energiýa düşýär. Maddanyň bir molunyň içki energiýasy

$$U = WN_A = 3\,kT \cdot N_A$$

bolar. Bu ýerde N_A – Awogadronyň sany, k – Bolsmanyň hemişeliginiň $k = R/N_A$ deňdigini hasaba alsak, onda:

$$U = 3\,RT, \tag{9.17}$$

bu ýerde 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:

$$C = 3\,R, \tag{9.18}$$

ýagny himiki taýdan ýönekeý kristallik gaty jisimleriň molýar (atom) ýylylyk sygymy $3\,R$-e 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 Ptiniň kanuny diýilýär.

§ 9.12. Agregat hallaryň üýtgemegi

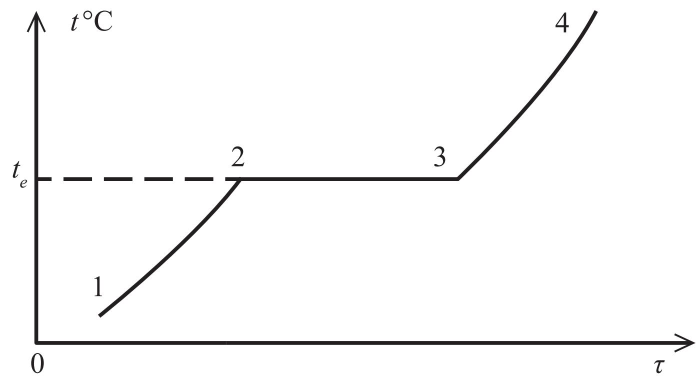
Tebigatdaky jisimleriň köpüsi üç faza halynda-da bolup biler: gaty, suwuklyk we gaz görnüşlerinde. Faza diýip, şol bir maddanyň fiziki häsiýetleri boýunça beýleki deňagramlylyk hallarynda tapawutlanýan termodinamik deňagramlylyk halyna aýdylýar. Mysal üçin, agzy ýapyk gapda duran suw iki faza halynda 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 düşünjesi 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 çürt-kesik üýtgemegi bilen häsiýetlendirilýär.

Maddanyň suwuk halyndan kristallik gaty halyna geçmekligi bellibir temperatura çenli suwuklygyň sowamagyna getirýär. Şeýlelikde, bölejikleriň arasyndaky özaratäsir 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 üýtgeýşi

Maddanyň gaty haldan suwuk hala geçmegine eremek diýilýär. Eremeklik molekulýar baglanyşygyň peselmegi, molekulalaryň hereketiniň artmagy bilen bolup geçýär. Bu proses 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 ilkibaşda 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) üýtgemeýär. Şu ýagdaýda jisime berilýän ýylylyk diňe eremek üçin harç edilýär, ýagny kristallik gurluşyny bozýar. 3 nokat eremekligiň gutaranlygyny aňladýar, 3–4 aralyk bolsa suwuklygyň gyzdyrylmagyna degişlidir.

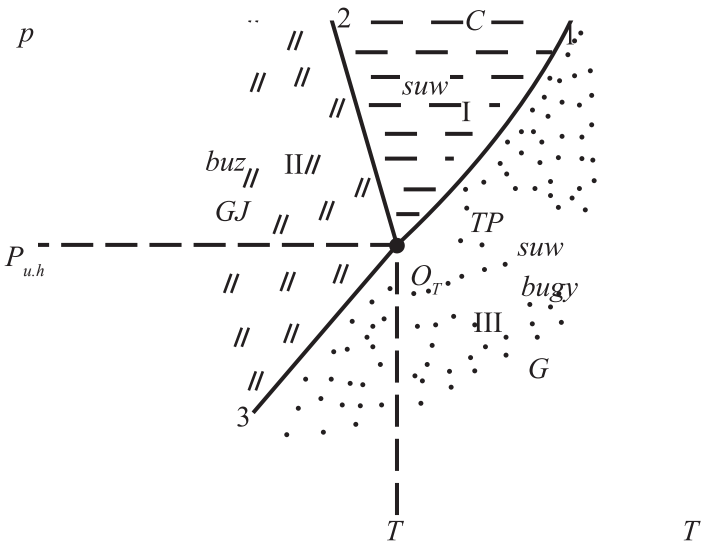
Suwuklyga geçmezden, maddanyň gaty haldan gaz halyna geçmegine sublimasiýa (wozgonka) diýilýär. Şunlukda, gaty jisimiň bugarmasy bolup geçýär. Şeýle prosese buzda, ýodda we başga-da, birnäçe maddalarda gözegçilik etmek bolýar.

Faza geçişlerini geometriki şekillendirmek üçin hal diagrammasy ulanylýar (*9.13-nji surat*).

0–2 egriçyzyk buzuň eremek temperaturasynyň basyşa baglylygyny görkezýär we gaty we suwuk fazalary biri-birinden bölýär. 0–3 egriçyzyk bolsa, buzuň doýan bugunyň basyşynyň temperatura görä üýtgeýşini aňladýar, hem-de bu egriçyzyk gaty we gaz şekilli fazany araçäklendirýär.

Doýan buguň basyşynyň temperatura baglylygyny (suwuň mysalynda) 0–1 egriçyzyk 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 (0 nokada degişli bahalar) – maddanyň üç halynyň hem deňagramlylyk ýagdaýyndaky p_d – basyşynyň we T_d temperaturasynyň ululygydyr. Ähli egrileriň kesişen 0 nokadyna uçluk nokady diýilýär. Şol suratdaky: *G.J.* – gaty faza, *S* – suwuk



9.13-nji surat. Maddanyň üç halynyň şekillendirilişi

faza, $G-$gaz şekilli fazadyr. Üçlük nokat maddanyň birbada bilelikde üç faza görnüşinde – suwuk, gaty we gaz şekilli – fazalarda bolmaklygynyň şertini häsiýetlendirýär.

Her bir maddanyň üçlük nokadyna kesgitli bahalar degişlidir. Mysal üçin, suwuň üçlük nokady üçin deňagramlylyk temperaturasy t = 0,00748 °C, suwuň doýgun buglarynyň basyşy 5 *mm*.sim.süt. barabardyr. Suwuň üçlük nokady üçin temperaturanyň termodinamiki şkalasynda kabul edilen bahasy T = 273,15 K; buzuň eremek temperaturasy üçlük nokadyndan 0,01 °C aşakda ýerleşýär. Şonuň üçin temperaturalaryň Selsiýa we Kelwin şkalalarynda şeýle baglanyşygy bar:

$$t = -273{,}15\ °\mathrm{C}.$$

Getirilen diagrammadan görnüşi ýaly, basyşyň üýtgemegi bilen: eremegiň temperaturasy, buga öwrülişiniň temperaturasy we sublimasiýa temperaturasy hem üýtgeýär. Faza geçişiň netijesinde maddanyň göwrümi uly üýtgeýär.

Faza deňagramlylygy ýagdaýynda basyşyň üýtgemegi bilen temperaturanyň arasyndaky baglylyk Klapeýron-Klauziusyň deňlemesi adyny alan differensial deňleme arkaly ýazylýar:

$$\frac{dp}{dT} = \frac{q}{T\Delta V}. \qquad (9.19)$$

Bu ýerde dp/dT – faza diagrammasynyň egrisindäki basyşyň temperatura görä alnan önümi (proizwodnysy), q – faza geçişindäki ýylylyk, ΔV – faza geçişindäki göwrüm üýtgemesi.

Eremegiň egrisi üçin (9.13-nji suratdaky 0–2 egriçyzyk) ΔV – göwrümiň üýtgemesi V_S – suwuklygyň we V_{gj} – gaty jisimiň göwrümleriniň üýtgemegine deňdir:

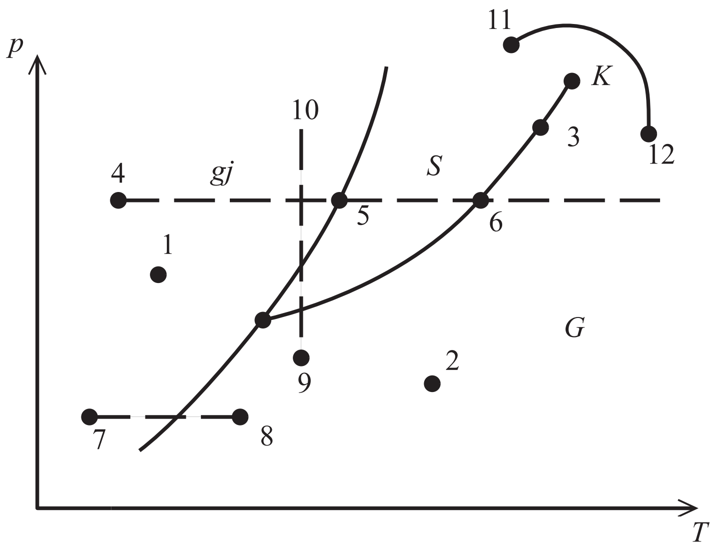
$$\Delta V = V_S - V_{gj}.$$

Gaty jisim-gaz (sublimasiýa: 0–3 egriçyzyk) halynyň deňagramlylyk ýagdaýy üçin.

Suwuklyk-gaz (0–1 egri çyzygy) deňagramlylygy üçin:

$$\Delta V = V_g - V_S \quad \text{bolar.}$$

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*



9.14-nji surat. Maddalaryň hal diagrammasy *surat*), 2 nokatda – gaz ýagdaýynda, 3 nokatda – birbada suwuklyk we gaz ýagdaýynda bolýar.

Goý, madda 4 nokada degişli basyşda we temperaturada gaty ýagdaýynda ýatyr diýeliň, ony hemişelik göwrümde gyzdyrsak, 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.

III

ELEKTROSTATIKA WE HEMIŞELIK ELEKTRIK TOGY

X bap

ELEKTROSTATIKA

§ 10.1. Elektrik zarýadynyň saklanma kanuny

Gozganmaýan elektrik zarýadlarynyň özaratäsirlerini we häsiýetlerini öwrenýän elektrodinamikanyň bir bölümine elektrostatika diýilýär.

Tebigatda zarýadlaryň položitel we otrisatel – iki görnüşi bar. Položitel zarýad, mysal üçin, aýna taýajygyny derä sürtenimizde, otrisatel zarýad, ýantar taýajygyny ýüň mata sürtenimizde döreýär.

Belli bolşy ýaly, ähli jisimler atomlardan düzülýär. Atom hem öz gezeginde položitel zarýadlanan ýadrodan we onuň töwereginde aýlanýan elektronlardan ybaratdyr. Elektronlar otrisatel zarýadlanandyr. Şonuň üçin-de, bütewilikde alanymyzda atom elektrik taýdan bitarapdyr. Temperaturanyň, magnit meýdanynyň, ýagtylygyň we şuňa meňzeş sebäpleriň täsirinde atom özüniň bir ýa-da birnäçe elektronlaryny ýitirmegi mümkin. Şeýle ýagdaýda ol položitel zarýadlanan iona öwrülýär. Eger-de atom (ýa-da molekula) özüne goşmaça elektron kabul etse, ol otrisatel iona öwrülýär.

Şeýlelikde, elektrik zarýady 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 zarýadlanýar.

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 zarýady elektronyň zarýadynyň absolýut ululygyna deň, emma garşylykly zarýady bardyr. Neýtron elektrik taýdan zarýadsyz bölejikdir. Elektrondan we protondan başga-da, köpsanly zarýadly elementar bölejikler bardyr. Elektrik zarýadsyz bölejik bolýar, emma bölejiksiz zarýad bolmaýar. Hemme zarýadlanan elementar bölejikleriň zarýady bardyr. Ol zarýadlaryň iň kiçisine, ýagny elektronyň zarýadyna deň bolan zarýada **elementar zarýad** diýilýär. Amerikan fizigi R.Milliken (1968–1953) we rus fizigi A. F. Ioffe elementar zarýadyň $e = 1.6 \cdot 10^{-19}$ 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 hem, otrisatel zarýad hem 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. Haçanda elektroskopyň dili noly görkezende položitel hem-de otrisatel zarýadlar biri-birine deň. Soňra bolsa otrisatel zarýadlar agdyklyk edip başlar, şeýlelikde, 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 golaýlaşdyrsaň bolsa, 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 geçýärler ýa-da şol bir jisimiň içinde ornuny üýtgedýärler. Tebigatyň esasy kanunlaryndan biri bolan şu elektrik zarýadynyň saklanma kanuny ilkinji gezek iňlis fizigi M. Faradeý (1791–1867) tarapyndan formulirlenýär.

Elektrik zarýadynyň saklanma kanuny başgaça şeýle formulirlenýär. Islendik ýapyk (daşky jisimler bilen zarýad çalşygy bolmadyk) sistemada olaryň içinde nähili hadysalaryň bolup geçýändigine garamazdan, elektrik zarýadlarynyň algebraik jemi üýtgemän galýar:

$$\sum_{i=1}^{n} q_i = const. \tag{10.1}$$

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 kynçylyklary döredýär. Mysal üçin, sintetik matalaryň gatlarynyň arasynda zarýadlar toplanýar, dokma fabriklerinde ýüplük sapaklar sürtülmäniň hasabyna elektriklenýärler, iklere we roliklere dartylýarlar hem-de üzülýärler. Ýüplük tozany çekýär we hapalanýar. Sapaklaryň elektriklenmeginiň garşysyna ýörite çäreler ulanmaly bolýar.

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 dartyşýarlar, ýagny zarýadlaryň arasynda özaratäsir güýçleri ýüze çykýar. 1785-nji ýylda fransuz fizigi Ş. Kulon tejribe arkaly zarýadlanan metal şarjagazlarynyň arasynda ýüze çykýan özaratäsirleriň kanunalaýyklyklaryny öwrenýär. Bu kanun diňe nokatlanç zarýad üçin dogrudyr. Zarýadlanan jisimi hemişe nokatlanç hasaplap bolmaz. Emma jisimleriň (zarýadlaryň) arasyndaky uzaklyk olaryň ölçeglerinden köp esse uly bolsa, onda zarýadlanan jisimleriň görnüşleri-de, ölçegleri-de olaryň arasyndaky özaragüýje 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 özaratäsir güýji bu zarýadlaryň ululyklaryna göni proporsionaldyr, olaryň arasyndaky uzaklygyň kwadratyna bolsa ters proporsionaldyr, ýagny

$$F = k\frac{q_1 q_2}{r^2}, \tag{10.2}$$

bu ýerde k – ölçeg birlikleriniň saýlanyp alnyşyna bagly bolan, proporsionallyk koeffisiýenti, q_1, q_2 – degişlilikde, zarýadlaryň ululygy, r – olaryň arasyndaky uzaklyk.

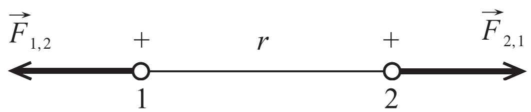
Iki sany gozganmaýan nokatlanç zarýadlanan jisimiň özaratäsir güýji (10.1-nji surat) ol jisimleriň merkezlerini birikdirýän göni çyzygyň boýuna baka ugrukdyrylandyr.

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, onda, zarýadly jisimler itekleşýärler, tersine, dartyşýarlar. Olaryň arasynda ýüze çykýan F özaratäsir güýjüne Kulon güýji diýilýär.

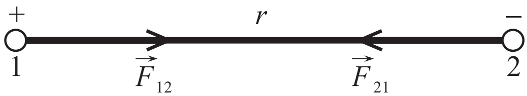
Kulonyň kanuny wektor görnüşinde şeýle ýazylýar:

$$\vec{F} = k\frac{q_1 q_2}{r^2}\frac{\vec{r}_{12}}{r}. \tag{10.3}$$

Bu ýerde $\vec{F}_{12} - q_1$ zarýada q_2 zarýad tarapyndan täsir edýän güýç, $\vec{r}_2 - q_1$, zarýady q_2 zarýad bilen birleşdirýän radius-wektor. $r = |\vec{r}_{12}|$ (*10.2-nji surat*).



10.1-nji surat. Iki nokatlanç zarýadlaryň özaratäsiri



10.2-nji surat. Dürli zarýadlaryň özaratäsiri

Eger özaratäsirleşýän zarýadlar birhilli we izotropik gurşawda ýerleşen bolsalar, olaryň özaratäsir güýçleri

$$F = k\frac{q_1 q_2}{\varepsilon r^2}.$$

Bu ýerdäki ε – ölçegsiz ululyga – gurşawyň (sredanyň) dielektrik syzyjylygy diýilýär. Ol berlen sredada zarýadlaryň aralygynda döreýän F özaratäsir güýjüniň wakuumdaky F_0 özaratäsir güýjünden näçe gezek kiçidigini görkezýär:

$$\varepsilon = F_0 / F. \tag{10.4}$$

Wakuumda $\varepsilon = 1$

Halkara birlikler sistemasynda (HS) proporsionallyk koeffisiýenti $k = \dfrac{1}{4\pi\varepsilon_0}$. Onda Kulonyň kanuny (zarýadyň birligi esasy däl-de, döredilen birlikdir) şeýle görnüşde ýazylýar:

$$F = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{q_1 q_2}{\varepsilon r^2}. \tag{10.5}$$

Elektrik zarýadynyň ölçeg birligi hökmünde kulon (Kl) kabul edilendir. 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:

$$1\,Kl = 1\,A \cdot s.$$

(10.2) formuladaky proporsionallyk koeffisiýenti

$$k = \frac{Fr^2}{q_1 q_2}, \tag{10.6}$$

aňlatma arkaly aňladylýar. Onuň (HS) sistemasyndaky ölçeg birligi $N \cdot m^2 / Kl^2$.

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 özaratäsir 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_O ululyga elektrik hemişeligi diýilýär. Ol fiziki hemişelikleriniň iň esaslaryndan biri bolup, aşakdaky baha eýedir.

$$\varepsilon_O = 8{,}85 \cdot 10^{-12} Kl^2/(N \cdot m^2),$$

ýa-da

$$\varepsilon_O = 8{,}85 \cdot 10^{-12} F/m, \tag{10.7}$$

bu ýerde Farad (F) – elektrik sygymynyň birligi.

§ 10.3. Elektrostatiki meýdan. Elektrik meýdanynyň güýjenmesi

Zarýadlanan jisimleriň özaratäsiri nähili ýüze çykýarka? Bu täsir bir jisimden başga bir jisime nähili geçýärkä? Bu soraglar öňler köp alymlary gyzyklandyrypdyr. Bu soraglara jogap berýän iki taglymat döreýär. Olar, ýakyndan täsir we aralykdan täsir taglymatlarydyr. Ikinji taglymata görä bir zarýadyň beýleki bir zarýada täsiri gös-göni boşluk arkaly hiç hili gurşawsyz şobada berilýär. Aralykdan täsir nazaryýetiniň tarapdarlary jisimler öz aralarynda hiç bir gurşaw bolmasa-da, bir-biriniň bardygyny «duýmaga» ukyplydyrlar diýip düşünipdirler.

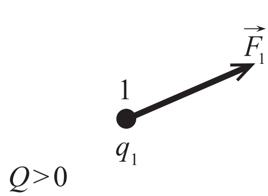
Ýakyndan täsir taglymaty boýunça bir zarýadyň beýleki zarýada täsiri diňe bellibir material gurşawyň üsti bilen, onda-da şobada berilmän, kesgitli bir tizlik bilen geçirilýär.

Häzirki zaman fizikasy ikinji – ýakyndan täsir nazaryýetiniň tarapynda durýar. Dogrudan-da, eger zarýadlaryň özaratäsiri, ýagny hereket, hiç bir gurşawsyz bir zarýaddan beýlekä geçýär diýsek, materiýasyz hereket bar diýdigimizdir. Bu bolsa manysyzdyr. Diýmek, dynçlykda duran zarýadlaryň özaratäsir 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, aňymyza bagly bolman, biziň duýujy organlarymyza, olaryň barlygyny priborlaryň kömegi bilen duýanymyzdan soňra täsir edýär. Şeýlelikde, elektrik meýdany-da materiýanyň bir görnüşidir. Gozganmaýan zarýadlaryň töwereginde döreýän meýdana elektrostatiki meýdan diýilýär. Aýrylykda alnan bir zarýadyň meýdanynyň barlygyny, şol meýdana başga bir «synag» zarýadyny eltenimizde, olaryň arasynda, Kulonyň kanuny esasynda özaratäsir güýçleriniň ýüze çykýanlygy bilen duýmak bolýar. Emma, birinji zarýadyň töweregindäki meýdan, onuň meýdanyna ikinji zarýady alyp barmazdan öň hem bardy, emma biz onuň bardygyny duýamyzokdyk.

Elektrostatiki 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 däldir. 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 hökmünde garamak bolar.

Goý, elektrik meýdany Q zarýad tarapyndan döredilen bolsun diýeliň (*10.3-nji surat*). Bu meýdanyň 1 nokadynda ululyklary dürli bolan nokatlanç, q_{0_1}, q_{0_2}, $q_{0_3}...q_{0_n}$ «synag» zarýadlaryny gezek-gezegine ýerleşdireliň, olara täsir edýän güýçleri degişlilikde, $\vec{F}_1$, $\vec{F}_2$, $\vec{F}_3$ ...$\vec{F}_n$ bilen belläliň. Olar-da dürli bolar.



10.3-nji surat. Zarýadyň getirilen zarýada täsiri

Emma zarýadlaryň arasynda ýüze çykýan özaratäsir güýçleri dürli bolsa-da, F/q gatnaşyk hemişelik bolar. Ýagny

$$\frac{\vec{F}_1}{q_{0_1}} = \frac{\vec{F}_2}{q_{0_2}} = \frac{\vec{F}_3}{q_{0_3}} = \ldots = \frac{\vec{F}_n}{q_{0_n}} = const.$$

Bu gatnaşyga san taýdan deň bolan ululyga meýdanyň berlen nokadyndaky güýjenmesi diýilýär. Ony E harpy bilen belgiläp alarys:

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q}. \tag{10.8}$$

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 güýjenmesiniň birligi N/Kl. Ýagny 1 N/Kl, 1 Kl nokatlanç zarýada 1 N güýç bilen täsir edýän meýdanyň güýjenmesidir. 1 N/Kl = 1 W/m. Ýokardaky (10.8) aňlatmadan görşümiz ýaly, F güýjüň ugry q zarýadyň alamatyna bagly. Eger $q>0$ bolsa, $\vec{F}$ güýç $\vec{F} = q \cdot \vec{E}$, $\vec{E}$ güýjenmäniň ugruna, $q < 0$ bolanda bolsa onuň garşysyna ugrugýar.

Wektor görnüşinde ýazylan Kulonyň (10.3) kanunyndan we (10.8) formulalardan görnüşi ýaly, nokatlanç zarýadyň güýjenmesi, wektor görnüşinde şeýle ýazylýar:

$$\vec{E} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_O}\frac{q}{r^2}\frac{\vec{r}}{r}$$

ýa-da skalýar görnüşinde

$$E = \frac{1}{4\pi\varepsilon_O}\frac{q}{r^2}. \tag{10.9}$$

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.

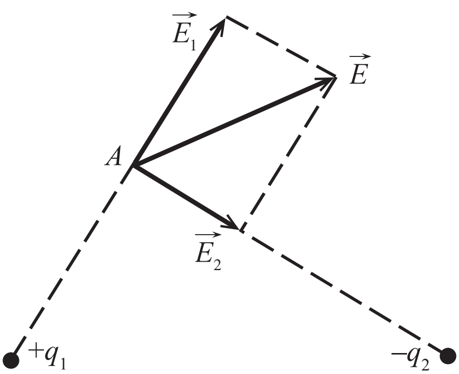
Eger meýdan nokatlanç zarýadlaryň birnäçesi tarapyndan döredilen bolsa, onda bu meýdanda ýerleşdirilen q_O synag zarýadyna täsir edýän güýçler wektorlary goşmak düzgüni boýunça goşulýar. Şonuň üçin meýdanyň berlen nokadyndaky zarýadlar sistemasynyň döredýän elektrik meýdanynyň güýjenmesi aýry-aýrylykda alnan her bir zarýadyň döreden güýjenme meýdanlarydyr, ýagny

$$\vec{E} = \vec{E_1} + \vec{E_2} + \vec{E_3} + \ldots + \vec{E_n} = \sum_{i=1}^{n} \vec{E_i}. \tag{10.10}$$

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 absolýut ululygy bolsa, şu formula bilen hasaplanyp bilner.



10.4-nji surat. Elektrik meýdanynyň üstüne goýma düzgüni

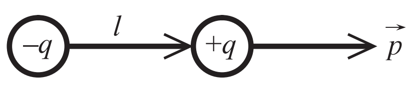
$$E = \sqrt{E_1^2 + E_2^2 - 2E_1E_2\cos\alpha}, \tag{10.11}$$

bu ýerde $\alpha - E_1$ we E_2 wektorlaryň arasyndaky burç.

§ 10.4. Elektrik dipoly we onuň meýdany

Ululyklary boýunça deň, alamatlary boýunça garşylykly özara berk baglanyşykda 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



10.5-nji surat

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:

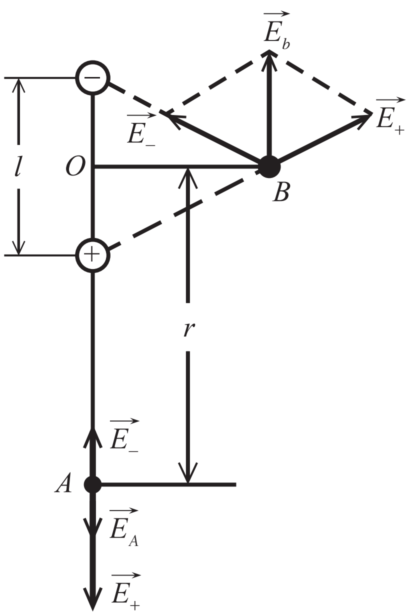
$$\vec{p} = q\vec{l}. \tag{10.12}$$

Elektrik momentiň ugry dipolyň egniniň wektorynyň ugry bilen gabat gelýär.

Superpozisiýa prinsipine görä, islendik nokatdaky dipolyň elektrik meýdanynyň $\vec{E}$ güýjenmesi:

$$\vec{E} = \vec{E_+} + \vec{E_-},$$

bu ýerde $\vec{E_+}$ we $\vec{E_-}$ – degişlilikde, položitel we otrisatel zarýadlaryň döreden meýdanlarynyň güýjenmeleri. Şu formuladan peýdalanyp, dipolyň okunyň ugrunda ýerleşen we onuň ortasyndan bu oka galdyrylan perpendikulýardaky meýdanlarynyň güýjenmesini hasaplalyň.



10.6-njy surat. Dipolyň meýdany

1. Dipolyň okunyň üstünde ýerleşen A nokatdaky meýdanyň güýjenmesi 10.6-njy suratdan görnüşi ýaly, dipolyň A nokatdaky meýdanynyň 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:

$$E_A = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\left[\frac{q}{(r-l/2)^2} - \frac{q}{(r+l/2)^2}\right] = \frac{q}{4\pi\varepsilon e_0}\frac{(r+l/2)^2-(r-l/2)^2}{(r-l/2)^2-(r+l/2)^2}.$$

Dipolyň kesgitlemesine görä, $l/2 << r$ şonuň üçin:

$$E_A = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{2ql}{r^3} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{2p}{r^3}.$$

2. Dipolyň okuna onuň ortasyndan galdyrylan perpendikulýarda ýerleşen B nokadyň güýjenmesini kesgitläliň:

B nokat zarýadlardan deň daşlykda ýerleşýär, şonuň üçin

$$E_+ = E_- = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{q}{(r')^2 + l^2/4} \approx \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{q}{(r')^2}, \qquad (10.13)$$

bu ýerde r' – B nokatdan dipolyň egniniň ortasyna çenli aralyk. Deňýanly üçburçluklaryň meňzeşdiginden, alarys:

$$\frac{E_B}{E_+} = \frac{l}{\sqrt{(r')^2 + (l/2)^2}} \approx \frac{l}{r'},$$

bu ýerden $$E_B = E_+ l/r'. \qquad (10.14)$$

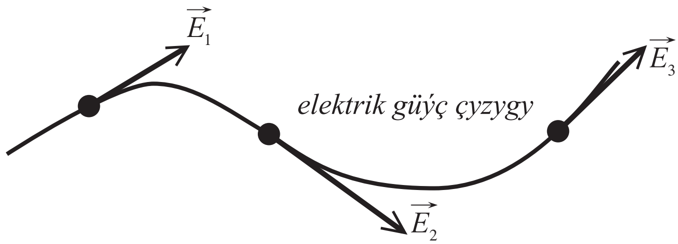
(10.14) formuladaky $\vec{E_B}$-nyň bahasyny (10.13) formula goýup, tapýarys:

$$E_B = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{ql}{(r')^3} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{p}{(r')^3}.$$

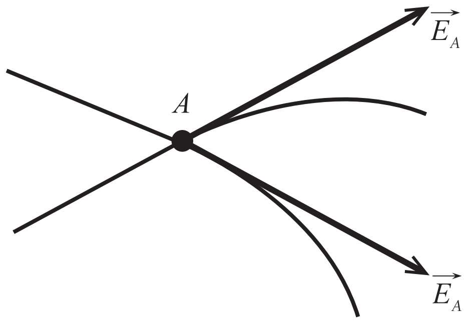
10.6-njy suratdan görnüşi ýaly, $\vec{E_B}$ wektoryň ugry dipolyň elektrik momentiniň garşysyna ugrukdyrylandyr.

§ 10.5. Elektrik güýç çyzyklary. Güýjenme wektorynyň akymy

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 teklip 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

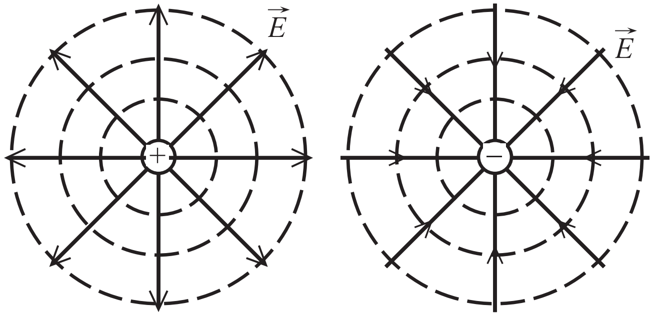


10.8-nji surat. Güýç çyzyklarynyň ugrunyň kesgitlenilişi

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*).

Elektrik güýç çyzyklarynyň başlangyjy-da, ahyry-da bar, ýagny olar açykdyrlar. Bu bolsa tebigatda elektrik meýdanynyň zarýad görnüşinde çeşmesiniň bardygyny görkezýär. Aýry-aýrylykda alnan položitel we otrisatel zarýadyň güýç çyzyklary 10.9-njy suratda şekillendirilendir.

Elektrik meýdany barlamak üçin synag zarýady hökmünde položitel zarýady alypdyk we ony elektrik meýdanyna girizenimizde güýçler şol zarýaddan çykypdy. Şonuň üçin hem güýç çyzyklary položitel zarýaddan çykýarlar, otrisatel zarýada girýärler diýip hasaplaýarlar. Haçanda meýdany birnäçe gozganmaýan zarýadlar emele getirseler, olaryň güýç çyzyklary dürli görnüşi alyp bilerler.



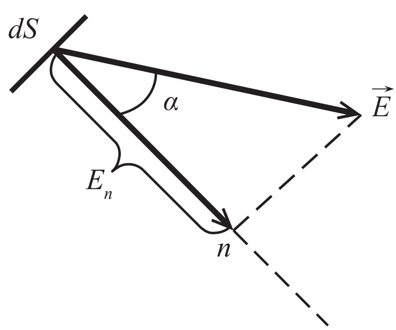
10.9-njy surat. Aýry-aýry položitel we otrisatel zarýadlaryň güýç çyzyklary

Şeýlelikde, güýç çyzyklarynyň toplumy $\vec{E}$ wektoryň ugrunyň we ululygynyň giňişlikdäki üýtgemegini bilmeklige, elektrik meýdanynyň gurluşyny häsiýetlendirmäge mümkinçilik berýär.

Eger güýç çyzyklarynyň gürlügi 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 güýjenmesiniň hem ululygyny görkezer ýaly, çyzyklarynyň sany 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 $d\vec{S}\vec{n} = d\vec{S}_n$ – 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:

$$\Phi_E = \oint_S E_n dS, \qquad (10.15)$$

(bu ýerde $E_n = E\cos\alpha$).

Bu ýerde S integral ýapyk üst boýunça alynýar.

§ 10.6. Ostrogradskiniň − Gaussyň teoremasy

Elektrik zarýadlar sistemasynyň döreden meýdanlarynyň güýjenmesini superpozisiýa prinsipiniň kömegi bilen kesgitleýärler. Emma şu maksat üçin nemes alymy K. Gaussyň (I777–I855) 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 üstdäki 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:

$$\Phi_E = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{q}{\varepsilon r^2} \cdot 4\pi r^2 = \frac{q}{\varepsilon\varepsilon_0}$$

ýa-da Gauss sistemasynda:

$$\Phi_E = \frac{4\pi}{\varepsilon} q. \qquad (10.16)$$

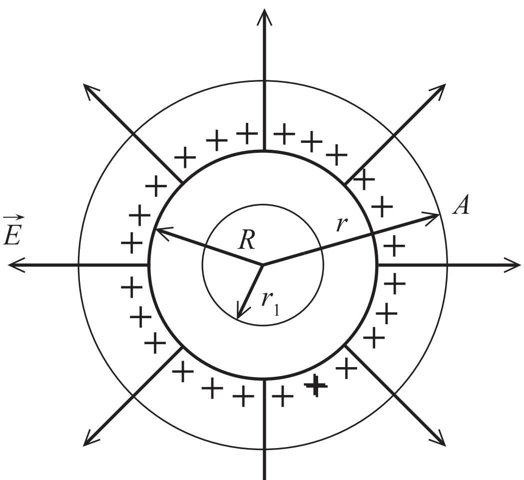
Şeýlelikde, her bir nokatlanç zarýaddan $q/\varepsilon\varepsilon_0$ deň bolan güýjenme wektorynyň akymy çykýar. Şu ýagdaýy umumylaşdyryp, umumy ýagdaý üçin Ostrogradskiý – Gaussyň teoremasy çykarylýar: islendik formaly ýapyk üstdäki güýjenme wektorynyň doly akymy bu üstüň içinde ýerleşen elektrik zarýadlaryň algebraik jeminiň onuň absolýut dielektrik syzyjylygyna bölünmegine san taýdan deňdir. Ýagny:

$$\Phi_E = \frac{1}{\varepsilon\varepsilon_0}\sum_{i=1}^{n} q_i, \tag{10.17}$$

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 gönüçyzyk, 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.

1. Birdeň zarýadlanan sferik üstüň döredýän elektrostatik meýdanynyň güýjenmesini kesgitläliň.



10.11-nji surat. *R* radiusly sferik üstüň elektrik meýdany

Goý, R radiusly sferik üstde q zarýadlar birdeň bölünen bolsun, ýagny sferanyň islendik nokadynda zarýadlaryň üst dykyzlygy birmeňzeş, sferik üstüň merkezinden r aralykda ýerleşen A nokady alalyň (*10.11-nji surat*).

Aňymyzda A nokadyň üstünden öňki zarýadlanan sfera simmetrik bolan täze S sferik üsti geçireliň. Eger $r > R$ bolanynda bizi gyzyklandyrýan meýdany döredýän zarýadlaryň ählisi sferik üstüň içinde galýar. Gaussyň teoremasy esasynda ýazýarys:

$$4\pi r^2 E = q/\varepsilon_0,$$

bu ýerden

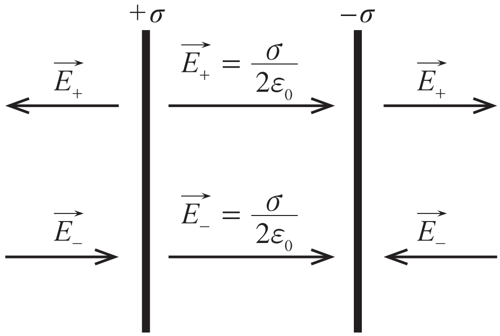
$$E = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{q}{r^2}, \quad (r \geq R). \qquad (10.18)$$

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 meýdanyny kesgitläliň.

Goý, tükeniksiz üstler üst dykyzlyklary $+\sigma$ we $-\sigma$ bolan zarýadlar bilen birdeň zarýadlanan bolsunlar (*10.12-nji surat*).

Şeýle tekizlikleriň döredýän meýdanyny superpozisiýa prinsipi boýunça tapmak bolar. Çyzgydan görnüşi ýaly, üstleriň elektrik meýdanlarynyň ugurlary üstlerden çepde we sagda özara garşylyklydyrlar.



10.12-nji surat. Iki özara parallel tükeniksiz üstleriň elektrik meýdany

Şonuň üçin bu ýerde $E = 0$. Üstleriň arasynda güýjenmeler ugurlary boýunça gabat gelýärler. $E = E_+ + E_-$ (E_+ we E_- Gaussyň teoremasyna görä, $E = \sigma / 2\varepsilon_0$ formula bilen kesgitlenýär). Diýmek, $E = \sigma / \varepsilon_0$. 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:

$$dA = Fdr \cdot \cos\alpha. \tag{10.19}$$

Bu ýerde α – F güýç bilen zarýadyň dr 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 taparys:

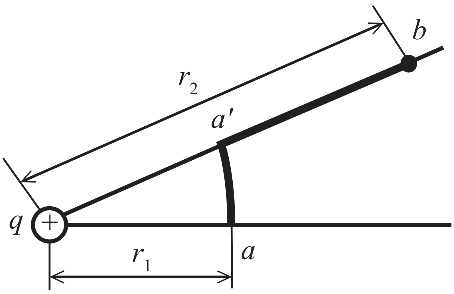
$$A = -\int_a^b Fdr\cos\alpha. \tag{10.20}$$

Bu ýerde $F = E \cdot q_s$, ýagny synag zarýadyna güýjenmesi E deň bolan meýdanyň her bir nokadynda täsir edýän Kulon güýji. Onda iş:

$$A = -\int_a^b Eq_s dr\cos\alpha. \tag{10.21}$$

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, ilkibaşda sarp eden energiýamyzdan uly energiýany «alardyk». Emma bu netije elektrostatikada energiýanyň saklanma kanunyna garşy gelýär. 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.



10.13-nji surat. q_s synag zarýady q zarýadyň meýdanynda süýşürilende işiň kesgitlenilişi

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-nji surat*).

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 işi şeýle görnüşde ýazyp bolar:

$$\int_a^b Eq_s dr = \frac{qq_s}{4\pi\varepsilon\varepsilon_0}\int_{r_1}^{r_2}\frac{dr}{r^2} = \frac{qq_s}{4\pi\varepsilon\varepsilon_0}\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}\right). \qquad (10.22)$$

Elektrostatiki meýdanda zarýadyň islendik çylşyrymly ýol bilen a nokatdan b nokada geçirilendigine garamazdan, ahyrynda şol bir netijä gelinýär:

$$A = -\int_a^b Eq_s dr. \qquad (10.23)$$

Ýagny edilen işiň ululygy zarýadyň süýşürilen 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 traýektoriýasyna bagly däldir, ol diňe bu nokatlaryň başlangyç we ahyrky ýagdaýlaryna baglydyr. Şonuň üçin iş şol zarýadyň potensial energiýasynyň kemelmegine deňdir, ýagny

$$A = -\Delta W = W_1 - W_2. \tag{10.24}$$

Eger elektrostatiki 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_s synag zarýadyny şol nokatdan A nokada geçirilen wagtyndaky ýerine ýetirilen işi $\varphi(a)\cdot q$ bilen, M nokatdan B nokada geçirilen wagtyndakysyny – $\varphi(b)\cdot q$ bilen belgiläp, (10.24) formulany şeýle görnüşinde ýazyp bolar:

$$A = -\int_a^b Eq_s dr = [\varphi(a) - \varphi(b)]\cdot q_s. \tag{10.25}$$

Şu halatda M nokadyň ýagdaýynyň hiç hili roly ýok. Işiň 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 ýerleşdirýärler. Tükeniksiz daşlaşdyrylan nokadyň potensialyny nola deň diýip kabul edýärler, ýagny $\varphi_\infty = 0$.

Elektrik meýdanynyň potensialy diýip, q_s položitel zarýady tükeniksizlikden giňişligiň berlen nokadyna geçirileninde onuň alýan potensial energiýasynyň şol zarýadyň ululygyna bolan gatnaşygyna deň bolan fiziki ululyga aýdylýar, ýagny

$$\varphi = \frac{W}{q_s}. \tag{10.26}$$

φ potensial skalýar ululykdyr, ol meýdanyň energetiki häsiýetnamasydyr: ol meýdanyň berlen nokadyndaky q_s zarýadyň potensial energiýasyny kesgitleýär.

(10.22) we (10.25) formulalardan q nokatlanç zarýadyň döreden meýdanynyň potensialy üçin şeýle aňlatmany alýarys:

$$\varphi = \frac{q}{4\pi\varepsilon\varepsilon_0 r}. \tag{10.27}$$

Haçanda meýdan erkin ýerleşen q_1, q_2, q_3, ..., q_n zarýadlaryň toplumy tarapyndan döredilen bolsa, onuň berlen nokatdaky potensialy her bir zarýadyň aýry-aýrylykda döreden φ_1, φ_2, φ_3, ... φ_n potensiallarynyň algebraik jemine deňdir.

$$\varphi = \sum_{i=1}^{n} \varphi_i. \tag{10.28}$$

Eger q_1, q_2, q_3, ..., q_n zarýadlary nokatlanç zarýadlar diýip kabul etsek, onda potensiallaryň jemi şu görnüşinde:

$$\varphi = \frac{1}{4\pi\varepsilon\varepsilon_0}\left(\frac{q_1}{r_1} + \frac{q_2}{r_2} + \frac{q_3}{r_3} + \ldots + \frac{q_n}{r_n}\right) \tag{10.29}$$

bolar. Bu ýerde r_1, r_2, r_3, ..., r_n – degişlilikde, q_1, q_2, q_3, ..., q_n zarýadlardan meýdanyň berlen nokadyna çenli aralyk.

Eger meýdan elektrik dipoly tarapyndan döredilen bolsa, dipolyň ortasyndan r aralykda ýerleşen, onuň haýsydyr bir nokadynyň potensialy şu formula arkaly kesgitlenilýär:

$$\varphi = \frac{p}{4\pi\varepsilon\varepsilon_0 r^2}\cos\alpha, \tag{10.30}$$

bu ýerde $p = q\ell$ – dipolyň elektrik momenti (ℓ – dipolyň egni), α – dipolyň $\vec{r}$ radius – wektory bilen ℓ – egniniň arasyndaky burç ($r >> \ell$).

Haçanda nokat dipolyň okunyň üstünde ýerleşende, $\alpha = 0$ we bu nokadyň potensialy şu görnüşinde ýazylýar:

$$\varphi = \frac{p}{4\pi\varepsilon\varepsilon_0 r^2}.$$

Dipolyň okuna onuň ortasyndan galdyrylan perpendikulýaryň üstünde ýatan ähli nokatlaryň potensialy nola deňdir ($\varphi = 0$), sebäbi $\alpha = 90°$.

Eger elektrostatiki meýdanda q' zarýad A nokatdan B nokada ornuny üýtgetse, onda elektrik güýçleriniň garşysyna iş edilýär, ýagny ((10.24) we (10.20) formulalara seret):

$$A_{1,2} = W_1 - W_2 = -q'(\varphi_1 - \varphi_2), \tag{10.31}$$

bu ýerde φ_1 we φ_2 meýdanynyň A we B nokatdaky potensiallary ýa-da

$$A_{2,1} = q'(\varphi_1 - \varphi_2). \tag{10.32}$$

Ýagny meýdanyň zarýad ornuny üýtgedende ýerine ýetirýän işiniň ululygy elektrostatiki meýdanda ornuny üýtgedýän q' zarýadyň ýoluň ahyrky φ_2 we başlangyç (φ_1) nokatlaryndaky potensiallar tapawudyna köpeldilmegine deňdir we ol ýoluň görnüşine bagly däldir.

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 perpendikulýardyrlar. 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. Elektrostatik meýdanyň güýjenmesi bilen potensiallaryň arasyndaky baglanyşyk

Elektrostatik meýdanyň güýjenmesi bilen potensiallarynyň tapawudynyň arasynda bellibir 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 üýtgedende 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 proýeksiýasy, ds – elementar orun üýtgetme. Şoňa 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 proýeksiýasy.

Ýokardaky iki deňlemäniň sag taraplaryny deňleşdirip, alarys:

$$E_x = -\frac{d\varphi}{dx}. \qquad (10.33)$$

Şuňa meňzeşlikde, güýjenme wektorynyň y we z koordinatlar okuna bolan proýeksiýalaryny-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 dl uzynlygy goýup ýazýarys:

$$E = -\frac{d\varphi}{dl}. \qquad (10.34)$$

Güýç çyzyklarynyň ugry boýunça potensialyň üýtgeýşiniň çaltlygyny häsiýetlendirýän $d\varphi / dl$ ululyga potensialyň gradiýenti diýilýär we $grad\varphi$ arkaly belgilenýär. Şonuň üçin 10.35-nji aňlatmany şeýle ýazmak bolar:

$$\vec{E} = -\,grad\varphi. \qquad (10.35)$$

Şeýlelikde, güýjenme wektory $\vec{E}$ potensial gradiýentine san taýdan deňdir, emma garşylykly tarapa (potensialyň kemelýän tarapyna) ugrukdyrylandyr.

Potensiallary hemişelik φ_1 we φ_2, aralyklary d bolan, iki sany tükeniksiz parallel, zarýadlanan plastinkalaryň arasyndaky elektrostatik meýdanyň güýjenmesini kesgitläliň. Plastinkalarda zarýadlar birdeň bölünen, plastinkalaryň arasyndaky elektrostatiki meýdan birhilli. Güýç çyzyklary plastinka perpendikulýar ekwipotensial üstler olara paralleldir. (10.35) formulany ulanyp ýazýarys:

$$E = \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{d} = \frac{U}{d}, \tag{10.36}$$

bu ýerde $\varphi_1 - \varphi_2 = U$ – plastinkalaryň aralygyndaky potensiallar tapawudy. Oňa naprýaženiýe hem diýilýär.

Potensiallar tapawudy ýa-da naprýaženiýe elektrostatik meýdanyň esasy häsiýetnamalarynyň biridir. Potensiallar tapawudy diýlende, iki nokadyň aralygyndaky potensiallaryň tapawudy göz öňünde tutulýar. Olaryň absolýut bahalaryna uly üns berilmeýär. Meýdanyň berlen nokadynyň potensialy diýleninde hem potensiallar tapawudy göz öňünde tutulýar. Bu ýerde meýdanyň berlen nokadynyň potensialy bilen meýdanyň beýleki bir ikinji nokadynyň potensialy diýmeklik, esasanam, şertleýin nol hasap edilýän nokadyň potensialy göz öňünde tutulýar. (Mysal üçin, ýeriň potensialyny nol diýip kabul edýärler).

(10.36) formula laýyklykda potensial we potensiallar tapawudy (U elektrik naprýaženiýesi) halkara ölçeg birlikler sistemasynda

$$1W = \frac{1J}{1Kl},$$

bolýar.

Eger 1 Kl zarýad iki nokadyň aralygynda ornuny üýtgedeninde 1 J 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 elektronlarynyň hereketi arkaly döredilýär.

Suwuklyklar we gazlar adaty şertlerde elektrik toguny 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 distillirlenen suw), gazlar degişlidir.

Ýokarda belleýşimiz ýaly, daşarky şertleriň üýtgemegi netijesinde (gyzdyrmak, radioaktiw şöhlelenme we ş.m.) dielektrikler geçirijä öwrülip bilerler. Dielektrikleriň elektrik meýdanynda ýerleşenlerinde ýagdaýlarynyň üýtgemegini olaryň molekulýar gurluşlary bilen düşündirmek bolar.

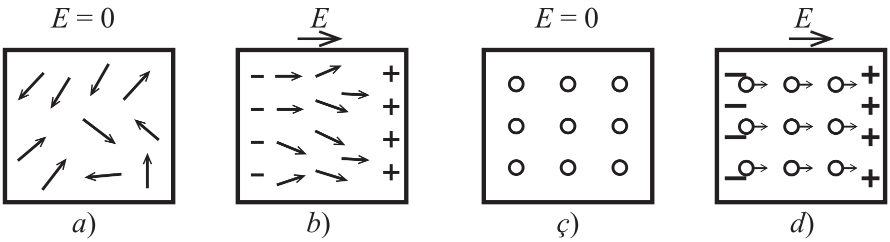
Dielektrikleri şertleýin üç topara bölmek bolar: 1) polýar molekulaly; 2) polýar däl molekulaly; 3) kristallik.

Birinji topara suw, fenol, nitrobenzol ýaly maddalar girýärler. Bu dielektrikleriň molekulalarynyň ýerleşişi simmetrik däl, olaryň požitel we otrisatel zarýadlarynyň «massa merkezleri» gabat gelmeýärler, hatda 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:

$$\sum_{i=1}^{n} p_i = 0.$$

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



10.14-nji surat. Polýar molekulaly dielektrige elektrik meýdanynyň täsiri

$$\sum_{i=1}^{n} p_i \neq 0.$$

Netijede, elektrik meýdanynda ýerleşdirilen dielektrigiň bir gapdaly otrisatel, bir gapdaly bolsa položitel zarýadlanýar diýmek, dielektrik polýarlanýar. Dielektrigiň polýarlanyş derejesi onuň häsiýetine we daşky elektrik meýdanynyň güýjenmesiniň ululygyna baglydyr.

Dielektrikleriň 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 zarýadlary şeýle ýerleşen, ýagny otrisatel we položitel zarýadlaryň «massa merkezleri» gabat gelýärler. Eger polýar däl molekulany elektrik meýdanynda ýerleşdirseň, dürli atly zarýadlar garşylykly taraplara süýşýärler we molekulanyň dipol momentini döredýärler. 10.14-nji suratda tegelejikler görnüşinde dielektrigiň şeýle molekulasynyň meýdan bolmadyk (*ç*) we bar wagtyndaky (*d*) ýagdaýy görkezilendir. Tegelejiklerdäki peýkamlar molekulalaryň dipol momentlerini aňladýarlar.

Dielektrikleriň üçünji toparyna – gözenegi položitel we otrisatel ionlardan ybarat bolan kristallik dielektrikler (mysal üçin, NaCl, KCl) degişlidir. Şeýle dielektrige biri položitel, ikinjisi otrisatel zarýadlanan iki gözenejigiň toplumy hökmünde çyzgyda görmek aýdyň bolar. Meýdan bolmadyk wagtynda gözenejikler simmetrik ýerleşendirler we şeýle dielektrigiň elektrik momentiniň jemi nola deňdir. Eger dielektrigi elektrik meýdanynda ýerleşdirseň, gözenejikler garşylykly tarapa süýşýärler we dielektrik elektrik momentini alýar.

Elektrik meýdanynda ýerleşdirilen dürli dielektriklerde bolup geçýän 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 dipolynyň elektrik momentiniň jemi hökmünde häsiýetlendirmek ($\sum_{i=1}^{n} p_i$) 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 göwrümine bolan gatnaşygyna deňdir:

$$\vec{p}_b = \sum_{i=1}^{n} \frac{\vec{p}_i}{V}.$$

Bu ýerde $\vec{p}_i$ – molekulalaryň dipol momentiniň wektory, n – dielektrigiň V göwrümdäki dipol molekulalaryň sany, $\vec{p}_b$ – polýarlanma 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 baglanyşyklydyrlar. Olary molekulalaryň üstünden aýryp bolmaz. Olar geçirijilerdäki erkin zarýadlar ýaly, maddanyň bütin göwrümi boýunça erkin süýşüp bilmeýärler. Şonuň üçin hem, olara baglanyşykly zarýadlar diýilýär.

Dielektrigiň içinde baglanyşykly 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 sredanyň elektrik häsiýetine baglydyr we dielektrige goýlan daşarky meýdanyň güýjenmesine proporsionaldyr:

$$E = E_0/\varepsilon.$$

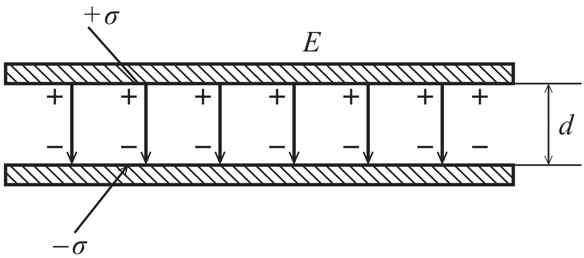
Sredanyň dielektrik syzyjylygy $\varepsilon = E_0/E$. Bu ululyk wakuumdaky meýdanyň güýjenmesiniň dielektrigiň içindäkä garanyňda näçe gezek ululygyny görkezýär. ε ölçeg birliksiz ululykdyr.

§ 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. Elektrostatik maşynyň kömegi bilen iki sany golaý duran geçirijileri zarýadlandyryp başlanymyzda olaryň biri $+(q)$ zarýady, beýlekisi $-(q)$ zarýady alýar. Iki geçirijiniň arasynda elektrik meýdany döreýär. Olaryň arasynda potensiallar tapawudy artyp başlaýar. Geçirijilerde toplanýan zarýadlaryň sanynyň köpeldigiçe, olaryň arasyndaky naprýaženiýe-de artýar we geçirijileriň arasynda uçgun döräp, olar zarýadsyzlanyp başlaýarlar.

Indi geçirijilerde zarýadyň toplanyşyna, onuň ululygynyň nämä baglydygyna seredeliň.

Goý, iki sany her haýsysynyň meýdany S bolan parallel ýerleşdirilen metal plastinalar berlen bolsun. Plastinalaryň aralygynda dielektrik syzyjylygy ε bolan dielektrik gatlagy ýerleşen. Ýokarky plastinada $+q$, aşakyda $-q$ zarýadlar toplanýar diýeliň. Olar plastin-



10.15-nji surat. Parallel plastinalaryň elektrik meýdany

kalaryň içki üstlerinde bir hilli bölünen. Zarýadlaryň üst dykyzlygy, degişlilikde, $\sigma_+ = \dfrac{q_+}{S}$ hem σ_- bolsun (*10.15-nji surat*).

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 (*10.15-nji sur. ser.*) aralygyndaky d uzaklygyň şeýle baglanyşygy bar:

$$U = E \cdot d.$$

Ikinji tarapdan, iki plastinkanyň arasyndaky meýdanyň güýjenmesi (öň belleýşimiz ýaly)

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon\varepsilon_0},$$

ululyga deň. Zarýadlaryň üst dykyzlygynyň $\sigma = q/S$ deňdigini hasaba almak bilen, ýazýarys:

$$U = E \cdot d = \frac{\sigma}{\varepsilon\varepsilon_0} d = \frac{d}{\varepsilon\varepsilon_0}\frac{q}{S} \tag{10.37}$$

ýa-da

$$U = \frac{q}{\varepsilon\varepsilon_0 S/d}.$$

Eger $\varepsilon\varepsilon_0\, S/d$ gatnaşygy C bilen bellesek, onda

$$U = \frac{q}{C} \tag{10.38}$$

ýa-da

$$q = CU,$$

bolar. (10.38) formuladan görnüşi ýaly, plastinkalaryň arasyndaky U naprýaženiýe q zarýada 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:

$$C = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 S}{d}. \qquad (10.39)$$

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-a deň bolan tükeniksiz gurşawda ýerleşen R radiusly ýekelikde ýerleşen metallik sferanyň elektrik sygymy:

$$C = \frac{q}{\varphi_1 - \varphi_2} = 4\pi\varepsilon\varepsilon_0 R. \qquad (10.40)$$

Bu ýerde ikinji tekizlige (obkladka) tükeniksiz radiusly sfera hökmünde seretmek bolar. Onda $\varphi_2 = \varphi_\infty = 0$

ýa-da $$\varphi_1 = q/(4\varepsilon\varepsilon_O R).$$

Halkara ölçeg birlikler sistemasynda sygymyň birligi deregine Kl/W kabul edilendir. Bu birlige Farad diýilýär.

Farad diýip, 1 Kl zarýad berleninde potensialy 1 W 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 ululyk, şonuň üçin, onuň ülüşlerinden peýdalanýarlar: mikrofarad (mkF), millifarad (mF), nanofarad (nF) we pikofarad (pF): 1 $mkF = 10^{-6}$ F, 1 $mF = 10^{-3}$, 1 $nF = 10^{-9}$ F, 1 $pF = 10^{-12}$ F we ş.m.

§ 10.12. Kondensatorlar

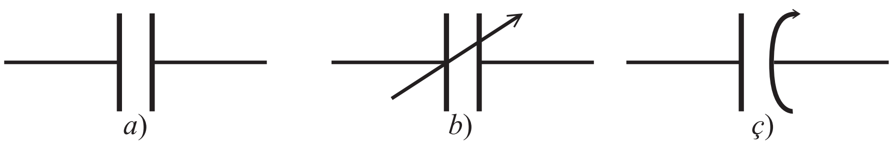
Geçen paragrafyň materiallaryndan görnüşine görä, geçirijiniň sygymynyň uly bolmagy üçin onuň ölçegleri hem uly bolmaly. Bu bolsa käbir kynçylyklary döredýär. Şonuň üçin, ölçegleri uly bolmadyk, emma özünde uly zarýadlary toplap bilýän, uly sygymly gurluşlar gerek bolýar. Bu gurluşlara kondensatorlar diýilýär. Kondensatoryň iň 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 (*10.15-nji 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 dürli görnüşleri 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 10.16-njy suratda görkezilendir.

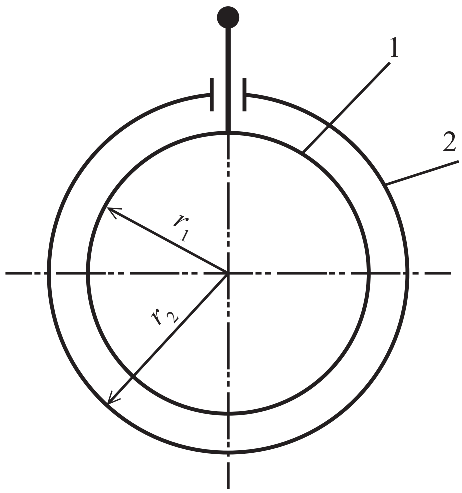
Bu ýerde *a* – hemişelik sygymly kondensator, *b* – üýtgeýän, *ç* – ýarym üýtgeýän sygymly kondensatorlardyr. Kondensatorlar ra-



10.16-njy surat. Kondensatorlaryň çyzgylarda belgilenişleri diokabuledijilerde, telewizorlarda, tehnikanyň dürli pudaklarynda-da giňden ulanylýarlar.

Käbir kondensatorlaryň gurluşy we olaryň sygymlarynyň kesgitlenilişi barada durup geçeliň:

a. Sferik (şar) kondensatory. Sferik kondensatory radiuslary, degişlilikde, r_1 we r_2 bolan özara konsentrik merkezleri bir bolan sferalardyr (*10.17-nji surat*).



10.17-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 obkladkalarynyň döreden meýdanlary biri-birlerini kompensirleýärler. Obkladkalaryň aralygyndaky meýdany diňe birinji zarýadlanan sfera dörедýär. (10.27) formula laýyklykda kondensatoryň obkladkalarynyň arasyndaky potensiallar tapawudy:

$$\varphi_1 - \varphi_2 = \frac{q}{4\pi\varepsilon\varepsilon_0}\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}\right).$$

Şeýlelikde, sferiki kondensatoryň elektrik sygymy

$$C = \frac{q}{\varphi_1 - \varphi_2} = \frac{q}{\frac{q}{4\pi\varepsilon\varepsilon_0}\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}\right)} = \frac{4\pi\varepsilon\varepsilon_0 r_1 r_2}{r_2 - r_1}. \qquad (10.41)$$

(10.41) formuladan görnüşi ýaly, sferik kondensatoryň sygymy obkladkalaryň arasyndaky gurşawyň dielektrik syzyjylygyna göni proporsionaldyr.

b. Slindrik kondensator. Ol uzynlyklary l we radiuslary r_1 hem r_2 bolan biri-biriniň içinde ýerleşen iki sany umumy okuň daşynda ýerleşdirilen (koaksial) slindrlerden ybaratdyr.

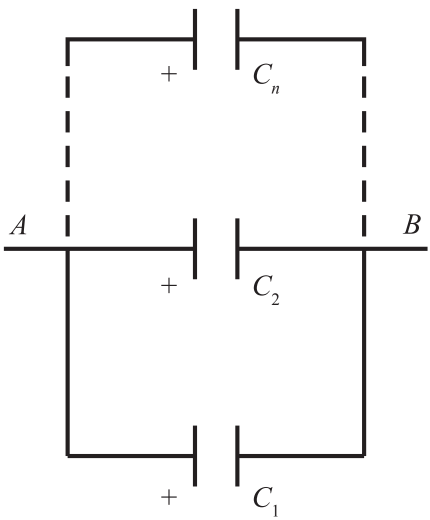
Zarýadlanan slindriň okundan r_1 we r_2 aralykda ýerleşen iki sany nokadyň aralygyndaky potensiallar tapawudy:

$$\varphi_1 - \varphi_2 = \int_{r_1}^{r_2} Edr = \int_{r_1}^{r_2} \frac{\tau}{2\pi\varepsilon\varepsilon_0}\frac{dr}{r} = \frac{\tau}{2\pi\varepsilon\varepsilon_0}\ln\frac{r_2}{r_1}, \qquad (10.42)$$

bu ýerde $\tau = \dfrac{q}{l}$ – zarýadlanan slindriň çyzyk dykyzlygy l – obkladkalaryň uzynlygy.

(10.42) formuladan potensiallar tapawudynyň bahasyny ornuna goýup, alarys:

$$C = \frac{q}{\varphi_1 - \varphi_2} = \frac{q}{\dfrac{q}{2\pi\varepsilon\varepsilon_0 l}\ln\dfrac{r_2}{r_1}} = \frac{2\pi\varepsilon\varepsilon_0 l}{\ln\dfrac{r_2}{r_1}}. \qquad (10.43)$$



10.18-nji surat. Kondensatorlaryň parallel birikdirilişi

Kondensatorlaryň birikdirilişi. Gerek elektrik sygymy almak üçin kondensatorlar özara parallel we yzygiderli birikdirilýärler.

1. Kondensatorlaryň parallel birikdirilişi (*10.18-nji surat*). Kondensatorlar parallel birikdirilende *A* we *B* nokatlaryň potensiallary 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:

$$q = q_1 + q_2 + \ldots + q_n. \qquad (10.44)$$

Her bir kondensator üçin şeýle ýazýarys:

$$q_1 = C_1\Delta\varphi,\ q_2 = C_2\Delta\varphi,\ q_n = C_n\Delta\varphi. \qquad (10.45)$$

(10.44) we (10.45) formulalaryň esasynda alýarys:

$$C_{AB}\Delta\varphi_{AB} = \Delta\varphi(C_1 + C_2 + C_3 + \ldots + C_n) = \Delta\varphi_{AB}\sum_{i=1}^{n} C_i,$$

bu ýerden

$$C_{AB} = \sum_{i=1}^{n} C_i. \tag{10.46}$$

Diýmek, kondensatorlar parallel birikdirilende alnan batareýanyň C_{AB} umumy sygymy bu batareýa girýän kondensatorlaryň aýry-aýrylykda alnan sygymlarynyň jemine deňdir.

Şeýlelikde, birnäçe kondensatorlary parallel birikdirip, örän uly elektrik sygymyny alyp bolýar.

2. Kondensatorlaryň yzygiderli birikdirilişi (*10.19-njy surat*).

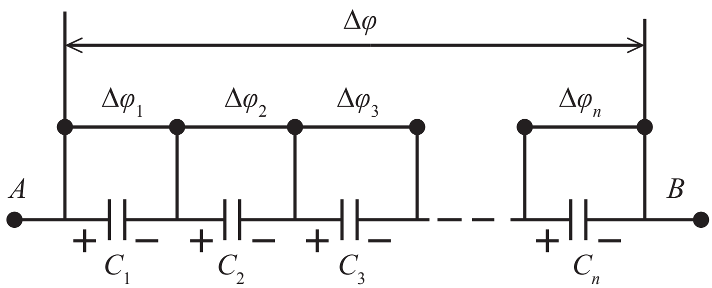
Kondensatorlar yzygiderli birikdirilende, eger-de birinji kondensatoryň obkladkasyna q zarýad berilse, täsiriň netijesinde kondensatorlaryň ähli obkladkalarynda hem şeýle zarýad bolýar. Ýöne her bir kondensatorlaryň obkladkalary garşylykly zarýadlanýar. Şeýlelikde $q_1 = q_2 = q_3 = \ldots = q_n$ diýip ýazyp bolýar.

Umumy potensiallaryň tapawudy bolsa, her bir kondensatoryň obkladkalarynyň arasyndaky potensiallaryň tapawutlarynyň jemine deňdir:

$$\Delta\varphi_{AB} = \Delta\varphi_1 + \Delta\varphi_2 + \Delta\varphi_3 \ldots + \Delta\varphi_n.$$

Elektrik sygymynyň kesgitlemesine görä:

$$C = \frac{q}{\Delta\varphi}, \quad \text{bu ýerden} \quad \Delta\varphi = \frac{q}{C},$$



10.19-njy surat. Kondensatorlaryň yzygiderli birikdirilişi 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 $$\frac{1}{C_{AB}} = \sum_{i=1}^{n}\frac{1}{C_i}. \tag{10.46a}$$

Diýmek, birnäçe kondensator yzygiderli birikdirilende olaryň umumy sygymynyň ters ululygy bu birleşmä girýän her bir kondensatoryň sygymlarynyň ters ululyklarynyň jemine deňdir.

§ 10.13. Elektrostatiki meýdanyň energiýasy. Energiýanyň dykyzlygy

Eger ýekelikde ýerleşdirilen geçirijiniň q zarýady bar bolsa, onuň töwereginde elektrostatiki meýdany döreýär. Goý, geçirijiniň üstüniň potensialy φ bolsun. Indi, geçirijiniň zarýadyny dq ululyk ulaldalyň. dq zarýady tükeniksizlikden meýdanyň berlen nokadyna geçirmek üçin dA bolan işi ýerine ýetirmeli, ýagny:

$$dA = dq\,(\varphi - \varphi_\infty).$$

Emma berlen geçirijiniň elektrostatik meýdanynyň potensialy tükeniksizlikde nola deňdir ($\varphi_\infty = 0$), onda

$$dA = \varphi dq = \frac{q}{C}dq, \tag{10.47}$$

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:

$$dW = dA = \frac{q}{C}dq. \tag{10.48}$$

(10.48) formulany integrirläp, zarýadlanan geçirijiniň zarýadynyň 0-dan q çenli artanyndaky elektrostatiki meýdanyň potensial energiýasyny tapýarys:

$$W = \int_0^q \frac{1}{C} q dq = \frac{q^2}{2C}. \tag{10.49}$$

$\varphi = \frac{q}{C}$ gatnaşygy göz öňünde tutup, meýdanyň potensial energiýasyny şeýle formulalaryň üsti bilen aňlatmak bolar:

$$W = \frac{1}{2}\frac{q^2}{C}; \quad W = \frac{1}{2}C\varphi^2; \quad W = \frac{1}{2}q\varphi, \tag{10.50}$$

bu ýerde q – geçirijiniň zarýady, C – onuň sygymy.

Eger elektrostatiki meýdan birnäçe q_i nokatlanç zarýadlar sistemasy tarapyndan döredilen bolsa, onda onuň energiýasy:

$$W = \frac{1}{2}\sum_{i=1}^{n} q_i \varphi_i, \tag{10.51}$$

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:

$$W = \frac{1}{2}\frac{q^2}{C}; \quad W = \frac{1}{2}CU^2; \quad W = \frac{1}{2}Uq.$$

Bu formulalary kondensatorlaryň obkladkalary nähili formada bolsalar-da, ulanyp bolýar.

Elektrostatik meýdanyň energiýasynyň göwrüm dykyzlygy elementiň göwrüminde toplanan elektrostatiki meýdanyň potensial energiýasynyň bu göwrümiň ululygyna bölünmegine san taýdan deňdir:

$$W_p = \frac{W}{V}. \tag{10.52}$$

Bu ýerde energiýanyň göwrüm dykyzlygynyň birligi (1 J/m^3).

Mysal üçin, tekiz kondensatoryň energiýasynyň göwrüm dykyzlygyny kesgitläliň. 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 öňünde tutup, ýazýarys:

$$W_P = \frac{1}{2}\frac{\varepsilon\varepsilon_0 SU^2}{d^2 S} = \frac{1}{2}\varepsilon\varepsilon_0 E^2 \qquad (10.53)$$

ýa-da

$$W_P = \frac{1}{2}ED = \frac{1}{2}\frac{D^2}{\varepsilon\varepsilon_0}, \qquad (10.54)$$

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 zarýadynyň bir tarapa tertipli hereketine elektrik togy diýilýär. Metallarda erkin orunlaryny üýtgedýän zarýadly bolejikler elektronlardyr. Şonuň üçin metallardaky elektrik togy elektronlaryň ugrukdyrylan hereketidir.

Suwuklyklardaky elektrik togy elektronlaryň, položitel we otrisatel ionlaryň, gazlardaky bolsa, ionlaryň hereketidir. Toguň ugry deregine položitel zarýadlanan bölejikleriň hereketiniň ugry kabul edilen. Emma bu ugur metallardaky elektrik togunyň hakyky ugry bilen gabat gelmeýär.

Geçirijiniň kese kesiginden wagt birliginde akyp geçýän elektrik mukdaryna san taýdan deň bolan fiziki ululyga toguň güýji diýilýär. Ýagny:

$$I = \frac{dq}{dt}. \qquad (11.1)$$

Eger islendik deň wagt aralygynda geçirijiniň islendik kese kesiginden şol bir mukdardaky elektrik zarýady geçýän bolsa, hem-de olaryň hereketleriniň ugurlary üýtgemeýän bolsa, şeýle toga hemişelik tok diýilýär, onda:

$$I = \frac{q}{t}.$$

Halkara birlikler sistemasynda tok güýjüniň birligi esasy birlikdir, oňa amper diýilýär we ol birlik iki sany parallel tokly geçirijileriň özaratäsirinden kesgitlenilýär (Biz oňa toklaryň magnit täsirini öwrenenimizde seretjekdiris). (11.1) formuladaky zarýad birligi

$$[q] = [I]\,[t] = A \cdot s = Kl.$$

Tok güýjüniň geçirijiniň kese kesiginiň meýdanyna bolan gatnaşygyna toguň dykyzlygy diýilýär, ol şeýle formula bilen kesgitlenýär:

$$j = \frac{dI}{dS}.$$

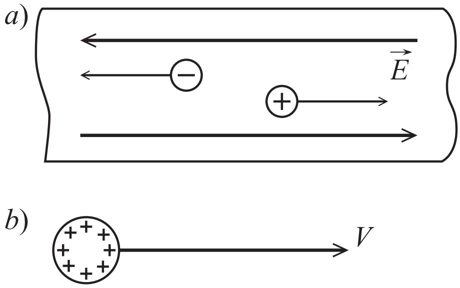
Eger tok hemişelik bolsa, onda toguň dykyzlygy hem üýtgemeýär, ýagny

$$j = \frac{I}{S} = \frac{q}{S \cdot t}, \qquad \vec{j} = en\vec{\upsilon}.$$

Toguň dykyzlygy wektor ululykdyr we ol položitel zarýadlaryň tizliginiň ugry boýunça ugrukdyrylyp, wagt birliginde meýdan birliginden akyp geçýän elektrik zarýadlarynyň mukdaryna san taýdan deňdir. HU birlikler sistemasynda toguň dykyzlygy A/m^2 ölçenilýär.

Elektrik togunyň görnüşleri:

a) eger geçirijide daşky elektrik meýdanyny döretsek we ony saklasak, onda geçirijiniň içinde zarýadlanan ummasyz bölejikler herekete geler (*11.1-nji surat*). Položitel zarýadlar meýdanyň ugruna tarap otrisatel zarýadlar bolsa, meýdanyň garşysyna (*11.1-nji a surat*) tertipli hereket ederler, ýagny geçirijide elektrik togy dörär.



11.1-nji surat. Elektrik meýdany döredilen geçirijilerde zarýadlaryň hereketleriniň ugurlary

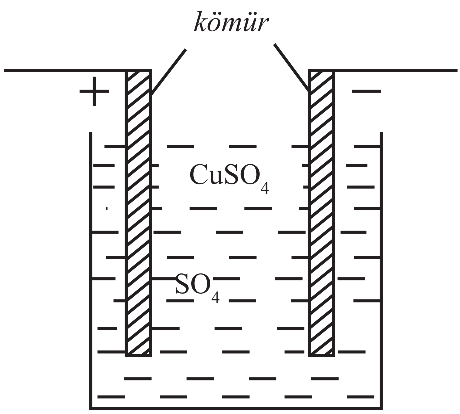
Şeýle toga geçiriji tok diýilýär. Geçiriji togy döretmek üçin, ýapyk elektrik zynjyry we tok çeşmesi gerek.

b) goý, zarýadlanan makroskopik jisim (*11.1-nji b surat*) giňişlikde ornuny üýtgetsin. Şar bilen bilelikde onuň içindäki ähli zarýadlanan bölejikler-de orunlaryny üýtgedýärler we olaryň tertipleşdirilen (ugrukdyrylan) hereketi döreýär, elektrik togy ýüze çykýar. Şeýle toga konweksiýa togy diýilýär.

ç) eger zarýadlanan bölejikler daşky elektrik meýdanynyň täsiri astynda wakuumda hereket edýän bolsalar şeýle toga wakuumdaky tok diýilýär.

Elektrik togunyň täsirleri. Elektronlaryň we ionlaryň hereketini biz gözümiz 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 täsiri.** 1820-nji ýylda Kopengagenli professor Ersted geçirijiden tok akanda, onuň golaýynda ýerleşdirilen magnit diljagazyna täsir edýändigini açdy. Sebäbi, tokly geçirijiniň töwereginde magnit meýdany döreýär. Ol hem bellibir güýç bilen magnit diljagazyna täsir edýär. Toguň magnit täsiri häzirki wagtda magnitelektrik enjamlarynyň kömegi bilen tok güýjüni ölçemekde ulanylýar.



11.2-nji surat. Toguň himiki täsiri

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 ergininiň 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 ol suwa galtaşanda, toguň barlygyna bagly bolmazdan, reaksiýa girýär:

$$2SO_4 + 2H_2O = 2H_2SO_4 + O_2.$$

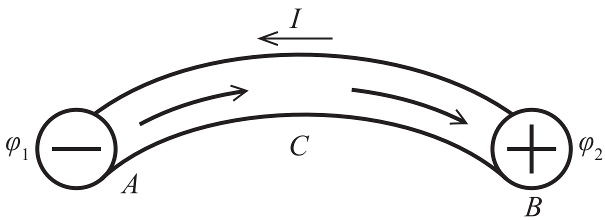
Erginde kükürt kislotasy emele gelýär, kömür sterženinde bolsa gaz görnüşinde kislorod bölünýär.

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 prinsipi 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, potensiallary φ_1 we φ_2-ä deň bolan garşylykly zarýadlanan iki sany A, B şarlar berlen bolsun (*11.3-nji surat*).

Eger-de şarlary geçiriji arkaly birleşdirsek, onda elektrik meýdanynyň täsiri astynda elektronlar ACB ugur boýunça orunlaryny üýtgedýärler, ýagny geçirijide BCA ugra baka elektrik togy döreýär we



11.3-nji surat. Elektrik togunyň döreýşi onuň ugry geçirijiniň içinde dörän elektrik meýdanynyň güýjenmesiniň ugry bilen gabat gelýär.

Elektrik togunyň geçmegi bilen t wagtdan soň A we B şarlaryň potensiallarynyň tapawudy we geçirijiniň içindäki elektrik meýdanynyň güýjenmesi nola deň bolýar, tok kesilýär. Şeýlelikde, elektrik 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 zarýadlary ýene-de A şara geçirmek gerek. Emma B-den A şara zarýadlar elektrik güýçleriniň täsiri astynda geçip bilmeýärler. Toguň döremeginiň hökmany şerti A we B şarlaryň arasynda potensiallaryň 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 potensiallar tapawudyny saklamakdan başga-da, elektrik zynjyryny utgaşdyryp, ikinji meseläni-de çözýär. Ýapyk zynjyr boýunça zarýadlaryň dyngysyz hereketini döredýär.

Tok çeşmesiniň iki polýusy (uçlary) bardyr: ýokary potensiallypoložitel we aşak potensially – otrisatel. Daşky zynjyr açyk bolan wagtynda onuň otrisatel polýusynda elektronlar agdyklyk edýärler, položitel polýusynda bolsa ýetmezçilik edýärler. Tok çesmesinde zarýadlaryň bölünmesi daşary güýçleriň kömegi bilen bolup geçýär. Zynjyr utgaşdyrylanda tutuş zynjyrda elektrik meýdany döreýär. Çeşmäniň içinde zarýadlar daşary güýçleriň täsiri astynda Kulon güýçleriniň garşysyna (otrisatel zarýadlar – plýusdan minusa tarap) hereket edýärler, galan ähli zynjyrda bolsa olary elektrik meýdany herekete getirýär. (Zarýadlanan bölejiklere elektrostatik häsiýetli – Kulon güýçlerinden başga täsir edýän güýçleriň ählisine daşary güýçler diýilýär).

Daşary güýçler tebigaty boýunça mehaniki, himiki, ýylylyk, biologiki we ş.m. hadysalar bilen bagly bolup, dürli-dürlüdirler. Mysal üçin, galwaniki elementlerde we akkumulýatorlarda zarýadlaryň bölünmegi himiki reaksiýanyň, hemişelik toguň generatorlarynda elektromagnit induksiýa hadysasynyň esasynda bolup geçýär.

Geçirijiden we tok çeşmesinden ybarat bolan zynjyry utgaşdyranymyzda, ondan tok geçýär. Şeýlelikde, daşary 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:

$$A_d = A_{t.r} + A_g. \tag{11.3}$$

Nokatlanç położitel zarýad ähli zynjyryň boýuna tok çeşmesini hem öz içine alyp, ornuny üýtgedenindäki daşary güýçleriň ýerine ýetirýän işiniň bu zarýadyň ululygyna bolan gatnaşygyna tok çeşmesiniň elektrik hereketlendiriji güýji (*EHG*) diýilýär:

$$\varepsilon = \frac{A_d}{q} = \frac{A_{t.r} + A_g}{q}. \tag{11.4}$$

Kesgitleme boýunça, ε elektrik meýdanynyň garşysyna ýerine ýetirilen iş şeýle aňladylýar:

$$A_{t.r} = q\,(\varphi_1 - \varphi_2).$$

Eger tok çeşmesiniň polýusy açyk bolsa, $A_g = 0$, onda (11.4) formuladan alarys:

$$\varepsilon = \varphi_1 - \varphi_2. \tag{11.5}$$

Ýagny daşky zynjyr açyk bolan wagtyndaky çeşmäniň *EHG* onuň polýuslaryndaky potensiallaryň tapawudyna deňdir.

§ 11.2. Omuň kanuny. Geçirijileriň garşylygy

Geçirijiniň uçlarynda potensiallaryň tapawudy döredilende onuň içinde elektrik meýdany döreýär. Zarýadlaryň ugrukdyrylan hereketi – elektrik togy döreýär. Olar potensialy ýokary polýusdan, pes polýusa tarap hereket edýärler. Geçirijiniň ahyrlaryndaky potensiallaryň tapawudyny tok çeşmesi daşary güýçleriň täsiri astynda üpjün edýär.

Diýmek, geçirijiden akyp geçýän tok güýjüniň ululygy bilen, onuň uçlaryndaky potensiallar tapawudynyň, ýagny naprýaženiýäniň arasynda baglanyşyk bardyr. Bu baglanyşygy görnükli 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 naprýaźeniýä göni proporsionaldyr:

$$I = \frac{U}{R}, \tag{11.6}$$

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 naprýaźeniýe 1 *W* bolanda ondan ululygy 1 *A* deň bolan hemişelik tok akyp geçen wagtyndaky garşylygydyr.

$$\gamma = 1/R$$

ululyga geçirijiniň elektrik geçirijiligi diýilýär. Geçirijiligiň birligi – Simensdir (*Sm*). 1 *Sm* – elektrik zynjyrynyň garşylygy 1 *Om* bolan zynjyr böleginiň geçirijiligidir.

Geçirijiniň garşylygy onuň ölçeglerine, formasyna hem-de onuň taýýarlanylan materialyna baglydyr. Silindr görnüşindäki geçirijiniň R garşylygy onuň uzynlygyna göni proporsionaldyr we kese kesiginiň S meýdanyna ters proporsionaldyr:

$$R = \rho\frac{l}{S}. \tag{11.7}$$

Bu ýerde ρ – geçirijiniň materialyny häsiýetlendirýän proporsionallyk koeffisiýentidir. Oňa udel elektrik garşylygy diýilýär. Udel elektrik garşylygynyň birligi – *Om · metr* (*Om · m*). Iň kiçi udel elektrik garşylykly materiallara kümüş (ρ = 1,6 · 10^{-8} *Om · m*) we mis (ρ = 1,7 · 10^{-8} *Om · m*) girýär. Praktikada elektrik geçirijileri hökmünde mis simleri bilen bir hatarda, udel garşylygynyň mise görä uludygyna garamazdan (ρ = 2,6 · 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:

$$\frac{I}{S} = \frac{1}{\rho}\frac{U}{l}, \tag{11.8}$$

bu ýerde udel garşylyga ters bolan ululyga $\gamma = \dfrac{1}{\rho}$ geçirijiniň udel elektrik geçirijiligi diýilýär. Onuň birligi – metrde Simens (Sm/m). Geçirijidäki elektrik meýdanynyň güýjenmesiniň $U/l = E$ deňdigini we toguň dykyzlygynyň $j = \dfrac{I}{S}$ deňdigini hasaba alyp, (11.8) formulany (Omuň kanunynyň differensial görnüşini) şeýle ýazmak bolar:

$$j = \gamma E. \tag{11.9}$$

Her bir nokatda elektrik zarýadlary $\vec{E}$ wektoryň ugruna hereket edýärler we $\vec{j}$, $\vec{E}$ wektorlar ugurlary boýunça gabat gelýärler. Şonuň üçin soňky formulany şeýle görnüşe getirýäris:

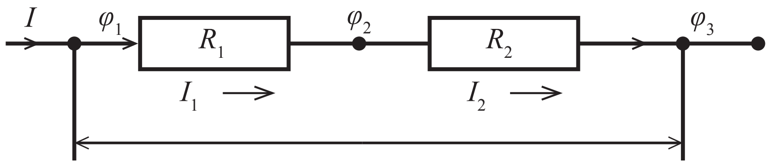
$$\vec{j} = \gamma\vec{E}. \tag{11.10}$$

(11.10) formula Omuň kanunynyň differensial görnüşinde ýazylyşydyr. Bu formula geçirijiniň içindäki islendik nokatda toguň dykyzlygyny, şol nokatdaky elektrik meýdanynyň güýjenmesi bilen baglanyşdyrýar. Bu baglanyşyk üýtgeýän meýdanlar üçin hem ulanylyp bilner.

§ 11.3. Geçirijileriň yzygider 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 yzygider birikdirilýärler.

a) goý, iki geçiriji yzygider 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 naprýaźeniýäniň peselmesi $U_1 = \varphi_1 - \varphi_2$ we ikinjidäki $U_2 = \varphi_2 - \varphi_3$.



11.4-nji surat. Geçirijileriň yzygider 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 naprýaźeniýäniň peselmesi

$$U_1 = I_1R_1 = IR_1.$$

R_2 garşylykdaky

$$U_2 = I_2R_2 = IR_2.$$

Soňky iki deňligi goşup, alarys:

$$U_1 + U_2 = IR_1 + IR_2 = I(R_1 + R_2).$$

Emma $U_1 + U_2 = \varphi_1 - \varphi_3 = U$, şeýlelikde,

$$U = I(R_1 + R_2).$$

n sany yzygider birleşdirilen geçirijilerden ybarat bolan zynjyryň umumy naprýaženiýesi

$$U = I(R_1 + R_2 + \dots R_n)$$

ýa-da garşylygy

$$R = R_1 + R_2 + \dots + R_n. \qquad (11.11)$$

(11.11) formuladan görnüşi ýaly, geçirijiler yzygider 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 naprýaźeniýäniň 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 güýji:

$$I = I_1 + I_2,$$

ýa-da

$$I = I_1 + I_2 = \frac{U}{R_1} + \frac{U}{R_2} = U\left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}\right).$$

Elektrik zynjyrynyň ähli böleklerindäki toguň ululygyny şeýle ýazýarys:

$$I = \frac{U}{R},$$

bu ýerde R – parallel birleşdirilen geçirijileriň umumy garşylygy. Onda:

$$\frac{U}{R} = U\left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}\right).$$

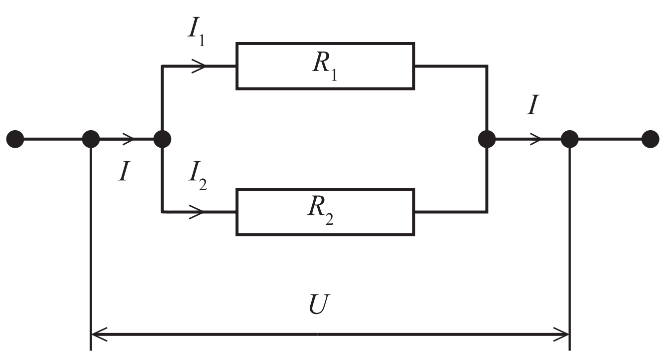
Şu ýerden:

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}.$$

Şular ýaly n sany geçirijiler parallel birikdirilenlerinde

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots \frac{1}{R_n}, \qquad (11.12)$$

ýagny parallel birikdirilen geçirijileriň umumy geçirijiligi olaryň aýry-aýrylykda alnan geçirijilikleriniň jemine deňdir.



11.5-nji surat. Geçirijileriň parallel birikdirilişi

§ 11.4. Kirhgofyň kanunlary

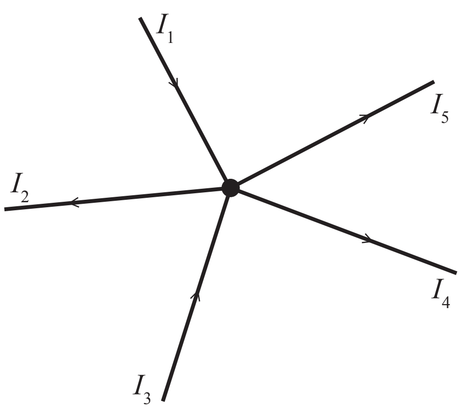
Praktikada has çylşyrymly (şahalanan) elektrik zynjyrlaryna köp gabat gelinýär. Olardaky toguň güýjüni, naprýaženiýäni we garşylygy kesgitlemeklik bellibir kynçylyklary döredýär. Emma, elektrik zynjyryndaky bu ululyklary kesgitlemek üçin görnükli nemes fizigi G. Kirhgofyň (1824–1887) hemişelik toguň esasy kanunlaryna daýanýan 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 düwnüne gelýän toklar položitel, düwünden çykýan toklar bolsa otrisatel hasap edilýär.

Kirhgofyň birinji kanuny: elektrik zynjyrynyň düwnünde kesişýän toklaryň algebraik jemi nola deňdir:

$$\sum_{i=1}^{n} I_i = 0. \tag{11.13}$$



11.6-njy surat. Düwündäki toklaryň şekillendirilişi

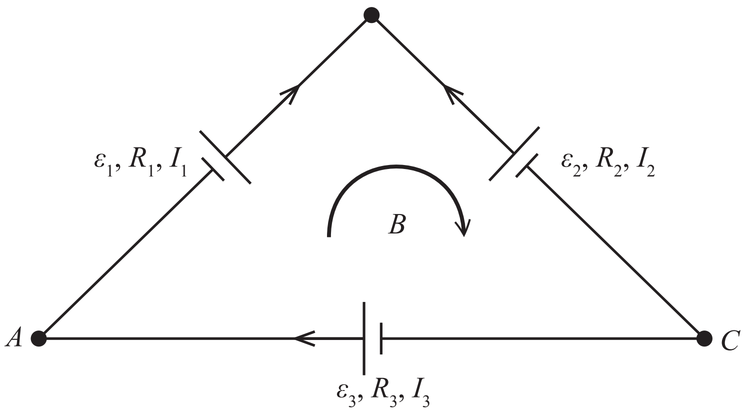
Mysal üçin, 11.6-njy suratdaky toklar üçin Kirhgofyň birinji kanuny şeýle ýazylýar:

$$I_1 - I_2 + I_3 - I_4 - I_5 = 0$$

ýa-da

$$I_1 + I_3 = I_2 + I_4 + I_5.$$

Kirhgofyň birinji kanuny elektrik zarýadynyň saklanma kanunyndan gelip çykýar. Dogrudan-da, şol kanuna görä, geçirijiniň hiç bir nokadynda zarýadlaryň toplanmagy we



11.7-nji surat. Ýapyk elektrik zynjyry (kontur)

ýok bolmagy bolmaly däldir. Ýagny wagt birliginde zynjyryň düwünine gelýän we ondan çykýan elektrik zarýadlarynyň mukdary biri-birine deňdir.

Kirhgofyň ikinji kanuny Omuň kanunynyň çylşyrymly elektrik zynjyrlary üçin umumylaşdyrylmagyndan alnyp, ol energiýanyň saklanma kanunyna esaslanandyr. Üç bölekden düzlen kontura (ýapyk zynjyra) seredeliň (*11.7-nji surat*).

Elektrik zynjyryny derňemek üçin ilki bilen konturda aýlanma ugruny kesgitleýäris, onda islendik bir ugry (sagat diliniň ugry boýunça bolsun, ýa-da tersine, tapawudy ýok) položitel ugur hökmünde kabul edýäris.

Goý, biziň seredýän konturymyzda aýlanma ugry sagat diliniň ugruna bolsun. Haýsy toklar ugurlary boýunça konturda aýlanma ugry bilen gabat gelseler, $I_i R_i$ köpeltmek hasyly položitel alamaty bilen, eger-de tersine bolsalar, otrisatel alamaty bilen alynýarlar. Tok çeşmesiniň elektrik hereketlendiriji güýji haçanda 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:

$$\begin{cases} I_1R_1 = \varphi_A - \varphi_B + \varepsilon_1 \\ -I_2R_2 = \varphi_B - \varphi_C + \varepsilon_2 \\ I_3R_3 = \varphi_C - \varphi_A + \varepsilon_3. \end{cases}$$

Deňlemeleri agzama-agza goşup, alarys:

$$I_1R_1 - I_2R_2 + I_3R_3 = \varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3 \tag{11.14}$$

(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 ε_K elektrik hereketlendiriji güýjüniň algebraik jemine deňdir:

$$\sum_{i=1}^{n} I_iR_i = \sum_{k=1}^{m} \varepsilon_K. \tag{11.15}$$

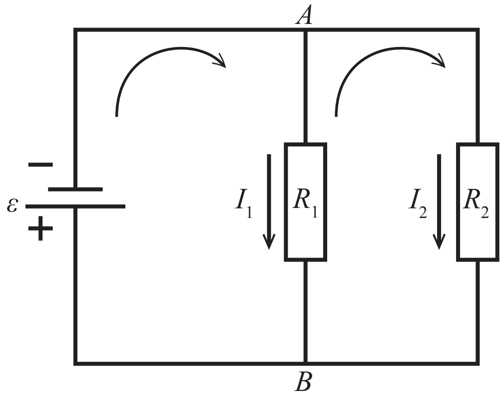
Hemişelik toguň çylşyrymly (şahalanan) elektrik zynjyrlary Kirhgofyň kanunlary ulanylyp hasaplanylanda, şu aşakdaky düzgünleri göz önünde tutmaly:

1. Berlen zynjyryň her bir şahasynda toguň ugruny anyklamaly. Dogry, meseläni çözmezden öň toguň ugruny görkezmek kyn. Emma häzirki ýagdaýda berlen zynjyrda toguň ugruny islendikçe görkezäýmeli. Mesele çözülenden 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 zyn-



11.8-nji surat. Şahalanan elektrik zynjyry

jyryň m düwni bar bolsa, onda $(m – 1)$ ýagny düwünleriň sanyndan bir deňleme az bolan biri-birine bagly bolmadyk deňlemeler sistemasyny, ikinji kanuny boýunça – (eger-de zynjyrda 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:

Konturlarda aýlanma ugruny sagat diliniň ugruna diýip hasap edýäris. Şahalardaky toguň položitel ugruny shemada strelka arkaly görkezýäris. Berlen elektrik zynjyrynyň iki sany düwni (A we B) bar. Diýmek, Kirhgofyň birinji kanuny boýunça $m – 1$, ýagny $(2 – 1)$ diňe bir deňleme ýazyp bolýar. Geliň, A düwün üçin ýazalyň:

$$I - I_1 - I_2 = 0. \qquad (11.16)$$

Zynjyrda AR_1B, AR_2B we $B\varepsilon A$ 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 hasap edip, 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:

$$I_2R_2 - I_1R_1 = 0 \qquad (11.17)$$

we $\varepsilon AR_1 B\varepsilon$ kontur üçin:

$$I \cdot r + IR_1 = -\varepsilon, \tag{11.18}$$

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 $dq = Idt$ zarýad geçýär diýeliň. Elektrik meýdanynyň täsiri astynda q zarýad ornuny üýtgedenindäki toguň işi şeýle kesgitlenilýär:

$$dA = qU = IUdt. \tag{11.19}$$

R garşylykly geçiriji üçin onda Omuň kanunyndan peýdalanyp, ýazýarys:

$$dA = I^2 Rdt = \frac{U^2}{R}dt. \tag{11.20}$$

(11.19) we (11.20) formulalardan toguň kuwwatyny tapýarys, ýagny:

$$P = \frac{dA}{dt} = UI = I^2 R = U^2/R. \tag{11.21}$$

(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 Wattlarda ölçenilýär. Önümçilikde toguň işi sistemadan daşary birliklerde hem ölçenilýär: Watt-sagat ($Wt \cdot sag$) we kilowatt-sagat ($kwt \cdot sag$): 1 $Wt \cdot sag$ – kuwwaty 1 Wt bolanda 1 sagadyň dowamyndaky toguň işi, 1 $Wt \cdot sag$ = = 3600 $Wt \cdot s = 3{,}6 \cdot 10^3$ J; 1 $kwt \cdot sag = 10^3$ $Wt \cdot sag = 3{,}6 \cdot 10^6$ J.

Eger tok gyzdyrmak üçin niýetlenen metal geçirijilerden geçýän bolsa, toguň ähli edýän işi ony gyzdyrmaga gidýär we energiýanyň saklanma kanuny esasynda ýazýarys:

$$dQ = dA. \qquad (11.22)$$

Şeýlelikde (11.19), (11.20) we (11.22) formulalary ulanyp, alarys:

$$dQ = IUdt = I^2Rdt = \frac{U^2}{R}dt. \qquad (11.23)$$

(11.23) formulany tejribe üsti bilen 1841-nji ýylda görnükli iňlis fizigi Joulyň we ondan bihabar 1842-nji ýylda rus fizigi E. H. Lensiň açandygy üçin, oňa Joulyň-Lensiň kanuny diýilýär.

§ 11.6. Metallarda elektron geçirijiligiň tejribede subut edilişi

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 zarýadlaryň 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 ýylda iňlis fizigi D. Tomson (1856–1940) tarapyndan açylan elektronlar arkaly bolaýmasyn diýen netijä gelinýär.

Bu pikiri subut etmek üçin bölejigiň alamatyny we udel zarýadynyň ululygyny (bölejigiň zarýadynyň 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 inersiýalary boýunça öňe süýşerler. Zarýadlaryň öňe süýşmeleriniň netijesinde-de toguň impulsy döremeli. Toguň ugry boýunça zarýadly bölejigiň alamatyny, onuň ölçeglerini we geçirijiniň garşylygyny kesgitläp bolsa, bölejigiň udel zarýadyny kesgitlemek mümkin. Bu ideýany durmuşa geçirmeklik 1913-nji ýylda rus fizikleri S. L. Mandelştama (1879–1944) we N. D. Papaleksä (1880–1947) başartdy. Bu tejribäni 1916-njy ýylda amerikan fizigi R. Tolmen (1881–1948) we ondan öň Şotlandiýaly B. Stýuart 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 atomlaryň golaýlaşmaklary netijesinde) her bir atomyň ýadrosy bilen gowşak baglanyşygy bolan walentli elektronlar metalyň atomyndan aýrylyp (bölünip), «erkin» elektronlara öwrülýärler we ähli göwrüm 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 (hyýaly) 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 kesgitläp bolar:

$$\langle \upsilon \rangle = \sqrt{8kT/\pi m_e},$$

ol otag (293 K) 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 gelýär, ýagny elektrik togy döreýär. Elektronlaryň şeýle ugrukdyrylan hereketiniň orta tizligini, toguň dykyzlygynyň üsti bilen aňladylan $j = ne\,\langle v\rangle$ formula bilen kesgitlemek bolar.

§ 11.7. Metallaryň elektrik geçirijiliginiň klassyki elektron teoriýasynyň esaslary

1. Omuň kanunynyň düşündirilişi. Metallaryň käbir häsiýetlerini olarda bar bolan elektronlaryň hereketi bilen düşündirmeklige elektron teoriýa diýilýär. Bu teoriýany Lorens, Tomson we Drude hödürlediler. Goý, metal geçirijide güýjenmesi $E = const$ bolan elektrik meýdany döredilen bolsun. q zarýada 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:

$$v_{\max} = qE\,\langle t\rangle / m, \tag{11.24}$$

bu ýerde $\langle t\rangle$ – elektronyň gözenegiň položitel iony bilen iki yzygiderli çaknyşmasynyň arasyndaky ortaça wagty, q – elektronyň zarýady, m – onuň massasy.

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, elektronyň ugrukdyrylan hereketiniň ortaça tizligi

$$\langle v\rangle = (v_{\max} + 0)/2 = qE\,\langle t\rangle/(2\,m).$$

Metallaryň nusgawy nazaryýeti elektronlaryň tizlikleri boýunça bölünişini göz öňünde tutmaýar, şonuň üçin erkin ylgawynyň $\langle t\rangle$ ortaça wagty onuň erkin ylgawynyň ortaça uzynlygy $\langle l\rangle$ bilen we geçirijiniň kristallik gözenegine göra elektronlaryň hereketiniň orta tizligi bilen kesgitlenilýär. Ol $\langle u \rangle$ + $\langle \upsilon \rangle$ deňdir. ($\langle u \rangle$ – elektronlaryň ýylylyk hereketiniň ortaça tizligi).

§11.6-da görkezilişi ýaly, $\langle \upsilon \rangle << \langle u \rangle$ şonuň üçin:

$$\langle t \rangle = \langle l \rangle / \langle u \rangle. \tag{11.25}$$

$\langle t \rangle$-niň bahasyny (11.26) formulada ornuna goýup, alarys:

$$\langle \upsilon \rangle = qE \langle l \rangle \,/\, (2\, m \langle u \rangle). \tag{11.26}$$

Metal geçirijide toguň dykyzlygy

$$j = nq\langle \upsilon \rangle = \frac{nq^2 \langle l \rangle E}{2m\langle u \rangle} = \gamma E. \tag{11.27}$$

Şu ýerden görnüşi ýaly, toguň dykyzlygy meýdanyň güýjenmesine proporsionaldyr. Bu formulany Omuň kanunynyň differensial görnüşi (11.10) formula bilen deňeşdirip alarys:

$$\gamma = \frac{nq^2 \langle l \rangle}{2m\langle u \rangle}.$$

Erkin elektronlaryň konsentrasiýasy hem-de olaryň erkin ylgawynyň uzynlygy näçe uly bolsa, materialyň udel geçirijiligi-de şonça uly bolýar.

2. Joulyň-Lensiň kanunynyň düşündirilişi. Elektron özüniň erkin ylgawynyň ahyrynda elektrik meýdanynyň täsir etmegi netijesinde şeýle goşmaça kinetik energiýany alýar:

$$\langle E_k \rangle = \frac{m\upsilon_{\max}^2}{2} = \frac{q^2 \langle l \rangle^2 E^2}{2m\langle u \rangle^2}. \tag{11.28}$$

1. Tertipli hereketdäki elektron kristal gözenegiň düwnündäki ionlar bilen çakyşyp, özüniň energiýasyny gözenege berýär we metalyň içki energiýasyny artdyrýar, metal gyzýar.

Wagt birliginde elektronyň gözenegiň düwünleri bilen bolup geçýän çaknyşmalarynyň ortaça sanyny $\langle z \rangle$ diýip bellesek, onda:

$$\langle z \rangle = \langle u \rangle / \langle l \rangle. \tag{11.29}$$

Eger elektronlaryň konsentrasiýasy n bolsa, onda wagt birliginde $n\langle z\rangle$ çaknyşma bolýar we gözenege

$$W = n\langle z\rangle \langle E_k\rangle, \tag{11.30}$$

energiýa berilýär. Bu energiýa bolsa geçirijini gyzdyrmaga sarp edilýär. (11.28) we (11.29) formulalardaky $\langle E_k\rangle$-nyň hem-de $\langle z\rangle$-iň bahalaryny (11.30) formulada ornuna goýup, alarys:

$$W = \frac{nq^2\langle l\rangle E^2}{2m\langle u\rangle}, \tag{11.31}$$

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 kanunynyň düşündirilişi. 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 göra, ýylylyk geçirijilik koeffisiýentiniň (λ) udel elektrik geçirijilik koeffisiýentine (γ) bolan gatnaşygy şol bir temperaturalarda hemme metallar üçin birmeňzeşdir we absolýut temperatura göni proporsionaldyr. Ýagny:

$$\lambda/\gamma = 3\frac{k^2}{q^2}T = \beta T,$$

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 bölünişini hasaba alyp, $\beta = 2\,(k/q)^2$ aňlatmany aldy. Bu bolsa teoriýa bilen tejribe arkaly β-niň alnan bahalarynyň tapawudynyň artmagyna getirdi.

Şeýlelikde, metallaryň klassyki nazaryýeti Omuň we Joulyň-Lensiň kanunlaryny düşündirýär, Widemanyň-Fransyň kanunyna hil taýdan seljerme berýär. Emma ony düýpli düşündirip bilmeýär. Ondan başga-da, klassyki elektron nazaryýetiň 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 bellibir paýlanyşyga boýun egýärler. Lorens bu paýlanyşygyň ýerine Maxwell-Bolsmanyň paýlanyşygyny ulanýar. Emma ugrukdyrylan elektronlar hereket edip başlanlarynda, ýylylyk hereketine elektrik meýdany tarapyndan döredilen hereket hem goşulýar. Şeýlelikde, elektronlaryň tizlikleriniň bölünişi Makswelliň we Bolsmanyň kanunlaryna boýun egmeýär.

Şeýlelikde, metallarda elektronlaryň hereketini kanagatlandyrýan mukdar taýdan düşündirýän nazaryýeti klassyki mehanikanyň kanunlary esasynda gurmaklygyň mümkin däldigi ýüze çykdy. Metallardaky elektronlaryň hereketini Nýutonyň klassyki mehanikasynyň kanunlary esasynda beýan etmek bolmaz. Mysal üçin, metalda elektronlaryň ýylylyk hereketiniň orta kinetik energiýasyny otag temperaturasynda $m \langle \upsilon \rangle\ 2/2 = 3\ kT/2$ formula bilen kesgitleseň, onda $10^5 - 10^6\ K$ temperatura alnar. Bu bolsa mümkin däldir. Metallaryň klassyki elektron nazaryýetinde bolan kemçilikleri düzetmek elektrik geçirijiliginiň kwant nazaryýetine başartdy.

Kwant nazaryýeti şu aşakdakylara esaslanýar:

1. Metallaryň düzümindäki elektronlaryň hemmesi erkin bolman, diňe walentli elektronlar erkin elektron gazyny döredýärler.
2. Kwant nazaryýeti boýunça elektronlaryň hereketi klassyki mehanikanyň kanunlaryna boýun bolmaýar. Elektronyň impulsynyň we energiýasynyň bahalary üznüksiz sanlar bilen

aňladylman, diskret (kesgitli, çäkli 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 üýtgeýşini-de gowy düşündirip bolýar.

Elektron nazaryýeti boýunça elektronlaryň ugrukdyrylan 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. Haçanda temperatura nol gradus Kelwinden üýtgeşik bolanda 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, $\gamma \sim \frac{1}{T}$ bolup çykýar, bu bolsa tejribe bilen gabat gelýär.

§ 11.8. Metallaryň garşylygynyň temperatura baglylygy. Aşageçirijilik

Temperaturanyň ýokarlanmagy bilen metal geçirijileriň garşylygynyň artýandygyny tejribeler görkezýär. Eger metal geçirijileriň temperaturasyny 1 °C artdyrsak, onda Omuň udel garşylygynyň otnositel üýtgemegini:

$$\frac{\rho - \rho_o}{\rho_o} = \alpha t \qquad (11.32)$$

görnüşde aňladyp bolar.

Bu ýerde ρ_o – geçirijiniň 0 °C-däki udel garşylygy α – $1/273\,K^{-1}$ ululyga golaý bolan hemişelik koeffisiýent. Ýokarky formulany başgarak görnüşinde ýazýarys:

$$\rho = \rho_o(1 + \alpha t), \qquad (11.33)$$

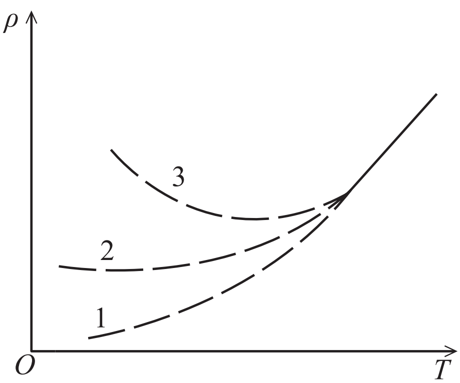
bu ýerde t – geçirijiniň temperaturasy. Metallaryň elektron nazaryýetine görä, ideal (hyýaly) kristallik gözenekde elektronlar hiç hili elektrik garşylygyna duçar bolmazdan hereket edýärler, ýagny $\rho = o$. Metallarda elektrik garşylygynyň ýüze çykmagynyň esasy sebäbi olarda başga garyndylaryň bolmagy, 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 Matisseniň 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 belleýşimiz ýaly, ideal metalyň udel garşylygy haçan $T \to 0$, 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 bellibir 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 $10^4 – 10^5$ ge-



11.9-njy surat. Ideal metalyň udel garşylygynyň temperatura baglylygy zek azalandygy kesgitlenildi. Emma $\rho(T) = 0$ almaklyk başartmaýar. Sebäbi daşary 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.

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 4,2 K (–269 °C) temperaturada azalyp, ölçäp bolunmajak ululyga ýetdi. Kamerling-Onnes bu hadysa ýagny, geçirijiniň udel garşylygyň nola öwrülmek 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 halynda 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 tablisada käbir maddalaryň aşageçirijilik halyna geçýän T_K temperaturalary görkezilendir.

tablisa

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

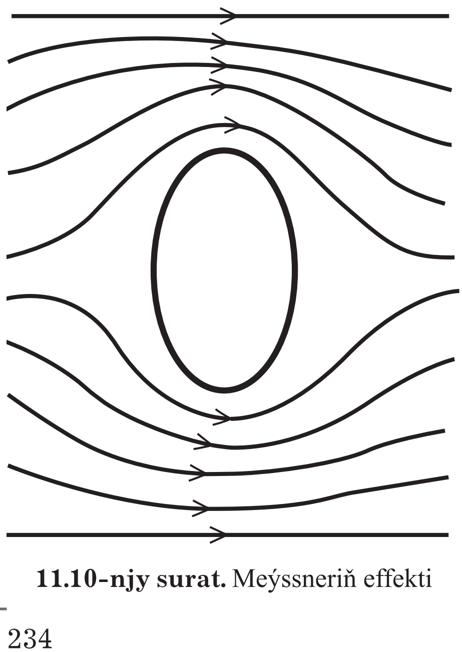
Maddalar aşageçirijilik halynda täsin häsiýetlere eýe bolýar. Birinjiden, aşageçirijide döredilen elektrik togy köp wagtlap tok çeşmesiz dowam edýär. Sebäbi, hiç bir garşylyk bolmasa toguň peselýän wagty gaty uly bolup, onlarça gije-gündize dowam edýär. Aşageçirijiligiň häsiýetlerini öwrenmek üçin geçirilen dürli tejribeleriň esasynda şeýle netijelere gelindi:

a) metallar aşageçirijilik ýagdaýyna geçenlerinde onuň kristallik gözeneginiň gurluşy, mehaniki we optiki häsiýetleri üýtgemeýär.

b) olaryň elektrik häsiýetleriniň birden üýtgemegi bilen bilelikde magnit we ýylylyk häsiýetleri-de hil taýdan üýtgeýär. Magnit meýdany bolmadyk wagtynda aşageçirijilik ýagdaýa geçmeklik ýylylyk sygymynyň birden üýtgemegi bilen bolup geçýär. Eger magnit meýdany bar bolsa, aşageçirijilik ýagdaýyna geçeninde maddanyň ýylylyk geçirijiligi we ýylylyk sygymy birden üýtgeýär.

ç) 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 gysylyp 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 gyzdyrylan we ionlaşan gazyň çüwdürimleriniň mehaniki energiýalaryny elektrik energiýasyna öwürýän elementar bölejikleriň tizlendirijilerinde, magnitogidrodinamiki elektrik öndürijilerde (MGD-generatorlarynda) peýdalanylýar.

Metallar örän pes temperaturalarda aşageçirijilik ýagdaýyna geçýärler. Eger aşageçiriji materialyny otag temperaturasynda ýa-da ondan-da ýokary temperaturalarda alyp bolsady, onda möhüm tehniki meseleleriň biri – sim boýunça energiýany uzak aralyga ýitgisiz geçirmek meselesi çözülerdi.

§ 11.9. Termoelektron emissiýasy we onuň ulanylyşy

Metallar gyzdyrylanynda 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 köpsanly (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 artykmaçlyk edýär, ýagny metalyň üsti položitel zarýadlanýar (sebäbi, onuň üstünden uçup çykan elektronlaryň sany köp) we olar üstüň golaýynda gaýmalaşyp uçup ýören elektronlar bilen özaratäsirleşýärler. Kulonyň dartyşma 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 uçup çykmaklary üçin olar bellibir işi ýerine ýetirmeli bolýarlar. Bu işiň iň kiçi ululygyna çykyş işi diýilýär. Çykyş işini A harpy bilen bellesek, onda:

$$A = e\varphi,$$

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.

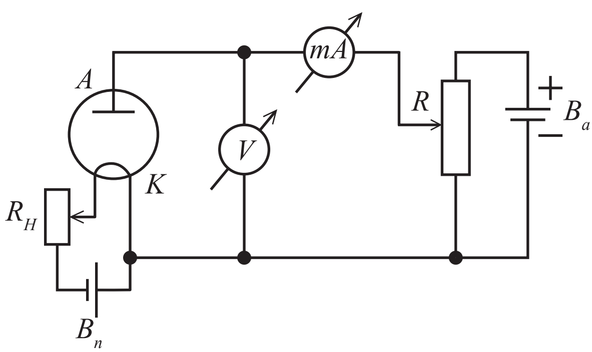
Islendik temperaturada birnäçe elektronlar metalyň üstüni taşlap gitmek üçin gerek bolan energiýa eýedirler. Olar metalyň üstünden uçup çykýarlar we özleriniň kinetik energiýalarynyň azalmagynyň hasabyna çykyş işini edýärler, ýagny:

$$e\varphi = \frac{m\upsilon_1^2}{2} - \frac{m\upsilon_2^2}{2},$$

bu ýerde m, e – degişlilikde, elektronyň massasy we zarýady, υ_1 we υ_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 termo-elektron emissiýasyndan başga-da, fotoelektron, ikinji elektron, aw-toelektron emissiýalary ýaly dürli görnüşleri bar.

Fotoelektron emissiýasynyň kanunlaryny ýönekeý iki elektrod-ly çyranyň – diodyň kömegi bilen öwrenip bolýar. Ol iki sany – A anoddan we K – katoddan ybarat elektrodlary bolan, howasy sordurylyp çykarylan aýna gapdan ybaratdyr. Katod hökmünde ereme temperaturasy örän ýokary bolan metaldan (wolframdan) taýýarlanylýan



11.11-nji surat. Iki elektrodly çyranyň (diodyň) häsiýetnamasynyň kesgitlenilişi sapajyk ulanylyp, ol elektrik togy bilen gyzdyrylýar. Anod, köplenç, metal silindri görnüşinde taýýarlanylýar. Eger diod elektrik zynjyryna, 11.11-nji suratda görkezilişi ýaly birleşdirilse, katod gyzdyrylan wagtynda we anoda, katoda görä položitel naprýaženiýe berleninde, diodyň anod zynjyrynda tok döreýär.

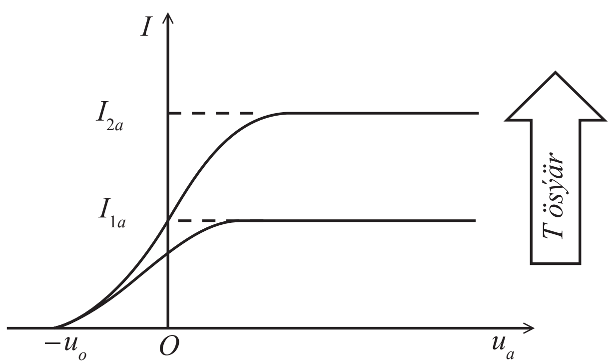
Eger tok çeşmesiniň (B_a) polýuslaryny (anoda «minus», katoda «plýus») çalşyrsaň, katodyň nähili gyzdyrylandygyna garamazdan, tok döremeýär. Bu bolsa katodyň otrisatel bölejikleri – elektronlary goýberýänligi bilen düşündirilýär.

Eger gyzdyrylýan katodyň temperaturasyny hemişelik saklap, I_a anod togunyň U_a anod naprýaženiýesine baglylygyny – wolt-amper häsiýetnamasyny seljerseň (*11.12-nji surat*), onuň çyzykly üýtgemeýänligine göz ýetirýärsiň, ýagny wakuum diody üçin Omuň kanuny ýerine ýetirilmeýär. Termoelektron togunyň anod naprýaženiýesine baglylygy naprýaženiýäniň 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 – elektrodlaryň ölçeglerine we görnüşlerine hem-de olaryň özara ýerleşişlerine bagly bolan koeffisiýent.

Anod naprýaženiýesiniň artdyrylmagy bilen anod togy bellibir iň uly baha çenli artýar. I_{max} – toga doýgun tok diýilýär. Beýle ýagdaý



11.12-nji surat. Diodyň wolt-amper häsiýetnamasy katoddan uçup çykýan ähli elektronlaryň anoda baryp ýetip, naprýaženiýäniň soňky artdyrylmasynyň termoelektron togunyň artmagyna getirmeýändigini aňladýar. Şeýlelikde, doýgun toguň dykyzlygy katodyň materialynyň emission (elektron goýberiş) ukyplylygyny häsiýetlendirýär.

Doýgun toguň ululygy kwant statistikasyna esaslanyp, Riçardsonyň – Dýoşmeniň teoretiki formulasy boýunça kesgitlenýär:

$$I_{max} = CST^2 \, e^{-A/(kT)},$$

bu ýerde S – katodyň meýdany, k – Bolsmanyň hemişeligi, A – elektronlaryň katoddan çykyş işi. T – katodyň termodinamiki temperaturasy, C – ähli metallar üçin üýtgemeýän emissiýa hemişeligi ($C = A_0 = 1{,}2 \cdot 10^6 \; A/(m^2 K^2)$). 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 woltamper häsiýetnamasy getirilen ($T_2 > T_1$). Temperaturanyň artmagy bilen katoddan uçup çykýan elektronlaryň intensiwliligi artýar, şunuň bilen birlikde şu temperatura üçin doýgun tok-da artýar. Suratdan görnüşi ýaly, (*11.12-nji surat*), haçanda 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 bilýändiklerini aňladýar.

Termoelektron emissiýa hadysasy elektron wakuum çyralarynda, rentgen trubkalarynda, elektron mikroskoplarynda we başga-da, köpsanly wakuum enjamlarynda ulanylýar.

§ 11.10. Kontakt potensiallaryň tapawudy. Woltanyň kanunlary

Eger iki sany dürli metal biri-biri bilen jebis galtaşdyrylsa, onda olaryň aralygynda potensiallar tapawudy ýüze çykýar, oňa hem kontaktdaky potensiallar 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 potensiallar tapawudy galtaşýan metallaryň diňe himiki düzümine we temperaturasyna baglydyr.
2. Birdeň temperaturaly yzygiderli birikdirilen birnäçe metal geçirijilerden düzülen, açyk zynjyryň ahyrlarynda döreýän potensiallar tapawudy aralykdaky geçirijilere bagly däldir, ol gös-göni çetki geçirijiler birleşdirilende döreýän potensiallar tapawudyna deňdir.

Bu kanunlary metallaryň klassyki elektron nazaryýetiniň esasynda düşündirip bolýar.

1. Goý, çykyş işi A_1 we A_2-ä 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 potensiallar tapawudy döreýär, ýagny:

$$U_1 = \frac{A_1 - A_2}{e}, \tag{11.34}$$

bu ýerde A_1 we A_2 – degişlilikde, 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 – degişlilikde, birinji we ikinji metallaryň konsentrasiýalary biri-birine deň däl bolsun: $n_1 > n_2$. Şu şertde metallar biri-biri bilen kontakta getirilende birinji metaldan ikinji metala tarap elektronlar geçip başlaýarlar, netijede, ol položitel, ikinji bol-

sa otrisatel zarýadlanýar, metallaryň arasynda potensiallar tapawudy döreýär we nazary hasaplamalara görä, ol

$$U_2 = \frac{kT}{e}\ln\frac{n_1}{n_2}. \tag{11.35}$$

Bu ýerde k – Bolsmanyň hemişeligi, e – elektronyň zarýady.

Iki sebäbe görä, dörän jemleýji potensiallar tapawudy birinji we ikinji sebäpleriň döreden potensiallar tapawudynyň jemine deňdir, ýagny:

$$U = U_1 + U_2 = \frac{A_2 - A_1}{e} + \frac{kT}{e}\ln\frac{n_1}{n_2}. \tag{11.36}$$

Bu formula Woltanyň birinji kanunynyň matematiki aňlatmasydyr. Formuladan görnüşi ýaly, kontaktdaky potensiallar tapawudy galtaşýan geçirijileriň diňe temperaturasyna we himiki düzümine baglydyr.

Woltanyň ikinji kanunyny subut etmek üçin bir temperaturada ýerleşen üç sany dürli geçirijileriň kontaktynda ýagdaýyna seredeliň (*11.13-nji surat*).

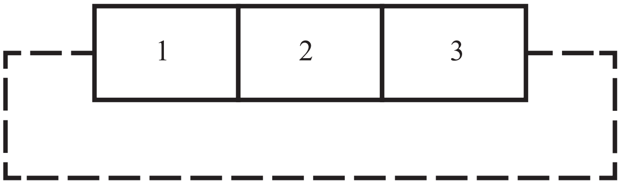
Açyk zynjyryň uçlarynyň arasyndaky potensiallar tapawudy onuň içindäki kontaktlardaky potensiallar tapawudynyň algebraik jemine deňdir, ýagny:

$$\varphi_1 - \varphi_3 = (\varphi_1 - \varphi_2) + (\varphi_2 - \varphi_3).$$

(11.36) formulany ulanyp alýarys:

$$\varphi_1 - \varphi_3 = U = -\frac{A_1 - A_3}{e} + \frac{kT}{e}\ln\frac{n_1}{n_3}, \tag{11.37}$$

hakykatdan-da $\varphi_1 - \varphi_3$ aralykdaky geçirijiniň tebigatyna bagly däl.



11.13-nji surat. Kontaktda potensiallaryň tapawudynyň ýüze çykyşy

Eger sereden metallarymyzdan ýapyk zynjyry düzsek (*11.13-nji surat, punktir çyzygy*), onda oňa goýlan elektrik hereketlendiriji güýji bu ýapyk zynjyrdaky potensiallaryň algebraik jemine deňdir:

$$\varepsilon = (\varphi_1 - \varphi_2) + (\varphi_2 - \varphi_3) + (\varphi_3 - \varphi_1).$$

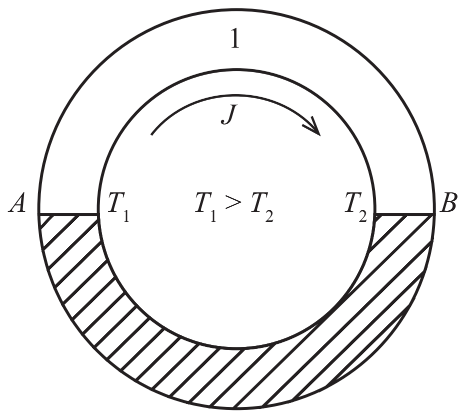
(11.37) formulany ulanyp, alarys:

$$\varepsilon = \frac{A_1 - A_2}{e} + \frac{kT}{e}\ln\frac{n_1}{n_2} - \frac{A_2 - A_3}{e} + \frac{kT}{e}\ln\frac{n_2}{n_1} - \frac{A_3 - A_1}{e} + \frac{kT}{e}\ln\frac{n_3}{n_1} = 0. \qquad (11.38)$$

Şeýlelikde, bir temperaturada ýerleşdirilen birnäçe metal geçirijileriň kontaktyndan emele gelen ýapyk zynjyrda diňe kontaktlardaky potensiallaryň üýtgemegi bilen elektrik hereketlendiriji güýjüniň döremeýändigini (11.38) formula subut edýär.

§ 11.11. Termoelektrik effektler 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 effektlerine Zeýebekiň, Peltýeniň we Tomsonyň effektleri degişlidir.



11.14-nji surat. Kontaktlary dürli temperaturaly iki geçirijide elektrik togunyň döreýşi

1. Zeýebekiň effekti. Kontraktlarynyň arasynda dürli temperaturalar bolan yzygider birleşdirilen dürli maddalardan 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 (*11.14-nji surat*).

Goý, $T_1 > T_2$ bolsun. Zynjyrda döreýän elektrik hereketlendiriji güýji ε iki kontaktlarda döreýän potensiallar tapawutlarynyň jemine deňdir:

$$\varepsilon = (\varphi_1 - \varphi_2) + (\varphi_2 - \varphi_1),$$

(11.36) formulanyň esasynda, ýazýarys:

$$\varepsilon = \left(-\frac{A_1 - A_2}{e} + \frac{kT_1}{e}\ln\frac{n_1}{n_2}\right) - \left(\frac{A_2 - A_1}{e} + \frac{kT_2}{e}\ln\frac{n_2}{n_1}\right) =$$

$$= \frac{k}{e}(T_1 - T_2)\ln\frac{n_2}{n_1}$$

formuladaky $\frac{k}{e}\ln\frac{n_2}{n_1}$ gatnaşygy α bilen, $T_1 - T_2$ temperaturalaryň tapawudyny ΔT bilen belläp, alarys:

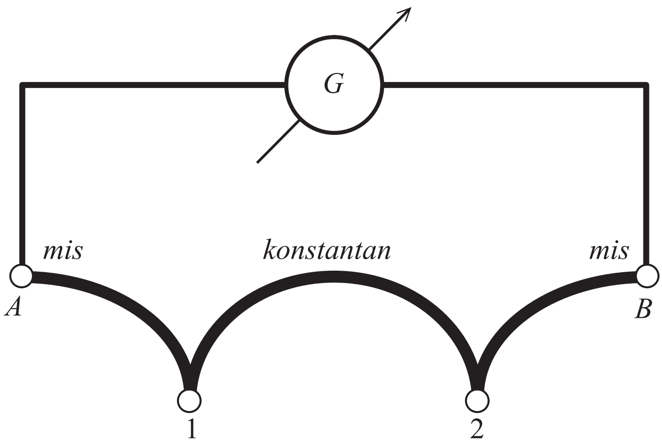
$$\varepsilon = \alpha\,\Delta T, \tag{11.39}$$

bu ýerde α – udel termoEHG, onuň ölçeg birligi (W/K).

(11.39) formuladan görnüşi ýaly, ýapyk zynjyrda döreýän termoelektrik hereketlendiriji güýji kontaktlardaky temperaturalaryň tapawudyna göni proporsionaldyr. Biziň sereden ýagdaýymyz, $T_1 > T_2$ we $n_2 > n_1$ üçin toguň ugry 11.14-nji suratda ýaý bilen görkezilendir. Kontaktlardaky temperaturalaryň tapawudynyň alamatynyň üýtgemegi zynjyrdaky toguň ugrunyň üýtgemegine getirýär.

Zeýebekiň effekti temperaturalary ölçemek üçin ulanylýar. Şu maksat üçin termoelementler we termoparalar (termojübütler) – iki sany özara birleşdirilen dürli geçirijilerden ybarat bolan temperaturanyň datçikleri peýdalanylýar. 11.15-nji suratda şeýle termojübütleriň biri görkezilendir.

Termojübütiň mis we konstantan simleriniň birleşdirilmeginden emele gelen iki sany 1 we 2 kontakty bar. A we B nokatlar sim ar-



11.15-nji surat. Zeýebekiň hadysasyna esaslanan temperatura ölçeýjiniň gurluşy

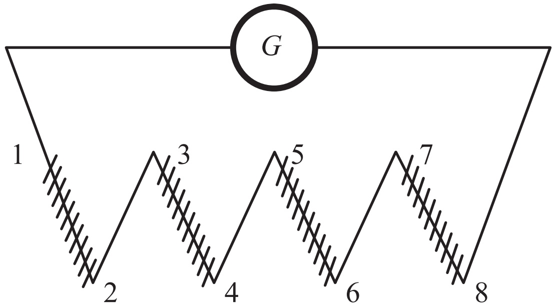
kaly G galwanometriň gysgyçlaryna birikdirilýär. Kontaktlaryň biri (goý diýeli, kontakt 1) temperaturasy belli bolan ýerde ýerleşdirilýär, ýagny köplenç halatlarda, içinde buzly suw bolan Dýuaryň gabyna salynýar we onuň şol 0 °C temperaturasy hemişelik saklanylýar. Ikinji kontakt bolsa biziň temperaturasyny ölçejek bolýan jisimimiziň, islendik nokadynda goýlup bilner. Şeýlelikde, ýüze çykýan termoelektrik hereketlendiriji güýjüniň ululygyny bilip, bizi gyzyklandyrýan jisimimiziň temperaturasyny kesgitläp bolar.

Şeýle maksat üçin ulanylýan galwanometrleriň örän kiçi toklary ölçemekleri üçin duýgurlyklary gaty ýokary bolmaly.

Aşakda käbir jübüt metallardan taýýarlanylan termojübütleriň udel termoEHG-leriniň ortaça bahalary getirilen.

Materiallar	**TermoEHG, *mkW/K***
Mis-konstantan	43
Kümüş-platina	12
Nikel-platina	11

Termojübütleri yzygider birleşdirmek arkaly olaryň duýgurlygyny artdyryp bolýar. Mysal üçin, birnäçe termojübüt 11.16-njy suratdaky ýaly yzygider birleşdirilen diýeliň.



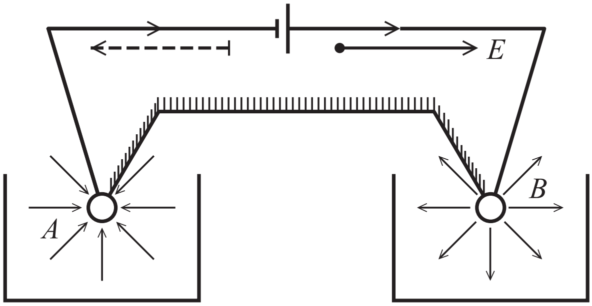
11.16-njy surat. Termojübütleriň yzygider birleşdirilişi

Termojübütleriň ähli täk kontaktlary bellibir temperaturada saklanylýar. Emele gelen termoEHG aýry-aýry termojübütlerde ýüze çykýan termoEHG-leriň jemine deňdir. Şeýle gurluşlara termobatareýalar diýilýär. Termobatareýalar ýylylyk energiýalaryny elektrik energiýasyna öwürmek üçin hem ulanylýar.

Termojübütleriň ýönekeý termometrler bilen deňeşdireniňde uly artykmaçlyklary bar: olaryň duýgurlyklary ýokary (~0,01 K temperaturany ölçäp bilýärler), inertliligi kiçi, temperaturany giň aralyklarda ölçemeklige mümkinçilik berýär. Metal eredilýän domna peçleriniň içindäki, gazlaryň suwuklyga öwrülen wagtyndaky, başga-da, şular ýaly uly we kiçi temperaturalar termojübütleriň kömegi bilen ölçenilýär.

2. Peltýeniň effekti. 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 (sowaýandygyny) tejribe arkaly subut edýär. Şeýlelikde, Peltýeniň effekti Zeýebekiň effektiniň tersi bolýar.

Iki sany dürli geçirijiniň birleşmeginden emele gelen ýapyk zynjyra seredeliň (*11.17-nji surat*). Haçanda zynjyrdan I elektrik togy geçende A kontakt gyzýar we ondan Q ýylylyk bölünip çykýar, B kontakt bolsa sowaýar, ol Q ýylylygy ýuwudýar. Şol wagtda bölünip



11.17-nji surat. Peltýeniň hadysasynyň ýüze çykyşy

çykýan we ýuwdulýan ýylylyk mukdary, Joulyň bölünip çykýan ýylylygyndan tapawutlylykda, şeýle kesgitlenilýär:

$$Q = nIt, \qquad (11.40)$$

bu ýerde n – kontaktda birleşýän materiallaryň tebigatyna bagly bolan Peltýe koeffisiýenti, I – geçirijileriň üstünden geçýän toguň ululygy, t – onuň geçýän wagty.

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.

Peltýeniň effektini nusgawy nazaryýetiň esasynda şeýle düşündirmek bolar. Haçanda 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 effekti sowadyjy maşynlary taýýarlamakda ulanylýar. Onuň esasy aýratynlygy, ol öwrülişikli prosesdir. Onuň bu häsiýeti bolsa termostatlary taýýarlamakda, howany kondisionirlemekde (sowatmakda ýa-da gyzdyrmakda) giňden ulanylýar.

3. Tomsonyň effekti. Uilýam Tomson (Kelwin) termoelektrik hadysalaryny öwrenip we tejribe arkaly barlap görüp, uzynlygyna temperaturalaryň 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 temperaturalaryň 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, bellibir mukdarda ýylylyk bölünip çykýar ýa-da ýuwdulýar. Oňa Tomsonyň ýylylygy diýilýär we ol şeýle kesgitlenilýär:

$$Q_T = k_T\,(T_2 - T_1)\,It, \tag{11.41}$$

bu ýerde k_T – materialyň tebigatyna bagly bolan Tomsonyň koeffisiýenti.

Tomsonyň effektini gyzdyrylan geçirijiniň häsiýetiniň üýtgeýänligi bilen düşündirmek bolýar. Geçirijiniň has gyzdyrylan ujunda, onuň beýleki ujuna seredeniňde, elektronlaryň tizlikleri ulalýar. Şunuň bilen bilelikde, olaryň energiýalary hem artýar. Olar temperaturanyň pes tarapyna tarap diffundirlenip başlaýarlar, metalyň ionlary bilen çaknyşýarlar, öz energiýalarynyň bellibir 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. Şeýlelikde, bu effektlere doly we dogry seljerme bermek üçin olara kwant mehanikasynyň nukdaýnazaryndan seredilmelidir.

§ 11.12. Gazlarda elektrik togy. Gazlaryň ionlaşmagy. Özbaşdak däl gaz zarýadsyzlanmalary

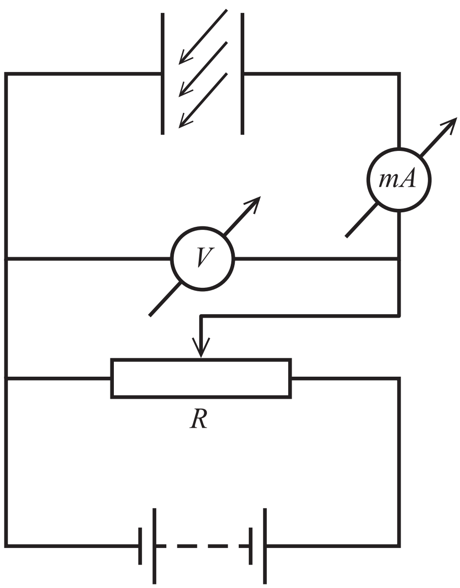
Gazlar onçakly uly bolmadyk temperaturalarda we atmosfera basyşyna golaý bolan basyşlarda gowy izolýatorlardyr (elektrik toguny geçirmeýänlerdir). Oňa göz ýetirmek üçin şeýle tejribe geçireliň. Tekiz kondensatory alyp, onuň disklerini (plastinkalaryny) elektrometr bilen birikdireliň we elektrometri zarýadlandyralyň. Elektrometriň zarýadynyň 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 (zarýadsyz) atomlardan we molekulalardan ybaratdyr. Olarda erkin zarýadlar (elektronlar we ionlar) ýokdur. Şonuň üçin, ol elektrik toguny geçirmeýär. Haçanda gazyň molekulalarynyň bellibir 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 zarýadsyzlanmasy diýilýär. Gaz zarýadsyzlanmasyny 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: gyzdyrmak 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 täzeden 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.



11.18-nji surat. Gaz ionlaşanda zynjyrda toguň döreýşi

Islendik howanyň düzüminde azda-kände erkin zarýadlar bar. Ol zarýadlar täze islendik şöhlelenmäniň täsir etmegi netijesinde ýa-da Ýeriň üstünde bar bolan radioaktiw elementleriň şöhlelenmeleri netijesinde döreýär. Şonuň üçin, gazlaryň geçirijiligi hiç wagtda nola deň bolup bilmez.

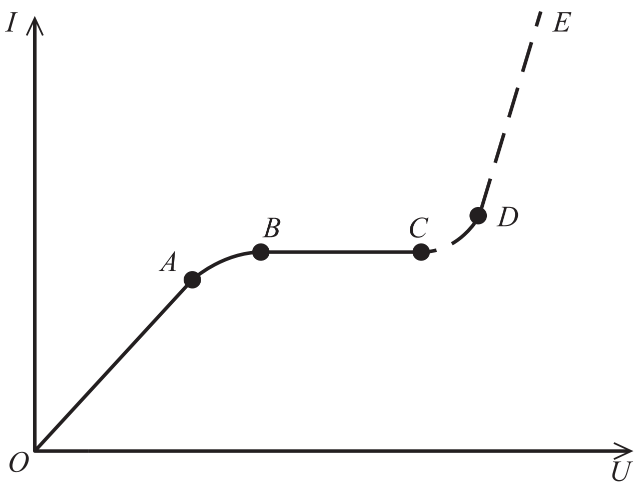
Şu sebäbe görä, islendik zarýadlanan jisimleriň wagtyň geçmegi bilen zarýadlary azalýar.

Gazyň häsiýetlerine, himiki düzümine, olaryň temperaturalaryna, basyşyna, elektrodlaryň materiallaryna we olara goýlan naprýaženiýelere, toguň dykyzlygyna we ş.m. baglylykda gaz zarýadsyzlanmalary dürli-dürli bolýarlar.

Gaz aralygy ionlaşdyryjynyň şol bir intensiwlikdäki dyngysyz şöhlelenmesi bilen (mysal üçin, ultramelewşe şöhleleri bilen) şöhlelendirilýän elektrik zynjyryna seredeliň (*11.18-nji surat)*.

Gaz ionlaşdyryjynyň täsiri netijesinde ionlaşýar, zynjyrdan toguň geçýändigini milliampermetr görkezýär. Döreýän toguň ululygynyň oňa goýlan naprýaženiýä baglylygynyň çyzgysy 11.19-njy suratda görkezilendir.

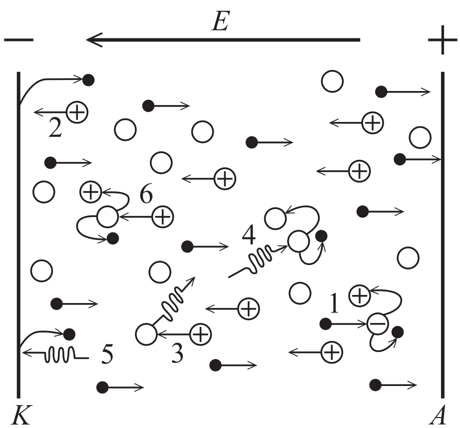
Çyzgydan görnüşi ýaly, erginiň *OA* aralygynda tok oňa goýlan naprýaženiýä proporsionallykda ösýär, ýagny Omuň kanuny ýerine ýetýär. Soňra naprýaženiýäniň ösmegi bilen Omuň kanuny bozulyp başlaýar. *AB* aralykda toguň artmagy peselip başlaýar, ahyrynda *BC* aralykda ol düýbünden artmaýar. Bu aralyk (*BC*) şeýle düşündirilýär. Daşky ionlaşdyryjy tarapyndan wagt birliginde döredilen ionlar we elektronlar şol wagt aralygynda elektrodlara baryp ýetýärler. Netije-



11.19-njy surat. Ionlaşan gazda toguň naprýaženiýä baglylygy de, ululygy ionlaşdyryjynyň kuwwatlylygy bilen kesgitlenilýän doýgun tok diýilýän I_d 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 güýjüniň (*CD* we *DE* aralyklarda) täzeden artýandygyny tejribe görkezýär. Munuň özi gazda ionlaşdyryjynyň hasabyna emele gelýän ionlardan başga, goşmaça ionlaryň ýüze çykýandygyny aňladýar. Toguň güýji ýüz we müň esse artyp, zarýadsyzlanma prosesinde döreýän ionlaryň mukdary şeýle bir köpelýär, hatda zarýadsyzlanmany goldaýan daşky ionlaşdyryjyny aýranymyzda hem gaz zarýadsyzlanmasy dowam eder. Gazlarda daşky ionlaşdyryjy aýrylanyndan soňra-da olarda gaz zarýadsyzlanmalary dowam etse, onda şeýle gaz zarýadsyzlanmalaryna özbaşdak gaz zarýadsyzlanmalary diýilýär. Indi özbaşdak gaz zarýadsyzlanmasynda näme üçin toguň birden artýandygyna düşünjek bolalyň:



11.20-nji surat. Ionlaşdyryjynyň ikilenç elektronlary döredişi

Daşky ionlaşdyryjy tarapyndan döredilen uly napryýaženiýede (*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 (*11.20-nji suratdaky 1-nji proses*).

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 golaýlaşdygyça barha artýar. Bu hadysa *CD* aralykda elektrik togunyň artmagynyň sebäbi bolýar. Biziň seredip geçen ýagdaýymyzdaky prosese ionlaşdyryjy urgy diýilýär.

Emma ionlaşdyryjy urgy daşky ionlaşdyryjy aýrylandan soňra gazyň zarýadsyzlanmasynyň dowam etmegi üçin ýeterlik däldir. Gaz zarýadsyzlanmasynyň dowam etmegi üçin, haýsy-da bolsa, bir prosesiň täsir etmegi netijesinde täze elektronlaryň döremegi gerek bolup durýar. Şeýle prosesler 11.20-nji suratda çyzgy boýunça görkezilendir.

1. Elektrik meýdany tarapyndan çaltlandyrylan ionlar katoda urlup, ondan elektronlary «goparýarlar» (2-nji proses);

2. Položitel ionlar gazyň molekulalary bilen çaknyşyp, olary oýandyrylan hala geçirýärler; şeýle molekulalaryň adaty ýagdaýa geçmekleri foton goýbermek bilen amala aşýar (3-nji proses);

3. Neýtral molekula tarapyndan ýuwdulýan foton ony ionlaşdyrýar, ýagny molekulanyň foton ionlaşmasy diýilýän proses bolup geçýär (4-nji proses);

4. Katoddan fotonlaryň täsir etmekleri netijesinde elektronlar «goparýarlar» (5-nji proses).

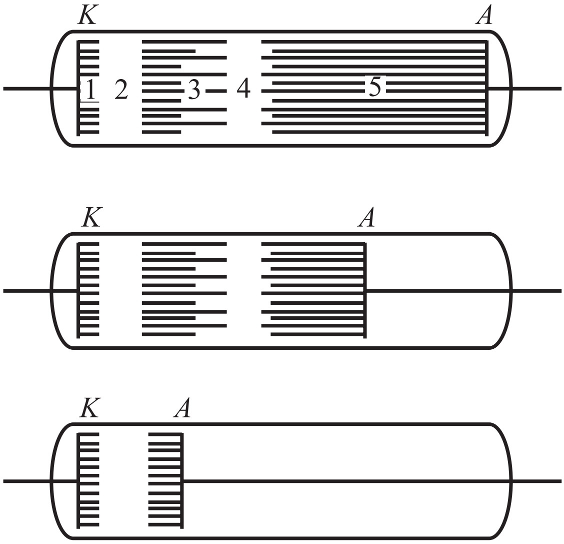
Ahyrynda elektrodlaryň aralygyndaky meýdanyň güýjenmesi şeýle bir derejä ýetýär weli, ylgaw ýolunyň uzynlygy elektronlaryňka seredeniňde kiçi bolan položitel ionlar gazyň molekulasyny ionlaşdyrmaklyga ýeterlik bolan energiýany alýarlar (proses 6) we otrisatel plastinka tarap ionlaryň «sili» herekete gelýär. Haçanda elektronlaryň «silinden» başga, ýene ionlaryň hem «sili» dörän wagtynda, toguň güýji naprýaženiýe artmasa-da, birden ösýär (*DE* aralyk).

Şeýlelikde, şeýle prosesleriň ýüze çykmaklary netijesinde, özbaşdak gaz zarýadsyzlanmasy başlaýar.

Olaryň gazyň basyşyna, elektrodlaryň görnüşlerine we daşky zynjyryň ululyklaryna baglylykda özbaşdak gaz zarýadsyzlanmasynyň dört görnüşi bardyr: köreýän zarýadsyzlanma, uçgun zarýadsyzlanmasy duga we täçli zarýadsyzlanmalar.

1. Köreýän zarýadsyzlanma pes basyşlarda ýüze çykýar. Uzynlygy 30–50 *sm* bolan iki sany metal elektrodly aýna turbajygynyň elektrodlarynyň aralygyna birnäçe ýüz wolt hemişelik naprýaženiýäni goýup, turbajygyň içiniň howasyny sorup çykaryp başlanymyzda, haçan basyş 5,3–6,7 *kPa* golaýlanynda, katoddan anoda tarap uzalyp gidýän gyzyl reňkli sapajyk görnüşinde ýagtylyp, gaz zarýadsyzlanmasy başlanýar. Basyşyň ýene-de aşaklanmagy bilen bu sapajyk giňelip, turbanyň ähli kese kesigini tutýar, katodyň golaýynda gaz ýagtylanmagy peselýär. Turbadaky gazyň basyşy 0,1–0,01 *mm.sim.süt*. (1,33–13,3 *Pa*) golaýlanynda, zarýadsyzlanma 11.21-nji suratdaky görkezilen görnüşde bolýar. Katodyň has golaýyndaky inçejik sapaklar görnüşindäki gatlak (birinji katod ýagtylanmasy ýa-da katod plýonkasy (1)), yz ýanyndan katod garamtyl giňişligi adyny alan garamtyl gatlak (2) emele gelýär. Bu garamtyl giňişlik soňra ýagtylanýan gatlaga (köreýän ýagtylanma (3)) geçýär. Köreýän ýagtylanma gatlagynyň katod tarapda aýdyň araçägi bolup, ol anod tarapa ýitip gidýär. Köreýän ýagtylanmadan soň, ýene-de ikinji ýa-da Faradeýiň garaňky giňişligi (4) diýilýän garamtyl aralyk ýerleşýär. Bu böleklere zarýadsyzlanmanyň katod bölekleri diýilýär. Ikinji gara giňişlikden soňra anoda çenli aralygy tutýan ýagtylanýan oblasty ýa-da položitel sütüni ýerleşýär. Kä halatlarda bu oblastyň hem birnäçe gatlaklara bölünmegi mümkin.

Köreýän zarýadsyzlanmada onuň esasy iki gara katod giňişligi we köreýän ýagtylanma bölegi aýratyn ähmiýete eýedir. Sebäbi, zarýadsyzlanmany goldaýan esasy prosesler şu böleklerde bolup geçýär. Eger gaz zarýadsyzlanmasy bolup geçýän aýna turbasynyň anody süýşýän edilse we ýuwaşjadan katoda tarap süýşürilse (*11.21-nji sur. ser.*), 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 haçanda 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.



11.21-nji surat. Köreýän zarýadsyzlanma

Köreýän zarýadsyzlanmasy ýagtylyk çeşmeleri hökmünde dürli gaz zarýadsyzlanmasy çyralarynda giňden ulanylýar. Gündiz ýagtylykly çyralarynda köreme zarýadsyzlanmasynyň şöhlelenmesi turbanyň içki üstüne çaýylan ýörite maddanyň gatlagy arkaly ýuwdulýar. Ol öz gezeginde ýuwdulýan şöhlelenmäniň täsiri astynda ýagtylanyp başlaýar. Gatlaga çaýylýan materiallary (lýuminoforlary) taýýarlanlarynda olaryň goýberýän şöhlelenmeleriniň gündiz ýagtylygyna golaý bolmaklygyny göz öňüne 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 gyzyl, argondan ýaşylymtyl-gök we ş.m.

Gaz zarýadsyzlanma turbalaryndaky katodyň materiallaryny üýtgedip, olary dürli naprýaženiýelerde ýanýan edip bolýar. Mysal üçin, neon çyralarynda elektrodlar hökmünde ýüzüne bariý çaýylan demir listjagazy ulanylýar. Netijede, baride elektronlaryň çykyş işiniň kiçidigi sebäpli, çyra ýagtylandyryş tok zynjyryna birikdirilenindede, işleýär. Şeýle çyralar signallaşdyryş maksatlary üçin-de, dürli gurluşlarda görkeziji çyralary hökmünde-de ulanylýarlar.

2. Uçgun zarýadsyzlanmasy howa atmosferasynda ýerleşen elektronlaryň arasyndaky naprýaženiýäni barha artdyranymyzda, olaryň aralygynda döreýän elektrik meýdany hem birhilli meýdandan gaty bir tapawutlanmaýan bolsa, naprýaženiýäniň ululygy bellibir baha ýetende elektrodlaryň arasynda uçgun döräp başlamagydyr. Uçgun zarýadsyzlanmasy (*11.22-nji sur. ser.*) ýiti ýagtylanýan inçejik iki elektrody hem biri-birine birleşdirýän, kanaljyklar görnüşinde bolýarlar.

Elektrik uçguny elektrodlaryň arasyndaky elektrik meýdanynyň güýjenmesiniň E_k kritiki bahasy bellibir ululyga ýeteninden soňra başlanýar. Ol gazyň düzümine, onuň ýagdaýyna bagly bolýar. Kadaly şertlerde, howa üçin $E_k \approx 3 \cdot 10^6\ W/m$. ($E_k$-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 toplumy 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» bol-

11.22-nji surat. Uçgun zarýadsyzlanmasy man, zarýadsyzlanma wagtynda gazyň özüniň şöhlelenmesi 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 öňüne 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 – bulutlaryň arasynda ýa-da bulut bilen Ýeriň aralygynda döreýär. Ýyldyrym çakan wagtynda toguň ululygy ummasyz ululyga ýetýär (10-dan 1000 *kA* çenli). Ýyldyrym çakmasynyň öň ýanynda (eger ýyldyrymyň çakmasy bulut bilen Ýeriň aralygynda bolsa) olaryň aralygyndaky naprýaženiýe $10^8 - 10^9$ *W*-a ýetýär.

3. Duga zarýadsyzlanmasy. Eger uçgun zarýadsyzlanmasy başlanandan soňra zynjyryň garşylygy kem-kemden azaldylsa, uçgunda toguň güýji artyp başlaýar. Haçanda 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, proýeksion apparatlarda we kinoapparatlarda ulanýarlar.

Simap çyralaryndaky duga zarýadsyzlanmasy kuwwatly ultramelewşe şöhleleriniň çeşmesi bolmak bilen, saglyk sistemasynda giňden ulanylýar. Pes basyşlarda simabyň bugunda bolup geçýän duga zarýadsyzlanmasy üýtgeýän togy hemişelik toga öwürmek üçin simap göneldijilerinde ulanylýar. Duga zarýadsyzlanmasy metallary kebşirlemekde 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, elektrodlaryň 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 ýogyn 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 ýagdaýynda bolýarlar. Gyzdyrmak 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 zarýadlaryň dykyzlyklary praktiki deňleşýär. Plazma – munuň özi bölekleýin ýa-da doly ionlaşan gazdyr, onda položitel we otrisatel zarýadlaryň dykyzlyklary gabat gelýärler. Şeýlelikde, plazma tutuşlygyna elektrik taýdan aralyk sistemadyr. Aşaýokary temperaturalarda ýüze çykýan ýokary temperaturaly plazma we gaz zarýadsyzlanmasynda ýüze çykýan gaz zarýadsyzlanma plazmasy bardyr.

Plazma, ondaky ionlaşan bölejikleriň sanynyň, onuň göwrüm birligindäki bölejikleriniň sanyna bolan gatnaşygy bilen kesgitlenýän α – ionlaşma derejesi bilen häsiýetlendirilýär.

Ionlaşma derejesiniň ululygyna görä, pes ($\alpha < 1\%$), aralyk (α – birnäçe göterim aralygynda) we doly ionlaşan ($\alpha \sim 100\%$-e golaý) plazmalar bolýarlar.

Gaz zarýadsyzlanmasy plazmasyndaky zarýadlanan bölejikler (elektronlar we ionlar) çaltlandyrylan elektrik meýdanynda bolmak bilen dürli orta kinetik energiýa eýedirler. Bu bolsa, elektronlaryň T_e

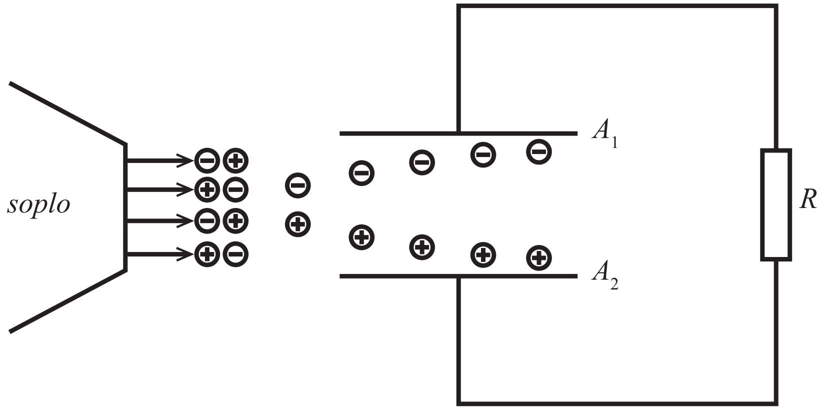
temperaturalarynyň ionlaryň T_i temperaturalaryna deň däldigini aňladýar, çünki $T_e > T_i$. Bu bolsa, gaz zarýadsyzlanma plazmasynyň deňagramsyzdygyny görkezýär, şonuň üçin bu plazma izotermiki däl plazma hem diýilýär. Gaz zarýadsyzlanmasy plazmasynda zarýadlanan bölejikleriň rekombinasiýa prosesi netijesinde azalmaklary elektrik meýdany tarapyndan çaltlandyrylan elektronlaryň ionlaşdyryjy urgy netijesinde doldurylýar. Elektrik meýdanynyň täsiriniň kesilmegi bilen gaz zarýadsyzlanma plazmasy-da ýok bolýar. Ýokary temperaturaly plazma deňagramly ýa-da izotermik plazmadyr. Onda kesgitli temperaturada zarýadlanan bölejikleriň sanlarynyň azalmaklary termiki ionlaşdyrmagyň netijesinde doldurylýar. Şeýle plazmada ony düzýän zarýadly bölejikleriň ählisiniň orta kinetik energiýalary deňdir. Maddalaryň köp bölegi şu plazma ýagdaýynda bolýar. Mysal üçin, Gün, ýyldyzlar, ýyldyzlar bilen galaktikalaryň arasyndaky giňişligi dolduryan ýyldyzlar gurşawy we ş.m. Bularyň temperaturalary onlarça million graduslara ýetýär.

Ýyldyzlar gurşawynyň dykyzlygy örän kiçidir, ortaça 1 sm^3 göwrüme bir atomdan hem azrak düşýär. Ýyldyzara gurşawyň atomlarynyň ionlaşmasy ýyldyzlaryň şöhlelenmesi, kosmos şöhleleri we älem giňişligini ähli ugurlar boýunça kesip geçýän, çalt hereketlenýän bölejikleriň akymy arkaly bolup geçýär. Ýyldyzlaryň plazmasyna garanyňda 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 Gunüň şöhlelenmesi we Günüň goýberýän zarýadly bölejikleriniň akymy bilen döredilýär.

Plazma şeýle esasy häsiýetlere eýedir: gazyň ýokary derejede ionlaşmasy, položitel we otrisatel zarýadlanan bölejikleriň praktiki deňleşmesi, 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 ýagdaýy diýmeklige esas döredýär.

Plazmanyň fiziki häsiýetlerini öwrenmeklik birinjiden, ol kosmos giňişliginde maddalaryň has köp ýaýran haly bolup, astrofizikanyň



11.23-nji surat. Magnitogidrodinamiki öwrüji

köp problemalaryny çözmeklige şertler döretse, ikinjiden, dolandyrylýan termoýadro sintezini amala aşyrmaklyga mümkinçilik berýär.

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 (*11.23-nji surat*). Suratdan görnüşi ýaly, sopladan (ýokary gyzgynlyga çydaýan ýörite turba) ionlaşan ýokary temperaturaly gazyň çüwdürimi çykyp, A_1 we A_2 elektrodlaryň aralygyndan geçýär.

Olaryň arasyndaky giňişlikde hereket edýän (güýç çyzyklaryna perpendikulýar bolan) plazma 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 akar. Şeýle ýagdaýda plazmanyň kinetik we ýylylyk energiýalarynyň elektrik energiýasyna öwrülmesi bolup geçýär. Energiýanyň şeýle öwrülmesi bolup geçýän enjamlara magnitogidrodinamiki gineratorlary (MGDG) diýilýär.

Bulardan başga-da, plazmatronlaryň kömegi bilen alynýan aşak temperaturaly plazma, metallary kesmekde we kebşirlemekde, adaty şertlerde bolmaýan birnäçe himiki birleşmeleri 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:

$$H_2O \leftrightarrow H^+ + OH^-,$$

bu ýerde H^+ – wodorodyň položitel zarýadlanan iony, OH^- – otrisatel zarýadlanan gidroksil topary.

Köp duzlar, kislotalar we aşgarlar hem dissosirlenmek häsiýetine eýedirler. Mysal üçin, natriniň gidrokisi (iýiji natriý) suwda natriniň položitel ionyny we gidroksili emele getirýär:

$$NaOH \leftrightarrow Na^+ + OH^-.$$

Eredijiniň täsir etmegi netijesinde ereýän maddanyň molekulalarynyň ionlara dargamagyna elektrolitik dissosiasiýa diýilýär.

Erän maddanyň dissosiasiýa derejesi şu görnüşinde

$$\alpha = \frac{n_0}{N}, \qquad (11.42)$$

formula bilen aňladylýan α dissosiasiýa koeffisiýenti bilen kesgitlenýär.

Bu ýerde n_0 – ionlara dargan molekulalaryň sany, N – ergindäki molekulalaryň sany. Dissosiasiýa koeffisiýenti noldan 1 aralygynda üýtgeýär, $\alpha = 0$ bolanynda dissosiasiýa bolmaýar, $\alpha = 1$ bolanynda doly dissosiasiýa geçýär.

Dissosiasiýanyň derejesi, ýagny erän maddanyň molekulalarynyň ionlara bölünişi, ereýän we eredýän maddanyň tebigatyna, ergininiň konsentrasiýasyna we temperaturasyna baglydyr.

Elektrolitik dissosiasiýa netijesinde ionlara baý bolup, elektrik toguny geçirmeklige ukyply bolan erginlere elektrolitler diýilýär.

Ionlaşan gazlarda bolşy ýaly, erginlerde hem elektrolitik dissosiasiýa prosesi bilen bir hatarda ionlaryň rekombinasiýa prosesi, ýagny dürli alamatly ionlaryň birleşip, neýtral molekulalary emele getirmeklik prosesi hem bolup geçýär.

Elektrolitlerde hem ionlaşan gazlardaky ýaly, toguň dykyzlygyny şeýle formula bilen aňlatmak bolar:

$$j = qn_0(u_{0+} + u_{0-})E. \tag{11.43}$$

$\alpha = n_0/N$ formulany hasaba almak bilen, alarys:

$$j = \alpha qN(u_{0+} + u_{0-})E, \tag{11.44}$$

bu ýerde q – ionyň zarýady, u_{0+}, u_{0-} – degişlilikde, 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 zarýadlaryny äkidijiler erkin elektronlardyr. Olar birinji jynsly geçirijilere girýär. Olardan elektrik togy geçeninde himiki taýdan hiç hili üýtgeşme bolup geçmeýär. Ion geçirijiligine eýe bolan elektrolitler – ikinji jynsly geçirijilere degişlidir. Şeýle geçirijileriň uçlarynda potensiallaryň tapawudy döredilse, položitel ionlar otrisatel zarýadlanan 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 ýetmezçiligi 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 zarýadyň mukdaryna göni proporsionaldyr, ýagny:

$$m = kq,$$

bu ýerde k – maddanyň elektrohimiki ekwiwalenti.

Eger t wagta elektrolitiň üstünden I hemişelik togy akyp geçýän bolsa onda

$$m = kIt, \tag{11.45}$$

bolar. k koeffisiýent elektroliz wagtynda elektrolitden 1 Kl zarýad geçeninde elektrodlarda bölünip çykýan maddanyň massasyna san taýdan deňdir.

Faradeýiň ikinji kanuny. Maddanyň elektrohimiki ekwiwalenti onuň himiki ekwiwalentine göni proporsionaldyr, ýagny

$$k = C\frac{A}{Z} \quad \text{ýa-da} \quad k = \frac{1}{F}\cdot\frac{A}{Z}, \tag{11.46}$$

bu ýerde maddanyň A molýar massasynyň onuň Z walentliligine bolan gatnaşygyna (A/Z), maddanyň himiki ekwiwalenti diýilýär. $C = 1/F$ – hemme elementler üçin hemişelik ululykdyr.

Faradeýiň birinji we ikinji kanunlaryny birleşdirip, onuň umumylaşdyrylan formulasyny alýarys:

$$m = \frac{1}{F}\frac{A}{Z}It, \tag{11.47}$$

bu ýerde m – elektrodda bölünip çykan maddanyň mukdary, F – Faradeýiň sany, ol elektrodda bir kilogram ekwiwalent maddanyň bölünip çykmagy üçin erginiň üstünden nähili elektrik mukdarynyň geçmelidigini görkezýär.

Ýagny $F = 9{,}65 \cdot 10^4\ Kl/mol$, A/Z– himiki ekwiwalent, A – maddanyň bir molunyň massasy, t – elektrolitiň üstünden toguň geçen wagty, Z – maddanyň walentliligi, I – toguň güýji.

Faradeýiň hemişeligini kesgitläp, elektronyň zarýadyny aňsatlyk bilen tapyp bolýar:

$$e = \frac{F}{N_A} = \frac{9{,}6484 \cdot 10^4 Kl/mol}{6{,}0225 \cdot 10^{23} mol^{-1}} \approx 1{,}6 \cdot 10^{-19} Kl.$$

Elektroliz hadysasynyň ulanylyşy. Elektrolizde bolup geçýän proseslerini praktikada ulanmaklyk häzirki zaman elektrohimiýa senagatynyň ösmegine goltgy berdi. Elektrohimiýada elektroliz hadysasy wodorod, hlor, ftor, mis, sink, kobalt, arassa demir, marganes, hrom, alýuminiý we başga-da birnäçe himiki elementleri almak üçin ulanylýar. Mysal üçin, mis kuporosynyň ergininiň üstünden elektrik togy geçeninde:

$$CuSO_4 \leftrightarrow Cu^{++} + SO_4^{--},$$

misiň kationlary emele gelýärler, olar katodda elektronlar bilen birleşip, metal görnüşinde misi emele getirýärler:

$$Cu^{++} + 2e \rightarrow Cu.$$

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 çaýmakda 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 $Om^{-1} \cdot m^{-1}$; dielektrikleriňki bolsa $10^{-8} - 10^{-10}$ $Om^{-1} \cdot m^{-1}$ deňdir. Ýarymgeçiriji materiallary soňky onýyllykda elektrotehniki we elektron gurluşlarynda giňden ulanylyşa eýe boldy.

Ýarymgeçirijilere kremniý (Si), germaniý (Ge), selen (Se), fosfor (P) we Mendeleýewiň 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, elektrotehnikada 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.

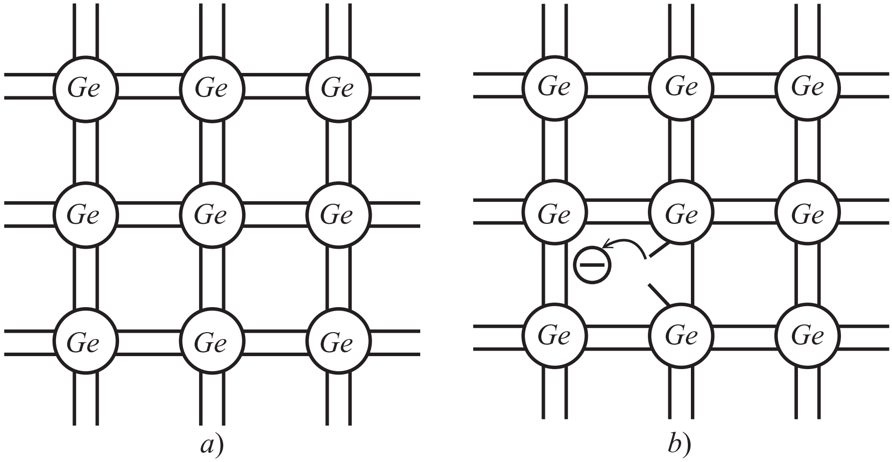
Ýarymgeçirijileriň kontaktlarynda bolup geçýän aýratyn häsiýetleri sowadyjy abzallaryny (holodilnikleri) taýýarlamakda ulanylýar.

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, birnäçe artykmaçlyklar ýarymgeçiriji gurluşlarynyň halk hojalygynyň we tehnikanyň ähli pudaklaryna aralaşmaklygyna şert döredýär.

§ 11.17. Ýarymgeçirijileriň hususy geçirijiligi

Arassa ýarymgeçirijiniň elektrik geçirijiligine hususy geçirijilik diýilýär. Mysal üçin, germaniý atomynyň daşky elektron gatlagynda 4 elektron ýerleşýär. Bu elektronlar ýadro bilen gowşak baglanyşykdadyrlar. Olara walent elektronlar diýilýär. Ýylylygyň ýa-da magnit meýdanynyň täsir etmegi netijesinde bu elektronlar öz atomyny taşlap gidýärler we 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 getirýärler. Germaniý kristalynyň gurluşynyň tekiz çyzgysy 11.24-nji *a* suratda görkezilendir.



11.24-nji surat. Germaniý kristalynyň şekillendirilişi

Şeýle ideal ýarymgeçiriji elektrik toguny düýbünden geçirmeýär. Temperaturanyň ($T > 0\ K$) ýokarlamagy bilen, ýa-da ýagtylygyň täsiri astynda walentli elektronlaryň baglanyşygy gowşap, olar atomlardan üzülip aýrylýarlar (*11.24-nji 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 sanynyň artmagy bilen düşündirilýär.

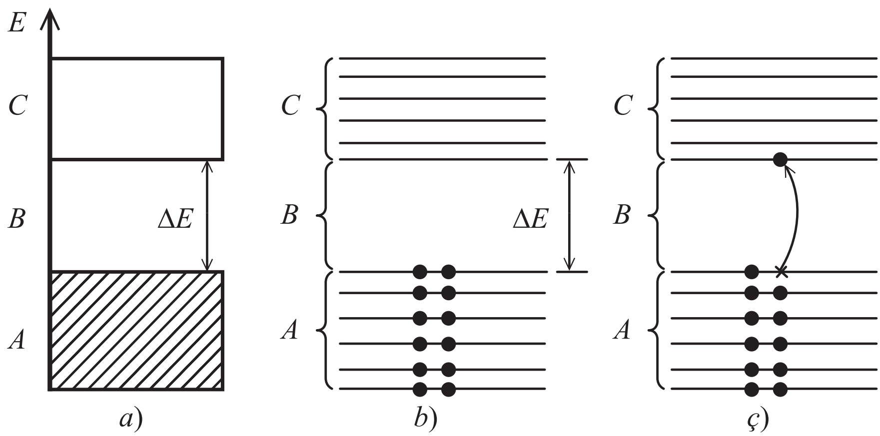
Ýarymgeçirijileriň walentli elektronlarynyň bar bolmagy bilen şertlenen geçirijiligine elektronly geçirijilik diýilýär.

Baglanyşyk üzülende elektron ýetmeýän boş ýer emele gelýär. Oňa deşijek diýilýär. Deşijekleriň bolmagy ýene-de goşmaça zarýadyň göçürilmegine getirýär. Emele gelen bu boş ýere goňşy atomlardan walentli elektronlar geçip, kadaly baglanyşygy dikeldýär, onuň gaýdan ýerinde bolsa indi täze deşijek döreýär. Täze dörän boş ýere başga bir elektron geçip, deşijek ýene-de süýşýär we ş.m. Netijede, togy döretmeklige diňe geçiriji (erkin) elektronlar gatnaşman, eýsem, baglanyşykly elektronlar-da gatnaşýarlar. Erkin elektronlar ýaly, baglanyşykly elektronlar-da elektrik meýdanynyň garşysyna hereket edýärler. Deşijekler bolsa meýdanyň ugruna hereket edip özlerini položitel zarýadlanan bölejikler ýaly alyp barýarlar. Diýmek, hiç hili garyndysy bolmadyk arassa ýarymgeçirijilerde bir wagtda iki hilli geçirijilik: elektron we deşikli geçirijilik amala aşyrylýar. Elektron geçirijilige *n* görnüşli, deşikli geçirijilige bolsa *p* görnüşli 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 (*11.25-nji surat*). Bu ýerde *A* – walentli zona, *C* – geçirijilik zonasy. Dielektriklerde we ýarymgeçirijilerde bu zonalar gadagan edilen *B* zona arkaly bölünen.

Gadagan edilen zonanyň giňligi dürli ýarymgeçirijilerde dürli-dürlüdir. Metallarda gadagan edilen zona ýok diýen ýalydyr. Sebäbi, olarda walentli zona bilen geçirijilik zona biri-biriniň içine girýär we metallarda $\Delta E_M \approx 10^{-22}$ $eW \approx 0$ bolýar. Şoňa görä-de, metallar islendik temperaturada hem elektrik toguny geçirýärler.

11.25-nji *b* suratdan görnüşi ýaly, şu temperaturada ähli elektronlar walentli zonada ýerleşendir, şu halatda ýarymgeçiriji ideal izolýatordyr. Onda elektrik toguny geçirijiler ýok. Gyzdyrmak netijesinde walentli zonadaky elektronlaryň energiýalary artyp başlaýar. Haçanda elektronyň alan energiýasy gadagan edilen zonanyň giňligine deň bo-

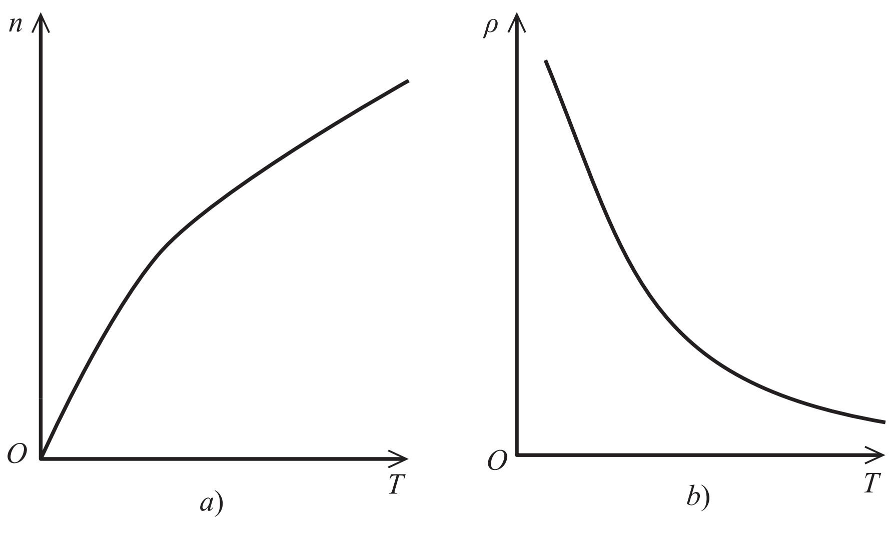


11.25-nji surat. Dielektriklerde we ýarymgeçirijilerde walentli zonalarda elektronlaryň orny lan ΔE energiýa ýeteninde, ol A walentli zonadan C geçirijilik zonasyna geçýär (*11.25-nji ç surat*). Bu ýagdaýda A zonada (atanak arkaly bellenen) deşijek emele gelýär. Şeýlelikde, walentli we geçirijilik zonalarynda elektrik meýdanynyň täsiri astynda elektrik togunyň döremegi üçin şertler döreýär: geçirijilik zonasynda erkin elektronlaryň döremegi elektron geçirijiligini, walentli zonada bolsa boş ýerleriň emele gelmegi, deşikli geçirijiligi döredýär.

Ýarymgeçirijilerde we dielektriklerde ΔE energiýanyň ululygy bilen kesgitlenilýän gadagan zonanyň giňligi dürli-dürlüdir. $\Delta E = 0{,}2 - 3\, eW$ aralygyndakylara ýarymgeçirijiler, $\Delta E > 3\ eW$ bolan materiallara dielektrikler diýilýär.

Mysal üçin, almazyň gadagan zonasynyň giňligi 5,2 *eW* bolup, ol dielektrik hasaplanylýar, gadagan zonalarynyň giňligi degişlilikde, 0,67 we 1,12 *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 (*11.26-njy a surat*).



11.26-njy surat. Geçirijilik zonasyndaky elektronlaryň we walentli zonadaky deşikleriň konsentrasiýalarynyň we ýarymgeçirijileriň elektrik udel garşylygynyň temperatura baglylyklary

$$n = n_0 e^{-\Delta E/(2\,kT)}, \qquad (11.48)$$

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*).

$$\rho = \rho_0 e^{\,\Delta E/(2\,kT)},$$

bu ýerde ρ_0 – proporsionallyk koeffisiýenti.

Biziň şu paragrafda sereden arassa ýarymgeçirijimiziň elektrik geçirijiligine hususy elektrik geçirijiligi diýilýär.

§ 11.18. Ýarymgeçirijilerde garyndyly geçirijilik

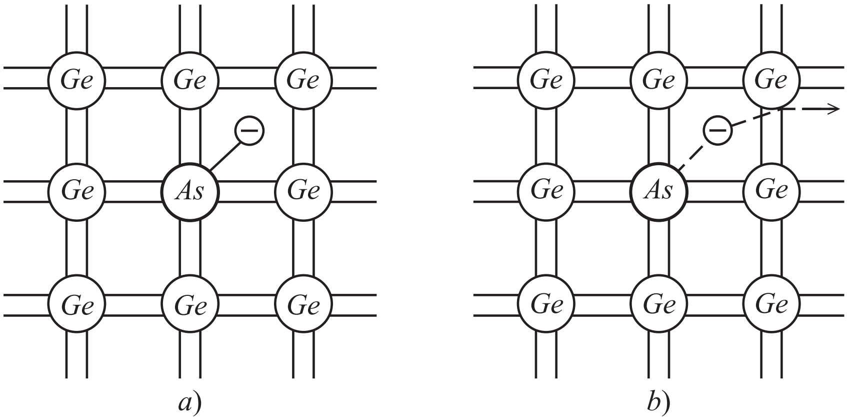
Tebigatda ideal (hyýaly) arassa ýarymgeçirijiler ýok, olary emeli usul bilen ähli garyndylardan arassalamaklyk örän çylşyrymly (praktiki mümkin däl). Şonuň bilen birlikde arassa ýarymgeçirijilerde ujypsyz mukdarda garyndynyň bolmagy onuň garşylygyny müňlerçe esse kiçeldýär. Şeýle faktlar birinji tarapdan ýarymgeçirijileriň häsiýetlerini üýtgetmekligiň mümkinçiligini görkezse, ikinji tarapdan berlen häsiýetli ýarymgeçiriji materiallaryny taýýarlamaklygyň tehnologiki 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 bäş walentli myşýagy goşalyň (*11.27-nji a surat*).

Myşýagyň her bir atomy özüniň daşky dört elektronlary arkaly germaniniň goňşy dört sany atomy bilen baglanyşýar. Myşýagyň daşky 5-nji elektrony bolsa «artyp» galyp atomara baglanyşygyna gatnaşmaýar (*11.27-nji a sur. ser.*) ýylylyk hereketiniň ýa-da başga täsirleriň netijesinde bu elektron üzülip (*11.27-nji b surat*) erkin bolup biler.

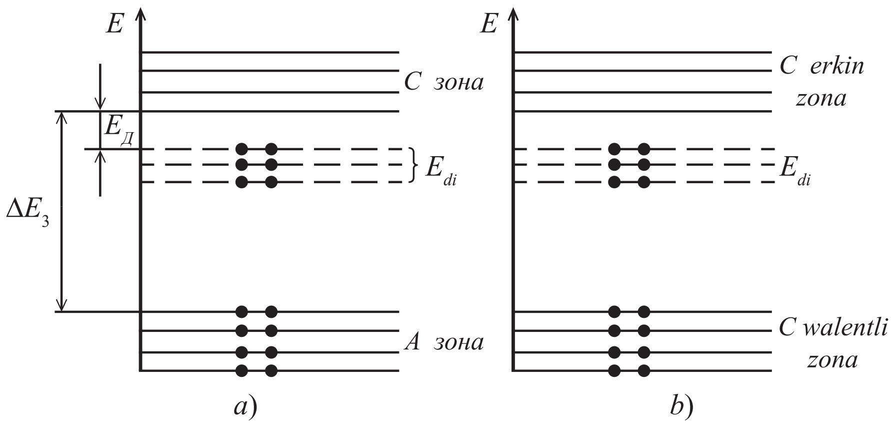
Myşýagyň goşulan her bir atomy ýarymgeçirijide bir erkin elektrony döredýär. (Myşýagyň 0,0001 % garyndysynyň goşulmagy ger-



11.27-nji surat. Germaniý kristalynyň garyndyly geçirijiligi

manide erkin elektronlaryň sanyny 1000 gezege golaý artdyrýar). Emma deşikleriň sany artmaýar, ýagny «artykmaç» elektronlaryň öz atomlaryndan üzülmekleri bilen olaryň atomara baglanyşyklary bozulmaýar. Netijede, germaniý erkin elektronlaryň hasabyna «baýlaşýar». Şonuň üçin hem, myşýak germanide elektron geçirijiligini döredýär (elektrik toguny geçirijileriň esasy elektronlar bolandygy sebäpli) we şeýle geçirijilige n – tipli geçirijilik, bu geçirijiligiň agdyklyk edýän ýarymgeçirijisine n – tipli ýarymgeçiriji diýilýär. Şeýle elektrik geçirijiligini döredýän garynda – donor garyndylar diýilýär. Garyndyly elektrik geçirijiligini zonalar teoriýasy arkaly şeýle düşündirmek bolar. Myşýak gadagan edilen (ΔE) zonanyň ýokarsynda, geçirijilik zonasynyň (C zonanyň) golaýynda galyndyly energetiki derejeleri emele getirýär (*11.28-nji a surat*).

Bu energetiki derejeleriň energiýalarynyň ululygyny E_{di} bilen belläliň. E_{di} C zonadan 0,01 eW aşakda ýerleşýär ($E_{di} \approx 0{,}01$ eW). Haçanda $T \approx 0$ K bolan wagtynda bu derejeler we walentli zonada ýerleşen derejeleriň ähli elektronlardan doly (*11.28-nji a sur. ser.*). Haçanda $T > 0$ K bolup başlanynda garyndynyň emele getiren derejelerindäki elektronlar C zona geçip başlaýarlar we ýarymgeçiriji elektrik toguny geçirip başlaýar (*11.28-nji b surat*). Haçanda garyndyly derejelerdäki elektronlaryň ähli C – zona geçip gutaranyndan soňra (sebäbi $E_{di} << \Delta E$) energiýanyň artmagy bilen elektronlar A zonadan



11.28-nji surat. Geçiriji zonasynyň golaýyndaky energetiki derejeler

C zona geçip başlaýarlar indi garyndyly elektrik geçirijiligi, elektrik meýdanynyň täsiri astynda, hususy elektrik geçirijiligine syrygýar.

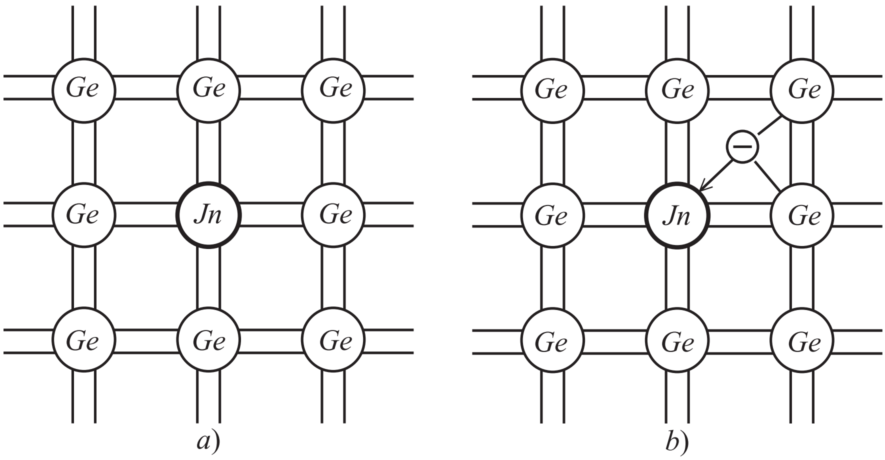
***b*)** goý, germaniý kristalyna Mendeleýewiň periodik tablisasynyň üçünji toparynda ýerleşen indiniň uly bolmadyk mukdaryny goşalyň. Belleýşimiz ýaly, germaniý dört walentli, indiý bolsa üç walentli. Indiniň her bir atomy özüniň üç sany daşky elektronlary arkaly goňşy germaniniň atomlarynyň üç elektrony bilen berk baglanyşyga girýär. Indiniň daşky gatlagynda dördünji elektronyň ýokdugy sebäpli germaniniň dördünji atomy bilen bolan baglanyşyk gaty gowşak bolýar (*11.29-njy a surat*).

Şeýlelikde, germaniý kristalyna goşulan indiniň her bir atomy onda bir deşik emele getirýär. Emma erkin elektronlaryň sany artmaýar.

Netijede, germaniý deşijekleriň hasabyna baýlaşýar. Garyndyly deşikli geçirijilik esasy bolup durýar. 11.29-njy *b* suratdan görnüşi ýaly, indiý atomynyň daşky gatlagyndaky boş ýere goňşy atomdan bir elektron geçýär we ş.m. Şeýlelikde, indiý germanide deşikli geçirijiligi (*p* – tipli) döredýär.

Şeýle garyndylara akseptor (kabul ediji) garyndylar diýilýär. Deşikli geçirijiliginiň agdyklyk edýän ýarymgeçirijisine bolsa, *p*–tipli ýarymgeçiriji diýilýär.

Garyndyly ýarymgeçirijiler şol bir wagtyň özünde garyndyly elektrik geçirijiligine-de, hususy elektrik geçirijiligine-de eýedirler.

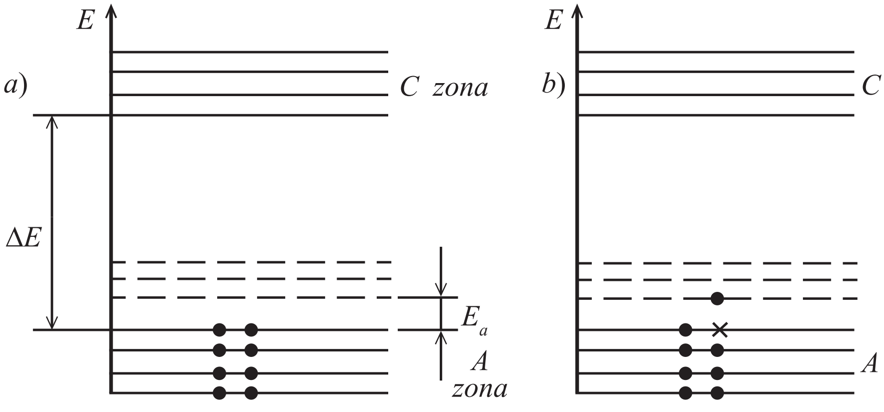


11.29-njy surat. Garyndyly deşikli geçirijiligiň ýüze çykyşy

Şeýlelikde, *p* nusgawy ýarymgeçirijilerde esasy elektrik toguny geçirijiler deşikler bolsa, *n* nusgawy ýarymgeçirijilerde elektronlardyr.

Zona nazaryýetiniň esasynda ýarymgeçirijileriň deşikli elektrik geçirijiligini şeýle düşündirmek bolar.

Üç walentli garyndynyň goşulmagy netijesinde gadagan edilen zonanyň aşaky böleginde (*A* zonasynyň ýokarsynda) 0 °K temperaturada hiç hili elektronlar bolmadyk energetiki derejeler döreýär (*11.30-njy a surat*). Haçanda temperatura $T > 0$ K bolanda walentli (*A*) zonadan elektronlaryň akseptorly garyndynyň emele getiren dere-



11.30-njy surat. Akseptorly garyndynyň energetiki derejeleri jesine geçmekliginiň ähtimallygy artyp başlaýar (*11.30-njy b surat*). Sebäbi $E_a << \Delta E$. Walentli zonadaky elektronlaryň ýerleri boş galyp deşikli geçirijiniň döremegine şert döreýär.

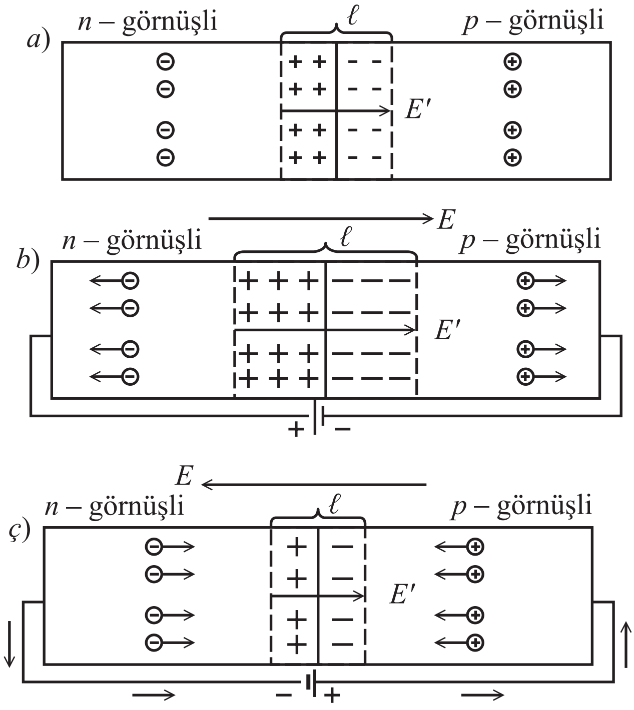
Şeýlelikde, ýarymgeçiriji kristalyna degişli garyndynyň az mukdaryny goşmak arkaly onuň ululygyny-da, hatda ýarymgeçirijiniň geçirijiliginiň görnüşini-de üýtgedip bolýar. Gerek bolan elektrik häsiýetli garyndyly ýarymgeçirijileri taýýarlamak esasy meseleleriň biri bolup durýar.

§ 11.19. Elektronly we deşikli ýarymgeçirijileriň kontakty (*p−n* geçiş)

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 (*11.31-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 bolup, elektronlar bolsa esasy däldir. Haçanda elektrik geçirijiligi boýunça iki dürli ($p-n$ – görnüşli) ýarymgeçirijiler galtaşanlarynda, bu galtaşan üst arkaly elektronly ýarymgeçirijiden erkin elektronlar p – oblasta tarap ($n \rightarrow p$) we deşikler bolsa garşylykly tarapa ($p \rightarrow n$) diffuziýa arkaly aralaşyp başlaýarlar. Netijede, araçäk gatlagyň p – ýarymgeçiriji tarapy otrisatel zarýadlanýar, n – ýarymgeçiriji tarapy bolsa, položitel, ýagny kontaktyň zonasynda «ikigat elektrik gatlagy» emele gelýär (*11.31-nji a surat*). Bu gatlakda dörän elektrik meýdanynyň E' güýjenmesi elektronlaryň $n \rightarrow p$ ugra baka deşikleriň bolsa, $p \rightarrow n$ ugra baka geçmeklerine päsgelçilik döredip başlaýar. Netijede, elektrik meýdanynyň E' güýjenmesiniň bellibir 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 potensiallarynyň tapawudy 10^{-1} *W* golaýdyr. Şeýle potensiallar tapawudyny (potensial päsgelçiligini) diňe ýokary temperaturalarda uly kinetik energiýalara eýe bolan elektronlar we deşikler ýeňip geçip biler. Bu gatlak kadaly temperaturada garşylygynyň örän uludygy 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.

Ýapyjy gatlagyň garşylygyny daşky elektrik meýdanyň kömegi bilen üýtgetmek mümkin. Geliň, $p-n$ geçişli ýarymgeçirijini elektrik zynjyryna utgaşdyralyň (*11.31-nji b surat*). Ilki bilen *p* – görnüşli ýarymgeçirijiniň potensialy otrisatel bolar ýaly, *n* – görnüşli ýarymgeçirijiniňki bolsa položitel bolar ýaly edip, tok çeşmesiniň polýuslaryna birikdireliň. Onda daşky meýdanyň, *E* güýjenmesi kontaktdaky elektrik meýdanynyň *E'* güýjenmesi bilen ugry boýunça gabat gelýär.

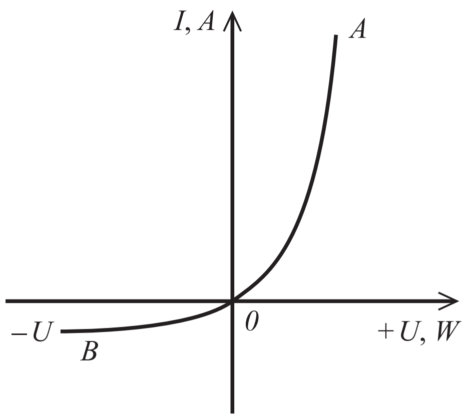


11.31-nji surat. *p* we *n* – görnüşli ýarymgeçirijileriň kontakty arkaly elektrik togunyň geçişi

n – oblastdaky erkin elektronlar tok çeşmesiniň položitel polýusyna tarap, p – oblastdaky deşijekler bolsa – otrisatel polýusyna 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 ýarymgeçirijide bolsa deşijikleriň konsentrasiýalarynyň az bolandygy sebäpli, $n–p$ – geçişiň geçirijiligi gaty az bolup, garşylygy diýseň köpdür. Praktiki togy geçirmeýän geçişiň bu ugruna ters geçiş diýilýär.

$p–n$ – geçişe berikdirilen tok çeşmesiniň polýuslaryny üýtgedeliň (*11.31-nji ç surat*). Onda daşky meýdanyň E güýjenmesiniň ugry E′ güýjenmäniň ugruna garşylykly ugrukdyrylandyr. Erkin elektronlar we deşijikler biri-birlerine garşy orunlaryny üýtgedýärler. Ýapyjy gatlak kiçelýär, onuň garşylygy azalýar. Daşky goýlan naprýaženiýäniň bellibir 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. $p–n$ – geçişiň şu häsiýetini üýtgeýän togy göneltmek üçin ulanýarlar. Ýarym periodyň dowamynda, haçanda p – görnüşli ýarymgeçirijiniň potensialy položitel bolanda, tok $p–n$ geçişiň üsti bilen erkin geçýär.



11.32-nji surat. p – n geçişiň wolt-amper häsiýetnamasy

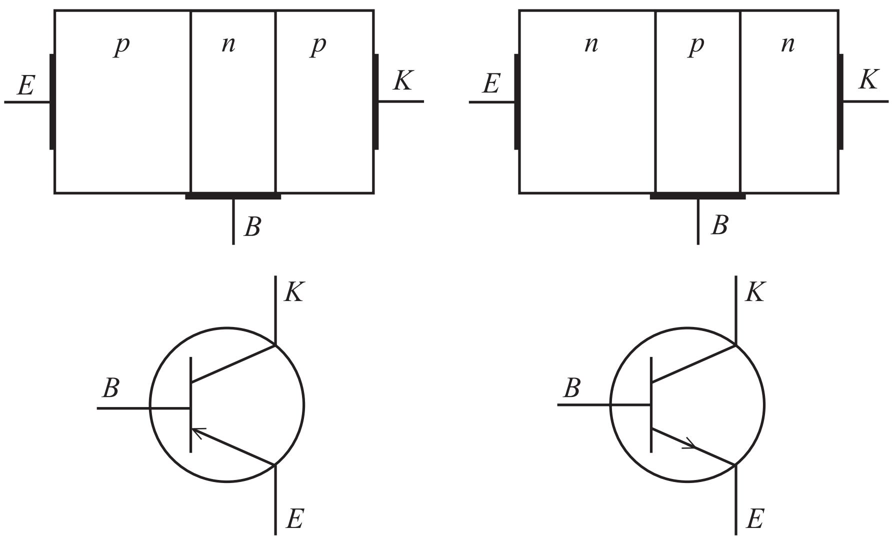
Indiki ýarym periodda – tok praktiki nola deňdir.

(11.32-nji suratda $p-n$ geçişiň (ýarymgeçiriji diodyň) üstünden geçýän toguň oňa goýlan naprýaženiýä baglylygynyň (wolt-amper häsiýetnamasynyň) çyzgysy görkezilendir. Bu ýerde egriniň 0 A şahasy göni geçişe, 0 B bolsa – ters geçişe degişlidir.

$p-n$ geçişiň 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 görnüşi bardyr: $p-n-p$ we $n-p-n$ – görnüşler (11.33-nji suratda olaryň görnüşleri we şertli belgilenişleri görkezilendir).

Tranzistoryň ortaky bölegine baza (esas) diýilýär we ol üç elektrodly elektron lampalaryndaky (triodlardaky) toruň roluny ýerine ýetirýär. Üstki bölekleriň birine emitter, beýlekisine – kollektor diýilýär, emitter trioddaky katodyň, kollektor bolsa anodyň roluny ýerine ýetirýär.

Tranzistorlar häzirkizaman tehnikasynda giňden ulanylýarlar. Olar ylmy, senagat we durmuş abzallarynyň elektrik zynjyrlarynyň köpüsinde elektron çyralarynyň ornuny eýelediler. Tranzistorly radiopriýomnikler döredi. Tranzistorlaryň, ýarymgeçirijili diodlar ýaly,



11.33-nji surat. Tranzistorlaryň gurluşlary we şekillendirilişleri 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 naprýaženiýeleri-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, ýangyny duýduryjy abzallar hökmünde hem ulanylýarlar.

Fotorezistorlar. Ýarymgeçirijileriň elektrik geçirijiligi diňe gyzdyrylanda 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.

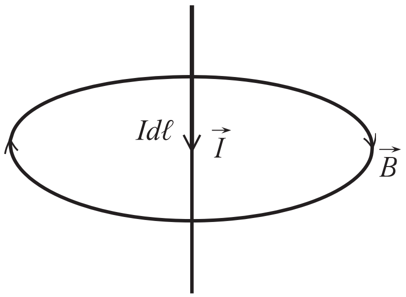
ELEKTROMAGNIT MEÝDANY

§ 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 täsir etmeýär. Magnit täsiri diňe hereket edýän zarýadlara (we üýtgeýän 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 özaratäsirleşýärler.

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 polýusyndan demirgazyk polýusyna tarap ugry bilen gabat gelýär. Daniýa fizigi H. K. Erstediň 1820-nji ýylda geçiren tejribesi netijesinde gönüçyzykly simden



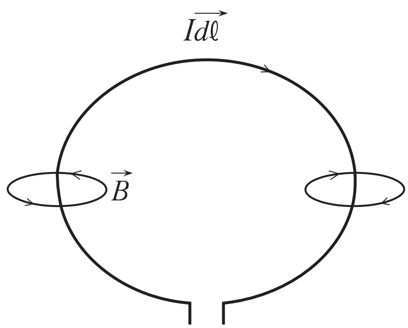
12.1-nji surat. Göni toguň magnit induksiýasy akýan I toguň magnit meýdanynyň güýç çyzyklarynyň şol sime perpendikulýar bolan we merkezleri simiň üstünde ýatýan töwerekleri emele getirýändigi anyklanyldy.

Güýç çyzyklarynyň ugry sag hyryň ýa-da sag eliň 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 aýlanmaklary netijesinde emele gelýär.

Maddanyň magnit täsirleri atomlardaky we molekulalardaky örän kiçi aýlaw toklary bilen baglanyşyklydyr.

§ 12.2. Amper güýji. Çep eliň düzgüni

Tokly geçirijileriň özara magnit täsirini ilkinji bolup Amper öwrenýär. Birinji tokly geçirijiniň magnit meýdany ikinji tokly geçirijä bellibir güýç bilen täsir edýär we ikinji tokly geçirijiniň magnit meýdany birinji tokly geçirijä täsir edýär. Magnit meýdanynyň tokly geçirijä edýän täsir güýjüne Amper güýji diýilýär.

Geçirilen tejribeler Amper güýjüniň tokly geçirijä täsir edýän magnit meýdanynyň induksiýasynyň wektorynyň modulyna proporsionaldygyny görkezýär. Ondan başga-da, Amper güýjüniň geçirijiden akýan toga baglylygy kesgitlenildi. Toguň güýjüniň ulalmagy bilen Amper güýji hem ulalýar. Amper güýji geçirijiniň uzynlygyna, $\vec{B}$ wektor 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 $\vec{F}$ güýji şeýle şekillendirip bolar (*12.3-nji surat*).

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.

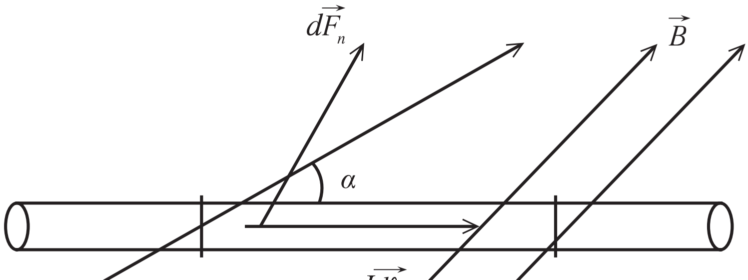
Toguň elementi bilen α burçuny emele getiren B magnit induksiýaly magnit meýdany tarapyndan üstünden güýji I deň bolan elektrik togy akýan $d\ell$ uzynlykly geçirijä täsir edýän F güýjüň moduly şeýle tapylýar:

$$dF = BId\ell\sin\alpha. \tag{12.1}$$

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



12.3-nji surat. Magnit meýdanynyň tokly geçirijä täsiri 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 Amper güýjüniň ugruny görkezýär.

(12.1) aňlatmadan ℓ uzynlykly gönüçyzykly geçiriji üçin (eger $\alpha=90°$ bolsa) alarys:

$$\vec{F}=\vec{B}I\vec{\ell}. \tag{12.2}$$

Bu aňlatmadan magnit meýdanynyň induksiýasynyň fiziki manysyny anyklap bolýar.

Magnit meýdanynyň induksiýasynyň moduly üstünden 1 A tok akýan 1 metr uzynlykly göni geçirijä magnit meýdany tarapyndan täsir edýän güýje san taýdan deň bolan ululykdyr. Eger täsir edýän güýç 1 Nýutona deň bolsa, onda magnit meýdanynyň induksiýasynyň wektorynyň moduly 1 Tesla deň diýip kabul edilýär.

§ 12.3. Lorens güýji

Ýokarda belleýşimiz ýaly, magnit meýdanynda ýerleşen tokly geçirijä Amper güýji täsir edýär. Elektrik togunyň zarýadlanan bölejikleriň tertipleşdirilen hereketidigini göz öňünde tutsak, onda Amper güýji zarýadlanan bölejiklere magnit meýdany tarapyndan täsir edýän güýçleriň jemidir diýip aýdyp 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 bilşimiz ýaly, toguň güýji:

$$I = \frac{q}{t},$$

bu ýerde t – q zarýadyň traýektoriýanyň ℓ uzynlykly bölegini geçýän wagty. Şonuň üçin Lorens güýji:

$$F = B\frac{q}{t}l\sin\alpha. \tag{12.3}$$

Ýöne:

$$\upsilon = \frac{l}{t}, \tag{12.4}$$

bu ýerde υ – zarýadlanan bölejigiň hereketiniň tizligi, α – tizligiň wektory bilen magnit induksiýasynyň wektorynyň arasyndaky burç. Onda

$$F = qB\upsilon\sin\alpha. \tag{12.5}$$

Bu ýerde F, υ we B ululyklaryň ugurlary özara perpendikulýardyrlar.

Lorens güýjüniň ugruny çep eliň düzgüni boýunça kesgitläp bolar. Düzgündäki güýjüň ugry diýip (eger zarýad položitel bolsa) υ we B wektor ululyklaryň köpeltmek hasylynyň emele getirýän wektorynyň ugruny kabul etmeli. Eger hereket edýän zarýad otrisatel bolsa, onda güýjüň ugry bilen tizligiň ugry gapma-garşylykly bolýar.

Lorens güýjüniň υ 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:

$$\frac{m\upsilon^2}{r} = Bq\upsilon \quad \text{ýa-da} \quad r = \frac{m\upsilon}{qB}, \tag{12.6}$$

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 tizligine bolan gatnaşygyna deň:

$$T = \frac{s}{\upsilon} = \frac{2\pi r}{\upsilon}.$$

(12.6) aňlatmany göz öňünde tutsak,

$$T = \frac{2\pi m}{qB}. \qquad (12.7)$$

Diýmek, bölejigiň magnit meýdanynda aýlanma periody zarýadyň q ululygyna we B magnit induksiýasyna ters baglydyr.

XIII bap

ELEKTROMAGNIT INDUKSIÝASY

§ 13.1. Elektromagnit induksiýasy hakynda Faradeýiň kanuny. Lensiň düzgüni

Elektrik togunyň töwereginde magnit meýdanynyň döreýändigi bellidir. Bu hadysa magnit meýdanynyň kömegi bilen tok döretmek synanyşyklaryna itekledi. 1831-nji ýylda iňlis alymy Faradeý elektromagnit induksiýasy hadysasyny açdy. Bu kanuna laýyklykda, elektrik geçiriji ýapyk konturyň giňişligindäki magnit akymy

$$\Phi = B \cdot S \qquad (13.1)$$

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 zynjyrda induksiýanyň *EHG*-iň ýüze çykandygyny aňladýar. Onda bu *EHG*:

$$\varepsilon_i \sim \frac{d\Phi}{dt}. \tag{13.2}$$

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 kesgitlenýändigi subut edilipdi. Onda:

$$\varepsilon_i = -\frac{d\Phi}{dt} \tag{13.3}$$

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.

Induksiýanyň EHG-si energiýanyň saklanma kanunyndan alynýar:

$$\varepsilon IdA = IYdt + d\Phi dt. \tag{13.4}$$

Bu ýerden

$$I = \frac{\varepsilon - {d\Phi}/{dA}}{R}. \tag{13.5}$$

Soňky formulany doly zynjyr üçin Omuň $I = \varepsilon / R$ kanuny bilen deňeşdirip alarys:

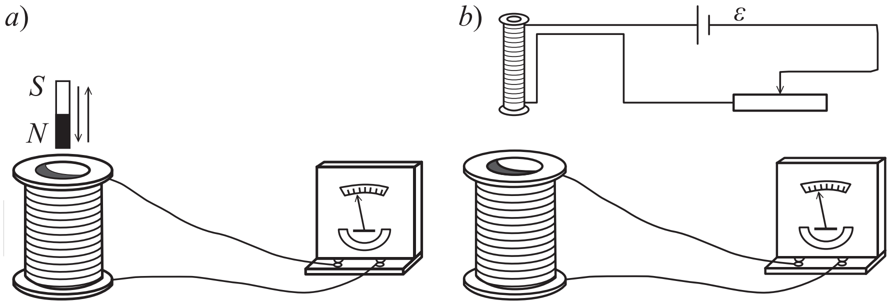
$$\varepsilon = -d\Phi / dt. \tag{13.6}$$

Elektromagnit induksiýasynyň ölçeg birligi:

$$\left[\frac{d\Phi}{dt}\right] = \frac{Wb}{s} = \frac{Tl \cdot m^2}{s} = \frac{N \cdot m^2}{A \cdot m \cdot s} = \frac{J}{A \cdot s} =$$

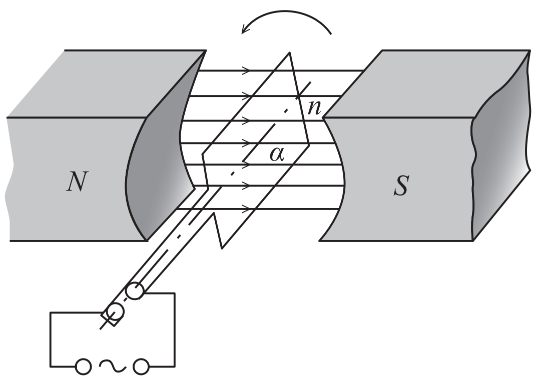
$$= \frac{A \cdot W \cdot s}{A \cdot s} = W. \tag{13.7}$$

Elektromagnit induksiýa hadysasy mehaniki energiýany elektrik energiýasyna öwürmekde ulanylýar.



13.1-nji surat. Elektromagnit induksiýa 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*).

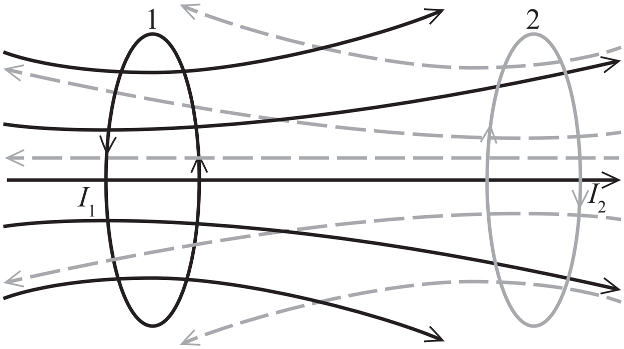


13.2-nji surat. Elektromagnit induksiýa effekti esasynda elektrik toguny öndürijiniň (generatoryň) işleýiş esasy

§ 13.2. Induktiwlik. Öz-özünde induksiýa. Özara induksiýa

Utgaşan (ýapyk) geçirijide akýan toguň öz töwereginde magnit meýdanyny döredýändigini bilýäris. Bu magnit meýdanynyň geçirijä ilişen Φ magnit akymy:

$$\Phi = LI \qquad (13.8)$$



13.3-nji surat. Üýtgeýän I_1 we I_2 halka görnüşli tokly geçirijilerde özara induksiýa hadysasynyň ýüze çykyşy

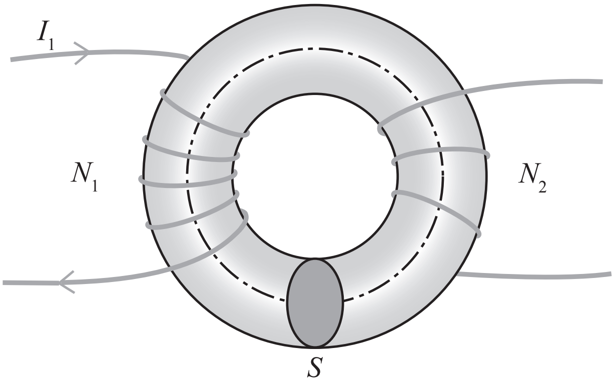
I tok güýjüne bagly. Bu ýerde *L* ululyga konturyň (ýapyk geçirijiniň) induktiwligi diýilýär. Geçirijide akýan tok üýtgände onda döreýän induksiýanyň *EHG*-ine öz-özünden induktiwlik diýilýär.

$$[L] = \frac{Wb}{A} = \frac{W \cdot s}{A} = Gn;(Genri). \tag{13.9}$$

Tükeniksiz uzyn (uly uzynlykly) solenoidiň doly magnit akymy

$$\Phi = \Phi_O N = NBS = \mu_O \mu \frac{N_1 N_2}{l} S. \tag{13.10}$$

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*).



13.4-nji surat. Özara induktiwligiň 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 induktiwlikli 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:

$$dA = Id\Phi = LIdI, \qquad (13.11)$$

bolar. Onda Φ magnit akymyny döretmek üçin gerek bolan iş:

$$A = \int_O^I LIdI = \frac{LI^2}{2} \qquad (13.12)$$

bolar.

Eger hususy halda, ýagny takyk şertde, magnit meýdany uzyn tegegiň içinde bolup, onuň hemme ýeri birmeňzeş bolsa, bu iş:

$$W = \frac{1}{2}\mu_O\mu\frac{N^2I^2}{l}S, \qquad (13.13)$$

energiýa deň bolar.

Onda uzyn tegekde (solenoidde) I tok güýjüniň döredýän magnit induksiýasynyň

$$B = \frac{\mu_O NI}{l} \qquad (13.14)$$

bolýandygyny hem-de

$$B = \mu_O\mu H \qquad (13.15)$$

aňlatmany nazarda tutsak:

$$W = \frac{B^2}{2\mu_O\mu}V = \frac{BH}{2}V \qquad (13.16)$$

gelip çykýar. Bu ýerde:

$$V = S \cdot l \qquad (13.17)$$

uzyn tegegiň (solenoidiň) göwrümi. Onda solenoidiň energiýasynyň göwrüm dykyzlygy:

$$\omega = \frac{W}{V} = \frac{B^2}{2\mu_O\mu} = \frac{\mu_O\mu H^2}{2} = \frac{BH}{2} \qquad (13.18)$$

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 herekete 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 Ш – görnüşli özenli elektromagniti üçin bu güýç şeýle kesgitlenýär.

$$F = 4 \cdot 10^5 B^2 S, \quad B = 0,4\pi \frac{IN}{l}\mu_O\mu. \qquad (13.19)$$

Ol ferromagnit häsiýetli şaýlary hereketlendirmek üçin (elektromagnit muftasy we ş.m.), ikilenç ulanyljak, zyňlan 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 *Ш* – ýa-da *П* – şekilli polat gatlaklarda) *Φ* magnit akymyny döredýär. Elektromagnit induksiýasy kanunynyň deňlemesine laýyklykda, birinji tegekde döreýän tok güýji:

$$\varepsilon_1 - \frac{d}{dt}(N_1\Phi) = I_1R_1, \tag{13.20}$$

aňlatmadan kesgitlenýär. Ýygy-ýygydan (çalt) üýtgeýän toklarda $IR=0$ bolýanlygy sebäpli:

$$\varepsilon_1 \approx N_1\frac{d\Phi}{dt}. \tag{13.21}$$

Ikinji tegekde döreýän induksiýanyň *EHG*-i bolsa, degişlilikde:

$$\varepsilon_2 \approx -N_2\frac{d\Phi}{dt}, \tag{13.22}$$

bolar. Bu iki aňlatmalardan:

$$\varepsilon_2 = -\frac{N_2}{N_1}\varepsilon_1 \tag{13.23}$$

gelip çykýar. Minus alamaty birinji we ikinji tegeklerdäki *EHG*-leriň fazalarynyň garşylyklydygyny görkezýär.

Transformatoryň tegekleriniň ikisinde-de toguň kuwwatlaryny deň hasap etsek:

$$\varepsilon_2 I_2 \approx E_1 I_1, \tag{13.24}$$

fazalaryň ugurlaryny hasaba almasak, san bahalaryň gatnaşygy:

$$k = \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} \approx \frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1} \tag{13.25}$$

ululyga transformatoryň öwürme (transformasiýa) koeffisiýenti diýilýär. $k > 1$ bolanda transformator ýokarlandyryjy bolýar, ýagny ulanyja berilýän napräýaženiýe transformatoryň birinji sargylaryndakydan uly bolýar. $k < 1$ bolanda peseldiji transformator bolýar. Onda ulanyja berilýän napýaženiýe tok çeşmesiniň naprýaženiýesinden kiçi bolýar.

Magnit induksiýa hadysasy «magneto» atly gurluşda galyndyly magnit meýdanynyň hasabyna EHG döretmekde ulanylýar. Bu gurluş uly bolmadyk kuwwatly içinden ýandyrylýan hereketlendirijileri elektrik togy bilen üpjün etmekde ulanylýar.

Starteri (içinden ýandyrylýan hereketlendirijini işe başladyjy gurluşy) işe goşujyda (wtýagiwaýuşaýa katuşka – *WK*) hemişelik toguň hasabyna hemişelik magnit meýdanyny döretmegiň hasabyna elektromagnit ýüze çykarylýar. Elektromagnit starteri elektrikhereketlendirijini 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 induksiýa 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 duýdurýar.

Uly tekizlikli bütewi geçirijilerde köwlenme induksion (Fuko) toklary ol geçirijileri gyzdyrmak üçin ulanylýarlar. Bu esasda metal erediji elektrik peçleri hem-de öý hojalygynda ulanylýan mikrotolkun (*SWÇ*-) peçleri işleýärler.

Elektromagnit induksiýa 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 maglumata laýyk tertipleýär. Habar okalanda bu maglumatlar okaýan başjagazda (golowkada) degişli magnit meýdanyny we induksion togy döredýär. Ol tok bolsa, degişli şekili ýa-da sesi ýüze çykarýar.

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, eredýärler.

XIV bap

ÝAGTYLYGYŇ TEBIGATY

§ 14.1. Ýagtylygyň tebigatyna bolan garaýyşlar

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 Gýuýgens tarapyndan esaslandyrylan tolkun taglymaty. Korpuskulýar taglymata laýyklykda, ýagtylyk çeşmeden uçup çykýan örän uly tizlikli bölejikleriň (korpuskulalaryň) üznüksiz akymydyr. Tolkun taglymatyna laýyklylykda, ýagtylyk çeşmeden uly tizlik bilen ýaýraýan tolkundyr. Tolkun älemi dolduryp duran hyýaly maýyşgak sredada – «dünýä efirinde» ýaýraýar diýlip hasap edilipdir. Soňra, 1881-nji ýylda amerikan fizigi A.A. Maýkelson ýagtylygyň ýaýramagy üçin maýyşgak gurşawyň hökman däldigini, netijede, «dünýä efiriniň» ýokdugyny subut etdi. Şeýlelikde, bu taglymat çäkli bolup galdy. Öňe sürlen bu iki taglymatlar ýagtylygyň serpikmegini we döwülmegini esaslandyryp bilseler-de, interferensiýa, difraksiýa, polýarlanma ýaly hadysalary fiziki esasda düşündirmek üçin ýeterlik bolmadylar.

Optikanyň esasy kanunlary – ýagtylygyň gönüçyzykly ýaýramagy, serpikmegi, döwülmegi gadym döwürlerden bäri belli bolupdyrlar. Ýagtylygyň hökman göni çyzyk boýunça ugrukdyrylýanlygyny b.e. öň 430-njy ýylda Platon, bir dury maddadan ikinjä geçende döwlüp, ýene-de gönüçyzyk boýunça ugrugýandygyny Aristotel we Ptolomeý b.e. öň 350-nji ýylda kesgitläpdirler.

Ýagtylygyň gönüçyzykly ýaýramak kanuny: birmeňzeş sredada ýagtylyk gönüçyzykly ýaýraýar.

Nokatlanç ýagtylyk çeşmesinden çykýan şöhlelenmäniň inçe konusyny çyzyk hökmünde kabul edip, oňa şöhle diýýärler.

Şöhlelenmäniň 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 ýagtylygyň tizligine deň bolan tizlik bilen ýaýraýandygy subut edildi. Bu bolsa, ýagtylygyň elektromagnit tolkundygy barada netije çykarmaga şert döretdi.

Ýagtylygyň tizliginiň (c = 300 000 *km/s*) örän ululygy sebäpli, ony tejribede kesgitlemek kyn. 1676-njy ýylda Rýomer Ýupiteriň hemralarynyň üstünde Gün tutulmasynyň (garaňkyda bolmalarynyň) gözegçilikleri netijesinde ilkinji gezek ýagtylygyň tizligini kesgitlemäge synanyşdy. Şonda ol ýagtylygyň tizligini 215 000 *km/s* barabar görnüşinde ölçedi. 1727-nji ýylda Bredli bu ululygyň 303 000 *km/s*, 1849-njy ýylda Fizo 313 000 *km/s* deňdigini ölçeglerde görkezdiler. Häzirki döwürde wakuumda ýagtylygyň tizligi

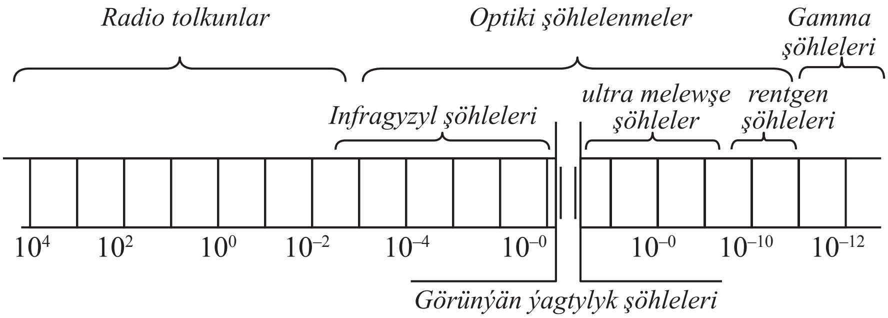
$$c = 299792{,}5 \pm 0{,}1\ km/s \tag{14.1}$$

hasap edilýär.

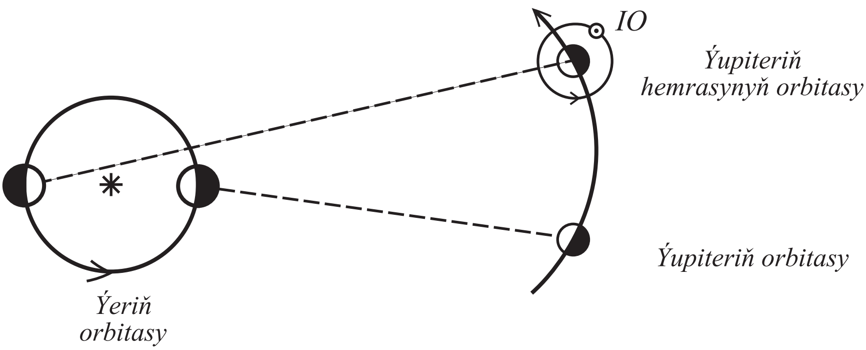
Makswelliň teoriýasyna görä, ýagtylyk – elektromagnit tolkuny, sredada

$$\upsilon = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon\mu}}, \tag{14.2}$$

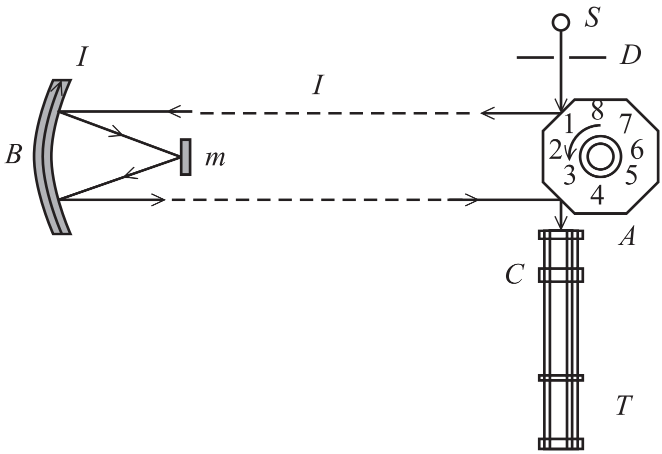
tizlik bilen ýaýraýar.



14.1-nji surat. Elektromagnit tolkunlarynyň şkalasy



14.2-nji surat. Rýemeriň tejribesinde ýagtylygyň tizliginiň kesgitlenilişi



14.3-nji surat. Ýagtylygyň tizliginiň kesgitlenilişi

Elektromagnit tolkunlary – özara perpendikulýar ýaýraýan elektrik we magnit tolkunlarydyr. Olar giňişlikde garmoniki üýtgeýän elektrik we magnit meýdanlary bolup, Makswelliň deňlemeleri bilen aňladylýar:

$$\oint_L \vec{E}d\vec{l} = -\int_S \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} d\vec{S}; \quad \oint_S \vec{B}d\vec{S} = 0;$$

$$\oint_L \vec{H}d\vec{l} = \int_S \left(\vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}\right) d\vec{S}; \quad \oint_S \vec{D}d\vec{S} = \int_V \rho dV, \tag{14.3}$$

bu ýerde $\vec{D}$ – elektrik meýdanynyň täsir güýjüni aňladýan, elektrik süýşme wektory onuň ölçeg birligi (Kl/m^2), $\vec{B}$ – magnit induksiýasy, ýagny magnit meýdanynyň güýç häsiýetnamasydyr, ölçeg birligi 1 *Tesla* = 1 $N/(A \cdot m)$, $\vec{E}$ – elektrik meýdanynyň güýjenmesi, $\vec{H}$ – magnit meýdanynyň güýjenmesi, $\int_L, \int_S$ – degişlilikde, kontur (daşky çäk) hem-de meýdan boýunça alynýan integrallar, $\vec{j}$ – geçirijilik togunyň dykyzlygy, ölçeg birligi (A/m^2), ρ – toguň göwrüm dykyzlygy, ölçeg birligi (A/m^3), $\frac{\partial \vec{D}}{dt}$ – süýşme togunyň dykyzlygy.

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:

$$\oint_L \vec{E}d\vec{l} = 0; \qquad \oint_S \vec{B}d\vec{S} = 0;$$

$$\oint_L \vec{H}d\vec{l} = I. \qquad \oint_S \vec{D}d\vec{S} = 0. \tag{14.5}$$

Wektor derňewlerinde Stoksyň we Gaussyň

$$\oint_L \vec{A}d\vec{l} = \int_S rot\vec{A}d\vec{S},$$

$$\oint_S \vec{A}d\vec{S} = \int_V div\vec{A}dV \qquad (14.6)$$

teoremalaryna esaslanyp, Makswelliň integral deňlemeler sistemasyny differensial görnüşde aňladyp bolýar:

$$rot\vec{E} = -\frac{\partial\vec{B}}{\partial t}, \quad div\vec{D} = \rho;$$

$$rot\vec{H} = \vec{j} + \frac{\partial\vec{B}}{\partial t}, \quad div\vec{B} = 0. \qquad (14.7)$$

Elektromagnit teoriýasynda we tolkun optikasynda bu deňlemeler mehanikada Nýutonyň hereket kanunlary ýaly ähmiýete eýedirler.

Bu deňlemelerden elektrik meýdanynyň çeşmesiniň elektrik zarýadlary ýa-da wagta görä üýtgeýän magnit meýdany, magnit meýdanynyň bolsa hereketlenýän elektrik zarýadlary hem-de üýtgeýän elektrik meýdany tarapyndan döredilýändigi ýüze çykýar. Tebigatda elektrik zarýadlary bardyr, magnit zarýadlary ýokdur.

(14.3) deňlemeleriň birinjisi elektrik *E* güýjenmesiniň we magnit meýdanynyň *B* induksiýasynyň özara baglanyşygyny aňladyp, ol Faradeýiň tejribe üsti bilen açan elektromagnit induksiýasy hadysasynyň umumylaşdyrmasydyr.

Ikinji deňleme magnit zarýadlarynyň ýokdugyny görkezýär, ýagny elektromagnit meýdanyndaky islendik hyýaly (ideal) üst boýunça 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 zarýadlaryň ρ mukdary baglanyşdyrylýar. Ol Ostrogradskiniň we Gaussyň bütewi üstden geçýän elektrik süýşme akymynyň üstüň içindäki erkin elektrik zarýadlary bilen kesgitlenýändigi baradaky teoremasyny umumylaşdyrýar.

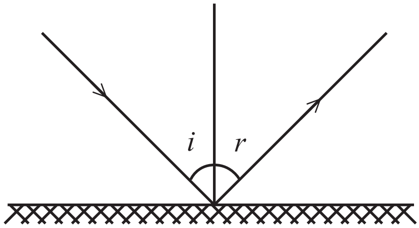
Makswelliň teoriýasynyň esasy netijeleriniň biri – elektromagnit tolkunlarynyň barlygydyr.

§ 14.2. Geometriki optika

Adamyň gözleriniň kabul edip bilýän ýagtylyk tolkunlarynyň tolkun uzynlyklarynyň örän gysgalygy ($7{,}6 \cdot 10^{-7} – 3{,}8 \cdot 10^{-7}\ m$) sebäpli, ony şöhle diýip atlandyrylýan käbir çyzyk boýunça ýaýraýar diýip hasap edýärler. Optikanyň bu bölümine geometriki ýa-da şöhle optikasy diýilýär. Geometriki optikanyň esasy dört sany kanunlary bar: optiki birmeňzeş sredada ýagtylygyň gönüçyzykly ýaýramak kanuny; ýagtylyk şöhleleriniň özara baglanyşykly däldigi baradaky kanun; (bu kanun diňe şöhle optikasynda dogry); ýagtylygyň serpikme kanuny; ýagtylygyň döwülme kanuny.

Ýagtylygyň gönüçyzykly ýaýramak kanuny: optiki birmeňzeş sredada ýagtylyk gönüçyzykly ýaýraýar. Optiki birmeňzeş sreda – bu islendik ugur boýunça, islendik ýerinde ýagtylygyň ýaýramak tizligi deň bolan sredadyr. 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 baglanyşykly däldigi baradaky kanun ýagtylyk şöhleleri özara kesişen ýerlerinde biri-birine täsir ýetirmeýärler diýmekdir. Şöhleleriň kesişmegi olaryň ýaýramagyna hiç hili täsir etmeýär, 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 krossmo-



14.4-nji surat. Ýagtylygyň serpikme kanuny

dulýasiýa 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:

$$\angle r = \angle i.$$

Dördünji kanun – ýagtylygyň bir sredadan başga sreda geçende döwülme kanuny. Oňa laýyklykda, düşýän şöhle, döwlen şöhle we ol şöhläniň düşýän nokadyna inderilen perpendikulýar bir tekizlikde ýatýarlar; düşme burçunyň sinusynyň döwülme burçunyň sinusyna bolan gatnaşygy berlen iki sreda üçin hemişelikdir:

$$\frac{\sin i}{\sin \gamma} = n_{21}, \tag{14.8}$$

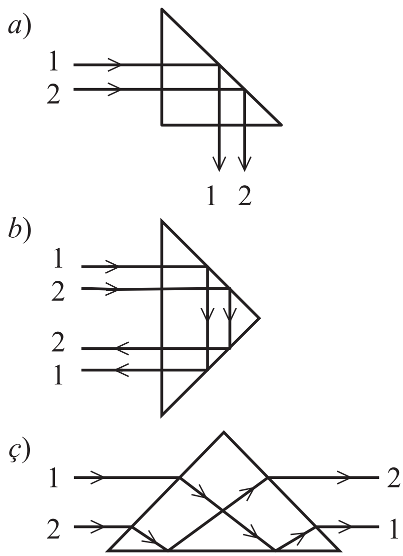
bu ýerde n_{21} – ikinji sredanyň birinji sreda görä döwme görkezijisi. Bu döwme görkeziji şol iki sredanyň absolyut döwme görkezijileriniň gatnaşygyna deňdir:

$$n_{21} = \frac{n_2}{n_1}. \tag{14.9}$$

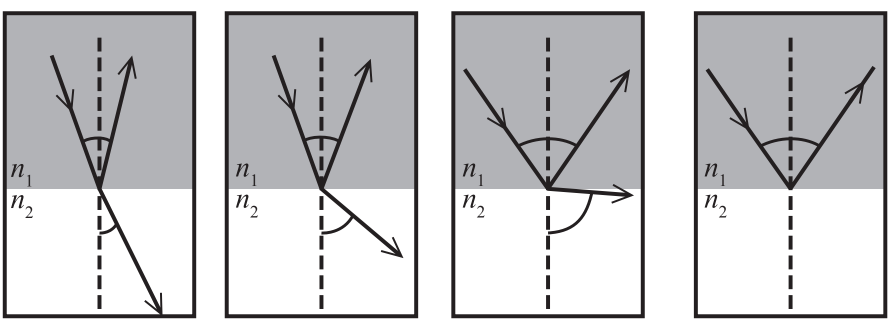
Sredanyň absolýut döwme görkezijisi diýip, ýagtylygyň wakuumdaky (howasyz giňişlikde) tizliginiň ($c = 300000\frac{km}{s}$) şol sredadaky faza (v) tizligine bolan gatnaşygyna aýdylýar:

dan howa geçende, uly burça döwülýär. Aýnanyň döwülme görkezijisi $n_{\text{aýna}} = 1{,}5$; howanyňky bolsa $n_{\text{howa}} = 1{,}0$. Şonuň üçin, $\arcsin\frac{1}{1{,}5} = 42^\circ$ burç bilen aýnadan çykmaly şöhle doly yzyna serpikmä sezewar bolýar.

Bu hadysa refraktometrlerde (döwülme görkezijilerini kesgitleýjilerde), binokllarda (dürbülerde), periskoplarda (bukyda, suwuň aşagynda we ş.m. ýokaryny görmek üçin ulanylýan ýörite enjamlarda), ýagtylygy geçiriji maýyşgak aýna taýajyklaryndan ybarat toplumly ýagtylyk geçirijilerde ulanylýar.



14.6-njy (a) surat. Ýagtylygyň üçgranly prizmada döwülmegi



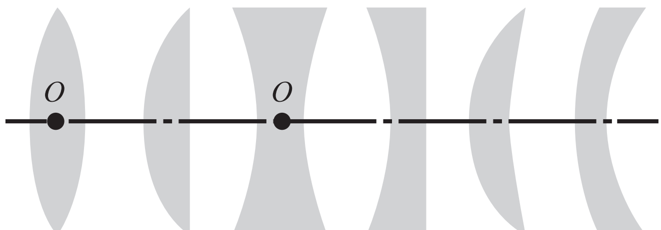
14.6-njy (b) surat. Ýagtylygyň doly serpikmesi

§ 14.3. Ýuka linzalar. Mikroskop

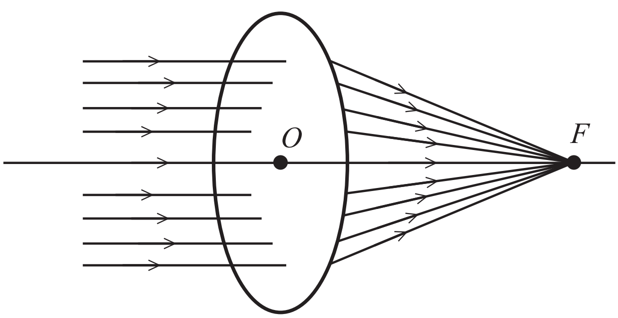
Iki tarapy ýylmanan üstler bilen çäklenen optiki taýdan dury jisime linza diýilýär. Adatça, olaryň bir üstleri sferik (şaryň bölegi) ýa-da silindrik, beýlekisi bolsa sferik ýa-da tekiz bolýarlar. Linzalar üstlerine düşen ýagtylyk şöhlelerini döwüp, şekil emele getirmäge ukyplydyrlar. Adatça, olar aýnadan, kwarsdan, kristallardan, plastmassalardan we ş.m. dury (ýagtylygy geçirýän) maddalardan ýasalýar. Daşky görnüşleri boýunça linzalar şeýle toparlara bölünýärler:

1) iki taraplary güberçek;
2) bir tarapy güberçek, beýlekisi tekiz;
3) iki tarapy oýuk;
4) bir tarapy oýuk, beýlekisi tekiz;
5) bir tarapy güberçek, beýlekisi oýuk;
6) bir tarapy oýuk, beýlekisi güberçek.

Linzanyň galyňlygy onuň üst radiuslaryndan örän kiçi bolsa, oňa ýuka linza diýilýär. Islendik linzanyň optiki merkezi bolýar. Linzanyň



14.7-nji surat. Linzalaryň görnüşleri



14.8-nji surat. Güberçek linzada parallel şöhleleriň döwlüşi üstleriniň egrilik merkezlerinden geçýän gönüçyzyga linzanyň baş optiki oky diýilýär. Baş optiki okuň üstünde ýatýan optiki merkezden geçýän ýagtylyk şöhleleri linzadan döwülmän geçýärler.

Iki tarapy güberçek linzalar ýygnaýjy linzalar bolýar. Onuň üstüne düşýän parallel ýagtylyk şöhleleri linzadan geçip, bir F nokatda jemlenip geçýärler. Ol F nokada linzanyň baş fokusy diýilýär. Linzanyň merkezinden F nokadyna çenli aralyga linzanyň fokus aralygy diýilýär. Linzanyň F fokus aralygynyň onuň geometriki ölçeglerine we döwme görkezijisine baglylygyna ýuka linzanyň formulasy diýilýär:

$$\frac{1}{F} = (n-1)\left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}\right). \tag{14.14}$$

Bu ýerden

$$n = \frac{n_2}{n_1},$$

ýagny n_1 – sredanyň absolýut döwme görkezijisi, n_2 – linzanyň absolýut döwme görkezijisi;

R_1 we R_2 – linzanyň üstleriniň egrilik radiuslary, F – linzanyň fokus aralygy.

Iki tarapy oýuk linzanyň üstüne düşýän parallel şöhleler linzadan geçende, dargaýarlar. Ol şöhleleriň hyýaly (ideal) dowamlary linzanyň şöhle gelýän tarapynda bir nokatda ýygnanýarlar. 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 tükeniksize deň hasap edilýär. Eger linzanyň bir tarapy oýuk, beýleki tarapy güberçek bolsa, oýuk tarapynyň egrilik radiusy minus alamaty bilen alynýar. Galyňlygy egrilik radiuslaryndan köp kiçi bolan linzalara ýuka linzalar diýilýär. Ýokarda belleýşimiz ýaly, linzalaryň optiki merkezinden geçýän ýagtylyk şöhleleri döwülmän geçýärler. Linzanyň optiki merkezinden geçýän gönüçyzyga linzanyň baş optiki oky diýilýär. Linzanyň merkezinden baş optiki oka perpendikulýar geçýän tekizlige linzanyň baş tekizligi diýilýär:

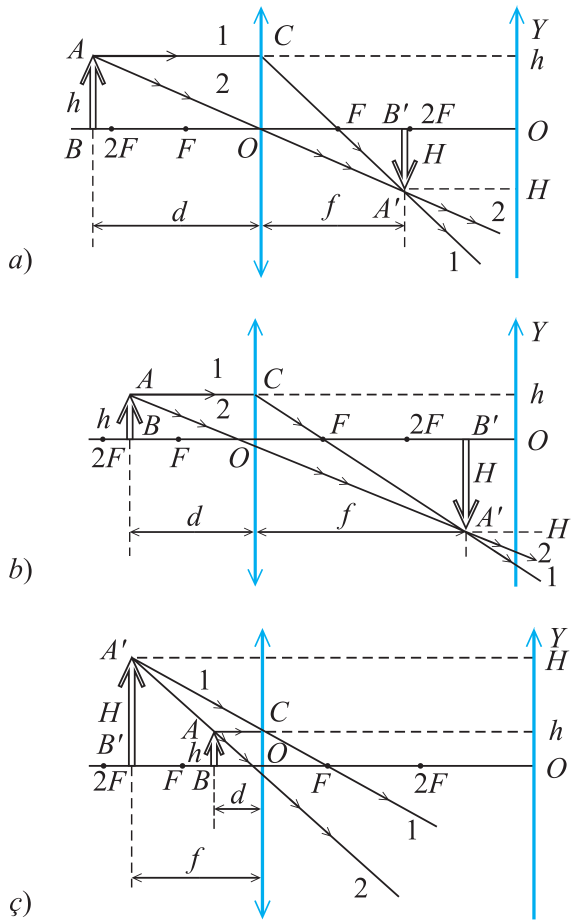
$$D = \frac{1}{F}, \tag{14.15}$$

ululyga linzanyň optiki güýji diýilýär. Onuň ölçeg birligi dioptriýa. 1 dioptriýa fokus aralygy 1 metr bolan linzanyň optiki güýjüdir.

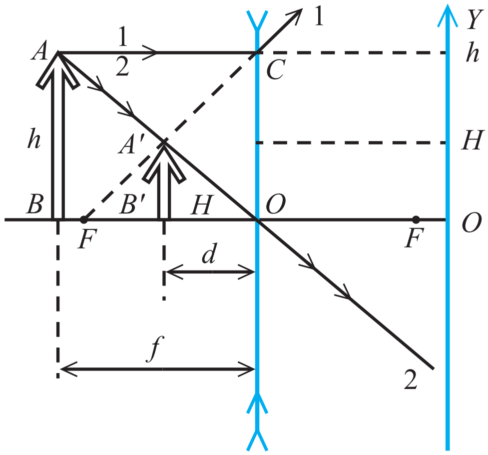
Ýygnaýjy linzanyň optiki güýji položitel, dargadyjy linzanyň optiki güýji otrisateldir:

$$D = \frac{1}{F} = (n-1)\left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}\right). \tag{14.16}$$

Linzalarda predmetiň (jisimiň) şekili şeýle gurulýar:



14.9-njy surat. Linzalarda şekiliň gurluşy



14.10-njy surat. Oýuk linzada şekiliň gurluşy

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.

Oýuk linzada dik predmetiň şekiliniň gurluşy: 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:

$$\frac{1}{F} = \frac{1}{d} + \frac{1}{f}, \tag{14.17}$$

ç ýagdaý ($d < F$) üçin

$$\frac{1}{F} = \frac{1}{d} - \frac{1}{f} \tag{14.18}$$

boljakdygyny geometrik subut etmek kyn däl. Şekiliň H ölçeginiň predmetiň h ölçegine gatnaşygyna linzanyň ulaldyşy diýilýär:

$$\gamma = \frac{H}{h}. \tag{14.19}$$

Suratlardan görnüşi ýaly, $\Delta AOB \sim \Delta A'OB'$, onda:

$$\gamma = \frac{H}{h} = \frac{f}{d} \quad \text{we} \quad \gamma = \frac{H}{h} = \frac{f - F}{F}. \tag{14.20}$$

ç) ýagdaýda bolsa :

$$\gamma = \frac{H}{h} = \frac{f + F}{F}, \tag{14.21}$$

bolýandygy linzanyň formulalaryny onuň ulaldyşy bilen baglanyşdyrýar. Oýuk linza üçin 14.10-njy suratdan

$$-\frac{1}{|F|} = \frac{1}{d} - \frac{1}{|f|}, \tag{14.22}$$

gelip çykýar. Hakyky (real) fokus aralygy položitel: $F = |F|$ hyýaly (ideal) – 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 Φ_v diýilýär. Energetiki şöhlelenmäniň 1 *watta* deň bahasynyň ýaşyl (555 *nm*) tolkuna degişli akymy 683 lýumen hasaplanýar. 1 watt gök ýagtylygyň (480 *nm*) görünijiligi $V(\lambda) = V(480) = 0{,}14$ bolup, akymy $\Phi_v = 683 \cdot 0{,}14 = 95{,}62$ lýumene barabar bolýar.

Umuman:

$$\Phi_v = 683 \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} V(\lambda) \cdot r(\lambda T_1) d\lambda. \tag{14.23}$$

Plankyň kanunyna laýyklykda:

$$r(\lambda T_1) = \frac{2c^2\pi h}{\lambda^5}\frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1}, \tag{14.24}$$

$$V(\lambda) = e^{-72\left(\frac{\lambda}{\lambda_m}-1\right)^2}, \tag{14.25}$$

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

$$M_v = 683 \int_{380nm}^{760nm} \frac{2c^2\pi^4}{\lambda^5}\frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1} \cdot e^{-72\left(\frac{\lambda}{\lambda_m}-1\right)^2} d\lambda \tag{14.26}$$

bolar.

Adamyň teniniň iň ýokary duýgurlygy $\lambda = 296,7$ *nm*-e gabat gelýär. Ultramelewşe tolkunlaryň bakterisid täsiriniň maksimal netijeliligi 254 *nm*-e gabat gelýär.

$$E_v = \frac{d\Phi_v}{dS}$$

– ýagtylandyrylyş, ölçeg birligi: lýuks (1 *lýuks* = 1 *lýumen*/m^2)

$$L_v = \frac{I_v}{\Delta S \cos i} = \frac{d\Phi_v}{\Delta S d\omega \cos i},$$

– ýagtylandyrylyş, ölçeg birligi: *nit* (1 *nit* = 1 *kd*/m^2).

Ýagtylyk güýji kandelalarda aňladylýar. Kandela iňlisçeden terjime edilende «şem» (sweça) sözüni aňladýar.

Esasy fotometriki ululyklar we olaryň birlikleri ýagtylygyň we onuň çeşmeleriniň intensiwligini ölçemek meselelerini öwrenýän optikanyň bölümine fotometriýa diýilýär. Fotometriýada şeýle ululyklar ulanylýar:

1. Energetiki – optiki şöhlelenmeleriň 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.

1. Energetiki ululyklar

Φ_e şöhlelenme akymy – W şöhlelenme energiýasynyň bu şöhlelenmäniň bolup geçen wagtyna bolan gatnaşygy bilen kesgitlenýän ululykdyr:

$$\Phi_e = W/t. \tag{14.27}$$

Şöhlelenme akymynyň birligi watt (Wt).

Energetiki ýagtylanyş (*şöhlelenme*) R_e – tekizligiň goýberýän Φ_e şöhlelenme akymynyň şu akymyň kesip geçýän S kesiginiň meýdanyna bolan gatnaşygyna deň bolan ululykdyr:

$$R_e = \Phi_e/S, \tag{14.28}$$

ýagny bu şöhlelenme akymyň üst dykyzlygydyr. Energetiki ýagtylanyşyň birligi kwadrat metrde watt (Wt/m^2).

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:

$$I_e = \Phi_e/\omega. \tag{14.29}$$

Ýagtylygyň energetiki güýjüniň birligi steradianda watt (Wt/sr).

Çeşmäniň ýagtylanma ýitiligi (*ýarkost*) B_e – şöhlelenýän üstüň elementiniň ΔI_e energetiki ýagtylyk güýjüniň bu elementiň ΔS meýdanynyň proýeksiýasynyň gözegçilik edilýän ugra perpendikulýar tekizlige bolan gatnaşygyna deň bolan ululykdyr:

$$B_e = \Delta I_e/\Delta S. \tag{14.30}$$

Çeşmäniň ýagtylanma ýitiliginiň (ýarkostyň) birligi kwadrat metr-steradianda watt ($Wt/(sr \cdot m^2)$)

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).

2. Ýagtylyk ululyklary

Optiki ölçeglerde (ölçemelerinde) dürli şöhleleri kabuledijiler ulanylýar (mysal üçin, göz, fotoelementler, fotoköpeldijiler (fotoumnožiteller)). Olar dürli tolkun uzynlykly energiýalar üçin dürli duýujylyga eýedirler.

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 görünýän ýagtylykda ulanylýan ýagtylyk birlikleri girizilýär.

Halkara birlikler sistemasynda (*HU*) esasy ýagtylyk birligi hökmünde, ýokarda kesgitlemesi berlen kandela (*Kd*) ulanylýar.

Ýagtylyk birlikleriniň kesgitlemeleri-de, energetiki birlikleriniň kesgitlemelerine meňzeş.

Ýagtylyk akymy Ф – 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) $1\ lm = 1\ Kd \cdot sr$.

Ýagtylandyrylyş R şeýle gatnaşyk bilen kesgitlenýär:

$$R = \Phi/S. \qquad (14.31)$$

Ýagtylandyrylyş 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 proýeksiýasyna bolan gatnaşygyna deňdir:

$$B_{ý} = I/(S \cdot \cos\varphi). \qquad (14.32)$$

Ýagtylyk birligi – kwadrat metrde Kandela (Kd/m^2).

Ýagtylandyrylyş E – üste düşýän Φ ýagtylyk akymynyň bu üstüň S meýdanyna bolan gatnaşygy bilen kesgitlenýän ululykdyr:

$$E = \Phi/S. \tag{14.33}$$

Ýagtylandyrylyşyň 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 netijeleýji yrgyldynyň güýçlenmegine ýa-da peselmegine tolkunlaryň interferensiýasy diýilýär. Ol goşulyşýan yrgyldylaryň faza gatnaşygyna baglydyr.

Tolkunlaryň interferensiýasynyň ýüze çykmagynyň möhüm şerti olaryň kogerentligidir, ýagny olaryň ýygylyklarynyň 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 netijeleýji güýjenmesiniň ululygy aýry-aýrylykda alnan elektrik (magnit) meýdanlarynyň güýjenmeleriniň wektor jemine deňdigini aňladýar.

Hususy halda, haçanda meýdanlaryň emele getirýän güýjenmeleri ululyklary boýunça deň, ugurlary boýunça garşylykly bolanynda netijeleýji 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).

Netijeleýji yrgyldynyň amplitudasy seredilýän yrgyldylaryň amplitudalaryny geometrik goşmak arkaly kesgitlenýär:

$$A^2 = A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2\cos(\varphi_2 - \varphi_1). \qquad (14.34)$$

(14.34) deňlemäni seljerip, şeýle netije çykarýarys:

1. Eger $\varphi_2 - \varphi_1 = 0; 2\pi; 4\pi; \ldots 2k\pi$ bolsa, (bu ýerde $k = 0, 1, 2, 3\ldots$) onda, $\cos(\varphi_2 - \varphi_1) = 1$ we $A = A_1 + A_2$. (14.35)

2. Eger $\varphi_2 - \varphi_1 = \pi; 3\pi; 5\pi; \ldots (2k + 1)\pi$, (bu ýerde: $k = 0, 1, 2, 3\ldots$) onda, $\cos(\varphi_2 - \varphi_1) = -1$ we $A = A_1 - A_2$. (14.36)

Birinji ýagdaýda netijeleýji 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 formulirlemek bolar.

Goşulyşýan yrgyldylaryň ýollarynyň tapawudy ýarym tolkun uzynlygynyň jübüt sanyna ýa-da tolkun uzynlygynyň bitin sanyna deň bolanynda netijeleýji yrgyldynyň maksimal güýçlenmesi bolýar, ýagny

$$\delta = 2k\frac{\lambda}{2} = k\lambda. \qquad (14.37)$$

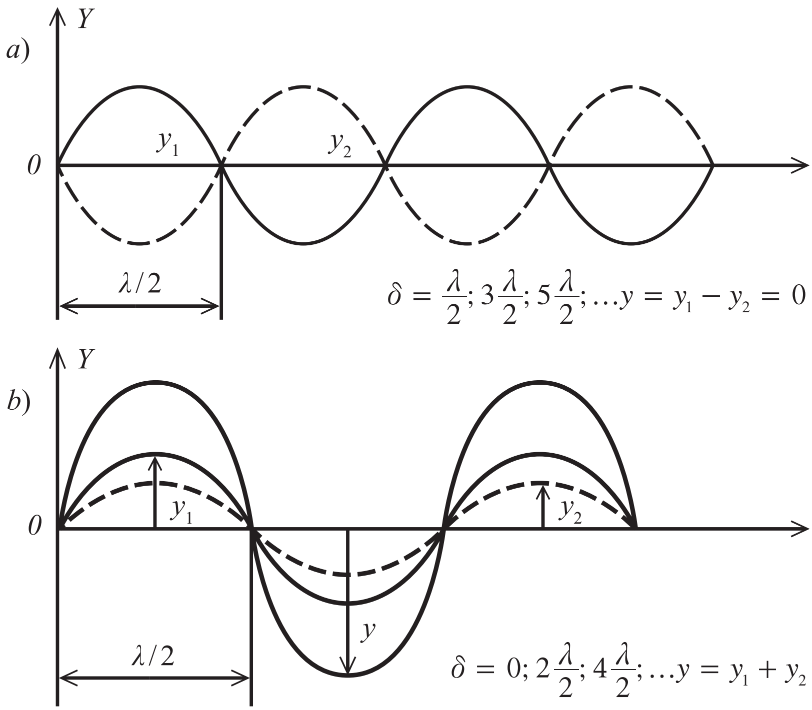
Şular ýaly-da minimumlar şerti formulirlenýär: goşulyşýan yrgyldylaryň ýollarynyň tapawudy ýarym tolkun uzynlygynyň täk sanyna deň bolanynda netijeleýji yrgyldynyň peselmesi bolýar, ýagny

$$\delta = (2k + 1)\frac{\lambda}{2}, \qquad (14.38)$$

bu ýerde $k = 0, 1, 2, 3,\ldots$ ululyga 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 öçürilmesi bolýar (ýagtylyk ýagtylygy ýok edýär). (*14.11-nji a surat*), şunda y_1 we y_2 süýşmesiniň alamatlary dürli,



14.11-nji surat. Deň amplitudaly we deň fazaly tolkunlaryň interferensiýasy

netijeleýji 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 $y = y_1 + y_2$.

Interferensiýanyň ulanylyşy

Işleýşi interferensiýa hadysasyna esaslanan interferometrler dürli maksatlar üçin giňden ulanylýar. Mysal üçin, ýagtylyk tolkunlarynyň uzynlyklaryny takyk ölçemek, gazlaryň we başga maddalaryň döwülme görkezijilerini kesgitlemek, iki şöhleli interferometriň we mikroskopyň birikdirilmesinden emele gelen interferension mikroskopy biologiýada gury maddanyň konsentrasiýasynyň döwülme görkezijisini we dury mikroobýektleriň 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

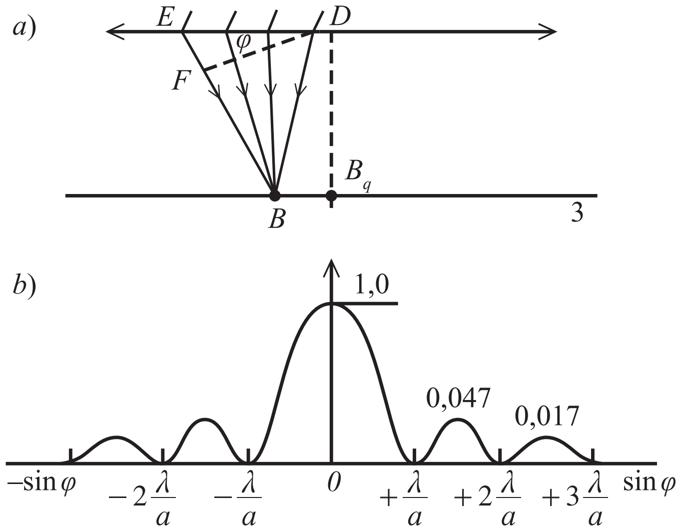
Ýagtylyk tolkunlarynyň gönüçyzykly ýaýramagyndan gyşaryp, päsgelçilikleriň daşyndan öwrülip geçmegine ýagtylygyň difraksiýasy diýilýär. Ýagtylygyň difraksiýasy onuň tolkun uzynlygyndan kiçi (ýa-da deňräk) yşlardan ýa-da dury däl ekranyň gyrasyndan geçende anyk ýüze çykýar. Tejribelerde ýagtylyk tolkunynyň difraksiýasyny yşlaryň hem-de päsgelçilikleriň ölçegleri tolkun uzynlygy bilen bir tertipde bolsa (10 esseden köp tapawut etmese), difraksiýa syn edilýän nokat yşdan ýa-da päsgelçilikden uly aralykda ýerleşen ýagdaýynda 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 käte aýdylyşy ýaly, parallel şöhleleriň difraksiýasyny öwrenen alym. Ol spektrleri barlamak üçin difraksion gözenegi ilkinji ulananlaryň biri hasaplanylýar.

Frangoferiň difraksiýasynyň uly amaly ähmiýeti bolup, haçanda 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 aňrysynda 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 gelşi

Yşdan φ erkin ugurlara gidýän çetki *BE* we *BD* şöhleleriň arasyndaky optiki ýoluň tapawudy:

$$\Delta = DF = a\sin\varphi, \tag{14.39}$$

bu ýerde a – *BE* şöhlä *D* nokatdan geçirilen perpendikulýaryň esasy.

Yşyň *ED* tekizligindäki tolkun üstüniň açyk bölegini *E* 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-birlerini ýok edýändikleri sebäpli, Freneliň her bir jübüt goňşy zonasynyň netijeleýji yrgyldysynyň amplitudasy nola deňdir.

Şeýlelikde, eger Freneliň zonalarynyň sany jübüt bolsa:

$$a \sin \varphi = \pm\, 2m \frac{\lambda}{2} (m = 1, 2, 3 \ldots). \qquad (14.40)$$

B nokatda difraksiýa minimumy döreýär (doly garaňky), eger-de Freneliň zonalarynyň sany täk bolsa

$$a \sin \varphi = \pm (2m + 1) \frac{\lambda}{2} (m = 1, 2, 3 \ldots), \qquad (14.41)$$

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 *0* nokatda merkezi difraksiýa maksimumy bolýar.

(14.39) we (14.40) aňlatmalaryň şertlerinden amplitudanyň (şeýle-de intensiwligiň nola deň) ($\sin\varphi_{min} = \pm m\lambda/a$) ýa-da maksimal baha ($\sin\varphi_{max} = \pm(2\,m + 1)\lambda/2a$) 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 gatnaşykdadygyny hasaplamalar görkezýär:

1 : 0,047 : 0,017 : 0,0083..., ýagny ýagtylyk energiýasynyň esasy bölegi merkezi maksimumda jemlenendir. 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. Haçanda $a >> \lambda$ bolanda, merkezi ýagtylyk çeşmesiniň aýdyň şekili alynýar, ýagny ýagtylygyň gönüçyzykly ýaýramasy bolýar.

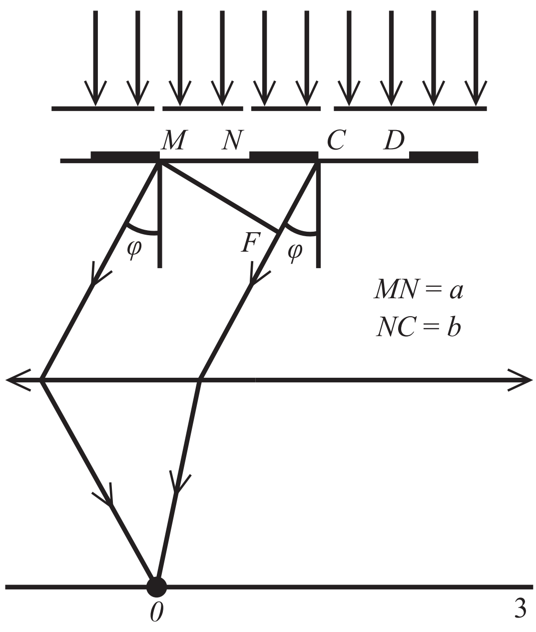
Difraksiýa maksimumlarynyň ýagdaýy tolkun uzynlygyna – λ bagly, şonuň üçin difraksiýanyň seredilen görnüşleri diňe monohromatik ýagtylyga degişlidir.

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). Gapdaldaky 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 ýaşyl gyrasy merkezi maksimum tarapynda ýerleşendir.

Difraksiýa gözenegindäki Fraungoferiň difraksiýasy

Düşnüklilik üçin, goňşy *MN* we *CD* yşlary bolan difraksiýa gözenegine seredeliň (*14.13-nji surat*).

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.



14.13-nji surat. Difraksiýa gözeneginde Fraungoferiň difraksiýasy

Goý, tekiz monohromatik ýagtylyk tolkuny gözenegiň tekizligine kadaly düşsün. Yşlar bir-birlerinden deň aralykda ýerleşýärler, goňşy iki yşdan gidýän şöhleleriň ýollarynyň tapawudy şu ugurda ähli difraksion gözenegiň çäginde birmeňzeş:

$$\Delta = CF = (a + b)\sin\varphi = d\sin\varphi. \tag{14.42}$$

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.

$$a\sin\varphi = \pm m\lambda\,(m = 1, 2, 3,...). \tag{14.43}$$

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 $\lambda/2$, $3\lambda/2$, ... bolan ugurlarda emele gelýär (mysal üçin, iki yşyň-da iň çetki çepdäki *M* we *C* nokatlaryň ugurlarynda).

Şeýlelikde, (14.42) aňlatmany hasaba almak bilen goşmaça minimumlaryň şertini ýazýarys:

$$d\sin\varphi = \pm(2m + 1)\lambda/2 \quad (m = 0, 1, 2 ...).$$

Tersine, bir yşyň täsiri beýlekileriň täsirini güýçlendirýär, eger

$$d\sin\varphi = \pm 2m\lambda/2 = \pm m\lambda \quad (m = 0, 1, 2 ...). \tag{14.44}$$

Ýagny (14.44) aňlatma baş maksimumlar şertini goýýar.

Şeýlelikde, iki yş üçin difraksiýanyň doly şekili şeýle şert bilen kesgitlenýär. Baş minimumlar:

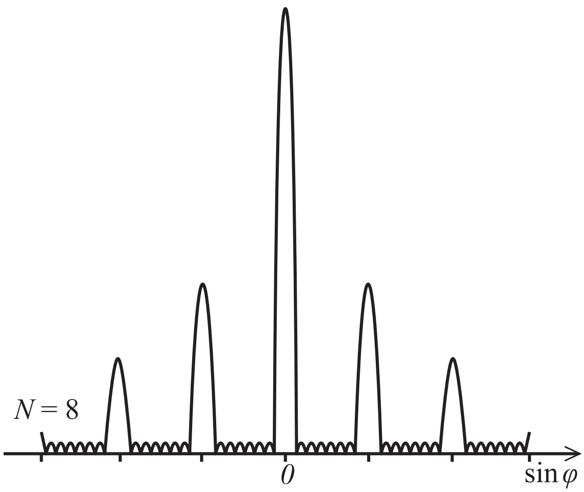
$$a\sin\varphi = \lambda, 2\lambda, 3\lambda ...,$$

goşmaça minimumlar:

$$d\sin\varphi = \frac{\lambda}{2}, \frac{3}{2}\lambda, \frac{5}{2}\lambda...,$$

baş maksimumlar:

$$d\sin\varphi = 0, \lambda, 2\lambda, 3\lambda ... .$$



14.14-nji surat. Difraksiýa gözeneginde Fraungoferiň difraksiýasynyň maksimumlary

Ýagny iki baş maksimumlaryň arasynda bir goşmaça minimum ýerleşýär:

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:

$$d\sin\varphi = m'\lambda/N,$$

$$(m' = 1,\ 2,\ \ldots\ N-1,\ N+1\ \ldots\ 2N-1,\ 2N+1\ \ldots), \qquad (14.45)$$

bu ýerde m' – 0, N, $2N$, ...-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 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. sinφ 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

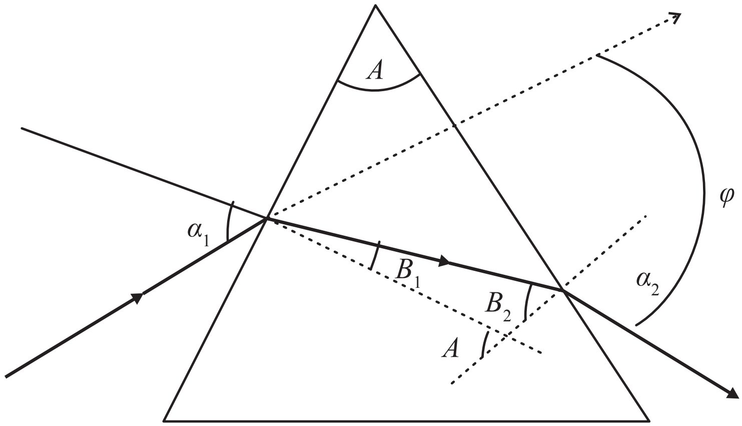
Ýagtylygyň sredalarda döwülmegi diňe ol sredalaryň häsiýetleri (olarda ýagtylygyň ýaýraýyş aýratynlyklary we ş.m.) bilen bagly bolman, eýsem, ýagtylygyň tolkun uzynlygy bilen hem bagly bolup durýar. Hemme ýeri optiki birmeňzeş bolan sreda takyk tolkun uzynlykly (kesgitli reňkli) ýagtylyk düşende, onuň belli ugur boýunça döwlüp ýaýraýandygyny belläp geçipdik. Bu hadysa diňe sreda bagly bolmak bilen çäklenmeýär. Ol sreda düşýän ýagtylygyň tolkun uzynlygyna (ýa-da ýygylygyna hem) baglydyr. Ýagny şol bir sredada dürli tolkun uzynlykly ýagtylyklar dürli tizlikler bilen ýaýraýarlar. Netijede, şol bir sreda dürli tolkun uzynlykly (ýa-da ýygylykly, reňkli) ýagtylygy dürli hili döwýärler (*14.15-nji surat*).

Gurşawda ýagtylygyň döwülme görkezijisiniň tolkun uzynlyga baglylygyna ýagtylygyň dispersiýasy diýilýär. Umuman dispersiýa diýmek, ýagtylygyň saýlanylmagy, ýagny onuň interferensiýa, difraksiýa hadysalarda döwüleninde-de, dürli burçlar boýunça döwülmegine düşünilýär. Bu nukdaýnazardan interferensiýadaky dispersiýa, difraksiýadaky dispersiýa we çylşyrymly (ak) ýagtylygyň üçgranly dury aýnadan geçende döwlüp ýüze çykýan dispersiýalary tapawutlanýarlar.

Ýagtylygyň dispersiýasy şeýle aňladylýar:

$$n = f(\lambda), \tag{14.46}$$

bu ýerde n – sredanyň döwme görkezijisi, λ – sreda düşýän ýagtylygyň tolkun uzynlygy.



14.15-nji surat. Üçgranly prizmada ýagtylyk şöhleleriniň döwlüşi

Ak ýagtylyk üçgranly dury aýna prizma düşende, dürli (7 sany atlary kabul edilen) reňklere dargap, dispersiýany ýüze çykarýar. Eger bir reňkli (bir ýygylykly) ýagtylyk depe burçy A bolan dury, döwme görkezijisi n bolan maddadan ýasalan üçgranly prizma α_1 burç bilen düşürilse, onuň çep we sag granlarynda (gapyrgalarynda) döwlüp, ol φ burç boýunça çykar (*14.16-njy surat*).

Suratdan görnüşine görä:

$$\varphi = (\alpha_1 - \beta_1) + (\alpha_2 - \beta_2) = \alpha_1 + \alpha_2 - A. \qquad (14.47)$$

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

$$\frac{\alpha_1}{\beta_1} = n; \quad \frac{\beta_2}{\alpha_2} = \frac{1}{n} \qquad (14.48)$$

we

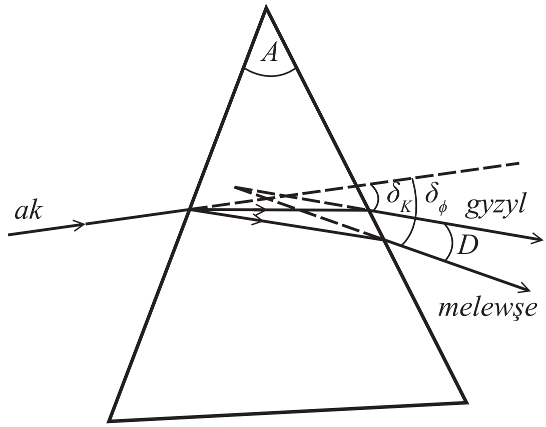
$$\beta_1 + \beta_2 = A, \qquad (14.49)$$

bolýandygy sebäpli

$$\alpha_2 = \beta_2 n = n(A - \beta_1) = n(A - \alpha_1/n) = nA - \alpha_1, \qquad (14.50)$$

ýagny

$$\alpha_1 + \alpha_2 = nA \qquad (14.51)$$



14.16-njy surat. Üçgranly prizmada ak ýagtylygyň dispersiýasy

hem-de (14.51) we (14.47) aňlatmalardan

$$\varphi = A(n-1) \tag{14.52}$$

gelip çykýar. Ýagny prizma düşýän şöhläniň çykanda gyşarýan burçy prizmanyň A depe burçuna we döwme görkezijisine bagly.

Eger-de bu ýagdaýda bir reňkli (monohromatik) däl-de, ak reňkli (köp tolkun uzynlykly) ýagtylyk düşürilse, döwlüp çykan şöhle dürli reňkli, dürli burçlar boýunça prizmadan çykarlar.

Eger tolkun uzynlygy kiçelende döwülme görkeziji ulalsa, şeýle dispersiýa normal dispersiýa diýilýär. Dispersiýanyň ululygy

$$D = \frac{dn}{d\lambda} \tag{14.53}$$

aňlatma bilen aňladylýar. Şeýlelikde, λ ululygyň kiçelmeginde

$$\left|\frac{dn}{d\lambda}\right| > 0 \tag{14.54}$$

şert ýüze çyksa, bu normal dispersiýadyr. Eger-de λ kiçelende n hem kiçelse, onda oňa anomal (normal däl) dispersiýa diýilýär.

Aýna prizmada normal dispersiýa bolup geçýänligi sebäpli, melewşe (tolkun uzynlygy kiçi bolan) reňkli ýagtylyk gyzyl ýagtylyga görä uly burça gyşarýar. Ýagny onuň döwülme görkezijisi uly.

Dispersiýanyň gyraky şöhleleriniň gyşarma burçlarynyň arasyndaky burça dispersiýa burçy diýilýär:

$$D = \delta_m - \delta_g = (n_m - n_g)A. \qquad (14.55)$$

Bu hadysanyň esasynda maddalaryň spektral derňewlerini geçirip, olaryň himiki düzümlerini kesgitlemekde prizmaly spektrograflar ulanylýar.

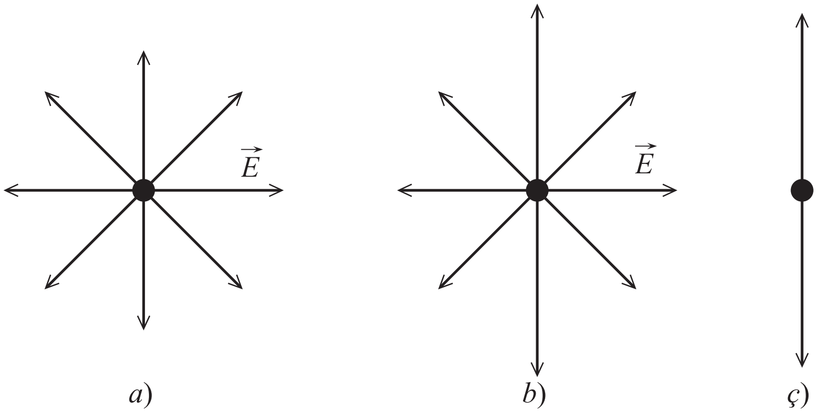
§ 14.8. Ýagtylygyň polýarlanmagy

Tebigy we polýarlanan ýagtylyklar bolýarlar. Ýagtylyk köpsanly atomlaryň şöhlelenmesidir. 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 öňüne getirmek bolar. Sebäbi, elektromagnit tolkuny kese tolkundyr, $\vec{E}$, $\vec{H}$ wektorlaryň ikiside tizlik wektoryna (şöhläniň ýaýraýan ugruna) perpendikulýar bolan tekizliklerde yrgyldaýarlar. Elektromagnit tolkunynyň şu wektorlaryň biri boýunça yrgyldamagy mümkin däldir. $\vec{E}$ güýjenmeli üýgeýän elektrik meýdany, şol kanun boýunça üýgeýän $\vec{H}$ güýjenmeli magnit meýdanyny döredýär we tersine.

Ýagtylygyň madda bilen himiki, fiziologiki we beýleki özaratäsirleri esasy elektrik yrgyldylary arkaly häsiýetlendirilýändigi 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 öňüne getireliň (*14.17-nji a surat*). $\vec{E}$ wektoryň ähli taraplara deňölçegli ýerleşmegi köpsanly atomlaryň bitertip şöhlelenmegi we olaryň ýaýraýan ugruna perpendikulýar her dürli ugurly yrgyldylaryň bardygy bilen düşündirilýär.

Ýaýramak ugruna perpendikulýar bolan, ähli ugurlar boýunça yrgyldaýan ýagtylyk tolkunyna tebigy ýa-da polýarlanmadyk ýagtylyk diýilýär. Adaty şertlerde ýagtylyk çeşmeleri diňe şu hili tolkuny



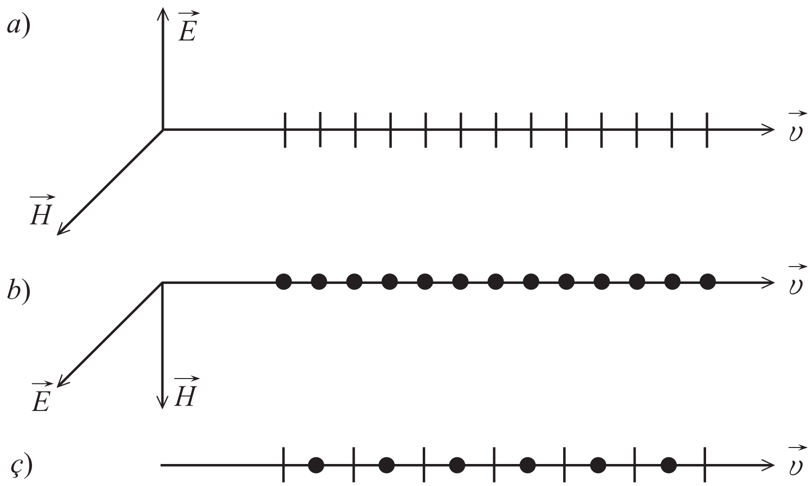
14.17-nji surat. Ýagtylygyň dürli görnüşli polýarlanmalary

dörедýärler. Bu bolsa şöhlelenýän jisimi emele getirýän her bir atomyň şöhlelenme 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 tolkunyň 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 köpsanly ýönekeý şöhlelenijiler – atomlar goýberýärler. Aýratyn alnan mikrobölejikler mydama polýarlanan elektromagnit tolkunlaryny şöhlelendirýärler. Ýörite gurluşlaryň (polýaroidleriň) kömegi bilen tebigy ýagtylyk dessesiniň içinden $\vec{E}$ wektoryň yrgyldysynyň tekizliginde bellibir, 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 surat. $\vec{E}$ wektoryň yrgyldaýan tekizliginiň belgilenişi

14.18-nji suratda $\vec{E}$ wektoryň yrgyldaýan tekizliginiň belgilenişi görkezilendir.

Eger $\vec{E}$ wektor çyzgy (suratyň ýerleşen) tekizliginde yrgyldaýan bolsa, onda şu ýagdaýda $\vec{v}$ 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*) $\vec{v}$ wektoryň üstünde çalşyp gelýän çyzyjaklar we nokatlar bilen şekillendirilýär. Asmanyň kesgitli böleklerinden gelýän 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, lýuminessent çyralary güýçli polýarlanan ýagtylygy goýberýärler.

Ýagtylygyň kem-käsleýin polýarlanyşy polýarlanma derejesi bilen häsiýetlendirilýär we şu formula arkaly kesgitlenilýär:

$$P = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}}. \tag{14.56}$$

Bu ýerde I_{max} 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 $I_{max} = I_{min}$ we $P = 0$.

Netije. Interferensiýa we difraksiýa 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 polýaroidler bilen geçirilen tejribeler ýagtylyk tolkunynyň kese tolkunlardygyny doly subut etdi.

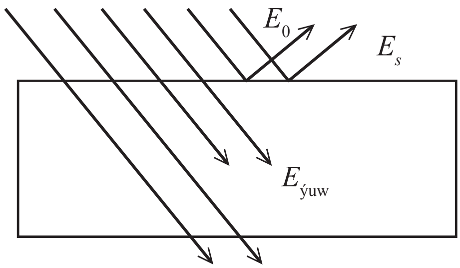
Polýarlanan ýagtylyk ylmy barlaglarynda we tehnikada giňden ulanylýar. Mysal üçin, köp halatlarda haýsydyr bir obýektiň ýagtylygyny ýuwaşjadan üýtgetmek gerek bolýar. Şonda ýagtylyk çeşmesiniň öňünde polýarlaýjyny we analizatory goýup, soňra analizatory ýuwaşjadan aýlap obýektiň ýagtylygyny iň uly ýagtylykdan, tä doly garaňkyraýança üýtgetmek bolar. Bulardan başga-da, polýarlanmagy bezeg (owadanlyk) maksatlary üçin (witrinalar gurlanynda, teatrda sahna oýunlary goýlanynda we ş.m), geologiýada we ylmyň-tehnikanyň dürli sistemalarynda ulanýarlar.

XV bap

ŞÖHLELENMÄNIŇ KWANT TEBIGATY

§ 15.1. Ýylylyk şöhlelenmeleri. Şöhlelenmäniň deňagramlylygy. Kirhgofyň kanuny

Temperaturasy absolýut noldan ýokary bolan jisimler elektromagnit şöhlelerini goýberýärler. Olaryň temperaturasy näçe ýokary boldugyça gyzdyrylsa, şöhle goýberijiligi hem artýar. Goýberilen şöhleler başga jisimlere siňýärler we olary gyzdyrýarlar. Şoňa gö-



15.1-nji surat. Şöhlelenmäniň serpikdirilişi, ýuwdulyşy we geçirilişi

rä-de, bu şöhlelere ýylylyk şöhleleri, bu hadysa bolsa ýylylyk şöhlelenmeleri diýilýär. Bellibir temperaturada jisimiň üst birliginden wagt birliginde goýberilýän şöhleleriň energiýasyna jisimiň şöhle goýberijilik ukyby diýilýär. Ony E harpy bilen belläliň. Goý, bir jisimiň üstüne E_0 şöhle energiýasy düşýän bolsun.

Onda ýagtylyk şöhlesiniň bir bölegi üstden serpigýär ($E_s < E_0$), ýene-de bir bölegi ýuwdulýar ($E_{ýuw} < E_0$), galan bölegi bolsa şöhlelenýän üstden geçýär ($E_g < E_0$).

Umumy energiýanyň deňlemesi şeýle aňladylar:

$$E_0 = E_s + E_{ýuw} + E_g. \tag{15.1}$$

Bu deňlemäniň iki tarapyny-da doly E_0 energiýa bölüp, alýarys:

$$1 = \frac{E_s}{E_0} + \frac{E_{ýuw}}{E_0} + \frac{E_g}{E_0}, \tag{15.2}$$

bu ýerde $\frac{E_s}{E_0} = \rho$ – jisimiň şöhläni serpikdirijilik ukyby, serpikme koeffisiýenti, $\frac{E_{ýuw}}{E_0} = \alpha$ – şöhläni ýuwudyjylyk (özüne siňdirijilik) ukyby, ýuwdulma koeffisiýenti, $\frac{E_g}{E_0} = r$ – ýagtylygy geçirijilik ukyby, goýberijilik koeffisiýenti.

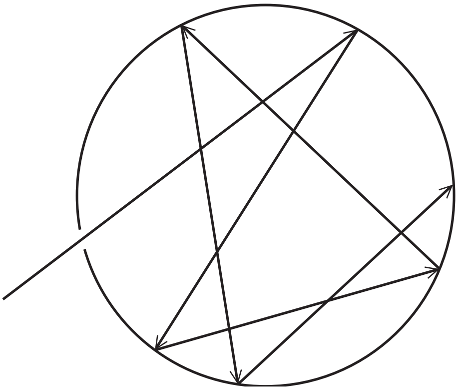
(15.2) aňlatma görä, bu koeffisiýentleriň arasynda şeýle baglanyşyk bardyr:

$$1 = \rho + \alpha + r. \tag{15.3}$$

r ululyk jisimiň durulygyny aňladýar. Jisimiň durulygy onuň galyňlygyna we materialyna baglydyr. Gaty jisimleriň köpüsi dury däldirler, ýagny $r = 0$. Bu ýagdaýda:

$$1 = \rho + \alpha. \tag{15.4}$$

Üstüne düşýän şöhleleriň ählisini özüne doly siňdirýän (ýuwudýan) jisime absolýut gara jisimler diýilýär, ($E_{ýuw}=E_0$) we $\alpha = 1$. Älemdäki käbir «gara deşik» diýilýän jisimler absolýut gara jisime meňzeşdirler.



15.2-nji surat. Absolýut gara jisimiň şekillendirilişi

Emma tebigatda absolýut gara jisim ýokdur. Şoňa görä-de, ylymda we tehniki derňewlerde absolýut gara jisime meňzeş jisimleri, mysal üçin, şöhleleri gowy özüne siňdirýän materiallardan taýýarlanylan örän kiçi deşijegi bolan içi boş şary (*15.2-nji surat*) emeli usullar bilen ýasaýarlar.

Deşikden şaryň içine girýän şöhle onuň içki üstünden birnäçe gezek serpigýär, her gezek serpigende-de onuň energiýasynyň bellibir bölegi şara siňýär we ondan daşary çykmaýar. Şoňa görä-de, şaryň içi garaňky bolup görünýär.

Jisimleriň şöhle siňdirijilik we goýberijilik ukyby şöhläniň tolkun uzynlygyna, jisimiň reňkine we tempraturasyna bagly bolýar.

Käbir jisimleriň şöhle siňdiriş ukyplary:

a) ak reňkli jisimler (kagyz, gar, hek we ş.m.) $\alpha = 0{,}15 - 0{,}20$;

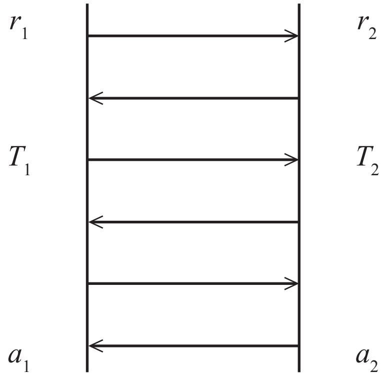
b) gara jisimler (kömür, gara reňkli mata, tüsse gurumy we ş.m.) $\alpha = 0{,}8 + 0{,}95$;

ç) absolýut gara jisimler $\alpha = 1$.

Beýleki jisimleriň şöhläni siňdirijilik ukyplary ak we gara jisimleriň aralygynda bolýarlar.

Jisimleriň hemişe ýylylyk şöhlelerini goýberýändikleri sebäpli ýapyk sistemadaky jisimlerde bir-birleri bilen ýylylyk çalşygy netijesinde deňagramlylyk ýagdaýy döreýär.

Ýapyk sistemadaky iki jisimiň arasyndaky şöhlelenmäniň deňagramlylyk ýagdaýyna seredeliň. Jisimleriň şöhle goýberijilik ukyp-



15.3-nji surat. Şöhlelenmäniň deňagramlylygy

lary, degişlilikde, r_1 we r_2, şöhle siňdirijilik ukyplary α_1 we α_2 , temperaturalary T_1 we T_2 bolsun.

Birinji jisimiň (*15.3-nji surat*) şöhle goýberijilik ukyby ikinji jisimiňkiden n gezek köp, ýagny

$$r_1 = n\, r_2. \tag{15.5}$$

Deňagramlylyk ýagdaýynda jisim näçe energiýany özüne siňdirse, ikinji jisimiň energiýasy şonça-da azalmaly:

$$\alpha_1 = n\, \alpha_2. \tag{15.6}$$

Bu deňlikleriň gatnaşygy:

$$\frac{r_1}{\alpha_1} = \frac{nr_2}{n\alpha_2} = \frac{r_2}{\alpha_2}. \tag{15.7}$$

Eger sistemada iki jisimden başga-da, absolýut gara jisim bar bolsa, bu gatnaşyk aşakdaky ýaly ýazylar:

$$\frac{r_1}{\alpha_1} = \frac{r_2}{\alpha_2} = \frac{R_0}{\alpha_0}. \tag{15.8}$$

Absolýut gara jisim üçin $\alpha_0 = 1$, onda:

$$\frac{r_1}{\alpha_1} = \frac{r_2}{\alpha_2} = R_0. \tag{15.9}$$

Diýmek, jisimiň şöhle goýberijilik ukybynyň, şöhle siňdirijilik ukybyna bolan gatnaşygy ähli jisimler üçin hemişelik ululyk bolup, ol şol bir temperaturada absolýut gara jisimiň şöhle goýberijilik ukybyna deňdir. Bu kesgitlemä Kirhgofyň kanuny diýilýär:

$$\frac{r}{\alpha} = R_0. \tag{15.10}$$

§ 15.2. Absolýut gara jisimiň şöhlelenme kanunlary. Stefanyň-Bolsmanyň kanuny. Winiň kanuny. Optiki pirometrler

Absolýut gara jisimiň şöhle goýberijilik ukyby onuň absolýut temperaturasynyň dördünji derejesine proporsionaldyr:

$$R_0 = \sigma T^4, \qquad (15.11)$$

bu ýerde σ – Stefanyň-Bolsmanyň hemişeligi $\left(\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \dfrac{Wt}{m^2 K^4}\right)$, T – jisimiň absolýut temperaturasy.

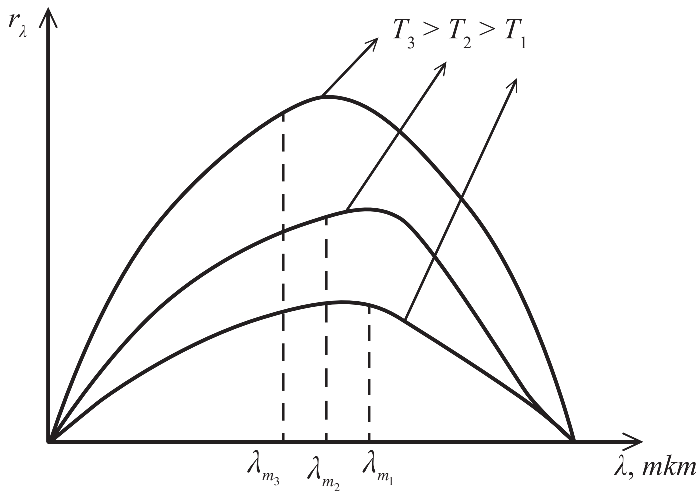
Bu gatnaşyk 1879-njy ýylda Awstriýa fizigi Ýozef Stefan tarapyndan tejribe arkaly alnan. Emma alym bu formulanyň dogrudygyny tejribe arkaly barlap görmezden, ony diňe bir absolýut gara jisimler üçin däl-de, ähli jisimler üçin dogrudyr diýip nädogry pikir edýär. Onuň hakykatdan-da şeýledigini, elektrodinamikanyň elektromagnit tolkunlarynyň energiýalarynyň dykyzlygy we ýagtylygyň basyşy arasyndaky gatnaşyklaryň esasynda termodinamikanyň prinsiplerini ilkinji gezek şöhlelenme üçin ulanyp, alymyň watandaşy Lýudwig Bolsman 1884-nji ýylda teoriýa taýdan subut edýär. Şonuň üçin bu kanuna Stefanyň-Bolsmanyň kanuny diýilýär. Stefanyň-Bolsmanyň kanuny hem Plankyň formulasyndan gelip çykýar:

$$R_0 = \int_0^\infty r_\lambda d\lambda = \int_0^\infty \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{hc/kT\lambda} - 1} d\lambda = \sigma T^4. \qquad (15.12)$$

Görnüşi ýaly, meýdany S bolan absolýut gara jisimiň t wagtyň dowamynda ähli tolkun uzynlyklarynda goýberýän şöhlelenme energiýasynyň jemi şeýle formula bilen kesgitlenip bilner:

$$E = \sigma T^4 St. \qquad (15.13)$$

Ýylylyk şöhlelenmesiniň kanunlary ýylylyk tehnikasynda şöhle energiýasynyň akymyny kesgitlemekde, optiki pirometriýada, astronomiýada asman ýagtylgyçlarynyň temperaturasyny kesgitlemekde giňden ulanylýar.



15.4-nji surat. Şöhlelenmäniň dürli temperaturalarda ýygylyklara görä paýlanyşlary

Makswelliň nazaryýetine görä, elektromagnit tolkunlarynyň, şol sanda ýylylyk şöhleleriniň çeşmesi hereket edýän zarýadlardyr. Ýylylyk şöhlelerini dürli ýygylyklar bilen yrgyldaýan atomlar goýberýärler. Şoňa görä-de, ýylylyk şöhleleri dürli ýygylykly elektromagnit tolkunlarydyr.

Şoňa görä-de, ýylylyk şöhlelenmäniň kanunlary her bir tolkun uzynlykly şöhlelenmä degişlidir.

15.4-nji suratda ýylylyk şöhlelenme spektrinde energiýanyň bölünişiniň çyzgysy görkezilendir.

Dürli temperaturalarda absolýut gara jisimleriň spektrinde energiýanyň bölünişini içgin öwrenmeklik şeýle kanunalaýyklyklara 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, käbir λ_m-de (tolkun uzynlygynda) uly baha (maksimuma) eýe bolup, soňra kiçelýär.
3. Temperaturanyň ýokarlanmagy bilen şöhlelenme maksimumy has gysga tolkun uzynlygyna tarap süýşýär (*15.4-nji surat*).

Gaty gyzdyrylan jisim has-da gyzarýar, temperaturanyň artmagy bilen barha agymtyl bolup başlaýar. Bu bolsa ýylylyk şöhlelenme güýjüniň maksimumynyň jisimiň temperaturasynyň artmagy bilen gysga tolkun uzynlygyna tarap süýşýändigini tassyklaýar.

Absolýut gara jisimiň şöhlelenme spektrindäki energetiki ýagtylanmasynyň spektral dykyzlygynyň gabat gelýän λ_m tolkun uzynlygy Winiň süýşme düzgüni bilen kesgitlenýär:

$$\lambda_m = \frac{c}{T}, \tag{15.14}$$

bu ýerde $c = 2,8979 \cdot 10^{-3}\ m \cdot K$ – Winiň hemişeligi, T – jisimiň absolýut temperaturasy. (15.14) formula Winiň kanuny hem diýilýär.

(15.11) formulanyň esasynda energetiki pirometrler (ýokary temperaturalary ölçeýjiler), (15.14) formula esaslanyp optiki pirometrler işleýärler.

§ 15.3. Fotoeffekt. Fotoeffektiň kanunlary. Fotoeffektiň teoriýasy. Fotoeffektiň ulanylyşy

Fotoelektrik effekti. Fotoeffektiň kanunlary. Fotoeffektiň teoriýasy

Infragyzyl şöhleleriň, görünýän ýagtylygyň, ultramelewşe, rentgen şöhleleriniň we energiýasy uly bolmadyk gamma kwantlaryň madda bilen özaratäsiri netijesinde, olardan elektronlaryň goparylmasy bolup geçýär.

Ýagtylygyň täsir etmegi netijesinde gaty we suwuk jisimleriň üstünden elektronlaryň goparylmak (uçup çykmak) hadysasyna fotoeffekt diýilýär.

Ýagtylygyň täsiri netijesinde gazyň atomlarynyň we molekulalarynyň ionlaşmagyna fotoionizasiýa effekti diýilýär.

Fotoeffekt hadysasy esasy daşky we içki görnüşde bolýar. Fotoeffektiň 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.

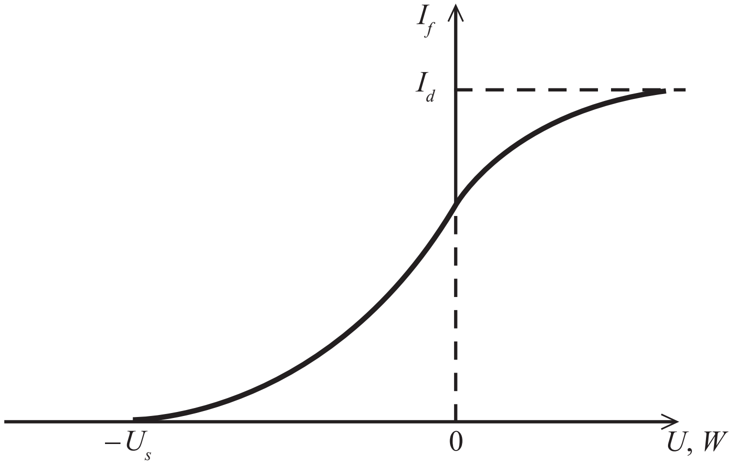
1887-nji ýylda nemes fizigi G. Gers tarapyndan açylan we görnükli rus fizigi Stoletow tarapyndan bu ajaýyp hadysanyň ykjam öwrenilmegi ýagtylygyň tebigaty baradaky düşünjeleriň ösüşinde öňe ädilen möhüm ädim boldy.

Fotoeffekt barada has doly düşünje almak we maddanyň üstüne ýagtylyk düşeninde ondan goparylýan elektronlaryň (fotoelektronlaryň) sanynyň nämä baglydygyny hem-de olaryň tizliginiň ýa-da kinetik energiýasynyň näme 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 görünýän ýagtylyk üçin dury bolman, eýsem, ultramelewşe şöhlelenmeler üçin hem dury bolan kwars «penjiresi» arkaly gabyň içindäki elektrodlaryň birine düşýär. Elektrodlara naprýaženiýe berlip, ony potensiometriň kömegi bilen üýtgetmek we woltmetr bilen ölçemek bolýar. Yşyklandyrylan elektroda tok çeşmesi-niň 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, elektrodlaryň arasyndaky potensiallarynyň tapawudy ulaldylsa, onda toguň güýji artýar. Käbir naprýaženiýede ol maksimal baha ýetip, şondan soň artmaýar (*15.5-nji sur. ser.*).

I_d toguň güýjüniň maksimal (iň uly) bahasyna doýgun tok diýilýär. Doýgun tok ýagtylandyrylýan elektrodyň bir sekuntda goýberen elektronlarynyň sany bilen kesgitlenýär.

Bu tejribede şöhlelenmäniň intensiwliginiň ululygyny üýtgedip, ýönekeý baglanyşygy takyklamak 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.



15.5-nji surat. Fototoguň napryažeňiýä baglylygy

Indi bolsa, elektronlaryň kinetik energiýalarynyň ýa-da tizlikleriniň ölçelişiniň üstünde durup geçeliň. 15.5-nji suratdan görnüşi ýaly, tok çeşmesiniň naprýaženiýesi nola deň bolan ýagdaýynda-da fototok nola deň däl. Munuň özi naprýaženiýäniň ýok 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 gaýtarýandygyny aňladýar.

Saklaýjy U_s naprýaženiýe ýagtylygyň goparan elektronlarynyň maksimal kinetik energiýasyna baglydyr. Saklaýjy naprýaženiýäni ölçäp, elektronlaryň kinetik energiýasynyň maksimal bahasyny kesgitläp bolar:

$$\frac{m\upsilon^2}{2} = eU_s.$$

Ýagtylygyň intensiwligi (ýagtylygyň akymynyň dykyzlygy) üýtgände, saklaýjy naprýaženiýe üýtgemeýär. Munuň özi elektronlaryň kinetik energiýasynyň üýtgemeýändigini aňladýar. Ýagtylygyň tolkun teoriýasynyň nukdaýnazaryndan seredilende bu fakt düşnüksizdir. Ýagtylygyň intensiwligi näçe güýçli bolsa, ýagtylyk tolkunynyň elektromagnit meýdany tarapyndan elektronlara şonça-da uly güýçler täsir edip, elektronlara şonça-da köp energiýa berilmeli ýaly, emma ýagtylygyň goparan elektronlarynyň energiýasynyň diňe ýagtylygyň ýygylygyna baglydygy tejribelerde ýüze çykaryldy. Fotoelektronlaryň maksimal kinetik energiýasy ýagtylygyň intensiwligine bagly bolman, ýagtylygyň ýygylygy bilen göni ösýär. Ýokarda belleýşimiz ýaly, eger ýagtylygyň ýygylygy berlen madda üçin käbir kesgitlenen v_{min} minimal ýygylygyndan kiçi bolsa, onda fotoeffekt ýüze çykmaýar.

Fotoeffektiň teoriýasy

Fotoeffekt hadysasyny Makswelliň elektrodinamika degişli kanunlarynyň esasynda düşündirmegiň synanyşyklary hiç bir netije bermedi.

Plankyň ýagtylygyň kwantlar görnüşinde (üznükli) goýberilýändigi baradaky ideýasyny ösdürmek bilen, Eýnşteýn 1905-nji ýylda fotoeffekti düşündirdi. Fotoeffektiň tejribe arkaly alnan kanunlarynda Eýnşteýn ýagtylygyň üznükli gurluşynyň bardygynyň we aýry-aýry ülüşler bilen siňdirilýändiginiň hem ynandyryjy subudyny berdi. Şöhlelenmäniň her bir ülşüniň E energiýasy, Plankyň çaklamasyna görä, ýagtylygyň ýygylygyna proporsionaldyr:

$$E = hv, \tag{15.15}$$

bu ýerde h – Plankyň hemişeligi ($h = 6{,}63 \cdot 10^{-34}\ J \cdot s$).

Plankyň görkezişi ýaly, ýagtylygyň aýry-aýry ülüşler bilen şöhlelendirilmeginden ýagtylyk şöhlesiniň üznükli gurluşy gelip çykanok. Ýagtylygyň üznükli gurluşynyň bardygyny, diňe fotoeffekt hadysasy görkezdi: ýagtylyk energiýasynyň şöhlelendirilen $E = hv$ ülşi özboluşlylygyny soň hem saklaýar. Plankyň energiýa şöhlelenme baradaky teoriýasyny peýdalanyp, Eýnşteýn fotoeffektiň teoriýasyny döretdi.

Fotoelektronyň kinetik energiýasyny energiýanyň saklanma kanunyny ulanyp tapmak bolar. Ýagtylygyň ülşüniň hv energiýasy $A_ç$ çykyş işine, maddadan elektrony goparmak üçin gerek bolan işe we elektrona kinetik energiýa bermäge gidýär. Diýmek:

$$hv = A_c + \frac{m\upsilon^2}{2}. \tag{15.16}$$

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 ýygylygy we maddanyň tebigatyna hem onuň üstüniň ýagdaýyna bagly bolan çykyş işi bilen kesgitlenýär. Ol ýagtylygyň intensiwligine bagly däldir.

Fotoeffekt ýagtylygyň v ýygylygy käbir iň kiçi $v_{\min}$ bahadan uly bolanda ýüze çykýar.

$$hv_{\min} > A_ç.$$

Aňryçäk $v_{\min}$ ýygylyga fotoeffektiň gyzyl araçägi diýilýär. Ol şeýle aňladylýar:

$$v_{\min} = \frac{A_ç}{h}. \tag{15.17}$$

$A_ç$ çykyş işi maddanyň tebigatyna baglydyr. Şoňa görä hem, dürli maddalar üçin fotoeffektiň aňryçäk $v_{\min}$ ýygylygy dürlüdir.

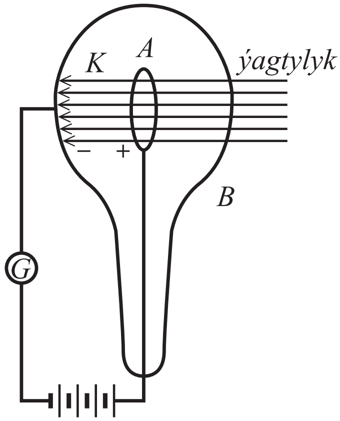
Eýnşteýniň (15.16) deňlemesinden peýdalanyp, Plankyň h hemişeligini kesgitlemek bolar. Munuň üçin ýagtylygyň ýygylygyny we $A_ç$ çykyş işini tejribede kesgitlemek, fotoelektronlaryň kinetik energiýasyny ölçemek gerek. Şeýle ölçemeler we hasaplamalar $h = 6{,}63 \cdot 10^{-34}\ J \cdot s$ ululygy berýärler.

Bu ululyk Plankyň düýpden başga hadysany – ýylylyk şöhlelenmesini teoretiki öwreneninde alan ululygy bilen gabat gelýär.

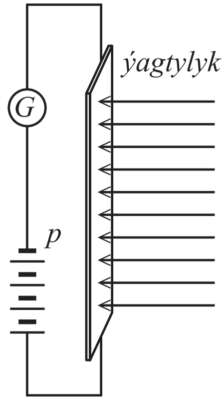
Plankyň hemişeliginiň dürli usullar bilen kesgitlenen bahalarynyň gabat gelmekleri maddanyň ýagtylygy şöhlelendirmeginiň we siňdirmeginiň üznükli häsiýetiniň bardygyny doly tassyklaýar.

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 ýaşaýyş şertlerini gowulandyrmakdan hem ybaratdyr.



15.6-njy surat. Wakuum fotoelementi



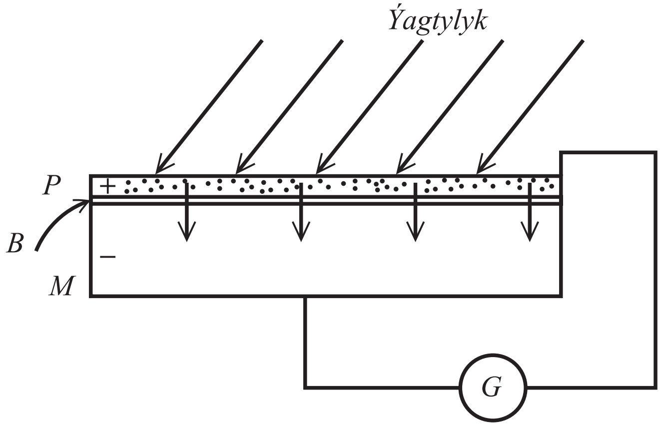
15.7-nji surat. Ýarymgeçirijili fotogarşylygy

Bu ýerde *A* – metaldan halka görnüşinde taýýarlanan anod, *K* – katod, *G* – galwanometr, *p* – ýarymgeçiriji plastinkasy.

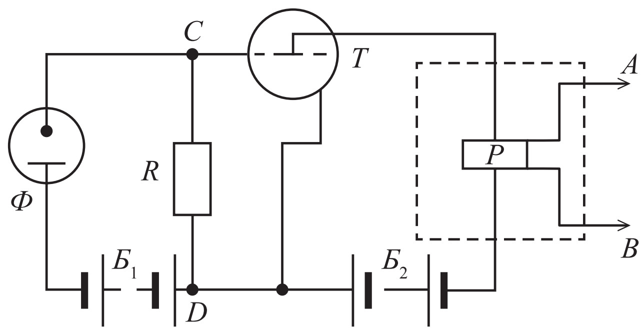
Fotoeffektiň kömegi bilen kino «dil açdy» we hereketlenýän şekilleri bermek mümkinçiligi döredi. Fotoeffekte esaslanyp gurlan abzallar önümleriň ölçeglerini islendik adamdan gowy barlaýar, maýaklary, köçe çyralaryny we ş.m. öz wagtynda ýakyp, söndürýär.

Bularyň hemmesi has kämilleşen gurluşlaryň – fotoelementleriň oýlanyp tapylmagy netijesinde mümkin boldy, olarda ýagtylygyň energiýasy elektrik togunyň energiýasyny dolandyrýar ýa-da oňa öwrülýär.

15.8-nji suratda içki fotoeffekte esaslanan ýapyjy gatlakly ýarymgeçiriji fotoelementi getirilen. *M* metal plastinkasyna ýukajyk *P* ýarymgeçiriji gatlagy çaýylan. Ol galwanometr arkaly elektrik zynjyryna birikdirilen. Metal, ýarymgeçiriji biri-biri bilen galtaşyp (kontaktlaşyp) elektronlary diňe ýarymgeçirijiden metal tarapa geçirýän ýapyjy gatlagy emele getirýär. Şeýle fotoelementler gönüden-göni ýagtylyk energiýasyny elektrik energiýasyna öwürýän toguň generatorlary hökmünde ulanylýar. Ýagtylyk fotoelementiň katodyna düşende, zynjyrda elektrik togy emele gelýär, ol tok bolsa ol ýa-da beýleki reläni işledýär ýa-da togtadýar. Fotoelementiň rele bilen utgaşdyrylmagy köp dürli görüji awtomatlary döretmäge mümkinçilik berdi.



15.8-nji surat. Ýarymgeçiriji wentil fotoelementi



15.9-njy surat. Fotoelektrik dolandyryjy gurluş

Fotoelementiň üstüne ýagtylyk düşende (*15.9-njy surat*) *R* rezistor arkaly $Б_1$ batareýanyň zynjyryndan gowşak tok gidýär. Rezistoryň uçlaryna *T* tranzistoryň bazasy we emitteri birikdirilen. Bazanyň potensialy emitteriň potensialyndan ýokarydyr hem-de tranzistoryň kollektor zynjyrynda tok ýokdur. Haçanda, adamyň eli howply zona gabat gelende, ol fotogarşylyga düşýän ýagtylygyň akymynyň öňüni ýapýar.

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.

§ 15.4. Fotonlar. Komptonyň effekti

Häzirki zaman fizikasynda fotona elementar bölejikleriň biri hökmünde garalýar. Elementar bölejikleriň tablisasy onlarça ýyllaryň dowamynda fotondan başlanýar. Ýagtylyk goýberilende we siňdirilende, ol özüni ýygylyga 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 ýygylyk arkaly däl-de, $\omega = 2\pi\nu$ aýlaw ýygylygy bilen aňladýarlar. Şunda proporsionallyk koeffisiýenti hökmünde h ululygyň deregine $\hbar$ ululygy ulanylýar (çyzylan aş diýip okalýar), ol häzirki maglumatlara görä:

$$\hbar = 1{,}05 \cdot 10^{-34}\ J \cdot s.$$

Onda fotonyň energiýasy Plankyň formulasyna görä şeýle aňladylýar:

$$E = h\nu = \hbar\omega. \tag{15.18}$$

Görälik teoriýasyna laýyklykda, energiýa massa bilen $E = mc^2$ aňlatma arkaly baglanyşyklydyr. Fotonyň energiýasy $h\nu$ deň bolany üçin onuň m massasy aşakdaky ýaly kesgitlenýär:

$$m = \frac{h\nu}{c^2}. \tag{15.19}$$

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:

$$p = mc = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda}.$$

Fotonyň impulsy ýagtylyk şöhlesi boýunça ugrukdyrylandyr. Ýygylyk näçe uly bolsa, fotonyň energiýasy we impulsy şonça-da uludyr, ýagtylygyň korpuskulýar häsiýeti şonça-da aýdyň ýüze çykýar. Plankyň hemişeliginiň kiçiligi sebäpli, görünýän ýagtylygyň fotonlarynyň energiýasy juda ujypsyzdyr. Ýaşyl 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 şöhlelenmäniň 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 ýygylykly düşýän şöhle şol bir ýygylykdaky elektronlaryň mejbury yrgyldylaryny döredýär. Yrgyldaýan elektronlar ν ýygylykly elektromagnit tolkunlaryny ikilenç şöhlelendirýärler. Bu ýaýraýan şöhledir. Onuň $\lambda = \frac{c}{\nu}$ tolkun uzynlygy düşýän şöhlelenmäniň tolkun uzynlygy bilen deň bolmalydyr.

Fotonlar $E = h\nu$ energiýaly we $p = \frac{h}{\lambda} = \frac{h\nu}{c}$ impulsly ýagtylygyň bölejikleridir diýen düşünjeleriň esasynda tolkunlaryň uzynlygynyň ýaýranda üýtgeýändigini (Komptonyň effekti) düşündirmek mümkin boldy. Foton bilen elektron çaknyşanda, impulsyň we energiýanyň saklanma kanunyny peýdalanmak bilen, tolkun uzynlygynyň üýtgeýşini kesgitlemek bolar:

$$h\nu + E_0 = h\nu' + E, \tag{15.20}$$

bu ýerde $E_0 = m_o c^2$ we E – degişlilikde, elektronyň başlangyç (çaknyşma çenli) hem-de ahyrky energiýasy (m_0 – dynçlykdaky elektronyň massasy), ν' – ýaýraýan fotonyň ýygylygy.

Impulsyň saklanma kanunyna laýyklykda:

$$p = p' + p_e. \tag{15.21}$$

Energiýanyň (15.20) we impulsyň (15.21) saklanma kanunlaryndan θ ýaýrama burçuna baglylykda ýaýraýan şöhlelenmäniň tolkun uzynlygynyň üýtgeýşini kesgitlemek bolar:

$$\Delta\lambda = \lambda^1 - \lambda = 2v_k \sin^2 \frac{\theta}{2}, \qquad (15.22)$$

bu ýerde $\lambda_k = \frac{h}{m_o c} = 2,4 \cdot 10^{-12}\ m$ – elektronyň Kompton tolkun uzynlygy diýilýän hemişelik ululyk.

§ 15.5. Optiki kwant generatorlary (lazerler)

Lazer sözi «Light Amplification by stimulated Emission of Radiation» diýen iňlis 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 peýdalanyp, ýadro partlamasynyň energiýasynyň dykyzlygyndanam uly dykyzlykly energiýany alyp bolýar. Lazer şöhlelenmesiniň kömegi bilen eýýäm temperaturanyň, basyşyň, magnit induksiýasynyň iň 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 alymlary N.G.Basow we A.M.Prohorow elektromagnit tolkunlaryny güýçlendirmek we generirlemek üçin indusirlenen şöhleleriň kwant sistemasyny ulanmaklygy teklip etdiler. Soňra öz ideýalaryny durmuşa geçirip, molekulýar generatory döretdiler. 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 1,27 *sm* 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 teklip 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 teklip edilipdi.

1961-nji ýylda N. G. Basow, O. N. Krotin, A. M. Prohorow ýarymgeçirijili lazerleri döretmekligi teklip 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 sredanyň) 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. Işçi jisimi, onda elektronlaryň konsentrasiýasynyň (göwrüm birligindäki sanynyň) köplügi döredilýär.
2. Nakaçka – işçi jisiminde elektronlaryň köplügini döretmek üçin ulanylýan gurluş.

22. Sargyt № 3303

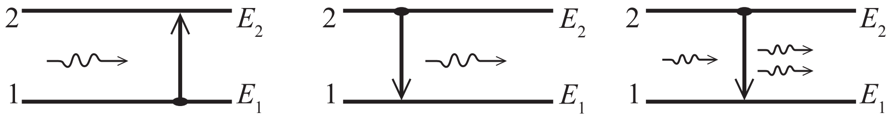
3. Optiki rezonator – giňişlikde fotonlaryň akym ugruny saýlaýan we çykýan ýagtylyk desselerini emele getirýän gurluş.

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 «ýaşaýan» (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 termodınamiki deňagramlylygynyň hem-de onuň goýberýän we siňdirýän şöhlelenmesiniň arasynda tejribede ýüze çykýan prosesleri düşündirmek üçin siňdirilýän we öz-özünden şöhlelenýän şöhlelenmelerden başga-da, täze üçünji bir hil taýdan täze görnüşli özaratäsiriň bolmalydygyny teklip etdi. Eger oýandyrylan 2 ýagdaýdaky atoma $h\nu = E_2 - E_1$ şerti kanagatlandyrýan daşardan şöhlelenme täsir etse, mejbury (indusirlenen) geçiş ýüze çykýar we oýandyrylan atom energiýasy pes bolan $h\nu = E_2 - E_1$-e deň bolan fotony şöhlelendirip, energiýasy pes bolan 1 esasy ýagdaýa geçýär (*15.10-njy ç surat*). Şeýle geçişde şu geçişi döreden fotona goşmaça atomyň özi-de foton goýberýär. Şeýle geçişleriň netijesinde ýüze çykýan şöhlelenmä iki sany foton gatnaşýar. Ilkinji foton-oýandyrylan atomy şöhlelendirmäge mejbur eden foton, ikinjisi, oýandyrylan atomyň goýberýän fotony. Şöhlelendirilen fotonlar



15.10-njy surat.
a) siňdirme; *b*) öz-özünden şöhlelenme; *ç*) mejbury şöhlelenme

bir ugra tarap hereket edýärler we beýleki oýandyrylan atomlar bilen duşuşyp, mejbury geçişleri ýüze çykarýarlar. Şeýlelikde, olaryň sany barha artýar. Bu şöhlelenmäniň ajaýyp aýratynlygy indusirlenen şöhlelenmede soňky dörän fotonlar, ilkinji fotonlardan ýygylyklary boýunça-da, polýarlanyşy boýunça-da tapawutlanmaýarlar.

Mejbury şöhlelenme kwant nazaryýetiniň dilinde atomyň ýokary energetik haldan aşaky (pes) energetik hala geçmegini aňladýar, emma bu adaty şöhlelenmede bolşy ýaly, öz-özünden bolman, daşky täsiriň astynda bolýar.

Ilkinji işçi jisimi gaty jisim bolan spektriň görünýän çäklerinde işleýän (tolkun uzynlygy 0,6943 *mkm*) rubin lazeri 1960-njy ýylda ABŞ-da (T. Meýman) döredilýär. Onda N. G. Basow tarapyndan teklip edilen üç derejeli sistema ulanylýar.

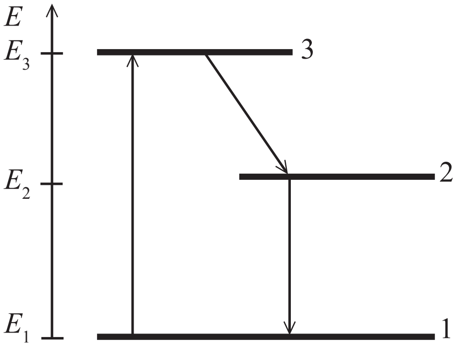
Siňdirme, öz-özünden we mejbury şöhlelenme

Atomlar $E_1, E_2, E_3 \ldots$ energiýalara eýe bolan kesgitli (kwant) ýagdaýynda bolup bilerler. Biz ýönekeýlik üçin, diňe E_1 we E_2 energiýalara eýe bolan iki derejeli sistema serederis:

Üç derejeli sistema. Ýokarda belleýşimiz ýaly, atomlary oýandyrylan ýagdaýda bolan sistemany 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 däldir. 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 sistemanyň dürli energetik ýagdaýlarda bolýan wagtynyň (ýaşaýyş wagtynyň) birden däl bolmagynyň uly ähmiýeti bardyr. Üçünji derejede elektronlar oýandyrylan ýagdaýda bolup örän az, ortaça 10^{-8} s töweregi ýaşaýarlar. Soňra, öz-özünden 2-nji ýagdaýa ýagtylyk şöhlelenmän geçýärler. Bu ýagdaýa durnukly däl (metastabil) ýagdaý diýilýär. Olaryň bu ýagdaýda «ýaşaýan» wagtlary üçünji ýagdaý bilen deňeşdireniňde 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 köpsanly atomlary «zyňmak» gerek. Şeýle maksat üçin optiki nakaçka ulanylýar. Kristalyň daşynda ýerleşen ýagtylyk çeşmesi – puržin görnüşli gaz zarýadsyzlanma çyrasy energiýany şöhlelendirýär. Sygymy birnäçe müň mikrofarad 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 (ýaşaýjylaryň) köplügi döredilýär.

Öz-özünden 2–1 geçişleriň netijesinde 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 hromuň oýandyrylan ionlarynyň indusirlenen şöhlelenmesini döredýär we çalt güýçlenýär. Rubin çybygynyň bir ujuny aýnalaýyn, beýlekisini bolsa ýarym dury edýärler. Bu uçdan gyzyl ýagtylygyň kuwwatly gysga wagtly (dowamlylygy ýüz mikrosekunt töweregi) impulsy çykýar. Ähli atomlaryň ylalaşykly şöhlelenýändikleri 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-nji takt. Atomlary oýandyrylan ýagdaýlaryna geçirýän gurluş (Nakaçka). Daşky ýagtylyk çeşmesi bilen işçi jisimini oýandyrmak we onuň atomlaryny energiýanyň oýandyrylan derejelerine geçirmek;

2-nji takt. Gysyş. Berlen energiýanyň köp bölegini durnukly däl derejelere geçirmek;

3-nji takt. Otlamak. Her bir kwantyň ýyldyrym çaltlygynda mejbury şöhlelenmäni goýbermegini döretmek;

4-nji takt. Çykyş. Gapdal üstleriň aralygynda «ylgap» ýören ýagtylyk kwantlary durnukly däl derejeleri boşadýarlar. Ýagtylyk şöhlesi kuwwatly kogerent impulslar görnüşinde kristaldan çykýarlar.

Lazerleriň görnüşleri: Rubin lazerleriň işçi jisimi Al_2O_3 alýumin okisi bolup, oňa 0,03–0,05 % möçberinde üç walentli hromuň 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, geliniň we neonyň garyndysyndan taýýarlanan gaz lazerleri bar. Aýratyn hem kömürturşy gazynyň – CO_2-niň esasynda taýýarlanan lazer giňden ulanylýar. Onuň peýdaly täsir koeffisiýenti (PTK) 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 çuňlugyna gowy aralaşyp bilýärler.

Lazerleriň ulanylyşy. 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, kebşirlemek we ş. m. üçin peýdalanylýar. Lazer şöhlesiniň kömegi bilen hirurgiýa operasiýalaryny geçirmek bolýar, meselem, gözüň düýbünden gopan torjagazlaryny «seplemek» bolýar, lazer şöhleleriniň kogerentligini peýdalanyp, 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 atomlary oýandyrylan ýagdaýlaryna geçirýän gurluşda (nakaçkada) $W = 20\ Wt$ energiýa aldy we $10^{-3}\ s$ şöhlelendirildi diýeliň, onda şöhlelenme akymy $\phi_e = 20 \cdot 10^{-3}\ J/s = 2 \cdot 10^4\ Wt$ bolýar. Bu şöhlelenmäni $1\,mm^2$ üste düşürip, $\phi_e/S = 2{,}10^4 \cdot 10^{-6}\ Wt/m^2 = 2 \cdot 10^{10}\ Wt/m^2$ energiýa alyp bolýar. Şeýle kuwwatly şöhle bilen islendik gaty materiallary kesmek, olarda kiçijik deşijekleri deşmek bolar.

Lazerleriň ulanylýan ýerleri şeýle giň, olaryň baryny sanap geçmek mümkin däl.

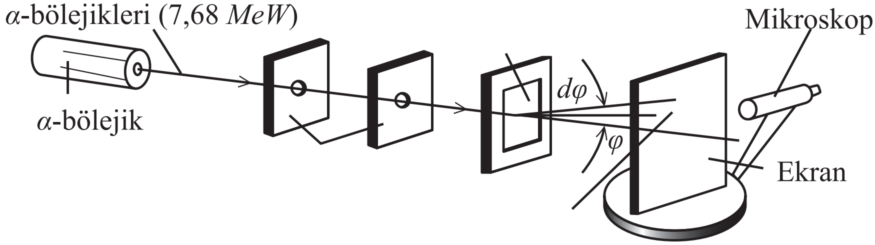
ATOMYŇ GURLUŞY WE ÝADRO FIZIKASYNYŇ ELEMENTLERI

§ 16.1. Atomyň 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 açyş bolup, kwant fizikasynyň döremegine getirdi.

Tomsonyň modeli. Alymlar atomyň gurluşy baradaky dogry düşünjelere birbada gelmediler. Atomyň ilkinji modelini elektrony açan iňlis fizigi J. J. Tomson teklip etdi. Tomsonyň pikirine görä, atomyň položitel zarýady onuň bütin göwrümini tutýar we şol göwrümde hemişelik dykyzlyk bilen bölünendir. Iň bir ýönekeý atom bolan wodorodyň atomy çyzykly ölçegi 10^{-10} *m* bolan şarjagaz (sfera) bolup, onuň içinde deňagramlyk ýagdaýda elektron ýerleşendir. Otrisatel elektronlar we ýadrodaky položitel zarýadlar özara itekleşme we dartyşma güýçleriniň täsiri netijesinde deňagramlylyk ýagdaýynda bolýarlar. Deňagramlylyk ýagdaýyndaky elektronlar bellibir aralykda yrgyldyly hereket edýärler we ýagtylygy şöhlelendirýärler. Emma Tomsonyň teklip eden bu modeli atomda položitel zarýadlaryň bölünişi barada geçirilen tejribelere doly garşy geldi we bu model atom spektrindäki kanunalaýyklyklary düşündirip bilmedi. 1911-nji ýylda iňlis fizigi E. Rezerfordyň geçiren tejribeleri düýbünden başga atom modeline getirdi.

Rezerfordyň tejribesi. Radiý we birnäçe radioaktiw 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* bolup, elektronyň massasyndan 7350 esse uly, položitel zarýady bolsa elektronyň zarýadyndan 2 esse uly bolan, ýagtylygyň tizligine golaý ($\approx 10^7$ *m/s*) tizlik bilen hereket edýän iki gezek ionlaşdyrylan geliý



16.1-nji surat. Rezerfordyň tejribesi

atomlarydyr. Rezerford α – bölejikleriň çeşmesi hökmünde radini ulanýar (*16.1-nji surat*). 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 traýektoriýasyny duýarlyk derejede üýtgedip bilmezler, α – bölejikleriň hereket ugruny bölejikleriň diňe atomyň položitel zarýadlanan bölegi üýtgedip biler diýen netijä gelýär.

Suratdan görnüşi ýaly, gurşun silindriň içinde ýerleşdirilen radiden çykýan α-bölejikleriň dessesi diafragma hökmünde ulanylýan gurşun kollimatoryndan geçip, altynyň (barlanylýan madda) ýukajyk folgasyna (tekiz list) düşýär. Energiýasy 5 *MeW* bolan bölejikler galyňlygy millimetriň ýüzden bir ülşüne golaý bolan altyn folgasyndan geçenlerinde olaryň 20 000-inden diňe biri 90° gyşarypdyr. α – bölejikler folgadan geçip, darganlaryndan soň kükürtli sink bilen örtülen ýarymdury ekrana düşýär. Her bir bölejik ekrana urlanda ýalpyldy döreýär we ony mikroskop arkaly görmek bolýar.

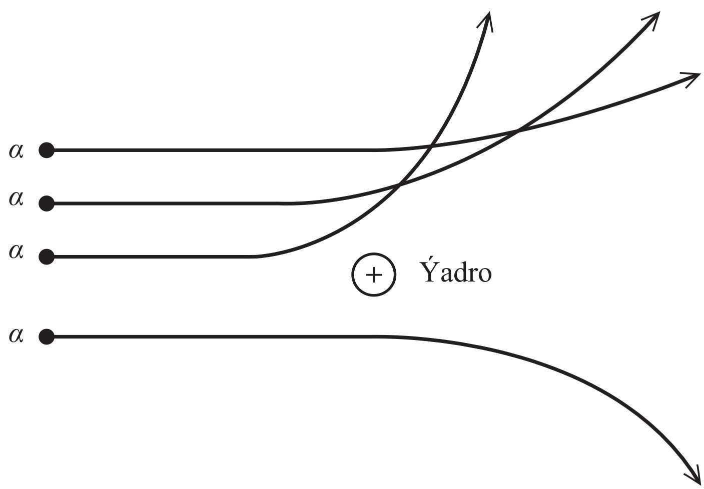
Ýokary wakuumda (içinden howasy, mümkin boldugyça, sordurylan gap) abzalyň içinde folga ýokka, ekranda bölejikleriň insizje dessesiniň döreden ýagtylyk zolagy döräpdir. Emma, dessäniň ýolunda folga goýlanda α – bölejikler dargap, ekranyň köp meýdançasyny tutupdyrlar.

Rezerford tejribede alnan netijeleri seljerip, elektronlaryň massalaryna garanyňda 7350 esse uly massaly, ägirt uly tizlik bilen hereket edýän α – bölejikleriň gyşarmasy, eger-de folgada Tomsonyň teklip eden modelindäki ýaly položitel zarýadlar bütin göwrüm boýunça ýerleşmän, bir-birlerinden ýeterlik daşlykda topbak görnüşinde (örän kiçi ýerde) jemlenen bolsa, diňe şol ýagdaýda α – bölejigiň yzyna zyňylmagy ýa-da gyşarmagy mümkindir diýen netijä gelýär. Şeýlelikde, Rezerford, atom – merkezinde ýadrosy bolan şol ýadroda-da onuň ähli diýen ýaly massasy we ähli položitel zarýady toplanan kiçijik jisimlerdir diýen netijä gelipdir.

Ýadrodan dürli uzaklyklara gyşaran α – bölejikleriň traýektoriýasy 16.2-nji suratda görkezilendir. Dürli burçlara gyşaran α – bölejikleriň sanyny hasaplap, Rezerford ýadronyň ölçeglerini kesgitleýär.

Ýadronyň diametri dürli ýadrolar üçin dürli bolup, $10^{-14} - 10^{-15}\,m$ töweregindedir. Atomyň özüniň ölçegi 10^{-10} m. Diýmek, ýadronyň ölçegi atomyň ölçeginden $10^4 - 10^5$ esse kiçidir. Ýadronyň zarýady elektronyň zarýady birlik deregine kabul edilende elektronyň zarýadyny şol himiki elementiň Mendeleýewiň tablisasyndaky tertip belgisine köpeldilmegine deňdir (Ze).

Atomyň planetar modeli. Rezerfordyň tejribesinden 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 böle-



16.2-nji surat. Ýadrodan gyşaran α-bölejikleriň traýektoriýalary jikleriň (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 elektrodinamikasyndaky kanunyna görä, tizlenip hereket edýän zarýad özüniň ýadronyň töweregindäki aýlanma ýygylygyna deň ýygylykly elektromagnit tolkunlaryny şöhlelendirmelidir. Şöhlelenen 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 durnuklydyrlar. 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 şöhlelenmeleriň nazaryýeti baradaky çaklamalaryny üç sany postulat görnüşinde teklip etdi.

1-nji postulat. Elektronlar atomda birnäçe stasionar orbitalarda şöhlelenmän hereket edýärler.

2-nji postulat. Stasionar orbitalar bolup elektronyň hereket mukdarynyň momenti (impulsy) $m\upsilon_n r_n$ bütin sanlara deň bolan orbitalar hasaplanylýar:

$$m\upsilon_n r_n = n\frac{h}{2\pi}, \qquad (16.1)$$

bu ýerde n – bütin sanlar (baş kwant sany n =1, 2, 3….), h – Plankyň hemişeligi ($h = 6{,}63 \cdot 10^{-34}\ J\cdot s$), m – elektronyň massasy, υ_n – elektronyň n-nji orbitadaky tizligi, r_n – n-nji orbitanyň radiusy.

3-nji postulat. Elektron islendik daşky (2-nji) stasionar orbitadan golaýdaky (1-nji) stasionar orbita geçeninde, atom energiýasy $h\nu = E_2 - E_1$ deň bolan ýagtylyk ülşüni (fotony) goýberýär. 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 zarýady bolup, ululygy boýunça elektronyň zarýadyna deňdir, emma alamaty boýunça garşylyklydyr. Protonyň massasy elektronyň massasyndan 1836,15 gezek, neýtronyň massasy bolsa elektronyň massasyndan 1838,68 gezek uludyr.

Ýokarda belleýşimiz ýaly, dürli atom ýadrolarynyň çyzykly ölçegi $10^{-15}-10^{-14}$ *m* aralygyndadyr, ýagny atomyň diametrinden $10000 \div 100000$ gezek kiçidir. Biri-birinden 10^{-15} *m* aralykda ýerleşen protonlar ägirt uly güýç bilen itekleşýänler-de bolsalar, olar böleklere dargap gitmeýärler. Ýadronyň şeýle durnuklylygy, ýadrodaky bölejikleriň arasynda ýadro güýçleri diýen aýratyn güýçleriň barlygy bilen düşündirilýär. Islendik himiki elementiň atomy ýa-da ýadrosy şeýle belgilenýär:

$$^{A}_{Z}X,$$

bu ýerde A – ýadrodaky protonlaryň we neýtronlaryň sanyna deň bolan massa sany, Z – ýadrodaky zarýadlanan bölejikleriň (protonlaryň) sanyna deň bolan zarýad sany. Ýadronyň zarýady Ze deň, e – elektronyň zarýadyna deň bolan elementar zarýad. 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 zarýadly, emma dürli massaly ýadrolara izotoplar diýilýär. Bir himiki elementiň izotoplarynyň birmeňzeş zarýad 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 bolan uranyňam (A = 238,235), iň ýeňili – wodorodyňam (A = 1, 2, 3) izotoplary bardyr. Wodorodyň izotoplary biri-birinden massalary boýunça üç esse tapawutlanýarlar.

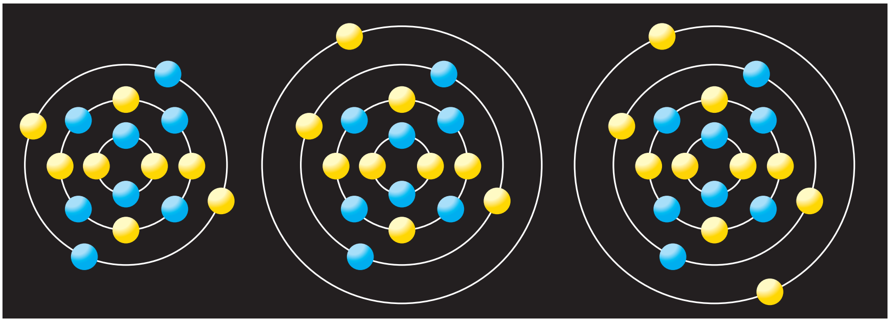
$^{2}_{1}H$ – izotopa deýteriý diýilýär. Ol durnukly (ýagny radioaktiw däl). Deýteriý kislorod bilen birleşende agyr suwy emele getirýär. Onuň fiziki häsiýetleri adaty suwuň häsiýetlerinden duýarlykly tapawutlanýar.

Atom massasy 3-e deň bolan ($^{3}_{1}H$) wodorodyň izotopyna tritiý diýilýär. Ol ýarymdargama periody 12 ýyla deň bolan β-radioaktiwlidir.

16.3-nji suratda kislorodyň üç sany durnukly izotoplary görkezilendir $^{16}_{8}O$, $^{17}_{8}O$, $^{18}_{8}O$.

Şol bir himiki elementiň izotopy birmeňzeş himiki häsiýete eýedir. Şu sebäpli-de, olar Mendeleýewiň periodiki tablisasynda bir öýjükde ýerleşýärler.

Birmeňzeş massa sanly (A), emma (Z) zarýad sanlary dürli bolan ýadrolara izobaralar diýilýär. Meselem $^{79}_{36}Kr$, $^{79}_{37}Pb$. Izobaralar dürli fiziki we himiki häsiýetli elementler bolandyklary üçin olar Mendeleýewiň periodiki tablisasynda dürli öýjüklerde ýerleşýärler.



16.3-nji surat. Kislorodyň izotoplary

§ 16.3. Atom ýadrosynyň baglanyşyk energiýasy. Massa defekti

Materiýa hasaplanylýan bölejikleriň arasynda bize belli bolan dört sany özaratäsir güýçleri bardyr: Olar: grawitasiýa, gowşak, elektromagnit we ýadro güýçleridir. Grawitasiýa güýçleriniň uly massaly jisimleriň özaratäsirinde ähmiýeti uly bolup, atom hadysalarynda olary hasaba almasaň-da bolýar. Elektromagnit güýçleri iki sany nokatlanç zarýadlanan jisimleriň arasynda täsir edýär. Ýadro güýçleri örän kiçi aralyklarda, ýagny atom ýadrosynyň diametrine golaýrak aralykda täsir edýär. Ýadroda ýerleşen bölejiklere iç tarapyndan ony dargatjak 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 saklanma kanunynyň esasynda baglanyşyk energiýasy aýrý-aýry bölejiklerden ýadro emele gelende bölünip çykýan energiýa deňdir diýmek bolar.

Energiýanyň saklanma 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:

$$\Delta E = \Delta m c^2, \tag{16.2}$$

bu ýerde c – ýagtylygyň wakuumdaky tizligi, ΔE seredýän ýagdaýymyzdaky ýadronyň baglanyşyk energiýasydyr.

Çylşyrymly ýadronyň massasynyň ony emele getirýän bölejikleriň (protonlaryň we neýtronlaryň) massalarynyň jeminden kiçidigini tejribeler görkezýär. Olaryň tapawudyna massa defekti diýilýär. Ýagny

$$\Delta M = M_O - {}^{A}_{Z}M > O, \tag{16.3}$$

bu ýerde M_0 – ýadrony emele getirýän ähli bölejikleriň massalarynyň jemi. ${}^{A}_{Z}M$ – ýadronyň massasy. Belli bolşy ýaly:

$$M_O = Zm_p + (A - Z)\, m_n, \tag{16.4}$$

bu ýerde m_p, m_n – degişlilikde, protonyň we neýtronyň massalary.

$$\Delta M = Zm_p + (A - Z)m_n - {}^{A}_{Z}M. \tag{16.5}$$

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 massanyň atom birliginde ($1\, m.a.b = 1{,}66 \cdot \cdot 10^{-27}\, kg$) aňladylan bolsa, baglanyşyk energiýasyny şeýle aňlatma bilen kesgitlemek bolar:

$$\Delta E = 931\, \Delta M, \tag{16.6}$$

bu ýerde 931 MeW – proporsionallyk koeffisiýenti.

Baglanyşyk energiýasynyň ululygy barada şeýle mysal getirmek bolar. 4 g 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:

$$\varepsilon = \frac{\Delta E}{A} = \frac{\Delta M c^2}{A}. \tag{16.7}$$

Ýadro güýçleri tebigaty boýunça elektrik güýçleri däl, onuň ululygy bölejigiň zarýadyna bagly däl. Şonuň üçin neýtron-neýtron, proton-proton we neýtron-proton jübütleriniň arasynda täsir edýän ýadro güýçleri birmeňzeşdir. Emma atom belgileriniň artmagy bilen protonlaryň arasyndaky elektrostatiki itekleşme güýçleri barha artýar. Şonuň üçin Mendeleýewiň periodiki sistemasynyň ahyrynda ýerleşen elementleriň ýadrolarynyň, talliden başlap, radioaktiwdikleri tebigydyr.

§ 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 bolandygy sebäpli, gaýtalap bilmeýär. Bekkerel plastinkanyň üstünde uranyň duzy bilen örtülen mis atanagyny goýup, olary stoluň sürgüçlerine salypdyr. Iki Gün 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 goýberýär, 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 köpsanly agyr himiki elementlere-de degişlidigini görkezdi (tertip belgisi 83-den uly bolan himiki elementleriň ählisiniň radioaktiwdigi soňra anyklanyldy).

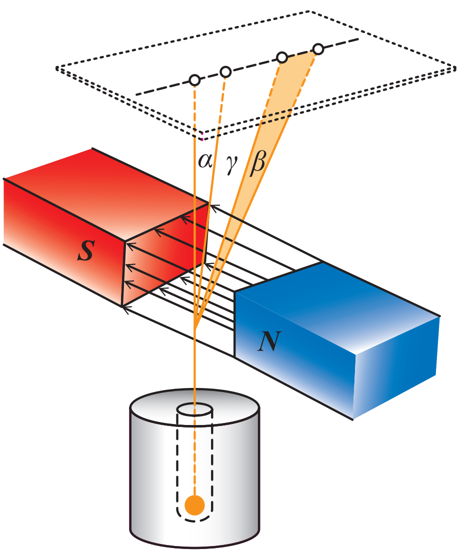
Radioaktiw şöhlelenmäniň çylşyrymly düzümi bolup, oňa alfa şöhlesi, beta şöhlesi we gamma şöhlesi adyny alan üç görnüşli şöhleler girýär. Bu şöhleleriň tebigaty we esasy häsiýetleri bilen tanşalyň.

1. Alfa şöhleler elektrik we magnit meýdanlarynda gyşarýarlar. Olar alfa şöhleler adyny alan ${}^{4}_{2}He$ geliý atomynyň ýadrosynyň akymydyr. 16.4-nji suratda alfa bölejikleriň akymynyň ugruna perpendikulýar bolan magnit meýdanynda olaryň gyşaryşy görkezilendir. Her bir bölejigiň 2-ä deň bolan položitel zarýady we 4-e deň bolan massa sany bardyr. Alfa bölejikleri radioaktiw elementiň ýadrosyndan 14 000–20 000 *km/s* tizlik bilen çykýarlar.

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 0,1 *mm* 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 şöhleler elektrik meýdanynda-da, magnit meýdanynda-da güýçli gyşarýarlar. Olar β – bölejikleri diýip atlandyrylýan elektronlaryň akymydyr. Olaryň massasy α – bölejikleriň massasyndan 7 350 gezek kiçidir. β – bölejikleriň orta tizligi 160 000 *km/s* golaý. Suratda magnit meýdanynda β – bölejikleriň gyşaryşy görkezilendir. Şol bir radioaktiw elementiň ýadrosy tizligi 0-a we ýagtylygyň tizligine golaý bolan β – bölejikleri goýberýär. Bu bolsa β – bölejikleriň dessesiniň magnit meýdanynda giňelmegine getirýär. β – bölejikleriň massalary kiçi, tizlikleri uly, bir elementar zarýada eýe, ionlaş-



16.4-nji surat. α, β, γ – şöhleleriň magnit meýdanynda gyşaryşy dyryjy ukyby α – bölejikleriňkiden 100 esse kiçi. Olaryň ylgaw ýoly (ýokary energiýada) howada 40 *m*, alýuminide 2 *sm*, biologiki bedende – 6 *sm*-e deňdir.

3. Gamma şöhleler. Öz häsiýetleri boýunça γ – şöhleler rentgen şöhlelerini ýada salýar. Emma olaryň geçijilik ukyby rentgen şöhleleriniňkiden has-da uludyr. γ – şöhleleri örän gysga tolkun uzynlygy bolan elektromagnit tolkunlarydyr ($\gamma = 10^{-10} - 10^{-13}$ *m*). Olaryň tizligi ähli elektromagnit tolkunlarynyň tizligi ýaly – 300 000 *km/s* golaýdyr. Ýokarda belleýşimiz ýaly, rentgen we γ şöhleler bir-birlerinden öz gelip çykyşlary we energiýalary boýunça tapawutlanýarlar. Rentgen şöhleleri çalt hereket edýän elektronlar birden togtadylan wagtynda ýüze çykýan bolsa, γ – şöhleler ýadro öwrülmelerinde ýüze çykýar. Onuň islendik madda bilen özaratäsirinde üç sany häsiýeti ýüze çykýar: fotoeffekt, komptonyň effekti we elektron-pozitron jübütiniň emele gelmegidir.

§ 16.5. Süýşme düzgüni. Radioaktiw dargama kanuny. Ýarymdargama periody

Radioaktiw şöhlelenmede şöhlelenýän elementiň ýadrosy başga bir elementiň ýadrosyna öz-özünden öwrülýär. Bu proses süýşme düzgünine boýun egýär. Bu düzgün radioaktiw dargama mejbur bolan izotopyň massa sanyny emele gelen izotopyň massa sany bilen baglanyşdyrýar.

β bölejik goýberilende ýadronyň zarýady 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 sistemada bir belgi saga süýşýär, ýagny:

$$ {}^{A}_{Z}X \rightarrow {}^{\;\;A}_{z+1}Y + \beta^{-}. \qquad (16.8)$$

Mysal üçin, ${}^{210}_{83}\mathrm{Bi} \rightarrow {}^{210}_{84}\mathrm{Po} + \beta^{-}$.

α – bölejik goýberilende ýadronyň zarýady iki birlik, massa sany bolsa, 4 birlik kemelýär, ýagny α – dargamada elementiň massa sany dört birlik kemelip, ol iki belgi çepe süýşýär:

$$^{A}_{Z}X \rightarrow {}^{A-4}_{z-2}Y + {}^{4}_{2}\mathrm{He}. \qquad (16.9)$$

Mysal üçin, $^{210}_{84}\mathrm{Po} \rightarrow {}^{206}_{82}\mathrm{Pb} + {}^{4}_{2}\mathrm{He}$.

Periodiki sistemada radioaktiw elementiň süýşmesini kesgitleýän (16.8) we (16.9) düzgüne radioaktiw süýşme düzgüni diýilýär. Ol ilkinji gezek 1913-nji ýylda iňlis fizigi we himigi J. Soddi tarapyndan we ondan bihabar, nemes fizigi we himigi K. Faýans tarapyndan açylýar (Soddi-Faýans kanuny).

Radioaktiw dargama radioaktiw 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, radioaktiw elementiň atomlarynyň umumy *N* sanyna we dargama wagtyna proporsionaldyr.

$$dN = -\lambda N dt, \qquad (16.10)$$

bu ýerde λ – proporsionallyk koeffisiýenti. Oňa berlen elementiň dargama hemişeligi diýilýär. Minus alamaty radioaktiw elementiň atomlarynyň sanynyň wagta görä azalýandygyny aňladýar. (16.10) deňlemeden, tapýarys:

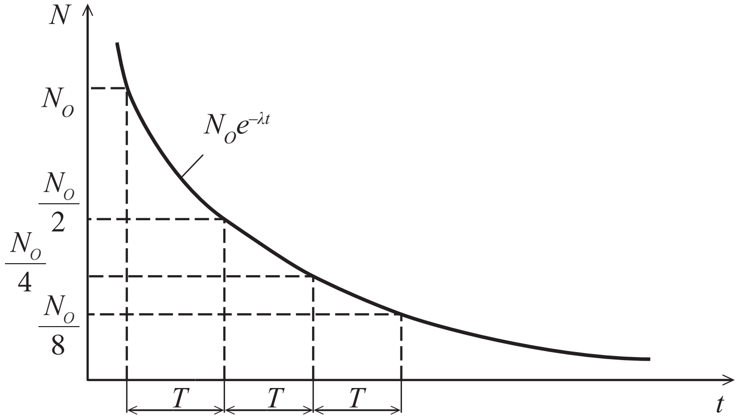
$$\lambda = -\frac{dN}{Ndt}.$$

Ýagny dargama hemişeligi berlen elementiň atomlarynyň sanynyň wagta baglylykda göräli azalmagyna deňdir.

(16.10) deňlemäni $t = 0$-dan t aralygynda integrirläp, alýarys:

$$N = N_O e^{-\lambda t}, \qquad (16.11)$$

bu ýerde N_0 – başlangyç wagt pursadyndaky elementiň atomlarynyň sany, N – şol bir elementiň t wagt geçeninden soňky galan atomlarynyň sany. (16.11) gatnaşyga radioaktiw dargama kanuny diýilýär. Bu kanunyň çyzgy görnüşi 16.5-nji suratda görkezilendir:



16.5-nji surat. Radioaktiw maddanyň atomlarynyň dargaýşynyň ýarymdargama periodyna baglylygynyň çyzgysy

$$\lambda = \frac{\ln 2}{T}.$$

Radioaktiw elementiň dargaýşyny häsiýetlendirmek üçin ýarymdargama periody diýen düşünje girizilýär.

Berlen elementiň atomlarynyň mukdarynyň iki esse azalýan wagtyna ýarymdargama periody T diýilýär. (16.11) aňlatmadan tapýarys:

$$e^{-\lambda T} = \frac{1}{2}, \quad \text{bu ýerden:} \quad T = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{0,693}{\lambda}. \qquad (16.12)$$

Dargama hemişeligine ters proporsional bolan ululyga radioaktiw atomyň ortaça ýaşaýan wagty τ diýilýär.

$$\tau = \frac{1}{\lambda}.$$

Şeýlelikde, $T = \tau \ln 2$.

Bu ýerden: $\tau = T/\ln 2 = 1,44\ T$; Ýagny radioaktiw atomyň ortaça ýaşaýan wagty ýarymdargama periodyndan 1,5 essä golaý uly.

Ýarymdargama periodyna düşünmek üçin şeýle mysal getireliň: Poloniniň $^{210}_{84}Po$ ýarymdargama periody T = 140 gün. Diýmek, 1 g poloniden 140 günden soňra 0,5 g galýar. Ýene-de 140 günden 0,5 gramyň ýary, ýagny 0,25 g galýar. Şeýlelikde, her 140 günden poloniniň galan atomlarynyň sany ýarym-ýarymdan azalyp barýar.

Geň galaýmaly zat, poloniniň 560 günden soňky galan 1/16 gramy ähli häsiýetleri boýunça şol başdakysyndan hiç hili tapawutlanmaýar. Diýmek, radioaktiw ýadronyň häsiýeti wagtyň geçmegi bilen üýtgemeýär, ýagny «ýadro garramaýar». Bu häsiýet ähli radioaktiw elementlere-de, ähli radioaktiw öwrülmelere-de degişlidir.

Radioaktiw elementiň 1 sekundyň dowamynda dargaýan atomlarynyň sanyna, bu elementiň aktiwligi (işjeňligi) diýilýär.

$$a = \left|\frac{dN}{dt}\right|. \tag{16.13}$$

(16.10), (16,11) we (16.12) aňlatmalardan: $a = \lambda N = \dfrac{N\ln 2}{T}$, ýagny elementiň aktiwligi onuň mukdaryna göni proporsional bolup, ýarymdargama periodyna ters proporsionaldyr. Aktiwligiň birligi deregine 1 g radiniň aktiwliligi kabul edilen, oňa Kýuri diýilýär (Ku). $1\,Ku = 3{,}7 \cdot 10^{10}$ $s/dargama$.

§ 16.6. Radioaktiw elementleriň maşgalasy

Himiki elementiň radioaktiw dargamasynyň önümi-de radioaktiw bolup biler. Şonuň üçin radioaktiw dargama prosesi köpsanly aralyk derejelerden geçip, radioaktiw elementleriň zynjyryny emele getirýär, ahyrynda bolsa durnukly elementde gutarýar. Elementleriň şeýle zynjyryna radioaktiw elementleriň maşgalasy diýilýär.

Häzirki wagtda dört sany radioaktiw maşgalanyň barlygy belli.

1. Uran – radiniň maşgalasy ${}^{238}_{92}U$-den başlanýar ($T = 4{,}5 \cdot 10^9$ ýyl) we durnukly ${}^{206}_{82}Pb$ gurşun izotopynda gutarýar.
2. Neptunlaryň maşgalasy: transuran elementi bolan neptuniden ${}^{237}_{93}Np$ başlanýar ($T = 2{,}2 \cdot 10^6$ ýyl) we wismutyň 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. Aktinileriň maşgalasy ${}^{235}_{92}AcU$-aktini urandan başlanýar ($T = 7{,}1 \cdot 10^8$ ýyl) we ${}^{207}_{82}Pb$ gurşunyň izotopynda gutarýar.

4. Torileriň maşgalasy: $^{232}_{90}Th$ toriden başlap, ($T = 1,4 \cdot 10^{10}$ ýyl) $^{208}_{82}Pb$ gurşunyň izotopynda gutarýar.

1-nji tablisa

Uran-radiniň radioaktiw maşgalasynyň häsiýetnamalary

T/n	Element	Belgilenişi	Dargamanyň görnüşi	Ýarymdargama periody
1	Uran	$^{238}_{92}U$	α	$4,5 \cdot 10^9$ ýyl
2	Toriý	$^{234}_{90}Th$	β	24,1 gün
3	Protaktiniý	$^{234}_{91}Ra$	β	1,14 min
4	Uran	$^{234}_{92}U$	α	$2,7 \cdot 10^6$ ýyl
5	Toriý	$^{230}_{90}Th$	α	$8,2 \cdot 10^4$ ýyl
6	Radiý	$^{226}_{88}Ra$	α	1622 ýyl
7	Radon	$^{222}_{86}Rn$	α	3,8 gün
8	Poloniý	$^{218}_{84}Po$	α	3,05 min
9	Gurşun	$^{214}_{84}Pb$	β	26,8 gün
10	Wismut	$^{214}_{83}Bi$	β, α	19,7 min
11	Poloniý	$^{214}_{84}Po$	α	$1,5 \cdot 10^{-4}$ *s*
12	Talliý	$^{210}_{81}Tl$	β	1,32 min
13	Gurşun	$^{210}_{82}Pb$	β	22,2 ýyl
14	Wismut	$^{210}_{83}Bi$	β	4,97 gün
15	Poloniý	$^{210}_{84}Po$	α	139 gün
16	Gurşun	$^{206}_{82}Pb$	durnukly	∞

Ýokardaky tablisada uran-toriniň radioaktiw maşgalasynyň ähli agzalary ýerleşdirilen. (Enelik elementleriň aşagynda gyzlyk elementleri ýerleşdirilen) tablisada radioaktiw dargamanyň görnüşleri, ýarymdargama periodlary görkezilendir.

Şu tablisadan we süýşme düzgüninden peýdalanyp, ähli zynjyr boýunça şu maşgalada bolup geçýän radioaktiw öwrülmeleri häsiýetlendirmek bolar.

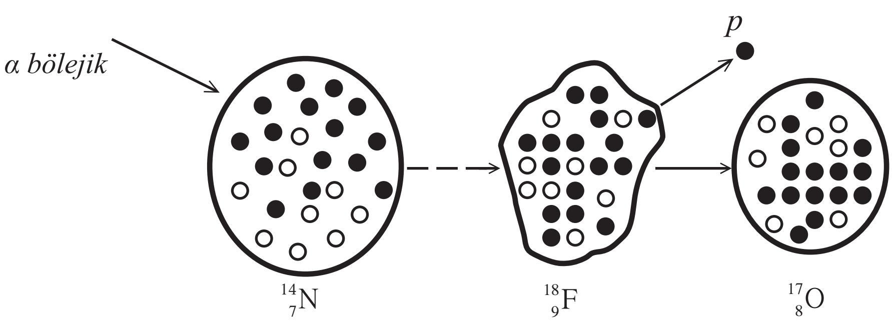
§ 16.7. Ýadro reaksiýalary. Emeli radioaktiwlik

Tebigy radioaktiwlik hadysasyny içgin öwrenmeklik radioaktiw dargamanyň netijesinde bir elementiň ýadrosynyň başga bir elementiň ýadrosyna öwrülmegi, atom ýadrosynyň içinde bolup geçýän prosesler bilen häsiýetlendirilýändigi doly anyklanyldy. Diýmek, emeli radioaktiwligi amala aşyrmak üçin, diňe elementiň ýadrosyna täsir edip, ony dargamaga mejbur etmeli. Bu meseläniň üstünde dünýäniň alymlary işläp başladylar.

Şeýle maksat bilen ilkinji etmeli ýadro reaksiýasy, ýagny azotyň atomynyň ýadrosyny kislorodyň izotopynyň ýadrosyna öwürmeklik 1919-njy ýylda iňlis alymy E. Rezerford tarapyndan amala aşyryldy. Reaksiýa azotdan doldurylan Wilsonyň kamerasynda geçirilýär. Ol azotyň ýadrosyny bombalamak üçin α – bölejikleri ulanýar. Azot şöhlelendirilenden soňra kamerada kislorod atomynyň izotopy we wodorodyň atomynyň ýadrosy, ýagny proton emele gelýär.

Bu reaksiýa şeýle tertipde geçýär.

α – bölejik azotyň atomynyň ýadrosyna ${}^{14}_{7}N$ degip ýuwdulýar, durnuksyz aralyk ýadro – ftor izotopynyň ýadrosy ${}^{18}_{9}F$ emele gelýär.



16.6-njy surat. Azotyň kisloroda öwrüliş reaksiýasy

Ol şol pursatda özünden bir proton goýberip, kislorodyň $^{17}_{8}O$ izotopynyň atomynyň ýadrosyna öwrülýär. Bu reaksiýany şeýle görnüşde ýazmak bolar:

$$^{14}_{7}N + ^{4}_{2}He \rightarrow ^{18}_{9}F \rightarrow ^{17}_{8}O + ^{1}_{1}H,$$

ýa-da

$$^{14}_{7}N + \alpha \rightarrow ^{18}_{9}F \rightarrow ^{17}_{8}O + p.$$

Reaksiýa netijesinde ilkinji gezek protonyň bardygy ýüze çykarylýar.

2-nji tablisa

Emeli-radioaktiw izotoplaryň häsiýetnamalary

T/n	Element	Belgilenişi	Dargamanyň görnüşi	Ýarymdargama periody
1	Uglerod	$^{14}_{6}C$	β^-	5720 ýyl
2	Azot	$^{13}_{7}N$	β^+	9,9 min
3	Kislorod	$^{15}_{8}O$	β^+	2,1 min
4	Natriý	$^{2}_{11}Na$	β^-, γ	2,6 ýyl
5	Fosfor	$^{32}_{15}P$	β^-	14,3 gün
6	Kükürt	$^{35}_{16}S$	β^-	87,1 gün
7	Kaliý	$^{42}_{19}K$	β^-, γ	12,4 sagat
8	Kalsiý	$^{45}_{20}Ca$	β^-	152 gün
9	Marganes	$^{56}_{25}Mn$	β^-, γ	26 sagat
10	Demir	$^{59}_{26}Fe$	β^-, γ	46,3 gün
11	Kobalt	$^{60}_{27}Co$	β^-, γ	5,3 ýyl
12	Sink	$^{65}_{30}Zn$	β^+, γ	250 gün
13	Myşýak	$^{76}_{33}As$	β^-, γ	26,8 sagat
14	Ýod	$^{31}_{53}J$	β^-, γ	8 gün

Tablisada biologiýada we oba hojalygynda has köp ulanylýan emeli-radioaktiw izotoplaryň birnäçesiniň häsiýetnamalary görkezilendir.

1932-nji ýylda iňlis fizigi D. Çedwik tarapyndan geçirilen, netijede, ilkinji gezek neýtronyň bardygy ýüze çykarylan ýadro reaksiýasyna seredeliň. Berilliý ýadrosy ${}_{4}^{9}\mathrm{Be}$ plastinkasy α – bölejik bilen bombalanynda plastinka α – bölejigi tutup alýar we özünden neýtron goýberip, uglerodyň ýadrosyna ${}_{6}^{12}\mathrm{C}$ öwrülýär:

$$ {}_{4}^{9}\mathrm{Be} + {}_{2}^{4}\alpha \rightarrow {}_{6}^{12}\mathrm{C} + {}_{0}^{1}n. $$

Berilliden çykan neýtron azotdan doldurylan Wilsonyň kamerasyna barýar we azotyň ýadrosyna ${}_{7}^{14}\mathrm{N}$ degip, boruň ýadrosyny ${}_{5}^{11}\mathrm{B}$ hem-de α – bölejigi emele getirýär:

$$ {}_{7}^{14}\mathrm{N} + {}_{0}^{1}n \rightarrow {}_{5}^{11}\mathrm{B} + {}_{2}^{4}\alpha. $$

Häzirki wagtda her bir himiki elementiň birnäçe izotoplarynyň bardygy ýüze çykaryldy. Olaryň umumy sany 2000-den-de gowrakdyr.

§ 16.8. Radioaktiw izotoplaryň ulanylyşy we radioaktiw şöhlelenmäniň biologik täsiri

Radioaktiw izotoplar ylymda, saglygy goraýyş sistemasynda we tehnikada γ – şöhleleriň oňaýly çeşmeleri bolup giňden ulanylýar. Esasan hem, radioaktiw kobalt ${}_{27}^{60}\mathrm{Co}$ 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 şöhlelendirileninde olaryň bellibir derejede hasyllylygynyň artýandygyny tejribeler görkezýär.

Radiasiýanyň ýeterlik derejedäki dozalary ösümliklerde we mikroorganizmlerde mutasiýa döredip, käbir ýagdaýlarda oňat täze häsiýetli sortlaryň ýüze çykmagyna getirýär. Şeýle ýol bilen bugdaýyň, noýbanyň, pagtanyň we beýleki ekinleriň gymmatly sortlary döredilýär, şeýle hem antibiotikleri ösdürmekde ulanylýan ýokary önümli organizmler alynýar. Radioaktiw izatoplaryň γ – şöhlelenmesi zyýanly mör-möjeklere garşy dürli çäreleri geçirmekde we iýmit önümlerini konserwirlemekde hem ulanylýar.

Şöhlelenmäniň biologiki täsiri. Radioaktiw maddalaryň şöhlelenmeleri ähli janly bedenlere juda güýçli täsir edýär. Hatda, doly siňdirilende jisimiň temperaturasyny bary ýogy 0,001 °C ýokarlandyrýan has gowşak şöhlelenme-de öýjükleriň ýaşaýşyny bozup biler. Sebäbi, janly öýjük aýry-aýry ýerlerine sähelçe zyýan ýetende-de kadaly ýaşap bilmeýän çylşyrymly mehanizmdir.

Janly organizmlere şöhlelenmäniň täsiri şöhlelenme dozasy bilen häsiýetlendirilýär. Ol şeýle formula bilen kesgitlenýär:

$$D = E / m,$$

bu ýerde D – şöhlelenmäniň siňdirilen dozasy, E – ionlaşdyryjy şöhlelenmäniň siňdirilen energiýasy, m – şöhlelendirilýän maddanyň massasy. Ölçeg birligi 1 $J/(1\ kg)$ = 1 greý (Gr). Şöhlelenme 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 1 $R \approx 0{,}01\ Gr$ deňdir.

Bulardan başga-da, şöhlelenmäniň *IS* birlikler sistemasynda ionlaşdyryjy şöhlelenmäniň effektiw we ekwiwalent dozasy görnükli radiobiolog R. M. Ziwertiň hormatyna (1979 ý.) kabul edilen. Hil koeffisiýenti (täsir ediş koeffisiýenti) 1,0 deň bolan ionlaşdyryjy şöhlelenmäniň birligi 1 Ziwert (Sv) = 1 Gr = 1 J/kg = 1 m^2/s^2.

Peýdalanylan edebiýatlar

1. *Gurbanguly Berdimuhamedow*. Garaşsyzlyga guwanmak, Watany, halky söýmek bagtdyr. Aşgabat. TDNG, 2007 ý.,143 sah.
2. *Gurbanguly Berdimuhamedow*. Türkmenistan sagdynlygyň we ruhubelentligiň ýurdy. TDNG, 2007 ý., 95sah.
3. *Gurbanguly Berdimuhamedow*. Türkmenistanyň ykdysady strategiýasy: halka daýanyp, halkyň hatyrasyna. Aşgabat. TDNG, 2010 ý., 112 sah.
4. Türkmenistanyň Ýaşulularynyň Maslahatynyň resminamalary. Türkmenistan gazeti №60 (25710) 2009-njy ýylyň 9-njy marty.
5. *Грабовский Р.И.* Курс физики. (учебное пособие для сельскохозяйственных институтов). М. Лань, 2007 г.
6. *Детлаф А.А., Яворский Б.М.* Курс физики. М. Высшая школа, 2001 г.
7. *Дмитриева В.Ф.* Курс физики. М. Высшая школа, 2005 г.
8. *Трофимова Т.И.* Курс физики. М. Высшая школа, 2003 г.
9. *Савельев С.П.* Курс общей физики. Т. 1–5. М. Астрель – 2007 г.
10. *Белановский А.С.* Основы биофизики в ветеринарии. М. ВО. Агропромиздат, 1989 г.
11. *Волькенштейн М.В.* Биофизика. М. Наука, 1988 г.
12. *Ремизов А.Н.* Медицинская и биологическая физика. М. Высшая школа, 1987 г.
13. *Бондарев Б.В., Спирин Г.Г.* Курс общей физики. М, 2005 г.
14. Кикоин А.К., Кикоин И.К. Молекулярная физика. М, 1976 г.
15. *Калашников С.Г.* Электричество. М, 1975 г.
16. *Волькенштейн В.С.* Сборник задач по общему курсу физики. М, 2005 г.
17. *Çaryýew A.A.* Fizikanyň esasy kanunlary. Aşgabat. TDNG, 2004 ý.
18. *Allakow Ö., Gurbangeldiýew Ç.* Mehanika. Aşgabat. TDNG, 2006 ý.
19. *Nurgeldiýew A., Bekmyradow Ö., Akmyradow B.* Molekulýar fizika we termodinamika. Aşgabat. TDNG, 2006 ý.
20. *Gurbanmuhammedow A.* Elektrik we magnit hadysalary. Aşgabat. TDNG, 2006 ý.
21. *Awliýakulyýew J., Baratow Ý., Ataýew G., Çaryýew A.* Optika. Aşgabat. TDNG, 2009 ý.
22. *Ataýew A.* Atom we ýadro fizikasy. Aşgabat. TDNG, 2006 ý.
23. *Awliýakulyýew J., Ataýew G.* Kwant fizikasy. Aşgabat. TDNG, 2008 ý.
24. *Gurbangeldiýew G., Allakow Ö., Toýlyýew G., Jumagulyýew R.* Fizikadan düşündirişli sözlük. Aşgabat. TDNG, 2005 ý.

Mazmuny